

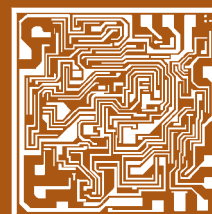
ISSN 0544-1269

Том 53, Номер 5

Сентябрь–Октябрь 2024



МИКРОЭЛЕКТРОНИКА



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Том 53, номер 5, 2024

ДИАГНОСТИКА

Исследования в условиях плазмы электронного циклотронного резонанса с применением резонанса на второй гармонике циклотронной частоты

А. В. Ковальчук, С. Ю. Шаповал

355

КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Нанопотонный светодиод на квантовых точках с ферстеровской связью

А. В. Цуканов, И. Ю. Катеев

362

ЛИТОГРАФИЯ

Новая концепция развития высокопроизводительной рентгеновской литографии

Н. И. Чхало

375

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Механизмы транспорта и полевой эмиссии электронов в 2D некристаллических углеродных гетероструктурах с квантовым барьером

Г. Я. Красников, В. П. Бокарев, Г. С. Теплов, Р. К. Яфаров

389

Математическое моделирование системы жидкостного охлаждения микропроцессора

А. И. Андреев, А. Е. Семенов

397

Согласование параметров термоэлектрической системы охлаждения теплонагруженных элементов электроники

Е. Н. Васильев

407

Исследование способов синтеза схем встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов с применением равномерных делимых кодов

Д. В. Ефанова, Е. И. Елина

413

НЕЙРОМОРФНЫЕ СИСТЕМЫ

Разработка аппарата образного представления информации для нейроморфных устройств

Н. А. Симонов

427

ПРИБОРЫ

Температурные зависимости напряжения пробоя высоковольтного КНИ LDMOS транзистора

А. С. Новоселов, М. Р. Гусев, Н. В. Масальский

439

ТЕХНОЛОГИИ

Получение графена: осаждение и отжиг

Е. Г. Шустин

448

Contents

No 5, 2024

DIAGNOSTICS

Electron cyclotron resonance plasma studies using second cyclotron harmonic resonance

A. V. Kovalchuk, S. Y. Shapoval

355

QUANTUM TECHNOLOGIES

Nanophotonic beam-splitter based on quantum dots with Förster coupling

A. V. Tsukanov, I. Yu. Kateev

362

LITHOGRAPHY

New concept for the development of high-performance X-ray lithography

N. I. Chkhalo

375

MODELING

Electron transport and field electron emission mechanisms in 2d noncrystalline hetero structures with quantum barrier

G. Ya. Krasnikov, V. P. Bokarev, G. S. Teplov, R. K. Yafarov

389

Mathematical modeling of a microprocessor liquid cooling system

A. I. Andreev, A. E. Semenov

397

Parameters matching of the thermoelectric system parameters for cooling heat-loaded electronics elements

E. N. Vasil'ev

407

Investigation of ways to synthesize concurrent error-detection circuits based on Boolean signals correction using uniform separable codes

D. V. Efanova, Y. I. Yelina

413

NEUROMORPHIC SYSTEMS

Development of an imagery representation apparatus for information representation in neuromorphic devices

N. A. Simonov

427

APPLICATIONS

Temperature dependences of the breakdown voltage of a high-voltage LDMOS transistor

A. S. Novoselov, M. R. Gusev, N. V. Masalsky

439

TECHNOLOGIES

Producing of graphene: deposition and annealing

E. G. Shustin

448

ИССЛЕДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕЗОНАНСА НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ЦИКЛОТРОННОЙ ЧАСТОТЫ

© 2024 г. А. В. Ковальчук^{1,*}, С. Ю. Шаповал^{1,**}

¹ Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов

Российской академии наук, г. Черноголовка

*E-mail: anatoly-fizmat@mail.ru

**E-mail: shapoval@iptm.ru

Поступила в редакцию 22 апреля 2024 г.

После доработки 10 июня 2024 г.

Принята к публикации 10 июня 2024 г.

СВЧ плазма (частота генерации 2.45 ГГц, мощность 200–1000 Вт, давление 0.2–10 мТорр) возбуждалась и поддерживалась в двух основных режимах: (1) при непрерывной подаче СВЧ мощности и низких магнитных полях ($B = 300\text{--}450$ Гс) в условиях сверхплотной ($N_e > N_{cr} = 7.4 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$) плазмы и низкой плотности плазмы ($N_e < N_{cr}$); (2) при высоких магнитных полях ($B = 750\text{--}1000$ Гс), близких к ЭЦР-условию. Исследовались особенности генерации плазмы при условии ЭЦР и при условии резонанса на второй циклотронной гармонике.

Ключевые слова: СВЧ-излучение, ЭЦР-плазма, вторая циклотронная гармоника, КВЧ интерферометрия, плазменный зонд

DOI: 10.31857/S0544126924050013

1. ВВЕДЕНИЕ

СВЧ плазма в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) находит широкое применение в науке и технологии [1, 2]. Особый интерес представляют технологические операции в области микроэлектроники, проведенные с использованием ЭЦР плазмы. Например, внедрение водорода в кремниевые приборы способно сильно модифицировать свойства полупроводниковых структур, в частности увеличить их стойкость к радиационному воздействию [3], или формирование пассивирующего покрытия методом ECR-PECVD оптимизирует характеристики GaN HEMT транзисторов [4]. Это в основном связано с высокой плотностью плазмы $10^{11}\text{--}10^{12} \text{ см}^{-3}$, возбуждаемой при СВЧ мощности 100–200 Вт и низком рабочем давлении 0.2–10 мТорр. Высокая плотность плазмы обуславливается высоким уровнем поглощения СВЧ мощности при ЭЦР-условиях и удержанием плазмы магнитным полем. Типичные магнитные поля в коммерческих реакторах 900–1200 Гс. Для создания таких магнитных полей в резонаторах диаметром 20–25 см требуются две или три больших и мощных магнитных катушек.

Ряд применений требует использование СВЧ плазмы в условиях не только ЭЦР, но и резонанса на второй циклотронной гармонике [5, 6] и импульсной подаче СВЧ мощности [7].

В то же время СВЧ плазма, с плотностями близкими к плотности плазмы при условии ЭЦР, может возбуждаться на ТЕ и ТМ фундаментальных модах при давлениях 0.2–10 мТорр и при магнитных полях $B = 400\text{--}600$ Гс, вдвое меньших поля B_r для условия ЭЦР [8, 9]. Существует практический интерес изучить условия, при которых сверхплотная ($N_e > N_{cr} = 7.4 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$) СВЧ плазма может быть возбуждена при низких магнитных полях $B = 100\text{--}400$ Гс. При $B < B_r/2$ минимизируется неоднородность плотности плазмы по сечению реакционной зоны. Такие СВЧ плазменные источники не требуют громоздких магнитных катушек и могут быть использованы в различных вариантах плазменной технологии.

В настоящей работе мы обсуждаем характеристики СВЧ плазмы, поддерживаемой в условиях ЭЦР и поддерживаемой в нерезонансных объемах при полях $B = 100\text{--}1000$ Гс.

После отработки стационарных режимов, СВЧ плазма применялась для осаждения слоев GaN

и $H_xSi_yN_zH_y$ (молекулярная формула для нитрида кремния введена в публикации [10]).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Концентрацию электронного газа в объеме СВЧ плазмы мы измеряли путем обработки данных КВЧ (крайне высокие частоты радиоволн, англ. EHF extremely-high frequency) интерферометрии. Объем с плазмой СВЧ играл роль активного тела в КВЧ интерферометре. Для этой цели пучок радиоволн с длиной волны (1–10) мм проходил по диаметру плазменного столба. Кварцевые окна использовались для входа и выхода пучка радиоволн. Опорный пучок радиоволн, посредством отражения от зеркал, проходил по волноводу вокруг половины реактора.

Плазменный зонд Ленгмюра применялся для измерения ионного тока насыщения J_{ion} .

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Излучаемая СВЧ мощность на частоте $f = 2.45$ ГГц стабильно поддерживалась генератором в интервале $P_f = 50$ –1000 Вт. Поток СВЧ-энергии поступал в объем источника (диаметр 15 см, длина

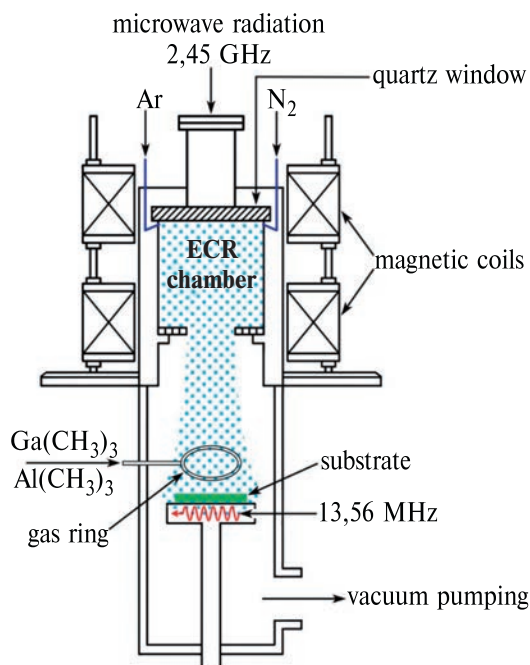


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с генерацией плазменного разряда в условиях ЭЦР: $f = 2.45$ ГГц, $B_r = 875$ Гс. Для управления энергией положительно заряженных ионов к держателю подложки (Si, GaAs или Al_2O_3 пластина) прикладывается ВЧ-напряжение с управляемой амплитудой.

Газовое кольцо используется для организации однородного распределения по поверхности сапфировой подложки потока молекул триметилгаллия и триметилалюминия в процессе эпитаксиального осаждения слоев GaN и $Al_xGa_{1-x}N$.

16 см) через СВЧ тракт на основе волноводов с прямоугольным профилем.

Вдали от области ЭЦР и стенок камеры, в плазме $\{e, N_2^+\}$ энергия электронов $kT_e \approx 5\text{ эВ}$. В любом направлении поток электронов в ≈ 1000 раз превышает поток ионов. Это обусловлено отношением масс ($M_i/m_e \approx 51000$) и отношением температур ($T_e/T_i \approx 20$) электронной и ионной компонент нейтральной плазмы. Изолированная подложка, помещенная в область плазмы, получит отрицательный заряд, необходимый для выравнивания потоков электронов и ионов на ее поверхность. Относительно нейтральной плазмы подложка зарядится отрицательным потенциалом. Такой потенциал в физике плазмы называется плавающим потенциалом V_{flo} . В плазме $\{e, N_2^+\}$ величина $V_{flo} \approx -5.155kT_e/e \approx -26\text{ В}$ [11].

Физическая картина модифицируется, если на подложку относительно стенок камеры подать ВЧ-напряжение, как это показано на рис. 1. Под действием импульса силы от ВЧ-поля смещение облака электронного газа в M_i/m_e раз превышает смещение массива ионов. В каждом периоде колебаний плазмы подложка “окунается в электронное облако”. Вблизи поверхности подложки произойдет поляризация плазмы. В результате такой поляризации слой отрицательного заряда сместится на поверхность подложки, а слой с положительным зарядом будет распределен на некотором расстоянии от ее поверхности. Относительно нейтральной плазмы подложка получает отрицательный потенциал U_b , величина которого зависит от амплитуды ВЧ-напряжения. Положительные ионы в потоке частиц, атакующих поверхность подложки, на прохождении области поляризации плазмы, приобретают энергию равную eU_b . Более детальное описание выпрямляющего действия приэлектродной плазмы на ВЧ поле изложено в книге Ю. П. Райзера [12].

Ввиду высокой степени ионизации (0.001–0.3) в условиях ЭЦР-плазмы обеспечиваются достаточные потоки активных частиц для нанесения на подложку слоев покрытий [13] при давлениях в камере $(0.1\text{--}10) \times 10^{-3}$ Торр.

3. ФОРМИРОВАНИЕ СВЕРХПЛОТНОЙ И РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ НИЖЕ УСЛОВИЯ ЭЦР

До настоящего времени ведутся работы [14–17], целью которых является оптимизация параметров СВЧ плазмы и создание компактных источников плазменных ионов [18, 19]. Чтобы возбудить СВЧ плазму при низком давлении (< 100 мТорр) в магнитных полях существенно ниже ЭЦР-условия требуется подача высокой мощности СВЧ-накачки до нескольких кВт [20]. Нам удалось обойти это условие разработкой специальной методики возбуждения плазменного разряда при мощностях накачки 300–500 Вт и магнитных полях 0–700 Гс. Плазменный разряд может поддерживаться в двух модах: сверхплотная плазма ($N_e > N_{cr}$)

и разреженная плазма ($N_e < N_{cr}$), где $N_{cr} = 7.4 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ — критическая плотность плазмы для частоты $f = 2.45 \text{ ГГц}$ [21]. Разреженная плазма может существовать при СВЧ мощности 200–1000 Вт в любых магнитных полях, даже при $B = 0$ и малом давлении, например при 0.2 мТорр. В таком случае СВЧ излучение проходит сквозь разреженную плазму, приводя к искажению вольт-амперных характеристик зонда Ленгмюра и нагреву подложкодержателя и, соответственно, подложки [21].

Переход от разреженной плазмы к сверхплотной возможен в том случае, когда поглощенной СВЧ мощности достаточно для возбуждения плазмы с плотностью более N_{cr} [21]. При давлениях менее 1 мТорр частота столкновений электронов с нейтральными частицами мала для обеспечения поглощения СВЧ мощности за счет столкновений. В этом случае для эффективного поглощения СВЧ мощности электронами используется электронный циклотронный резонанс право поляризованных СВЧ волн.

При магнитных полях ниже ЭЦР-условия, $B < B_r = 2\pi f m c / e = 875 \text{ Гс}$, и давлении в разряде 0.1–3 мТорр, переход от разреженной к сверхплотной плазме может быть осуществлен при магнитных полях $B = 435\text{--}440 \text{ Гс}$ около окна ввода СВЧ мощности. Этот переход сопровождается увеличением плотности плазмы N_e , тока насыщения ионного зонда и падением доли СВЧ мощности, проходящей сквозь плазму (P_{tr}). Отраженная мощность обычно тоже падает, но величина этого падения зависит от положения стержней тюнера. Такой переход наблюдался во всем интервале использованных в работе величин прямой СВЧ мощности P_f , отраженной мощности P_{ref} , давления в камере и настройке тюнера.

Магнитное поле перехода $B_{wp} = 435\text{--}440 \text{ Гс}$ соответствует половине магнитного поля циклотронного резонанса $B_r = 875 \text{ Гс}$ и не зависит от плотности плазмы, давления газов и СВЧ мощности. Переход происходит за счет увеличения поглощения СВЧ мощности в условиях резонанса второй циклотронной гармоники [5, 6]. На частоте $f = 2.45 \text{ ГГц}$ вторая гармоника $\omega_2 = 2\pi f / 2 = 7.70 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$. Магнитное поле $B_2 = 438 \text{ Гс}$, соответствующее резонансу второй гармоники, прекрасно совпадает с величиной переходного магнитного поля $B_{wp} = 435\text{--}440 \text{ Гс}$.

С целью генерации однородной плотности плазмы по сечению газового потока распределение магнитного поля было установлено так, как показано на рис. 2.

Подбором расстояния между катушками и величин токов через них величина магнитного поля на срезе окна энерговвода была установлена 925 Гс. ЭЦР условие $B_r = 875 \text{ Гс}$ обеспечивалось на отрезке не менее четверти длины волны СВЧ излучения. При таких условиях устойчиво генерируется однородная мода плазмы [22]. В ходе исследований определялась зависимость тока насыщения зонда от напряженности магнитного поля. При перестройке

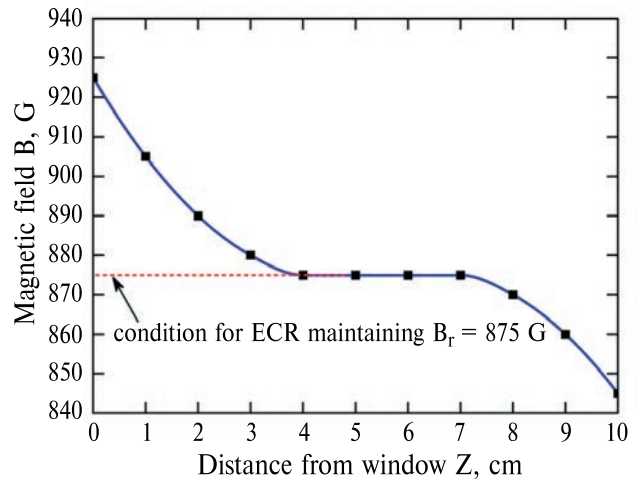


Рис. 2. Распределение магнитного поля на оси реактора в зависимости от расстояния до среза окна энерговвода. В экспериментах для обеспечения формирования однородной моды плазмы использовалась область $Z = [5, 6] \text{ см}$.

магнитного поля токи катушек изменялись пропорционально, чтобы сохранить неизменным относительное распределение напряженности поля в объеме плазмы. Величина отраженной СВЧ мощности поддерживалась автоматическим тюнером на уровне 50 Вт.

Зависимость тока насыщения J_{ion} зонда Ленгмюра на оси камеры от напряженности магнитного поля показана на рис. 3 при давлении азота 1 мТорр и поглощаемой СВЧ мощности $P_{abs} = 450 \text{ Вт}$. При напря-

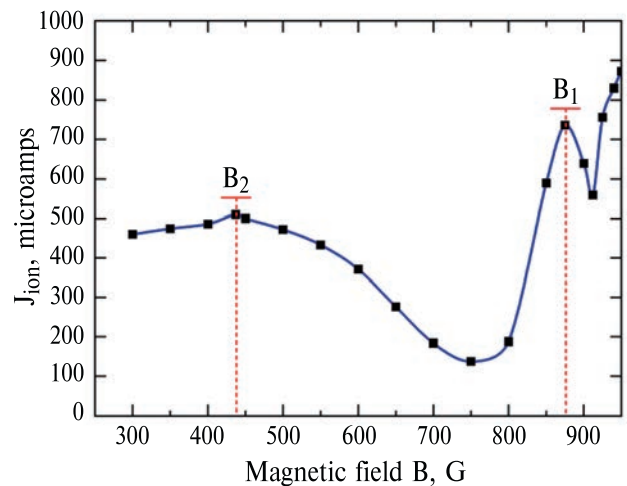


Рис. 3. Зависимость тока насыщения плазменного зонда от величины магнитного поля в интервале «полки» (см. рис. 2). $P_f = 500 \text{ Вт}$, $P_{ref} = 50 \text{ Вт}$, давление азота 1 мТорр. При перестройке магнитного поля для определения зависимости тока насыщения зонда от магнитного поля токи катушек изменялись пропорционально, чтобы сохранить распределение напряженности поля. Величина отраженной мощности P_{ref} поддерживалась автоматическим тюнером на уровне 50 Вт.

женностях магнитного поля $B_1 = B_r = 875$ Гс и $B_2 = B_r/2 \approx 438$ Гс ток J_{ion} проходит через максимумы. Величины этих максимумов зависят от давления газа и СВЧ мощности. Максимум при поле B_1 соответствует ЭЦР, а максимум при поле B_2 соответствует резонансу на второй циклотронной гармонике.

Уменьшение плотности плазмы при магнитном поле 500–800 Гс сопровождается увеличением протечки СВЧ излучения сквозь плазму, хотя отраженная мощность остается постоянной. Протечка СВЧ излучения сквозь плазму приводит к уменьшению поглощенной мощности P_{abs} и соответственному уменьшению плотности плазмы. Протечка СВЧ излучения сквозь плазму в этих условиях может быть объяснена следующим образом. Когда магнитное поле в области поглощения СВЧ энергии около окна энерговода приближается к ЭЦР-условию (875 Гс), толщина эванесцентной зоны около окна ($N_e > N_{cr}$) уменьшается, что позволяет некоторым порциям лево и право поляризованным волнам проходить сквозь эванесцентную зону и распространяться без поглощения [23, 24].

Зависимости тока насыщения зонда J_{ion} от поглощенной СВЧ мощности $P_{abs} = (P_f - P_{ref})$ показаны на рис. 4.

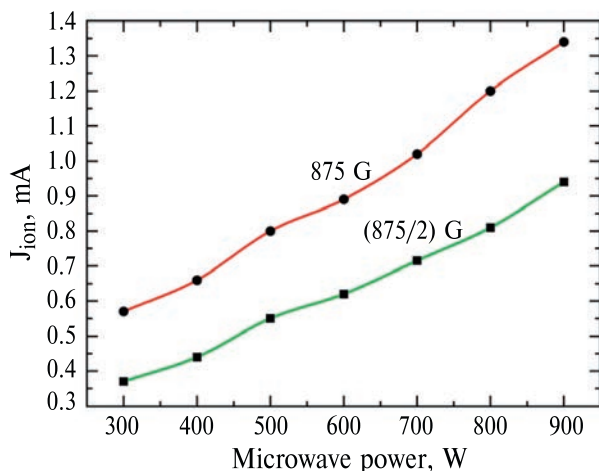


Рис. 4. Зависимости ионного тока насыщения зонда J_{ion} от поглощенной СВЧ мощности $P_{abs} = (P_f - P_{ref})$ в плазме N_2 . Давление азота $p = 1$ мТорр.

Можно заметить, что J_{ion} увеличивается практически линейно с ростом поглощенной мощности P_{abs} . Это означает, что в сверхплотной плазме СВЧ излучение не проходит сквозь плазму и вся энергия поглощается плазмой.

При магнитных полях $B < 800$ Гс сверхплотная СВЧ плазма может поддерживаться вплоть до давления $p_r = 0.7$ мТорр (рис. 5). При давлении ниже p_r плотность плазмы резко уменьшается и при давлении 0.2 мТорр (p_{ev}) плазма гаснет. Это сопровождается прохождением СВЧ излучения в объем плазмохимической установки.

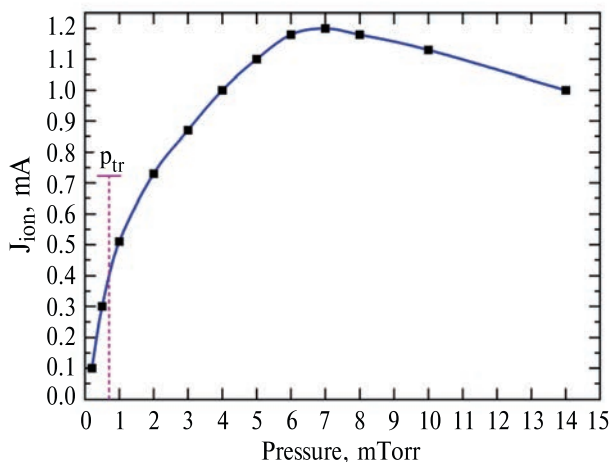


Рис. 5. Зависимость тока насыщения плазменного зонда J_{ion} от давления азота в реакторе. Падающая мощность $P_f = 500$ Вт. Отраженная мощность $P_{ref} = 50$ Вт. Магнитное поле на оси реактора $B = B_r/2 = 438$ Гс.

Переходное значение давления p_r вероятно связано с критической плотностью плазмы $N_{cr} = 7.4 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ для частоты 2.45 ГГц. Для иллюстрации на рис. 6 приведена зависимость плотности плазмы N_e от давления в реакторе. Измерения N_e проводились методом КВЧ интерферометрии [25]. Плотность $N_{cut-off}$ плазмы отсечки [23, 24, 26] для право поляризованных волн: $N_{cut-off} \cdot R = N_{cr}(1 - 1/B_r)$. Для лево поляризованных волн: $N_{cut-off} \cdot L = N_{cr}(1 + 1/B_r)$. При резонансном магнитном поле $B = B_r$ плотность плазмы отсечки $N_{cut-off} \cdot L$ достигает величины $2N_{cr} = 1.48 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$. При давлении 2 мТорр экспериментально измеряемая плотность плазмы достигает значения $N_{cut-off} = 2N_{cr}$ и далее продолжает увеличиваться с ростом давления вплоть до 7 мТорр, затем начинает постепенно уменьшаться.

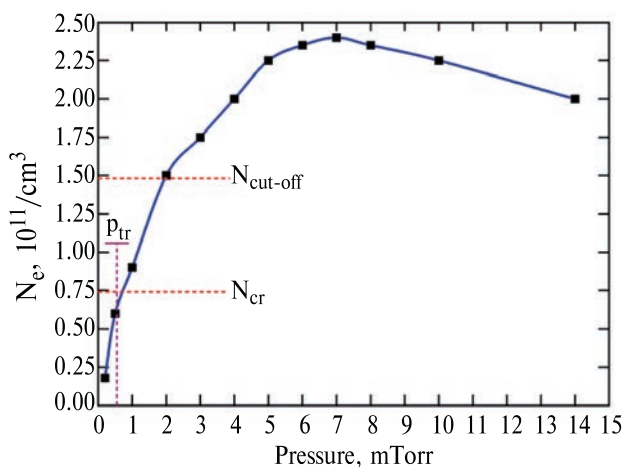


Рис. 6. Зависимость плотности плазмы от давления азота в реакторе. Падающая мощность $P_f = 500$ Вт. Отраженная мощность $P_{ref} = 50$ Вт. Магнитное поле на оси реактора $B = B_r = 875$ Гс. Концентрация электронного газа вычислялась из данных КВЧ интерферометрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ особенностей СВЧ плазмы при магнитных полях, напряженность которых ниже напряженности поля ($B_r = 875$ Гс) необходимого для условия ЭЦР и при магнитных полях, напряженность которых близка к ЭЦР условию.

Установлено, что в нерезонансном объеме при напряженностях магнитного поля ниже условия ЭЦР могут возбуждаться и поддерживаться два вида плазмы: низкой плотности ($N_e < N_{cr}$), сопровождающейся протечками СВЧ излучения сквозь разряд, и сверхплотной ($N_e > N_{cr}$). Для давлений в реакторе $p > 1$ мТорр и СВЧ мощности $P_{abs} > 200$ Вт сверхплотная плазма может поддерживаться при напряженностях магнитного поля около окна СВЧ ввода равных 75–800 Гс.

Переход от разреженной к сверхплотной плазме происходит при напряженностях магнитного поля около окна СВЧ ввода равных 430–440 Гс. Мы предполагаем, что этот переход связан с реализацией условия ($B = B_r/2 = 438$ Гс) резонанса на второй циклотронной гармонике.

Понимание процессов формирования плазмы при воздействии магнитного поля и СВЧ-излучения на газовую среду дает возможность организации стабильных, воспроизводимых технологических операций, удовлетворяющих требованиям микроэлектроники и других наукоемких областей технологии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИПТМ РАН № 075-00296-24-01.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Celona L., Gammino S., Ciavola G., Maimone F., Mascali D. Microwave to plasma coupling in electron cyclotron resonance and microwave ion sources (invited). *Rev. Sc. Instrum.*, 81 (2), 02A333 (2010). DOI: 10.1063/1.3265366
2. Shapoval S., Bulkin P., Chumakov A., Khudobin S., Maximov I., Mikhailov G. Compact ECR-source of ions and radicals for semiconductor surface treatment. *Vacuum*, 43 (3), 195 (1992). [https://doi.org/10.1016/0042-207X\(92\)90260-4](https://doi.org/10.1016/0042-207X(92)90260-4)
3. Polushkin E.A., Nefed'ev S.V., Koval'chuk A.V. et al. Hydrogen Plasma under Conditions of Electron-Cyclotron Resonance in Microelectronics Technology. *Russ Microelectron* 52, 195–197 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1063739723700373>
4. Shapoval S., Gurtovoi V., Kovalchuk A., Lester F.E., Vertjakhii A., Gaquiere C., Theron D. "Improvement of conductivity and breakdown characteristics of AlGaIn/GaN HEMT structures in passivation experiments", *Proc. SPIE 5023, 10th International Symposium on Nanostructures: Physics and Technology*, (11 June 2003). <https://doi.org/10.1117/12.511539>
5. Datlov J., Teichmann J., Zacek F. Regimes of plasma acceleration by inhomogenous high frequency and magnetostatic field in a cavity resonator. *Phys. Letters*, 17 (1), 30 (1965). [https://doi.org/10.1016/0031-9163\(65\)90634-7](https://doi.org/10.1016/0031-9163(65)90634-7)
6. Celona L., Gammino S., Maimone F., Mascali D., Gambino N., Miracoli R., and Ciavola G. Observations of resonant modes formation in microwave generated magnetized plasmas. *Eur. Phys. J. D*, 61(1), 107 (2011). <https://doi.org/10.1140/-epjd/e2010-00244-y>
7. Skalyga V.A., Golubev S.V., Izotov I.V., Lapin R.L., Razin S.V., Sidorov A.V., and Shaposhnikov R. A. High-current pulsed ECR ion sources. *Prikl. Fiz.*, 1, 17 (2019). <https://applphys.orion-ir.ru/appl-19/19-1/PF-19-1-17.pdf>
8. Tulle P.A. Off-resonance microwave-created plasmas. *Plasma Phys.*, 15 (10), 971 (1973). DOI: 10.1088/0032-1028/15/10/003
9. Morito M., and Ken'ichi O. Ion extraction from microwave plasma excited by ordinary and extraordinary waves and applications to the sputtering deposition. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 9, 691 (1991). <https://doi.org/10.1116/1.577345>
10. Kovalchuk A., Beshkov G., Shapoval S. Dehydrogenation of Low-Temperature ECR-Plasma Silicon Nitride Films under Rapid Thermal Annealing. *J. Res. Phys.*, 31 (1), 37–46 (2007). https://www.researchgate.net/publication/277125029_Dehydrogenation_of_low-temperature_ECR-plasma_silicon_nitride_films_under_rapid_thermal_annealing
11. Райзер Ю.П. Физика газового разряда, Глава 8, § 5, пункт 5.3., 199 («Наука», Физматлит 1992) ISBN: 5-02-014615-3. <https://studizba.com/files/show/djvu/2107-1-rayzer-yu-p--fizika-gazovogo-razryada.html> (in Russian)
12. Райзер Ю.П. Физика газового разряда, Глава 15, § 4, пункт 4.3., 479 («Наука», Физматлит 1992) ISBN: 5-02-014615-3. <https://studizba.com/files/show/djvu/2107-1-rayzer-yu-p--fizika-gazovogo-razryada.html> (in Russian)
13. Shapoval S.Y., Petrashov V.T., Popov O.A., Yoder M.D., Maciel P.D., and Lok C.K.C. Electron cyclotron resonance plasma chemical vapor deposition of large area uniform silicon nitride films. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 9 (6), 3071 (1991). DOI: 10.1116/1.577175
14. Salahshoor M., Aslaninejad M. Resonance surface, microwave power absorption, and plasma density distribution in an electron cyclotron resonance ion source. *Phys. Rev. Accel. Beams*, 22 (4), 043402 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.043402
15. Roychowdhury P., Mishra L., Kewlani H., Gharat S. Hydrogen Plasma Characterization at Low Pressure in 2.45 GHz Electron Cyclotron Resonance Proton Ion Source. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 45 (4), 665 (2017). DOI: 10.1109/TPS.2017.2679758
16. Gallo C.S., Galata A., Mascali D., Torrissi G. A possible optimization of electron cyclotron resonance ion sources plasma chambers. 23th Int. Workshop on ECR Ion Sources, 67 (Catania, Italy, ECRIS 2018). <https://accelconf.web.cern.ch/ecris2018/papers/tub3.pdf>

17. Qian Y. Jin, Yu G. Liu, Yang Z., Qi Wu, Yao J. Zhai and Liang T. Sun. RF and Microwave Ion Sources Study at Institute of Modern Physics. *Plasma*, 4 (2), 332 (2021). <https://doi.org/10.3390/plasma4020022>
18. Mauro G.S., Torrisi G., Leonardi O., Pidatella A., Sorbello G., and Mascali D. Design and Analysis of Slotted Waveguide Antenna Radiating in a "Plasma-Shaped" Cavity of an ECR Ion Source. *MDPI Telecom*, 2 (1), 42 (2021). <https://doi.org/10.3390/telecom-2010004>
19. Tsybin O.Yu., Makarov S.B., Dyubo D.B., Kuleshov Yu.V., Goncharov P.S., Martynov V.V., Shunevich N.A. An electrically powered ion accelerator with contact ionization for perspective electrically powered thrusters. *St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics*, 13 (2), 99 (2020). <https://phymath.spbstu.ru/en/article/2020.48.08/>
20. Lax B., Allis W.P. and Brown S.C. The effect of magnetic field on the breakdown of gases at microwave frequencies. *J. Appl. Phys.*, 21, 1297 (1950). DOI: 10.1063/1.1699594
21. Popov O.A. Characteristics of electron cyclotron resonance plasma sources. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 7 (3), 894 (1989). <https://doi.org/10.1116/1.575816>
22. Shapoval S.Y., Petrashov V.T., Popov O.A., Yoder M.D.Jr., Maciel P.D., and Lok C.K.C. Electron cyclotron resonance plasma chemical vapor deposition of large area uniform silicon nitride films. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 9(6), 3071 (1991). <https://doi.org/10.1116/1.577175>
23. Ginzburg V.L. The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas 2nd ed. (Pergamon Press, Oxford, 1970) ISBN: 0080155693; Russian original: V. L. Ginzburg. The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas 2nd ed. (Nauka, Moscow, 1967). https://www.studmed.ru/ginzburg-vl-rasprostranenie-elektromagnitnyh-voln-v-plazme_729023ed3e1.html
24. Popov O.A., Shapoval S.Y. and Yoder M.D.Jr. 2.45 GHz microwave plasmas at magnetic fields below ECR. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 1 (1), 7 (1992). DOI: 10.1088/0963-0252/1/1/002
25. Popov O.A., Shapoval S.Y. and Yoder M.D., and Chumakov A.A. Electron cyclotron resonance plasma source for metalorganic chemical vapor deposition of silicon oxide films. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 12(2), 300 (1994). <https://doi.org/10.1116/1.578872>
26. Stix T.H. The Theory of Plasma Waves (McGraw-Hill, New York, 1962) ASIN: B0006AY0IW. <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uc1.b3754096&view=1up&seq=9>

ELECTRON CYCLOTRON RESONANCE PLASMA STUDIES USING THE SECOND CYCLOTRON HARMONIC RESONANCE

© 2024 A. V. Kovalchuk^{1,*}, S. Y. Shapoval^{1,**}

¹ Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials,
Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia

*E-mail: anatoly-fizmat@mail.ru

** E-mail: shapoval@iptm.ru

Microwave plasma (generation frequency 2.45 GHz, power 200–1000 W, pressure 0.2–10 mTorr) is excited and maintained in two main modes: (1) at continuous microwave power and low magnetic fields ($B = 300\text{--}450$ G) under a superdense ($N_e > N_{cr} = 7.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) plasma and low plasma density ($N_e < N_{cr}$); and (2) in high magnetic fields ($B = 750\text{--}1000$ G), close to the ECR condition. The peculiarities of plasma generation under the ECR condition and at the second harmonic of cyclotron resonance are studied.

Keywords: microwave radiation, ECR plasma, second cyclotron harmonic, plasma probe, EHF interferometry

REFERENCES

1. Celona L., Gammino S., Ciavola G., Maimone F., Mascali D. Microwave to plasma coupling in electron cyclotron resonance and microwave ion sources (invited) // *Rev. Sc. Instrum.* 2010. V. 81. No 2. P. 02A333. DOI: 10.1063/1.3265366
2. Shapoval S., Bulkin P., Chumakov A., Khudobin S., Maximov I., Mikhailov G. Compact ECR-source of ions and radicals for semiconductor surface treatment // *Vacuum*. 1992. V. 43. No 3. P. 195. [https://doi.org/10.1016/0042-207X\(92\)90260-4](https://doi.org/10.1016/0042-207X(92)90260-4)
3. Polushkin E.A., Nefed'ev S.V., Koval'chuk A.V., et al. Hydrogen Plasma under Conditions of Electron-Cyclotron Resonance in Microelectronics Technology // *Russian Microelectronics*. 2023. V. 52. P. 195–197. <https://doi.org/10.1134/S1063739723700373>
4. Shapoval S., Gurtovoi V., Kovalchuk A., Lester Fuess Eastman, Vertjachih A., Christophe Gaquiere, David Theron. Improvement of conductivity and breakdown characteristics of AlGaN/GaN HEMT structures in passivation experiments // *Proc. SPIE 5023*, 10th International Symposium on Nanostructures: Physics and Technology, 11 June 200. <https://doi.org/10.1117/12.511539>
5. Datlov J., Teichmann J., Zacek F. Regimes of plasma acceleration by inhomogenous high frequency and

- magnetostatic field in a cavity resonator // *Phys. Letters*. 1965. V. 17. No 1. P. 30.
[https://doi.org/10.1016/0031-9163\(65\)90634-7](https://doi.org/10.1016/0031-9163(65)90634-7)
6. Celona L., Gammino S., Maimone F., Mascali D., Gambino N., Miracoli R., and Ciavola G. Observations of resonant modes formation in microwave generated magnetized plasmas // *Eur. Phys. J. D*. 2011. V. 61. No 1. P. 107.
<https://doi.org/10.1140/epjd/e2010-00244-y>
 7. Skalyga V.A., Golubev S.V., Izotov I.V., Lapin R.L., Razin S.V., Sidorov A.V., and Shaposhnikov R.A. High-current pulsed ECR ion sources // *Prikl. Fiz.* 2019. V. 1. P. 17.
<https://applphys.orion-ir.ru/appl-19/19-1/PF-19-1-17.pdf>
 8. Tulle P.A. Off-resonance microwave-created plasmas // *Plasma Phys.* 1973. V. 15. No 10. P. 971.
 DOI: 10.1088/0032-1028/15/10/003
 9. Morito Matsuoka and Ken'ichi Ono. Ion extraction from microwave plasma excited by ordinary and extraordinary waves and applications to the sputtering deposition // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1991. V. 9. P. 691.
<https://doi.org/10.1116/1.577345>
 10. Kovalchuk A., Beshkov G., Shapoval S. Dehydrogenation of Low-Temperature ECR-Plasma Silicon Nitride Films under Rapid Thermal Annealing // *J. Res. Phys.* 2007. V. 31. No 1. P. 37-46, https://www.researchgate.net/publication/277125029_Dehydrogenation_of_low-temperature_ECR-plasma_silicon_nitride-films_under_rapid_thermal_annealing
 11. Raiser Y.P. Physics of gas discharge. Chapter 8, § 5. Item 5.3. P. 199. "Nauka", Fizmatlit, 1992, ISBN: 5-02-014615-3, <https://studizba.com/files/show/djvu/2107-1-rayzer-yu-p-fizika-gazovogo-razryada.html> (in Russian)
 12. Raiser Y.P. Physics of gas discharge. Chapter 15, § 4. Item 4.3. P. 479. "Nauka", Fizmatlit, 1992, ISBN: 5-02-014615-3, <https://studizba.com/files/show/djvu/2107-1-rayzer-yu-p-fizika-gazovogo-razryada.html> (in Russian)
 13. Shapoval S.Y., Petrashov V.T., Popov O.A., Yoder M.D. Jr., Maciel P.D., and Lok C.K.C. Electron cyclotron resonance plasma chemical vapor deposition of large area uniform silicon nitride films // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1991. V. 9. No 6. P. 3071.
 DOI: 10.1116/1.577175
 14. Salahshoor M., Aslaninejad M. Resonance surface, microwave power absorption, and plasma density distribution in an electron cyclotron resonance ion source // *Phys. Rev. Accel. Beams*. 2019. V. 22. No 4. P. 043402.
 DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.043402
 15. Pradip Roychowdhury, Love Mishra, Hitesh Kewlani, Surendra Gharat. Hydrogen Plasma Characterization at Low Pressure in 2.45 GHz Electron Cyclotron Resonance Proton Ion Source // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. V. 45. No 4. P. 665.
 DOI: 10.1109/TPS.2017.2679758
 16. Gallo C.S., Galata A., Mascali D., Torrissi G. A possible optimization of electron cyclotron resonance ion sources plasma chambers // 23th Int. Workshop on ECR Ion Sources. P. 67. Catania, Italy, ECRIS 2018, <https://accelconf.web.cern.ch/ecris2018/papers/tub3.pdf>
 17. Qian Y. Jin, Yu G. Liu, Yang Zhou, Qi Wu, Yao J. Zhai and Liang T. Sun. RF and Microwave Ion Sources Study at Institute of Modern Physics // *Plasma*. 2021. V. 4. No 2. P. 332.
<https://doi.org/10.3390/plasma4020022>
 18. Giorgio Sebastiano Mauro, Giuseppe Torrissi, Ornella Leonardi, Angelo Pidotella, Gino Sorbello, and David Mascali. Design and Analysis of Slotted Waveguide Antenna Radiating in a "Plasma-Shaped" Cavity of an ECR Ion Source // *MDPI Telecom*. 2021. V. 2. No 1. P. 42.
<https://doi.org/10.3390/telecom2010004>
 19. Tsybin O.Yu., Makarov S.B., Dyubo D.B., Kuleshov Yu.V., Goncharov P.S., Martynov V.V., Shunevich N.A. An electrically powered ion accelerator with contact ionization for perspective electrically powered thrusters // *St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics*. 2020. V. 13. No 2. P. 99,
<https://physmath.spbstu.ru/en/article/2020.48.08/>
 20. Lax B., Allis W.P., and Brown S.C. The effect of magnetic field on the breakdown of gases at microwave frequencies // *J. Appl. Phys.* 1950. V. 21. P. 1297.
 DOI: 10.1063/1.1699594
 21. Popov O.A. Characteristics of electron cyclotron resonance plasma sources // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1989. V. 7. No 3. P. 894.
<https://doi.org/10.1116/1.575816>
 22. Shapoval S.Y., Petrashov V.T., Popov O.A. Yoder M.D. Jr., Maciel P.D., and Lok C.K.C. Electron cyclotron resonance plasma chemical vapor deposition of large area uniform silicon nitride films // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1991. V. 9. No 6. P. 3071.
<https://doi.org/10.1116/1.577175>
 23. Ginzburg V.L. The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas (2nd edn). Pergamon Press, Oxford, 1970, ISBN: 0080155693; Russian original: V. L. Ginzburg. The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas (2nd edn). "Nauka", Moscow, 1967, https://www.studmed.ru/ginzburg-vl-rasprostranenie-elektromagnitnyh-voln-v-plazme_729023ed3e1.html
 24. Popov O.A., Shapoval S.Y. and Yoder M.D. Jr. 2.45 GHz microwave plasmas at magnetic fields below ECR // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1992. V. 1. No 1. P. 7. DOI: 10.1088/0963-0252/1/1/002
 25. Popov O.A., Shapoval S.Y. and Yoder M.D. Jr., and Chumakov A.A. Electron cyclotron resonance plasma source for metalorganic chemical vapor deposition of silicon oxide films // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1994. V. 12. No 2. P. 300, <https://doi.org/10.1116/1.578872>
 26. Stix T.H. The Theory of Plasma Waves // McGraw-Hill, New York, 1962, ASIN: B0006AY0IW, <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uc1.b3754096&view=1up&seq=9>

НАНОФОТОННЫЙ СВЕТОДЕЛИТЕЛЬ НА КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ С ФЕРСТЕРОВСКОЙ СВЯЗЬЮ

© 2024 г. А. В. Цуканов^{1,*}, И. Ю. Катеев^{1,**}

¹ НИЦ «Курчатовский институт» — ФТИАН им. К.А. Валиева

*E-mail: tsukanov@ftian.ru

**E-mail: ikateyev@mail.ru

Поступила в редакцию 13 мая 2024 г.

После доработки 10 июня 2024 г.

Принята к публикации 10 июня 2024 г.

В работе описывается схема квантового светоделителя, преобразующего состояние пространственного фотонного кубита на двух модах за счет обмена энергией между модами и квантовыми точками. Контролируя время взаимодействия, можно получить требуемую суперпозицию базисных однофотонных состояний кубита на выходе устройства. Кроме того, светоделитель позволяет генерировать запутанные двухфотонные NOON-состояния. Использование эффекта Ферстера для управления обменом энергией между КТ дает возможность увеличить межмодовое расстояние и подавить нежелательное прямое взаимодействие мод. В качестве примера был рассмотрен светоделитель на основе двумерного фотонного кристалла с температурной и структурной настройкой частот.

Ключевые слова: квантовая точка, светоделитель, эффект Ферстера, фотонный кристалл, волновод

DOI: 10.31857/S0544126924050023

1. ВВЕДЕНИЕ

Успешное развитие квантовых оптических технологий, появившихся на рубеже XX — XXI вв., охватывает такие сферы человеческой деятельности, как физика, медицина, метрология, информатика и др. Они находят широкое применение в самых разных областях науки и техники [1]. Миниатюризация и рост качества изготовления позволяют интегрировать их отдельные компоненты в уже существующие полупроводниковые устройства и платформы, созданные на базе микроэлектроники [2–4]. Таким образом, разработка и дальнейшее совершенствование структурных элементов твердотельных нанопотонных сетей представляет собой важную практическую задачу. Отдельный аспект, требующий всестороннего исследования, связан с тем, что с уменьшением геометрических размеров возрастает влияние квантовых эффектов на работу сети. В первую очередь оно обусловлено взаимодействием одиночных фотонов или фотонных пар с квантовыми системами (атомами, молекулами, квантовыми точками, центрами окраски) [5, 6]. В частности, обмен квантом между оптической модой и двухуровневым атомом обуславливает нелинейные свойства данной системы [7]. Дополнительный фазовый сдвиг, приобретаемый фотонной парой при прохождении через нее, оказывается значительно больше, чем для классической

среды Керра [8]. Кроме того, квантовые объекты могут выступать в роли фазовращателей, повторителей и частотных модуляторов, преобразовывать фотоны в локальные атомные возбуждения или электрические сигналы, а также функционировать в качестве ячеек квантовой памяти.

В нашей работе мы рассмотрим светоделитель на основе структуры из квантовых точек (КТ), взаимодействующих с квантовыми полями мод микрорезонаторов (МР) или волноводов. Эти компоненты являются неотъемлемыми частями многих оптических схем, в том числе и тех, которые используются для выполнения квантовых операций на фотонных кубитах [9–11]. В классическом светоделителе совершается преобразование (преломление и отражение) падающей электромагнитной волны при прохождении ее через границу двух сред с разными значениями диэлектрической постоянной. Наша схема базируется на управляемом пространственном перемещении фотонов с помощью квантовой системы, взаимодействующей с волноводами. Данный принцип позволяет трансформировать одно- и двухфотонные состояния на входе в их заданные суперпозиции на выходе. В разделе 2 описывается процесс взаимодействия фотона с одной или двумя КТ, который обеспечивает произвольное вращение вектора состояния кубита для

больших отстроек частот КТ и мод. Раздел 3 посвящен алгоритму генерации запутанного двухфотонного NOON-состояния как для больших, так и для малых отстроек. Помимо схемы с одной КТ, также рассмотрены варианты с двумя КТ, в которых вторая КТ функционирует как дополнительный элемент частотного контроля. Кроме того, ферстеровская связь электронов КТ дает возможность опосредовать взаимодействие мод и увеличить расстояние между ними. В качестве волноводов мы предлагаем использовать оптическую структуру на основе двумерного фотонного кристалла (ФК), где волноводы формируются из отсутствующих рядов отверстий в брэгговской решетке. В разделе 4 с помощью численного решения уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области проведено моделирование спектральных характеристик таких волноводов и исследован температурный и структурный способы настройки их оптического спектра.

2. ПРИНЦИП ИНЖЕНЕРИИ ОДНОФОТОННЫХ СОСТОЯНИЙ С ПОМОЩЬЮ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В ВОЛНОВОДНОЙ СТРУКТУРЕ

Генерация однофотонных состояний кубитов в пространственной (двухрельсовой) кодировке, а также их преобразование с помощью светоделителей и фазовращателей, являются хорошо известными и отлаженными экспериментальными процедурами [12–16]. Роль логических состояний кубита здесь играют однофотонные состояния $|0\rangle = |1_1, 0_2\rangle$ и $|1\rangle = |0_1, 1_2\rangle$ пространственно-разделенных мод 1 и 2 МР или волноводов. В зависимости от того, насколько близки частоты электронных переходов КТ к частотам мод, можно выделить два способа, позволяющих осуществить преобразование однофотонных полей.

Рассмотрим схему квантового светоделителя с одной КТ и двумя модами волноводов (рис. 1а). КТ содержит один электрон и имеет два состояния, $|g\rangle$ и $|e\rangle$. В работе [17] мы описали алгоритм резонансного (быстрого) инвертирования кубита при прохождении фотона через такую систему. Ее вектор состояния представляется суперпозицией

$$|\Psi(t)\rangle = c_1(t)|g, 0_1, 1_2\rangle + c_2(t)|g, 1_1, 0_2\rangle + c_e(t)|e, 0_1, 0_2\rangle \quad (1)$$

Гамильтониан светоделителя имеет вид

$$H_{BS} = (\omega_{eg} - i\gamma)|e\rangle\langle e| + (\omega_1 - i\kappa_1)a^+ a_1 + (\omega_2 - i\kappa_2)a^+ a_2 + [\Omega_{R,1}a_1|e\rangle\langle g| + \Omega_{R,2}a_2|e\rangle\langle g| + H.c.]. \quad (2)$$

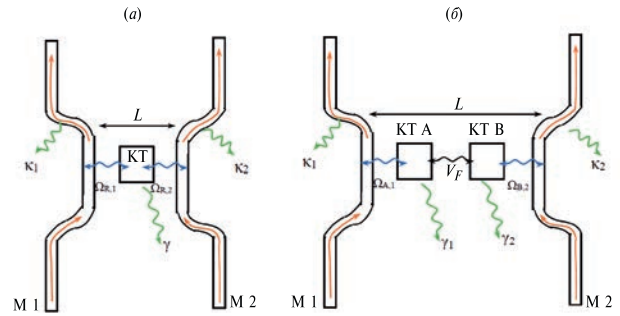


Рис. 1. Схемы квантового светоделителя, представляющего собой два оптических волновода, находящихся на расстоянии L друг от друга. Моды 1 и 2 волноводов взаимодействуют с одной КТ с частотами Раби $\Omega_{R,1}$ и $\Omega_{R,2}$ (а) или двумя КТ А и КТ В с частотами Раби $\Omega_{A,1}$ и $\Omega_{B,2}$ (б). Обмен энергией между КТ А и КТ В происходит за счет взаимодействия Ферстера со скоростью V_F . Диссипативные эффекты в системе определяются скоростями электронной релаксации КТ γ , γ_1 и γ_2 , а также скоростями фотонного распада мод 1 и 2 κ_1 и κ_2 .

Здесь ω_{eg} — частота электронного дипольного перехода между основным $|g\rangle$ и возбужденным $|e\rangle$ состояниями КТ, $\omega_{1(2)}$ — частота моды 1(2), $a_{1(2)}$ — оператор уничтожения фотона в моде 1(2), $\Omega_{R,1(2)}$ — частота Раби или скорость когерентного обмена квантом энергии между КТ и модой 1(2), γ — скорость электронной релаксации КТ, $\kappa_{1(2)}$ — скорость фотонного распада моды 1(2). Эволюция вектора состояния электрон-фотонной системы описывается уравнением Шредингера

$$-i \frac{\partial |\Psi(t)\rangle}{\partial t} = H_{BS} |\Psi(t)\rangle \quad (3)$$

с начальным состоянием $|\Psi(0)\rangle = c_1(0)|g, 0_1, 1_2\rangle + c_2(0)|g, 1_1, 0_2\rangle$.

Если отстройка (разность) частот моды 1(2) и КТ $\delta_{1(2)} = \omega_{1(2)} - \omega_{eg}$ заметно меньше, чем частота Раби, то есть $|\delta_{1(2)}| \ll \Omega_{R,1(2)}$, то тогда имеет место резонансный перенос фотона между модами в соответствии с атомной трехуровневой Λ -схемой. Точность воспроизведения операции зависит от отстройки частот мод $\delta\omega_{1,2} = \omega_1 - \omega_2$, разности частот Раби $\delta\Omega_R = \Omega_{R,1} - \Omega_{R,2}$, а также от скоростей диссипативных процессов. Для выполнения операции резонансного переноса с вероятностью, близкой к единице, необходимо соблюдение следующих условий: $|\delta\omega_{1,2}|, |\delta\Omega_R|, \gamma, \kappa_{1(2)} \ll \Omega_{R,1(2)}$. В этом случае заселенность возбужденного (промежуточного) состояния КТ достигает 0.5, а минимальное время переноса составляет $T = \pi/\Omega_R$. Однако резонансная схема позволяет выполнить лишь полную инверсию состояний кубита, когда КТ возвращается в исходное основное состояние. Чтобы осуществить произвольное вращение вектора состояния кубита, необходимо увеличить отстройки частот подсистем (см. ниже).

Отдельного рассмотрения требуют вопросы, связанные с прямым переносом энергии между модами посредством фотонного туннелирования, которое описывается гамильтонианом $H_J = J a_1^+ a_2 + \text{H.c.}$, где J – энергия туннелирования. Поскольку данный процесс не использует КТ в качестве посредника, то он и не поддается контролю извне. Чтобы исключить его влияние на контролируемый фотонный перенос путем минимизации J , необходимо увеличивать расстояние L между модами, что, однако, будет сопровождаться и уменьшением частот Раби КТ, которая расположена в середине пространственного интервала. Тем не менее, если условие $J \ll \Omega_{R,1(2)}$ выполняется, то сохраняется и трехуровневый тип осцилляций Раби. Если же J достаточно велико, то следует искать другие способы компенсировать данный эффект. Все они требуют привлечения дополнительных ресурсов. Например, анализируя графики зависимостей заселенностей от времени, полученные в ходе численного интегрирования уравнения Шредингера, можно определить моменты времени, для которых достигается желаемое конечное распределение фотонной плотности между модами с возвращением КТ в начальное (основное) состояние. Нарушая в один из этих моментов времени условие резонанса мод за время τ_s , мы блокируем процесс переноса, замораживая конечное состояние. После того, как фотон покинет узел, резонанс восстанавливается. Данная операция требует использования физического механизма, позволяющего быстро ($\tau_s \ll 1/J$) изменять частоту одной из мод для перехода в режим блокировки ($J \ll |\delta\omega_{1,2}|$) и выхода из него. Еще один способ подразумевает замену состояний однофотонного базиса (1) на их равновзвешенные суперпозиции $|\Psi_J^\pm\rangle = [|1, 0_2\rangle \pm |0, 1_2\rangle]/\sqrt{2}$, являющиеся собственными состояниями системы при конечном J . Это достигается за счет размещения на пути фотонов 50/50-светоделителя до и после узла.

Другой тип квантовой эволюции ассоциируется с выполнением условия $|\delta_{1(2)}| \gg \Omega_{R,1(2)}$, которое соответствует нерезонансному переносу кванта энергии между модами посредством переходов Рамана. Заселенность возбужденного состояния КТ здесь не превышает 0.01. В этом случае скорость переноса падает, но также снижается и вероятность электронной релаксации. В дальнейшем будем считать, что частоты мод вырождены, то есть $\delta\omega_{1,2} = 0$ и $\delta = \delta_1 = \delta_2$, а скорости диссипативных процессов равны нулю, $\kappa_1 = \kappa_2 = \gamma = 0$. Эффективная частота Раби для симметричной нерезонансной схемы составляет $\tilde{\Omega}_R = \Omega_R^2/|\delta| \ll \Omega_R$. Вектор состояния в любой момент времени представляется суперпозицией однофотонных базисных состояний, амплитуды вероятности которых плавно меняются. Это дает возможность осуществить произвольное преобразование (не только инвертирование) с высокой точностью.

Вернемся к вопросу, касающемуся подавлению прямой туннельной связи между модами путем их пространственного разделения. Чтобы сохранить высокие значения частот Раби для опосредованного взаимодействия мод через КТ, предлагается включить в схему светоделителя ферстеровский блок (рис. 16). Он может представлять собой структуру (цепочку) из N одноэлектронных КТ с близкими частотами перехода. Ее гамильтониан имеет вид

$$H_F = \sum_{k=1}^N \omega_{eg,k} |e_k\rangle\langle e_k| + \quad (4)$$

$$+ \sum_{k=1}^{N-1} V_{F,k} |e_k, g_{k+1}\rangle\langle e_{k+1}, g_k|$$

Расстояние между соседними КТ выбрано так, чтобы энергия Ферстера существенно превосходила разброс частот переходов, $|\omega_{eg,k} - \omega_{eg,k+1}| \ll V_{F,k}$, где k – номер КТ в цепочке. «Портовые» КТ А ($k=1$) и В ($k=N$), расположенные на краях цепочки, взаимодействуют с модами 1 и 2, соответственно. Поглощаемый в КТ А фотон из моды 1 производит коллективное электронное возбуждение [17–20], которое через КТ В трансформируется в фотон моды 2. Остальные КТ не взаимодействуют с полями мод. Их количество задается расстоянием L между модами и размерами КТ. Эффективность такого канала зависит от симметрии структуры и близости энергий Ферстера. Таким образом, полный гамильтониан в уравнении (2) представляет собой сумму гамильтонианов H_{BS} (без первого слагаемого), H_J и H_F .

Подобные структуры с одной и двумя КТ, осуществляющие инверсию контролируемого кубита в ходе выполнения операции CNOT, анализировались в работе [17]. В данной схеме фотоны контролирующего и контролируемого кубитов имели ортогональные поляризации и взаимодействовали с соответствующими электронными переходами в КТ. Состояние «единица» контролирующего кубита (нахождение фотона в ближайшем к КТ волноводе) трансформировалось в возбужденное электронное состояние КТ, после чего она уже не могла поглотить второй фотон контролируемого кубита, который проходил через узел без изменений. Если же контролирующий кубит находился в состоянии «ноль», то остающаяся в основном состоянии КТ способна реализовать перенос фотона между волноводами контролируемого кубита, а ее возбужденное состояние используется в качестве промежуточного. Как было установлено, резонансная схема обеспечивает быстрое инвертирование кубита за время, обратное частоте Раби. Однако произвольное вращение вектора состояния кубита оказывается невозможным, поскольку квант энергии полностью покидает КТ только в моменты времени, соответствующие инверсии.

Решение состоит в применении нерезонансной схемы, для которой амплитуды вероятностей состояний кубита удовлетворяют выражению

$$\begin{pmatrix} c_0(t) \\ c_1(t) \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} \cos(\tilde{\Omega}_R t) & i \sin(\tilde{\Omega}_R t) \\ i \sin(\tilde{\Omega}_R t) & \cos(\tilde{\Omega}_R t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_0(0) \\ c_1(0) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где эффективная частота Раби $\tilde{\Omega}_R$ определена выше, а $J = 0$. Точность выполнения данного уравнения увеличивается с ростом отстройки частот подсистем. При этом увеличивается и длительность операции. Таким образом, выбирая время взаимодействия мод кубита и КТ, можно получить заданное распределение энергии однофотонного поля между модами. Следовательно, квантовый светоделитель, в отличие от своего классического аналога, распределяющего входные световые потоки в строго фиксированной пропорции, способен генерировать произвольное однофотонное состояние мод на выходе. С точки зрения квантовой логики, устройство представляет собой вентиль $R_x(\theta)$, реализующий вращение вектора состояния кубита на угол $\theta = \tilde{\Omega}_R t$ в плоскости Y-Z. На рис. 2 показаны графики заселенностей $P_{0(1)} = |c_{0(1)}(t)|^2$ мод от времени для двух вариантов схемы — с одной активной КТ ($V_F = 0$) и с двумя КТ, обменивающимися энергией ($V_F \neq 0$). Как можно видеть, увеличение отстройки частот подсистем δ , как и энергии Ферстера V_F , сопровождается ростом периода двухуровневых осцилляций, а также сглаживанием быстрых осцилляций малой амплитуды, связанных с возбуждением КТ. При больших отстройках численное решение уравнения (3) полностью соответствует приближенному аналитическому решению (5).

3. ФОРМИРОВАНИЕ ЗАПУТАННЫХ ДВУХФОТОННЫХ NOON-СОСТОЯНИЙ С ПОМОЩЬЮ КВАНТОВОГО СВЕТОДЕЛИТЕЛЯ

Используя светоделитель, на вход которого подается состояние $|1_1, 1_2\rangle$, где в каждом из волноводов присутствует один фотон, можно получить их пространственно-запутанные состояния $|\Psi_{NOON}^\pm\rangle = [|2_1, 0_2\rangle \pm |0_1, 2_2\rangle]/\sqrt{2}$. Эти двухфотонные состояния относятся к так называемым NOON — состояниям, представляющим собой равновзвешенные суперпозиции двух компонент с N фотонами в одной из мод [21–23]. Здесь также рассматриваются два варианта, когда активным элементом светоделителя являются или одна КТ, или две КТ с ферстеровской связью. Вектор состояния электрон-фотонной системы, которая теперь содержит два кванта, представлен суперпозицией

$$\begin{aligned} |\Psi(t)\rangle = & c_{1,1}(t)|g_A, g_B, 1_1, 1_2\rangle + c_{2,0}(t)|g_A, g_B, 2_1, 0_2\rangle + \\ & + c_{0,2}(t)|g_A, g_B, 0_1, 2_2\rangle + \\ & + c_{A,01}(t)|e_A, g_B, 0_1, 1_2\rangle + c_{A,10}(t)|e_A, g_B, 1_1, 0_2\rangle + \\ & + c_{B,10}(t)|g_A, e_B, 1_1, 0_2\rangle + \\ & + c_{B,01}(t)|g_A, e_B, 0_1, 1_2\rangle + c_{AB}(t)|e_A, e_B, 0_1, 0_2\rangle \end{aligned} \quad (6)$$

с начальным состоянием $|\Psi(0)\rangle = |g_A, g_B, 1_1, 1_2\rangle$.

Приведем результаты моделирования для случая с одной КТ, взаимодействующей с каждой из мод, тогда как вторая КТ с модами не взаимодей-

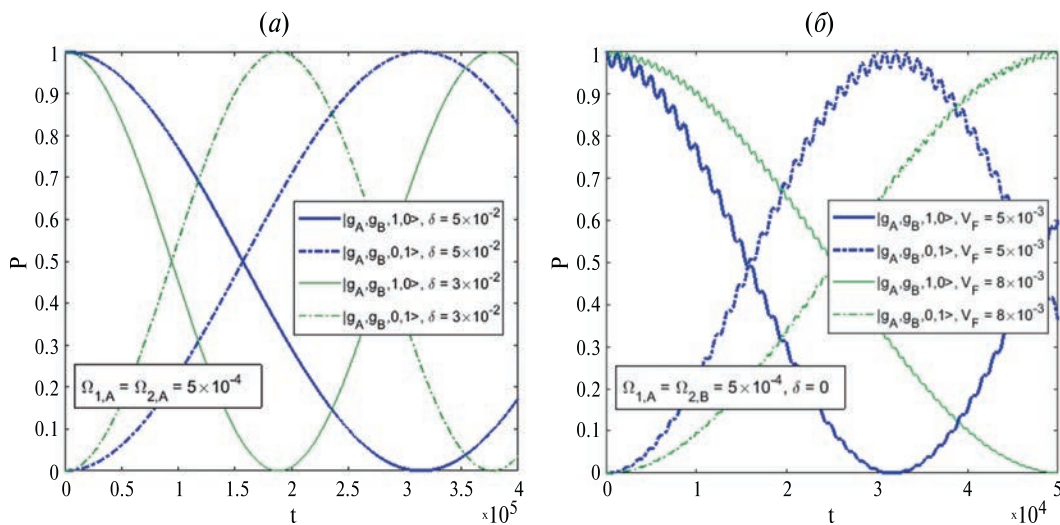


Рис. 2. Графики зависимостей заселенностей от времени для базисных состояний фотонного кубита в схемах с одной КТ (а) и с двумя КТ (б). Показаны результаты для двух близких значений отстроек и энергий Ферстера. Параметры даны в единицах частоты перехода в КТ.

ствуется, но может обмениваться энергией с первой КТ. Этот ферстеровский обмен приводит к расщеплению возбужденных состояний двух КТ в дублет $|\Psi_F^\pm\rangle = [|e_A, g_B\rangle \pm |g_A, e_B\rangle]/\sqrt{2}$, а их резонансные частоты смещаются на величину $\pm V_F$. Если V_F много меньше, чем частоты Раби (рис. 3а), то присутствие «темной» КТ практически не сказывается на резонансной эволюции электрон-фотонной системы для выбора отстройки $\delta = 0$. Однако при сильном взаимодействии двух КТ, когда $\Omega_{R,1(2)} \ll V_F$, это смещение частот необходимо учитывать. В данной схеме «темная» КТ, которая может быть расположена на определенном расстоянии от области взаимодействия мод и КТ А, функционирует как элемент внешнего управления светоделителем. Выбирая $\delta = \pm V_F$, мы настраиваем моды в резонанс с одним из переходов в КТ с участием дублетов и получаем квазирезонансную

динамику системы, модулированную секулярным процессом (рис. 3б). Отметим, что здесь наблюдается синхронное заселение четырех промежуточных состояний с одноэлектронным возбуждением одной из КТ. В обоих случаях вероятность получения запутанного двухфотонного состояния (первый максимум для кривой $|g_A, g_B, 2(0), 0(2)\rangle$ на рис. 3а и рис. 3б) близка к единице. При сохранении первоначального выбора отстроек с $\delta = 0$ система переходит в нерезонансный режим, когда в качестве промежуточного теперь фигурирует состояние $|e_A, e_B\rangle$ с двумя возбужденными электронами в двух КТ, см. рис. 3в. Заселенность ферстеровских дублетов крайне мала, а графики для остальных состояний демонстрируют «бахрому» из быстрых осцилляций малой амплитуды. Они вызваны слабым заселением дублетов и затухают с увеличением энергии Ферстера (то есть отстрой-

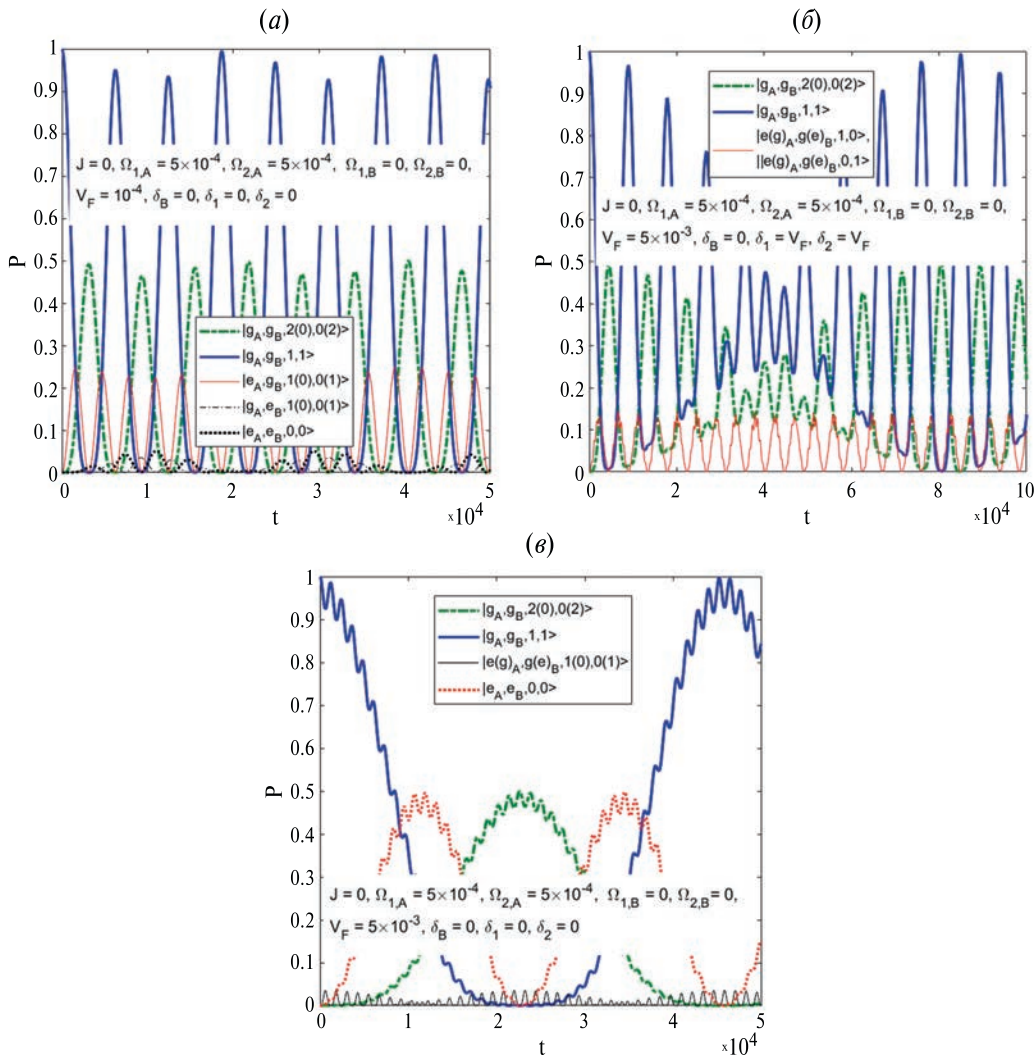


Рис. 3. Графики зависимостей заселенностей от времени электрон-фотонных состояний светоделителя с оптически активной КТ А и вспомогательной КТ В. Показаны результаты для резонансного режима при слабом (а) и сильном (б) взаимодействии Ферстера, а также для нерезонансного режима (в). Параметры даны в единицах частоты перехода в КТ.

ки). Как и следовало ожидать, времена выполнения операции запутывания в нерезонансном ($T \approx 2.5 \times 10^4$) и резонансном ($T \approx 0.25 \times 10^4$) случаях различаются на порядок.

Следующий вариант предполагает разделение самих мод, взаимодействие между которыми теперь определяется, наряду с локальной динамикой Раби, и ферстеровским процессом. Каждая КТ обменивается энергией только с одной модой (КТ А с модой 1, а КТ В – с модой 2). Как не сложно понять, вероятность фотонного переноса между модами будет зависеть от эффективности ферстеровской связи в КТ-структуре. Последнее подразумевает близость (в идеале – равенство) частот КТ, а также корректный выбор энергии V_F и отстроек частот мод и КТ. Если взаимодействие между КТ гораздо слабее, чем взаимодействие КТ и моды, то есть $V_F \ll \Omega_{R,1(2)}$, то динамика сводится в основном к рабиевскому локальному обмену энергией. Конечное состояние отвечает полному поглощению фотонов и возбуждению обеих КТ. Следовательно, такой выбор параметров отвечает независимой эволюции каждой пары «КТ + мода» и не может обеспечить их корреляцию. Напротив, ферстеровский обмен, быстрый по сравнению с рабиевским обменом для случая $V_F \gg \Omega_{R,1(2)}$, способствует генерации NOON-состояния в резонансной схеме для $\delta = \pm V_F$. На рис. 4 показан пример получения запутанного состояния при настройке частот мод в строгий резонанс с электронными переходами взаимодействующих КТ для $\Omega_{R,1(2)}/V_F = 0.1$. Время операции составляет

$T \approx 0.5 \times 10^4$. Сравнение с графиками заселенностей системы, представленными на рис. 3б и рис. 4, указывает на их практически полное совпадение, что говорит об эквивалентности оптических схем с одной или двумя КТ. Рост энергии взаимодействия Ферстера (расщепления дублета) увеличивает период и уменьшает амплитуду секулярных осцилляций, связанных с нерезонансным возбуждением второго уровня ферстеровского дублета. Поскольку задача состоит в быстром получении двухфотонного состояния определенного вида (равновзвешенной NOON-суперпозиции), то, в отличие от однофотонной схемы, здесь достаточно ограничиться резонансным случаем. Генерация произвольного поворота в базисе состояний $|2_1, 0_2\rangle$ и $|0_1, 2_2\rangle$ требует минимизации заселенностей всех промежуточных уровней системы и выбора другого начального состояния (например, одного из указанных базисных векторов).

4. ТЕМПЕРАТУРНАЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА ЧАСТОТЫ СВЕТОДЕЛИТЕЛЯ

В работе [17] была предложена схема квантового узла, выполняющего квантовую операцию CNOT на гибридном электрон-фотонном полупроводниковом (GaAs) чипе. Его составными элементами являются КТ, взаимодействующие с модами микродисковых резонаторов и оптических волноводов. С помощью компьютерного моделирования было исследовано оптическое взаимодействие мод двух волноводов и микродиска с волноводом и показано, что оптическое взаимодействие более тонких волноводов между собой сильнее, а присутствие волновода рядом с микродиском приводит к перераспределению электромагнитного поля между ними и к уменьшению излучательной добротности МР. В настоящее время технология изготовления подобного рода чипов, использующая электронную литографию с последующим травлением, достаточно хорошо развита (см, например, [24]). Поскольку волновод в этом случае представляет собой пластину с прямоугольным или круглым поперечным сечением, то величину поля снаружи волновода можно регулировать только путем изменения его поперечных размеров, что приводит к выходу КТ из резонанса с модой волновода. Поэтому в данной работе для светоделителя мы предлагаем использовать двумерный ФК, решетка которого образована вытравленными в GaAs-пластине (показатель преломления $n_c = 3.4$) отверстиями радиусом R и периодом a . В волноводе, который формируется отсутствующим рядом отверстий, пространственная зависимость амплитуды поля определяется в том числе количеством и геометрией отверстий. Волноводы на основе ФК являются перспективными для использования в различных устройствах нанопотоники, например, для создания оптической оперативной памяти с низким потреблением энергии [25, 26].

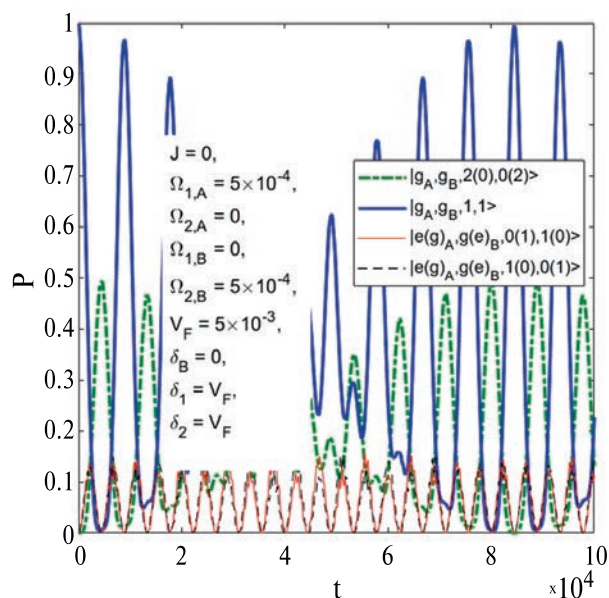


Рис. 4. Графики зависимостей заселенностей от времени электрон-фотонных состояний светоделителя для резонансного режима при сильном взаимодействии Ферстера КТ А и КТ В. Мода 1(2) обменивается энергией с КТ А(В). Параметры даны в единицах частоты перехода в КТ.

Кроме того, они могут применяться для исследования уникального явления — замедления фотонов, возникающего из-за малой групповой скорости света вблизи центра разрешенной зоны [27, 28].

Прежде всего, необходимо подобрать параметры решетки ФК R и a так, чтобы частота одной из мод волновода была близка к частоте электронного перехода между основным и возбужденным состояниями в зоне проводимости КТ. Для InAs/GaAs КТ с характерным размером 10 нм длина волны, соответствующая данной частоте, составляет $\lambda_c = 12$ мкм. С помощью численного решения уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области мы провели моделирование оптических характеристик двумерного ФК при различных значениях периода a решетки и радиуса R отверстий ФК (GaAs), где волновод формируется отсутствием одного ряда отверстий. На рис. 5а изображена зависимость усредненной по времени амплитуды электрического поля, рассчитанной в центре волновода, от длины волны λ фотона (спектр волновода) при $a = 3.3$ мкм, $R = 1.2$ мкм. Спектр имеет несколько пиков, соответствующих собственным модам волновода, где компонента магнитного поля, ортогональная поверхности кристалла, равна нулю (так называемые ТМ-моды). Число пучностей амплитуды поля вдоль оси распространения света для каждой моды различно. Видно, что длина волны одной из мод находится вблизи значения λ_c , поэтому КТ, расположенная в пучности электрического поля, будет обмениваться энергией именно с данной модой (далее — рабочей модой). Распределение электрического поля

рабочей моды изображено на рис. 5б. Для увеличения взаимодействия между оптической модой и КТ вместо волновода можно использовать интегральную оптическую структуру, состоящую из МР и волновода, которые расположены на единой ФК-пластине. Формирование МР происходит за счет введения дефекта (изменение геометрических параметров R и/или a) в область решетки ФК-волновода, где находится КТ [29].

Как показано в п. 3, для формирования запутанных двухфотонных NOON-состояний с помощью квантового светоделителя необходимо, чтобы КТ была настроена в строгий резонанс с модой волновода. Существуют различные способы контроля оптического спектра ФК, которые можно условно разделить на необратимые и обратимые (см. обзор [9]). К первым относятся изменение структуры решетки отверстий ФК [30], травление его поверхности иглой атомно-силового микроскопа [31] и нанесение на поверхность материалов с иным показателем преломления [32]. Наиболее популярными являются обратимые способы настройки спектра, например, за счет теплового воздействия на ФК нагревательных микроэлементов [33] или лазера [34]. В работе [23] продемонстрирована возможность температурной настройки оптического спектра треугольной и квадратной фотонных молекул, состоящих из четырех GaAs-микродисков, и вычислена зависимость частот собственных мод от температуры. Нагрев вызывает два явления: тепловое расширение микродиска и термооптический эффект,

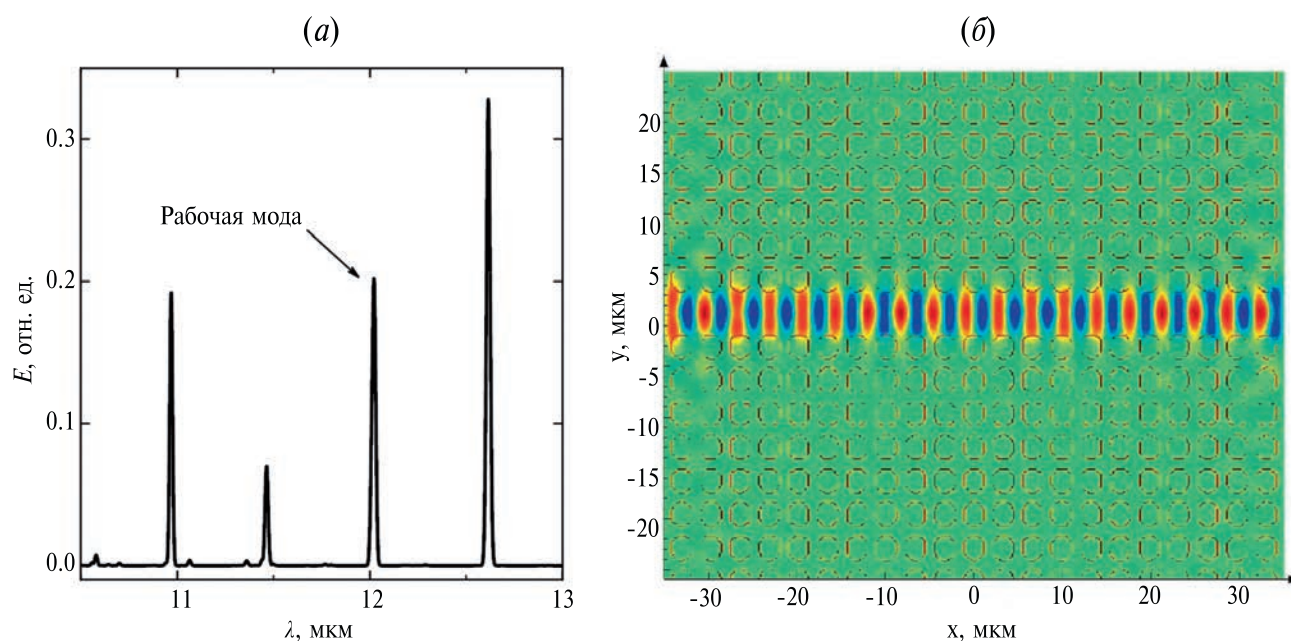


Рис. 5. Оптический спектр ТМ-мод волновода на основе линейного дефекта ФК при $a = 3.3$ мкм, $R = 1.2$ мкм (а) и двумерное распределение амплитуды электрического поля рабочей моды (б).

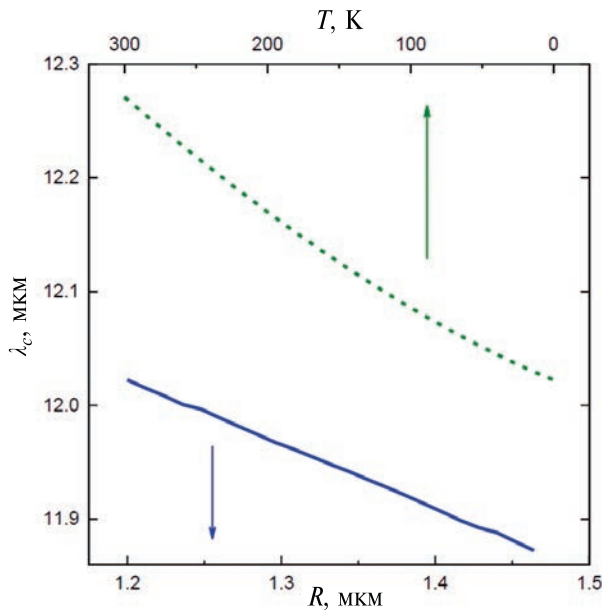


Рис. 6. График зависимости длины волны λ_c рабочей моды волновода на основе линейного дефекта ФК для $a = 3.3$ мкм от радиуса отверстий R при $T = 0$ ($n_c = 3.4$), сплошная линия, и от температуры T при $R = 1.2$ мкм, штриховая линия.

причем, как показали расчеты, выполненные в [23], вклад последнего в изменение спектральных характеристик системы является преобладающим. В данной работе мы рассмотрели два метода контроля спектра волновода, а именно: изменение радиуса R отверстий решетки при фиксированном значении ее периода a и нагрев

ФК, учитывая только термооптический эффект. Рост температуры на величину ΔT приводит к увеличению показателя преломления n_c материала ФК:

$$n_c = n_{c0} + \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T, \quad (7)$$

где $n_{c0} \equiv n_c(\Delta T = 0)$, а $\partial n / \partial T$ — термооптическая постоянная GaAs, которая в свою очередь также зависит от температуры T [35, 36]:

$$\frac{\partial n}{\partial T} = 1.47 \times 10^{-4} + 3.49 \times 10^{-7} T - 1.86 \times 10^{-10} T^2 (K^{-1}). \quad (8)$$

При уменьшении радиуса R отверстий ФК наблюдается монотонное увеличение длины волны λ_c рабочей моды, вызванное сдвигом зонной картины оптического спектра (рис. 6). К аналогичному результату приводит и увеличение температуры кристалла из-за роста показателя преломления. Это позволяет контролировать отстройку δ частот КТ и волновода и регулировать время преобразования однофотонных полей в светоделителе (см. п. 2).

Рассмотрим теперь два одинаковых волновода, образованных двумя рядами отсутствующих отверстий в решетке ФК, и исследуем их оптическое взаимодействие. Перескок фотонов между ними приводит к расщеплению спектральных пиков и образованию четной и нечетной мод $|\Psi_J^\pm\rangle$ с частотами ω_- и ω_+ , соответственно, с симметричным и антисимметричным распределением электри-

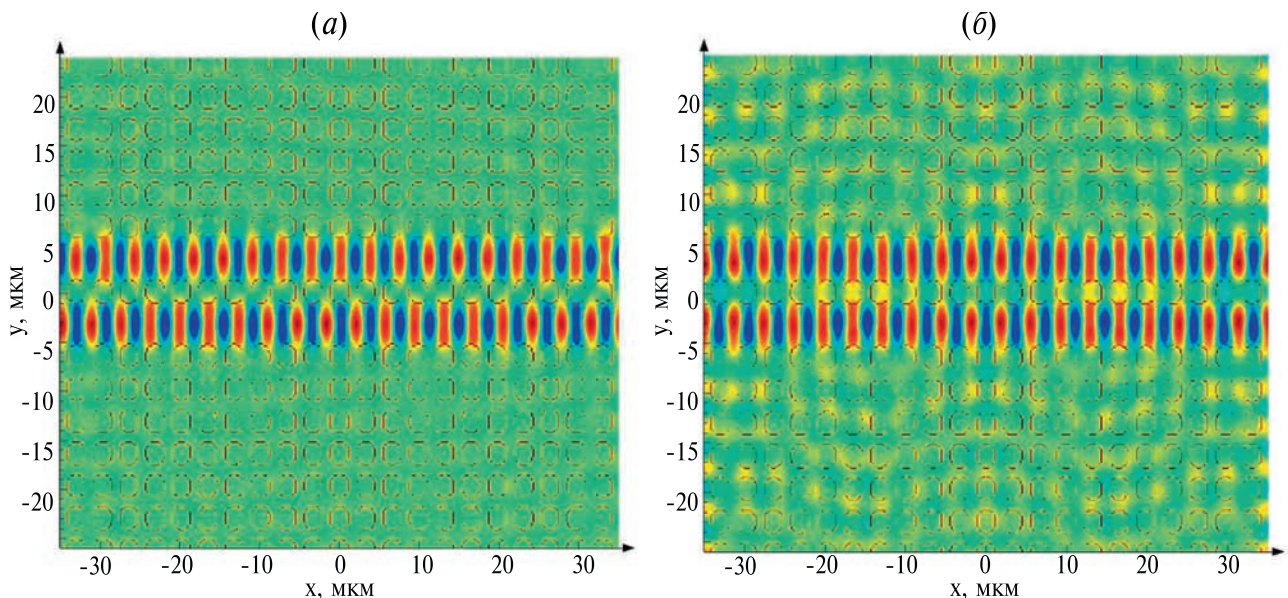


Рис. 7. Двумерное распределение амплитуды электрического поля нечетной (а) и четной (б) моды двух взаимодействующих волноводов на основе ФК при $a = 3.3$ мкм, $R = 1.2$ мкм.

ческого поля относительно линии, проходящей на одинаковом расстоянии между волноводами. В рамках подхода, аналогичного приближению сильной связи в физике твердого тела, коэффициент оптического взаимодействия J имеет вид [37]

$$J = \frac{\omega_- - \omega_+}{2}. \quad (9)$$

В случае, когда оптический барьер между волноводами с геометрическими параметрами решетки ФК $a = 3.3$ мкм, $R = 1.2$ мкм образует один ряд отверстий, пик рабочей моды расщепляется на два с длинами волн $\lambda_- = 11.998$ мкм (нечетная мода) и $\lambda_+ = 12.028$ мкм (четная мода), что соответствует значению $J = 0.131$ мэВ. Распределение амплитуды электрического поля для четной и нечетной мод представлено на рис. 7. Данная величина коэффициента оптического взаимодействия сопоставима как с частотой Раби Ω_R обмена квантом энергии между КТ и модой волновода, так и с энергией V_F ферстеровского обмена между КТ (см. п. 2 и 3), что уменьшает эффективность работы светоделиителя и генерации NOON-состояний из-за нежелательного прямого обмена фотонами между волноводами. Наиболее естественным способом подавления такого перескока фотонов служит усиление оптического барьера, например, путем увеличения расстояния L между волноводами за счет добавления дополнительных рядов отверстий, однако, как было отмечено выше,

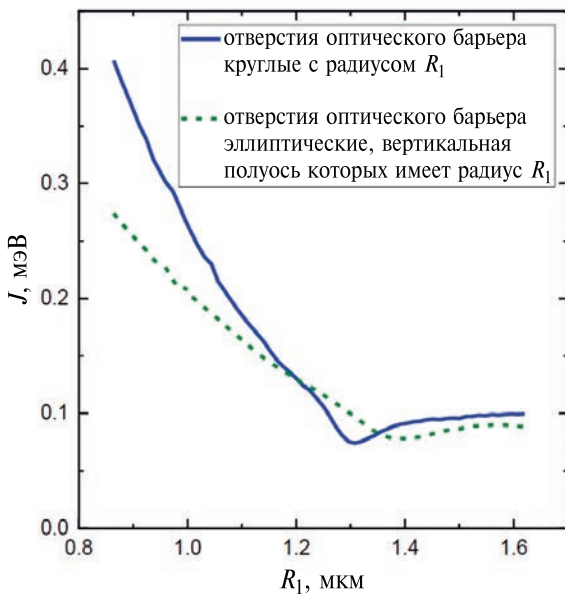


Рис. 8. Коэффициент оптического взаимодействия J двух волнопроводов на основе ФК для $a = 3.3$ мкм, $R = 1.2$ мкм для двух случаев: 1) отверстия оптического барьера имеют радиус R_1 (сплошная линия) и 2) отверстия оптического барьера эллиптические, вертикальная полуось которых имеет радиус R_1 (штриховая линия).

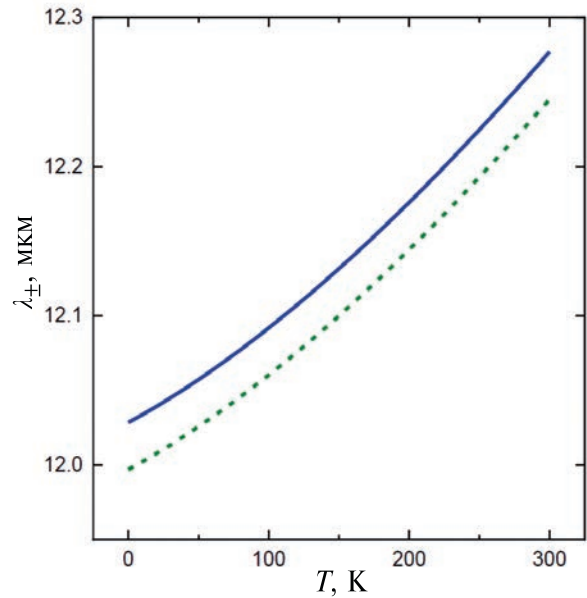


Рис. 9. График зависимости длин волн λ_+ и λ_- четной (сплошная линия) и нечетной (штриховая линия) мод двух взаимодействующих волнопроводов на основе ФК для $a = 3.3$ мкм, $R = 1.2$ мкм от температуры T .

это приведет к уменьшению частоты Раби Ω_R . Мы предлагаем контролировать фотонный перескок с помощью модификации геометрии отверстий оптического барьера сохраняя число их рядов (величину L) и зафиксировав остальные параметры решетки ФК. Сначала мы изучили влияние радиуса R_1 отверстий, образующих оптический барьер, на оптический спектр и величину J . Оказалось, что сначала рост радиуса отверстий барьера R_1 ведет к падению коэффициента оптического взаимодействия из-за усиления барьера, однако, при $R_1 \geq 1.3$ мкм величина J меняется незначительно (рис. 8). Отметим, что при этом уменьшаются длины волн λ_+ и λ_- четной и нечетной мод. Далее, мы заменили круглые отверстия оптического барьера на эллиптические, горизонтальная полуось которых имеет радиус $R = 1.2$ мкм, а вертикальная R_1 , и рассчитали спектр структуры и коэффициент оптического взаимодействия при различных значениях R_1 . Зависимость $J(R_1)$ в целом аналогично случаю, когда все отверстия оптического барьера круглые, однако здесь величина J меняется более плавно (рис. 8). Наконец, мы исследовали влияние температуры T на спектральные характеристики двух взаимодействующих волнопроводов. Расчеты показали, что нагрев ФК в диапазоне $0 \leq T \leq 300$ К одинаковым образом увеличивает длины волн λ_+ и λ_- четной и нечетной мод (рис. 9), практически не оказывая влияние на фотонный перескок между волноводами, поэтому подобный способ контроля величины J является неэффективным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках концепции квантового нанофотонного чипа предложена схема светоделителя на основе одной или нескольких КТ, взаимодействующих с модами оптических волноводов. Одно- и двухфотонные состояния волноводов, проходя через данный элемент, преобразуются когерентным образом в заданное конечное состояние (произвольную однофотонную или запутанную двухфотонную суперпозицию их мод). Такой подход к дизайну светоделителя, в отличие от классического аналога, делает его более гибким и многофункциональным инструментом для работы с фотонами, задействованными в выполнении квантовых алгоритмов. Варьируя частоты одноэлектронных КТ при помощи электрических затворов, подбирая материал, размеры и геометрию волноводов, можно эффективно управлять процессами фотонного обмена между модами волноводов и ферстеровской динамикой КТ. Как было установлено, для выполнения однофотонных преобразований следует работать в нерезонансном режиме, когда отстройки частот КТ и мод велики. Напротив, для получения двухфотонного NOON-состояния лучше всего подходит резонансный режим управления.

С помощью численного решения уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области проведено моделирование оптических характеристик двух взаимодействующих волноводов на основе двумерного GaAs-ФК, которые представляли собой два ряда отсутствующих отверстий в периодической решетке. Фотонный перескок между волноводами приводит к образованию четной и нечетной мод оптического спектра системы, частота которых, благодаря подобранным нами параметрам структуры, была близка к частоте электронного перехода между основным и возбужденным состояниями в зоне проводимости КТ. Было показано, что изменение температуры ФК позволяет осуществлять контроль частот мод и их настройку в резонанс с КТ, однако подобный способ контроля скорости фотонного перескока между волноводами является неэффективным. Продемонстрирована альтернативная возможность подавления фотонного перескока с помощью модификации геометрии отверстий оптического барьера, располагающихся между волноводами.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К. А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0016 «Фундаментальные и прикладные исследования в области разработки методов высокоточного моделирования и контроля элементной базы квантовых компьютеров».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moody G., Sorger V.J., Blumenthal D.J., Juodawlkis P.W., Loh W., Sorace-Agaskar C., Jones A.E., Balram K.C., Matthews J.C.F., Laing A., Davanco M., Chang L., Bowers J.E., Quack N., Galland C., Aharonovich I., Wolff M.A., Schuck C., Sinclair N., Lončar M., Komljenovic T., Weld D., Mookherjee S., Buckley S., Radulaski M., Reitzenstein S., Pingault B., Machielse B., Mukhopadhyay D., Akimov A., Zheltikov A., Agarwal G.S., Srinivasan K., Lu J., Tang H.X., Jiang W., McKenna T.P., Safavi-Naeini A.H., Steinhauer S., Elshaari A.W., Zwiller V., Davids P.S., Martinez N., Gehl M., Chiaverini J., Mehta K.K., Romero J., Lingaraju N.B., Weiner A.M., Peace D., Cernansky R., Lobino M., Diamanti E., Vidarte L.T., Camacho R.M. 2022 Roadmap on integrated quantum photonics // J. Phys. Photon. 2022. V. 4. P. 012501.
2. Adcock J.C., Bao J., Chi Y., Chen X., Bacco D., Gong Q., Oxenløwe L.K., Wang J., Ding Y. Advances in silicon quantum photonics // IEEE Journal Of Selected Topics of Quantum Electronics. 2020. V. 27. P. 1.
3. Dietrich C.P., Fiore A., Thompson M.G., Kamp M., Höfling S. GaAs integrated quantum photonics: Towards compact and multi-functional quantum photonic integrated circuits // Las. Photon. Rev. 2016. V. 10. P. 870.
4. Elshaari A.W., Pernice W., Srinivasan K., Benson O., Zwiller V. Hybrid integrated quantum photonic circuits // Nat. Photon. 2020. V. 14. P. 285.
5. Bogdanov S., Shalaginov M.Y., Boltasseva A., Shalae V.M. Material platforms for integrated quantum photonics // Opt. Nat. Expr. 2017. V. 7. P. 111.
6. Kim J.H., Aghaieimodi S., Carolan J., Englund D., Waks E. Hybrid integration methods for on-chip quantum photonics // Optica. 2020. V. 7. P. 291.
7. Raimond J.M., Brune M., Haroche S. Colloquium: Manipulating quantum entanglement with atoms and photons in a cavity // Rev. Mod. Phys. 2001. V. 73. P. 565.
8. Shu J., Zou X.B., Xiao Y.F., Guo G.C. Quantum phase gate of photonic qubits in a cavity QED system // Phys. Rev. A. 2007. V. 75. P. 044302.
9. Цуканов А.В., Катеин И.Ю. Квантовые вычисления на квантовых точках в полупроводниковых микрорезонаторах. Часть I. // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. С. 323.
10. Цуканов А.В., Катеин И.Ю. Квантовые вычисления на квантовых точках в полупроводниковых микрорезонаторах. Часть II. // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. С. 403.
11. Цуканов А.В., Катеин И.Ю. Квантовые вычисления на квантовых точках в полупроводниковых микрорезонаторах. Часть III. // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. С. 79.
12. Chuang I.L., Yamamoto Y. A simple quantum computer // Phys. Rev. A. 1995. V. 52. P. 3489.
13. Cerf N.J., Adami C., Kwiat P.G. Optical simulation of quantum logic // Phys. Rev. A. 1998. V. 57. P. R1477.
14. John R., Fiore A. Proposal for a two-qubit quantum phase gate for quantum photonic integrated circuits // Phys. Rev. A. 2012. V. 86. P. 063815.

15. *Gazzano O., Almeida M.P., Nowak A.K., Portalupi S.L., Lemaître A., Sagnes I., White A.G., Senellart P.* Entangling quantum-logic gate operated with an ultrabright semiconductor single-photon source // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 110. P. 250501.
16. *Lee J.M., Lee W.J., Kim M.S., Cho S.W., Ju J.J., Navickaite G., Fernandez J.* Controlled-NOT operation of SiN-photonic circuit using photon pairs from silicon-photonic circuit // *Opt. Commun.* 2022. V. 509. P. 127863.
17. *Цуканов А.В., Катеев И.Ю.* Квантовый вентиль CNOT на пространственных фотонных кубитах с резонансным электрооптическим контролем // *Микроэлектроника*. 2024. Т. 53. С. 296.
18. *Цуканов А.В.* Принцип измерения электронной населенности квантовой точки с помощью однофотонного транзистора на основе массива квантовых точек // *Квант. электроника*. 2021. Т. 51. С. 718.
19. *Цуканов А.В., Катеев И.Ю.* Взаимодействие массива одноэлектронных квантовых точек с полем микрорезонатора с учетом кулоновских корреляций // *Квантовая электроника*. 2022. Т. 52. С. 474.
20. *Tsukanov A.V., Kateev I.Yu.* Optical measurement of a quantum dot state in a microdisk by a Stark transducer // *Laser Phys. Lett.* 2022. V. 19. P. 086201.
21. *Bromberg Y., Lahini Y., Silberberg Y.* Bloch oscillations of path-entangled photons // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 105. P. 263604.
22. *Chen X., Fu Z., Gong Q., Wang J.* Quantum entanglement on photonic chips: a review // *Adv. Photon.* 2021. V. 3. P. 064002.
23. *Tsukanov A.V., Kateev I.Yu.* Generation of spatially entangled states in a photonic molecule containing a quantum dot // *Las. Phys. Lett.* 2023. V. 20. 116201.
24. *Baker C., Belacel C., Andronico A., Senellart P., Lemaître A., Galopin E., Ducci S., Leo G., Favero I.* Critical optical coupling between a GaAs disk and a nanowaveguide suspended on the chip // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 99. P. 151117.
25. *Nozaki K., Shinya A., Matsuo S., Suzuki Y., Segawa T., Sato T., Kawaguchi Y., Takahashi R., Notomi M.* Ultralow-power all-optical RAM based on nanocavities // *Nat. Photon.* 2012. V. 6. P. 248.
26. *Notomi M., Shinya A., Nozaki K., Tanabe T., Matsuo S., Kuramochi E., Sato T., Taniyama H., Sumikura H.* Low-power nanophotonic devices based on photonic crystals towards dense photonic network on chip // *IET Circ. Device Syst.* 2011. V. 5. P. 84.
27. *Baba T., Kawasaki T., Sasaki H., Adachi J., Mori D.* Large delay-bandwidth product and tuning of slow light pulse in photonic crystal coupled waveguide // *Opt. Expr.* 2008. V. 16. P. 9245.
28. *Kondo K., Shinkawa M., Hamachi Y., Saito Y., Arita Y., Baba T.* Ultrafast slow-light tuning beyond the carrier lifetime using photonic crystal waveguides // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 110. P. 053902.
29. *Tanabe T., Notomi M., Kuramochi E., Shinya A., Taniyama H.* Trapping and delaying photons for one nanosecond in an ultrasmall high-Q photonic-crystal nanocavity // *Nat. Photon.* 2007. V. 1. P. 49.
30. *Lu T.W., Lin P.T., Sio K.U., Lee P.T.* Optical sensing of square lattice photonic crystal point-shifted nanocavity for protein adsorption detection // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. P. 213702.
31. *Hennessy K., Högerle C., Hu E., Badolato A., Imamolu A.* Tuning photonic nanocavities by atomic force microscope nanooxidation // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. P. 041118.
32. *Strauf S., Rakher M.T., Carmeli I., Hennessy K., Meier C., Badolato A., DeDood M.J.A., Petroff P.M., Hu E.L., Gwinn E.G., Bouwmeester D.* Frequency control of photonic crystal membrane resonators by monolayer deposition // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 88. P. 043116.
33. *Faraon A., Vučković J.* Local temperature control of photonic crystal devices via micron scale electrical heaters // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 95. P. 043102.
34. *Faraon A., Englund D., Fushman I., Vučković J.* Local quantum dot tuning on photonic crystal chips // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90. P. 213110.
35. *Properties of Gallium Arsenide*, 2nd ed., EMIS Datareview Series (INSPEC, London, U.K., 1990), p. 18.
36. *Della Corte F.G., Cocorullo G., Iodice M., Rendina I.* Temperature dependence of the thermo-optic coefficient of InP, GaAs, and SiC from room temperature to 600 K at the wavelength of 1.5 μm // *Appl. Phys. Lett.* — 2000. — V. 77. — P. 1614.
37. *Bayindir M., Temelkuran B., Ozbay E.* Tight-binding description of the coupled defect modes in three-dimensional photonic crystals // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84. P. 2140.

NANOPHOTONIC BEAM-SPLITTER BASED ON QUANTUM DOTS WITH FÖRSTER COUPLING

© 2024 A. V. Tsukanov^{1,*}, I. Yu. Kateev^{1,**}

¹ Valiev Institute Of Physics And Technology Of Russian Academy Of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: tsukanov@ftian.ru

**E-mail: ikateyev@mail.ru

The paper describes a scheme of a quantum beam-splitter that transforms a state of a spatial photonic qubit based on two modes due to an energy exchange between the modes and quantum dots (QDs). By controlling the interaction time, it is possible to obtain the required superposition of the basis single-photon states of the qubit at the output of the device. In addition, the beam-splitter allows the generation entangled two-photon NOON states. Using the Förster effect to control the energy exchange between the QDs makes it possible to increase the intermode distance and suppress the undesirable direct mode interaction. As an example, a beam-splitter based on a two-dimensional photonic crystal with a temperature and structural frequency tuning is considered.

Keywords: quantum dot, beam-splitter, Förster effect, photonic crystal, waveguide

REFERENCES

1. Moody G., Sorger V.J., Blumenthal D.J., Juodawlisk P.W., Loh W., Sorace-Agaskar C., Jones A.E., Balram K.C., Matthews J.C.F., Laing A., Davanco M., Chang L., Bowers J.E., Quack N., Galland C., Aharonovich I., Wolff M.A., Schuck C., Sinclair N., Lončar M., Komljenovic T., Weld, D., Mookherjee S., Buckley S., Radulaski M., Reitzenstein S., Pingault B., Machielse B., Mukhopadhyay D., Akimo A., Zheltikov A., Agarwal G.S., Srinivasan K., Lu J., Tang H.X., Jiang W., McKenna T.P., Safavi-Naeini A.H., Steinhauer S., Elshaari A.W., Zwiller V., Davids P.S., Martinez N., Gehl M., Chiaverini J., Mehta K.K., Romero J., Lingaraju N.B., Weiner A.M., Peace D., Cernansky R., Lobino M., Diamanti E., Vidarte L.T. and Camacho R.M. 2022 Roadmap on integrated quantum photonics, *J. Phys. Photon.*, 2022, vol. 4, p. 012501.
2. Adcock J.C., Bao J., Chi Y., Chen X., Bacco D., Gong Q., Oxenlowe L.K., Wang J. and Ding Y. Advances in silicon quantum photonics, *IEEE Journal of Selected Topics of Quantum Electronics*, 2020, vol. 27, p. 1.
3. Dietrich C.P., Fiore A., Thompson M.G., Kamp M. and Höfling S. GaAs integrated quantum photonics: Towards compact and multi-functional quantum photonic integrated circuits, *Las. Photon. Rev.*, 2016, vol. 10, p. 870.
4. Elshaari A.W., Pernice W., Srinivasan K., Benson O. and Zwiller V. Hybrid integrated quantum photonic circuits, *Nat. Photon.*, 2020, vol. 14, p. 285.
5. Bogdanov S., Shalaginov M.Y., Boltasseva A. and Shalaev V.M. Material platforms for integrated quantum photonics, *Opt. Nat. Expr.*, 2017, vol. 7, p. 111.
6. Kim J.H., Aghaieimodi S., Carolan J., Englund D. and Waks E. Hybrid integration methods for on-chip quantum photonics, *Optica*, 2020, vol. 7, p. 291.
7. Raimond J.M., Brune M. and Haroche S. Colloquium: Manipulating quantum entanglement with atoms and photons in a cavity, *Rev. Mod. Phys.*, 2001, vol. 73, p. 565.
8. Shu J., Zou X.B., Xiao Y.F. and Guo G.C. Quantum phase gate of photonic qubits in a cavity QED system, *Phys. Rev. A*, 2007, vol. 75, p. 044302.
9. Tsukanov A.V. and Kateev I.Yu. Quantum calculations on quantum dots in semiconductor microcavities. Part I, *Russ. Microelectron.*, 2014, vol. 43, p. 315.
10. Tsukanov A.V. and Kateev I.Yu. Quantum calculations on quantum dots in semiconductor microcavities. Part II, *Russ. Microelectron.*, 2014, vol. 43, p. 377.
11. Tsukanov A.V. and Kateev I.Yu. Quantum calculations on quantum dots in semiconductor microcavities. Part III, *Russ. Microelectron.*, 2015, vol. 44, p. 79.
12. Chuang I.L. and Yamamoto Y. A simple quantum computer, *Phys. Rev. A*, 1995, vol. 52, p. 3489.
13. Cerf N.J., Adami C. and Kwiat P.G. Optical simulation of quantum logic, *Phys. Rev. A*, 1998, vol. 57, p. R1477.
14. Johne R. and Fiore A. Proposal for a two-qubit quantum phase gate for quantum photonic integrated circuits, *Phys. Rev. A*, 2012, vol. 86, p. 063815.
15. Gazzano O., Almeida M.P., Nowak A.K., Portalupi S.L., Lemaître A., Sagnes I., White A.G. and Senellart P. Entangling quantum-logic gate operated with an ultrabright semiconductor single-photon source, *Phys. Rev. Lett.*, 2013, vol. 110, p. 250501.
16. Lee J.M., Lee W.J., Kim M.S., Cho S.W., Ju J.J. Navickaite G. and Fernandez J. Controlled-NOT operation of SiN-photonic circuit using photon pairs from silicon-photonic circuit, *Opt. Commun.*, 2022, vol. 509, p. 127863.
17. Tsukanov A.V. and Kateev I.Yu. Quantum gate CNOT based on spatial photonic qubits under resonant electro-optical control, *Russ. Microelectron.*, 2024, vol. 53, p. 306.
18. Tsukanov A.V. Principle of measuring the electron population of a quantum dot using a single-photon transistor based on an array of quantum dots, *Quantum Electron.*, 2021, vol. 51, p. 718.
19. Tsukanov A.V. and Kateev I.Yu. Interaction of an array of single-electron quantum dots with a microcavity field with allowance for Coulomb correlations, *Quantum Electron.*, 2022, vol. 52, p. 474.
20. Tsukanov A.V. and Kateev I.Yu. Optical measurement of a quantum dot state in a microdisk by a Stark transducer, *Laser Phys. Lett.*, 2022, vol. 19, p. 086201.
21. Bromberg Y., Lahini Y. and Silberberg Y. Bloch oscillations of path-entangled photons, *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 105, p. 263604.
22. Chen X., Fu Z., Gong, Q. and Wang, J. Quantum entanglement on photonic chips: a review, *Adv. Photon.*, 2021, vol. 3, p. 064002.
23. Tsukanov A.V. and Kateev I.Yu. Generation of spatially entangled states in a photonic molecule containing a quantum dot, *Las. Phys. Lett.*, 2023, vol. 20, p. 116201.
24. Bake, C., Belacel C., Andronico A., Senellart P., Lemaître A., Galopin E., Ducci S., Leo G., and Favero I. Critical optical coupling between a GaAs disk and a nanowaveguide suspended on the chip, *Appl. Phys. Lett.*, 2011, vol. 99, p. 151117.
25. Nozaki K., Shinya A., Matsuo S., Suzuki Y., Segawa T., Sato T., Kawaguchi Y., Takahashi R., and Notomi M., Ultralow-power all-optical RAM based on nanocavities, *Nat. Photon.*, 2012, vol. 6, p. 248.
26. Notomi M., Shinya A., Nozaki K., Tanabe T., Matsuo S., Kuramochi E., Sato T., Taniyama H., and Sumikura H. Low-power nanophotonic devices based on photonic crystals towards dense photonic network on chip, *IET Circ. Device Syst.*, 2011, vol. 5, p. 84.
27. Baba T., Kawasaki T., Sasaki H., Adachi J. and Mori D. Large delay-bandwidth product and tuning of slow light pulse in photonic crystal coupled waveguide, *Opt. Expr.*, 2008, vol. 16, p. 9245.
28. Kondo K., Shinkawa M., Hamachi Y., Saito Y., Arita Y. and Baba T. Ultrafast slow-light tuning beyond the carrier lifetime using photonic crystal waveguides, *Phys. Rev. Lett.*, 2013, vol. 110, p. 053902.
29. Tanabe T., Notomi M., Kuramochi E., Shinya A., and Taniyama H. Trapping and delaying photons for one

- nanosecond in an ultrasmall high-Q photonic-crystal nanocavity, *Nat. Photon.*, 2007, vol. 1, p. 49.
30. *Lu T.W., Lin P.T., Sio K.U. and Lee P.T.* Optical sensing of square lattice photonic crystal point-shifted nanocavity for protein adsorption detection, *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol. 96, p. 213702.
 31. *Hennessy K., Högerle C., Hu E., Badolato A., and Imamolu A.* Tuning photonic nanocavities by atomic force microscope nanooxidation, *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, p. 041118.
 32. *Strauf S., Rakher M.T., Carmeli I., Hennessy K., Meier C., Badolato A., DeDood M.J.A., Petroff P.M., Hu E.L., Gwinn E.G. and Bouwmeester D.* Frequency control of photonic crystal membrane resonators by monolayer deposition, *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 88, p. 043116.
 33. *Faraon A. and Vučković J.*, Local temperature control of photonic crystal devices via micron scale electrical heaters, *Appl. Phys. Lett.*, 2009, vol. 95, p. 043102.
 34. *Faraon A., Englund D., Fushman I. and Vučković J.* Local quantum dot tuning on photonic crystal chips, *Appl. Phys. Lett.*, 2007, vol. 90, p. 213110.
 35. *Properties of Gallium Arsenide*, 2nd ed., EMIS Datareview Series (INSPEC, London, U.K., 1990), p. 18.
 36. *Della Corte F.G., Cocorullo G., Iodice M. and Rendina I.* Temperature dependence of the thermo-optic coefficient of InP, GaAs, and SiC from room temperature to 600 K at the wavelength of 1.5 μm , *Appl. Phys. Lett.*, 2000, vol. 77, p. 1614.
 37. *Bayindir M., Temelkuran B., and Ozbay E.* Tight-binding description of the coupled defect modes in three-dimensional photonic crystals, *Phys. Rev. Lett.*, 2000, vol. 84, p. 2140.

УДК 621.37

НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИТОГРАФИИ

© 2024 г. Н. И. Чхало^{1,*}

¹ Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения “Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук”, Нижегородская область

*E-mail: chkhalo@ipmras.ru

Поступила в редакцию 13 июня 2024 г.

После доработки 25 июня 2024 г.

Принята к публикации 25 июня 2024 г.

Дается краткий обзор современного состояния экстремальной ультрафиолетовой (ЭУФ, EUV в англоязычной транскрипции), или, что тоже, рентгеновской литографии на длине волны 13.5 нм в мире. Обсуждаются проблемы и перспективы развития этой технологии на ближайшие годы. Сообщается о новой концепции рентгеновской литографии в России, развиваемой в Институте физики микроструктур РАН. Приводится обоснование преимуществ и перспектив реализуемости литографии на новой для литографии длине волны 11.2 нм. Дается краткий обзор отечественного уровня развития критических технологий, необходимых для создания рентгеновского литографа.

Ключевые слова: ЭУФ литография, рентгеновская оптика, источник рентгеновского излучения, длина волны 11.2 нм, многослойные зеркала

DOI: 10.31857/S0544126924050038

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди сотен технологических операций и единиц оборудования, используемых при производстве микросхем, литография занимает особое место. Это связано с рядом обстоятельств. Прогресс микроэлектроники все эти годы, напрямую связан с уменьшением геометрических размеров топологических элементов. Чем меньше эти элементы, тем выше степень интеграции, информационная емкость и т.д. Топология и размеры элементов задаются литографией. Затраты на литографическое оборудование и стоимость самого процесса литографии могут на порядки величин превосходить другие затраты при производстве микросхем. Например, цена литографа с иммерсией на длине волны 193 нм может достигать 50 млн евро, литографа на длине волны 13.5 нм — от 300 млн евро, а комплект масок может стоить до 10 млн долларов и более.

Самые современные чипы, в основном, производятся с использованием литографии на длине волны 193 нм. Это стало возможным благодаря непрерывному развитию методов повышения разрешающей способности (RET — resolution enhancement

technique в англоязычной транскрипции). Наиболее эффективными RET являются: внеосевое освещение шаблона [1]; иммерсия, позволившая повысить числовую апертуру проекционных объективов до $NA = 1.32$ [2]; фазосдвигающие шаблоны, которые уменьшили числовой коэффициент k в критерии пространственного разрешения Рэлея более чем в 2 раза [3], и многократное экспонирование (Multipatterning) [4]. Активно применяются методы оптической коррекции (OPC — optical proximity correction), улучшающие качество передачи рисунка маски на пластину с фоторезистом [5].

Еще одним важным направлением по снижению коэффициента k в Рэлеевском соотношении является совершенствование резистов в направлении повышения контраста, увеличивающего угол наклона края проявленного рисунка, и снижения шероховатости края [6].

В настоящее время применение RET позволило достичь предела разрешающей способности ультрафиолетовой литографии 8 нм [7].

Однако эти технологии резко увеличили стоимость литографического процесса и понизили выход годных изделий. Например, если современный

чип памяти содержит около 80 слоев, а критических, т.е. с минимальными размерами, 25 слоев, то при размере $hp = 8$ нм (hp – half pitch) и использовании DUV (deep ultraviolet) 193i литографии только для их изготовления потребуется до 100 полных процессов на пластине.

Разрешающую способность литографии можно повысить, перейдя к более короткой длине волны. Исследования в области EUV литографии на длине волны $\lambda = 13.5$ нм, были начаты еще в 80-х годах прошлого столетия [8]. И если в начале разработкой собственного рентгеновского литографа занимались в США [9], Японии [10], Нидерландах [11] и в России [12], то к настоящему времени осталась только компания ASML, Нидерланды. Период разработки показал невероятную ее сложность, и только компания ASML смогла интегрировать самые передовые достижения со всего мира в своем продукте. Другие компании и организации, достигшие успехов в разработке определенных узлов и технологий для EUV литографа, сконцентрировались на этих разработках в интересах ASML.

Следует отметить так же продолжающиеся исследования в области литографии на синхротронах ALS и NewSUBARU [13,14].

Несмотря на широкий фронт работ и большое число участников этого глобального проекта, только на рубеже 2018–2019 г. литографы на рабочей длине волны 13.5 нм стали применяться для производства чипов [15]. К концу 2023 г. на фабриках в США, Корее и Тайване при изготовлении критических слоев уже использовалось около 180 EUV литографов. Несмотря на относительную молодость этой технологии, она быстро распространяется и можно смело утверждать, что это литография следующего поколения. ASML ожидает дальнейшего роста производства EUV литографов. Если Россия планирует занимать достойное место в микроэлектронике, ей также необходимо развивать эту технологию.

После долгих лет забвения и, порой, агрессивного отторжения проектов, предлагаемых Салащенко Н.Н. и автором данной работы [16], тема рентгеновской литографии стала широко обсуждаемой в РФ. В значительной мере этому способствовало появление в 2022 г. Дорожной карты по развитию рентгеновской литографии в России, разработанной в Институте физики микроструктур РАН (ИФМ РАН), о которой пойдет речь ниже. Главное же, вызрело понимание в Правительстве важности поднятой проблемы. Появился ряд организаций, не имеющих заделов, тем не менее, готовые заняться этой проблемой.

Очевидно, что при таких исходных условиях, единственно возможным путем к собственному рентгеновскому литографу виделось повторение того, что сделала компания ASML. На основании длительного (начиная с середины 90-х и до 2014 г.) взаимодействия с ASML и ZEISS по разработке

EUV литографа, а также собственного опыта создания экспериментального образца литографа, автор убежден, что попытка копирования литографа компании ASML не приведет к успеху. Этот вывод относится как к техническим, так и экономическим проблемам, стоящим на пути построения литографа на 13.5 нм.

Целями данной статьи является обсуждение существующей концепции EUV литографии, изложение и обоснование новой парадигмы рентгеновской литографии, реализация которой могла бы привести к успеху ее развития в обозримом будущем в России.

2. КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ EUV ЛИТОГРАФИИ КОМПАНИЕЙ ASML

В данном разделе не будем подробно останавливаться на критических технологиях литографии, принципах построения рентгеновского литографа, этому посвящено много оригинальных работ, монографий, например, [17]. В последнее время автор с коллегами обращался к этой теме в отечественных журналах и интернете [20–22]. Остановимся лишь на парадигме, в рамках которой строилась программа развития EUV литографии в ASML и тех последствиях, к которым привело следование этой концепции.

Концепция развития EUV литографии компании ASML основана на достижении производительности литографического процесса как у традиционной DUU литографии но, с выигрышем в пространственном разрешении и уменьшении числа операций на пластине, за счет уменьшения числа применяемых RET (RET – resolution enhancement techniques). И действительно, еще в 2012 г. на опытных литографах (β -tools) было показано, что если не учитывать низкий жизненный цикл элементов литографа и затраты на ремонт и простой оборудования, начиная с топологических норм 32 нм, стоимость литографического процесса на EUV машине становится меньше, чем на DUV. При уменьшении топологических размеров этот эффект только усиливается [23].

Следствием требования сравнимой с DUV литографией производительностью у рентгеновского литографа стал ряд трудно разрешимых проблем и крайне дорогостоящих их решений. Производительность определяется эффективностью отражающей многослойной оптики и конверсии подведенной к источнику энергии в EUV излучение на рабочей длине волны, в спектральной полосе, равной полосе пропускания оптической системы литографа.

Рекордные коэффициенты отражения многослойных Mo/Si зеркал на длине волны 13.5 нм составляют 70.15% [24] при теоретически возможном значении около 75%. Несмотря на огромные усилия исследователей, этот результат остается

неизменным уже долгие годы. В работе [25] сообщалось о достигнутых коэффициентах отражения около 71.5%, однако в этих зеркалах используется Ве, работы с которым в Европе ограничены, поэтому этот результат не находил своего применения в литографах.

Если рассчитать эффективность 12-ти зеркальной оптической системы литографа, состоящей из коллектора, 4-х зеркал осветителя, маски и 6-ти зеркал проекционного объектива, а также учесть коэффициенты пропускания фильтра, защищающего маску от загрязнений (pellicle), и фильтра, разделяющего объемы проекционного объектива и стола с экспонируемой пластиной GDL (gas dynamic lock), то эффективность системы составит менее 0.9%. На практике, эта величина еще меньше из-за низкого, на уровне 41%, коэффициента отражения коллектора [26], наличия на поверхности Mo/Si зеркал защитных слоев и поляризационных эффектов. Поэтому, для достижения высокой производительности основные усилия разработчиков направлены на увеличение мощности лазерно-плазменного источника излучения на 13.5 нм.

В качестве излучателя выступают высокочargedные ионы олова +7...+10, получаемые при воздействии мощного CO₂ лазера, длина волны 10.6 мкм, на капли олова с размерами около 30 мкм. Эффективность такого источника составляет СЕ = 6%, которая представляет собой долю энергии от энергии лазерного пучка, излученную ионами олова на длине волны 13.5 нм, в спектральной полосе 2%, в телесный угол 2π ср (полупространство) [26]. В русскоязычной версии описание работы такого источника можно найти в [27]. Так как эффективность конверсии уже достигла своего предела, то направление повышения производительности — это увеличение средней мощности лазера. В настоящее время мощность лазера составляет 21.5 кВт [26], обсуждаются планы по ее увеличению до 50 кВт.

Этот источник, обладающий наивысшим коэффициентом конверсии в области 13.5 нм, является основной проблемой EUV литографа от ASML. Во-первых — это огромные габариты установки, лазерная система занимает целый этаж. Во-вторых, из-за использования уникального по параметрам газоразрядного CO₂ лазера установка превысила по мощности мегаваттный уровень. В-третьих, серьезнейшие проблемы влечет за собой использование олова в литографическом процессе. Не трудно рассчитать, что за сутки в литограф поступает почти 1 кг олова, которое необходимо вывести из установки, так как даже нанометровые загрязнения зеркал парами олова приведут к полной потере отражательной способности. Решением по защите оптики от загрязнения парами олова стало использование водорода, благодаря образованию летучего соединения SnH₄ [26]. Также водород тормозит высокоэнергичные ионы, предотвращая бомбардировку дорогостоящего коллекторного

зеркала, находящегося на расстоянии нескольких десятков сантиметров от точки взаимодействия лазерного пучка с оловянной каплей. Тем не менее, защита олова не полная и требуется перестановка коллектора примерно каждые 2 недели [28]. Использование в литографе водорода, да еще активированного ионизацией из-за облучения EUV и DUV излучением, предъявляет жесткие требования к материалам конструкции, сильно ограничивая их номенклатуру или сокращая срок службы. В частности, химическое взаимодействие водорода с pellicle сильно ограничивает его время жизни примерно 2-мя неделями [29, 30]. Есть большая вероятность, что при повреждении pellicle, происходит повреждение и маски. Наконец, в-четвертых, 10% мощности, т.е. около 2 кВт, лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм рассеиваются на плазме и падают на коллектор [31]. Для предотвращения распространения этого излучения дальше в литографа коллектор покрывается дифракционной решеткой, в нулевом порядке отражающим EUV излучение и в дифракционных порядках 10.6 мкм [32]. Использование хорошо проводящей тепло металлической подложки для коллектора, а также потери, связанные с формированием дифракционной структуры на подложке, приводят к низкой на уровне 41% эффективности коллектора, тем самым еще сильнее понижая эффективность оптической системы.

В совокупности, из-за описанных проблем из 6% конверсионной эффективности источника до промежуточного фокуса доходит менее 1.2%. К этому выводу легко прийти, разделив мощность EUV излучения в промежуточном фокусе 250 Вт на мощность лазерного пучка 21.5 кВт [26]. Эти потери — результат мероприятий, защищающих оптику и другие элементы литографа от паров и высокоэнергичных ионов олова, и радиационных нагрузок от рассеяния лазерного излучения.

Очень короткое время жизни коллектора и маски, стоимость каждого в районе миллиона евро, огромное потребление электрической энергии делает крайне большой стоимость пользования этого вида оборудования.

В целом, развиваемая ASML концепция привела к огромной стоимости оборудования. По разным данным цена выпускаемых в настоящее время литографов серии NXE:3400C и NXE:3600D превышает 300 млн евро, а нового поколения EXE:5000 с числовой апертурой NA = 0.55 и разрешением 8 нм в разы больше. Тем не менее, топ менеджеры компаний TSMC, Samsung и Intel подтверждают, что, несмотря на все эти затраты, EUV литография экономически эффективна. Однако надо учитывать, что эта эффективность обусловлена гигантским рынком чипов, занимаемым этими компаниями, по сути монополистов. При уменьшении рынка, эта эффективность резко упадет. Косвенным подтверждением этого вывода является и то,

что кроме этих гигантов, а также американской Micron Technology и корейской SK Hynix Korea, входящих в 5-топ производителей чипов в мире, такое оборудование больше никто не приобрел и, согласно прогнозам ASML на ближайшее будущее, и не планирует.

Исходя из объемов рынка, можно сделать вывод, что с экономической точки зрения повторять проект ASML для России бессмысленно. Аргумент, что цена для спецтехники не столь принципиальна, на наш взгляд, не корректен, так как даже при классической DUV литографии стоимость чипа изменяется на 5 порядков величины, в зависимости от серийности производства и при мелкосерийном производстве она может и превысить стоимость спецтехники, для которой этот чип производился.

Невероятные технологические трудности создания EUV литографа привели к тому, что даже США и Япония, стартовав в этой гонке первыми, не смогли довести свои EUV программы до конкурентного продукта, и ограничились лишь отдельными компонентами для ASML. Причиной их неудачи, и в противовес, успеха ASML, на наш взгляд, является то, что ASML смогла интегрировать в своем продукте лучшие мировые достижения по всем основным компонентам. Этого они достигли за счет беспрецедентной открытости проекта. На основании этого можно сделать вывод, что и в технологическом смысле одной стране маловероятно повторить проект ASML. Поэтому для автора, очевидно, что для отечественной программы необходим альтернативный подход к решению проблемы высокопроизводительной рентгеновской литографии, обеспечивающий сопоставимые технические характеристики, и при этом делающий эту технологию более доступной по цене оборудования и стоимости эксплуатации. В случае реализации этой концепции, литографы будут востребованы не только в РФ, но и за рубежом, так как они станут доступными для компаний, не входящих в топ-5.

3. НОВАЯ ПРАДИГМА РАЗВИТИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИТОГРАФИИ

Последние достижения ИФМ РАН в области многослойной рентгеновской оптики и лазерно-плазменного источника на основе ксенона на длину волны 11.2 нм позволили по-новому взглянуть на развитие рентгеновской литографии с точки зрения удешевления стоимости и дальнейшей эксплуатации литографа с сохранением минимальных технологических норм на уровне ASML, ценой некоторого уменьшения его производительности. Достижение такой цели предполагает кратное снижение энергетики ЛПИ. Если литограф от ASML — это установка мегаваттного уровня, то концепт от ИФМ РАН — порядка 100 кВт. Будут кардинально уменьшены габаритные размеры, по-

вышен жизненный цикл лазера, коллектора и других элементов литографа. Появится возможность повышения эффективности рентгенооптической схемы и упрощения проекционной схемы.

В основе предложенной концепции лежат следующие инновации.

1. Уменьшение рабочей длины волны с 13.5 нм до 11.2 нм приведет, согласно критерию Рэля, к увеличению разрешающей способности на 20%. Это позволит для достижения одинакового разрешения уменьшить числовую апертуру объектива с $NA_{13.5} = 0.33$ до $NA_{11.2} = 0.27$. Следствием относительно небольшого изменения NA является уменьшение габаритных размеров и существенное упрощение изготовления зеркал. Упрощение изготовления зеркал связано с тем, что зеркала для проекционной схемы литографа имеют асферичность 8–12 порядков, а уменьшение числовой апертуры зеркала на 20% приведет к уменьшению асферичности высоких порядков в 4–9 раз. Поэтому, можно ожидать уменьшения габаритных размеров и заметного удешевления производства объектива. Примерно в 1.4 раза повысится эффективность оптической системы за счет применения многослойных Ru/Be зеркал вместо Mo/Si.

2. Замена оловянного лазерно-плазменного источника на ксеноновый на порядки уменьшает загрязнения оптических элементов продуктами разлета материала источника. В разы возрастет время жизни дорогостоящих коллектора и pelli-cle, а значит и масок. Все это снижает затраты как на изготовление вакуумных элементов и систем, и литографа в целом, так и стоимость эксплуатации. Ксенон представляет собой инертный газ и не может загрязнять оптику. Основными источниками негативного воздействия на оптику в случае ксенона являются высокоэнергичные ионы, способные распылять зеркала, и продукты эрозии сопла из-за бомбардировки ударными волнами и быстрыми ионами, рожденными в лазерном разряде (о пути решения этих проблем будет сказано ниже). При недостаточной защите рассеянными потоками рабочего газа, для подавления ионных потоков будет использоваться инертный или слабоактивный газ.

Одной из проблемных частей оловянного ЛПИ является высокочастотный генератор капель олова, сопло которого работает при температуре, превышающей температуру плавления олова. Помимо проблемы надежности работы генератора капель [33], в этом ЛПИ требуется сложная инфраструктура по синхронизации работы всех систем, обеспечивающая генерацию и предварительное испарение капель, и последующий их нагрев основным импульсом лазерного излучения. В случае ксенонового источника конструкция генератора капель упрощается до примитивного сверхзвукового сопла с непрерывной подачей газа. Это решение устраняет ряд сложных и до-

рогостоящих систем ЛПИ, увеличивает ресурс его работы. Это снижает как стоимость ЛПИ, так и эксплуатационные затраты.

Вместо крупногабаритного газоразрядного CO_2 лазера используется надежный, малогабаритный и энергосберегающий твердотельный дисковый лазер с диодной накачкой. Рабочая длина волны лазера 1.03 мкм. Важно отметить, что в России в настоящее время нет даже экспериментального прототипа импульсного CO_2 лазера с близкими к ASML параметрами, в то время, как имеются передовые разработки в области мощных твердотельных гибридных лазерах, о чем будет сказано ниже.

Меньше средняя мощность и рассеянное плазмой лазерное излучение, а также высокие коэффициенты поглощения тонких металлических пленок излучения с длиной волны 1 мкм, заметно уменьшают радиационную нагрузку на коллектор, а также позволяют использовать обычные фильтры для подавления длинноволнового излучения вместо дифракционных структур на коллекторе. Это существенно упрощает конструкцию, удешевляет коллектор и повышает его эффективность с $\sim 40\%$, как у ASML литографа, до $\sim 65\%$. Использование фильтра вместо дифракционной структуры на коллекторе, также уменьшает тепловые нагрузки на последующие элементы проекционной схемы, так как они эффективно поглощают излучение в широком диапазоне длин волн. В противовес, дифракционный фильтр на коллекторе фактически защищает только от излучения с длиной волны 10.6 мкм.

3. Переход к длине волны 11.2 нм, потенциально, открывает возможность использования резистов на основе кремния, в частности, кремнийорганических. Наибольшей чувствительностью при высоких параметрах передачи рисунка в EUV литографии обладают органические резисты. Однако по мере уменьшения топологических размеров необходимо уменьшение их толщины. В настоящее время толщина слоя резиста составляет десятки нанометров. Однако разработчики столкнулись с проблемой низкого поглощения в этих слоях. Так, слой ПММА толщиной 50 нм (аспектное отношение для $h\lambda = 13$ нм около четырех) поглотит только 23% излучения. Это одна из причин, понижающая в разы производительность EUV литографа. ASML приводит дозы при получении наноструктур на уровне 30 мДж/см², в то время, как чувствительность химически усиленных резистов на основе ПММА существенно выше, а дробовой шум перестает заметным образом влиять на LER (line edge roughness) при поглощенной дозе на уровне 10 мДж/см² [34]. Для повышения поглощения излучения, фоторезист наполняются металлическими нанокластерами, уменьшающими длину пробега фотонов в резисте. Однако использование таких частиц ухудшает шероховатость края формируемых в резисте наноструктур.

Длина волны 11.2 нм находится за L-краем поглощения Si ($\lambda_L = 12.4$ нм) и в этом случае поглощение кремния становится даже выше, чем у многих металлов. Поэтому, использование кремнийорганических резистов может заметно повысить их чувствительность без ухудшения шероховатости LER. Простейшие расчеты показывают, что хорошо известный электронный резист HSQ, имеющий в своей формуле всего один атом Si, обеспечивает большее поглощение на длине волны 11.2 нм, чем ПММА на 13.5 нм. Можно ожидать, что увеличение доли кремния в резисте приведет к заметному увеличению эффективности резиста на длине волны 11.2 нм по сравнению с 13.5 нм.

В табл. 1 приводится сравнение основных параметров литографа TWINSCAN NXE:3600D с ожидаемыми параметрами литографа, разработанного в ИФМ РАН. Ряд «внутренних» параметров литографа от ASML были восстановлены автором из анализа различных источников, тем не менее, основные взяты из сайта ASML. При расчете производительности литографического процесса от ИФМ РАН были сделаны консервативные оценки.

Несколько комментариев к таблице. Благодаря существенно меньшим ионным/тепловым/радиационным нагрузкам и отсутствию водорода, за счет сегментирования зеркала и электронных приводов сегментов к функционалу коллектора, как сборщика рентгеновского излучения, можно добавить функционал формирователя заданного распределения света, падающего на маску. В этом случае в осветительной системе можно уменьшить количество зеркал с 4 до 3, что повысит производительность примерно на 30%. Однако в расчете производительности эта возможность не учитывалась.

Точно значения коэффициентов отражения Mo/Si зеркал в реальных объективах в литературе не нашлось, только для маски, 65%. С нашей точки зрения значение 69%, близкое к рекордному значению 70.1%, представляется верхней оценкой, так как эксплуатация зеркал в водородной среде предполагает на поверхности дополнительный защитный слой Ru, который снижает коэффициент отражения. В случае Ru/Be зеркал Ru входит как составной элемент, таким образом, не снижая коэффициент отражения зеркала.

Пропускание газодинамической системы защиты ASML литографа было рассчитано из приведенных на сайте производителя средних значения коэффициента отражения коллектора, коэффициента конверсии, телесного угла коллектора, средней мощности лазера и EUV мощности в промежуточном фокусе. 80% со звездочкой в нашем случае — расчетная величина с учетом поглощения в ксеноне.

Эффективность конверсии 2–4% с двумя звездочками — это экспериментальные данные разных авторов. Теория показывает, что можно ожидать 7.5%, что даже выше, чем у оловянного источника на 13.5 нм. Однако экспериментального подтвержде-

Таблица 1. Сравнение основных параметров литографа TWINSKAN NXE:3600D с ожидаемыми параметрами литографа, разработанного в рамках концепции от ИФМ РАН. Пояснения чисел со звездочками дано в тексте статьи

Параметр	ASML	ИФМ РАН
Длина волны, нм	13.5	11.2
Числовая апертура объектива, NA	0.33	0.27
Пространственное разрешение, нм	13	13
Количество зеркал в объективе, шт.	6	6
Количество зеркал в осветителе, шт.	4	4 (3)
Коэффициент отражения зеркала, %	69	72
Коэффициент отражения маски, %	66	70
Коэффициент отражения коллектора, %	41	65
Пропускание газодинамической защиты, %	57	80*
Поглощение в резисте, относительные единицы	1	1.2**
Мощность лазера, кВт	21.5	3.6
Конверсионная эффективность источника, %	6	2-4***
Производительность, пластин Ø300 мм в час	160	60

ния этому пока нет. В расчете производительности был принят коэффициент конверсии 3%.

Увеличенная в 1.2 раза эффективность резиста на длине волны 11.2 нм по сравнению с 13.5 нм – расчетная величина с учетом сильного поглощения кремния на этой длине волны.

Как видно из таблицы, достаточно консервативные оценки показывают, что при средней мощности лазера 3.6 кВт, ожидаемая производительность на длине волны 11.2 нм будет меньше примерно в 2.7 раза, чем у ASML литографа. Для фабрик, у которых рынок продукции меньше, чем у топ-5 компаний, этой величины вполне достаточно, с учетом того, что из всех слоев на чипе рентгеновская литография используется только при формировании нескольких критических слоев.

Таким образом, успешная реализация данной концепции позволит достичь целей повышения доступности рентгеновской литографии для пользователей без ущерба разрешающей способности.

4. ОБОСНОВАНИЕ РЕАЛИЗУЕМОСТИ
ПРЕДЛАГАЕМОЙ КОНЦЕПЦИИ
РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИТОГРАФИИ

Для успешной реализации проекта в ИФМ РАН создан научно-технологический задел мирового уровня.

Для изготовления рентгеновской оптики, в том числе и асферической, разработана технология двухстадийного формообразования. На первом этапе методом классической глубокой шлифовки-полировки с использованием уникальных по-

лирующих составов [35] изготавливаются плоские или сферические заготовки. Целевыми параметрами завершения этой стадии обработки является достижение эффективной шероховатости в диапазоне пространственных частот 0.025–60 мкм⁻¹ на уровне 0.2 нм и точности формы по параметру среднеквадратического отклонения (СКО) менее 10 нм. На следующем этапе методом ионно-пучкового травления осуществляется финишная полировка, асферизация и коррекция локальных ошибок. На этой стадии достигается эффективная шероховатость на уровне 0.1 нм, а точность формы СКО = 0.6–0.8 нм или $\lambda/18-\lambda/14$, для длины волны $\lambda = 11.2$ нм. Эти значения удовлетворяют критерию Марешаля для достижения дифракционного качества получаемых изображений. Подробнее о развитых методах безэталоной метрологии aberrаций оптических элементов и систем, шероховатости, а также методах и оборудовании для изготовления высокоточных подложек можно найти в работах [37–40].

Для напыления высокоотражающих многослойных рентгеновских зеркал, в том числе и нормального падения, в ИФМ РАН действуют 8 технологических установок, использующих магнетронное и ионно-пучковое распыление материалов. В том числе 2 установки работают в специализированной бериллиевой лаборатории. В недавней работе сообщалось, что в ИФМ РАН была разработана технология напыления Ru/Be зеркал с коэффициентами отражения на длине волны 11.4 нм до 72.2% [41], что заметно выше рекордных 70.15% Mo/Si зеркал, используемых в установке ASML. В составе двенадцати-зеркальной оптической системы литогра-

фа эта оптика по эффективности превосходит Mo/Si-оптику в 1.4 раза.

Исследования по ксеноновому источнику рентгеновского излучения были начаты почти 10 лет назад. Основные результаты опубликованы в работах [42–45]. Экспериментальные значения коэффициента конверсии *CE* на длине волны 11.2 нм варьируются в пределах 2–4%. Причиной такого разброса является сильное поглощение рентгеновского излучения в ксеноне. Эта проблема будет решаться за счет наращивания откачных мощностей вакуумной камеры источника, а также оптимизации параметров струи в области взаимодействия с лазерным излучением.

Перспективы получения конверсионной эффективности около 4% подтверждаются также работами группы С. Калмыкова из ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Они приводят значение 3.8% [46]. По сравнению с эффективностью оловянного источника 6% эта величина кажется меньше. Однако, как отмечалось выше, из-за потерь в системах защиты оптических элементов от загрязнения оловом, и необходимости выдерживать коллектором киловаттных радиационных нагрузок лазерного излучения с длиной волны 10.6 мкм, эффективность этого источника находится на уровне 1%. Таким образом, есть серьезные основания ожидать, что эффективность использования ксенонового источника будет не ниже.

Важно отметить, что приведенные выше коэффициенты конверсии на длине волны 11.2 нм были получены с использованием твердотельного лазера с длиной волны 1.06 мкм. Для литографических целей нужен импульсно-периодический лазер с энергией в импульсе десятки-сотни мДж, длительность несколько наносекунд и средней мощностью от киловатта. В ИФМ РАН имеются существенные заделы в области создания гибридных Yb:YAG лазеров с дисковым усилителем на длину волны 1.03 мкм. В частности, разработан экспериментальный образец лазера с близкими параметрами импульсов и средней мощностью около 1 кВт [47]. Разработчики уверены в возможности масштабирования средней мощности до 2.4–3.6 кВт.

К значимым заделам в области источников рентгеновского излучения также следует отнести самые современные диагностики, обеспечивающие измерение основных параметров источника: мощность рентгеновского излучения в спектральной полосе пропускания литографа и вне полосы в EUV диапазоне, размер источника на рабочей длине волны. Для этого в ИФМ РАН разработан ряд приборов. В частности, абсолютно калиброванный по чувствительности и длине волны прибор для измерения мощности EUV излучения в 2% спектральной полосе был использован в ASML в качестве вторичного эталона для сравнения источников от различных разработчиков [48]. Однозеркальный спектрометр для абсолютных измерений рентгеновского и EUV

излучения позволяет измерять эмиссионные характеристики источника в диапазоне 3–30 нм [49]. Для измерений размеров источника излучения на длине волны 11.2 нм создан калиброванный по длине волны и чувствительности микроскоп на основе объектива Шварцшильда, обеспечивающий микронное разрешение [50].

В области резистов для 13.5 нм совместно ИФМ РАН и Институтом химии ННГУ им. Н. И. Лобачевского, также были получены значимые заделы. На базе химически усиленных ПММА резистов были достигнуты высокие 5–15 мДж чувствительности резистов при контрасте больше 3 [51, 52]. При переходе на резисты на основе Si можно ожидать увеличения чувствительности за счет их большего поглощения на длине волны 11.2 нм по сравнению с 13.5 нм. В частности, расчеты показывают, что уже применяемый в электронной литографии резист силсесквиоксанный водород (HSQ), обеспечивающий рисование линий менее 10 нм [53], имея в своей молекулярной формуле всего один атом Si, и плотность существенно меньше, чем у ПММА, тем не менее, на длине волны 11.2 нм поглощает больше, чем ПММА на длине волны 13.5 нм. Это позволяет надеяться на существенный прогресс в резистах на основе кремния на длину волны 11.2 нм.

В ИФМ РАН имеются значимые заделы в области масок для EUV литографии [54] и свободно-висящих многослойных пленок для защиты масок (pellicle) и оптики от загрязнений продуктами разложения резистов (GDL), фильтров спектральной очистки (SPF) [55–57]. В частности, экспериментальные литографы компании ASML оснащались этой свободно-висящей оптикой. Получено около 20 совместных патентов. В настоящее время, эта оптика востребована, в частности, в странах Юго-Восточной Азии.

При разработке методов изготовления и на стадии серийного производства важной является диагностика дефектов масок на рабочей длине волны. Поверхностных методов диагностики, например, с использованием атомно-силовой или электронной микроскопии недостаточно, так как маски для EUV/рентгеновского излучения отражательного типа и в отражении участвует весь объем многослойной структуры. Внутренние дефекты, даже в одном слое, могут локально привести к потере отражения. При этом на поверхности этот дефект может быть не заметен.

Для решения этой проблемы в ИФМ РАН создан прототип такого микроскопа, работающий на длине волны 13.8 нм [58], обеспечивающий разрешение 140 нм, ограниченное размером пикселя видеокамеры. Аберрации проекционного объектива обеспечивают разрешение на уровне 30 нм, что вполне достаточно для инспекции масок.

В ИФМ РАН имеются заделы в области сканирующих систем и автофокуса, что позволило

ранее создать первый в России макет литографа на длину волны 13.5 нм [12]. Главным отличием систем сканирования современных нанолитографов от традиционных движущихся платформ является использование принципов левитации — отсутствие контактирующих подвижных элементов [19]. Это новый подход для понятия «точная механика». Если раньше основной упор делался на высокую точность изготовления деталей и их сборку, то в этих подвижках упор переносится на точное позиционирование, базирующееся на системе управления движущейся платформы с использованием специально рассчитанных и изготовленных электромоторов, системы управления в реальном времени большим числом обмоток и высокоточные, на первом этапе интерферометрические, системы контроля положения платформы в пространстве. В России имеются заделы и научные школы в областях, как электропривода, так и интерферометрических систем, поэтому и эта проблема может быть решена.

5. ДОРОЖНАЯ КАРТА ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТА

По аналогии с опытом развития мировой EUV литографии реализация предложенной концепции предполагает 3 этапа. Первый этап — это НИР с элементами ОКР. Целями данного этапа являются: доработка, а там где научно-технологические заделы минимальны, фактически создание критических технологий рентгеновской литографии; выявление основных проблем по всем ключевым технологиям и выработка предложений по коррекции технических решений, формирование кооперационных связей и списка оборудования необходимого для решения задач второго этапа; создание экспериментального образца литографа для тестирования всех элементов литографа в реальном технологическом процессе, разработка резистов и отработка технологии формирования наноструктур методом рентгеновской литографии.

Целями второго этапа являются: создание опытного образца высокопроизводительного литографа с шестизеркальным проекционным объективом, мульти-киловаттной лазерной системой, системой сканирования для пластин $\varnothing 200/300$ мм; интеграция рентгеновской литографии в высокопроизводительную линейку производства передовых отечественных чипов; создание кооперационных цепочек для производства основных элементов и систем литографа.

Результатами этапа станут создание опытного образца литографа с производительностью более 60 пластин $\varnothing 200$ мм; интеграция рентгеновской литографии в технологическую цепочку производства чипов на передовой отечественной фабрике, позволяющие использовать эту технологию при производстве критических, с минимальными то-

пологическими нормами, слоев; формулирование технического задания и технико-экономического обоснования на опытный образец литографа для индустриальных применений.

Третий этап предполагает создание литографа, адаптированного к эксплуатации на фабрике, с производительностью больше 60 пластин диаметром 300 мм в час, организацию серийного производства литографов в России.

Важным для дальнейших перспектив этой передовой технологии литографии является создание в России научно-технического центра для исследований и разработок в области рентгеновской литографии.

ВЫВОДЫ

EUV литография на длине волны 13.5 нм, несмотря на свою молодость, в индустрии применяется с конца 2018 г., тем не менее, стала одной из ключевых технологий при производстве чипов с передовыми технологическими нормами. Производство EUV литографов и сопутствующего оборудования уже обеспечивает около 50% выручки компании ASML — мирового лидера в производстве литографического оборудования и единственного для EUV литографии. Однако, развиваемая ими концепция достижения максимальной производительности литографического процесса привела к экстремально высокой стоимости оборудования и его эксплуатации. Это резко ограничило число компаний, способных использовать эту технологию. Технически повторить разработку ASML представляется маловероятным, да и использование подобного оборудования для отечественного рынка чипов с его ограниченным объемом представляется не целесообразным.

В данной работе предлагается новая концепция рентгеновской литографии, основанная на ряде инновационных решениях, которые приведут к существенному снижению энергетики литографа, габаритных размеров, стоимости оборудования и его пользования при сохранении пространственного разрешения и производительности на уровне литографа от компании ASML. Приводится обоснование реализуемости предложенной концепции, которая базируется на почти 30-ти летней вовлеченности коллектива ИФМ РАН в разработку по EUV литографии, а также на результатах последних лет в области источника рентгеновского излучения, оптики дифракционного качества и многослойных рентгеновских зеркал на длину волны 11.2 нм. На основе предложенной концепции разработана дорожная карта развития рентгеновской литографии в РФ.

Реализация предлагаемой концепции и дорожной карты развития рентгеновской литографии за счет новых решений позволит в разумные сроки создать в РФ собственные современные нанолитографические установки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания FFUF-2021–0022.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор посвящает эту статью ушедшему в 2024 г. из жизни д.ф.-м.н., член.-корр. РАН Салашенко Н.Н., основателю многослойной рентгеновской оптики в стране и отдавшему много сил для развития рентгеновской литографии. Также выражаю благодарность Красильнику З.Ф. за поддержку темы рентгеновской литографии и активные усилия по продвижению данного проекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reynolds G.O. A concept for a high resolution, optical lithographic system for producing one-half micron linewidths // Proc. SPIE. 1986. V. 633. P. 228–238.
2. Kim K., Chung U-In., Park Y., Lee J., Yeo L., Kim D. Extending the DRAM and FLASH memory technologies to 10 nm and beyond // Optical Microlithography XXV. Proc. SPIE. 2012. V. 8326. P. 46–56. <https://doi.org/10.1117/12.920053>.
3. Trichtkov A., Jeong S., and C. Kenyon C. Lithography Enabling for the 65 nm node gate layer patterning with Alternating PSM // Proc. SPIE. 2005. V. 5754. P. 215–225.
4. Hazelton A.J., Wakamoto S., Hirukawa S., McCallum M., Magome N., Ishikawa J., Lapeyre C., Guilmeau I., Barnola S., and S. Gaugiran S. Double patterning requirements for optical lithography and prospects for optical extension with double patterning // Proc. SPIE. 2008. V. 6924. P. 69240R.
5. Starikov A. Use of a single size square serif for variable print bias compensation in microlithography: method, design and practice // Proc. SPIE. 1989. V. 1088. P. 34–46.
6. Allenet T., Vockenhuber M., Yeh C.K., Santaclara J.G., van Lent-Protasov L., Ekinci Y., Kazazis D. EUV resist screening update: progress towards High-NA lithography // Advances in Patterning Materials and Processes XXXIX, edited by Daniel P. Sanders, Douglas Guerrero, Proc. SPIE. 2022. V. 12055. P. 120550F.
7. Duv lithography systems twinscan nxt: 2000i; <https://www.asml.com/en/products/duv-lithography-systems/twinscan-nxt2000i>
8. Kinoshita H., Kurihara K., Ishii Y., Torii Y. // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena. 1989. V. 7. № 6. P. 1648–1651. <https://doi.org/10.1116/1.584507>
9. Tichenor D.A., Ray-Chaudhuri A.K., Replogle W.C., Stulen R.H., Kubiak G.D., Rockett P.D., Klebanoff L.E., Jefferson K.J., Leung A.H., Wronosky J.B., Hale L.C., Chapman H.N., Taylor J.S., Foltz J.A., Montcalm C., Soufli R., Spiller E.A., Blaedel K.L., Sommargren G.E., Sweeney D.W., Naulleau P.P., Goldberg K.A., Gullikson E.M., Bokor J., Batson P.J., Attwood Jr.D.T., Jackson K.H., Hector S.D., Gwyn C.W., Yan P.Y. System integration and performance of the EUV engineering test stand // Proc. SPIE. 2001. V. 4343. P. 19.
10. Uzawa S., Kubo H., Miwa Y., Tsuji T., Morishima H. Path to the HVM in EUVL through the development and evaluation of the SFET // Emerging Lithographic Technologies XI.— SPIE. 2007. V. 6517. P. 72–81. <https://doi.org/10.1117/12.711650>
11. Meiling H., Boon E., Buzing N., Cummings K., Frijns O., Galloway J., Goethals M., Harned N., Hultermans B., de Jonge R., Kessels B., Kurz P., Lok S., Lowisch M., Mallman J., Pierson B., Ronse K., Ryan J., Smitt-Weaver E., Tittnich M., Wagner C., van Dijk A., Zimmermann J. Performance of the full field EUV systems // Emerging Lithographic Technologies XII.— SPIE. 2008. V. 6921. P. 171–183. <https://doi.org/10.1117/12.773259>
12. Volgunov D.G., Zabrodin I.G., Zakalov B.A., Zuev S.Yu., Kas'kov I.A., Kluekov E.B., Toropov M.N., and Chkhalo N.I. A Stand for a Projection EUV Nanolithographer—Multiplier with a Design Resolution of 30 nm // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2011. V. 75. № 1. P. 49–52.
13. Glatzel H., Ashworth D., Bremer M., Chin R., Cummings K., Girard L., Goldstein M., Gullikson E., Hudyma R., Kennon J., Kestner B., Marchetti L., Naulleau P., Soufli R., Spiller E. Projection Optics for Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL) Microfield Exposure Tools (METs) with a Numerical Aperture of 0.5 // Proc. SPIE Advanced Lithography. 2013. V. 8679. P. 42.
14. Watanabe T., Harada T., Yamakawa S. Fundamental research activities on EUV lithography at NewSUBARU synchrotron light facility // Proc. SPIE. 2021. V. 11908. P. 1190807. doi: 10.1117/12.2600896
15. Optical and EUV Nanolithography XXXVI, edited by Anna Lio // Proc. SPIE. 2023. V. 12494. P. 1249406.
16. Макушкин М., Мартынов В. Нужен ли России самодельный EUV-нанолитограф // Фотоника. 2010. № 4. С. 6–13.
17. Wu B. and Kumar A. Extreme ultraviolet lithography and three dimensional integrated circuits—A review // Appl. Phys. Rev. 2014. V. 1. P. 011104.
18. van de Kerkhof M., Jasper H., Levasier L., Peeters R., van Es R., Bosker J.W., Zdravkov A., Lenderink E., Evangelista F., Broman P., Bilski B., Last T. Enabling sub-10nm node lithography: presenting the NXE: 3400B EUV scanner // Proc. SPIE. 2017. V. 10143. P. 101430D.
19. Levinson H. Principles of Lithography, 4th Edition. SPIE. 2019. P. 524. <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/03/15/133578>
20. Chkhalo N.I., Durov K.V., Nechay A.N., Perekalov A.A., Polkovnikov V.N., and Salashchenko N.N. On the Prospects of Lithography in the Region of Wavelengths Shorter than 13.5 nm // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2023. V. 17. No 1. P. S226–S232.
21. Chkhalo N.I., and Salashchenko N.N. Current State and Prospects for the Development of X-Ray Lithography // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2023. V. 17. No 1. P. 307–316. DOI: 10.1134/S1027451022060349

22. Wood O., Arnold J., Brunner T., Burkhardt M. Insertion strategy for EUV lithography // *Proc. of SPIE*. 2012. V. 8322. P. 832203. DOI: 10.1117/12.916292
23. Yakshin A.E., van de Kruijs R.W.E., Nedelcu I., Zoethout E., Louis E., Bijkerk F., Enkisch H., and Müllender S. Enhanced reflectance of interface engineered Mo/Si multilayers produced by thermal particle deposition // *Proc. SPIE*. 2007. V. 6517. P. 651701.
24. Chkhalo N., Gusev S., Nechay A., Pariev D., Polkovnikov V., Salashchenko N., Schäfers F., Sertsu M., Sokolov A., Svechnikov M., and Tatarsky D. High reflective Mo/Be/Si multilayers for the EUV lithography // *Optics Letters*. 2017. V. 42. Iss. 24. P. 5070–5073. <https://doi.org/10.1364/OL.42.005070>
25. Fomenkov I., Brandt D., Ershov A., Schafgans A., Tao Y., Vaschenko G., Rokitski S., Kats M., Vargas M., Purvis M., Rafac R., La Fontaine B., De Dea S., La Forge A., Stewart J., Chang S., Graham M., Riggs D., Taylor T., Abraham M., and Brown D. Light sources for high-volume manufacturing EUV lithography: technology, performance, and power scaling // *Advanced Optical Technologies*. 2017. V. 6. No 3–4. P. 173–186. <https://doi.org/10.1515/aot-2017-0029>
26. Абраменко Д.Б., Анциферов П.С., Астахов Д.И., Виноходов А.Ю., Вичев И.Ю., Гаязов Р.Р., Грушин А.С., Дорохин Л.А., Иванов В.В., Ким Д.А., Кошелев К.Н., Крайнов П.В., Кривокорытов М.С., Кривиц В.М., Лакатош Б.В., Лап А.А., Медведев В.В., Рябцев А.Н., Сидельников Ю.В., Снегирев Е.П., Соломянная А.Д., Спиридонов М.В., Цыгвинцев И.П., Якушев О.Ф., Якушкин А.А. Плазменные источники экстремального ультрафиолетового излучения для литографии и сопутствующих технологических процессов (к 50-летию Института спектроскопии РАН // *УФН*. 2019. Т. 189. № 3. С. 323–334. DOI: 10.3367/UFN.2018.06.038447
27. Brandt D.C., Fomenkov I.V., Farrar N.R., La Fontaine B., Myers D.W., Brown D.J., Ershov A.I., Bowering N.R., Riggs D.J., Rafac R.J., De Dea S., Peeters R., Meiling H., Hamed N., Smith D., Pirati A., Kazinczi R. LPP EUV source readiness for NXE3300 B // *Proc. of SPIE, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography V*, Eds. by O.R. Wood II and E.M. Panning. 2014. V. 9048. P. 90480C-1.
28. van de Kerkhof M., Jasper H., Levasier L., Peeters R., van Es R., Bosker J.W., Zdravkov A., Lenderink E., Evangelista F., Broman P., Bilski B., Last T. Enabling sub-10nm node lithography: presenting the NXE:3400B EUV scanner // *Proc. SPIE*. 2017. V. 10143. P. 101430D.
29. Зуев С.Ю., Лопатин А.Я., Лучин В.И., Салащенко Н.Н., Цыбин Н.Н., Чхало Н.И. Защитные свободновисящие пленки для установок проекционной литографии экстремального ультрафиолетового диапазона // *Микроэлектроника*. 2023. Т. 52. № 5. С. 354–366. EDN: <https://elibrary.ru/QAIWGO>, DOI:10.31857/S0544126923700539
30. Nan Lin, Yunyi Chen, Xin Wei, Wenhe Yang and Yuxin Leng. Spectral purity systems applied for Laser-produced plasma Extreme UltraViolet (LPP-EUV) lithography source: a review // *High Power Laser Science and Engineering*. 2023. V. 11. No 5. P. 05000e64.
31. Platonov Y., Kriese M., Crucet R., Li Y., Martynov V., Jiang L., Rodriguez J., Mueller U., Daniel J., Khatri S., Magruder A., Grantham S., Tarrio C., Lucatorto T.B. Collector development with IR suppression and EUVL optics refurbishment at RIT // <https://www.euvlitho.com/2013/S30.pdf> (Dublin, November 3–7, 2013).
32. Pirati A., Peeters R., Smith D., Lok S., van Noordenburg M., van Es R., Verhoeven E., Meijer H., Minnaert A., van der Horst J.W., Meiling H., Mallmann J., Wagner C., Steldraijer J., Fisser G., Finders J., Zoldesi C., Stamm U., Boom H., Brandt D., Brown D., Fomenkov I., Purvis M. EUV lithography performance for manufacturing: status and outlook // *Proc. of SPIE, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VII*, Eds. by E.M. Panning and K.A. Goldberg. 2016. V. 9776. P. 97760A-1. <https://doi.org/10.1117/12.2220423>
33. Naulleau P.P., Niakoula D., and Zhang G. System-level lineedge roughness limits in extreme ultraviolet lithography // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2008. V. 26(4). P. 1289–1293.
34. Торопов М.Н., Ахсаханян А.А., Зорина М.В., Салащенко Н.Н., Чхало Н.И., Токунов Ю.М. Получение гладких высокоточных поверхностей методом механического притира // *Журнал технической физики*. 2020. Т. 90. Вып. 11. С. 1958–1964.
35. Чхало Н.И., Малышев И.В., Пестов А.Е., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н., Торопов М.Н. Рентгеновская оптика дифракционного качества: технология, метрология, применения // *УФН*. 2020. Т. 190 (1). С. 74–91. <https://doi.org/10.3367/UFN.2019.05.038601>
36. Akhsakhalyan A.A., Chkhalo N.I., Kumar N., Malyshev I.V., Pestov A.E., Salashchenko N.N., Toropov M.N., Ulasevich B.A., Kuzin S.V. Compact high-aperture interferometer with a diffractive reference wave for high-precision referenceless aberration measurements of optical elements and systems // *Precision Engineering*. 2021. V. 72. P. 330–339. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.05.011>
37. Toropov M., Chkhalo N., Malyshev I., and Salashchenko N. High-aperture low-coherence interferometer with a diffraction reference wave // *Optics Letters*. 2022. V. 47. No 14. P. 3459–3462. <https://doi.org/10.1364/OL.460708>
38. Chkhalo N.I., Salashchenko N.N. and Zorina M.V. Note: A stand on the basis of atomic force microscope to study substrates for imaging optics // *Rev. Sci. Instrum.* 2015. V. 86. P. 016102. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4905336>.
39. Chkhalo N.I., Kaskov I.A., Malyshev I.V., Mikhaylenko M.S., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Toropov M.N., Zabrodin I.G. High-performance facility and techniques for high-precision machining of optical components by ion beams // *Precision Engineering*. 2017. V. 48. P. 338–346. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.004>
40. Smerlin R.M., Chkhalo N.I., Drozdov M.N., Garakhin S.A., Zuev S.Yu., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., and Yunin P.A. Influence of Mo interlayers on the microstructure of layers and reflective characteristics of Ru/Be multilayer mirrors // *Opt. Express*. 2022. V. 30. No 26. P. 46749–46761.
41. Chkhalo N.I., Garakhin S.A., Golubev S.V., Lopatin A.Ya., Nechay A.N., Pestov A.E., Salashchenko N.N., Toropov M.N., Tsybin N.N., Vodopyanov A.V., and Yulin S. A double-stream Xe: He jet plasma emission in the

- vicinity of 6.7 nm // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 112. P. 221101.
doi: 10.1063/1.5016471
42. Chkhalo N.I., Garakhin S.A., Lopatin A.Ya., Nechay A.N., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Tsybin N.N., and Zuev S.Yu. Conversion efficiency of a laser-plasma source based on a Xe jet in the vicinity of a wavelength of 11 nm // AIP Advances. 2018. V. 8. P. 105003.
doi: 10.1063/1.5048288
43. Nechay A.N., Perekalov A.A., Chkhalo N.I., Salashchenko N.N., Korepanov M.A., Koroleva M.R. Emission properties of targets based on shock waves excited by pulsed laser radiation // Optics & Laser Technology. 2021. V. 142. P. 107250.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107250>
44. Guseva V.E., Nechay A.N., Perekalov A.A., Salashchenko N.N., Chkhalo N.I. Investigation of emission spectra of plasma generated by laser pulses on Xe gas-jet targets // Applied Physics B. 2023. V. 129. No 155.
<https://doi.org/10.1007/s00340-023-08095-8>
45. Kalmykov S.G., Butorin P.S., Sasin M.T. Xe laser-plasma EUV radiation source with a wavelength near 11 nm—Optimization and conversion efficiency // JAP. 2019. V. 126 (10). P. 103301.
46. Волков М.Р., Кузнецов И.И., Мухин И.Б., Палашов О.В. Дисковые квантроны на основе Yb: YAG для лазеров мульткиловаттной средней мощности // Квантовая электроника. 2019. Т. 49 № 4. С. 354–357.
47. Chkhalo N.I., Golubev S.V., Mansfeld D., Salashchenko N.N., Sjmaenok L.A., and Vodopyanov A.V. Source for extreme ultraviolet lithography based on plasma sustained by millimeter-wave gyrotron radiation // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 2012. V. 11. P. 021123. DOI: 10.1117/1.JMM.11.2.021123
48. Vodop'yanov A.V., Garakhin S.A., Zabrodin I.G., Zuev S.Yu., Lopatin A.Ya., Nechay A.N., Pestov A.E., Perekalov A.A., Pleshkov R.S., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Smertin R.M., Ulasevich B.A., N.I. Chkhalo N.I. Measurements of the absolute intensities of spectral lines of Kr, Ar, and O ions in the wavelength range of 10–18 nm under pulsed laser excitation // Quantum Electronics. 2021. V. 51 (8) P. 700–707.
49. Антюшин Е.С., Ахсаханян А.А., Зуев С.Ю., Лопатин А.Я., Малышев И.В., Нечай А.Н., Перекалов А.А., Пестов А.Е., Салащенко Н.Н., Торопов М.Н., Уласевич Б.А., Цыбин Н.Н., Чхало Н.И., Соловьев А.А., Стародубцев М.В. Система визуализации плазменного факела бетатронного источника рентгеновского излучения // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 8. С. 1202–1206.
DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52784.80–22
50. Bulgakova S.A., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Mazanova L.M., Molodnjakov S.A., Salashchenko N.N. PMMA-based resists for a spectral range near 13 nm // Nucl. Instrum. and Meth. 2000. A448. P. 487–492.
51. Булгакова С.А., Гурова Д.А., Зайцев С.Д., Куликов Е.Е., Скороходов Е.В., Торопов М.Н., Пестов А.Е., Чхало Н.И., Салащенко Н.Н. Влияние полимерной матрицы и фотогенератора кислоты на литографические свойства химически усиленного фоторезиста // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 6. С. 419–428.
52. Min Z., Baoqin C., Changqing X., Ming L., and Jiebing N. Study of process of HSQ in electron beam lithography // 2010 IEEE 5th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Xiamen, China. 2010. P. 1021–1024. doi: 10.1109/NEMS.2010.5592584.
53. Gusev S.A., Zuev S.Yu., Klimov A.Yu., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Rogov V.V., Salashchenko N.N., Skorokhodov E.V., Toropov M.N., and Chkhalo N.I. Reflective Mask for Projection Lithography Operating at a Wavelength of 13.5 nm // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2012. V. 6. No 4. P. 568–573.
54. Chkhalo N.I., Drozdov M.N., Kluev E.B., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Salashchenko N.N., Tsybin N.N., Sjmaenok L.A., Banine V.E., Yakunin A.M. Free-standing spectral purity filters for extreme ultraviolet lithography // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 2012. V. 11. No 2. P. 021115
<https://doi.org/10.1117/1.JMM.11.2.021115>
55. Chkhalo N.I., Drozdov M.N., Kluev E.B., Kuzin S.V., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Salashchenko N.N., Tsybin N.N., Zuev S.Yu. Thin film multilayer filters for solar EUV telescopes // Applied Optics. 2016. V. 55 (17). P. 4683–4690. doi: 10.1364/AO.55.004683
56. Chkhalo N.I., Kluev E.B., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Salashchenko N.N., Sjmaenok L.A., N.N. Tsybin N.N. Study of heat induced changes in elastic properties of multilayer Mo/ZrSi2 membranes // Thin Solid Films. 2017. V. 631. P. 93–98.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.04.015>
57. Malyshev I.V., Reunov D.G., Chkhalo N.I., Toropov M.N., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Tsybin N.N., Lopatin A.Ya., Chernyshev A.K., Mikhailenko M.S., Smertin R.M., Pleshkov R.S., and Shirokova O.M. High-aperture EUV microscope using multilayer mirrors and a 3D reconstruction algorithm based on z-tomography // Optics Express. 2022. V. 30. No 26. P. 47567–47586.
<https://doi.org/10.1364/OE.475032>

NEW CONCEPT FOR THE DEVELOPMENT OF HIGH-PERFORMANCE X-RAY LITHOGRAPHY

© 2024 N. I. Chkhalo^{1,*}

¹ Institute of Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences is a branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center Institute of Applied Physics named after. A. V. Gaponova-Grekhov Russian Academy of Sciences", Nizhny Novgorod region, Russia

*E-mail: chkhalo@ipmras.ru

A brief overview of the current state of extreme ultraviolet (UV, EUV in English transcription), or, also, X-ray lithography at a wavelength of 13.5 nm in the world is given. The problems and prospects for the development of this technology in the coming years are discussed. A new concept of X-ray lithography in Russia is being developed at the Institute of Microstructure Physics of the Russian Academy of Sciences. The substantiation of the advantages and prospects of the feasibility of lithography at a wavelength new to lithography of 11.2 nm is given. A brief overview of the domestic level of development of critical technologies necessary for the creation of an X-ray lithograph is given.

Keywords: EUV lithography, X-ray optics, X-ray source, wavelength 11.2 nm, multilayer mirrors

REFERENCES

1. Reynolds G.O. A concept for a high resolution, optical lithographic system for producing one-half micron linewidths // Proc. SPIE. 1986. V. 633. P. 228–238.
2. Kim K., Chung U-In., Park Y., Lee J., Yeo L., Kim D. Extending the DRAM and FLASH memory technologies to 10 nm and beyond // Optical Microlithography XXV. Proc. SPIE. 2012. V. 8326. P. 46–56. <https://doi.org/10.1117/12.920053>.
3. Trichtkov A., Jeong S., and C. Kenyon C. Lithography Enabling for the 65 nm node gate layer patterning with Alternating PSM // Proc. SPIE. 2005. V. 5754. P. 215–225.
4. Hazelton A.J., Wakamoto S., Hirukawa S., McCallum M., Magome N., Ishikawa J., Lapeyre C., Guilmeau I., Barnola S., and S. Gaugiran S. Double patterning requirements for optical lithography and prospects for optical extension with double patterning // Proc. SPIE. 2008. V. 6924. P. 69240R.
5. Starikov A. Use of a single size square serif for variable print bias compensation in microlithography: method, design and practice // Proc. SPIE. 1989. V. 1088. P. 34–46.
6. Allenet T., Vockenhuber M., Yeh C.K., Santaclara J.G., van Lent-Protasov L., Ekinci Y., Kazazis D. EUV resist screening update: progress towards High-NA lithography // Advances in Patterning Materials and Processes XXXIX, edited by Daniel P. Sanders, Douglas Guerrero, Proc. SPIE. 2022. V. 12055. P. 120550F.
7. Duv lithography systems twinscan nxt: 2000i; <https://www.asml.com/en/products/duv-lithography-systems/twinscan-nxt2000i>
8. Kinoshita H., Kurihara K., Ishii Y., Torii Y. // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena. 1989. V. 7. № 6. P. 1648–1651. <https://doi.org/10.1116/1.584507>
9. Tichenor D.A., Ray-Chaudhuri A.K., Replogle W.C., Stulen R.H., Kubiak G.D., Rockett P.D., Klebanoff L.E., Jefferson K.J., Leung A.H., Wronosky J.B., Hale L. C., Chapman H. N., Taylor J. S., Foltz J.A., Montcalm C., Soufli R., Spiller E.A., Blaedel K.L., Sommargren G.E., Sweeney D.W., Naulleau P.P., Goldberg K.A., Gullikson E.M., Bokor J., Batson P.J., Attwood Jr. D.T., Jackson K.H., Hector S.D., Gwyn C.W., Yan P.Y. System integration and performance of the EUV engineering test stand // Proc. SPIE. 2001. V. 4343. P. 19.
10. Uzawa S., Kubo H., Miwa Y., Tsuji T., Morishima H. Path to the HVM in EUVL through the development and evaluation of the SFET // Emerging Lithographic Technologies XI. — SPIE. 2007. V. 6517. P. 72–81. <https://doi.org/10.1117/12.711650>
11. Meiling H., Boon E., Buzing N., Cummings K., Frijns O., Galloway J., Goethals M., Harned N., Hultermans B., de Jonge R., Kessels B., Kurz P., Lok S., Lowisch M., Mallman J., Pierson B., Ronse K., Ryan J., Smitt-Weaver E., Tittnich M., Wagner C., van Dijk A., Zimmermann J. Performance of the full field EUV systems // Emerging Lithographic Technologies XII. — SPIE. 2008. V. 6921. P. 171–183. <https://doi.org/10.1117/12.773259>
12. Volgunov D.G., Zabrodin I.G., Zakalov B.A., Zuev S.Yu., Kas'kov I.A., Klunov E.B., Toropov M.N., and Chkhalo N.I. A Stand for a Projection EUV Nanolithographer—Multiplier with a Design Resolution of 30 nm // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2011. V. 75. № 1. P. 49–52.
13. Glatzel H., Ashworth D., Bremer M., Chin R., Cummings K., Girard L., Goldstein M., Gullikson E., Hudyma R., Kennon J., Kestner B., Marchetti L., Naulleau P., Soufli R., Spiller E. Projection Optics for Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL) Microfield Exposure Tools (METs) with a Numerical Aperture of 0.5 // Proc. SPIE Advanced Lithography. 2013. V. 8679. P. 42.
14. Watanabe T., Harada T., Yamakawa S. Fundamental research activities on EUV lithography at NewSUBARU synchrotron light facility // Proc. SPIE. 2021. V. 11908. P. 1190807. doi: 10.1117/12.2600896
15. Optical and EUV Nanolithography XXXVI, edited by Anna Lio // Proc. SPIE. 2023. V. 12494. P. 1249406.
16. Makushkin M., Martynov V. Does Russia need a homemade EUV nanolithography // Photonics. 2010. #4. P. 6–13. (In Russian)

17. Wu B. and Kumar A. Extreme ultraviolet lithography and three dimensional integrated circuits-A review // Appl. Phys. Rew. 2014. V. 1. P. 011104.
18. van de Kerkhof M., Jasper H., Levasier L., Peeters R., van Es R., Bosker J.W., Zdravkov A., Lenderink E., Evangelista F., Broman P., Bilski B., Last T. Enabling sub-10nm node lithography: presenting the NXE: 3400B EUV scanner // Proc. SPIE. 2017. V. 10143. P. 101430D.
19. Levinson H. Principles of Lithography, 4th Edition. SPIE. 2019. P. 524. <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/03/15/133578>
20. Chkhalo N.I., Durov K.V., Nechay A.N., Perekalov A.A., Polkovnikov V.N., and Salashchenko N.N. On the Prospects of Lithography in the Region of Wavelengths Shorter than 13.5 nm // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2023. V. 17. No. 1. P. S226–S232.
21. Chkhalo N.I., and Salashchenko N.N. Current State and Prospects for the Development of X-Ray Lithography // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2023. V. 17. No. 1. P. 307–316. DOI: 10.1134/S1027451022060349
22. Wood O., Arnold J., Brunner T., Burkhardt M. Insertion strategy for EUV lithography // Proc. of SPIE. 2012. V. 8322. P. 832203. DOI: 10.1117/12.916292
23. Yakshin A.E., van de Kruijs R.W.E., Nedelcu I., Zoethout E., Louis E., Bijkerk F., Enkisch H., and Müllender S. Enhanced reflectance of interface engineered Mo/Si multilayers produced by thermal particle deposition // Proc. SPIE. 2007. V. 6517. P. 651701.
24. Chkhalo N., Gusev S., Nechay A., Pariev D., Polkovnikov V., Salashchenko N., Schäfers F., Sertsu M., Sokolov A., Svechnikov M., and Tatarsky D. High reflective Mo/Be/Si multilayers for the EUV lithography // Optics Letters. 2017. V. 42. Iss. 24. P. 5070–5073. <https://doi.org/10.1364/OL.42.005070>
25. Fomenkov I., Brandt D., Ershov A., Schafgans A., Tao Y., Vaschenko G., Rokitski S., Kats M., Vargas M., Purvis M., Rafac R., La Fontaine B., De Dea S., LaForge A., Stewart J., Chang S., Graham M., Riggs D., Taylor T., Abraham M., and Brown D. Light sources for high-volume manufacturing EUV lithography: technology, performance, and power scaling // Advanced Optical Technologies. 2017. V. 6. No. 3–4. P. 173–186. <https://doi.org/10.1515/aot-2017-0029>
26. D.B. Abramenko, P.S. Antsiferov, D.I. Astakhov, A.Yu. Vinokhodov, I.Yu. Vichev, R.R. Gayazov, A.S. Grushin, L.A. Dorokhin, V.V. Ivanov, D.A. Kim, K.N. Koshelev, P.V. Krainov, M.S. Krivokorytov, V.M. Krivtsun, B.V. Lakatosh, A.A. Lash, V.V. Medvedev, A.N. Ryabtsev, Yu.V. Sidel'nikov, E.P. Snegirev, A.D. Solomyannaya, M.V. Spiridonov, I.P. Tsygintsev, O.F. Yakushev, A.A. Yakushkin “Plasma-based sources of extreme ultraviolet radiation for lithography and mask inspection” Phys. Usp. 62 304–314 (2019)
27. Brandt D.C., Fomenkov I.V., Farrar N.R., La Fontaine B., Myers D.W., Brown D.J., Ershov A.I., Bowering N.R., Riggs D.J., Rafac R.J., De Dea S., Peeters R., Meiling H., Hamed N., Smith D., Pirati A., Kazinczi R. LPP EUV source readiness for NXE 3300 B // Proc. of SPIE, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography V', Eds. by O. R. Wood II and E. M. Panning. 2014. V. 9048. P. 90480C–1.
28. van de Kerkhof M., Jasper H., Levasier L., Peeters R., van Es R., Bosker J.W., Zdravkov A., Lenderink E., Evangelista F., Broman P., Bilski B., Last T. Enabling sub-10nm node lithography: presenting the NXE:3400B EUV scanner // Proc. SPIE. 2017. V. 10143. P. 101430D.
29. Yu. Zuev, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, N.N. Salashchenko, N.N. Tsybin, and N.I. Chkhalo, Protective free-standing films for projection lithography installations in the extreme UV, Russian Microelectronics, 2023, Vol. 52, No. 5, pp. 344–355 DOI: 10.1134/S1063739723700622.
30. Nan Lin, Yunyi Chen, Xin Wei, Wenhe Yang and Yuxin Leng. Spectral purity systems applied for Laser-produced plasma Extreme UltraViolet (LPP-EUV) lithography source: a review // High Power Laser Science and Engineering. 2023. V. 11. No. 5. P. 05000e64.
31. Platonov Y., Kriese M., Crucet R., Li Y., Martynov V., Jiang L., Rodriguez J., Mueller U., Daniel J., Khatri S., Magruder A., Grantham S., Tarrio C., Lucatorto T.B. Collector development with IR suppression and EUVL optics refurbishment at RIT // <https://www.euvlitho.com/2013/S30.pdf> (Dublin, November 3–7, 2013).
32. Pirati A., Peeters R., Smith D., Lok S., van Noordenburg M., van Es R., Verhoeven E., Meijer H., Minnaert A., van der Horst J.W., Meiling H., Mallmann J., Wagner C., Stoeldraijer J., Fisser G., Finders J., Zoldesi C., Stamm U., Boom H., Brandt D., Brown D., Fomenkov I., Purvis M. EUV lithography performance for manufacturing: status and outlook // Proc. of SPIE, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VII, Eds. by E. M. Panning and K. A. Goldberg. 2016. V. 9776. P. 97760A–1. <https://doi.org/10.1117/12.2220423>
33. Naulleau P.P., Niakoula D., and Zhang G. System-level line-edge roughness limits in extreme ultraviolet lithography // J. Vac. Sci. Technol. B. 2008. V. 26(4). P. 1289–1293.
34. M.N. Toropov, A.A. Akhsakhalyan, M.V. Zorina, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo, and Yu.M. Tokunov / Obtaining of Smooth High-Precision Surfaces by the Mechanical Lapping Method // Technical Physics, 2020, Vol. 65, No 11, pp. 1873–1879.
35. N.I. Chkhalo, I.V. Malyshev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov. Diffraction limited X-ray optics: technology, metrology, applications. Physics-Uspekhi 63 (1) 67–82 (2020). DOI: 10.3367/UFNe.2019.05.038601
36. Akhsakhalyan A.A., Chkhalo N.I., Kumar N., Malyshev I.V., Pestov A.E., Salashchenko N.N., Toropov M.N., Ulasevich B.A., Kuzin S.V. Compact high-aperture interferometer with a diffractive reference wave for high-precision referenceless aberration measurements of optical elements and systems // Precision Engineering. 2021. V. 72. P. 330–339. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.05.011>
37. Toropov M., Chkhalo N., Malyshev I., and Salashchenko N. High-aperture low-coherence interferometer with a diffraction reference wave // Optics Letters. 2022. V. 47. No. 14. P. 3459–3462. <https://doi.org/10.1364/OL.460708>
38. Chkhalo N.I., Salashchenko N.N. and Zorina M.V. Note: A stand on the basis of atomic force microscope to study substrates for imaging optics // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 016102. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4905336>.

39. Chkhalo N.I., Kaskov I.A., Malyshev I.V., Mikhaylenko M.S., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Toropov M.N., Zabrodin I.G. High-performance facility and techniques for high-precision machining of optical components by ion beams // *Precision Engineering*. 2017. V. 48. P. 338–346. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.004>
40. Smertin R.M., Chkhalo N.I., Drozdov M.N., Garakhin S.A., Zuev S.Yu., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., and Yunin P.A. Influence of Mo interlayers on the microstructure of layers and reflective characteristics of Ru/Be multilayer mirrors // *Opt. Express*. 2022. V. 30. No. 26. P. 46749–46761.
41. Chkhalo N.I., Garakhin S.A., Golubev S.V., Lopatin A.Ya., Nechay A.N., Pestov A.E., Salashchenko N.N., Toropov M.N., Tsybin N.N., Vodopyanov A.V., and Yulin S. A double-stream Xe:He jet plasma emission in the vicinity of 6.7 nm // *Appl. Phys. Lett.* 2018. V. 112. P. 221101. doi: 10.1063/1.5016471
42. Chkhalo N.I., Garakhin S.A., Lopatin A.Ya., Nechay A.N., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Tsybin N.N., and Zuev S.Yu. Conversion efficiency of a laser-plasma source based on a Xe jet in the vicinity of a wavelength of 11 nm // *AIP Advances*. 2018. V. 8. P. 105003. doi: 10.1063/1.5048288
43. Nechay A.N., Perekalov A.A., Chkhalo N.I., Salashchenko N.N., Korepanov M.A., Koroleva M.R. Emission properties of targets based on shock waves excited by pulsed laser radiation // *Optics & Laser Technology*. 2021. V. 142. P. 107250. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107250>
44. Guseva V.E., Nechay A.N., Perekalov A.A., Salashchenko N.N., Chkhalo N.I. Investigation of emission spectra of plasma generated by laser pulses on Xe gas-jet targets // *Applied Physics B*. 2023. V. 129. No. 155. <https://doi.org/10.1007/s00340-023-08095-8>
45. Kalmykov S.G., Butorin P.S., Sasin M.T. Xe laser-plasma EUV radiation source with a wavelength near 11 nm – Optimization and conversion efficiency // *JAP*. 2019. V. 126 (10). P. 103301.
46. M.R. Volkov, I.I. Kuznetsov, I.B. Mukhin, O.V. Palashov, A.V. Konyashchenko, S.Yu. Tenyakov and R.A. Liventsov, Thin-rod active elements for amplification of femtosecond pulses. 2019 *Quantum Electron.* V. 49 P. 350. DOI: 10.1070/QEL16964.
47. Chkhalo N.I., Golubev S.V., Mansfeld D., Salashchenko N.N., Sjmaenok L.A., and Vodopyanov A.V. Source for extreme ultraviolet lithography based on plasma sustained by millimeter-wave gyrotron radiation // *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*. 2012. V. 11. P. 021123. DOI: 10.1117/1.JMM.11.2.021123
48. Vodopyanov A.V., Garakhin S.A., Zabrodin I.G., Zuev S.Yu., Lopatin A.Ya., Nechay A.N., Pestov A.E., Perekalov A.A., Pleshkov R.S., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Smertin R.M., Ulasevich B.A., Chkhalo N.I. Measurements of the absolute intensities of spectral lines of Kr, Ar, and O ions in the wavelength range of 10–18 nm under pulsed laser excitation // *Quantum Electronics*. 2021. V. 51 (8) P. 700–707.
49. Antyushin E.S., Akhsakhalyan A.A., Zuev S.Yu., Lopatin A.Ya., Malyshev I.V., Nachay A.N., Perekalov A.A., Pestov A.E., Salashchenko N.N., Toropov M.N., Ulasevich B.A., Tsybin N.N., Chkhalo N.I., Soloviev A.A., Starodubtsev M.V. Imaging system of a plasma torch of a Betatron X-ray source. *Technical Physics*, 2022, Vol. 67, No. 8. P. 1018–1022. DOI: 10.21883/TP.2022.08.54566.80-22
50. Bulgakova S.A., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Mazanova L.M., Molodnjakov S.A., Salashchenko N.N. PMMA-based resists for a spectral range near 13 nm // *Nucl. Instrum. and Meth.* 2000. A448. P. 487–492.
51. Bulgakova S.A., Gurova D.A., Zaitsev S.D., Kulikov E.E., Skorokhodov E.V., Toropov M.N., Pestov A.E., Chkhalo N.I., Salashchenko N.N. Influence of the polymer matrix and acid photogenerator on the lithographic properties of chemically enhanced photoresist // *Microelectronics*. 2014. Vol. 43. No. 6. P. 419–428. (In Russian)
52. Min Z., Baoqin C., Changqing X., Ming L., and Jiebing N. Study of process of HSQ in electron beam lithography // 2010 IEEE 5th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Xiamen, China. 2010. P. 1021–1024. doi: 10.1109/NEMS.2010.5592584.
53. Gusev S.A., Zuev S.Yu., Klimov A.Yu., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Rogov V.V., Salashchenko N.N., Skorokhodov E., Toropov M.N., and Chkhalo N.I. Reflective Mask for Projection Lithography Operating at a Wavelength of 13.5 nm // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2012. V. 6. No. 4. P. 568–573.
54. Chkhalo N.I., Drozdov M.N., Kluev E.B., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Salashchenko N.N., Tsybin N.N., Sjmaenok L.A., Banine V.E., Yakunin A.M. Free-standing spectral purity filters for extreme ultraviolet lithography // *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*. 2012. V. 11. No. 2. P. 021115. <https://doi.org/10.1117/1.JMM.11.2.021115>
55. Chkhalo N.I., Drozdov M.N., Kluev E.B., Kuzin S.V., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Salashchenko N.N., Tsybin N.N., Zuev S.Yu. Thin film multilayer filters for solar EUV telescopes // *Applied Optics*. 2016. V. 55 (17). P. 4683–4690. doi: 10.1364/AO.55.004683
56. Chkhalo N.I., Kluev E.B., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Salashchenko N.N., Sjmaenok L.A., Tsybin N.N. Study of heat induced changes in elastic properties of multilayer Mo/ZrSi₂ membranes // *Thin Solid Films*. 2017. V. 631. P. 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.04.015>
57. Malyshev I.V., Reunov D.G., Chkhalo N.I., Toropov M.N., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Tsybin N.N., Lopatin A.Ya., Chernyshev A.K., Mikhailenko M.S., Smertin R.M., Pleshkov R.S., and Shirokova O.M. High-aperture EUV microscope using multilayer mirrors and a 3D reconstruction algorithm based on z-tomography // *Optics Express*. 2022. V. 30. No. 26. P. 47567–47586. <https://doi.org/10.1364/OE.475032>

УДК 537.311.32:538.911

МЕХАНИЗМЫ ТРАНСПОРТА И ПОЛЕВОЙ ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ В 2D НЕКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ УГЛЕРОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМ БАРЬЕРОМ

© 2024 г. Г. Я. Красников¹, В. П. Бокарев^{1,*}, Г. С. Теплов¹, Р. К. Яфаров^{2,**}¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Зеленоград, Россия² Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Саратов, Россия

*E-mail: vbokarev@niime.ru

**E-mail: pirpc@yandex.ru

Поступила в редакцию 02 мая 2024 г.

После доработки 10 июня 2024 г.

Принята к публикации 10 июня 2024 г.

Исследовано влияние ширины квантового барьера в виде туннельно тонкого обедненного носителями заряда углеродного слоя в обогащенной некристаллической углеродной матрице на бездиссипативный транспорт и полевою эмиссию электронов. Показано, что нелинейности поперечных тока в гетероструктурах при статических низкополевых электрических воздействиях и параметров вольт-амперных характеристик полевой эмиссии электронов в сильных импульсных электрических полях микросекундной длительности определяются параметрами квантового барьера и реализацией условий резонансного туннелирования с участием различных нулевых уровней энергии размерного квантования.

Ключевые слова: углеродная гетероструктура, размерное квантование, электронный транспорт, полевая эмиссия электронов

DOI: 10.31857/S0544126924050043

1. ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими параметрами современной электронной компонентной базы являются быстродействие и устойчивость к воздействию радиационных излучений различной природы. В полупроводниках дрейфовая скорость носителей заряда, которая определяет быстродействие элементной базы, увеличивается с ростом электрического поля только до некоторых максимальных значений, а затем либо насыщается, либо уменьшается. Основной причиной является рассеяние носителей заряда на различных дефектах структуры твердого тела, акустических и оптических колебаниях решетки.

В последние годы, наряду с разработкой путей устранения ограничений на применение полупроводников, развитие получила вакуумная микроэлектроника и вакуумные интегральные схемы (ВИС). Приборы вакуумной микроэлектроники могут быть использованы как усилители и генераторы миллиметрового диапазона длин волн, в системах непосредственного телевизионного вещания со спутников с использованием тридца-

тисантиметровых антенн и менее, в РЛС, телефонных системах сотовой связи и т.п.

Ближайшими конкурентами ВИС, предназначенными для усиления, переключения или модуляции высокочастотных электрических сигналов, являются твердотельные МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) структуры, работа которых основана на изменении проводимости полупроводника под действием электрического поля. Благодаря простоте изготовления, низкой стоимости в результате групповой обработки и энергопотреблению, а также надежности и длительному сроку службы кремниевые МДП структуры занимают ведущее положение в современной микро- и нанoeлектронике. Однако, по ряду принципиальных характеристик, они уступают активным элементам, в которых вместо твердого тела используется вакуум [1].

Основными достоинствами ВИС на основе твердотельных полевых источников электронов являются сверхвысокое быстродействие, большие плотности токов и возможность экс-

плутации в экстремальных условиях, связанных с высокой температурой и воздействием электромагнитных излучений. Вакуум по своей природе превосходит твердое тело в качестве среды для транспорта носителей заряда. Он имеет электрическую прочность, которая многократно превышает электрическую прочность полупроводниковых структур и допускает баллистический транспорт, в то время как в полупроводниках носители зарядов испытывают столкновительное рассеяние. Скорость электронов в вакууме теоретически составляет 3×10^{10} см/с, в то время как в полупроводниках она ограничена тепловой скоростью, которая не превышает 5×10^7 см/с. Эти свойства вакуума позволяют создавать силовые вакуумные устройства с высокими частотой и выходной мощностью, которые не достижимы в твердотельных ИС. С другой стороны, при уменьшении вакуумного промежутка между эмиттером и коллектором электронов до нанометровых размеров рабочие напряжения ВИС могут быть уменьшены до величин сравнимых с полупроводниковыми устройствами. При длине вакуумного канала меньше длины свободного пробега электронов, требование к вакууму ослабляется, и напряжение автоэлектронной эмиссии снижается до значения, меньшего, чем потенциал ионизации молекул в воздухе. Это позволяет ВИС работать в атмосферных условиях.

Функционирование ВИС основано на использовании полевой эмиссии электронов из металлов и полупроводниковых структур при напряженностях внешних электрических полей 10^6 – 10^7 В/см, что весьма близко к их электрической прочности [2]. Например, поле лавинного пробоя кремниевых кристаллов составляет всего $3 \cdot 10^5$ В/см. Традиционным путем улучшения эмиссионных характеристик для всех видов автокатодов является уменьшение радиусов эмитирующих острий и диаметров отверстий в управляющих электродах, что определяется уровнем применяемой технологии изготовления [3]. Наиболее значительные успехи получены при создании на кремнии острийных решеток автоэмиссионных катодов с радиусом кривизны атомарных размеров (менее 1 нм) [4], что позволяет существенно понизить рабочее напряжение. Однако усложнение технологии изготовления таких устройств сопровождается, как правило, снижением их надежности и увеличением себестоимости. В связи с этим большой фундаментальный и прикладной интерес представляют исследования альтернативных путей улучшения эмиссионных характеристик автокатодов, которые были бы связаны не только с конструктивными, но и с физико-химическими модификациями эмиссионных свойств материалов. Перспективным материалом для получения сильноточных полевых катодов являются нанокompозитные углеродные пленочные структуры [5–8].

Одним из направлений исследований по повышению дрейфовой скорости и быстродействия полупроводниковых приборов является использование методов зонной инженерии при создании гетероструктур с резонансным туннелированием в однобарьерных с баллистическим транспортом и двухбарьерных структурах с квантовыми ямами в качестве резонаторов для электронных волн [9–13]. Создание подобных гетероструктур стало возможным с развитием техники молекулярно-лучевой и газовой эпитаксии из металлоорганических соединений. Круг материалов, которые используются для их создания, по ряду причин, весьма ограничен, экологически небезвреден, материалы не обладают устойчивостью к радиационным воздействиям.

В развитие «зеленых» полупроводниковых технологий представляет важный фундаментальный и прикладной интерес использование новых материалов и конкурентоспособных технологических методов получения гетероструктур обладающих необходимыми свойствами.

Цель работы — исследование влияния неоднородности электрофизических свойств по координате на транспорт и полевую эмиссию электронов в квантово-размерных некристаллических 2D углеродных гетероструктурах, полученных с использованием микроволнового плазмохимического синтеза.

2. МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Трех- и двухслойные 2D углеродные гетероструктуры с различными размерностями и электронным обогащением слоев получали в одном вакуумном технологическом цикле с использованием микроволновой плазмы паров этанола низкого давления по методике, изложенной в [14]. В нижнем слое использовались обогащенные электронами углеродные пленки толщиной около 100 нм с различным удельным поверхностным сопротивлением. Толщина обедненного слоя в гетероструктурах изменялась от 5 до 100 нм. В трехслойных гетероструктурах на обедненный слой осаждался обогащенный электронами углеродный слой толщиной 60 нм. Подключение гетероструктур к источнику питания при статических электрических измерениях с фиксированным напряжением 30 и 50 В осуществлялось через осажденные термическим испарением в вакууме никелевые контактные площадки на верхних и нижних слоях гетероструктуры. Исследования автоэмиссионных свойств проводились в высоком вакууме (10^{-6} Па) на диодной структуре, способной изменять расстояние между электродами с точностью до 1 мкм по методике изложенной в [15]. Пороги активации автоэмиссии определяли по напряженности электрического поля в импульсе длительностью 10 мкс, при которой полевые токи составляли 5 μ А.

2.1. Размерное квантование и выпрямление в углеродных гетероструктурах с различным электронным обогащением слоев

Установлено, что в двухслойных гетероструктурах при подключении отрицательного полюса источника питания к контактной площадке обогащенной углеродной пленки поперечный ток превышал ток при обратном включении. При уменьшении толщины обедненной пленки в интервале от 30 нм до 5 нм токи через гетероструктуры и разности токов между токами при различной полярности подключения источника питания увеличиваются. При напряжении 30 В ток через гетероструктуру с удельным поверхностным сопротивлением обогащенного слоя основания 160 кОм/□ и толщиной обедненного слоя 5 нм, по сравнению с толщиной 100 нм, увеличился от 0,6 до 3,8 мА, а разность между токами увеличилась от 4 до 86 мкА (рис. 1).

В трехслойных гетероструктурах при толщинах обедненных слоев 5 и 10 нм поперечные токи при увеличении напряжения от 0 до 10 В существенно меньше, чем при других толщинах. Наиболее сильное и быстрое увеличение тока с увеличением напряжения выше 10 В наблюдалось для толщины 5 нм. При 20 В ток превышал более, чем в три раза, ток в структуре без обедненного носителями углеродного слоя. При напряжениях 30 и 50 В поперечные токи имеют максимумы при толщинах обедненного слоя 5 и 15 нм (рис. 2). Разности токов при прямой и обратной полярностях напряжения, характеризующие выпрямительные свойства гетероструктур, также как для двухслойных гетероструктур, зависят от напряжения между стоком и истоком и имеют максимум при толщине обедненного слоя 5 нм. При напряжении 50 В разность между прямым и обратным токами при толщине обедненной пленки 5 нм, по сравнению с толщиной 100 нм, увеличилась от 9

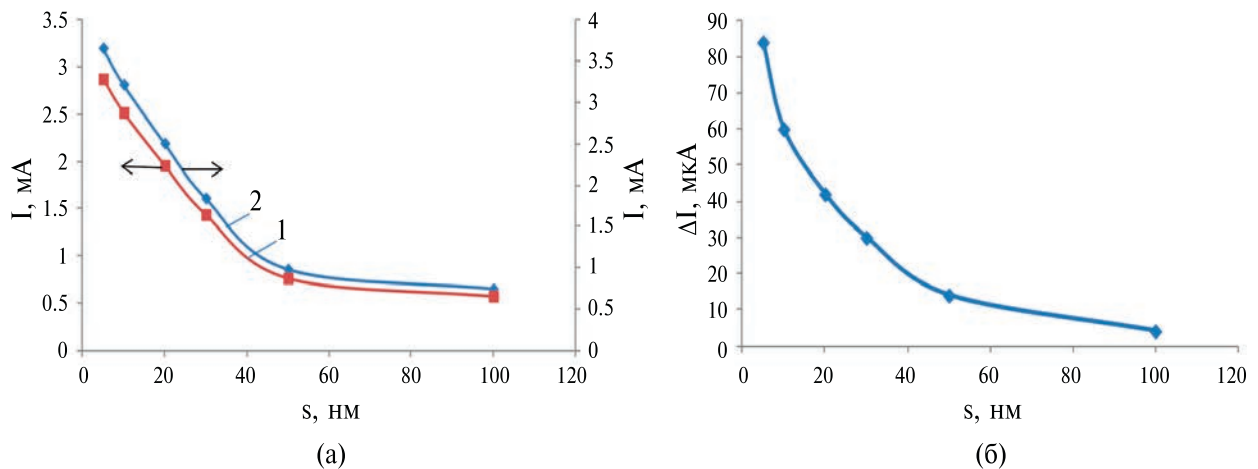


Рис. 1. Зависимости поперечных токов (а) и их разностей (б) от толщины обедненного слоя двухслойных гетероструктур при обратном (1) и прямом (2) включении источника питания.

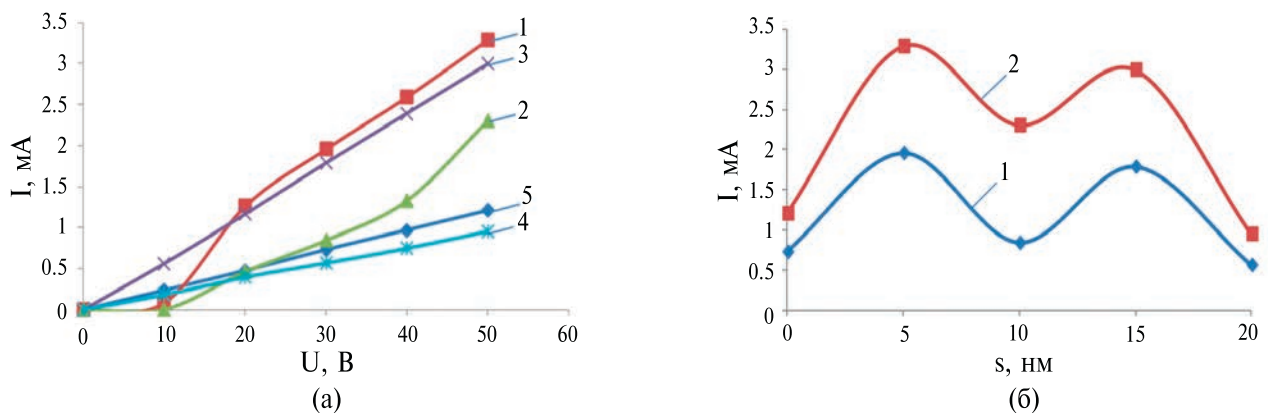


Рис. 2. ВАХи (а) и поперечные токи (б) при напряжениях 30 (1) и 50 В (2) в трехслойных гетероструктурах с различными толщинами обедненных слоев, нм: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 20; 5 – 0.

до 140 мкА, при увеличении напряжения разность токов увеличивается. Установлено, что выпрямление в двух и трехслойных гетероструктурах, кроме толщины обедненного слоя и напряжения между стоком и истоком, зависит от удельного поверхностного сопротивления обогащенного слоя. Его уменьшение увеличивает выпрямления токов. При поверхностном сопротивлении обогащенного слоя 80 кОм/□ и разности потенциалов между истоком и стоком 30 В разность токов в двухслойных гетероструктурах при толщине обедненного слоя 5 нм составляет около 200 мкА.

2.2. Полевая эмиссия электронов в 2D углеродных гетероструктурах с различным электронным обогащением слоев

Характер зависимостей параметров полевых ВАХ от толщины обедненного слоя для двух- и трехслойных гетероструктур существенно различается (рис. 3–5). Для двухслойных гетероструктур плотности полевых токов увеличиваются линейно и при толщине обедненного слоя 15 нм на порядок превышают плотность полевого тока обогащенного основания. Изменения других параметров полевых ВАХ имеют выраженный нелинейный характер, который свидетельствует об изменении механизмов транспорта и/или полевой эмиссии в зависимости от характеристик обедненного слоя.

Для трехслойных гетероструктур плотности полевых токов, также как при статических измерениях поперечных токов, имеют максимум при толщине обедненного слоя 5 нм. Он реализуется при меньшем пороге начала эмиссии и превышает плотность полевого тока обогащенного основания в 2,5 раза. Крутизна ВАХ, также как для двухслойных гетероструктур, имеет максимум при толщине 5 нм, который превышает крутизну ВАХ двухслойных гетероструктур. Полевые токи, пороги эмиссии и интервалы допустимых напряженностей внешних

полей в трехслойных гетероструктурах меньше, чем в двухслойных.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В двухслойной гетероструктуре положительный потенциал на контакте с обедненным носителями заряда углеродном слое снижает потенциальный барьер на его границе с обогащенным слоем. При высокой концентрации электронов в обогащенном слое увеличение удельного сопротивления не столь велико, как при подключении положительного полюса к контакту с противоположной стороны. Следствием этого является больший ток через гетероструктуру при положительном потенциале в контакте металл – обедненный носителями углеродный слой (рис. 1а).

Толщины обедненных углеродных слоев в интервале от 5 до 30 нм, являющихся по своей природе полуметаллами, меньше длины волны де Бройля при комнатной температуре, которая для полупроводников составляет от 25 до 100 нм, а для металлов на порядок меньше. При приложении электрических полей это позволяет электронам туннелировать сквозь квантоворазмерные слои, прозрачность которых тем выше, чем меньше их толщина l и больше энергия электрона W , падающего на квантовый барьер высотой U [9]:

$$D \approx \exp \left[-\frac{2}{h} \int_0^l \sqrt{2m(U - W)} dx \right], \quad (1)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Джс – постоянная Планка, m – масса туннелирующей частицы.

При положительном потенциале в контакте с туннельно тонким обедненным слоем на его границе с обогащенным слоем возникает двумерный электронный газ, нормальная к слоям компонента энергии электронов в котором тем боль-

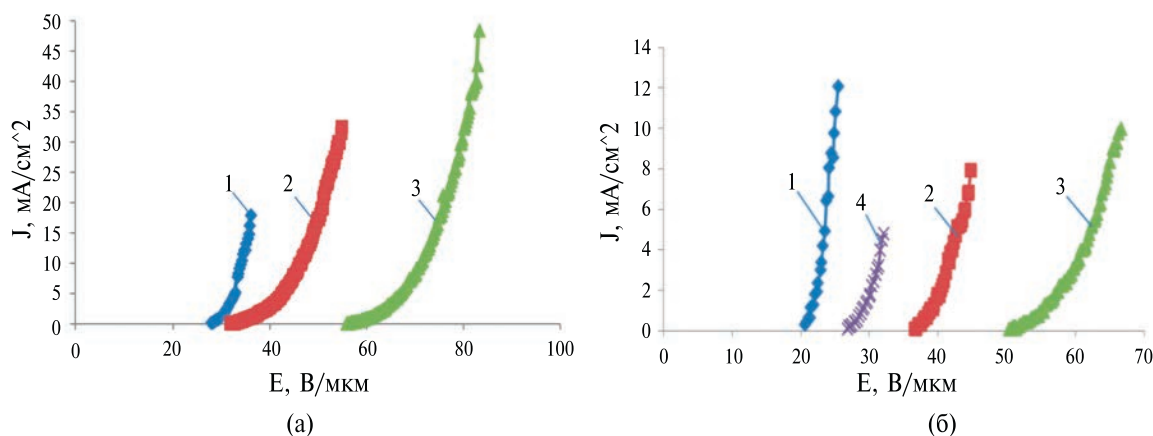


Рис. 3. Полевые ВАХ двух (а) и трехслойных (б) гетероструктур в зависимости от толщины обедненного слоя, нм: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 0.

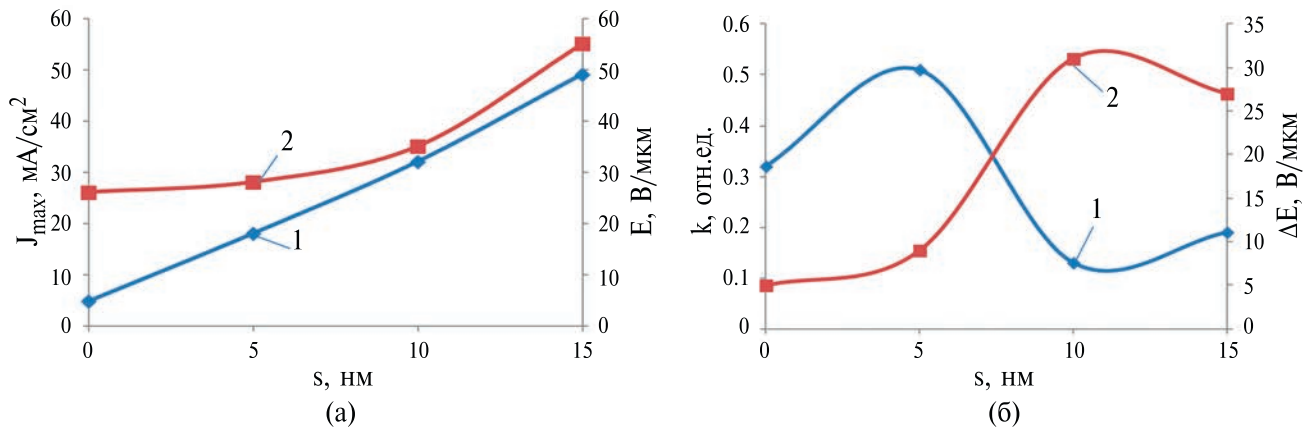


Рис. 4. Зависимости плотностей полевых токов (1), порогов активации эмиссии (2) (а), крутизны ВАХ (1) и интервалов допустимых напряженностей электрических полей (2) (б) от толщины обедненных слоев двухслойных гетероструктур.

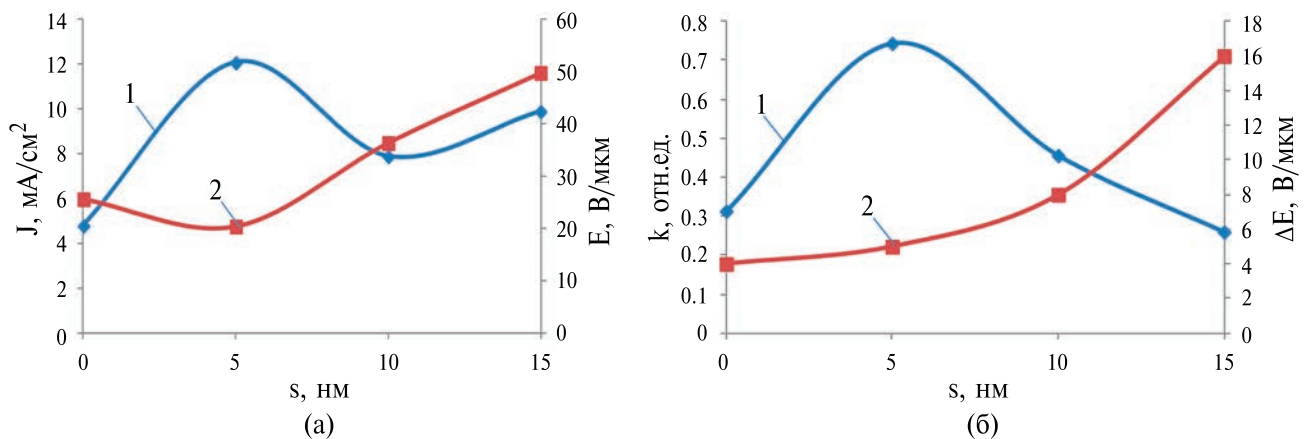


Рис. 5. Зависимости плотностей полевых токов (1), порогов активации эмиссии (2) (а), крутизны ВАХ (1) и интервалов допустимых напряженностей электрических полей (2) (б) от толщины обедненных слоев трехслойных гетероструктур.

ше, чем меньше его толщина [10, 12]. Увеличение собственной энергии электронов, падающих на потенциальный барьер (ПБ), в виде обедненного электронами углеродного слоя, увеличивает, согласно (1), его коэффициент прозрачности. При фиксированной разности потенциалов между контактами с уменьшением толщины обедненного слоя увеличиваются его «геометрическая» прозрачность и нулевая энергия электронов в двумерном электронном газе. Следствием этого являются нелинейные увеличения поперечных токов и выпрямления, по сравнению с положительной поляриностью источника питания в контакте с обогащенным слоем (рис. 1б).

Оценки показывают, что при размерном квантовании нулевые уровни энергии электронов (E_i) в 2D структурах с толщинами квантовых барьеров (КБ) 5, 10 и 15 нм составляют, соответственно, около 0,2, 0,05 и 0,02 эВ. Коэффициенты туннелирования в квантоворазмерных гетероструктурах увеличива-

ются в случаях, когда нулевые уровни энергии в них близки к средней кинетической энергии электронов эмиттеров, которая при комнатной температуре составляет около 0,025 эВ. Для толщин обедненных слоев 5 и 10 нм это условие не реализуется и поперечные токи при небольших напряжениях имеют низкие значения (рис. 2а). С увеличением разности потенциалов снижаются нулевые энергии электронов, а их средняя кинетическая энергия при этом возрастает. При сближении их значений до величины порядка $k_B T$ токи сквозь КБ интенсивно увеличиваются. Вследствие более низкой «геометрической» туннельной прозрачности, зависимость тока от напряжения при толщине слоя 10 нм и больших напряженностях электрического поля, более слабая, чем для толщины 5 нм. При увеличении напряжения влияние поля усиливается и токи ускоренно возрастают (рис. 2а, кривые 1, 2).

При ширине КБ 15 нм реализуется условие близкое к резонансному туннелированию, при

котором поперечный ток с увеличением напряжения увеличивается линейно при всех напряжениях (рис. 2а, кривая 3). Для толщины обедненного слоя 20 нм и больше E_i ниже средней энергии электронов. Коэффициент прозрачности определяется только шириной КБ и экспоненциально снижается. Об этом свидетельствует зависимость между током и напряжением близкая к закону Ома со значительно более низким, по сравнению с толщиной 15 нм, коэффициентом пропорциональности, а также низкий поперечный ток, который меньше, чем в структуре без обедненного слоя.

Увеличение, более, чем в три раза, плотности полевого тока двухслойных гетероструктур с шириной КБ 5 нм, по сравнению с полемым током одиночного обогащенного слоя, кроме внутреннего бездиссипативного транспорта электронов, обусловлено, вероятнее всего, снижением потенциального барьера (ПБ) на границе с вакуумом из-за увеличения собственной энергии электронов. Экспериментально это выражается в небольшом увеличении интервала допустимых напряженностей внешнего импульсного электрического поля (меньше 3 В/мкм) при значительном увеличении крутизны ВАХ (рис. 4).

В трехслойных гетероструктурах, вследствие столкновительного рассеяния в толстом верхнем обогащенном слое, энергия электронов на границе твердое тело-вакуум, по сравнению с двухслойной гетероструктурой, снижается. Вследствие этого уменьшается влияние энергетических уровней туннельно-тонких обедненных слоев на прозрачность ПБ на границе твердое тело – вакуум. В гетероструктурах с шириной КБ 5 нм при полевой эмиссии, также как при статических измерениях поперечного транспорта, увеличиваются собственная энергия туннелирующих электронов и поперечный ток. «Геометрическое» увеличение поперечного тока снижает порог начала эмиссии, повышает крутизну ВАХ и при небольшом увеличении интервала допустимых напряженностей импульсных полей приводит к электротепловому разрушению гетероструктуры. Полевой ток в трехслойной гетероструктуре при значительно меньшей напряженности внешнего электрического поля уменьшается с 17 мА/см² для двухслойных гетероструктур до 12 мА/см² (рис. 5).

При увеличении ширины КБ уменьшается прозрачность для туннелирования электронов, увеличиваются сопротивление поперечному транспорту электронов, пороги начала полевой эмиссии и интервалы допустимых напряженностей внешних электрических полей. В двухслойных гетероструктурах при ширине КБ 10 нм повышение порога начала полевой эмиссии и интервала допустимых напряженностей внешних полей уменьшает высоту и ширину ПБ на границе твердое тело – вакуум, снижает крутизну ВАХ и увеличивает собственную энергию электронов

на границе между обедненным и обогащенным слоем основания. После достижения энергии электронов до значения близкого ко второму нулевому уровню КБ, равному 0,2 эВ, возникает условие резонансного туннелирования, при котором полевой ток увеличивается, по сравнению с полемым током при толщине обедненного слоя 5 нм, практически в два раза. Его ограничение обусловлено мгновенным развитием процессов ударной ионизации и разрушением обогащенного подслоя гетероструктуры. В трехслойной гетероструктуре увеличение собственной энергии электронов ускоряет развитие процессов ударной ионизации в верхнем обогащенном слое и снижает полевой ток, практически во столько же раз.

При ширине КБ 15 нм общая допустимая напряженность импульсного поля для двухслойной гетероструктуры увеличивается до 85 В/мкм. Повышение напряженности поля увеличивает собственную энергию электронов до значений второго и третьего нижних нулевых уровней, которые составляют, около 0,08 и 0,18 эВ. Широкий диапазон условий для последовательной реализации трехуровневого резонансного туннелирования трехкратно увеличивает плотности полевых токов, по сравнению с шириной КБ 5 нм, и более, чем на порядок, по сравнению с одиночным обогащенным слоем. В трехслойной гетероструктуре увеличение прозрачности КБ и ПБ с увеличением амплитуды внешнего импульсного поля замедляет, по сравнению с двухуровневым резонансным туннелированием при ширине КБ 10 нм, развитие процессов ударной ионизации в верхнем обогащенном слое и увеличивает плотность полевого тока при снижении крутизны ВАХ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отсутствие квантового барьера в виде обедненного электродами туннельно-тонкого углеродного слоя механизмы бездиссипативного транспорта в твердом теле и повышения прозрачности потенциального барьера на его границе с вакуумом за счет «геометрического» повышения собственной энергии электронов, отсутствуют. Полевая эмиссия осуществляется за счет уменьшения высоты и толщины ПБ на границе твердое тело-вакуум для туннелирования электронов с энергиями близкими к стационарному «морю Ферми». Напряженность внешнего электрического поля при этом, как известно, составляет 10⁶⁻⁷ В/см, что весьма близко к электрической прочности многих материалов и, тем более, пленочных структур на их основе. Эти факторы определяют низкие допустимые диапазоны внешних электрических полей и полевых токов.

«Геометрическое» увеличение собственной энергии электронов и формирование условий резонансного туннелирования в углеродных гете-

роструктурах с квантоворазмерным обедненным слоем в сильных импульсных электрических полях микросекундной длительности увеличивает бездиссипативную составляющую тока в твердом теле и повышает прозрачность потенциального барьера на его границе с вакуумом. Бездиссипативный транспорт электронов увеличивает поперечные токи в гетероструктурах и снижает энергетическую нагрузку на материал автокатода. Изменением параметров КБ достигается управление в широких пределах плотностью полевых токов, крутизной ВАХ и быстродействием твердотельных и эмиссионных устройств микро- и нанoeлектроники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jin-Woo Han, Jae Sub Oh and M. Meyyappan. Vacuum nanoelectronics: Back to the future? — Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor. Appl. Phys. Lett. 100, 213505 (2012). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4717751>.
2. Fowler R.H., Nordheim L.W. Electronemission in intense electric fields // Proc. R. Soc. London. A. 1928. V. 119. P. 173–181.
3. Патент RU2455 724 C1. Опубликовано: 10.07.2012. Бюл. № 19. Структура и способ изготовления интегральных автоэмиссионных элементов с эмиттерами на основе наноалмазных покрытий. Авторы: Красников Г.Я., Зайцев Н.А., Орлов С.Н., Хомяков И.А., Яфаров Р.К.
4. Marcus R.B., Ravi T.S., Gmitter T. et al. Formation of silicon tips with < 1 nm radius // Applied Physics Letters. 1990. Vol. 56, № 3. P. 236–238.
5. Фурсей Г.Н., Поляков М.А., Кантонистов А.А., и др. // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 6. С. 71.
6. Panda K., Hyeok J.J., Park J.Y., et al. // Sci. Rep. 2007. № 7. P. 16325.
7. Sobaszek M., Siuzdak K., Ryl J., et al. // J. Phys. Chem. C. 2017. V. 121. № 38. P. 20821.
8. Яфаров Р.К., Сторублев А.В. Долговременная воспроизводимость эмиссионных характеристик алмазографитовых полевых источников электронов в нестационарных вакуумных условиях эксплуатации // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47, вып. 24. С. 17–19.
9. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. М.: Наука, 1983.
10. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977. 672 с.
11. Пул Ч.—мл., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. Москва.: Техносфера, 2006. 336 с.
12. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы нанoeлектроники. Москва. Физматкнига, 2006. 496 с.
13. Успехи наноинженерии: электроника, материалы, структуры. Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томсона. Москва.: Техносфера, 2011. 491 с.
14. Яфаров Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. М.: Физматлит, 2009. 216 с.
15. Яфаров Р.К. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 9. С. 3.

ELECTRON TRANSPORT AND FIELD ELECTRON EMISSION MECHANISMS IN 2D NONCRYSTALLINE HETERO STRUCTURES WITH QUANTUM BARRIER

© 2024 G. Ya. Krasnikov¹, V. P. Bokarev^{1,*}, G. S. Teplov¹, R. K. Yafarov^{2,**}

¹Joint-Stock Company “Scientific-Research Institute of Molecular Electronics” Zelenograd, Russian Federation

²Saratov branch-office of the Kotelnikov V. A. Institute for Radiotechnics and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russian Federation

*E-mail: vbokarev@niime.ru

**E-mail: pirpc@yandex.ru

Impact of the depth of a quantum barrier in the form of a tunnel-thin charge-depletion carbon layer in the enriched noncrystalline carbon template on non-dissipative transport and field electron emission has been studied. It has been shown that cross-current nonlinearities in current variables in heterostructures with static low-field electric effects and current-voltage curve parameters of the field electron emission in the strong pulse electric fields with microsecond duration are determined by the parameters of quantum barrier and by the implementation of resonant tunneling conditions with different zero levels of size quantization energy.

Keywords: carbon heterostructure, size quantization, electron transport, field electron emission

REFERENCES

1. *Jin-Woo Han, Jae Sub Oh and M. Meyyappan.* Vacuum nanoelectronics: Back to the future? — Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor. *Appl. Phys. Lett.* 100, 213505 (2012).
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4717751>.
2. *Fowler R.H., Nordheim L.W.* Electronemission in intense electric fields // *Proc. R. Soc. London. A.* 1928. V. 119. P. 173–181.
3. Patent RU 2 455 724 C1. Issued: 10.07.2012. Patent office journal № 19. The Structure and Manufacturing Process of Integrated Autoemissive Elements with Emitters Based on Nanodiamond Coating. Authors: *Krasnikov G.Ya., Zaitsev N.A., Orlov S.N., Khomyakov I.A., Yafarov R.K.*
4. *Marcus R.B., Ravi T.S., Gmitter T. et al.* Formation of silicon tips with < 1 nm radius // *Applied Physics Letters.* 1990. Vol. 56. № 3. P. 236–238.
5. *Fursey G.N., Polyakov M.A., Kantonistov A.A., et al.* // *Technical Physics Journal* 2013. Vol. 83. № 6. P. 71.
6. Panda K., Hyeok J.J., Park J.Y., et al. // *Sci. Rep.* 2007. № 7. P. 16325.
7. *Sobaszek M., Siuzdak K., Ryl J., et al.* // *J. Phys. Chem. C.* 2017. V. 121. № 38. P. 20821.
8. *Yafarov R.K., Storublev A.V.* The Long-Term Reproducibility of Emission Characteristics of Diamond-Graphite Field Electron-Emittig Sources in Unsteady Vacuum Environment. // *Letters to the Technical Physics Journal.* 2021. Vol. 47, Issue 24. P. 17–19.
9. *Blokhintsev D.I.* Quantum Mechanics Fundamental. M.: Science, 1983.
10. *Bonch-Bruevich V.L., Kalashnikov S.G.* Semiconductor Physics. M.: Science, 1977. 672 p.
11. Pool Ch. — Jr., Owens F. Nanotechnologies. Moscow: Technosphere, 2006. 336 p.
12. *Dragunov V.P., Neizvestny I.G., Gridchin V.A.* Nanoelectronics Fundamental. Moscow. Physmathbook, 2006. 496 p.
13. *Advances in Nanoengineering: Electronics, Materials, Structures.* Edited by Davis J., Thomson M. Moscow: Technosphere, 2011. 491 p.
14. *Yafarov R.K.* Physics of Microwave Vacuum-Plasma Nanotechnologies. M.: Physmathlit, 2009. 216 p.
15. *Yafarov R.K.* // *Letters to the Technical Physics Journal.* 2019. Vol. 45. № 9. P. 3.
16. *O.A. Popov.* Characteristics of electron cyclotron resonance plasma sources // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 1989. V. 7. No 3. P. 894.
<https://doi.org/10.1116/1.575816>

УДК 621.317

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЖИДКОСТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРА

© 2024 г. А. И. Андреев^{1,*}, А. Е. Семенов¹¹Астраханский государственный технический, Астрахань, Россия

*E-mail: aresut79@mail.ru

Поступила в редакцию 21 апреля 2024 г.

После доработки 10 июня 2024 г.

Принята к публикации 10 июня 2024 г.

В данной работе исследуются вопросы эффективности работы системы микропроцессор-система охлаждения и поддержания оптимальной температуры электронных компонентов. Для этого проведены эксперименты на существующей системе охлаждения микропроцессора с контролем всех основных параметров, в первую очередь таких как температура и расход теплоносителя, производительность и температура процессора. На основании полученных данных построена математическая модель, описывающая изменение мощности микропроцессора и позволяющая рассчитывать температуры и скорости теплоносителей, а также получать наиболее эффективные режимы для работы системы охлаждения. Полученные экспериментальные данные и математическая модель позволяет прогнозировать потребные мощности системы охлаждения и параметры работы микроэлектронных компонентов, что особенно важно при появлении новых поколений микропроцессоров, обладающих наиболее высокой производительностью. Полученные данные также позволяют рассчитывать параметры для существующих процессоров с целью наибольшего увеличения эффективности и надёжности их работы, что актуально и для других электронных устройств, в частности микроконтроллеров.

Ключевые слова: микропроцессор, жидкостная система охлаждения, математическая модель, теплопроводимость, коэффициент теплопередачи, электроника, системы охлаждения, тепловыделение микропроцессора, тепловой режим, надёжность

DOI: 10.31857/S0544126924050056

1. ВВЕДЕНИЕ

Стабильная работа микропроцессоров и микроконтроллеров неразрывно связана с поддержанием основных параметров их работоспособности, таких как бесперебойность питания и обеспечения оптимального теплового режима. Последнее является наиболее важным фактором, в частности, прогнозирования отказов оборудования микроэлектронной техники и разрушения основных элементов микроструктуры. В работе [1] детально описаны наиболее распространённые механизмы деградации процессоров вследствие перегрева и перегрузки. В первую очередь страдают такие элементы как металлические шины и поканальные транзисторы. Со временем под воздействием токов можно наблюдать такой процесс, как электромиграция. Вследствие электромиграции возможно появление утолщений, скоплений атомов металла в одном месте. Из-за высокой плотности металлической разводки (соседние металлические шины

расположены на минимально допустимом по технологии расстоянии) утолщение одной из шин может привести к возникновению короткого замыкания с соседней шиной. Это может привести, как к повышению токов утечки, так и к полному отказу какого-то блока схемы или даже всей схемы.

Подобные опасности возникают, если система охлаждения подобрана неправильно, либо её параметры работы резко упали вследствие той или иной причины, например, загрязнения.

Обеспечение долгосрочной, или «пожизненной», надёжности, обусловленной низкой частотой ошибок из-за отказов, связанных с износом, является важнейшим требованием для всех производителей микропроцессоров. Однако постоянное масштабирование технологий в сочетании с увеличением плотности мощности процессоров ставит под угрозу высокие стандарты надёжности на протяжении всего срока службы, которых ожидают клиенты. Это привело к тому, что Междуна-

родная технологическая дорожная карта для полупроводников (ITRS) предсказала возникновение серьезных проблем с надежностью в течение всего срока службы, причем такими темпами, которые не наблюдались в прошлом [2].

Это в первую очередь связано с быстрым ростом производительности микропроцессоров, в частности, для CPU персональных компьютеров. Так за последние несколько десятилетий произошел революционный рост производительности компьютеров. Следуя закону Мура [3], полупроводниковая промышленность успешно удваивала плотность транзисторов каждые два года, а микропроцессоры стали флагманским продуктом, успешно используя повышение производительности с каждым новым поколением технологий [4].

Управление температурным режимом имеет важное значение для обеспечения надежной и долгосрочной работы всей микроархитектуры. Существует много различных способов отведения тепла от микропроцессора. Наиболее распространённые в последнее время это воздушные и жидкостные системы охлаждения.

Воздушное охлаждение требует больших открытых каналов для направления воздушного потока на платы, внутри корпуса и между серверными стойками. Вентиляторы потребляют много энергии, шумят и неустанно вытягивают пыль и другие загрязнения в корпуса компьютеров. Вентиляторы охлаждают только те области, по которым поток воздуха может эффективно перемещаться. Воздушное охлаждение требует больших радиаторов, которые увеличивают стоимость и вес системы и тратят огромное количество места. Вентиляторы и воздушное охлаждение переносят тепло в окружающую атмосферу вокруг компьютера, где оно рециркулируется в систему, что еще больше снижает эффективность, и обрабатывается с помощью энергозатратных систем отопления, вентиляции и кондиционирования. Безвентиляторные системы охлаждения обычно отдают тепло непосредственно в окружающую атмосферу через корпус компьютера. Проблема этого метода состоит в том, что фактическое тепло для передачи происходит только с очень маленькой площади поверхности, что сильно ограничивает эффективность системы охлаждения. Для эффективного рассеивания этого тепла требуются лучшие инженерные и теплопроводящие материалы, чтобы распространить тепло на большую площадь, где оно может передаваться в окружающий воздух. Эти условия обычно диктуют, что в таких системах могут использоваться только процессоры с более низкой мощностью и низким уровнем нагрева [5–6].

Эти недостатки приводят к тому, что для высокопроизводительных процессоров, выше 13 поколения, воздушные системы охлаждения не рекомендованы для использования.

Им на смену пришли быстроразвивающиеся системы жидкостного охлаждения. Преимуществом системы жидкостного охлаждения является возможность установки ее в ограниченном пространстве корпуса. В отличие от воздуха, трубы с жидкостью можно устанавливать практически в любом направлении. Еще одним преимуществом этой системы является ее бесшумность. Очень часто, насосы обеспечивают циркуляцию потока воды через систему, не создавая шума больше, чем повышение значения на 25 дБ. Недостаток – высокая стоимость установки [7–9].

Существует множество исследований по жидкостному охлаждению CPU с использованием различных методов охлаждения. В некоторых исследованиях воздушное охлаждение используется для сравнения предлагаемых методов. Для увеличения теплопередачи предлагается множество методов, таких как орошение жидкостью, термосифон, радиатор и жидкостное охлаждение с использованием теплообменника. Более того, многие исследователи также изучали различные конфигурации систем охлаждения. Помимо методов жидкостного охлаждения, для жидкостного охлаждения процессора было изучено множество типов рабочих жидкостей. В последние годы растет интерес к наножидкостям в качестве рабочей жидкости для теплопередачи [8, 10–11].

Всё это приводит к тому, что для получения наиболее эффективного метода охлаждения в системах с жидкостью, требуется детальное исследование системы отвода тепла и поведения микропроцессора.

В данной работе рассмотрена работа жидкостной системы охлаждения, при различных параметрах расхода и температурах охлаждения и построена математическая модель процесса, позволяющая детально исследовать недостатки жидкостных систем охлаждения и проводить расчёт с целью сокращения их стоимости для конечного потребителя.

Для этого был разработан экспериментальный стенд и методика исследования.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На первом этапе использовалась базовая система водяного охлаждения – Thermaltake Floe RC240 Memory & CPU AIO Liquid Cooler.

Для контроля параметров температуры внутри контура были установлены термодпары типа К. В качестве измерителя использовался комплекс измерения – В7–78/1 с точностью измерения 0,1 °С. В качестве объекта охлаждения был выбран процессор Intel i7 core 13700k OEM имеющий TDM с базовым тепловыделением 125 Вт. Данный процессор испытывался в стресс-режиме.

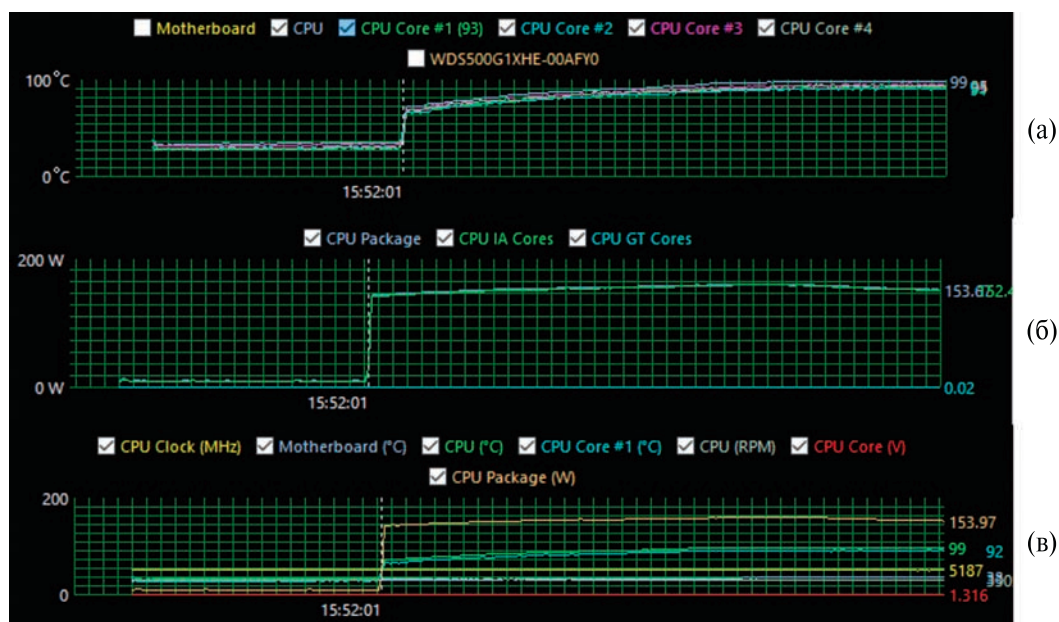


Рис. 1. Изменение температуры основных компонентов и ядер процессора (а), мощности процессора (б) и частоты (в) от времени

Также измерялись параметры основных теплоносителей — жидкости в гидравлическом контуре (воды) и воздуха через воздушный радиатор системы. Для контроля расхода воды использовался ротаметр — Raifil проточный FM02, для контроля скорости и температуры воздуха — термоанемометр DT-8880. Температура окружающей среды составляла 25–30 °С. Стресс режим и отслеживание температуры процессора проводилось с помощью программы AIDA64. На рис. 1 показаны температуры процессора и выделяемая мощность при введении в стресс-режим.

На втором этапе проводились эксперименты с контролем температуры и расхода воды на входе в теплообменник водоблока при охлаждении процессора. Температура процессора в ходе эксперимента изменялась в интервале от +38 — +97 °С. Для понижения температуры использовался охлажденный теплоноситель (вода) в интервале от +7 до +52 °С, для получения стабильной температуры воды использовался термостат с холодильной машиной и нагревателем. Постоянство расхода обеспечивалось работающей помпой и регулирующим вентилем. Расход теплоносителя через водоблок процессора контролировался с помощью ротаметра в пределах от 0,3 до 1,5 л/мин и регулировался с помощью регулирующего вентиля. Контроль температуры на входе и выходе в водоблок и внутри термостата производился по термопарам. На рис. 2 показана схема экспериментального стенда для исследования температурного режима работы микропроцессора.

Стенд работает следующим образом:

Теплоноситель (вода) из бака 7 поступает в змеевик внутри термостата 8. Теплоноситель из термостата, где, охлаждаясь или нагреваясь до необходимой температуры поступает к помпе (наосу) 2 откуда через ротаметр 3 и запорный вентиль 11

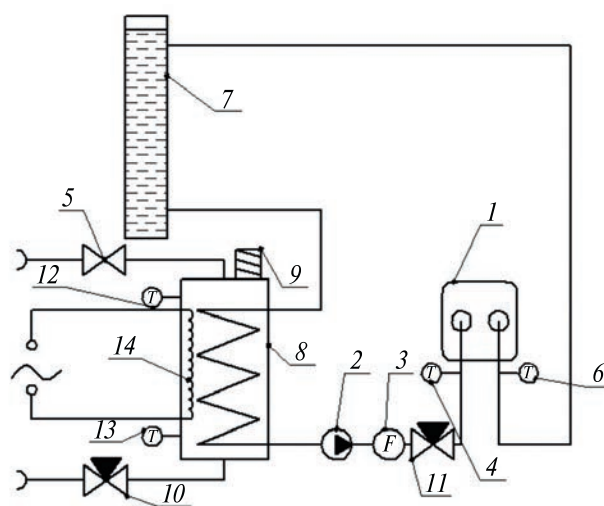


Рис. 2. Стенд для исследования охлаждения процессора компьютера: 1 — теплообменник на процессоре, 2 — помпа (насос), 3 — ротаметр, 4, 6, 12, 13 — термопары, 5 — запорный вентиль, 7 — расширительный бак, 8 — термостат с мешалкой с теплоэлектронагревателем и змеевиком холодильного агента, (холодильная машина), 9 — крышка для сепарации воздуха, 10, 11 — регулирующие вентили, 14 — нагреватель

поступает в теплообменник 1 системы охлаждения процессора. Контроль входной и выходной температуры осуществляется по термопарам 4 и 6. Затем нагретая вода через поступает обратно в бак 7. Термостат 8 до температуры $+7^{\circ}\text{C}$ охлаждается с помощью хладоносителя, который входит через открытый запорный вентиль 5 и выходит через регулирующий клапан 10. Контроль температуры внутри термостат производится по термопарам 12 и 13 установленный в верхней и нижней части термостата.

Полученные на обоих этапах эксперимента данные обрабатывались и анализировались.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для построения тепловой модели на первом этапе и нахождения параметров измерялись температуры жидкости и воздуха в системе охлаждения.

На рис. 3 показаны экспериментальные данные по изменению параметров теплоносителя. Отсчёт температуры начинался и при её росте, и после установления режима охлаждения, при котором изменения температур теплоносителей практически не было.

При охлаждении жидким теплоносителем важную роль играет также гидродинамика потока, так как от температурного режима и скорости течения жидкости зависят коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, что влияет на эффективность теплоотвода.

Поэтому, для правильного построения тепловой модели исследовалась также гидродинамика в контуре жидкостного охлаждения, в первую очередь в теплообменнике водоблока, который установлен на процессоре. Данные, снятые

с системы охлаждения Thermaltake Floe RC240 Memory & CPU AIO Liquid Cooler показали расход 0.3 литр/с. Эти сведения позволяют построить зависимости и математические модели для контура охлаждения.

На втором этапе исследования также контролировалась температура входящего теплоносителя с высокой точностью для определения оптимальных режимов охлаждения, для более точной верификации и построения математической модели.

Полученные данные температуры и мощности процессора при различной температуре охлаждающей воды приведены на рис. 4.

Полученные данные обрабатывались и на основе полученных данных строилась математическая модель работы системы охлаждения и процессора.

4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Данные первого этапа исследований показывают, что наибольшая мощность охлаждения достигается в определённом интервале скоростей и температур охлаждающего потока. На базе полученных в ходе эксперимента данных построены зависимости температуры в определяемых точках контура жидкостного охлаждения.

Рассматривая разности температур на входе и выходе каждого из основных элементов, построен трёхмерный график, связывающий динамику основных элементов системы охлаждения (рис. 5).

Данные зависимости показывают работу системы охлаждения процессора и позволяют разработать математическую модель системы охлаждения, включающей в себя температуру процессора $T_{\text{проц}}$,

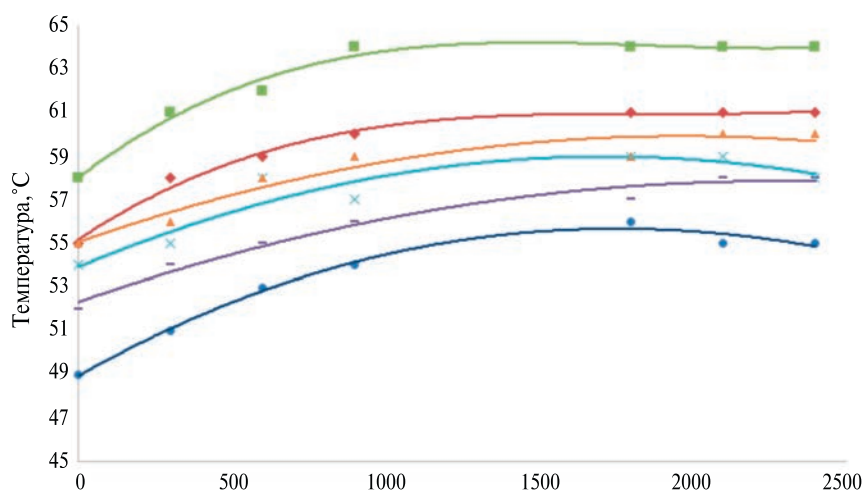


Рис. 3. Изменение температуры в жидкостной системе охлаждения: □ — температура на входе в радиатор, ° — температура на выходе из радиатора, ° — температура на входе в водоблок, ◇ — температура на выходе из водоблока, Δ — температура на входе воздуха в вентилятор, × — температура на выходе воздуха из вентилятора

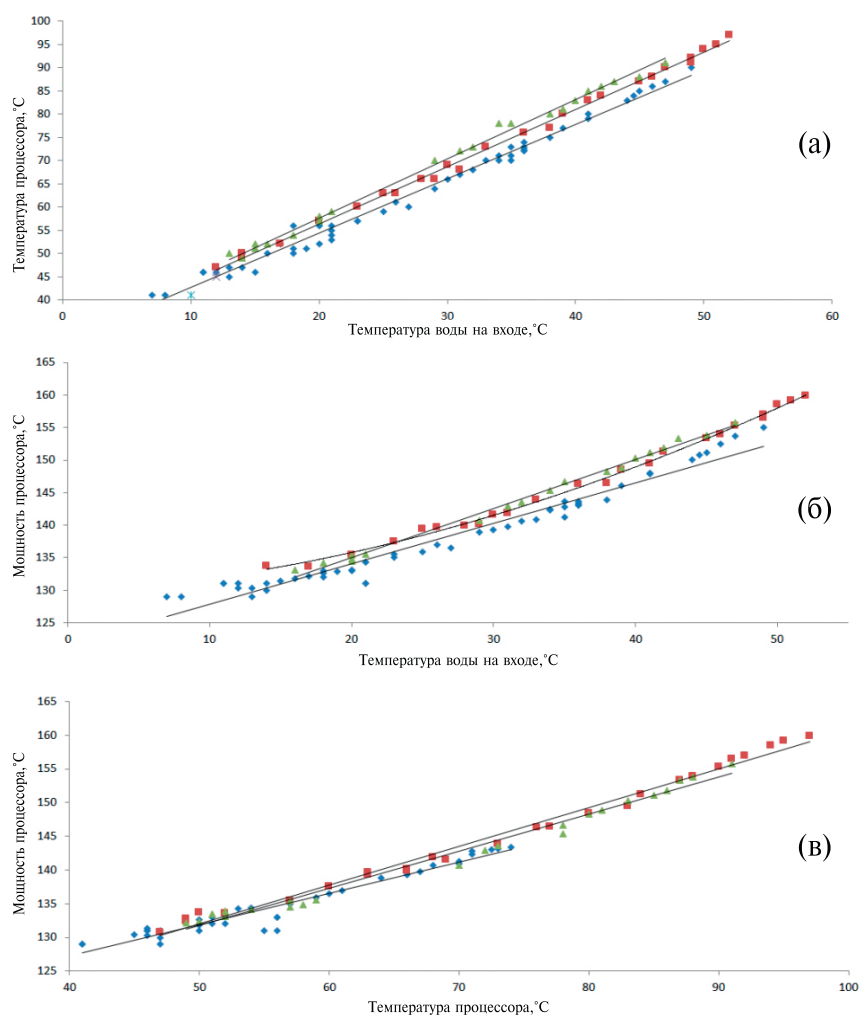


Рис. 4. Зависимость температуры процессора от: температуры входящей в водоблок воды — а), мощности процессора от температуры входящей в водоблок воды — б), мощности процессора от температуры процессора — в) при расходах 0.3 л/мин (Δ), 0.55 л/мин (□), 1 л/мин (°).

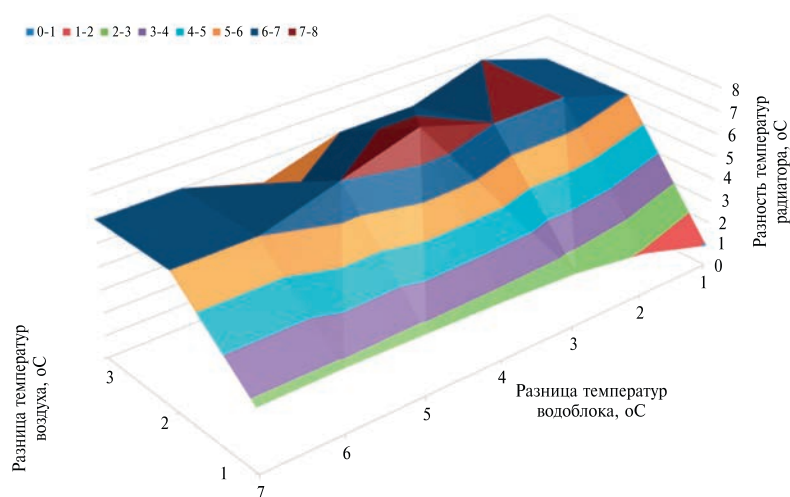


Рис. 5. Разницы температур в элементах системы охлаждения процессора при различных температурах на входе и выходе каждого элемента системы.

температуру охлаждающей воды $T_{вод}$ и её расход V , с расчётом среднеквадратичной ошибки R^2 .

$$\begin{aligned} T_{проц} &= 36.12778 + 1.2033T_{вод} - 6.02538V \\ R^2 &= 0.9923 \end{aligned} \quad (1)$$

В зависимости от температуры процессора $T_{проц}$ математическая модель мощности процессора $W_{проц}$ имеет вид:

$$\begin{aligned} W_{проц} &= 103.1179 + 0.566653T_{проц} \\ R^2 &= 0.9792 \end{aligned} \quad (2)$$

Изменение мощности от температуры может быть представлена формулой:

$$\frac{\Delta W_{проц}}{\Delta T_{проц}} = \frac{(W_{проц2} - W_{проц1})}{(T_{проц1} - T_{проц2})} \quad (3)$$

Увеличение мощности процессора при изменении температуры процессора от 40 °С до 100 °С составило 0.45 Вт/К, в опытах [12] – 0.37 Вт/К.

Сравнение экспериментальных и расчётных данных показывает высокую сходимость математической модели с экспериментальными данными (рис. 6).

Расчёт теплопередачи kF по данным температур процессора при его мощности и температуры нагрева воды получается из параметров математической модели. Средняя арифметическая ошибка расчётных данных составила 0.0379 Вт/К.

Среднее значение $kF = 3.938$ Вт/К.

Теплообменник процессора представляет собой медную оребрённую пластину толщиной 2.5 мм с размером оребрённой поверхности 33 на 30 мм: длина рёбер 33 мм, высотой ребра 1.8 мм, и числом рёбер 132 на ширине 30 мм. Степень оребрения 7.8. Площадь поверхности 0.00884 м², гидравлический диаметр канала 0.4 мм.

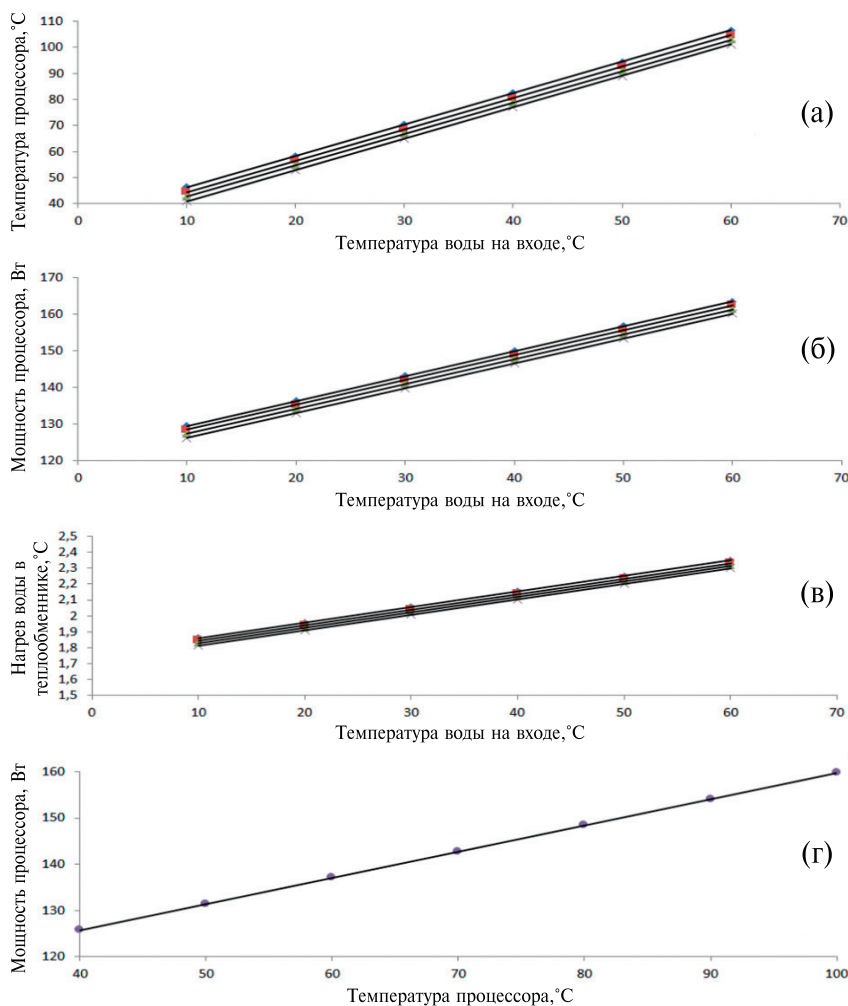


Рис. 6. Зависимость температуры процессора от температуры входящей в водоблок воды – а), мощности процессора от температуры входящей в водоблок воды – б), нагрева воды от температуры входящей в водоблок воды – в), мощности процессора от температуры процессора – г), при расходах 0.3 л/мин (Δ), 0.55 л/мин (□), 1 л/мин (°), 1.2 л/мин (×).

Получено уравнение коэффициента теплопередачи от процессора к воде в теплообменнике:

$$k = 437.85 - 0.3472T_{вод} + 24.237V \quad (4)$$

$$R^2 = 0.9056$$

Сравнение экспериментальных данных и данных полученных из математической модели представлены на рис. 7.

На рис. 8 представлен расчёт коэффициента теплопередачи для системы охлаждения процессора жидкостью через стенку теплообменника водоблока.

Полученные экспериментальные данные позволяют рассчитывать и оптимизировать системы

охлаждения микропроцессора, для поддержания оптимального теплового режима и мощности микропроцессора.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Полученные экспериментальные и расчётные данные показывают, что увеличение эффективности охлаждения, при высокой производительности микропроцессора, достигается за счёт увеличения расхода воздуха и воды через внешний теплообменник и понижения температуры теплоносителя на входе в теплообменник водоблока.

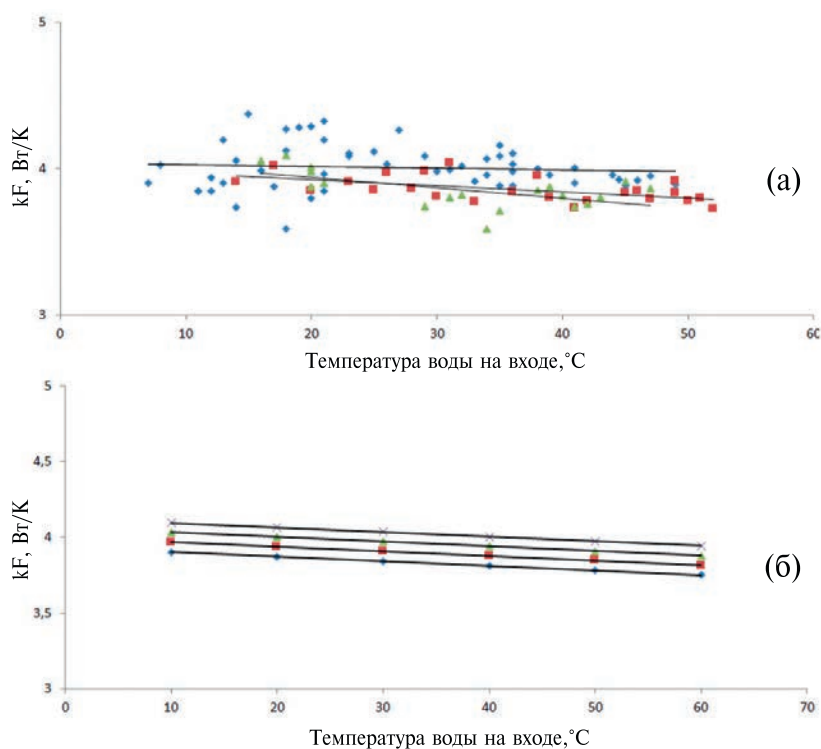


Рис. 7. Зависимость характеристики теплообменника процессора от температуры воды по экспериментальным данным а), по данным из математической модели б) при расходе – 0.3 л/мин ($\diamond$), 0.6 л/мин ($\square$), 0.9 л/мин (Δ), 1.2 л/мин ($\times$).

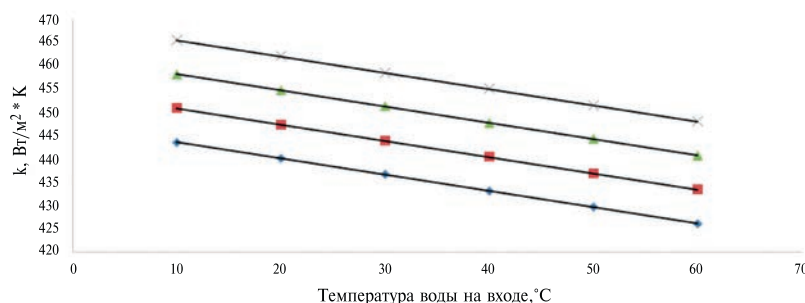


Рис. 8. Расчётная зависимость коэффициента теплопередачи от температуры воды при расходе – 0.3 л/мин ($\diamond$), 0.6 л/мин ($\square$), 0.9 л/мин (Δ), 1.2 л/мин ($\times$).

Существующие конструкции систем жидкостного охлаждения осуществляют сброс тепла во внешнюю среду благодаря внешнему теплообменнику. При этом повышение температуры окружающей среды существенно снижает эффективность работы всей системы охлаждения и приводит к перегреву процессора. А с учётом того, что высокопроизводительные микропроцессоры при работе в режиме максимальной производительности и разгоне быстро достигают максимальной рабочей температуры, даже при нормальной работе системы охлаждения, этот фактор приводит к опасности повреждения электроники.

Всё это подводит к тому, что для повышения эффективности систем охлаждения требуется понижение температуры входящего в теплообменник водоблока теплоносителя, что возможно достичь только благодаря искусственному охлаждению. Наиболее преимущественные пути охлаждения — это использование элементов Пельтье, как например, в работах [13–14] или переход на охлаждение по схеме чиллера. Эти два пути вполне приемлемы с точки зрения энергозатрат и эффективности охлаждения, однако имеют и свои конструкционные и эксплуатационные недостатки. Анализ и исследование коэффициента теплопередачи между процессором и теплообменником показывает, что усовершенствование последнего без кардинального изменения теплообменной поверхности слабо влияет на увеличение эффективности теплоотвода. Модификации теплоносителя наножидкостями [15–17] и ферромагнитными [18–21] жидкостями дают свой результат, но остаются менее эффективными чем понижение температуры.

Поэтому, на основании проделанной работы следует вывод о применении в системах жидкостного охлаждения микроэлектроники встраиваемых систем охлаждения, и как показали ранние исследования, охлаждение с помощью стандартной холодильной машины менее энергозатратно, чем использование полупроводников, однако это несёт в себе сложности в точности поддержание терморежимов. Однако данный вопрос требует особых исследований в связи со сложностью гидродинамики и тепловых исследований [22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты явно показывают необходимость понижения температуры теплоносителя и повышения его расхода для улучшения охлаждения микропроцессора. Из математической модели и эксперимента видно, что при повышении температуры воздуха, проходящего через внешний теплообменник, система охлаждения теряет свою эффективность, что обуславливает высокие температуры теплоносителя, идущего на охлаждение микропроцессора. В таких условиях способом повышения эффективности охлаждения может стать

переход на системы искусственного холода различной конструкции. Повышение теплопередачи между процессором и теплоносителем, а также теплоносителем и окружающей средой также играет важную роль, с точки зрения роста производительности охлаждения и энергозатрат.

Полученная модель также позволяет рассчитывать оптимальную мощность системы охлаждения под конкретную производительность микропроцессора, что снижает капитальные и энергетические затраты на эксплуатацию всего комплекса «микропроцессор– система охлаждения».

Исследования поддержания параметров температуры в заданных режимах для конкретного вида микропроцессора также позволяет получить из модели необходимый результат, что существенно облегчает проектирование микропроцессора, с точки зрения его оценки тепловыделения и создание систем охлаждения под новые поколения появляющихся изделий электронной промышленности.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Федорович Д.С.* Деграация центральных процессоров в персональных компьютерах / Д. С. Федорович; науч. рук. С. В. Сизиков // Актуальные проблемы энергетики 2020 [Электронный ресурс]: материалы студенческой научно-технической конференции / сост. И. Н. Прокопеня. — Минск: БНТУ, 2020. — С. 278–284.
2. *Srinivasan J. et al.* The case for lifetime reliability-aware microprocessors // ACM SIGARCH Computer Architecture News. — 2004. — Т. 32. — № 2. — С. 276.
3. *Moore G.* BCramming more components onto integrated circuits, [Electronics, vol. 38, pp. 114–117, Apr. 19, 1965.
4. *Mahajan R., Chiu C., Chrysler G.* Cooling a microprocessor chip // Proceedings of the IEEE. — 2006. — Т. 94. — № 8. — С. 1476–1486.
5. *Пехуров Н.В., Нацаренус П.А.* Сравнение методов традиционного охлаждения с иммерсионным методом охлаждения систем // Вестник магистратуры. — 2019. — № 6–2. — С. 93.
6. *Шелехов И.Ю., Коваленко А.Е., Залуцкий А.А.* Оптимизация процесса использования вторичной тепловой энергии // The Scientific Heritage. — 2022. — № 82–1. — С. 68–70.
7. *Немтырёва К.А.* Системы охлаждения в ПК / Конкурс лучших студенческих работ — 2021. — С. 9–12.

8. *Harun M.A., Sidik N.A.C.* A review on development of liquid cooling system for central processing unit (CPU) // *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. – 2020. – Т. 78. – № 2. – С. 98–113.
9. *Gullbrand J. et al.* Liquid cooling of compute system // *Journal of Electronic Packaging*. – 2019. – Т. 141. – № 1. – С. 010802.
10. *Halim N.F.C. and Sidik N.A.C.* “Nanorefrigerants: A Review on Thermophysical Properties and Their Heat Transfer Performance.” *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology* 20, No. 1 (2020): 42–50. 11.
11. *Halim N.F.C. and Sidik N.A.C.* “Mixing Chamber for Preparation of Nanorefrigerant.” *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology* 21, No 1 (2020): 32–40.
12. Effect of Temperature on Power-Consumption with the i7–2600K /. 2011 <https://forums.anandtech.com>
13. Рыбаков А.В. Разработка системы охлаждения процессора персонального компьютера с использованием элемента Пельтье // Договора № 17–1–004502 от 19.10. 2017 г. между Фондом Президентских грантов и РМПО. Проект «Организация региональной сети и проведение бизнес-школ-выставок, направленных на развитие у школьников и студентов навыков научного предпринимательства, способствующих внедрению экономически перспективных разработок молодых инноваторов». – С. 12.
14. Лебакин А.И., Червенчук В.Д., Забудский А.И. К вопросу о практическом применении элементов Пельтье // Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК. – 2019. – С. 165–173.
15. *Al-Rashed M.H. et al.* Investigation on the CPU nanofluid cooling // *Microelectronics Reliability*. – 2016. – Т. 63. – С. 159–165.
16. *Bahiraei M., Heshmatian S.* Electronics cooling with nanofluids: A critical review // *Energy Conversion and Management*. – 2018. – Т. 172. – С. 438–456.
17. *Qi C. et al.* Experimental study on thermo-hydraulic performances of CPU cooled by nanofluids // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – Т. 153. – С. 557–565.
18. *Deng Y., Liu J.* Optimization and evaluation of a high-performance liquid metal CPU cooling product // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. – 2013. – Т. 3. – № 7. – С. 1171–1177.
19. *Sarafraz M.M. et al.* On the convective thermal performance of a CPU cooler working with liquid gallium and CuO/water nanofluid: A comparative study // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – Т. 112. – С. 1373–1381.
20. *Habibishandiz M., Saghir M.Z.* A critical review of heat transfer enhancement methods in the presence of porous media, nanofluids, and microorganisms // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2022. Т. 30. С. 101267.
21. *Fan F. et al.* A novel thermal efficiency analysis on the thermo-hydraulic performance of nanofluids in an improved heat exchange system under adjustable magnetic field // *Applied Thermal Engineering*. 2020. Т. 179. С. 115688.
22. Букин В.Г. Гидравлическое сопротивление при кипении хладагентов в трубах горизонтальных и вертикальных испарителей судовых холодильных машин / В.Г. Букин, А.И. Андреев, А.В. Букин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 2. С. 92–99.
DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-92-99.

MATHEMATICAL MODELING OF A MICROPROCESSOR LIQUID COOLING SYSTEM

© 2024 A. I. Andreev^{1,*}, A. E. Semenov¹

¹ *Russia Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education,
Astrakhan State Technical, 414056 Astrakhan, Russia*

*E-mail: aresut79@mail.ru

This work examines the efficiency of the microprocessor-cooling system and maintaining the optimal temperature of electronic components. To do this, experiments were carried out on the existing microprocessor cooling system with control of all main parameters, primarily such as temperature and coolant flow, performance and temperature of the processor. Based on the data obtained, a mathematical model was built that describes the change in microprocessor power and allows one to calculate the temperatures and speeds of coolants, as well as obtain the most effective modes for the operation of the cooling system. The obtained experimental data and mathematical model make it possible to predict the required power of the cooling system and the operating parameters of microelectronic components, which is especially important when new generations of microprocessors with the highest performance appear. The data obtained also makes it possible to calculate parameters for existing processors in order to maximize the efficiency and reliability of their operation, which is also relevant for other electronic devices, in particular microcontrollers.

Keywords: microprocessor, liquid cooling system, mathematical model, thermal conductivity, heat transfer coefficient, electronics, cooling systems, processor heat dissipation, thermal regime, reliability

REFERENCES

1. *Fedorovich D.S.* Degradaciya centralnyh processorov v personalnyh kompyuterah / D. S. Fedorovich; nauch. ruk. S. V. Sizikov // Aktualnye problemy energetiki 2020 [Electronic resource] : materialy studencheskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii / sost. I. N. Prokopenya. — Minsk : BNTU, 2020. — pp. 278–284.
2. *Srinivasan J. et al.* The case for lifetime reliability-aware microprocessors // ACM SIGARCH Computer Architecture News. — 2004. — T. 32. — № 2. — pp. 276.
3. *Moore G.* BCramming more components onto integrated circuits, [Electronics, vol. 38, pp. 114–117, Apr. 19, 1965.
4. *Mahajan R., Chiu C., Chrysler G.* Cooling a microprocessor chip // Proceedings of the IEEE. — 2006. — T. 94. — № 8. — pp. 1476–1486.
5. *Pehurov N.V., Nacarenus P.A.* Svravnenie metodov tradicionnogo ohlazhdeniya s immersionnym metodom ohlazhdeniya sistem // Vestnik magistratury. — 2019. — № 6–2. — pp. 93.
6. *Shelehov I. Yu., Kovalenko A.E., Zaluckij A.A.* Optimizaciya processa ispolzovaniya vtorichnoj teplovoj energii // The Scientific Heritage. — 2022. — № 82–1. — S. 68–70.
7. *Nemtyryova K.A.* Sistemy ohlazhdeniya v PK/ Konkurs luchshih studencheskih rabot — 2021. — S. 9–12. *Harun M.A., Sidik N.A.C.* A review on development of liquid cooling system for central processing unit (CPU) // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. — 2020. — T. 78. — № 2. — pp. 98–113.
8. *Harun M.A., Sidik N.A.C.* A review on development of liquid cooling system for central processing unit (CPU) // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. — 2020. — T. 78. — № 2. — C. 98–113.
9. *Gullbrand J. et al.* Liquid cooling of compute system // Journal of Electronic Packaging. — 2019. — T. 141. — № 1. — pp. 010802.
10. *Halim N. F. C. and Sidik N.A.C.* "Nanorefrigerants: A Review on Thermophysical Properties and Their Heat Transfer Performance." Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology 20, No. 1 (2020): 42–50. 11.
11. *Halim N. F. C. and Sidik N.A.C.* "Mixing Chamber for Preparation of Nanorefrigerant." Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology 21, No. 1 (2020): 32–40.
12. Effect of Temperature on Power-Consumption with the i7-2600K/. 2011 <https://forums.anandtech.com>
13. *Rybakov A.V.* Razrabotka sistemy ohlazhdeniya processora personalnogo kompyutera s ispolzovaniem elementa Pelte // Dogovora № 17-1-004502 ot 19.10. 2017 g. mezhdru Fondom Prezidentskih grantov i RMPO. Proekt «Organizaciya regionalnoj seti i provedenie biznes-shkol-vystavok, napravlennyh na razvitiye u shkolnikov i studentov navykov nauchnogo predprinimatelstva, sposobstvuyushih vnedreniyu ekonomicheskimi perspektivnyh razrabotok molodyh innovatorov». — pp. 12.
14. *Lebakin A.I., Chervenchuk V.D., Zabudskij A.I.* K voprosu o prakticheskom primenenii elementov Pelte // Rol nauchno-issledovatel'skoj raboty obuchayushih'sya v razvitiy APK. — 2019. — S. 165–173. *Al-Rashed M. H. et al.* Investigation on the CPU nanofluid cooling // Microelectronics Reliability. — 2016. — T. 63. — pp. 159–165.
15. *Al-Rashed M.H. et al.* Investigation on the CPU nanofluid cooling // Microelectronics Reliability. — 2016. — T. 63. — C. 159–165.
16. *Bahiraei M., Heshmatian S.* Electronics cooling with nanofluids: A critical review // Energy Conversion and Management. — 2018. — T. 172. — C. 438–456.
17. *Qi C. et al.* Experimental study on thermo-hydraulic performances of CPU cooled by nanofluids // Energy Conversion and Management. — 2017. — T. 153. — pp. 557–565.
18. *Deng Y., Liu J.* Optimization and evaluation of a high-performance liquid metal CPU cooling product // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. — 2013. — T. 3. — № 7. — C. 1171–1177.
19. *Sarafraz M.M. et al.* On the convective thermal performance of a CPU cooler working with liquid gallium and CuO/water nanofluid: A comparative study // Applied Thermal Engineering. — 2017. — T. 112. — pp. 1373–1381.
20. *Habibishandiz M., Saghir M.Z.* A critical review of heat transfer enhancement methods in the presence of porous media, nanofluids, and microorganisms // Thermal Science and Engineering Progress. — 2022. — T. 30. — pp. 101267.
21. *Fan F. et al.* A novel thermal efficiency analysis on the thermo-hydraulic performance of nanofluids in an improved heat exchange system under adjustable magnetic field // Applied Thermal Engineering. — 2020. — T. 179. — pp. 115688.
22. *Bukin V.G., Andreev A.I., Bukin A.V.* Gidravlicheskie soprotivleniya pri kipenii hladagentov v trubah gorizontalnyh i vertikalnyh isparitelej sudovyh holodilnyh mashin Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. — 2020. — № 2. — pp. 92–99. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-92-99.

СОГЛАСОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ

© 2024 г. Е. Н. Васильев^{1,*}

¹ Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения
Российской академии наук, Красноярск, Россия

*E-mail: ven@icm.krasn.ru

Поступила в редакцию 19 апреля 2024 г.

После доработки 10 июня 2024 г.

Принята к публикации 10 июня 2024 г.

Рассмотрена термоэлектрическая система охлаждения и терморегулирования электронных устройств. На основе математической модели, использующей в качестве исходных данных рабочие характеристики серийного термоэлектрического модуля, проведены расчеты энергетических характеристик термоэлектрической системы охлаждения с учетом ее термических сопротивлений. Результаты расчетов представлены в виде диаграмм, которые позволяют производить согласованный выбор термических сопротивлений системы, обеспечивающий заданные значения холодопроизводительности и температурного перепада.

Ключевые слова: теплонагруженный элемент, термоэлектрическая система охлаждения, термическое сопротивление, холодильный коэффициент, холодопроизводительность

DOI: 10.31857/S0544126924050068

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших факторов, необходимых для обеспечения ресурса и стабильности функционирования радиоэлектронной аппаратуры, является поддержание оптимального температурного режима всех её элементов. Для выполнения этой задачи используются различные методы и технические средства. Отвод теплоты от теплонагруженных элементов может осуществляться механизмами излучения и конвекции [1, 2], для более эффективного охлаждения за счет теплопроводности, используются современные материалы, имеющие коэффициент теплопроводности в несколько раз превышающий соответствующее значение для меди [3, 4]. В то же время эти методы зачастую не имеют достаточной эффективности охлаждения и требуемой точности поддержания заданного температурного режима. Термоэлектрические системы охлаждения и терморегулирования являются перспективными для обеспечения оптимальных тепловых режимов электроники [5–7]. Они дают возможность плавного и точного регулирования температуры, а также прецизионного термостабирования [8]. Термоэлектрические устройства имеют ряд преимуществ по сравнению с другими системами охлаждения и терморегулирования: высокую надежность, отсутствие движущихся частей, практически неограниченный ресурс работы, не-

большие габариты и вес, малую инерционность, независимость от ориентации в пространстве.

Основной задачей термоэлектрической системы охлаждения и терморегулирования является поддержание заданной температуры электронного устройства, имеющего мощность тепловыделения Q . Выбор оптимальной конструкции системы охлаждения является достаточно сложной и неоднозначной задачей, поскольку зависит от целого набора исходных параметров, характеризующих отдельные элементы конструкции. Причем взаимное тепловое влияние этих элементов имеет нелинейный характер, поэтому наибольшая эффективность работы системы охлаждения достигается при согласованном наборе параметров, обеспечивающем минимизацию тепловых потерь. В работе [9] был проведен анализ влияния термических сопротивлений на характеристики процесса охлаждения, направленный на обоснование выбора оптимального термоэлектрического модуля (ТЭМ) для системы охлаждения. При этом было показано, что применение высокопроизводительного ТЭМ не дает автоматического повышения эффективности системы охлаждения, оно может быть обеспечено только при выполнении достаточно жестких требований к величине термических сопротивлений. Помимо выбора оптимального ТЭМ важной задачей при разработке термоэлектрической системы

охлаждения и терморегулирования является согласованный выбор ее основных параметров. В настоящей работе представлена методика согласования, которая обосновывает выбор такого соотношения термических сопротивлений и рабочих характеристик ТЭМ, при которых обеспечиваются заданные значения холодопроизводительности и температурного перепада.

2. КОНСТРУКЦИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ И ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ

Схема термоэлектрической системы охлаждения и терморегулирования приведена на рис. 1. Теплота от теплонагруженного элемента 1 с мощностью тепловыделения Q передается на холодную сторону ТЭМ через два тепловых контакта и теплораспределитель 2, которые имеют суммарное термическое сопротивление R_T . Теплораспределитель, обычно представляющий собой прямоугольную пластину из материала с высоким коэффициентом теплопроводности, необходим для выравнивания распределения тепловой мощности, поступающей от теплонагруженного элемента на поверхность термоэлектрического модуля при несоответствии их поперечных размеров. Термоэлектрический модуль 3 отводит тепловую мощность Q и обеспечивает при собственном энергопотреблении W заданный перепад температуры ΔT_0 между основанием теплонагруженного элемента и внешней средой. Устройство отвода теплоты 4, имеющее термическое сопротивление R_S , передает теплоту $Q + W$ с горячей стороны ТЭМ во внешнюю среду.

Термическое сопротивление теплораспределителя зависит от материала и размеров теплонагруженного элемента, для медного теплораспределителя $40 \times 40 \text{ мм}^2$ его минимальное термическое сопротивление составляет примерно 0.03 К/Вт при размере элемента $22.5 \times 22.5 \text{ мм}^2$ [10]. Значение термического сопротивления тепловых контактов зависит от теплопроводности наполнителя, толщины и площади зазора. При использовании стандартной термопасты КПТ-8 с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0.85 \text{ Вт/мК}$ величина термического сопротивления $R = \delta/(\lambda S)$ при толщине слоя $\delta = 0.1\text{--}0.2 \text{ мм}$ составит $0.074\text{--}0.15 \text{ К/Вт}$ для площади контакта $S = 40 \times 40 \text{ мм}^2$ и $0.23\text{--}0.46 \text{ К/Вт}$ для площади контакта $S = 22.5 \times 22.5 \text{ мм}^2$. Значение R может быть существенно снижено при использовании паяных контактов, так низкотемпературный припой ПОСВ-50 имеет $\lambda = 16 \text{ Вт/мК}$. Анализ возможных значений термического сопротивления устройства отвода теплоты R_S приведена в [11, 12]. Характерный диапазон термического сопротивления устройств теплоотвода на основе воздушного теплообменника (кулера) составляет $0.1\text{--}0.5 \text{ К/Вт}$.

Расчет энергетических характеристик термоэлектрической системы охлаждения производился с помощью соотношения, связывающего общий температурный перепад ΔT_0 между основанием теплонагруженного элемента и внешней средой с перепадами температур на отдельных элементах конструкции

$$\Delta T_0 = R_T Q - \Delta T_{\text{ТЭМ}}(I, Q) + R_S(Q + U(I, Q)I),$$

где U , I — напряжение и сила тока электропитания ТЭМ. Первое и третье слагаемые в правой части формулы соответствуют перепаду температуры в теплораспределителе и устройстве теплоотвода, второе слагаемое — разность температур между горячей и холодной сторонами ТЭМ. Зависимости $U(I, Q)$ и $\Delta T_{\text{ТЭМ}}(I, Q)$ определяются на основе рабочих характеристик ТЭМ с помощью интерполяционных полиномов, методика расчета этих зависимостей представлена в [11, 13]. Для серийно выпускаемых ТЭМ их рабочие характеристики обычно приводятся в технической документации производителя. Вычислительная модель, основанная на численном решении нелинейной алгебраической системы уравнений, позволяет рассчитать энергетические характеристики термоэлектрической системы охлаждения для заданных значений исходных параметров R_S , R_T , ΔT_0 и силы тока I . Расчеты проведены на примере серийного ТЭМ «S-199–14–11» с максимальными значениями холодопроизводительности $Q = 124.2 \text{ Вт}$ и перепада температуры $\Delta T = 72.5 \text{ К}$, достигаемыми при силе тока $I_{\text{max}} = 7.9 \text{ А}$ и напряжении $U_{\text{max}} = 25.3 \text{ В}$ [14].

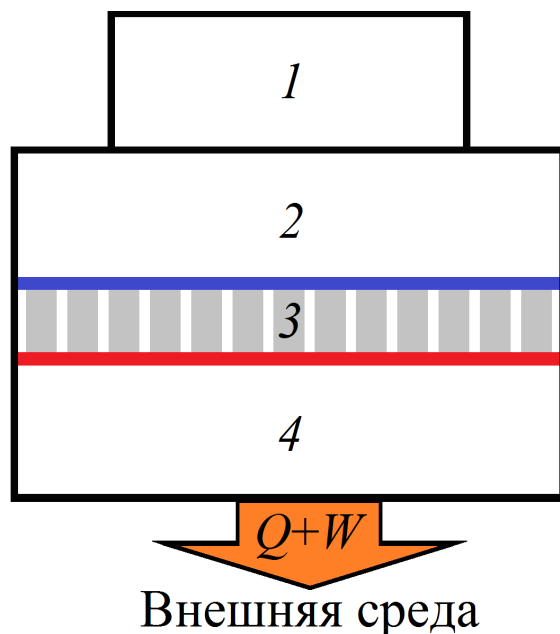


Рис. 1. Схема термоэлектрической системы охлаждения и терморегулирования: 1 — теплонагруженный элемент, 2 — теплораспределитель, 3 — термоэлектрический модуль, 4 — устройство отвода теплоты.

Выбор режима работы ТЭМ и его согласование с другими параметрами системы охлаждения основывается на анализе энергетических характеристик с учетом заданной мощности тепловыделения теплонагруженного элемента и требуемого температурного перепада между основанием элемента и внешней средой. Такими энергетическими характеристиками являются холодопроизводительность и холодильный коэффициент, которые прежде всего зависят от силы тока электропитания ТЭМ. Из технической документации производителя известно, что максимальная холодопроизводительность отдельного ТЭМ достигается при значении силы тока $I_{\max}$. Для термоэлектрической системы охлаждения в целом дополнительное влияние оказывают тепловые потери на термических сопротивлениях теплораспределителя, устройства теплоотвода и тепловых контактов. Эти потери приводят к ухудшению энергетических характеристик.

Величина холодопроизводительности численно равна тепловой мощности, которая будет отведена от теплонагруженного элемента при заданных параметрах системы охлаждения. Зависимость холодопроизводительности $Q(I)$ для $\Delta T_0 = -10^\circ\text{C}$ приведена на рис. 2 для следующих значений термических сопротивлений: 1 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 2 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 3 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$, 4 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$. Представленные зависимости $Q(I)$ имеют максимумы, величина которых зависит от термических сопротивлений. Из сравнения графиков видно более существенное влияние изменения величины R_S , это обусловлено тем, что через устройство теплоотвода во внешнюю среду помимо теплоты от теплонагруженного элемента дополнительно передается собственное тепловыделение ТЭМ. Значения силы тока, при которых достигаются максимумы Q , также в большей степени зависят от

термического сопротивления R_S . Значениям Q , которые ниже максимальных, соответствуют по два значения силы тока, более эффективный режим работы обеспечивается при меньшем значении силы тока, поскольку в этом случае собственное энергопотребление ТЭМ ниже.

Значительное влияние на холодопроизводительность термоэлектрической системы оказывает степень охлаждения теплонагруженного элемента. Для сравнения на рис. 3 приведена зависимость $Q(I)$ для $\Delta T_0 = -20^\circ\text{C}$ и тех же значений термических сопротивлений: 1 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 2 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 3 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$, 4 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$. В данном случае характер зависимостей не изменился, но значения максимумов кривых от 27% ($R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$) до 47% ($R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$) ниже, чем на рис. 2. Следует отметить, что производители термоэлектрических систем в сопроводительной документации обычно предлагают в качестве оптимального параметра электропитания ТЭМ уровень напряжения или тока, составляющий 75% от максимальной величины [15, 16]. Рассчитанные зависимости $Q(I)$ дают возможность определить с учетом термических сопротивлений оптимальные значения силы тока, которые могут существенно отличаться от рекомендации производителя. Так при $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$ зависимости $Q(I)$, приведенные на рис. 2 и 3 (синие линии), имеют максимумы в диапазоне силы тока 4.1–4.3 А, что существенно ниже рекомендованного значения $I = 0.75 I_{\max} \approx 6 \text{ А}$.

Энергетическая эффективность системы охлаждения определяется холодильным коэффициентом ε , который равен отношению холодопроизводительности Q к величине потребляемой электрической мощности W . Влияние термических сопротивлений на холодильный коэффициент исследовано в [17], где было установлено,

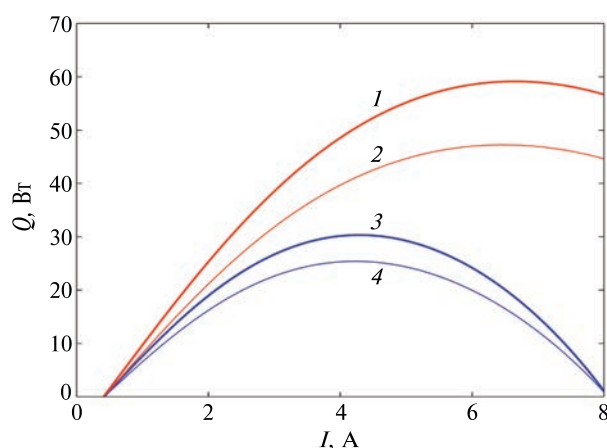


Рис. 2. Зависимости $Q(I)$ для $\Delta T_0 = -10^\circ\text{C}$: 1 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 2 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 3 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$, 4 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$.

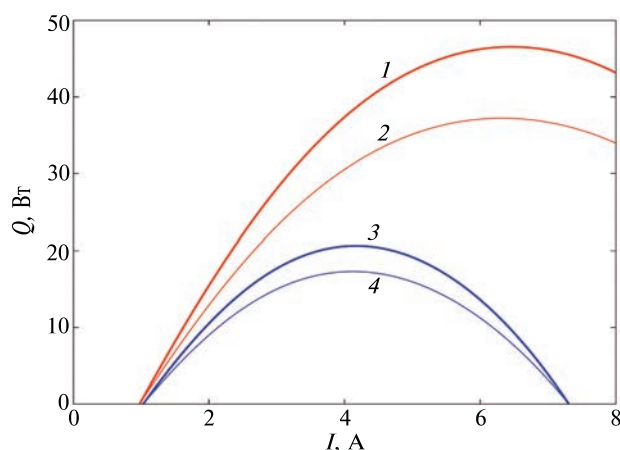


Рис. 3. Зависимости $Q(I)$ для $\Delta T_0 = -20^\circ\text{C}$: 1 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 2 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 3 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$, 4 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$.

что зависимости $\varepsilon(I)$ имеют максимумы, величины и расположение которых существенно зависят от значений R_S и R_T . Максимальные значения характеристик $Q(I)$ и $\varepsilon(I)$ характеризуют потенциал применяемого ТЭМ при заданных ΔT_0 , R_T и R_S , поскольку позволяют определить предельно достижимый предел энергетической эффективности термоэлектрической системы охлаждения. Поэтому дальнейший анализ энергетических характеристик проведен применительно к максимальным значениям $Q_{\max}$ и $\varepsilon_{\max}$.

Результаты расчетов холодопроизводительности для значений $\Delta T = -10^\circ\text{C}$ и -20°C приведены на плоскости $R_S - R_T$ в виде изолиний, на которых указаны соответствующие им значения $Q_{\max}$ в Ваттах (рис. 4). Данная диаграмма дает общую картину зависимости максимальной холодопроизводительности от термических сопротивлений термоэлектрической системы охлаждения и позволяет оценивать величины R_S и R_T , при которых обеспечивается заданный температурный

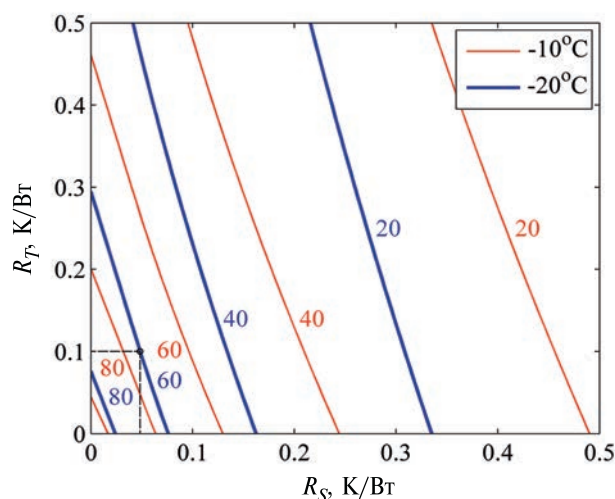


Рис. 4. Диаграмма холодопроизводительности, на кривых указаны значения $Q_{\max}$ в Ваттах.

режим теплонагруженного элемента с известной мощностью тепловыделения. Так, например, для $\Delta T_0 = -20^\circ\text{C}$ значение $Q = 60$ Вт может быть достигнуто при $R_T = 0.1$ К/Вт и $R_S \approx 0.05$ К/Вт, эти значения отмечены на рисунке штриховыми линиями, а место пересечения на изолинии выделено кружком. При этом каждой точке на изолинии соответствует своя согласованная пара значений R_S и R_T . В то же время холодопроизводительность 60 Вт не может быть получена при $R_S > 0.08$ К/Вт для $\Delta T_0 = -20^\circ\text{C}$ и $R_S > 0.13$ К/Вт для $\Delta T_0 = -10^\circ\text{C}$. Термическое сопротивление теплораспределителя в меньшей степени ограничивает величину холодопроизводительности, величина $Q = 60$ Вт не может быть получена при $R_T > 0.29$ К/Вт для

$\Delta T_0 = -20^\circ\text{C}$ и $R_T > 0.46$ К/Вт для $\Delta T_0 = -10^\circ\text{C}$. Более сильное ограничивающее влияние величины R_S на холодопроизводительность объясняется увеличенным перепадом температуры в устройстве теплоотвода при отводе суммарной тепловой мощности $Q + W$. Из проведенного анализа следует, что представленная диаграмма позволяет определить диапазоны значений R_S и R_T , при которых достигается заданная холодопроизводительность термоэлектрической системы охлаждения. Определение силы тока, обеспечивающей заданную холодопроизводительность, производится с помощью зависимостей $Q(I)$ (рис. 2).

Как было показано выше, заданная холодопроизводительность может быть достигнута в определенных диапазонах термических сопротивлений теплораспределителя и устройства теплоотвода, но при этом возможны различные сочетания пар значений R_S и R_T . Для выбора значений термических сопротивлений, соответствующих наибольшей эффективности системы охлаждения, на рис. 5

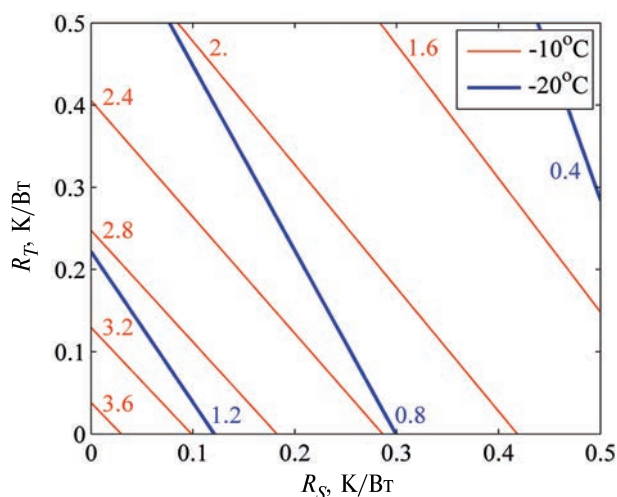


Рис. 5. Диаграмма холодильного коэффициента, на кривых указаны значения $\varepsilon_{\max}$.

приведена диаграмма, на изолиниях которой указаны значения $\varepsilon_{\max}$. Значение холодильного коэффициента определяется по выбранной с помощью рис. 4 паре значений R_S и R_T для заданного значения Q , так для выделенной на рис. 4 точки соответствующее ей значение $\varepsilon_{\max} = 1.24$. Изолинии $\varepsilon_{\max}$ на большей части плоскости $R_S - R_T$ имеют меньший угол наклона к оси R_S по сравнению с изолиниями $Q_{\max}$, поэтому наиболее высокое значение холодильного коэффициента будет получено при $R_T = 0$, так в рассматриваемом случае изолинии $Q_{\max} = 60$ Вт соответствует значение $\varepsilon_{\max} = 1.33$. Следует отметить, что на практике нулевые значения термического сопротивления не могут быть получены, поэтому при анализе следует исходить из

значений R_s и R_T для реальных конструкций тепло-распределителя и устройства теплоотвода с массогабаритными параметрами, соответствующими техническим требованиям к термоэлектрической системе охлаждения. Дополнительно диаграммы холодопроизводительности и холодильного коэффициента позволяют рассчитать собственное энергопотребление ТЭМ, определяемое из соотношения $W = Q/\epsilon$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведен анализ зависимостей холодопроизводительности от силы тока при различных значениях общего температурного перепада ΔT_0 и термических сопротивлений R_s и R_T . По результатам расчетов энергетических характеристик термоэлектрической системы охлаждения и терморегулирования получены диаграммы, отображающие на плоскости определяющих параметров $R_s - R_T$ изолинии максимальных значений холодопроизводительности и холодильного коэффициента. Диаграммы позволяют на этапе разработки проводить анализ энергетических характеристик и на этой основе осуществлять согласование параметров основных элементов, входящих в конструкцию термоэлектрической системы охлаждения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартюшев С.Г., Шеремет М.А. Два фактора, влияющие на интенсивность охлаждения тепловыделяющих элементов в герметичных блоках // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 5. С. 390–398. <https://doi.org/10.7868/S0544126914050056>
2. Boutina L., Bessaih R. Numerical simulation of mixed convection air-cooling of electronic components mounted in an inclined channel // Applied Thermal Engineering. 2011. V. 31. P. 2052–2062. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.021>
3. Глинский И.А., Зенченко Н.В. Расчет теплораспределителя элемента конструкции для мощных СВЧ-транзисторов // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. № 4. С. 269–274. <https://doi.org/10.7868/S0544126915040055>
4. Зуев С.М., Прохоров Д.А., Малеев Р.А., Дебелов В.В., Лавриков А.А. Применение графена в системе охлаждения персональной электронно-вычислительной машины // Микроэлектроника. 2021. Т. 50. № 6. С. 445–452. <https://doi.org/10.31857/S0544126921050094>
5. Chang Y.W., Chang C.C., Ke M.T., Chen S.L. Thermoelectric air-cooling module for Chang electronic devices // Applied Thermal Engineering. 2009. V. 29. № 13. P. 2731–2737. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.01.004>
6. Штерн М.Ю., Штерн Ю.И., Шерченков А.А. Термоэлектрические системы для обеспечения тепловых режимов вычислительной техники // Известия вузов. Сер. Электроника. 2011. № 4. С. 30–38.
7. Васильев Е.Н. Термоэлектрическое охлаждение теплонегруженных элементов электроники // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 2. С. 133–141. <https://doi.org/10.31857/S054412692002009X>
8. Загороднов А.П., Якунин А.Н. Прецизионное термостатирование резонатора на объемных акустических волнах. Моделирование и синтез системы управления // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 10. С. 1–14.
9. Васильев Е.Н. О важности термических сопротивлений системы охлаждения при выборе термоэлектрического модуля // Журнал технической физики. 2023. Т. 93. № 5. С. 615–621. <https://doi.org/10.21883/JTF.2023.05.55455.13–23>
10. Васильев Е.Н. Расчет термического сопротивления теплораспределителя системы охлаждения теплонегруженного элемента // Журнал технической физики. 2018. Т. 88. № 4. С. 487–491. <https://doi.org/10.21883/JTF.2018.04.45714.2312>
11. Васильев Е.Н. Определение режимов термоэлектрического охлаждения теплонегруженных элементов электроники // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 4. С. 297–303. <https://doi.org/10.31857/S0544126920030072>
12. Васильев Е.Н. Оптимизация режимов термоэлектрического охлаждения теплонегруженных элементов с учетом термического сопротивления теплоотводящей системы // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 9. С. 1290–1296. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.09.44899.2094>
13. Васильев Е.Н. Расчет и оптимизация режимов термоэлектрического охлаждения теплонегруженных элементов // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 1. С. 80–86. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.01.44022.1725>
14. Электронный ресурс. Режим доступа: https://crystalltherm.com/upload/iblock/5af/1knj372x6ho3v82cw-zufypmaktsqm4ph/TM_S_199_14_11_L2_SPEC.pdf
15. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://kryotherm.ru/ru/assembly-instructions.html>
16. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://ecogenthermoelectric.com/ru/technicheskaya-podderzhka.html>
17. Васильев Е.Н. Влияние термических сопротивлений на холодильный коэффициент термоэлектрической системы охлаждения // Журнал технической физики. 2021. Т. 91. № 5. С. 743–747. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.05.50684.296–20>

PARAMETERS MATCHING OF THE THERMOELECTRIC SYSTEM PARAMETERS FOR COOLING HEAT-LOADED ELECTRONICS ELEMENTS

© 2024 E. N. Vasil'ev^{1,*}

¹ *Institute of Computational Modelling, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia*

**E-mail ven@icm.krasn.ru*

A thermoelectric cooling and thermal control system for electronic devices is considered. Based on a mathematical model using the operating characteristics of a serial thermoelectric module as initial data, calculations of the energy characteristics of a thermoelectric cooling system were carried out, taking into account its thermal resistances. The calculation results are presented in the form of diagrams, which allow for a coordinated selection of the system's thermal resistances, ensuring the specified values of the cooling capacity and temperature difference.

Keywords: heat-loaded element, thermoelectric cooling system, thermal resistance, coefficient of performance, cooling capacity

REFERENCES

1. *Martyushev S.G., Sheremet M.A.* Two factors affecting the cooling rate of fuel elements in sealed units // *Mikroelektronika*. 2014. V. 43. No 5. P. 390–398. doi: 10.7868/S0544126914050056
2. *Boutina L., Bessaih R.* Numerical simulation of mixed convection air-cooling of electronic components mounted in an inclined channel // *Applied Thermal Engineering*. 2011. V. 31. P. 2052–2062. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.021>
3. *Glinskii I.A., Zenchenko N.V.* Computer simulation of the heat distribution element for high-power microwave transistors // *Russian Microelectronics*. 2015. V. 44, No 4. P. 236–240. doi: 10.1134/S1063739715040058
4. *Zuev S.M., Prokhorov D.A., Maleev R.A., Debelov V.V., Lavrikov A.A.* Application of Graphene in The Cooling System of a Personal Electronic Computer // *Russian Microelectronics*. 2021. V. 50. No 6. P. 404–411. <https://doi.org/10.1134/S1063739721050097>
5. *Chang Y.W., Chang C.C., Ke M.T., Chen S.L.* Thermoelectric air-cooling module for Chang electronic devices // *Applied Thermal Engineering*. 2009. V. 29. № 13. P. 2731–2737. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.01.004>
6. *Shtern M.Yu., Shtern Yu.I., Sherchenkov A.A.* Thermoelectric systems for providing thermal modes of computer technology // *Izvestija Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektronika*. 2011. No 4. P. 30–38.
7. *Vasil'ev E.N.* Thermoelectric cooling of heat-loaded electronics // *Russian Microelectronics*. 2020. V. 49. No 2. P. 123–131. <https://doi.org/10.1134/S1063739720020092>
8. *Zagorodnov A.P., Yakunin A.N.* Precision thermostating of a resonator on volume acoustic waves. Modeling and synthesis of a control system // *Zhurnal Radioelektroniki*. 2013. No 10. P. 1–14, <http://jre.cplire.ru/iso/oct13/12/text.pdf>
9. *Vasil'ev E.N.* On the importance of thermal resistances of the cooling system when choosing a thermoelectric module // *Technical Physics*. 2023. V. 68. No 5. P. 574–579, <https://doi.org/10.21883/tp.2023.05.56062.13-23>
10. *Vasil'ev E.N.* Calculation of the thermal resistance of a heat distributor in the cooling system of a heat-loaded element // *Technical Physics*. 2018. V. 63. No 4. P. 471–475. <https://doi.org/10.21883/JTF.2018.04.45714.2312>
11. *Vasil'ev E.N.* Determination of thermoelectric cooling modes of heat-loaded electronics // *Russian Microelectronics*. 2020. V. 49. No 4. P. 278–284, <https://doi.org/10.31857/S0544126920030072>
12. *Vasil'ev E.N.* Optimization of thermoelectric cooling regimes for heat-loaded elements taking into account the thermal resistance of the heat-spreading system // *Technical Physics*. 2017. V. 62. No 9. P. 1300–1306, <https://doi.org/10.1134/S1063784217090286>
13. *Vasil'ev E.N.* Calculation and optimization of thermoelectric cooling modes of thermally loaded elements // *Technical Physics*. 2017. V. 62. No 1. P. 90–96. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.01.44022.1725>
14. https://crystalltherm.com/upload/iblock/5af/1knj372x6ho3v82cwzufypmaktsqm4ph/TM_S_199_14_11_L2_SPEC.pdf. Accessed September 13, 2024.
15. <http://kryotherm.ru/ru/assembly-instructions.html>. Accessed September 13, 2024.
16. <http://ecogenthermoelectric.com/ru/texnicheskaya-podderzhka.html>. Accessed September 13, 2024.
17. *Vasil'ev E.N.* The Effect of thermal resistances on the coefficient of performance of a thermoelectric cooling system // *Technical Physics*. 2021. V. 66. No 6. P. 815–819. <https://doi.org/10.1134/S1063784221050248>

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ СИНТЕЗА СХЕМ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ ЛОГИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ СИГНАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАВНОМЕРНЫХ РАЗДЕЛИМЫХ КОДОВ

© 2024 г. Д. В. Ефанов^{1,2,3,4,*}, Е. И. Елина^{1,**}

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

² Российский университет транспорта, Москва, Россия

³ Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

⁴ ООО «НИПИ «ТрансСтройбезопасность», Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: TrES-4b@yandex.ru

**E-mail: eseniya-elina@mail.ru

Поступила в редакцию 16 апреля 2024 г.

После доработки 10 июня 2024 г.

Принята к публикации 10 июня 2024 г.

Исследуются особенности синтеза схем встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов с применением равномерных разделимых кодов. Рассматриваются структуры трех типов: тип I – структура с коррекцией части сигналов с выходов объекта диагностирования, формирующих проверочные символы заданного кода в схеме встроенного контроля; тип II – структура с коррекцией части сигналов с выходов объекта диагностирования, формирующих информационные символы заданного кода в схеме встроенного контроля; тип III – структура с коррекцией сигналов от всех выходов объекта диагностирования. Для структур всех типов приведены формулы определения числа способов синтеза схем встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов с применением заданного кода. Установлены новые свойства структур, характеризующие особенности роста числа способов синтеза схем встроенного контроля при увеличении числа выходов, формирующих информационные и проверочные символы. Найдены закономерности, позволяющие на практике оценивать число способов синтеза схем встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов с применением равномерных разделимых кодов в целях выбора наилучшего из них по заданным критериям. Приведены примеры, демонстрирующие эффективность использования найденных закономерностей.

Ключевые слова: самопроверяемые цифровые устройства, логическая коррекция сигналов, равномерные разделимые коды в задачах обнаружения неисправностей, синтез схем встроенного контроля

DOI: 10.31857/S0544126924050079

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование схем встроенного контроля (СВК) позволяет обнаруживать неисправности и ошибки в вычислениях устройствами автоматики и вычислительной техники в процессе реализации ими своих функций [1, 2]. Такое свойство крайне важно для обеспечения надежности и безопасности устройств, функционирующих в системах различного назначения, в том числе, являющихся составляющими систем управления ответственными технологическими процессами в промышленности и на транспорте [3, 4].

При синтезе СВК используются принципы дробного и кратного резервирования, а также диверсной защиты. Существуют методы, основан-

ные на использовании внутренней избыточности – внесении ее в структуру исходного устройства (объект диагностирования), а также основанные на внесении внешней избыточности – применении внешних средств технического диагностирования. Здесь широко используются методы теории информации и кодирования в процессе выбора способа внесения избыточности [5–10].

Известен [11, 12] традиционный подход к организации СВК с внешними средствами технического диагностирования, основанный на отождествлении булевого вектора, формируемого на выходах объекта диагностирования, с информационным вектором и дополнении его во внешней СВК с применением контрольных устройств до кодового слова заранее выбранного двоичного рав-

номерного кода. В процессе вычисления функций объектом диагностирования во время эксплуатации могут возникать неисправности, приводящие к ошибкам на его выходах, что, в свою очередь, приводит и к возникновению искажений символов кодовых слов и фиксируется тестером заданного кода. Часто в традиционной структуре организации СВК применяют свойства двоичных разделимых кодов: информационный вектор формируется на выходах объекта диагностирования, а контрольный — на выходах устройства контрольной логики. При этом физически объект диагностирования и устройство контрольной логики разделены, что позволяет понятным образом обеспечивать самопроверяемость структуры конечной системы [13].

Достоинства традиционного подхода к организации СВК очевидны, а вот недостатком является то, что при использовании заданного равномерно-го кода число вариантов синтеза СВК для устройства с конкретными параметрами является крайне малым. Это не позволяет в ряде случаев добиваться обеспечения свойства его самопроверяемости. Однако существует альтернативный подход, основанный на логической коррекции сигналов (ЛКС) в СВК, лишенный данного недостатка [14].

Использование ЛКС при организации СВК с применением равномерных кодов дает возможность синтеза большого числа самопроверяемых устройств. Более того, в практических приложениях удастся синтезировать полностью самопроверяемые структуры даже в тех случаях, когда этого невозможно добиться при использовании традиционных подходов к синтезу СВК, основанных на применении традиционного подхода [15].

Использованию ЛКС совместно с равномерными кодами посвящено большое количество работ (однако в сотни раз меньше, чем использованию традиционного подхода). Например, в [16–18] обсуждаются особенности применения неразделимых равномерных кодов при синтезе СВК на основе ЛКС, в [19–21] — разделимых равномерных кодов с учетом их свойств, в [22, 23] — использования свойств особых классов булевых функций совместно с ЛКС, а в [24, 25] — применения сразу же двух диагностических признаков для организации контроля вычислений на основе ЛКС. В данной статье авторы приводят результаты исследований общего числа способов синтеза СВК на основе ЛКС с применением равномерных разделимых кодов.

ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ДОПУЩЕНИЯ

При синтезе схем встроенного контроля (СВК) на основе логической коррекции сигналов (ЛКС) с применением разделимых равномерных кодов, или (m, k) -кодов, где m и k — число информационных и проверочных символов, могут рассматриваться три основные структуры. Структура типа I

подразумевает использование ЛКС для преобразования части функций, вычисляемых на выходах объекта диагностирования, в функции, описывающие проверочные символы заданного (m, k) -кода. Следует отметить, что такое преобразование оказывается единственным для заданной последовательности преобразуемых выходов объекта диагностирования в силу того, что каждому информационному вектору будет соответствовать единственный контрольный вектор (m, k) -кода. Структура типа II основана на логической коррекции сигналов только с тех выходов объекта диагностирования, которые участвуют в формировании информационных символов (m, k) -кода. Здесь преобразование не является единственным, так как для (m, k) -кода при условии $m > k$ одному контрольному вектору может соответствовать два и более информационных векторов. Структура типа III — обобщенная структура организации СВК — основана на использовании ЛКС сразу же со всех выходов объекта диагностирования. В такой структуре возможно гораздо большее количество вариантов доопределения значений информационных и проверочных символов заданного (m, k) -кода. Эти структуры не являются новыми. Структура типа I исследовалась в работах [19, 20, 26], структура типа II рассматривалась в [27] и структура типа III — в [28, 29].

На рис. 1 приведены каскады элементов преобразования для структур всех трех типов. Во всех структурах объектом диагностирования является блок $F(x)$, формирующий систему булевых функций $f_1, f_2, \dots, f_n$, $n = m + k$. Данные функции участвуют в формировании кодовых слов выбранного на этапе проектирования СВК (m, k) -кода, описываемых функциями $h_1, h_2, \dots, h_n$. В структурах типа I и II часть из рабочих функций объекта диагностирования корректируются, а часть — нет; в структуре типа III корректируются значения всех булевых функций. Функции логической коррекции сигналов вычисляются блоком контрольной логики $G(x)$.

Ясно, что могут рассматриваться и другие вариации структур организации СВК на основе ЛКС с применением (m, k) -кодов. Однако в дальнейшем изложении ограничимся только тремя основными.

Работа устройств $F(x)$ происходит при подаче на t входов множества булевых векторов длиной t . Рассмотрим общий случай, когда объект диагностирования функционирует при подаче полного множества входных комбинаций. Его мощность равна 2^t . При рассмотрении (m, k) -кода будем рассматривать полное множество его кодовых слов. Его мощность будет равна 2^m . Максимальное число контрольных векторов будет равно 2^k . Причем, будем рассматривать только те (m, k) -коды, для которых при формировании всех 2^m информационных векторов, контрольные векторы генерируются равномерно. Другими словами, ка-

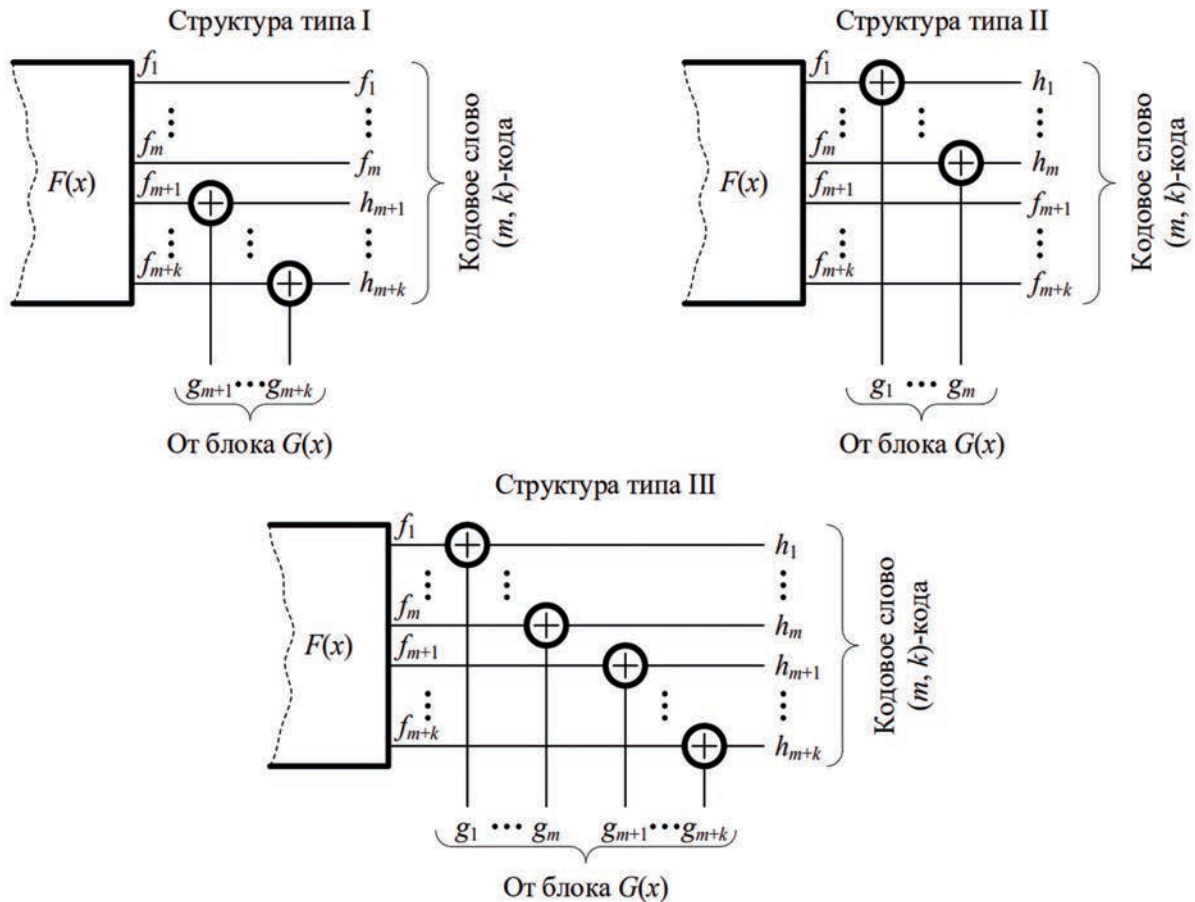


Рис. 1. Каскады элементов преобразования в структурах организации СВК на основе ЛКС с применением (m, k) -кодов.

ждому контрольному вектору соответствует 2^{m-k} информационных векторов. Такое ограничение вызвано вопросами обеспечения самопроверяемости СВК и необходимостью формирования некоторого множества кодовых слов (m, k) -кода для проверки его тестера в процессе эксплуатации (конкретное количество кодовых слов, информационных и контрольных векторов определяется при проектировании СВК с учетом особенностей реализации тестера и условий эксплуатации самопроверяемого устройства) [27–29].

Поставим следующую задачу: определить общее количество способов синтеза СВК по трем различным структурам и оценить возможности использования (m, k) -кодов при этом.

МНОГООБРАЗИЕ СПОСОБОВ СИНТЕЗА СХЕМ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ

В структуре типа I каждый информационный вектор (m, k) -кода однозначно будет определять значения проверочных символов в контрольном векто-

ре. Для выбранных выходов m и k существует только один способ доопределения функций ЛКС. Число способов выбора k преобразуемых функций из $m+k$ определяется величиной C_{m+k}^k . Число вариантов выбора последовательности размещения символов в информационном векторе определяется числом перестановок из m элементов – числом P_m . Число вариантов выбора последовательности размещения символов в контрольном векторе определяется числом перестановок из k элементов – числом P_k . Таким образом, общее число способов организации СВК по структуре типа I с учетом однозначного доопределения функций ЛКС равно:

$$N_I = C_{m+k}^k P_m P_k = \frac{(m+k)!}{k!m!} m!k! = (m+k)! \quad (1)$$

В структуре типа II заполнение на каждом входном наборе не однозначное. Напомним, что рассматривается случай использования (m, k) -кода, при котором информационные векторы распределены между контрольными равномерно (такие коды широко распространены и используются в практике синтеза высоконадежных цифровых схем [30]). Чис-

ло способов выбора m преобразуемых функций из $m+k$ определяется величиной $C_{m+k}^m = C_{m+k}^k$. Число вариантов выбора последовательности размещения символов в контрольном векторе определяется числом перестановок из m элементов — числом P_m . Число вариантов выбора последовательности размещения символов в контрольном векторе определяется числом перестановок из k элементов — числом P_k . На каждой входной комбинации из 2^t можно 2^{m-k} способами доопределить функции так, чтобы был сформирован информационный вектор с необходимым контрольным. При этом должно выполняться условие: $t \geq k$. В противном случае не удастся обеспечить формирование по разу каждого контрольного вектора. Общее число способов доопределения, таким образом, будет равно $2^t 2^{m-k} = 2^{t+m-k}$. Отсюда становится ясно, что число способов построения СВК с учетом отмеченного равно:

$$N_{II} = 2^{t+m-k} C_{m+k}^k P_m P_k = 2^{t+m-k} \frac{(m+k)!}{k!m!} m!k! = 2^{t+m-k} (m+k)! \quad (2)$$

Структура типа III отличается от вышерассмотренных тем, что на каждом из 2^t входных наборов можно получить любое кодовое слово из полного множества кодовых слов (m, k) -кода с учетом необходимости формирования каждого контрольного вектора хотя бы на одном входном наборе. Далее будем полагать, что доопределение будет таковым, что все контрольные векторы будут формироваться на одинаковом числе входных комбинаций, т.е. распределение формируемых контрольных векторов будет равномерно. В таком случае имеем 2^t кодовых слова, распределенных равномерно между 2^k контрольными векторами, или имеем 2^{t-k} кодовых слов с одним и тем же контрольным вектором. Следует отметить естественное ограничение, как и в случае со структурой типа II, величина $t \geq k$.

Число способов выбора m информационных символов из $m+k$ символов, по-прежнему, равно $C_{m+k}^m = C_{m+k}^k$. Число вариантов выбора последовательности размещения символов в информационном векторе определяется числом перестановок из m элементов — числом P_m . Число вариантов выбора

последовательности размещения символов в контрольном векторе определяется числом перестановок из k элементов — числом P_k . При этом на каждом входном наборе можно осуществить доопределение функций ЛКС для получения информационных символов 2^{m-k} способами, поскольку все кодовые слова (их 2^m) распределены равномерно между всеми контрольными векторами (их 2^k); проверочные символы будут получены после единственным способом. Итого, имеем $2^{t-k} 2^{m-k} = 2^{t+m-2k}$ способов доопределения функций логической коррекции.

Но здесь не учитывается, что первый контрольный вектор может быть сформирован на $C_{2^t-2^{t-k}}^{2^{t-k}}$ входных комбинациях; второй — на $C_{2^t-2^{t-k}}^{2^{t-k}}$; третий — на $C_{2^t-2^{t-k}}^{2^{t-k}}$; ...; 2^k -ый — на $C_{2^t-(2^k-1)2^{t-k}}^{2^{t-k}} = C_{2^t-2^{t-k}}^{2^{t-k}} = 1$. Всего число вариантов доопределений с учетом возможных вариантов сочетаний выходов равно:

$$C_{2^t-2^{t-k}}^{2^{t-k}} C_{2^t-2^{t-k}}^{2^{t-k}} C_{2^t-2^{t-k}}^{2^{t-k}} \cdot \dots \cdot C_{2^t-(2^k-1)2^{t-k}}^{2^{t-k}} = \prod_{i=0}^{2^k-1} C_{2^t-i \cdot 2^{t-k}}^{2^{t-k}}$$

С учетом числа способов доопределения, имеем следующее общее число способов построения СВК по структуре типа III:

$$N_{III} = 2^{t+m-2k} C_{m+k}^k P_m \prod_{i=0}^{2^k-1} C_{2^t-i \cdot 2^{t-k}}^{2^{t-k}} = 2^{t+m-2k} (m+k)! \prod_{i=0}^{2^k-1} C_{2^t-i \cdot 2^{t-k}}^{2^{t-k}} \quad (3)$$

Рассмотрим отдельно произведение в формуле (3).

Введем обозначения: $a = 2^{t-k}$, $b = 2^t$. Тогда 2^k можно получить следующим образом: $a = \frac{2^t}{2^k} = \frac{b}{2^k} \Rightarrow 2^k = \frac{b}{a}$. Произведение в выражении (3) с учетом введенных обозначений может быть записано в виде:

$$\begin{aligned} \prod_{i=0}^{2^k-1} C_{2^t-i \cdot 2^{t-k}}^{2^{t-k}} &= \prod_{i=0}^{\frac{b}{a}-1} C_{b-i \cdot a}^a = C_b^a C_{b-a}^a C_{b-2a}^a \cdot \dots \cdot C_{b-\left(\frac{b}{a}-3\right)a}^a C_{b-\left(\frac{b}{a}-2\right)a}^a C_{b-\left(\frac{b}{a}-1\right)a}^a = \\ &= \frac{b!}{a!(b-a)!} \cdot \frac{(b-a)!}{a!(b-2a)!} \cdot \frac{(b-2a)!}{a!(b-3a)!} \times \dots \times \\ &\times \frac{\left(b-\left(\frac{b}{a}-3\right)a\right)!}{a!\left(b-\left(\frac{b}{a}-3\right)a-a\right)!} \cdot \frac{\left(b-\left(\frac{b}{a}-2\right)a\right)!}{a!\left(b-\left(\frac{b}{a}-2\right)a-a\right)!} \cdot \frac{\left(b-\left(\frac{b}{a}-1\right)a\right)!}{a!\left(b-\left(\frac{b}{a}-1\right)a-a\right)!} = \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{b!}{a!(b-a)!} \cdot \frac{(b-a)!}{a!(b-2a)!} \cdot \frac{(b-2a)!}{a!(b-3a)!} \cdot \dots \cdot \frac{(3a)!}{a!(2a)!} \cdot \frac{(2a)!}{a!a!} \cdot \frac{a!}{a!0!} = \\
&= \frac{b!}{a! \cdot 1} \cdot \frac{1}{a! \cdot 1} \cdot \frac{1}{a! \cdot 1} \cdot \dots \cdot \frac{1}{a! \cdot 1} \cdot \frac{1}{a! \cdot 1} \cdot \frac{1}{a! \cdot 1} = \frac{b!}{\underbrace{a! \cdot a! \cdot \dots \cdot a!}_{\frac{b}{a}}} = \frac{b!}{(a!)^{\frac{b}{a}}}
\end{aligned} \quad (4)$$

Вернемся к введенным выше обозначениями и подставим исходные выражения в формулу (4):

$$\prod_{i=0}^{2^k-1} C_{2^t-i \cdot 2^{t-k}}^{2^{t-k}} = \prod_{i=0}^{\frac{b-a}{a}-1} C_{b-i \cdot a}^a = \frac{b!}{(a!)^{\frac{b}{a}}} = \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}} \quad (5)$$

Формула (3), описывающая число способов построения СВК по структуре III, с учетом (5) приводится к виду:

$$N_{III} = 2^{t+m-2k} (m+k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}} \quad (6)$$

Используя (1), (2) и (6), можно определить для рассматриваемого объекта диагностирования общее количество способов организации СВК на основе ЛКС с применением (m, k) -кода. В табл. 1–3 приведены результаты расчетов для некоторых значений t , m и k для всех трех структур. К примеру, при исходных данных $t = 4$, $m = 4$, $k = 2$ число способов организации СВК по структурам типа I, II и III равно $N_I = 720$, $N_{II} = 46080$, $N_{III} = 726485760000$. Из сравнения данных такого простого примера следует, что структура типа III обладает более высокой вариативностью, чем первые две структуры: существует в 1009008000 раз больше вариантов ее построения, чем по структуре типа I и в 15765750 раз, чем по структуре типа II.

Из сравнения же формул (1), (2) и (6) непосредственно следует, что представляет интерес исследование способов формирования алгоритмов построения СВК на основе структур типа II и III, тогда как

Таблица 1. Число способов организации СВК по структуре типа I

m	k		
	2	3	4
4	720	5 040	40 320
5	5 040	40 320	362 880
6	40 320	362 880	3 628 800
7	362 880	3 628 800	39 916 800
8	3 628 800	39 916 800	479 001 600
9	39 916 800	479 001 600	6 227 020 800
10	479 001 600	6 227 020 800	87 178 291 200

по структуре типа I число способов определяется исключительно вариантами выбора выходов для преобразования и перестановок выходов внутри информационного и контрольного векторов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЛА СПОСОБОВ ОРГАНИЗАЦИИ СХЕМ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ ПО РАЗЛИЧНЫМ СТРУКТУРАМ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ЧИСЛА ВЫХОДОВ ОБЪЕКТА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

4.1. Свойства структур, проявляющиеся при увеличении числа выделяемых информационных символов при постоянстве числа проверочных символов

Установим, как изменяется общее число вариантов построения СВК по структурам всех трех типов.

Определим, как изменится число вариантов построения СВК по структуре типа I с увеличением m на 1 при неизменном k :

$$\delta_I^{m+1, m} = \frac{((m+1)+k)!}{(m+k)!} = m+k+1 \quad (7)$$

Найдем, как изменится число вариантов построения СВК по структуре типа I с увеличением m на 2 при неизменном k :

$$\begin{aligned}
\delta_I^{m+2, m} &= \frac{((m+2)+k)!}{(m+k)!} = \\
&= (m+k+1)(m+k+2) = (m+k+2)^2
\end{aligned} \quad (8)$$

Обобщим (7) и (8) и найдем, как изменится число вариантов построения СВК по структуре типа I с увеличением m на произвольное $p \in \mathbb{N}$ при неизменном k :

$$\begin{aligned}
\delta_I^{m+p, m} &= \frac{((m+p)+k)^k}{(m+k)^k} = \\
&= (m+k+1)(m+k+2) \cdot \dots \cdot (m+k+p) = \\
&= (m+k+p)^p
\end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, справедливо следующее умозаключение.

Утверждение 1. При увеличении числа информационных символов при постоянном значении числа проверочных символов на величину $p \in \mathbb{N}$ общее число способов построения СВК на основе ЛКС

Таблица 2. Число способов организации СВК по структуре типа II

t	m	k		
		2	3	4
2	4	11 520	—	—
2	5	161 280	—	—
2	6	2 580 480	—	—
2	7	46 448 640	—	—
2	8	928 972 800	—	—
2	9	20 437 401 600	—	—
2	10	490 497 638 400	—	—
...	...	...	...	...
3	4	23 040	80 640	—
3	5	322 560	1 290 240	—
3	6	5 160 960	23 224 320	—
3	7	92 897 280	464 486 400	—
3	8	1 857 945 600	10 218 700 800	—
3	9	40 874 803 200	245 248 819 200	—
3	10	980 995 276 800	6 376 469 299 200	—
...	...	...	...	...
4	4	46 080	161 280	645 120
4	5	645 120	2 580 480	11 612 160
4	6	10 321 920	46 448 640	232 243 200
4	7	185 794 560	928 972 800	5 109 350 400
4	8	3 715 891 200	20 437 401 600	122 624 409 600
4	9	81 749 606 400	490 497 638 400	3 188 234 649 600
4	10	1 961 990 553 600	12 752 938 598 400	89 270 570 188 800

с применением заданного (m, k) -кода по структуре типа I увеличивается в $(m + k + p)^p$ раз.

Аналогично изложенному выше найдем, как изменится число вариантов построения СВК по структуре типа II с увеличением m на 1 при неизменном k :

$$\delta_{II}^{m+1, m} = \frac{2^{t+(m+1)-k} ((m+1) + k)!}{2^{t+m-k} (m+k)!} = 2(m+k+1) \quad (10)$$

Установим, как меняется число вариантов построения СВК по структуре типа II с увеличением m на произвольную величину $p \in \mathbb{N}$ при неизменном k :

$$\begin{aligned} \delta_{II}^{m+p, m} &= \frac{2^{t+(m+p)-k} ((m+p) + k)!}{2^{t+m-k} (m+k)!} = \\ &= 2^p (m+k+1)(m+k+2) \cdot \dots \cdot (m+k+p) = \\ &= 2^p (m+k+p)^p \end{aligned} \quad (11)$$

С увеличением m на 1 при неизменном k для структуры типа III число способов построения СВК изменяется на величину:

$$\delta_{III}^{m+1, m} = \frac{2^{t+(m+1)-2k} ((m+1) + k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}}{2^{t+m-2k} (m+k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}} = \quad (12)$$

$$= 2(m+k+1)$$

С учетом полученных ранее закономерностей (см. формулу 9), установим, как меняется число вариантов построения СВК по структуре типа III с увеличением m на произвольную величину $p \in \mathbb{N}$ при неизменном k .

Таблица 3. Число способов организации СВК по структуре типа III

t	m	k		
		2	3	4
2	4	69 120	—	—
2	5	967 680	—	—
2	6	15 482 880	—	—
2	7	278 691 840	—	—
2	8	5 573 836 800	—	—
2	9	122 624 409 600	—	—
2	10	2 942 985 830 400	—	—
...	...	...	...	...
3	4	14 515 200	406 425 600	—
3	5	203 212 800	6 502 809 600	—
3	6	3 251 404 800	117 050 572 800	—
3	7	58 525 286 400	2 341 011 456 000	—
3	8	1 170 505 728 000	51 502 252 032 000	—
3	9	25 751 126 016 000	1 236 054 048 768 000	—
3	10	618 027 024 384 000	32 137 405 267 968 000	—
...	...	...	...	...
4	4	726 485 760 000	1 647 669 703 680 000	843 606 888 284 160 000
4	5	10 170 800 640 000	26 362 715 258 880 000	15 184 923 989 114 880 000
4	6	162 732 810 240 000	474 528 874 659 840 000	303 698 479 782 297 600 000
4	7	2 929 190 584 320 000	9 490 577 493 196 800 000	6 681 366 555 210 547 200 000
4	8	58 583 811 686 400 000	208 792 704 850 329 600 000	160 352 797 325 053 132 800 000
4	9	1 288 843 857 100 800 000	5 011 024 916 407 910 400 000	4 169 172 730 451 381 452 800 000
4	10	30 932 252 570 419 200 000	130 286 647 826 605 670 4000 000	116 736 836 452 638 680 678 400 000

$$\delta_{III}^{m+p, m} = \frac{2^{t+(m+1)-2k} ((m+1)+k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}}{2^{t+m-2k} (m+k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}} = 2^p (m+k+p)^p \quad (13)$$

Утверждение 2. При увеличении числа информационных символов при постоянном значении числа проверочных символов на величину $p \in \mathbb{N}$ общее число способов построения СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода по структурам типа II и III увеличивается в $2^p (m+k+p)^p$ раз.

4.2. Свойства структур, проявляющиеся при увеличении числа выделяемых проверочных символов при постоянстве числа информационных символов

Рассмотрим, как меняется общее количество способов синтеза СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода в случае изменения

числа выделяемых проверочных символов при постоянстве числа информационных символов.

Анализ (7)–(9) приводит к следующему умозаключению.

Утверждение 3. При увеличении числа проверочных символов при постоянном значении числа информационных символов на величину $p \in \mathbb{N}$ общее число способов построения СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода по структуре типа I увеличивается в $(m+k+p)^p$ раз.

Установим, как меняется число вариантов построения СВК по структуре типа II с увеличением k на произвольную величину $p \in \mathbb{N}$ при неизменном m :

$$\delta_{II}^{k+p, k} = \frac{2^{t+m-(k+p)} (m+(k+p))!}{2^{t+m-k} (m+k)!} = 2^{-p} (m+k+1)(m+k+2) \cdot \dots \cdot (m+k+p) = \quad (14)$$

$$= 2^{-p} (m + k + p)^p$$

Выражение (14) доказывает следующее положение:

Утверждение 4. При увеличении числа проверочных символов при постоянном значении числа информационных символов на величину $p \in \mathbb{N}$ общее число способов построения СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода по структуре типа II изменяется в $2^{-p} (m + k + p)^p$ раз.

Пользуясь (6), найдем, как меняется число вариантов построения СВК по структуре типа III с увеличением k на произвольную величину $p \in \mathbb{N}$ при неизменном m :

$$\begin{aligned} \delta_{III}^{k+p, k} &= \frac{2^{t+m-2(k+p)} (m + (k + p))! \frac{2^t!}{(2^{t-(k+p)}!)^{2^{k+p}}}}{2^{t+m-2k} (m + k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}} = \\ &= 2^{-2p} (m + k + p)^p \frac{(2^{t-k}!)^{2^k}}{(2^{t-(k+p)}!)^{2^{k+p}}} = \\ &= \frac{(2^{t-k}!)^{2^k} (m + k + p)^p}{4^p (2^{t-k-p}!)^{2^{k+p}}} \end{aligned} \quad (15)$$

Выражение (15) приводит к такому положению:

Утверждение 5. При увеличении числа проверочных символов при постоянном значении числа информационных символов на величину $p \in \mathbb{N}$ общее число способов построения СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода по структуре

типа III изменяется в $\frac{(2^{t-k}!)^{2^k} (m + k + p)^p}{4^p (2^{t-k-p}!)^{2^{k+p}}}$ раз.

Отметим, что могут быть установлены аналогичные свойства структур типов I, II и III, проявляющиеся при увеличении числа проверочных символов при постоянстве числа информационных символов (m, k) -кода, а также проявляющиеся при изменении как чисел m , так и k .

4.3. Сравнение числа способов синтеза СВК на основе структур различных типов

Найдем отношение величины N_{II} к N_I :

$$\chi_{II, I} = \frac{N_{II}}{N_I} = \frac{2^{t+m-k} (m + k)!}{(m + k)!} = 2^{t+m-k} \quad (16)$$

Выражение (16) доказывает следующее положение:

Утверждение 6. Общее число способов построения СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода по структуре типа II для одних и тех же t , m и k больше в 2^{t+m-k} раз, чем аналогичное число для структуры типа I.

Найдем отношение величины N_{III} к N_I :

$$\begin{aligned} \chi_{III, I} &= \frac{N_{III}}{N_I} = \frac{2^{t+m-2k} (m + k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}}{(m + k)!} = \\ &= 2^{t+m-2k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}} \end{aligned} \quad (17)$$

Конечное выражение в (17) свидетельствует о следующем:

Утверждение 7. Общее число способов построения СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода по структуре типа III для одних и тех же t , m и k больше в $2^{t+m-2k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}$ раз, чем аналогичное число для структуры типа I.

И, наконец, найдем отношение величины N_{III} к N_{II} :

$$\begin{aligned} \chi_{III, II} &= \frac{N_{III}}{N_{II}} = \frac{2^{t+m-2k} (m + k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}}{2^{t+m-k} (m + k)!} = \\ &= 2^{-k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}} \end{aligned} \quad (18)$$

Становится ясным следующее:

Утверждение 8. Общее число способов построения СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода по структуре типа III для одних и тех же t , m и k больше в $2^{-k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}$ раз, чем аналогичное число для структуры типа II.

Установим, как изменяется значение $\chi_{II, I}$ с увеличением m на 1:

$$\chi_{II, I}^{m, m+1} = \frac{2^{t+(m+1)-k}}{2^{t+m-k}} = 2 \quad (19)$$

Обобщим результат и определим, как изменяется значение $\chi_{II, I}$ с увеличением m на произвольное $q \in \mathbb{N}$:

$$\chi_{II, I}^{m, m+q} = \frac{2^{t+(m+q)-k}}{2^{t+m-k}} = 2^q \quad (20)$$

Аналогично определим, как изменяется значение $\chi_{III, I}$ с увеличением m на 1:

$$\chi_{III, I}^{m, m+1} = \frac{2^{t+(m+1)-2k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}}{2^{t+m-2k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}} = 2 \quad (21)$$

Обобщим результат и определим, как изменяется значение $\chi_{III, I}$ с увеличением m на произвольное $q \in \mathbb{N}$:

$$\chi_{III, I}^{m, m+q} = \frac{2^{t+(m+q)-2k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}}{2^{t+m-2k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}} = 2^q \quad (22)$$

Из сравнения (20) и (22) следует, что при увеличении m на произвольное натуральное число q значения величин $\chi_{II, I}$ и $\chi_{III, I}$ изменяются одинаково. Из (18) следует, что величина $\chi_{III, II}$ с увеличением m на произвольное натуральное число q не меняется.

Утверждение 9. Величины $\chi_{II, I}$ и $\chi_{III, I}$ не зависят от числа m и при увеличении на q изменяются одинаково в 2^q раз.

Утверждение 10. Величина $\chi_{III, II}$ не зависит от числа m и при увеличении на q не изменяется.

Отмеченные в настоящем разделе свойства структур типа I, II и III могут учитываться на практике при выборе способа организации СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода.

УЧЕТ ЧИСЛА СПОСОБОВ РЕАЛИЗАЦИИ СВК НА ПРАКТИКЕ

Рассмотрим примеры применения полученных в исследовании зависимостей.

Пример 1. Даны устройства $F_1(x)$ и $F_2(x)$ с одинаковым числом входов $t = 4$ и $n_1 = 10$ и $n_2 = 12$ выходами. Определить число способов организации СВК на основе ЛКС с применением (m, k) -кода, удовлетворяющего введенным ранее ограничениям, по структурам типа I, II и III при $k = 2$ и установить, во сколько раз больше способов построения СВК для устройства $F_2(x)$, чем для устройства $F_1(x)$, для каждой из структур.

Рассматриваемый пример можно дополнить рис. 2, где приведены устройства и их параметры.

Используем формулы (1), (2) и (6) и определим числа N_I , N_{II} , N_{III} для структур трех типов, организуемых для устройства $F_1(x)$:

$$N_I = (8 + 2)! = 10! = 3\,628\,800$$

$$N_{II} = 2^{4+8-2} (8 + 2)! = 3\,715\,891\,200$$

$$N_{III} = 2^{4+8-2 \cdot 2} (8 + 2)! \frac{2^4!}{(2^{4-2}!)^{2^2}} =$$

$$= 58\,583\,811\,686\,400\,000$$

Аналогично для $F_2(x)$ имеем:

$$N_I = (10 + 2)! = 12! = 479\,001\,600$$

$$N_{II} = 2^{4+10-2} (10 + 2)! = 1\,961\,990\,553\,600$$

$$N_{III} = 2^{4+10-2 \cdot 2} (10 + 2)! \frac{2^4!}{(2^{4-2}!)^{2^2}} =$$

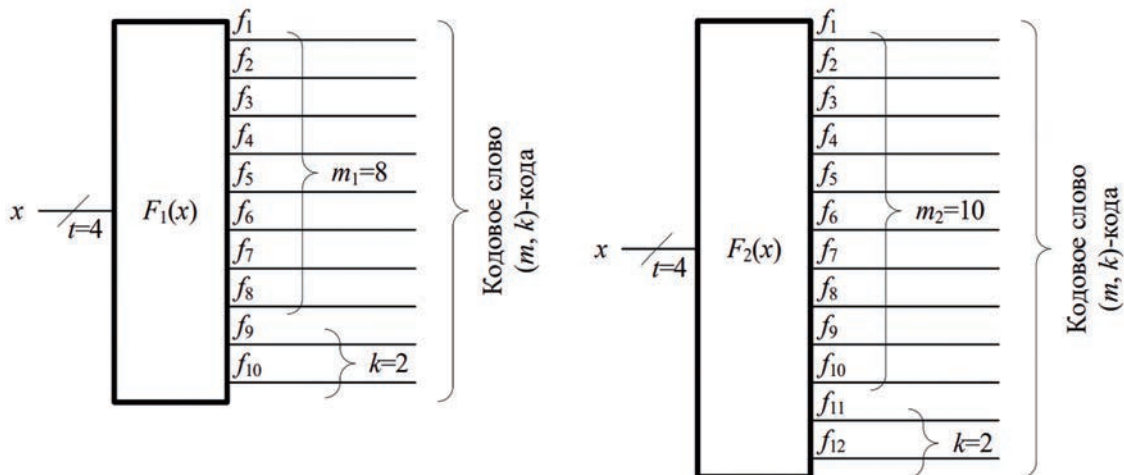


Рис. 2. Заданные устройства $F_1(x)$ и $F_2(x)$.

= 30 932 252 570 419 200 000

Читатель может найти те же данные в табл. 1–3.

С использованием формулы (8), найдем значение следующего выражения:

$$\delta_I^{10,8} = (8 + 2 + 2)^2 = (8 + 2 + 1)(8 + 2 + 2) = 11 \cdot 12 = 132$$

Далее используем (11) при $p = 2$:

$$\delta_{II}^{10,8} = 2^2 (8 + 2 + 2)^2 = 2^2 (8 + 2 + 1)(8 + 2 + 2) = 4 \cdot 11 \cdot 12 = 528$$

Формула (13) для рассматриваемого случая $p = 2$ дает аналогичный результат:

$$\delta_{III}^{10,8} = 2^2 (8 + 2 + 2)^2 = 528$$

Пример 2. Дано устройство $F(x)$ с числом входов $t = 4$ и выходов $n = 16$. Требуется установить число способов синтеза СВК на основе ЛКС по структурам всех трех типов с учетом контроля всех выходов на основе (m, k) -кода, удовлетворяющего введенным ранее ограничениям, при $k = 2$, а также при делении выходов на два подмножества одинаковой мощности и контроля каждого из них на основе аналогичных структур, а также определить, во сколько раз больше окажется число способов синтеза СВК в случае контроля всех выходов на основе одного кода.

Рассматриваемый пример можно проиллюстрировать рис. 3.

Используем те же формулы (1), (2) и (6) и определим числа N_I , N_{II} , N_{III} для структур трех типов,

организуемых для устройства $F(x)$ при его контроле на основе заданного кода:

$$N_I = (14 + 2)! = 16! = 20\,922\,789\,888\,000$$

$$N_{II} = 2^{4+14-2} (14 + 2)! = 1\,371\,195\,958\,099\,968\,000$$

$$N_{III} = 2^{4+14-2 \cdot 2} (14 + 2)! \frac{2^4!}{(2^{4-2}!)^2} = 21\,617\,932\,676\,414\,570\,496 \cdot 10^6$$

Разобьем выходы на две группы по 8 выходов в каждой и организуем контроль каждой из них на основе всех трех структур. Получаем следующее число способов организации СВК:

$$N_I = ((6 + 2)!)^2 = (8!)^2 = 1\,625\,702\,400$$

$$N_{II} = (2^{4+6-2} (6 + 2)!)^2 = 106\,542\,032\,486\,400$$

$$N_{III} = \left(2^{4+6-2 \cdot 2} (6 + 2)! \frac{2^4!}{(2^{4-2}!)^2} \right)^2 = 264\,819\,675\,286\,078 \cdot 10^{14}$$

Таким образом, число вариантов организации СВК на основе ЛКС и рассматриваемого (m, k) -кода по структурам типа I и II больше числа вариантов организации СВК для двух выделяемых подмножеств в 12870 раз. Для структуры типа III

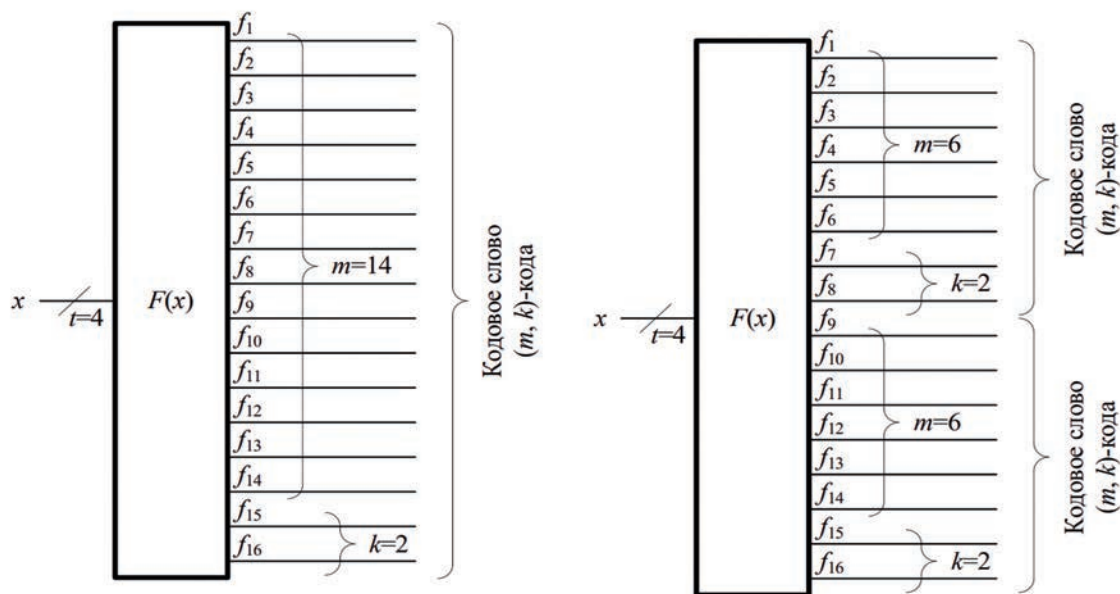


Рис. 3. Принцип организации контроля вычислений по рассматриваемому примеру.

число вариантов организации СВК, наоборот, уменьшилось в 1225 раз.

Могут быть рассмотрены и иные примеры, демонстрирующие эффективность использования установленных в настоящей статье свойств структур типов I, II и III.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большое число способов организации СВК на основе ЛКС с применением (m, k) -кодов позволяет на практике не только синтезировать различные по показателям структурной избыточности устройства с обнаружением неисправностей, но и гораздо проще обеспечивать их самопроверяемость, чем при использовании традиционной структуры, подразумевающей единственную реализацию для выбранного кода (при условии заданных элементной базы и способов синтеза контрольных элементов).

Наибольшей вариативностью обладает структура типа III, позволяющая синтезировать гигантское количество СВК на основе ЛКС с применением (m, k) -кодов. Несколько меньшей вариативностью обладает структура типа II и наименее вариативной является структура типа I, где число способов организации СВК определяется только числом вариантов выбора преобразуемых выходов и перестановками внутри групп преобразуемых и не преобразуемых выходов.

Установленные в ходе исследования закономерности позволяют на практике оценивать общее количество способов синтеза СВК на основе ЛКС с применением (m, k) -кодов и выбирать наилучшие из них для реализации самопроверяемых цифровых устройств.

Наличие большого числа способов синтеза СВК на основе ЛКС является одновременно и достоинством и недостатком, поскольку даже при малых значениях $m = 8 \dots 10$ процедура выбора наилучшего способа по заданному критерию (например, структурной избыточности СВК или равномерности формирования тестовых комбинаций для ее элементов) трудоемка. На практике целесообразно искать квазиоптимальные варианты организации СВК.

Следует также отметить, что здесь не рассматривались некоторые возможные ограничения на процедуру синтеза СВК, например, формирование неполного множества входных воздействий на объект диагностирования или же возможность использования только подмножества кодовых слов заданного (m, k) -кода для организации контроля и пр. Все эти способы будут являться частными случаями рассмотренных и могут быть исследованы дополнительно.

Использование ЛКС с применением (m, k) -кодов — это тот подход, который может оказаться весьма эффективным при синтезе устройств с обнаружением неисправностей для использования в составе систем управления ответственными технологическими процессами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Согомонян Е.С., Слабаков Е.В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989, 208 с.
2. Mikoni S. Top Level Diagnostic Models of Complex Objects // Lecture Notes in Networks and Systems.— 2022.— Vol. 442.— Pp. 238–249. DOI: 10.1007/978-3-030-98832-6_21.
3. Drozd A., Kharchenko V., Antoshchuk S., Sulima J., Drozd M. Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions // Proceedings of 9th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2011), Sevastopol, Ukraine, 2011, pp. 411–416. doi: 10.1109/EWDTS.2011.6116606.
4. Drozd O., Perebeinos I., Martynyuk O., Zashcholkina K., Ivanova O., Drozd M. Hidden Fault Analysis of FPGA Projects for Critical Applications // Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 25–29 February 2020, Lviv-Slavsko, Ukraine, paper 142. doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235591.
5. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1.— Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008, 184 p.
6. Borecký J., Kohlík M., Kubátová H. Parity Driven Reconfigurable Duplex System // Microprocessors and Microsystems.— 2017.— Vol. 52.— Pp. 251–260. doi: 10.1016/j.micpro.2017.06.015.
7. Tshagharyan G., Harutyunyan G., Shoukourian S., Zorian Y. Experimental Study on Hamming and Hsiao Codes in the Context of Embedded Applications // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017, pp. 25–28. doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110065.
8. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Том 1: Классические коды Бергера и их модификации.— М.: Наука, 2020, 383 с.
9. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Том 2: Взвешенные коды с суммированием.— М.: Наука, 2021, 455 с.
10. Stempkovsky A.L., Zhukova T.D., Telpukhov D.V., Gurov S.I. CICADA: A New Tool to Design Circuits with Correction and Detection Abilities // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 13–15 May 2021, Kazan, Russia pp. 1–5. doi: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438900.
11. Nicolaidis M. On-Line Testing for VLSI: State of the Art and Trends // Integration, the VLSI Journal, 1998, Vol. 26, Issues 1–2, pp. 197–209. doi: 10.1016/S0167-9260(98)00028-5.
12. Mitra S., McCluskey E.J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? // Proceedings of International

- Test Conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 03–05 October 2000, pp. 985–994.
doi: 10.1109/TEST.2000.894311.
13. Ефанов Д.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля // Автоматика и телемеханика. — 2010. — № 6. — С. 155–162.
 14. Гессель М., Морозов А.В., Сапожников Вл.В., Сапожников Вл.В. Контроль комбинационных схем методом логического дополнения // Автоматика и телемеханика. — 2005. — № 8. — С. 161–172.
 15. Гессель М., Морозов А.В., Сапожников Вл.В., Сапожников Вл.В. Логическое дополнение — новый метод контроля комбинационных схем // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 1. — С. 167–176.
 16. Sen S.K. A Self-Checking Circuit for Concurrent Checking by 1-out-of-4 code with Design Optimization using Constraint Don't Cares // National Conference on Emerging trends and advances in Electrical Engineering and Renewable Energy (NCEEERE2010), Sikkim Manipal Institute of Technology, Sikkim, held during 22–24 December, 2010.
 17. Das D.K., Roy S.S., Dmitriev A., Morozov A., Gössel M. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes // Proceedings of the 10th International Workshops on Boolean Problems, Freiberg, Germany, September, 2012, pp. 33–40.
 18. Пивоваров Д.В. Построение систем функционального контроля многовыходных комбинационных схем методом логического дополнения по равновесным кодам // Автоматика на транспорте. — 2018. — Том 4. — № 1. — С. 131–149.
 19. Morozov M., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V., Goessel M. New Self-Checking Circuits by Use of Berger-codes // Proceedings of 6th IEEE International On-Line Testing Workshop, Palma De Mallorca, Spain, 3–5 July 2000, pp. 171–176.
 20. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V. The Self-Checking Concurrent Error-Detection Systems Synthesis Based on the Boolean Complement to the Bose-Lin Codes with the Modulo Value $M=4$ // Electronic Modeling. — 2021. — Vol. 43. — Issue 1. — Pp. 28–45.
DOI: 10.15407/emodel.43.01.028.
 21. Ефанов Д.В., Зуева М.В. Свойства кодов Сяо в системах технического диагностирования дискретных устройств // Программная инженерия. — 2023. — Т. 14. — № 7. — С. 339–349.
DOI: 10.17587/prin.14.339–349.
 22. Sapozhnikov Vl.V., Dmitriev A., Goessel M., Sapozhnikov V.V. Self-Dual Parity Checking — a New Method for on Line Testing // Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium, USA, Princeton, 1996, pp. 162–168.
 23. Гессель М., Дмитриев А.В., Сапожников Вл.В., Сапожников В.В. Обнаружение неисправностей в комбинационных схемах с помощью самодвойственного контроля // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 7. — С. 140–149.
 24. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Osadchy G., Pivovarov D. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019, pp. 136–143.
doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.
 25. Efanov D.V., Pivovarov D.V. The Hybrid Structure of a Self-Dual Built-In Control Circuit for Combinational Devices with Pre-Compression of Signals and Checking of Calculations by Two Diagnostic Parameters // Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021), Batumi, Georgia, September 10–13, 2021, pp. 200–206.
doi: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581019.
 26. Пашуков А.В. Применение взвешенных кодов с суммированием при синтезе схем встроенного контроля по методу логического дополнения // Автоматика на транспорте. — 2022. — Том 8. — № 1. — С. 101–114.
DOI: 10.20295/2412–9186–2022–8–01–101–114.
 27. Ефанов Д.В., Елина Е.И. Исследование алгоритмов синтеза самопроверяемых цифровых устройств на основе логической коррекции сигналов с применением взвешенных кодов Боуза–Лина // Автоматика на транспорте. — 2024. — Том 10. — № 1. — С. 74–99.
DOI: 10.20296/2412–9186–2024–10–01–74–99.
 28. Ефанов Д.В. Синтез самопроверяемых комбинационных устройств на основе метода логической коррекции сигналов с применением кодов Боуза–Лина // Информационные технологии. — 2023. — Том 29. — № 10. — С. 503–511.
DOI: 10.17587/it.29.503–511.
 29. Efanov D.V., Yelina Y.I. Synthesis of Concurrent Error-Detection Circuits Based on Boolean Signals Correction Using Modular Weight-Based Sum Codes // Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon), 29–30 January 2024, St. Petersburg, Russia, pp. 350–355.
doi: 10.1109/EICon61730.2024.10468328.
 30. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств: монография. — СПб.: Наука, 2018, 151 с.

INVESTIGATION OF WAYS TO SYNTHESIZE CONCURRENT ERROR-DETECTION CIRCUITS BASED ON BOOLEAN SIGNALS CORRECTION USING UNIFORM SEPARABLE CODES

© 2024 D. V. Efanov^{1,2,3,4,*}, Y. I. Yelina^{1,**}

¹ Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

² Russian University of Transport, Moscow, Russia

³ Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

⁴ «Transport and Construction Safety» LLC, St. Petersburg, Russia

*E-mail: TrES-4b@yandex.ru

**E-mail: eseniya-elina@mail.ru

The features of the synthesis of concurrent error-detection circuit based on the Boolean signals correction using uniform separable codes are investigated. Three types of structures are considered: type I – structure with correction of part of the signals from the outputs of the diagnostic object forming the check symbols of a given code in the concurrent error-detection circuit; type II – structure with correction of part of the signals from the outputs of the diagnostic object forming the data symbols of a given code in the concurrent error-detection circuit; type III – structure with signal correction from all outputs of the diagnostic object. For structures of all types, formulas are given for determining the number of ways to synthesize concurrent error-detection circuit based on the Boolean signals correction using a given code. New properties of structures have been established that characterize the features of the growth in the number of methods for synthesizing concurrent error-detection circuit with an increase in the number of outputs forming data and check symbols. Patterns have been found that allow in practice to estimate the number of ways to synthesize concurrent error-detection circuit based on the Boolean signals correction using uniform separable codes in order to select the best one according to specified criteria. Examples are given to demonstrate the effectiveness of using the found patterns.

Keywords: self-checking digital devices, Boolean signals correction, uniform separable codes in fault detection tasks, synthesis of concurrent error-detection circuit

REFERENCES

1. *Sogomonyan E.S. and Slabakov E.V.* Self-Checking Devices and Fault-Tolerant Systems // in Moscow: Radio i Svyaz', pp. 208, 1989 (in Russian).
2. *Mikoni S.* Top Level Diagnostic Models of Complex Objects // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 442. – Pp. 238–249. DOI: 10.1007/978-3-030-98832-6_21.
3. *Drozd A., Kharchenko V., Antoshchuk S., Sulima J., Drozd M.* Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions // Proceed-ings of 9th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2011), Sevastopol, Ukraine, 2011, pp. 411–416. doi: 10.1109/EWDTS.2011.6116606.
4. *Drozd O., Perebeinos I., Martynyuk O., Zashcholkina K., Ivanova O., Drozd M.* Hidden Fault Analysis of FPGA Projects for Critical Applications // Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Tele-communications and Computer Engineering (TCSET), 25–29 February 2020, Lviv-Slavsko, Ukraine, paper 142. doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235591.
5. *Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D.* New Methods of Con-current Checking: Edition 1. – Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008, 184 p.
6. *Borecký J., Kohlík M., Kubátová H.* Parity Driven Reconfigurable Duplex System // Microprocessors and Microsystems. – 2017. – Vol. 52. – Pp. 251–260, doi: 10.1016/j.micpro.2017.06.015.
7. *Tshagharyan G., Harutyunyan G., Shoukourian S., Zorian Y.* Experimental Study on Hamming and Hsiao Codes in the Context of Embedded Applications // Proceed-ings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017, pp. 25–28. doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110065.
8. *Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V.* Summation codes for technical diagnostics systems. Vol. 1: Classical Berger codes and their modifications. – M.: Nauka, 2020, 383 p. (in Russian).
9. *Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V.* Summation codes for technical diagnostics systems. Vol. 2: Weighted codes with summation. – M.: Nauka, 2021, 455 p. (in Russian).
10. *Stempkovsky A.L., Zhukova T.D., Telpukhov D.V., Gurov S.I.* CICADA: A New Tool to Design Circuits with Correction and Detection Abilities // International Siberian Conference on Control and Communications

- (SIBCON), 13–15 May 2021, Kazan, Russia pp. 1–5. doi: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438900.
11. Nicolaidis M. On-Line Testing for VLSI: State of the Art and Trends // *Integration, the VLSI Journal*, 1998, Vol. 26, Issues 1–2, pp. 197–209. doi: 10.1016/S0167-9260(98)00028-5.
 12. Mitra S., McCluskey E.J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? // *Proceedings of International Test Conference*, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 03–05 October 2000, pp. 985–994. doi: 10.1109/TEST.2000.894311.
 13. Efanov D.V., Sapozhnikov V.I. and Sapozhnikov V.I. On Summation Code Properties in Functional Control Circuits // *Automation and Remote Control*, 2010, no. 6, pp. 155–162. (in Russian).
 14. Goessel M., Morozov A.V., Sapozhnikov V.I. and Sapozhnikov V.V. Checking Combinational Circuits by the Method of Logic Complement // *Automation and Remote Control*, vol. 66, No 8, pp. 1336–1346, 2005. (in Russian).
 15. Gessel M., Morozov A.V., Sapozhnikov V.V. and Sapozhnikov V.V. Logic Complement a New Method of Checking the Combinational Circuits // *Automation and Remote Control*, vol. 64, No 1, pp. 153–161, 2003 (in Russian).
 16. Sen S.K. A Self-Checking Circuit for Concurrent Checking by 1-out-of-4 code with Design Optimization using Constraint Don't Cares // *National Conference on Emerging trends and advances in Electrical Engineering and Renewable Energy (NCEEERE 2010)*, Sikkim Manipal Institute of Technology, Sikkim, held during 22–24 December, 2010.
 17. Das D.K., Roy S.S., Dmitriev A., Morozov A., Gössel M. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes // *Proceedings of the 10th International Workshops on Boolean Problems*, Freiberg, Germany, September, 2012, pp. 33–40.
 18. Pivovarov D.V. Formation of Concurrent Error Detection Systems in Multiple-Output Combinational Circuits Using the Boolean Complement Method Based on Constant-Weight Codes // *Transport Automation - 2018*. – Vol. 4. – No 1. – pp. 131–149 (in Russian).
 19. Morozov M., Saposhnikov V.V., Saposhnikov V.V., Goessel M. New Self-Checking Circuits by Use of Berger-codes // *Proceedings of 6th IEEE International On-Line Testing Workshop*, Palma De Mallorca, Spain, 3–5 July 2000, pp. 171–176.
 20. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. The Self-Checking Concurrent Error-Detection Systems Synthesis Based on the Boolean Complement to the Bose-Lin Codes with the Modulo Value $M=4$ // *Electronic Modeling*. – 2021. – Vol. 43. – Issue 1. – Pp. 28–45. DOI: 10.15407/emodel.43.01.028.
 21. Efanov D.V., Zueva M.V. Hsiao Codes Properties in Discrete Devices Technical Diagnostics Systems // *Programmnaya Ingeneria*, 2023, vol. 14, No 7, pp. 339–349. DOI: 10.17587/prin.14.339-349 (in Russian).
 22. Saposhnikov V.I., Dmitriev A., Goessel M., Saposhnikov V.I. Self-Dual Parity Checking – a New Method for on Line Testing // *Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium*, USA, Princeton, 1996, pp. 162–168.
 23. Gessel M., Dmitriev A.V., Sapozhnikov V.I., Sapozhnikov V.V. Fault detection in combinational circuits using self-dual control // *Automation and telemechanics*, 2000, No 7, pp. 140–149 (in Russian).
 24. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V.I., Osadchy G., Pivovarov D. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems // *Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019)*, Batumi, Georgia, September 13–16, 2019, pp. 136–143. doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.
 25. Efanov D.V., Pivovarov D.V. The Hybrid Structure of a Self-Dual Built-In Control Circuit for Combinational Devices with Pre-Compression of Signals and Checking of Calculations by Two Diagnostic Parameters // *Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021)*, Batumi, Georgia, September 10–13, 2021, pp. 200–206. doi: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581019.
 26. Pashukov A.V. Application of weight-based sum codes at the synthesis of circuits for built-in control by Boolean complement method // *Automation in transport*. – 2022. – Vol. 8. – No 1. – pp. 101–114. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-01-101-114 (in Russian).
 27. Efanov D.V., Yelina Y.I. Study of algorithms for synthesis of self-checking digital devices based on Boolean correction of signals using weighted Bose-Lin codes // *Automation in transport*. – 2024. – Vol. 10. – No 1. – pp. 74–99. DOI: 10.20296/2412-9186-2024-10-01-74-99. (in Russian).
 28. Efanov D.V. The Synthesis of Self-Checking Combinational Devices on the Basis of Codes with the Effective Symmetrical Error Detection // *Information technology*. – 2023. – Vol. 29. – No 10. – pp. 503–511. DOI: 10.17587/it.29.503-511. (in Russian).
 29. Efanov D.V., Yelina Y.I. Synthesis of Concurrent Error-Detection Circuits Based on Boolean Signals Correction Using Modular Weight-Based Sum Codes // *Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon)*, 29–30 January 2024, St. Petersburg, Russia, pp. 350–355. doi: 10.1109/EICon61730.2024.10468328.
 30. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V. Hamming codes in concurrent error detection systems of logic devices / *Monograph*. – St. Petersburg: Nauka, 2018, 151 p. (in Russian).

УДК 004.272

РАЗРАБОТКА АППАРАТА ОБРАЗНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ
ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ НЕЙРОМОРФНЫХ УСТРОЙСТВ© 2024 г. Н. А. Симонов^{1,*}¹ Физико-технологический институт им. К. А. Валиева Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: nsimonov@ftian.ru

Поступила в редакцию 08 мая 2024 г.

После доработки 10 июня 2024 г.

Принята к публикации 10 июня 2024 г.

В работе рассматривается применение математического аппарата пятен для нейроморфных устройств на кроссбарах элементов памяти, архитектура которых соответствует технике *вычислений в памяти*. Аппарат пятен позволяет представлять и обрабатывать семантическую информацию в форме ментальных образов, а также моделировать рассуждения в форме, свойственной человеку. В частности, это дедуктивные, индуктивные, абдуктивные, а также и немонотонные рассуждения, когда выводы делаются на основе имеющихся знаний, а получение новых знаний может изменить выводы. Аппарат пятен является математической основой создания нейроморфных устройств с техникой *вычислений в памяти*, способных не только представлять семантическую информацию в образной форме, но и моделировать образное мышление. Это позволит решить большую проблему для современных глубоких нейронных сетей, связанную с возможностью возникновения случайных, ничем не обусловленных ошибок.

Ключевые слова: ментальные образы, каузальные рассуждения, нейроморфные устройства, кроссбары, мемристоры, FeFET

DOI: 10.31857/S0544126924050086

1. ВВЕДЕНИЕ

Нейроморфные системы, включающие искусственные нейронные сети, — это вычислительные устройства, архитектура которых основана на принципах биологических нервных систем и отличается от обычной архитектуры фон Неймана. Структуры из искусственных нейронов и синапсов могут быть реализованы в электронной среде, например, на КМОП технологии (комплементарный металлооксид-полупроводник) с использованием ячеек статической памяти с произвольным доступом [1] или транзисторов с плавающим затвором [2]. В настоящее время рассматривается перспективным применение в нейроморфных процессорах новых элементов энергонезависимой памяти, таких как, мемристоров и FeFET-транзисторов. Они перспективны для технологии СБИС (сверхбольших интегральных схем), обладают чрезвычайно низкими потерями переключения и более быстрыми операциями чтения/записи [3].

Однако существуют и ограничения для применения мемристоров и FeFET транзисторов в нейроморфных устройствах, и они связаны с тем, что ресурс переключения у этих элементов мал по сравнению с ресурсом для КМОП-транзисторов. Поэтому рассматриваемые элементы памяти не могут заменить классические КМОП-транзисторы, рабо-

тающие в режиме переключения с частотой нескольких гигагерц. Тем не менее, мемристоры и FeFET могут применяться в качестве энергонезависимых элементов памяти с малой скоростью переключения, предназначенных для создания программируемых КМОП логических ячеек, формируя адаптивную архитектуру нейроморфных процессоров.

Современные глубинные нейронные сети (ГНС) построены на модели нейрона, основанной на применении численных преобразований, а обучение ГНС — на использовании численных оптимизационных стохастических методов. Это, в принципе, неадекватно природе человеческого мышления, которое основано на образном представлении и образно-логической обработке информации с использованием ментальных образов в процессе мышления [4]. Так как численные значения входных и выходных сигналов для традиционных искусственных нейронов не имеют прямой связи с семантикой (смыслом) объектов моделирования, это создает большую проблему современных ГНС: возможность появления ничем не обусловленных, неожиданных (глупых) и неустранимых ошибок при распознавании (классификации) образов [5]. Этим объясняется и особенность природы таких ошибок, когда, даже при наличии четких изображений для нейронных сетей всегда существует вероятность случайных ошибок, что представляет особую опасность применения ГНС в областях,

связанных с безопасностью и здоровьем людей [5]. Другим свидетельством проблемы ГНС является, например, тот факт, что в течение последних четырех лет ошибка классификации изображений базы ImageNet для лучших систем ГНС, обученных на суперкомпьютерах, практически не менялась, оставаясь близкой 10% [6].

Для обеспечения гибкости и надежности работы нейроморфных процессоров необходимо применение методов представления и обработки информации, близкими к восприятию и мышлению, свойственным человеку. Несомненно, это соответствует задаче создания интеллектуальных систем, способных представлять информацию в образном виде и осуществлять ее обработку в форме образного мышления. Область исследований «когнитивное моделирование» направлено на имитацию человеческого интеллекта, и рассматривается как подход к созданию сильного искусственного интеллекта (ИИ) [7]. Несомненно, для этой задачи представляется перспективным применение концепции ментальных образов и разработка специального математического аппарата для представления и обработки семантической информации в образной форме.

Были предложены ряд неклассических, когнитивных логик, которые могли бы быть близки к логике рассуждений человека. Например, В. К. Финном был разработан ДСМ-метод автоматического порождения гипотез, рассуждений и принятия решений [8, 9]. P. Wang [10] предложил модель Non-Axiomatic Reasoning System (NARS).

Ж. Адамар [11] поделился самонаблюдениями о том, что происходит в уме, когда он начинал строить или понимать математическое рассуждение. «Если я должен думать о каком-нибудь силлогизме, я о нем думаю не словами — слова мне не позволили бы понять, правилен ли силлогизм или ложен, ... а с помощью интерпретации какими-то *пятнами* *неопределенной формы*.»

В работе [12] предложена математическая модель пятен, которая является адекватной для моделирования ментальных образов. Математический аппарат пятен описан в работе [13], а в статье [14] показана возможность их применения для представления образов и ментальной активности. Следовательно, предложенный там подход соответствует задаче создания интеллектуальных систем, способных не только представлять информацию в образной форме, но и моделировать образное мышление.

2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗОВ С ПОМОЩЬЮ ПЯТЕН

Ментальные (вторичные) образы — это абстрактное понятие, позволяющее описать структуру семантической информации, хранящейся в памяти человека. Концепция образов применяется в психо-

логии и когнитивистике, и она играет важнейшую роль не только в восприятии, но и в памяти, эмоциях, языке, желаниях и действиях-исполнениях [15].

Ментальные образы обладают элементарными пространственными свойствами [4, 14]. Аппарат пятен позволяет формировать пространственно-структурное представление образов и образной сферы человека в психологии, а также — образного представления семантической информации в области ИИ [14]. В частности, предлагаемая модель позволяет адекватно отображать такие свойства образов как многомерность, многоуровневость, полимодальность, а также — внести понимание в сохраняющуюся еще до настоящего времени концептуальную неопределенность трактовки рубежа между образом и мыслью [16].

Поскольку аппарат L4 чисел подробно описан в предыдущих работах, мы кратко изложим основное содержание и раскроем смыслы введенных там понятий. «Пятно» — это математический объект, для которого определено понятие *логической связи* между пятнами. Для пятен a и b логическая связь ab является булевой величиной и подчиняется двум аксиомам:

$$\forall a(aa) \quad (1)$$

$$\forall a\forall b(ab = ba) \quad (2)$$

Вводится понятие нулевого пятна $\emptyset$, которое определяется аксиомой

$$\forall x(\neg \emptyset x) \quad (3)$$

Для пятен также вводится понятие *окружения* пятна, которое тоже является пятном. Окружение $\tilde{a}$ пятна a подчиняется трем аксиомам:

$$a\tilde{a} = 0 \quad (4)$$

$$\tilde{\tilde{a}} = a \quad (5)$$

$$\forall x \neq \emptyset (\neg xa \rightarrow x\tilde{a}) \quad (6)$$

Для пятен, как и для геометрических тел, определены операции объединения $\cup$ и пересечения $\cap$, позволяющие формировать новые пятна. Заметим, что в применении к моделированию образов, операцию объединения $\cup$ можно применять для *формирования обобщающего образа*, а операцию пересечения $\cap$ — для увеличения *фрагментарности* и *детализации образа*. Например, диаграмма рис. 1 иллюстрирует разбиение пятен a и b на части A , B , C при пересечении. Эти части и окружение D можно выразить через операцию пересечения следующим образом:

$$A = a \cap \tilde{b} \quad B = \tilde{a} \cap b \quad (7)$$

$$C = a \cap b \quad D = \tilde{a} \cap \tilde{b}$$

Информация о пятне задается сравнением его с другими пятнами, совокупность которых мы называем *базисом* пятен. Это сравнение на элементарном

уровне можно осуществить, например, с помощью указанных качественных данных как *раздельность*, *пересечение*, *включение* или *часть*. Совокупность таких качественных данных мы называем элементарными пространственными отношениями пятен (ЭПО) [12, 13]. Следует отметить, что в аппарате пятен ЭПО кодируются не с помощью действительных чисел, а с помощью 2×2 логических матриц, которые мы назвали L4 числами.

Для пятен a, b и их окружений $\tilde{a}, \tilde{b}$ L4 число $\langle a|b \rangle$ определяется как таблица

$$\langle a|b \rangle = \begin{bmatrix} ab & a\tilde{b} \\ \tilde{a}b & \tilde{a}\tilde{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & A \\ B & D \end{bmatrix}$$

где $ab, a\tilde{b} \dots$ обозначают логические связи, а A, B, C и D обозначают выраженные в логических величинах части пересечений пятен a, b и их окружений (рис. 1). Такие L4 числа, в принципе, позволяют различать 16 различных ЭПО между пятнами. Примеры ЭПО и соответствующие им L4 числа приведены в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 2.

Мы называем эти отношения элементарными пространственными отношениями, так как они несут качественную информацию самого низкого уровня о пятнах. Тем не менее, достаточно большое количество таких качественных данных, полученных сравнением пятна с пятнами базиса, т.е. некоторой совокупности пятен, позволяет извлекать информацию более высокого уровня, включая численную [13]. Базис пятен будем называть структурой пятен, если между всеми пятнами этого базиса заданы ЭПО.

Семантика ЭПО между двумя пятнами определяется объектами, которые моделируют эти пятна (например, образы, гранулы, геометрические тела), а также – диаграммами Эйлера, которые представляют эти ЭПО [14].

Отношение между пятном и каким-либо базисом пятен назовем отображением пятна на этом базисе. Оно представляется с помощью L4 вектора, в котором координатами являются L4 числа, соответствующие его ЭПО с пятнами базиса [13]. Например, L4 вектор $\mathbf{a}_X$ пятна a , представленный на базе $X = \{x_i\}$, определяется как

$$\mathbf{a}_X \equiv [\langle a|x_1 \rangle; \langle a|x_2 \rangle; \dots; \langle a|x_n \rangle],$$

где n – количество пятен в базисе X .

Отношение между двумя базисами пятен X и Y определяется с помощью L4 матрицы $A = \langle Y|X \rangle$, которая имеет в качестве элементов – ЭПО между пятнами базисов $X = \{x_i\}$ и $Y = \{y_j\}$ [13]:

$$\langle Y|X \rangle \equiv [\langle y_j|x_i \rangle] = [(\mathbf{y}_1)_X; (\mathbf{y}_2)_X; \dots; (\mathbf{y}_n)_X]$$

Здесь $(\mathbf{y}_j)_X$ – L4 векторы-строки пятен y_j , представленные на базисе X .

Таблица 1. L4 числа для некоторых ЭПО.

ЭПО:	$\langle a b \rangle = \begin{bmatrix} ab & a\tilde{b} \\ \tilde{a}b & \tilde{a}\tilde{b} \end{bmatrix}$
Пересечение, $a \succ b$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
Раздельность, $a \diamond b$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
Включение, $a > b$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Часть, $a < b$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
Включение, $a > \tilde{b}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
Неразличимость, $a \approx b$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

С помощью L4 матриц можно осуществлять трансформацию отображения пятна из одного базиса на другой. Такая трансформация находится с помощью математической операции произведения L4 матрицы A на L4 вектор a , результатом которого является новый L4 вектор b :

$$b = A \cdot a \quad (8)$$

Для пятен были разработаны правила умножения L4 матрицы и L4 вектора [13]. Проверка математического аппарата была проведена на задачах реконструкции изображений исследуемых фигур по данным их ЭПО с базисными фигурами, в качестве которых использовались сканирующие квадраты или круги с малым шагом сканирования (см. [13], рис. 4–12). Пример такой реконструкции формы плохо структурированного изображения звезды приведен на рис. 3.

3. ОБРАЗНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СЕМАНТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Пятна позволяют моделировать ментальные образы, которые напрямую связаны с семантикой, то есть со смысловым содержанием информации. Следовательно, с помощью аппарата пятен семантическая информация может быть представлена в образной форме. При этом в модели рассуждений, основанных на аппарате пятен, возможно использование, в частности, немонотонной логики, когда

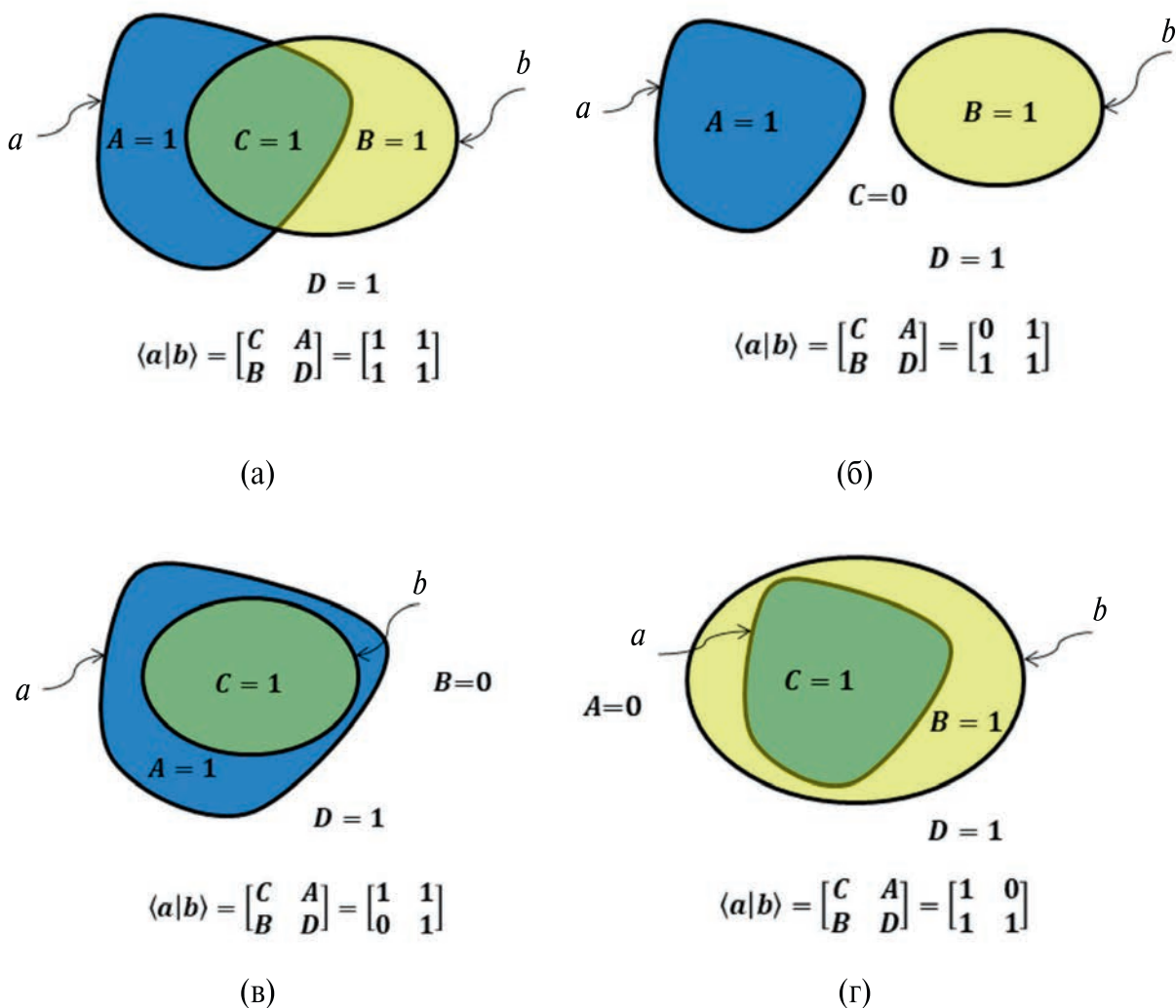


Рис. 2. Диаграмма Эйлера-Венна для пересечений пятен, иллюстрирующая геометрический смысл введенных L4 чисел для ЭПО между двумя пятнами: (а) пересечение пятен a и b ; (б) раздельность пятен a и b ; (в) включение b в a ; (г) включение a в b .

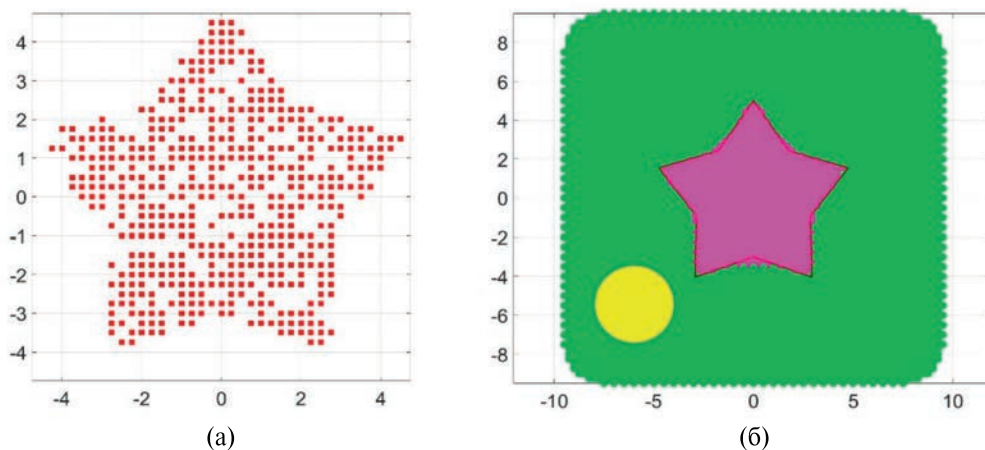


Рис. 3. Пример реконструкции плохо структурированного изображения звезды: (а) изображение звезды в виде случайным образом расположенных точек внутри ее контура; (б) восстановление формы звезды по данным ЭПО изображения (а) со сканирующим кругом, изображенным на рисунке (б), с малым периодом.

выводы делаются на основе имеющихся знаний, а новые знания могут изменить выводы [14].

Таким путем формируется структура пятен, изоморфная системе образов в образной сфере человека [4]. С другой стороны, возможно применение концепции образов за пределами психических процессов человека, например, в областях ИИ и нейроморфных устройств. Следовательно, аппарат пятен позволяет кодировать представление семантической информации в образной форме и создание на этой базе модели абстрактного семантического информационного пространства.

Для моделирования образов необходимо поставить им в соответствие пятна, а отношения между образами представить в форме ЭПО между этими пятнами. Так как смысл образа или понятия определяется системой его отношений с другими образами (понятиями), отображение пятна на базисе представляет смысл образа или суждение о нем. При этом, внутренняя структура пятна представляет степень фрагментарности образа [14]. Аппарат пятен дает возможность многомерного пространственного представления образов [17], что также применимо для формирования семантического пространства в области ИИ.

4. НЕМОНОТОННАЯ ЛОГИКА И КАУЗАЛЬНЫЕ РАССУЖДЕНИЯ В ПРЕДСТАВЛЕНИИ ПЯТЕН

Математический аппарат пятен позволяет моделировать различные психологические понятия и процессы, такие как дифференциация и обобщение образов, внимание, апперцепция и дискриминативная способность мозга [17]. Он также позволяет создать вычислительно-когнитивную модель ментальных образов, которая не противоречит ABQT теории (attention-based quantification theory) [18].

Как показано в работе [14], аппарат пятен способен моделировать различные категории рассуждений, включая немонотонные рассуждения. Действительно, для ментальных образов L4 векторы моделируют смыслы или суждение об этих образах, а L4 матрицы — правила вывода, основанные на знании об отношениях между двумя системами образов. Разработанный математический аппарат моделирует рассуждения с помощью произведения L4 матрицы A и L4 вектора a (8) [14]. То есть, рассуждение можно представить в виде

$$b = A \cdot a \Leftrightarrow a \leftarrow_A b \quad (9)$$

где a — посылка, L4 матрица A — правило вывода, основанное на знании, а b — следствие или вывод. В частности, (9) соответствует рассуждениям с использованием немонотонной логики, когда выводы делаются на базе существующих знаний, а получение новых знаний может изменить вывод [19].

Однако равенство (9) может описывать и классические категории рассуждений, например, *дедуктивные*. Чтобы это продемонстрировать, рассмотрим простой пример дедуктивного рассуждения.

- a) Правило: все собаки — животные.
- b) Посыл: все щенки — собаки.
- c) Вывод: все щенки — животные.

Покажем возможность моделирования этого *дедуктивного* рассуждения с помощью равенства

$$a_y = \langle Y|X \rangle a_x \quad (10)$$

Здесь используются следующие обозначения: щенки — пятно a , собаки — базис X , состоящий из одного пятна x , а животные — базис Y , состоящий из одного пятна y . Тогда L4 векторы a_x , a_y и L4 матрица $\langle Y|X \rangle$ будут состоять из одного L4 числа: $a_x = \langle a|x \rangle$, $a_y = \langle a|y \rangle$, а L4 матрица $\langle Y|X \rangle = \langle y|x \rangle$. Из условий a), b), c) следует, что пятно a является частью пятна x , а пятно x является частью пятна y . Тогда из табл. 1 следует:

$$\langle a|x \rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \langle y|x \rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Применяя формулу (11) работы [13], получим $\langle a|y \rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$, что соответствует выводу, что a является частью пятна y . Следовательно, мы получили результат дедуктивного вывода: все щенки — животные.

Покажем теперь, что аппарат пятен способен также моделировать *индуктивные* и *абдуктивные* рассуждения. Эти категории рассуждений основываются на анализе отдельных случаев и стремлении их обобщения (индукция) или объяснения (абдукция) [20]. На языке аппарата пятен (равенство (10)) эти рассуждения соответствуют следующим задачам.

1) Индукция: по набору данных $\{x_i, y_i\}$ найти матрицу $\langle Y|X \rangle$, которая удовлетворяет выводу, представленному равенством (10).

2) Абдукция: найти матрицу $\langle X|Y \rangle$, чтобы по данным следствия $a_x = [\langle a|x_i \rangle]$ определить их причину $a_y = [\langle a|y_i \rangle]$. Это соответствует задаче, обратной (10):

$$a_x = \langle X|Y \rangle a_y \quad (11)$$

где матрица $A^{-1} = \langle X|Y \rangle$ — обратна матрице $A = \langle Y|X \rangle$ [13].

Следует отметить, что в рамках модели пятен, в общем случае, *индуктивное* рассуждение аналогично задаче обучения, а *абдуктивное* рассуждение — решению задачи, обратной (10), методом обучения [13]. Действительно, индуктивное рассуждение можно записать с помощью равенства (10) с использованием следующего представления [14]:

$$\langle Y|X \rangle = Y^{-1} \cdot Y \cdot X^{-1} \cdot X \quad (12)$$

где матрицы X и Y сформированы из L4 векторов x_i, y_i , заданных на соответствующих атомарных базисах:

$$X = [x_i], \quad Y = [y_i] \quad (13)$$

Обратная L4 матрица X^{-1} определяется как транспонированная матрица X , у которой элементы в форме L4 чисел тоже транспонированы. Для *абдуктивного* рассуждения (11) L4 матрица $\langle X|Y \rangle$ определяется аналогично (12):

$$\langle Y|X \rangle = X^{-1} \cdot X \cdot Y^{-1} \cdot Y \quad (14)$$

где X и Y матрицы также определяются равенствами (13).

Для решения задач (10) и (11) нужно применять общие правила умножения L4 матрицы на L4 вектор. Для уравнения (10) это правило определяется следующим выражением [13]:

$$a_Y = \langle Y|V \rangle \cdot \langle V|W \rangle \cdot \langle W|U \rangle \cdot \langle U|X \rangle a_X \quad (15)$$

Здесь базис $U = \{u_i\}$ состоит из пересечений пятен x_i , $V = \{v_i\}$ – базис пересечений пятен $\{y_j\}$, а $W = \{w_i\}$ – базис пересечений пятен базисов U и V . Уравнение (15) следует рассматривать как серию преобразований от одного базиса к другому, а именно:

$$\begin{aligned} \text{а) } a_U &= \langle U|X \rangle a_X, & \text{б) } a_W &= \langle W|U \rangle a_U, \\ \text{в) } a_V &= \langle V|W \rangle a_W, & \text{г) } a_Y &= \langle Y|V \rangle a_V. \end{aligned} \quad (16)$$

Векторы a_V и a_Y вычисляются по формулам (11), (12) работы [13], а векторы a_U и a_W – по формулам (15), (16) той же работы.

Следует отметить, что так как формулы (15), (16) работы [13] являются приближенными, то правило умножения (15) тоже приближенное, но близкое к оптимальному алгоритму обработки качественных данных. Последнее подтверждается примерами реконструкции формы фигур по данным их ЭПО с базисными фигурами (рис. 3, [13], рис. 4–12). Из равенства (15) следует, что для уравнения (11) общее правило умножения для L4 матрицы и вектора можно представить в виде

$$a_X \cong \langle X|U \rangle \cdot \langle U|W \rangle \cdot \langle W|V \rangle \cdot \langle V|Y \rangle a_Y \quad (17)$$

где расчет вектора a_X в (17) является приближенным решением задачи, которая является обратной задаче (15).

Следует напомнить, что равенство (9) описывает более широкий класс рассуждений, не сводится только к перечисленным классическим категориям, а является общей формулой и для рассуждений, относящихся к немонотонным и каузальным (причинно-следственным) рассуждениям [19, 21]. Заметим, что формулы (15) и (17) описывают рассуждения, которые включают этапы анализа

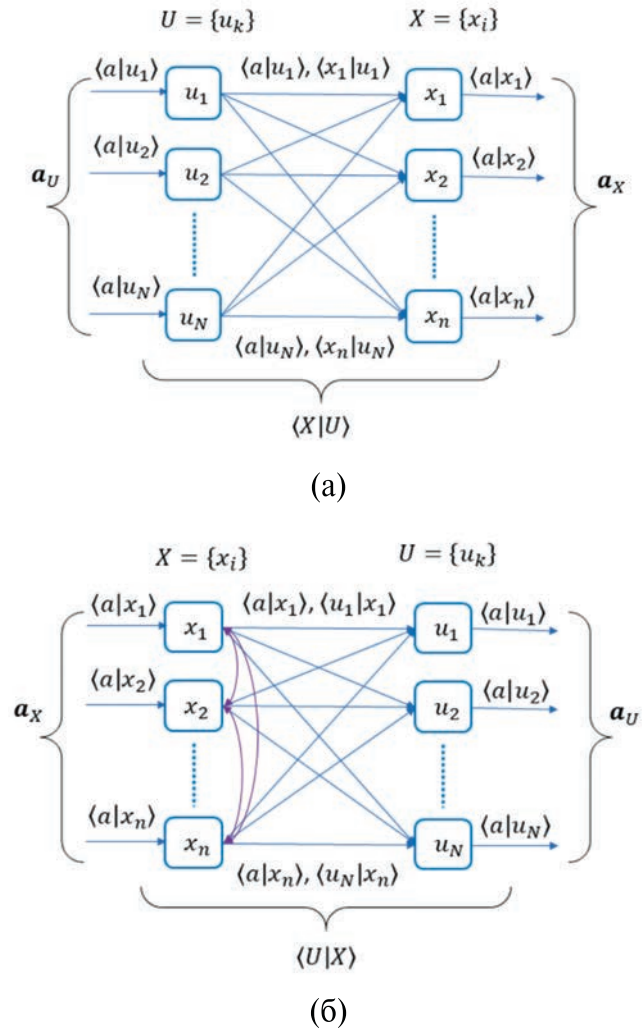


Рис. 4. Пример архитектуры одного слоя образно-логических нейронных сетей: (а) моделирование обобщения или синтеза; (б) моделирование анализа.

и синтеза. Например, равенство а) в (16) моделируют мыслительную операцию анализа, а равенство в) там же – синтеза.

5. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ АППАРАТА ПЯТЕН В ФОРМЕ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ НЕЙРОМОРФНЫХ УСТРОЙСТВ

L4 числа можно кодировать с помощью булевых функций (БФ), если отобразить эти функции с помощью таблицы истинности в форме карты Карно [22]. При этом нужно использовать следующее правило:

L4 число представляется такой логической функцией двух переменных, для которой карта Карно совпадает с 2×2 логической матрицей, соответствующей этому L4 числу.

Аналогичным образом, можно описать и операции матрично-векторного умножения, заменяя формулу (8) на БФ многих переменных. Очевидно, предлагаемый подход позволит значительно упростить применение аппарата пятен для создания нейроморфных систем, способных представлять и обрабатывать семантическую информацию в форме ментальных образов [14, 23]. Такие нейроморфные устройства, которые, будем называть *образно-логическими*, относятся к категории *объяснимого искусственного интеллекта*, так как матрично-векторное умножение (8) всегда можно связать с семантикой (смыслом).

Примеры представления L4 чисел $\langle a|b \rangle$ с помощью БФ $F(a,b)$ логических переменных $a \cdot b$, приведены в табл. 2. В общем случае, произвольное L4 число $\begin{bmatrix} ab & a\tilde{b} \\ \tilde{a}b & \tilde{a}\tilde{b} \end{bmatrix}$ можно кодировать булевой функцией, которую мы обозначим как $L4(\alpha, a, b)$:

$$L4(\alpha, a, b) = ab \cdot a \cdot b + a\tilde{b} \cdot a \cdot \bar{b} + \tilde{a}b \cdot \bar{a} \cdot b + \tilde{a}\tilde{b} \cdot \bar{a} \cdot \bar{b} \quad (18)$$

где $\alpha = (ab, a\tilde{b}, \tilde{a}b, \tilde{a}\tilde{b})$ – логический вектор, а символы « $\cdot$ » и « $+$ » обозначают логические операции конъюнкции («и») и дизъюнкции («или»).

Таблица 2. Примеры кодирования L4 чисел булевыми функциями

$\langle a b \rangle = \begin{bmatrix} ab & a\tilde{b} \\ \tilde{a}b & \tilde{a}\tilde{b} \end{bmatrix}$	$F(a,b)$
$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$a \cdot b$
$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$a \cdot \bar{b}$
$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\bar{a} \cdot b$
$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\bar{a} \cdot \bar{b}$

Как следует из (18), значения элементов L4 числа или, что тоже самое, элементов логического вектора $\alpha = (ab, a\tilde{b}, \tilde{a}b, \tilde{a}\tilde{b})$ можно определить с помощью таблицы истинности булевой функции $L4(\alpha, a, b)$ (табл. 3).

Рассмотрим, например, представление в форме БФ матричного уравнения

$$\mathbf{a}_x = \langle X|U \rangle \cdot \mathbf{a}_u \quad (19)$$

где $X = \{x_i\}$ – произвольный базис пересекающихся пятен, а $U = \{u_k\}$ – атомарный базис, в качестве которого можно рассматривать совокупность фрагментов пятен x_i . По определению,

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_u &= [\langle a|u_1 \rangle; \langle a|u_2 \rangle \dots \langle a|u_N \rangle], \\ \mathbf{a}_x &= [\langle a|x_1 \rangle; \langle a|x_2 \rangle \dots \langle a|x_n \rangle] \end{aligned} \quad (20)$$

Таблица 3. Таблица истинности булевой функции $L4(\alpha, a, b)$

a	b	$L4(\alpha, a, b)$
0	0	$\tilde{a}\tilde{b}$
0	1	$\tilde{a}b$
1	0	$a\tilde{b}$
1	1	ab

L4 вектор $\mathbf{a}_x$ (20) определяется формулами (11) и (12) работы [13]. В частности, формулу (11) указанной работы для L4 числа $\langle a|x_k \rangle_u$ можно представить с помощью БФ $F_u(\alpha, \beta_k, a, b)$:

$$\langle a|x_k \rangle_u \Rightarrow F_u(\alpha, \beta, a, x) = \sum_{i=1}^N L4(\alpha_i, a, 1) \cdot L4(\beta_{ki}, x, 1) \quad (21)$$

где введены следующие логические векторы:

$$\begin{aligned} \alpha &= (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N) & \beta_k &= (\beta_{k1}, \beta_{k2}, \dots, \beta_{kN}) \\ \alpha_i &= (a u_i, a \tilde{u}_i, \tilde{a} u_i, \tilde{a} \tilde{u}_i) & \beta_{ki} &= (x_k u_i, x_k \tilde{u}_i, \tilde{x}_k u_i, \tilde{x}_k \tilde{u}_i) \end{aligned} \quad (22)$$

Получим теперь выражения для представления в форме булевых функций матричного уравнения, которое обратное уравнению (19):

$$\mathbf{a}_u = \langle U|X \rangle \cdot \mathbf{a}_x \quad (23)$$

где L4 векторы $\mathbf{a}_u$ и $\mathbf{a}_x$ представлены равенствами (20), а L4 числа $\langle a|uk \rangle$ определяются равенством (15) работы [13]. Для этого сначала преобразуем формулу (15) указанной работы в следующее эквивалентное представление:

$$\langle a|uk \rangle = \begin{bmatrix} a u_k & a \tilde{u}_k \\ \tilde{a} u_k & \tilde{a} \tilde{u}_k \end{bmatrix} \quad (24)$$

где

$$\begin{aligned} a u_k &= \prod_i \left(a x_i + \overline{(x_i u_k)} \right) \cdot (a \tilde{x}_i + x_i u_k) \\ a \tilde{u}_k &= \sum_i \left(a \tilde{x}_i \cdot x_i u_k + a x_i \cdot \overline{(x_i u_k)} \right) \\ \tilde{a} u_k &= \prod_i \left(\tilde{a} x_i + \overline{(x_i u_k)} \right) \cdot (\tilde{a} \tilde{x}_i + x_i u_k) \\ \tilde{a} \tilde{u}_k &= \sum_i \left(\tilde{a} \tilde{x}_i \cdot x_i u_k + \tilde{a} x_i \cdot \overline{(x_i u_k)} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

Тогда правило матричного умножения (23)–(25) можно преобразовать в форму следующей БФ:

$$\begin{bmatrix} au_k & a\tilde{u}_k \\ \tilde{a}u_k & \tilde{a}\tilde{u}_k \end{bmatrix} \Rightarrow \alpha_{k1} \cdot a \cdot u + \alpha_{k2} \cdot a \cdot \bar{u} + \alpha_{k3} \cdot \bar{a} \cdot u + \alpha_{k4} \cdot \bar{a} \cdot \bar{u} \quad (26)$$

где $\alpha_k = (\alpha_{k1}, \alpha_{k2}, \alpha_{k3}, \alpha_{k4}) = (au_k, a\tilde{u}_k, \tilde{a}u_k, \tilde{a}\tilde{u}_k)$ — логический вектор, а логические переменные α_{ki} определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned} au_k &= \prod_i (\beta_{i1} + \bar{\gamma}_{ik1}) \cdot (\beta_{i2} + \gamma_{ik1}) \\ a\tilde{u}_k &= \sum_i (\beta_{i1} \cdot \bar{\gamma}_{ik1} + \beta_{i2} \cdot \gamma_{ik1}) \\ \tilde{a}u_k &= \prod_i (\beta_{i3} + \bar{\gamma}_{ik1}) \cdot (\beta_{i4} + \gamma_{ik1}) \\ \tilde{a}\tilde{u}_k &= \sum_i (\beta_{i3} \cdot \bar{\gamma}_{ik1} + \beta_{i4} \cdot \gamma_{ik1}) \end{aligned} \quad (27)$$

Логические переменные β_i и γ_{ik} в (27) определяются как:

$$\beta_i = (\beta_{i1}, \beta_{i2}, \beta_{i3}, \beta_{i4}) = (ax_i, a\tilde{x}_i, \tilde{a}x_i, \tilde{a}\tilde{x}_i) \quad (28)$$

$$\gamma_{ik} = (\gamma_{ik1}, \gamma_{ik2}, \gamma_{ik3}, \gamma_{ik4}) = (x_i u_k, x_i \tilde{u}_k, \tilde{x}_i u_k, \tilde{x}_i \tilde{u}_k)$$

которые также используются в следующие преобразования L4 чисел с помощью БФ:

$$\begin{bmatrix} ax_i & a\tilde{x}_i \\ \tilde{a}x_i & \tilde{a}\tilde{x}_i \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$L4(\beta_i, a, x) = \beta_{i1} \cdot a \cdot x + \beta_{i2} \cdot a \cdot \bar{x} + \beta_{i3} \cdot \bar{a} \cdot x + \beta_{i4} \cdot \bar{a} \cdot \bar{x}$$

$$\begin{bmatrix} x_i u_k & x_i \tilde{u}_k \\ \tilde{x}_i u_k & \tilde{x}_i \tilde{u}_k \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$L4(\gamma_{ik}, x, u) = \gamma_{ik1} \cdot x \cdot u + \gamma_{ik2} \cdot x \cdot \bar{u} + \gamma_{ik3} \cdot \bar{x} \cdot u + \gamma_{ik4} \cdot \bar{x} \cdot \bar{u}$$

6. ВОЗМОЖНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ АППАРАТА ПЯТЕН В НЕЙРОМОРФНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Реализация образно-логических нейроморфных устройств возможна, например, на программируемых логических матрицах (ПЛИС) или на новых перспективных элементах памяти — мемристорах и FeFET-транзисторах [24, 25]. Указанные элементы обладают энергонезависимой памятью, чрезвычайно низкими потерями переключения и более быстрыми операциями чтения/записи. Мемристоры и FeFET-транзисторы обладают также уникальным свойством, позволяющим хранить и использовать логику в одном устройстве. Нейроморфные устройства, построенные с применением этих перспективных элементов памяти, реализуют концепцию *вычисления в памяти*, что позволяет значительно ускорить работу систем за счет сокращения передачи данных между

вычислениями и памятью, обеспечивая максимальный параллелизм вычислений [24, 25].

При моделировании, например, уравнения (19) с помощью БФ L4 векторы $\mathbf{a}_U$ и $\mathbf{a}_X$ будут играть роль входных и выходных данных. При этом $\mathbf{a}_U$ будет кодироваться с помощью логических векторов α_i , а L4 матрица $\langle X|U \rangle$ должна храниться в ячейках памяти в форме логических векторов $\beta_{ki} = (x_k u_i, x_k \tilde{u}_i, \tilde{x}_k u_i, \tilde{x}_k \tilde{u}_i)$ (22). Результат матричного умножения вычисляется с помощью БФ $F_U(\alpha, \beta, a, x)$ (21). Аналогично, для представления уравнения (23) с помощью БФ, L4 матрицу $\langle U|X \rangle$, ее необходимо хранить в ячейках памяти в форме логических векторов γ_{ik} (27), а результат матричного умножения вычислять с помощью БФ (26)–(28).

Математический аппарат пятен в форме БФ можно, например, реализовать на прямоугольных логических матрицах элементов памяти, используя метод кодирования, предложенный Акерсом [26], позволяющий формировать любую логическую функцию. В логической матрице Акерса выполнение любой булевой функции осуществляется путем передачи данных через матрицу элементарных логических ячеек, каждая из которых вычисляет одну из четырех простых логических функций. В работе [27] было предложено использовать этот подход для формирования БФ на кроссбарах мемристоров [24], где все ячейки используют только одну из четырех БФ работы [26]:

$$f(x, y, z) = x \cdot \bar{z} + y \cdot z \quad (29)$$

БФ матрицы Акерса формируется с помощью переменных z_k , которые сохраняются в элементах памяти и определяют состояние логической матрицы. Тогда входные данные x_i, y_i будут обрабатываться с помощью сформированной БФ, которую можно изменять переключением состояний мемристоров. Такие структуры БФ названы *логикой состояний* (“stateful logic”) [28].

Реализация этой функции на мемристорах в работе [27] осуществляется следующим образом. Каждая элементарная ячейка Акерса включает два комплементарно включенных мемристора и четыре КМОП транзистора, играющих роль переключателей, которые используются для изоляции между логическими ячейками и поддержания регулярных операций чтения и записи (см. [27], рис. 6 и рис. 7с). Очевидно, что построение БФ на ячейках Акерса (29) также возможно и на кроссбарах FeFET, играющих роль элементов энергонезависимой памяти. Отметим, что кодирование аппарата пятен в форме БФ на логических матрицах Акерса соответствует компьютерной архитектуре *вычислений в памяти* [20, 25].

Были предложены и другие архитектуры БФ, построенных на кроссбарах мемристоров. Например, это — логические ячейки, называемые блоками обработки памяти (Memory Processing Unit),

включая IMPLY [28], MAGIC [29], and FELIX [30]. Архитектуры указанных логических элементов позволяют формировать, такие операции как NOT/NOR, NAND, OR.

В работах [31, 32] предложена архитектура многослойных мемристорно-диодных матриц для создания нейроморфного процессора. Здесь используются технология интегрирования мемристорного кроссбара с КМОП-транзисторной логикой. Элементарные логические ячейки построены на комплементарных мемристорах и диодах Зенера, включенных последовательно с первыми. Применение диодов Зенера позволяет уменьшить деградацию выходного сигнала при суммировании входных импульсов напряжения. Многослойная логическая матрица, состоящая из КМОП-инверторов и мемристоров, в основном режиме работы реализует БФ, построенную на основе конъюнктивной многовходовой логики с отрицанием типа «И-НЕ», которая предварительно сформирована мемристорными переключателями в режиме обучения [32].

Дальнейшая работа в направлении разработки архитектуры образно-логических нейроморфных устройств предполагает сравнение предложенных разными авторами архитектур логических функций на мемристорах и FeFET, а также выбор их оптимальной архитектуры.

В работе [12] было показано, что аппарат пятен позволяет строить архитектуры глубоких нейронных сетей, где каждый слой производит операцию умножения L4 матрицы на L4 вектор, играющий роль входных сигналов. В результате умножения получается новый L4 вектор, играющий роль выходных сигналов этого слоя и входных сигналов следующего слоя. Формулы умножения работы [13] позволяют рассмотреть это представление более детально и предложить концепцию образно-логических нейронных сетей.

В частности, рис. 4а представляет слой такой нейронной сети, который пересчитывает отображение пятна-образа a на произвольный базис пятен $X = \{x_i\}$, используя данные об его отображении на базисе $U = \{u_k\}$ фрагментов (частей) пятен базиса X . При этом применяются формулы (11), (12) работы [13]. Этот слой выполняет расчет, который моделирует мыслительную операцию синтеза или обобщения. рис. 4б иллюстрирует работу слоя нейронной сети, который решает задачу, обратную предыдущей: по данным отображения пятна-образа a на произвольном базисе пятен $X = \{x_i\}$, найти его отображение на базисе $U = \{u_k\}$ фрагментов (частей) пятен базиса X . При этом применяются формулы (15), (16) работы [13]. Этот слой выполняет расчет, моделирующий мыслительную операцию анализа.

Отдельными квадратами на рис. 4 обозначены схемы искусственных нейронов, соответствующих пятнам-образам $\{u_k\}$ и $\{x_i\}$. Эти нейроны производят образно-логическую обработку информа-

ции, поступающую на их входы, что эквивалентно элементарным актам мышления. Поэтому предложенный тип нейронных сетей мы назвали образно-логическими.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено применение аппарата пятен для представления информации и рассуждений в форме ментальных образов, а также его реализация для нейроморфных устройств нового типа, которые названы образно-логическими. Особенностью предлагаемых нейроморфных устройств является то, что обработка информации в них аналогична рассуждениям человека, что должно позволить решить серьезную проблему современных глубоких нейронных сетей, связанную с неизбежностью возникновения случайных ошибок. Рассмотрена возможность построения архитектуры образно-логических нейроморфных устройств на базе кроссбаров мемристоров или FeFET, которая соответствует схеме *вычислений в памяти*. Все это позволяет сформулировать новую парадигму интеллектуальных систем, способных не только представлять информацию в образной форме, но и моделировать образное мышление.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К. А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0019 «Фундаментальные и поисковые исследования в области создания перспективной элементной базы нанoeлектроники и ее ключевых технологий».

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность Лукичеву В. Ф., Руденко К. В., Волковой Е. В. и Гостеву А. А. за поддержку и плодотворные обсуждения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seo J.S., Brezzo B., Liu Y., Parker B.D., et al. A 45nm CMOS neuromorphic chip with a scalable architecture for learning in networks of spiking neurons // IEEE Custom Integrated Circuits Conf (CICC). 2011. P. 1–4. IEEE.
2. Indiveri G., Linares-Barranco B., Hamilton T.J. et al. Neuromorphic silicon neuron circuits // Front. Neurosci. 2011. V. 5. P. 1–23.

3. Zhu J., Zhang T., Yang Y., and Huang R. A comprehensive review on emerging artificial neuromorphic devices // *Applied Physics Reviews*. 2020. Rev. 7, 011312. P. 1–107.
4. Гостев А.А. Психология вторичного образа. М.: Литрес, 2022.
5. Горбань А.Н. Проблема надежности многомерно-го ИИ в многомерном мире. Доклад на заседании ОНИТ РАН, 24 февраля 2022 г. URL: <https://cloud.niime.ru/s/fwfx8eYHg6EDz6q?path=%2F2021%20-%202023>
6. Image Classification on ImageNet. URL: <https://paperswithcode.com/sota/image-classification-on-imagenet>
7. Searle J.R. Minds, brains, and programs // *Behav. Brain Sci.* 1980. V. 3. P. 417–424.
8. Финн В.К. Индуктивные методы ДС Милля в системах искусственного интеллекта. Часть I // Искусственный интеллект и принятие решений. 2010. № 3. С. 3–21.
9. Финн В.К. Индуктивные методы ДС Милля в системах искусственного интеллекта. Часть II // Искусственный интеллект и принятие решений. 2010. № 4. С. 14–40.
10. Wang P. Cognitive Logic vs Mathematical Logic // *Lecture Notes of the 3rd International Seminar on Logic and Cognition*. China, Guangzhou, 2004.
11. Адамар Ж. Исследование психологии процесса изобретения в области математики. Пер. с франц. М.: МЦНМО, 2001.
12. Симонов Н.А. Концепция пятен для задач искусственного интеллекта и алгоритмов нейроморфных систем. // *Микроэлектроника*. 2020. Т. 49. № 6. С. 459–473.
13. Simonov N.A. Application of the model of spots for inverse problems. // *Sensors*. 2023. V. 23. No 3. 1247.
14. Simonov N.A., Rusalova M.N. Mental imagery representation by model of spots in psychology // *Natural Systems of Mind*. 2023. V. 3. No 1. P. 4–22.
15. Nanay B. Mental Imagery // E. N. Zalta (ed.) *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. 2021. [Электронный ресурс] URL: <https://plato.stanford.edu/archives/win2021/entries/mental-imagery/>
16. Веккер Л.М. Психика и реальность: единая теория психических процессов. М.: Смысл, 1998.
17. Simonov N.A. Spatial representation of concepts and processes in psychology by the spots model // *Natural Systems of Mind*. 2024. V. 4. No 2. С. 6–20. https://doi.org/10.38098/nsom_2024_04_02_01.
18. Sima J.F., Freksa C. Towards computational cognitive modeling of mental imagery: The attention-based quantification theory // *KI-Künstliche Intelligenz*. 2012. V. 26. P. 261–267.
19. Donini F.M., Lenzerini M., Nardi D., Pirri F., and Schaefer M. Nonmonotonic reasoning // *Artificial Intelligence Review*. 1990. V. 4. No 3. P. 163–210.
20. Светлов В.А. Методологическая концепция научного знания Чарлза Пирса: единство абдукции, дедукции и индукции // *Логико-философские штудии*. 2012. № 5. С. 165–188.
21. Bochman A. Causal reasoning from almost first principles // *Synthese*. 2024. V. 203:19.
22. Карта Карно [Электронный ресурс] // Википедия. 2023. Дата обновления: 28.10.2023. URL: <https://ru.wikipedia.org/?curid=712337&oldid=133861103>
23. Simonov N.A. Development of a mathematical apparatus with an imagery representation of information for neuromorphic systems. // *Russian Microelectronics*. 2023. V. 52. No. 6, Suppl. 1. P. S158–S161.
24. Ielmini D. and Wong H.S.P. In-memory computing with resistive switching devices // *Nature electronics*. 2018. V.1. No 6. P. 333–343.
25. Tarkov M., Tikhonenko F., Popov V., Antonov V., Mialonki-kh A., and Rudenko K. Ferroelectric Devices for Content-Addressable Memory. *Nanomaterials*. 2022. V. 12. 4488.
26. Akers S.B. A rectangular logic array // *12th Annual Symposium on Switching and Automata Theory (SWAT)*. 1971. P. 79–90. IEEE.
27. Levy Y., Bruck J., Cassuto Y., Friedman E. G., Kolodny A., Yaakobi E., and Kvatinsky S. Logic operations in memory using a memristive Akers array // *Microelectronics Journal*. 2014. V. 45. No 11. P. 1429–1437.
28. Borghetti J., Snider G.S., Kuekes P.J., Yang J.J., Stewart D.R., and Williams R.S. Memristive switches enable ‘stateful’ logic operations via material implication // *Nature*. 2010. V. 464. P. 873–876.
29. Kvatinsky S., Belousov D., Liman S., Satat G., Wald N., Friedman E.G., Kolodny A. and Weiser U.C. MAGIC-Memristor-aided logic // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2014. V. 61. No 11. P. 895–899.
30. Gupta S., Imani M. and Rosing T. Felix: Fast and energy-efficient logic in memory // *IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD)*. 2018. P. 1–7. IEEE.
31. Удовиченко С., Писарев А., Бусыгин А., Маевский О. 3D КМОП-мемристорная нанотехнология создания логической и запоминающей матриц нейропроцессора // *Наноиндустрия*. 2017. № 5. С. 26–34.
32. Удовиченко С., Писарев А., Бусыгин А., Маевский О. Нейропроцессор на основе комбинированного мемристорно-диодного кроссбара // *Наноиндустрия*. 2018. Т. 11. № 5. С. 344–355.

DEVELOPMENT OF AN IMAGERY REPRESENTATION APPARATUS FOR INFORMATION REPRESENTATION IN NEYROMORPHIC DEVICES

© 2024 N. A. Simonov^{1,*}

¹ Valiev Institute of Physics and Technology, Russian Academy of Sciences

*E-mail: nsimonov@ftian.ru

The paper considers the application of the mathematical apparatus of spots for neuromorphic devices on crossbars of memory elements, the architecture of which corresponds to the technique of computing in memory. The apparatus of spots allows to represent and process semantic information in the form of mental imagery, as well as to model reasoning in a form inherent to a person. In particular, these are deductive, inductive, abductive, as well as non-monotonic reasoning, when conclusions are made on the basis of existing knowledge, and obtaining new knowledge can change the conclusions. The apparatus of spots is the mathematical basis for creating neuromorphic devices with the technique of computing in memory, capable of not only representing semantic information in an imaginary form, but also modeling imaginative thinking. This will solve a major problem for modern deep neural networks associated with the possibility of random, causeless errors.

Keywords: mental imagery, causal reasoning, neuromorphic devices, crossbars, memristors, FeFET

REFERENCES

1. *Seo J.S., Brezzo B., Liu Y., Parker B.D., et al.* A 45nm CMOS neuromorphic chip with a scalable architecture for learning in networks of spiking neurons // IEEE Custom Integrated Circuits Conf (CICC). 2011. P. 1–4. IEEE.
2. *Indiveri G., Linares-Barranco B., Hamilton T.J. et al.* Neuromorphic silicon neuron circuits // Front. Neurosci. 2011. V. 5. P. 1–23.
3. *Zhu J., Zhang T., Yang Y., and Huang R.* A comprehensive review on emerging artificial neuromorphic devices // Applied Physics Reviews. 2020. Rev. 7, 011312. P. 1–107.
4. *Gostev A.A.* Psychology of the Secondary Image. M.: Litres. 2022 (in Russian).
5. *Gorban A.N.* The Problem of Reliability of Multidimensional AI in a Multidimensional World. Presentation at the ONIT RAS Meeting, February 24 2022. URL: <https://cloud.niime.ru/s/fwfX8eYHg6EDz6q?path=%2F2021%20-%202023> (in Russian).
6. Image Classification on ImageNet. URL: <https://paperswithcode.com/sota/image-classification-on-imagenet>
7. *Searle J.R.* Minds, brains, and programs // Behav. Brain Sci. 1980. V. 3. P. 417–424.
8. *Finn V.K.* Inductive methods of D.S. Mill in artificial intelligence systems. Part I // Artificial intelligence and decision making. 2010. № 3. C. 3–21 (in Russian).
9. *Finn V.K.* Inductive methods of D.S. Mill in artificial intelligence systems. Part II // Artificial intelligence and decision making. 2010. № 4. C. 14–40.
10. *Wang P.* Cognitive Logic vs Mathematical Logic // Lecture Notes of the 3rd International Seminar on Logic and Cognition. China, Guangzhou, 2004.
11. *Hadamard J.* An essay on the psychology of invention in the mathematical field. Courier Corporation. 1954.
12. *Simonov N.A.* Spots Concept for Problems of Artificial Intelligence and Algorithms of Neuromorphic Systems // Russian Microelectronics. 2020. V. 49. P. 431–444. <https://doi.org/10.1134/S106373972005008X>
13. *Simonov N.A.* Application of the model of spots for inverse problems. // Sensors. 2023. V. 23. No 3. 1247.
14. *Simonov N.A., Rusalova M.N.* Mental imagery representation by model of spots in psychology // Natural Systems of Mind. 2023. V. 3. No 1. P. 4–22.
15. *Nanay B.* Mental Imagery // E.N. Zalta (ed.) The Stanford Encyclopedia of Philosophy. 2021. [Электронный ресурс] URL: <https://plato.stanford.edu/archives/win2021/entries/mental-imagery/>
16. *Vekker L.M.* Psyche and reality: a unified theory of mental processes. M.: Smysl, 1998 (in Russian).
17. *Simonov N.A.* Spatial representation of concepts and processes in psychology by the spots model // Natural Systems of Mind. 2024. V. 4. No 2, P. 6–20. https://doi.org/10.38098/nsom_2024_04_02_01.
18. *Sima J.F., Freksa C.* Towards computational cognitive modeling of mental imagery: The attention-based quantification theory // KI-Künstliche Intelligenz. 2012. V. 26. P. 261–267.
19. *Donini F.M., Lenzerini M., Nardi D., Pirri F., and Schaerf M.* Nonmonotonic reasoning // Artificial Intelligence Review. 1990. V. 4. No 3. P. 163–210.
20. *Svetlov V.A.* Charles Peirce's Methodological Concept of Scientific Knowledge: The Unity of Abduction, Deduction and Induction // Logiko-fylosofskiye shtudii. 2012. No 5. P. 165–188 (in Russian).
21. *Bochman A.* Causal reasoning from almost first principles // Synthese. 2024. V. 203:19.
22. Wikipedia contributors, 'Karnaugh map' // Wikipedia, The Free Encyclopedia, 20 August 2024, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Karnaugh_map&oldid=1241369572.
23. *Simonov N.A.* Development of a mathematical apparatus with an imagery representation of information for neuromorphic systems. // Russian Microelectronics. 2023. V. 52. No 6, Suppl. 1. P. S158–S161.

24. *Ielmini D. and Wong H.S.P.* In-memory computing with resistive switching devices // *Nature electronics*. 2018. V.1. No 6. P. 333–343.
25. *Tarkov M., Tikhonenko F., Popov V., Antonov V., Miakonkikh A., and Rudenko K.* Ferroelectric Devices for Content-Addressable Memory. *Nanomaterials*. 2022. V. 12. 4488.
26. *Akers S.B.* A rectangular logic array // 12th Annual Symposium on Switching and Automata Theory (SWAT). 1971. P. 79–90. IEEE.
27. *Levy Y., Bruck J., Cassuto Y., Friedman E.G., Kolodny A., Yaakobi E., and Kvatinsky S.* Logic operations in memory using a memristive Akers array // *Microelectronics Journal*. 2014. V. 45. No 11. P. 1429–1437.
28. *Borghetti J., Snider G.S., Kuekes P.J., Yang J.J., Stewart D.R., and Williams R.S.* Memristive switches enable ‘stateful’ logic operations via material implication // *Nature*. 2010. V. 464. P. 873–876.
29. *Kvatinsky S., Belousov D., Liman S., Satat G., Wald N., Friedman E.G., Kolodny A. and Weiser U.C.* MAGIC – Memristor-aided logic // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2014. V. 61. No 11. P. 895–899.
30. *Gupta S., Imani M. and Rosing T.* Felix: Fast and energy-efficient logic in memory // *IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD)*. 2018. P. 1–7. IEEE.
31. *Udovichenko S., Pisarev A., Busygin A., Mayevskiy O.* 3D CMOS memristor nanotechnology for creating logical and memory matrices of a neuroprocessor // *Nanoindustry*. 2017. No 5. P. 26–34 (in Russian).
32. *Udovichenko S., Pisarev A., Busygin A., Mayevskiy O.* Neuroprocessor based on a combined memristor-diode crossbar // *Nanoindustry*. 2018. V. 11. No 5. P. 344–355 (in Russian).

УДК 621.382.323

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОБОЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО КНИ LDMOS ТРАНЗИСТОРА

© 2024 г. А. С. Новоселов¹, М. Р. Гусев¹, Н. В. Масальский¹¹ Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований РАН

*E-mail: volkov@niisi.ras.ru

Поступила в редакцию 15 апреля 2024 г.

После доработки 10 июня 2024 г.

Принята к публикации 10 июня 2024 г.

Обсуждаются результаты исследования температурных зависимостей напряжения пробоя мощных КНИ nLDMOS транзисторов с длинной областью дрейфа с топологическими нормами 0.5 микрон. Основное внимание сфокусировано на влиянии механизма генерации и пассивации ловушек на границе раздела Si/SiO₂ в сильных электрических полях. Экспериментально и теоретически проанализирована зависимость напряжения пробоя в диапазоне температуры окружающей среды от -60° С до 300° С и определен диапазон температур от 25° С до 220° С, где напряжение пробоя практически постоянно. Рассмотрена возможность восстановления уровня напряжения пробоя после длительного периода покоя, что является предпосылкой для продления срока эксплуатации устройства.

Ключевые слова: технология «кремний на изоляторе», мощный LDMOS, температурная зависимость напряжения пробоя, деградация горячих носителей, моделирование, тестирование

DOI: 10.31857/S0544126924050098

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день, силовой LDMOS транзистор представляет собой основной элемент для интеллектуальных энергетических технологий [1, 2]. Однако из-за сложной поперечной структуры высокие электрические поля на границе раздела кремний/оксид усиливают механизмы, которые влияют на работоспособность транзистора. В случае высоких полей носители могут набирать достаточную кинетическую энергию, необходимую для создания на границе раздела состояний (дефектов), с последующим захватом заряда, что приводит к снижению производительности устройства [3, 4]. Деградация горячих носителей (hot carrier degradation – HCD) привлекла к себе внимание, поскольку она становится все более губительной для новых микроэлектронных технологий, направленных на усложнение высоковольтных полупроводниковых устройств, причем их напряжение питания постоянно повышается [1, 5, 6]. При этом под “горячими носителями” подразумеваются электроны и дырки, которые обладают энергией выше энергии активации (по разным данным 2.5–2.8 эВ). HCD проявляется, когда транзистор смещен высоким напряжением на

стоке. В этой ситуации носители могут получать большую энергию от продольного электрического поля. Во время столкновений с поверхностью раздела Si/SiO₂ эти высокоэнергетические носители создают дефекты (разорванные связи Si-H или Pb-дефекты [7]), приводящие к деградации электрофизических характеристик транзистора.

В этой статье был проведен анализ влияния HCD на напряжение пробоя высоковольтных КНИ LDMOS транзисторов с большой DRIFT областью в расширенном диапазоне внешних температур (подробное описание конструкции транзистора приведено в [8]). Чтобы исследовать деградацию характеристик устройства из-за HCD, были проведены экспериментальные исследования в сочетании с моделированием. Используемая ранее математическая модель была расширена с учетом свойств пространственно локализованного захваченного заряда на границе раздела. В частности, поведение напряжения пробоя в режиме OFF было экспериментально исследовано для расширенного диапазона температур и оценено с помощью моделирования. Результаты направлены на оптимизацию ограничений SOA (safe operation area) транзистора LDMOS.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поскольку HCD — это одна из наиболее важных проблем, влияющих на надежность LDMOS [9], в литературе предлагаются различные прогностические модели [7, 10, 11]. В данных моделях, принимая во внимание взаимодействие горячих носителей с молекулами поверхности раздела и взаимодействие теплового поля с решеткой, моделируются характеристики HCD для расширенного диапазона управляющих напряжений и геометрии LDMOS транзистора, но с помощью в настоящее время недоступного инструмента приборно-технологического моделирования. Направление исследования заключается в изучении дефектов, вызванных горячими носителями применительно к отечественным высоковольтным микроэлектронным технологиям. В данной работе детализируется влияние эффектов HCD на электро-физические характеристики LDMOS транзистора в расширенном диапазоне температур. В наших исследованиях мы опираемся на симбиоз (конвергенцию) натурных и численных экспериментов. Часть исследований представлена в нашей предыдущей работе [12]. На данном этапе мы, используя нашу модель и модели [7, 10, 11], связали восстановление HCD с пассивацией Pb-дефектов молекулярным водородом. Важным следствием этого исследования было то, что энергия пассивации индуцированных дефектов не однозначна, а соответствует гауссову распределению, обусловленному базовым распределением в конфигурациях атомных дефектов [13].

При комнатной температуре HCD является квазипостоянным. И, соответственно, напряжение пробоя ведет себя так же, что было показано в [12, 14]. Однако, в расширенном диапазоне температур поведение этого важного параметра подробно не исследовалось. Данная проблема решается в представленной работе. Немаловажно, что часть (возможно большая) деградации может быть восстановлена. И в данном случае важно знать температурный диапазон восстановления. В любом случае получается прогностическая методика оценки способности продления срока службы транзистора и схемы в целом с учетом устранения повреждений, получая формально самовосстанавливающуюся электронику.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Деградация устройства была экспериментально проверена на пластине с использованием следующей методики измерения. Мы исследовали напряжение пробоя LDMOS транзистора в выключенном состоянии U_{bg} ($U_{gs} = 0V$, $U_{ds} = \text{от } 0V \text{ до } U_{bg}$ с шагом $500mV$) в диапазоне температур от минус 60 до плюс 300 °C. Измерение напряжения

пробоя проводилось по уровню тока стока в 100 нА LDMOS транзистора. Было проведено два этапа измерений: 1 этап — 500 циклов измерений U_{bg} для набора температур из диапазона от минус 60 до плюс 300 °C; 2 этап — через 14 дней еще 500 циклов измерений U_{bg} для такого же набора температур. На рис. 1 приведены графики изменения напряжения пробоя LDMOS транзистора в зависимости от количества циклов и температуры, скачок графика вниз — начало второго этапа измерений.

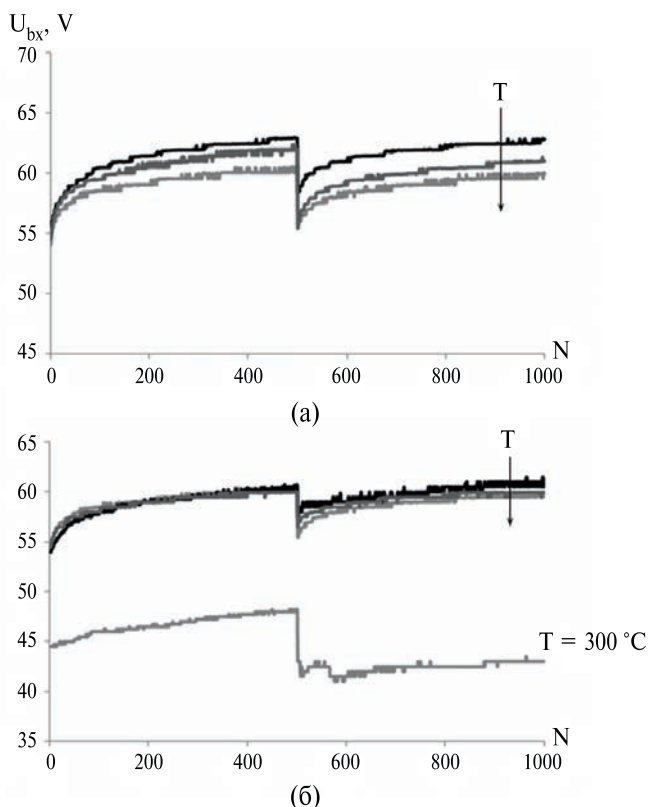


Рис. 1. Экспериментальные данные: изменение напряжения пробоя (U_{bg}) от количества циклов N при разных температурах: а) сверху — вниз — $T = -60^\circ C, 0^\circ C, 25^\circ C$; б) сверху — вниз — $T = 225^\circ C, 125^\circ C, 25^\circ C$; нижняя кривая — $T = 300^\circ C$.

4. МОДЕЛЬ

В [15] показано, что изменение структуры поверхности, вызванное влиянием HCD, может быть описано с использованием модели Стесманса [7] для пассивации Pb-дефектов. Этот подход моделирует реакцию: $Si + H_2 \rightarrow Si-H + H$ [16]. Из-за того, что распределение конфигурации дефектов на границе раздела неравномерно [17], то энергия пассивации Pb-центра E_p в нашем предположении, имеет гауссово распределение. В данном случае это распределение характеризуется плотностью вероятности $gr(E_p)$ со средней энергией пассивации $\mu(E_p)$ и стандартным откло-

нением (E_p). Индуцированная горячими носителями концентрация Pb-дефектов в зависимости от времени t задается формулой [16]:

$$P(t) = N_{it_{\max}} \int_0^{\infty} dE_p g_p(E_p) P(E_p, t), \quad (1)$$

где $N_{it_{\max}}$ — максимальная плотность дефектов на границе раздела, а $P(E_p, t)$ — доля созданных дефектов. Тогда выражение для $P(E_p, t)$ описывается с использованием кинетики первого порядка:

$$\frac{dP}{dt} = -k_p P \Rightarrow P(E_p, t) = P_{stat} \exp(-k_d / \Delta t), \quad (2)$$

$\Delta t = t - t_0$ и $P_0 = P(t = 0)$. Постоянная времени пассивации τ_p (постоянная скорости k_p) связана с E_p посредством соотношения Аррениуса [17]:

$$\tau_p = k_p^{-1} = \tau_0 \exp(E_p / k_B T) \quad (3)$$

где k_B — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, коэффициент τ_0 может быть подгоночным параметром, в общем случае, он зависит от концентрации атомарного водорода на границе раздела пленок и от количества (частоты) актов восстановления [18].

Следует отметить, что подынтегральное выражение (1) $G_p(E_p, t) = g_p(E_p)P(E_p, t)$ дает временную эволюцию распределения энергий пассивации связей. Чтобы описать данные циклической пассивации (восстановления), необходимо применить модель для различных фаз, т.е. для разрыва связи Si-H: $Si + H \rightarrow Si-H$. Мы использовали модель времени захвата/испускания (СЕТ) [19], для описания обоих процессов. В данном случае модель СЕТ использовалась с точки зрения диссоциации связей (создания новых дефектов) и пассивации, а не с точки зрения захвата заряда и излучения в/из ранее существующих дефектов. В модифицированной модели энергии диссоциации и пассивации E_d и E_p распределены с плотностью вероятности $g(E_d, E_p)$. Для функции g берется двумерное гауссово распределение со средней энергией рассеяния $\mu(E_d)$, стандартным отклонением $\sigma(E_d)$ и коэффициентом корреляции ρ (помимо $\mu(E_p)$ и $\sigma(E_p)$). Распределение энергий пассивации может быть получено из следующего выражения:

$$G_p(E_p, t) = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} dE_p g(E_d, E_p) P(E_d, E_p, t), \quad (4)$$

где N — нормирующий коэффициент, гарантирующий, что интеграл (4) в начале фазы восстановления равен единице.

Образование дефектов с использованием кинетики первого порядка описывается следующим выражением [20]:

$$\frac{dP}{dt} = k_d(1 - P) \Rightarrow P(t) = 1 + (P_0 - 1)\exp(-k_d / \Delta t), \quad (5)$$

По аналогии с (3) постоянная времени диссоциации связи τ_d (скорость k_d) будет равна:

$$\tau_d = k_d^{-1} = \tau_0 \exp(E_d / k_B T)$$

В некоторых случаях удобно упростить (2) и (5) с использованием аппроксимации $e^{-k_d \Delta t} \approx H(k^{-1} - \Delta t)$, где H — функция Хевисайда ($H(x) = 1$ для $x > 0$ и 0 в остальных случаях) [21]. В такой формулировке учитывается условие пассивации во время фазы напряжения (когда приложено высокое напряжение на стоке), что позволяет учесть обратную реакцию. В таком случае процесс пассивации зависит от концентрации атомарного водорода. Тогда процесс пассивации линейно зависящий от концентрации дефектов P аналогично (5) запишем в виде:

$$\frac{dP}{dt} = k_d(1 - P) - k'_{p,i} P, \quad (6)$$

где $k'_{p,i} = p k_d N_i$ — постоянная скорости пассивации во время фазы напряжения, выраженная через постоянную скорости k_d с использованием безразмерного параметра p . Величина N_i представляет собой атомарный водород в фазе напряжения i , который был создан во время предыдущих фаз. Он рассчитывается исходя из доли дефектов в конце различных фаз напряжения/восстановления. Решением (6) является:

$$P(t) = \alpha_i^{-1} + (P_0 + \alpha_i^{-1})\exp(k_d \alpha_i \Delta t), \quad (7)$$

где $\alpha_i = 1 + p N_i$.

Зависящее от концентрации водорода время пассивации приводит к различной деградации в конце фазы напряжения при разных температурах. Так как все реакции в качестве продукта используют атомарный водород, то восстановление при более высокой температуре увеличивает срок пассивации на следующей фазе напряжения и приводит к меньшему разрушению на ней по сравнению действием при более низкой температуре [22].

В модели мы привязываем среднюю энергию диссоциации $\mu(E_d) = 2,56$ эВ к значению, измеренному Брауэром для диссоциации пассивированных водородом Pb-дефектов [23]. Известно, что в масштабируемых устройствах процесс разрыва связи Si-H является сложным и может состоять из процессов с несколькими частицами (мультичастичный процесс) и процесса с одной частицей [24]. Поскольку эффективную энергию разрыва связи трудно оценить, мы использовали полную энергию разрыва связи. Для средней энергии пассивации $\mu(E_p)$ и ее стандартного отклонения $\sigma(E_p)$ мы сопоставляем их значения с измеренными в [13, 18] и усредняем при помощи (1).

Таблица 1. Значения параметров модели при максимальной плотности дефектов $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$

σ (Ер), эВ	μ (Ер), эВ	σ (Ed), эВ	μ (Ed), эВ	ρ	τ_0 , пс	p
0.31	1.21	0.23	2.56	1×10^{-3}	64	2.1

Затем на основе соответствия определяются два оставшихся параметра распределения энергий диссоциации (Ed) и пассивации (Ер) и ρ . Полученное значение σ (Ed) для энергии диссоциации немного меньше, но аналогично значению для энергии пассивации. При этом коэффициент корреляции очень низкий (практически равен нулю). Это говорит об отсутствии корреляции между энергиями диссоциации и пассивации. Связь, которую легко разорвать, может быть в равной степени легко или трудно пассивировать. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

По результатам моделирования наблюдается несколько меньшая деградация в более поздних циклах измерений при незначительном росте температуры. Этот эффект моделируется с использованием соотношения пассивации в цикле измерения (см. (6)) в зависимости от концентрации атомарного водорода. Отметим, что концентрация атомарного водорода считалась постоянной по времени и не рассматривалось ее возможное снижение.

Наконец, мы рассчитываем распределение энергий пассивации связей $G_p(E_p)$ путем интегрирования энергий диссоциации из двумерного распределения $g(E_d, E_p)$ с использованием (4) (рис. 2). Тогда в начале первого восстановления, $G_p(E_p)$ является гауссовым, как в классической модели [15].

В начале более поздних фаз распределение отклоняется от гауссовой формы. Это можно понять следующим образом. Из соотношений Аррениуса следует, что константы скорости пассивации k_p связи

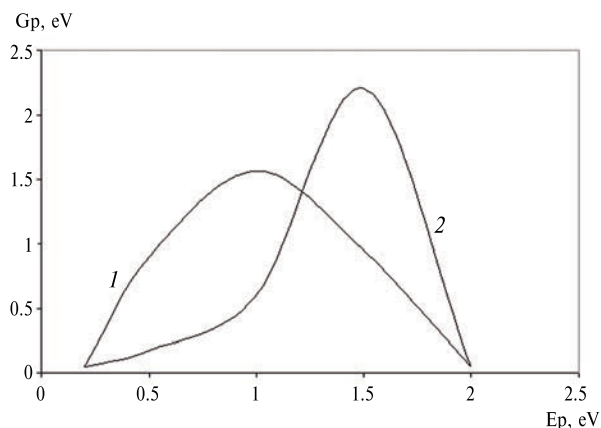


Рис. 2. Распределения энергий активации связи Si-H в начале каждой фазы для постоянного напряжения U_{ds} , где 1 – в начале первого цикла восстановления (усеченный гаусс), 2 – в начале четвертого цикла.

с меньшими энергиями пассивации пассивируются гораздо быстрее (низкие энергии пассивации имеют меньший вес), чем связи с большей энергией пассивации. В результате в каждый момент времени образуются связи с энергией пассивации ниже (выше) определенной эталонной энергии E^* , причем E^* смещается в сторону более высоких энергий пассивации с увеличением времени восстановления (рис. 3). Аналогичный процесс происходит во время последующей фазы измерения, причем первыми разрываются связи с наименьшей энергией

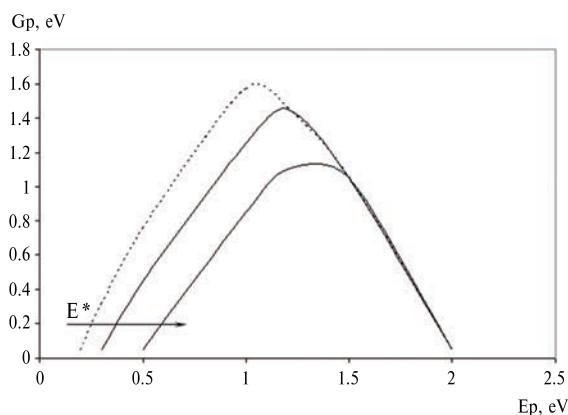


Рис. 3. Распределение энергии в начале первого цикла (пунктирная линия) и в разные моменты в течение первой фазы (сплошные линии).

диссоциации. Однако, поскольку нет корреляции между энергиями пассивации и диссоциации, разрыв связи в последующей фазе добавляет все энергии пассивации к распределению. Следствием этого является то, что, начиная со второго цикла восстановления, распределение энергии пассивации связи больше не является симметричным.

Встраивание заряженных дефектов оказывает двойственное влияние на электрофизические характеристики транзистора: они вызывают локальные искажения электростатики прибора и играют роль заряженных рассеивающих центров. В данном случае происходит уменьшение подвижности носителей и, следовательно, тока стока и проводимости транзистора в подпороговом и линейном режимах. Деградация подвижности описывается эмпирической формулой [25; 26]:

$$\mu_{it} = \frac{\mu_o}{1 + \gamma_{it} N'_{it} \exp(-r / r_{it})}, \quad (8)$$

где через μ_{it} обозначена подвижность в присутствии интерфейсных состояний, μ_0 соответствует подвижности в “свежем” приборе, γ_{it} с параметр, определяющий величину эффекта, r – расстояние от носителя до интерфейса Si/SiO₂, а r_{it} – характерная длина, задающая, на каком расстоянии носители “чувствуют” заряд на интерфейсе. Величина N'_{it} соответствует плотности N_{it} с учетом заселенности ловушек, которая зависит от локальной

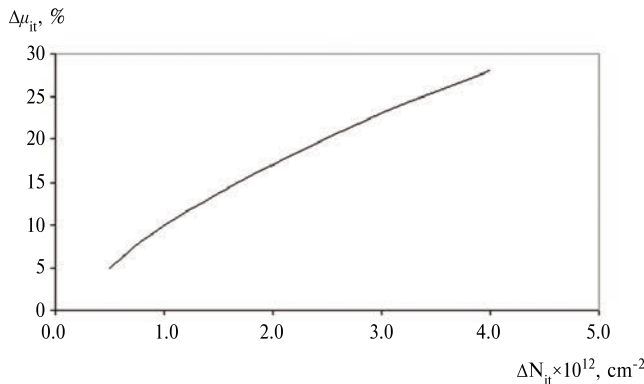


Рис. 4. Зависимость деградации подвижности от изменения концентрации ловушек.

электростатики прибора. Строго говоря, числа заполнения таких ловушек определяются статистикой Шокли–Рида–Холла (ШРХ), т.е. следуют за изменениями локального положения уровня Ферми почти мгновенно. Результаты моделирования приведены на рис. 4.

Моделируемая структура была измерена и откалибрована в нашей предыдущей работе [12] с учетом топологических характеристик, свойств пленок и технологии их изготовления. В частности, при моделировании были использованы профили легирования областей транзистора. Подгоночные параметры выбирались так, чтобы воспроизвести аналогичное пороговое напряжение экспериментального устройства, использованы модели подвижности ШРД, Оже и Ломбарди [12], чтобы получить хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными ВАХ. Следует отметить, что квантовые эффекты и утечки на затворе игнорируются.

5. РЕЗУЛЬТАТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментально и численно получены ВАХ рассматриваемого образца в подпороговом режиме при высоких управляющих напряжениях на стоке в расширенном диапазоне температур. Извлечены значения напряжения пробоя в режиме OFF ($U_{gs}=0$) при номинальном токе 100 нА. На рис. 5 представлена зависимость напряжения пробоя (U_{br}) от внешней температуры.

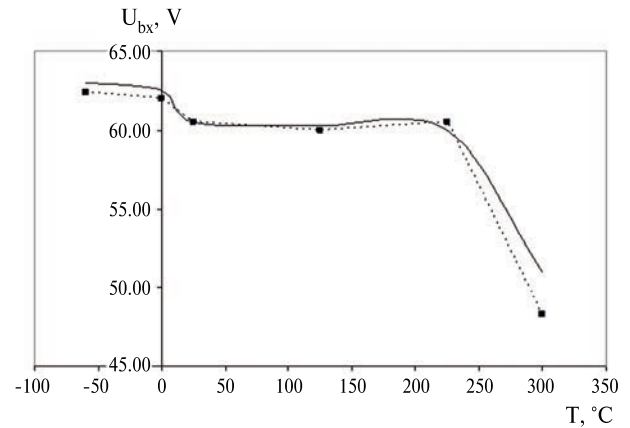


Рис. 5. Зависимость $U_{br}(T)$, где черные квадраты – экспериментальные значения, сплошная линия – расчет.

Из результатов исследований можно выделить диапазон температур от 25 до 220 °C где напряжение U_{br} практически не изменяется. Для рассматриваемой топологии транзистора мы это связываем с наличием взаимокompенсации двух механизмов: подвижность носителей растет с ростом температуры (напомним, что мы рассматриваем подпороговый режим!) и следовательно увеличивается ток стока и с ростом температуры повышается скорость генерации ловушек. Вклад этих механизмов «обнуляется», ток стока не растет, следовательно напряжение U_{br} постоянно. Следующий вывод относится к температурным диапазонам ниже и выше диапазона термостабильности U_{br} . При $T < 0$ °C подвижность носителей снижается, ток стока уменьшается и следовательно параметр U_{br} примерно пропорционально возрастает. При $T > 230$ °C начинается резкий рост подвижности превышающий рост концентрации захваченных зарядов, что вызывает практически экспоненциальный рост тока стока и уровень U_{br} катастрофически падает.

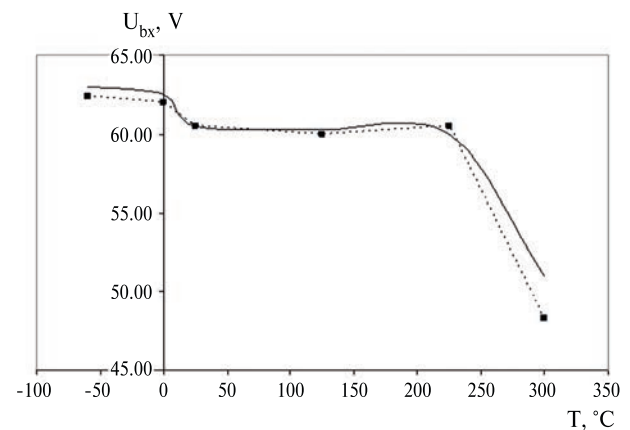


Рис. 6. Зависимость $\Delta U_{br}(T)$.

По результатам моделирования получена оценка способности восстановления напряжения U_{br} после повторной серии измерений. Зависимость восстановления $d_{U_{br}}$ от внешней температуры приведена на рис. 6. Здесь рассматривался процесс изменения напряжения пробоя транзистора после длительного покоя. В результате последующее включение транзистора, что имитировалось повторной серией измерений, уровень U_{br} достигал первоначального значения. Это связано с тем, что процесс генерации ловушки в общем случае многочастичный, т.е. чтобы произошла диссоциация связи — сгенерировалась ловушка — необходимо многократное воздействие электронов, так как масса электрона значительно меньше массы атома кремния. Поэтому часть связей остается возбужденными на разных уровнях, но, не достигая диссоциации. После снятия поля происходит их релаксация (возможно с разными временами). При повторных измерениях мы наблюдаем процесс роста U_{br} по примерно одинаковому закону $U_{br} = \theta \ln(n) + U_{br_o}$. При этом есть отличия $\theta(1) > \theta(2)$ и $U_{br_o}(1) < U_{br_o}(2)$, где индексы (1) и (2) соответствуют первой и второй серии измерений.

Аналогично предыдущим результатам, на зависимости $\Delta U_{br}(T)$ можно выделить температурный диапазон от 30 до 220 °C где приращение постоянно и составляет примерно 2.3 В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы температурные зависимости напряжения пробоя мощных КНИ nLDMOS транзисторов с длинной областью дрейфа с топологическими нормами 0.5 микрон. Основное внимание уделялось влиянию механизма генерации и пассивации ловушек на границе раздела Si/SiO₂ в сильных электрических полях. Разработана математическая модель с учетом механизмов генерации и пассивации для уточнения процесса переноса носителей в высоковольтном nLDMOS транзисторе. Проанализирована зависимость напряжения пробоя в расширенном диапазоне температуры окружающей среды. Определен широкий диапазон температур, где напряжение пробоя практически постоянно. Практическое совпадение расчетных и экспериментальных данных говорит о достоверной оценке пространственного распределения ловушек на интерфейсе. Проанализирована возможность восстановления уровня напряжения пробоя после длительного периода покоя. Предпосылками продления срока эксплуатации устройства за счет практически полного восстановления электро-физических характеристик является то, последующие включения могут иметь следующие свойства — более быстрое восстановление и несколько меньшую деградацию. Результаты исследований могут служить основой для разработки прогностической методики оценки способности продления срока службы транзистора и схемы в целом с учетом устранения повреждений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (Проведение фундаментальных научных исследований (47 ГП)) по теме «1023032900380-3-1.2.1 Фундаментальные и прикладные исследования в области литографических пределов полупроводниковых технологий и физико-химических процессов травления 3D нанометровых диэлектрических структур для развития критических технологий производства ЭКБ. Исследование и построение моделей и конструкций элементов микроэлектроники в расширенном диапазоне температур (от -60С до +300С). (FNEF-2024-0004)».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

У авторов нет конфликта интересов, имеющих отношение к содержанию данной рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) Interconnect, 2020 Edition. [Online] Available: <https://irds.ieee.org/editions/2020> (data access 12.02.2023).
2. de Jong M.J., Salm C., Schmitz J. Effect of Ambient on the Recovery of Hot-Carrier Degraded Devices // In Proceedings of the 2020 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), Dallas, TX, USA, 28 April–30 May 2020. P. 1–6.
3. Chuang K.H., Bury E., Degraeve R., Kaczer B., Kallstenius T., Groeseneken G., Linten D., I. Verbaauwhede I. A multi-bit/cell PUF using analog breakdown positions in CMOS // IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). 2018. 11–15 March 2018. Burlingame, CA, USA. P. PCR.2.1–PCR.2.5.
4. Nanoelectronics: Devices, Circuits and Systems. Editor by Brajesh Kumar Kaushik. Elsevier. 2018.
5. Reggiani S., Barone G., Gnani E., Gnudi A., Baccarani G., Poli S., Wise R., Chuang M.Y., Tian W., Pendharkar S., Denison M. Characterization and modeling of high-voltage LDMOS transistors in book Hot carrier degradation semiconductor devices by ed T. Grassner, 2015, Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. P. 309–340.
6. Liebmann L., Smith J., Chanemougame D., Gutwin P. CFET Design Options, Challenges, and Opportunities for 3D Integration. In Proceedings of the 2021 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA, USA, 13–15 December 2021. P. 3.1.1–3.1.4.
7. Stesmans A. Passivation of Pb0 and Pb1 interface defects in thermal (100) Si/SiO₂ with molecular hydrogen // Applied Physics Letters. 1996. V. 68. № 15. P. 2076–2078.
8. Румянцев С.В., Новоселов А.С., Масальский Н.В. Исследование эффекта самонагрева в высоковольтных КНИ транзисторах с большой областью дрейфа. Микроэлектроника. 2022. Т. 51. № 5. С. 377–385.

9. *Lundstrom M., Guo J.* Nanoscale Transistors: Device Physics, Modeling and Simulation. Springer: New York, 2006.
10. *Tang T.W., Gan H.* Two formulations of semiconductor transport equations based on spherical harmonic expansion of the Boltzmann transport equations // *IEEE Trans. Elec. Dev.* 2000. V. 47. P. 1726–1732.
11. *McMahon W., Haggag A., Hess K.* Reliability Scaling Issues for Nanoscale Devices // *IEEE Trans. Nanotech.*, 2003. V. 2. № 1. P. 33–38.
12. *Новоселов А.С., Масальский Н.В.* Влияние деградации горячих носителей на характеристики высоковольтного КНИ транзистора с большой областью дрейфа // *Микроэлектроника*. 2023 Т. 52. № 5. С. 423–430.
13. *Ragnarsson. L.A., Lundgren P.* Electrical characterization of Pb centers in (100) Si–SiO₂ structures: the influence of surface potential on passivation during post metallization anneal // *Journal of Applied Physics*. 2000. V. 88. № 2. P. 938–942.
14. *Federspiel X., Torrente G., Arfaoui W., Cacho F., Huard V.* Temperature sense effect in HCI self-heating de convolution: application to 28nm FDSOI // *IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*. 2016. P. XT-09–1–XT-09–4.
15. *Hot-Carrier Degradation*, ed. By T. Grasser, Springer, Wien, New York, 2015.
16. *Brower K.L.* Dissociation kinetics of hydrogen-passivated (111) Si–SiO₂ interface defects // *Physical Review B*. 1990. V. 42. № 6. P. 3444–3454.
17. *Brower K.L.* Kinetics of H₂ passivation of Pb centers at the (111) Si–SiO₂ interface // *Physical Review B*. 1988. V. 38. № 14. P. 9657–9664.
18. *Rashkeev S., Ventra M., Pantelides S.* Hydrogen passivation and activation of oxygen complexes in silicon // *Applied Physics Letters*. 2001. V. 78. P. 1571–1573.
19. *Grasser T.* The capture/emission time map approach to the bias temperature instability. in *Bias Temperature Instability for Devices and Circuits*. Springer, 2014, P. 447–481.
20. *Lee G.B., Kim C.K., Park J.Y., Bang T., Bae H., Kim S.Y., Ryu S.W., Choi Y.K.* A novel technique for curing hot-carrier induced damage by utilizing the forward current of the PN-junction in a MOSFET // *IEEE Electron Device Letters*. 2017. V. 38. № 8. P. 1012–1014.
21. *de Jong M., Salm C., Schmitz J.* Towards understanding recovery of hot-carrier induced degradation. *Microelectronics Reliability*. 2018. V. 88. P. 147–151.
22. *Edwards A.H.* Interaction of H and H₂ with the silicon dangling orbital at the <111> Si/SiO₂ interface // *Physical Review B*. 1991. V. 44. № 4. P. 1832–1838.
23. *Guerin C., Huard V., Bravaix A.* General Framework about Defect Creation at the Si/SiO₂ Interface // *J. Appl. Phys.* 2009. V. 105. P. 114513–1–114513–12.
24. *McMahon W., Matsuda K., Lee J., Hess K., Lyding J.* The Effects of a Multiple Carrier Model of Interface States Generation of Lifetime Extraction for MOSFETs. in *Proc. Int. Conf. Mod. Sim. Micro*. 2002. V. 1. P. 576–579.
25. *Fischetti M.V., Vandenbergh W.G.* Advanced Physics of Electron Transport in Semiconductors and Nanostructures, New York, U.S.A.: Springer, 2016.
26. *Reggiani S., Barone G., Poli S., Gnani E., Gnudi A., Baccarani G., Chuang M.Y., Tian W., Wise R.* TCAD simulation of hot-carrier and thermal degradation in STI–LDMOS transistors // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2013. V. 60. № 2. P. 691–698.

TEMPERATURE DEPENDENCES OF THE BREAKDOWN VOLTAGE OF A HIGH-VOLTAGE LDMOS TRANSISTOR

© 2024 A. S. Novoselov¹, M. R. Gusev¹, N. V. Masalsky¹

¹ Federal State Institution Federal Scientific Center Scientific Research
Institute of System Research of the Russian Academy of Sciences

*E-mail: volkov@niisi.ras.ru

The results of a study of the temperature dependences of the breakdown voltage of high-power nLDMOS transistors with a long drift region with topological norms of 0.5 microns are discussed. The main attention is focused on the effect of the mechanism of generation and passivation of traps at the Si/SiO₂ interface in strong electric fields. The dependence of the breakdown voltage in the ambient temperature range from –60 °C to 300 °C has been experimentally and theoretically analyzed and the temperature range from 25 °C to 220 °C, where the breakdown voltage is almost constant, has been determined. The possibility of restoring the breakdown voltage level after a long period of rest is considered, which is a prerequisite for extending the life of the device.

Keywords: silicon-on-insulator technology, powerful LDMOS, temperature dependence of breakdown voltage, degradation of hot carriers, modeling, testing

REFERENCES

1. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) Interconnect, 2020 Edition. [Online] Available: <https://irds.ieee.org/editions/2020> (data access 12.02.2023)
2. *de Jong M.J., Salm C., Schmitz J.* Effect of Ambient on the Recovery of Hot-Carrier Degraded Devices // In Proceedings of the 2020 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), Dallas, TX, USA, 28 April–30 May 2020, P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IRPS45951.2020.9129540>.
3. *Chuang K.H., Bury E., Degraeve R., Kaczer B., Kallstenius T., Groeseneken G., Linten D., I. Verbaauwhede I.* A multi-bit/cell PUF using analog breakdown positions in CMOS // IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). 2018. 11–15 March 2018. Burlingame, CA, USA. P. PCR.2.1–PCR.2.5. <https://doi.org/10.1109/IRPS.2018.8353655>.
4. Nanoelectronics: Devices, Circuits and Systems. Editor by Brajesh Kumar Kaushik. Elsevier. 2018. ISBN: 978-0128133538.
5. *Reggiani S., Barone G., Gnani E., Gnudi A., Baccarani G., Poli S., Wise R., Chuang M.Y., Tian W., Pendharkar S., Denison M.* Characterization and modeling of high-voltage LDMOS transistors in book Hot carrier degradation semiconductor devices by ed T. Grasser, 2015, Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. P. 309–340. ISBN: 978-3319089935.
6. *Liebmann L., Smith J., Chanemougame D., Gutwin P.* CFET Design Options, Challenges, and Opportunities for 3D Integration. In Proceedings of the 2021 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA, USA, 13–15 December 2021. P. 3.1.1–3.1.4. <https://doi.org/10.1109/IEDM19574.2021.9720577>.
7. *Stesmans A.* Passivation of Pb0 and Pb1 interface defects in thermal (100) Si/SiO₂ with molecular hydrogen // Applied Physics Letters. 1996. V. 68. № 15. P. 2076–2078. <https://doi.org/10.1063/1.116308>.
8. *Rumyantsev S.V., Novoselov A.S., Masalsky N.V.* Study of the effect of self-heating in high-voltage SOI transistor with a large drift region // Russian Microelectronics. 2022. V. 51. № 5. P. 325–333. <https://doi.org/10.1134/S1063739722050080>
9. *Lundstrom M., Guo J.* Nanoscale Transistors: Device Physics, Modeling and Simulation. Springer: New York, 2006, ISBN: 978-0387280028.
10. *Tang T.W., Gan H.* Two formulations of semiconductor transport equations based on spherical harmonic expansion of the Boltzmann transport equations // IEEE Trans. Elec. Dev. 2000. V. 47. P. 1726–1732. <https://doi.org/10.1109/16.861583>.
11. *McMahon W., Haggag A., Hess K.* Reliability Scaling Issues for Nanoscale Devices // IEEE Trans. Nanotech., 2003. V. 2. № 1. P. 33–38. <https://doi.org/10.1109/TNANO.2003.808515>.
12. *Novoselov A.S., Masalsky N.V.* Influence of hot carrier degradation on the characteristics of a high-voltage SOI transistor with a large drift region // Russian Microelectronics. 2023. V. 52. № 5. P. 411–418. <https://doi.org/10.1134/s1063739723700580>.
13. *Ragnarsson L.A., Lundgren P.* Electrical characterization of Pb centers in (100) Si–SiO₂ structures: the influence of surface potential on passivation during post metallization anneal // Journal of Applied Physics. 2000. V. 88. № 2. P. 938–942. <https://doi.org/10.1063/1.373759>.
14. *Federspiel X., Torrente G., Arfaoui W., Cacho F., Huard V.* Temperature sense effect in HCI self-heating deconvolution: application to 28nm FDSOI // IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). 2016. P. XT–09–1–XT–09–4. <https://doi.org/10.1109/IRPS.2016.7574651>.
15. Hot-Carrier Degradation, ed. By T. Grasser, Springer, Wien, New York, 2015, ISBN: 978-3319089935.
16. *Brower K.L.* Dissociation kinetics of hydrogen-passivated (111) Si–SiO₂ interface defects // Physical Review B. 1990. V. 42. № 6. P. 3444–3454. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.42.3444>.
17. *Brower K.L.* Kinetics of H₂ passivation of Pb centers at the (111) Si–SiO₂ interface // Physical Review B. 1988. V. 38. № 14. P. 9657–9664. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.38.9657>.
18. *Rashkeev S., Ventra M., Pantelides S.* Hydrogen passivation and activation of oxygen complexes in silicon // Applied Physics Letters. 2001. V. 78. P. 1571–1573. <https://doi.org/10.1063/1.1355297>.
19. *Grasser T.* The capture/emission time map approach to the bias temperature instability. in Bias Temperature Instability for Devices and Circuits. Springer, 2014, P. 447–481, ISBN: 978-1461479086.
20. *Lee G.B., Kim C.K., Park J.Y., Bang T., Bae H., Kim S.Y., Ryu S.W., Choi Y.K.* A novel technique for curing hot-carrier induced damage by utilizing the forward current of the PN-junction in a MOSFET // IEEE Electron Device Letters. 2017. V. 38. № 8. P. 1012–1014. <https://doi.org/10.1109/LED.2017.2718583>.
21. *de Jong M.J., Salm C., Schmitz J.* Towards understanding recovery of hot-carrier induced degradation. Microelectronics Reliability. 2018. V. 88. P. 147–151, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.07.057>.
22. *Edwards A. H.* Interaction of H and H₂ with the silicon dangling orbital at the <111> Si/SiO₂ interface // Physical Review B. 1991. V. 44. № 4. P. 1832–1838. <https://doi.org/10.1103/physrevb.44.1832>.
23. *Guerin C., Huard V., Bravaix A.* General Framework about Defect Creation at the Si/SiO₂ Interface // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 114 513–1–114 513–12. <https://doi.org/10.1063/1.3133096>.
24. *McMahon W., Matsuda K., Lee J., Hess K., Lyding J.* The Effects of a Multiple Carrier Model of Interface States Generation of Lifetime Extraction for MOSFETs.

- in Proc. Int. Conf. Mod. Sim. Micro. 2002. V. 1. P. 576–579.
25. *Fischetti M.V., Vandenberghe W.G.* Advanced Physics of Electron Transport in Semiconductors and Nanostructures, New York, U.S.A.: Springer, 2016, ISBN: 978-319011004.
26. *Reggiani S., Barone G., Poli S., Gnani E., Gnudi A., Baccarani G., Chuang M.Y., Tian W., Wise R.* TCAD simulation of hot-carrier and thermal degradation in STI-LDMOS transistors // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. V. 60. № 2. P. 691–698.
<https://doi.org/10.1109/ted.2012.2227321>.

ПОЛУЧЕНИЕ ГРАФЕНА: ОСАЖДЕНИЕ И ОТЖИГ

© 2024 г. Е.Г. Шустин^{1,*}¹ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал

*E-mail: shustin2005@ya.ru

Поступила в редакцию 23 апреля 2024 г.

После доработки 10 июня 2024 г.

Принята к публикации 10 июня 2024 г.

Обзор посвящен анализу роли высокотемпературного отжига в технологиях получения графеновых пленок и создания структур для нанoeлектроники на их основе. Как известно, один из способов получения графена – высокотемпературный отжиг монокристаллов Si C. Этот метод позволяет получать высококачественные графеновые пленки, но существенными недостатками этого метода являются высокая температура отжига и малые размеры монокристаллических доменов получаемого графена. Все более широкое распространение получает способ получения графена путем отжига структур с твердыми углеродными слоями, нанесенными на пленку никеля на диэлектрической подложке, с последующим удалением никеля химическим травлением. Отжиг графеновых пленок, независимо от способа их получения, является средством очистки поверхности графена от адсорбированных загрязнений и улучшения его кристаллической структуры. Выявлено, что отжиг может приводить к разным результатам для изолированных графеновых пленок и для графеновых структур, предназначенных для применения в устройствах нанoeлектроники.

Ключевые слова: нанoeлектроника, двумерные материалы, технология производства, графен

DOI: 10.31857/S0544126924050102

1. ВВЕДЕНИЕ

Сразу после открытия возможности получения графена в виде стабильной структуры и получения его первых образцов [1, 2] в мировом научном сообществе начался поиск воспроизводимых методов массового производства структурно совершенных монокристаллических графеновых пленок, пригодных для создания электронных устройств. Графен привлекает внимание как материал для следующего поколения приборов нанoeлектроники и фотоники из-за его уникальных электронных и оптических свойств: высокая подвижность электронов, на порядок превышающая достижимые значения всех полупроводников, высокая теплопроводность, оптическая прозрачность. Как хорошо известно, электронные свойства графеновых пленок зависят от количества графеновых слоев, от плотности структурных дефектов, а также от контакта графеновой пленки с подложкой и проводниками.

Для синтеза графена наиболее распространены два основных метода: высокотемпературный отжиг монокристаллов SiC, при котором с поверхности кристалла испаряется кремний и формируется на нем решетка графена; и метод CVD (химическое осаждение из паровой фазы), который заключается в формировании пленок графена на подложках из переходных металлов с константой кристалли-

ческой решетки, наиболее близкой к константе графена (2,46 Å).

Здесь нет необходимости описывать свойства графена: подробную информацию о его свойствах и способах его получения можно найти в многих обзорах (см., например, [3–6]). В [6] представлены предприятия, которые уже производят графен для промышленного применения в многих областях техники: солнечной энергетике, терморегулировании, в биологических приложениях и других областях. Пока такие пленки не могут быть использованы в промышленной электронике, но уже используются в качестве защитных покрытий и как прозрачные электроды для солнечных батарей. Однако все разработанные пленки имеют размеры кристаллитов, не превышающие 1 мкм, хотя опытные образцы таких приборов демонстрируют их уникальные свойства и параметры.

Наноразмерные графитовые пленки получили названия: однослойный графен (single-layer graphene – SLG), двухслойный графен (bi-layer graphene – BLG) и многослойный графен (few-layer graphene – FLG). Применение SLG в электронных устройствах вряд ли возможно из-за отсутствия запрещенной зоны. По сравнению с SLG, BLG не только обладает большинством преимуществ, но и имеет свои особенности [7, 8]. Запрещенная зона

BLG легко открывается, что имеет большое значение для практического использования. В последние годы были обнаружены сверхпроводниковые свойства BLG [9].

2. ГРАФЕН НА SiC

Одним из самых популярных методов выращивания графена является отжиг монокристалла SiC [10]. Высокотемпературный отжиг монокристаллов SiC после испарения кремния с поверхности кристалла приводит к образованию решетки графена на поверхности кристалла SiC. Обе поверхности кристалла (Si (0001) и C (0001)) при отжиге при высоких температурах (> 1000 °C) в сверхвысоком вакууме, графитизируются при испарении Si.

Следуя [10–12], укажем, что получение графена на SiC привлекательно тем, что этот материал является признанной подложкой для высокочастотной электроники, светоизлучающих устройств и радиационно-стойких устройств. Однако очень большое несоответствие постоянных решетки SiC (3,073 Å) и графена приводит к чрезмерному натяжению пленки и, как следствие, к дефектам ее структуры. Недостатком этой технологии является также стоимость пластин SiC и их меньший размер (обычно не более 4 дюймов) по сравнению с пластинами Si. Один из подходов к снижению стоимости подложки — это выращивание тонких слоев SiC на сапфире с последующим термическим разложением для получения FLG. Другой подход состоит в выращивании SiC на кремнии, но SiC на кремнии обычно имеет кубическую форму, что затрудняет получение непрерывного высококачественного графена из-за искривления и растрескиванию.

Обе поверхности (Si(0001) и C(0001)) при высокотемпературном отжиге (> 1000 °C) в сверхвысоком вакууме преобразуются в графит из-за испарения кремния. В [13] был выращен однослойный графен (SLG) синтезированный на поверхности эпитаксиальных пленок монокристаллического кубического карбида кремния, предварительно выращенных на пластинах Si(001) с доменами ~ 100 мкм². Однако этот размер, вероятно, является пределом для структурно совершенных графеновых пленок при производстве этим способом.

3. МЕТОД CVD И PECVD СИНТЕЗА

Химическое осаждение из газовой фазы (CVD) — один из наиболее часто используемых методов крупномасштабного промышленного производства тонких полупроводниковых материалов. Этот метод также является одним из основных методов получения графеновых пленок. Было приложено очень много усилий для выращивания графена большой площади (масштаба сантиметров) с использованием различных углеводородных предшественников, с применением

различных металлов в качестве подложек. На этих подложках были созданы пленки SLG и FLG.

Теме CVD и PECVD синтеза графена посвящено много обзоров, поэтому здесь мы освещаем это направление достаточно кратко.

Первая статья о пленках графена, синтезированных методом химического осаждения из газовой фазы (CVD), была опубликована в 2006 г. [14]. В этой работе для синтеза графена на никелевых фольгах использовался природный, экологически чистый и недорогой источник углерода — камфора. В процессе синтеза графена на никелевых фольгах использовалась газовая смесь H_2 и CH_4 . Полученные пленки графена были успешно перенесены на гибкую прозрачную подложку из полидиметилсилоксана, не меняя их свойств и показав 80% прозрачности в видимом спектре. При дальнейших исследованиях графен был синтезирован методом CVD на медной фольге с площадью 1 см² [15]. Позже в работе [16] сообщалось о формировании от трех до четырех слоев графена на поликристаллической никелевой фольге толщиной 500 мкм. Полученные в этих работах пленки были сильно дефектными как по структуре, так и по морфологии (с множественными складками и неоднородные по толщине). Однако эти работы открыли путь к синтезу графеновых пленок, который стал основным в последующие несколько лет.

Затем была разработана технология отделения этих пленок от металла и переноса их на диэлектрическую подложку при помощи связующей пленки полиметилметакрилата (ПММА) и химического вытравливания металлической подложки.

В качестве подложек использовались различные переходные металлы, наибольшее распространение получили никель, медь и кобальт. Графен переносился на различные диэлектрические подложки, что позволяло применять их в различных областях. A. Reina et al. [17] сообщили о масштабируемом и дешевом способе изготовления крупномасштабных ($\sim$ см²) однослойных или многослойных графеновых пленок методом CVD и переноса пленок на подложки. Количество слоев графена варьировалось от 1 до 12. Однослойные или двухслойные кристаллиты могли иметь поперечный размер до 1 мкм. После них были успешно приготовлены более крупномасштабные BLG [18–20] с площадью более 5×5 см² с двухслойным покрытием более 99%. В последующих многочисленных сообщениях размер графена был увеличен, вплоть до пленок площадью в кв. метры, полученных методом «roll to roll» [21]. Такие пленки создавались для использования в качестве прозрачных электродов и по своим электрофизическим параметрам не пригодны для использования в электронных приборах.

Графен осаждается при высокотемпературном ($T > 800$ °C) крекинге углеродсодержащих газов, в большинстве работ метана CH_4 , в смеси с водородом и часто с аргоном. Утверждалось, что концентрация водорода критически влияет на качество

получаемой пленки, однако анализ режимов синтеза показывает, что в успешных экспериментах по синтезу графена соотношение концентраций $H:CH_4$ варьировалось от 11:1 до 1:4 (см. табл. 1 из [22], источники данных представлены в этой статье).

Существенное различие между никелем и медью и другими переходными металлами заключается в заметной растворимости углерода в никеле (~0,6% при 1300 °C) и практическом отсутствии растворимости в меди и других металлах. Следовательно, механизм образования графена на этих металлах различен. На медных подложках графеновая пленка образуется при осаждении углерода в виде атомов, ионов и радикалов CH_x на поверхности подложки. На никеле происходит частичное растворение углерода в объеме металла с последующей его сегрегацией на поверхности при охлаждении подложки.

Толщина пленки зависит от растворимости углерода в этом металле, температуры, при которой углерод вводится, и скорости охлаждения. Поэтому для процесса CVD на никель весьма существенными являются толщина металла, времена нагрева и остывания подложки.

Последние достижения в выращивании графена с помощью термического CVD подтвердили воспроизводимость синтеза поликристаллического графена

на подложке сантиметрового масштаба и возможность успешного переноса на многие другие подложки, включая Si и SiO_2 . Эти разработки открывают новые возможности для применения графена в фотоэлектрической и гибкой электронике. Однако в ближайшем будущем необходимо решить вопрос эффективного управления количеством атомных слоев и их структурной однородностью, чтобы определить перспективы реальных применений.

Снижение температуры роста важно для большинства применений, особенно при рассмотрении процесса создания дополнительных металлооксидных полупроводниковых устройств (CMOS). Одним из наиболее распространенных и недорогих методов производства является технология плазмохимического осаждения из паровой фазы (PECVD) (см., например, [23]). Создание плазмы реагирующих газов позволяет осаждение при более низкой температуре подложки по сравнению с термическим CVD. Использование плазмы для уменьшения температуры во время роста и осаждения широко использовалось при выращивании графена. Методы PECVD применялись для выращивания графена при температуре подложки до 500 °C, что более приемлемо для крупномасштабного промышленного применения. В системах PECVD используется дуговая, высокочастотная

Таблица 1.

Характеристики процесса	Соотношение углеводорода и других компонентов ratio	Температура °C	Давление	Параметры результата
Тонкий графит на Ni	$H_2:CH_4$ 92:8	950	40–80 мТорр	Слой толщиной 1–2 нм DC
Графен на поликристаллическом никеле	$CH_4:H_2:Ar$: 0.15:1:2	1000	1 атм	3–4 –слойный графенг
Графен на никеле	$CH_4:H_2:Ar$: 550:65:200	1000	—	Поликристаллический графит большой площади
Графен на никеле с последующим травлением никеля	Поток Ar и H_2 в течение 10–20 мин.	900–1000		
Графен на MgO	$CH_4:Ar$: 1:4	1000	40 мТорр	5-слойный графит
Графен на меди	Поток смеси газов со скоростью 20–35 cm^3/c	1000	40–500 мТорр	Одно-, двух- и трехслойный графен
Графен на медной фольге большой площади	$H_2:CH_4$: 1:4	1000		
Roll-to-roll графен на гибкой подложке	Отжиг пленки Cu в среде $CH_4:H_2$ (3:1)	1000	90–460 мТорр	

и микроволновая плазма. Нижний предел температуры синтеза определяется значением $\sim 480^\circ\text{C}$, при котором образование поверхностного карбида преобладает над ростом графена.

В процессе в качестве подложек использовались Si, Ni, W, Mo и некоторые другие металлы. Плазмообразующая среда — $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$.

Поскольку эмиссия из плазмы высокоэнергичных ионов и УФ излучения может внести радиационные повреждения структуры пленки, необходимо разработать оборудование и выбрать режимы процесса, которые минимизируют это повреждение. С этой точки зрения наибольший интерес представляют технологии с удаленной плазмой, в которых область генерации плазмы (обычно УВЧ-разряд) отделена от реакционной камеры.

Однако все описанные выше достижения привели к получению пленок поликристаллического графена с размером кристаллитов не более 1 мкм (см., например, [21–27]). Для массового производства нанoeлектронных устройств, нужны, конечно, монокристаллические пленки с размерами порядка используемых в настоящее время подложек размером по крайней мере в несколько сантиметров и с минимальной плотностью структурных дефектов. Основными препятствиями на этом пути являются большое несоответствие постоянных решетки решетке графена в металлах с малой растворимостью углерода (Cu и др.) и относительно высокая растворимость углерода в никеле, которая препятствует получению однородной по толщине пленки графена. Двойниковая природа монокристаллических пленок никеля на сапфире (кристаллическая форма Al_2O_3), полученных гетероэпитаксиальным синтезом, также ограничивает размер монокристаллических доменов.

4. ОТЖИГ

Впервые метод синтеза однослойного эпитаксиального графена путем отжига структур с твердыми источниками углерода на диэлектрических подложках, покрытых металлической пленкой, был применен в [30]. Этот подход открыл новый путь для производства графена и получил широкое распространение. В этом методе твердый источник углерода осаждается между слоями никеля и изолирующими подложками или над ними, и эта структура подвергается отжигу при температурах от 500°C до 1000°C . Углерод диффундирует в пленку никеля, и при охлаждении на верхней и нижней поверхности никеля образуется однослойный или двухслойный графен, приобретая кристаллическую структуру на матрице Ni. После травливания никеля непосредственно на подложке получается графен.

В [29–30] в качестве подложки использовался SiO_2 , поэтому с помощью такой технологии можно было получить только поликристаллический графен.

Информацию о получении графена путем отжига металлических пленок с твердыми источниками углерода можно также найти в [31–36], где эксперименты показали образование графена за счет диффузии углерода из твердого или газового источника через Ni или другие металлы. Однако во всех этих работах в качестве матриц использовались поликристаллические металлические пленки, препятствующие созданию монокристаллического графена.

В [37, 38] продемонстрированы результаты получения высокосовершенного монокристаллического графена. Однако в первой из этих работ использовался очень сложный способ, а во втором в качестве подложки был использован массивный монокристалл никеля. Таким образом, предложенные здесь методы вряд ли будут могут быть использованы в промышленном производстве.

Монокристаллические пленки графена были получены в [39]. Однослойный графен сантиметрового масштаба был получен на поверхности никеля, нанесенного на подложку из высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ). В этой статье было продемонстрировано, как оптимизация времени и температуры отжига обеспечивает точный контроль толщины и структуры графенового слоя.

Этот путь был применен в работе автора обзора с соавторами [40]. Мы подтвердили возможность получения графена таким способом. В этой работе на пластины ВОПГ был нанесен слой никеля толщиной 60 нм с относительно высоким совершенством кристаллической структуры (полуширина кривой качания менее 0,3). Если в [39] отжиг проводился в течение 6–30 ч при $600\text{--}900^\circ\text{C}$, то нами отжиг в аргоне проводился при температуре 600°C . После предварительного отжига в водороде для восстановления пленки естественного оксида на поверхности никеля отжиг проводят с добавлением водорода. Отжиг структуры приводит к образованию графитовой пленки на поверхности никеля. При времени отжига 1 ч мы обнаружили рамановский спектр аморфного углерода (а-В); при времени отжига от 2 до 4 ч спектр представляет собой суперпозицию графеновых пиков и непрерывного спектра, типичного для аморфного углерода. При повторном отжиге образцов при температуре 500°C пленка трансформировалась в структурно совершенный графит (рис. 1). Таким образом, в данной работе установлено, что структура тонких пленок графита, полученных в результате отжига, может быть улучшена путем последовательных сеансов отжига.

Режимы отжига этих экспериментов были использованы в работе [41]. Сначала на структуру (0001) $\text{Al}_2\text{O}_3/(111)\text{ Ni}$ в разряде полого катода наносилась пленка алмазоподобного углерода (DLC) или монокристаллического графита толщиной 60–100 нм [42]. При отжиге при температурах от 600 до 800°C диффузия углерода через пленку никеля приводит к образованию графитовой пленки из 4–10 атомных

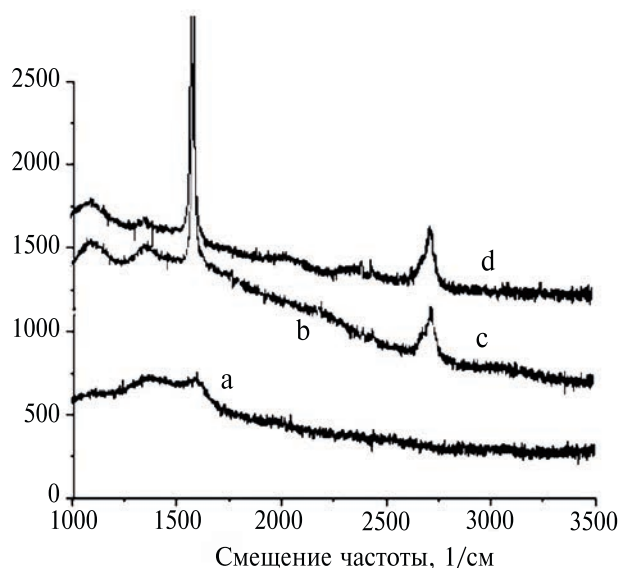


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния на структуре $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ВОПГ}$.

слоев с достаточно низкой плотностью дефектов на границе раздела никель-сапфир. Мы также наблюдаем превращение нанесенной ДЛС-пленки на верхней плоскости пленки никеля в дефектный слой графита. При удалении никеля мокрым травлением на слое сапфира образуется графитовая пленка, а другая графитовая пленка всплывает и может быть перенесена на любую подложку. Как и в [39], повторные сеансы отжига улучшают структуру полученных таким образом пленок (см. рис. 2). Таким образом, эффективность и перспективность способа получения структурно совершенных графеновых пленок на диэлектрических подложках путем отжига структур с твердыми источниками углерода доказана достаточно убедительно.

5. PECVD + ОТЖИГ

Отжиг графена, независимо от способа его получения, является мощным средством воздействия на его кристаллическую структуру и, как следствие, из-

менения электрофизических свойств образцов на его основе. Например, мы укажем здесь на статью [43], где отжиг графена, полученного механическим расщеплением высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ) с последующим его утонением с помощью плазменного травления, применяется для самовосстановления дефектов решетки, вызванных эффектом ионной бомбардировки. Показано, что отжиг графена в смеси H_2 и Ar при $T = 250\text{--}750^\circ\text{C}$ приводит к очистке поверхности графена от адсорбированных загрязнений и к модификации температурной зависимости сопротивления.

В [44] применен отжиг для уменьшения дефектов в графене, изготовленном методом CVD и перенесенном на подложку Si/SiO_2 . Мы отжигали образцы CVD при пяти различных температурах в N_2 в течение 30 с. Рамановская спектроскопия показывает, что дефекты можно уменьшить в диапазоне от 200 до 600°C . Атомно-силовая микроскопия (АСМ) также показывает, что гораздо более гладкая поверхность может быть достигнута при температуре ниже 600°C . Когда температура отжига превышает 800°C , среднее расстояние углерод-углерод увеличивается с ростом температуры. Это приведет к увеличению гофрирования, что является одним из видов дефектов. Тепловое расширение, вызванное высокой температурой, также повредит структуру решетки графена и, следовательно, приведет к еще большим нарушениям.

В [43–45] проводится сравнительное исследование структурных и электронных изменений графена для графена после выращивания графена со структурой в форме микропята. В то время как выращенный графен, нагретый на воздухе или Ar , почти не подвергался структурным изменениям, графен с микропятами демонстрировал сильное уширение пиков G и 2D. Различное поведение нагретого графена с микропятами означает, что с графеновыми устройствами следует обращаться иначе, чем с однородным выращенным графеном.

В [46] изучено влияние высокотемпературного отжига на графен и контакты никель – графен. Авторы обнаружили, что при отжиге образца графена выше 600°C контакт никель-графен начал разрушаться, а графен выдерживал и более высокие температуры процесса.



Рис. 2. Схема получения графена методом отжига.

В статье [47] представлен новый метод формирования графеновых нанолент с использованием нанопроволок никеля в качестве шаблона. Модификация электрохимической процедуры синтеза нанопроволок никеля была внесена путем внедрения квантовых точек графена в качестве источника углерода. Таким образом были получены нанопроволоки никеля с квантовыми точками графена. Эти проволоки подвергались быстрому термическому отжигу при температурах 500–800 °С. Во время этого процесса атомы углерода растворяются в металле и осаждаются на поверхности никеля, образуя нанопроволоки никель-углерод. После травления никеля были получены графеновые наноленты со средней шириной 32 нм и средней длиной 4 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном обзоре автор пытается показать, что отжиг как технологическая процедура является универсальным инструментом для получения наноразмерных пленок графена и модификации свойств пленок и структур на их основе. Отжиг структуры $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}/\text{C}$ не только конкурентоспособен для получения структурно совершенных монокристаллических пленок графена, но и имеет очевидные преимущества — принципиальную возможность получения однородных по площади пленок на диэлектрической подложке. Широкие возможности открывает отжиг пленок и структур с графеном для управления их электрофизическими и теплофизическими параметрами. Экспериментатору следует иметь в виду, что свойства изолированного графена и структур на его основе могут существенно различаться после отжига.

Несмотря на продолжающийся поток публикаций по исследованию и применениям графена, включая последние обзоры [50–52], до сих пор не описан способ получения структурно совершенного графена с размерами пленки, приемлемыми для применения в полупроводниковой электронике. Это связано прежде всего с тем, что не найден способ синтеза монокристаллической подложки переходного металла с постоянной решеткой, близкой к постоянной решетке графита. Наиболее подходящим для этой задачи металлом является никель, однако пока нет способа получить пленки никеля с бездвойниковой кристаллической структурой. Эта задача на настоящий момент представляется наиболее актуальной.

Во всех обзорах по графену не рассматривается метод отжига структуры с твердым углеродсодержащим материалом. Настоящий обзор заполняет этот пробел.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит своих коллег и соавторов статей [40–42] Д. В. Колодко, Е. Н. Миргородскую, В. А. Лузанова, И. А. Сорокина, М. П. Темирязеву, участие которых в совместной работе легло в основу настоящего обзора.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*. 2004. V. 306. P. 666–669.
2. *Geim A.K., Novoselov K.S.* The rise of graphene. *Nat Mater*. 2007. V. 6(3). P. 183–191.
3. *Randviir E.P., Brownson D.A.C., Banks C.E.* A decade of graphene research: production, applications and outlook. *Materials Today*. 2014. V. 17(9). P. 426–432.
4. *Bhuyan S.A., Uddin N., Islam M. et al.* Synthesis of graphene. *Int. Nano Let.* 20. V. 6. P. 65–83.
5. *Lee H.C., Liu W.W., Chai S.P. et al.* Review of the synthesis, transfer, characterization and grow mechanisms of single and multilayer graphene. *RSC Adv*. 2017. V. 7. 15644.
6. *Zhu Y., Ji H., Cheng H.M., Ruoff R.S.* Mass production and industrial applications of graphene materials. *National Science Review*. 2018. V. 5. P. 90–101.
7. *Huang Y., Li X., Cui H., Zhou Z.* Bi-layer graphene: structure, properties, preparation and prospects. *Current Graphene Science*. 2018. V. 2. P. 97–105.
8. *Ohta T., Bostwick A., Seyller T., et al.* Controlling the electronic structure of bilayer graphene. *Science* 2006. V. 313(5789) P. 951–954.
9. *Cao Y., Fatemi V., Fang S., et al.* Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. *Nature*. 2018. V. 556(7699) P. 43–50.
10. *Hass J., de Heer W.A., Conrad E.H.* The growth and morphology of epitaxial multilayer graphene, *J. Phys. Cond. Matter*. 2008. V. 20323202
11. *Emtsev K.V., Bostwick A., Horn K., et al.* Towards wafer-size graphene layers by atmospheric pressure graphitization of silicon carbide. *Nat. Mater*. 2009. V. 8 (3) P. 203–207.
12. *Landois P., Wang T., Nachawaty A., et al.* Growth of low doped monolayer gra/phene on SiC(0001) via sublimation at low argon pressure *Phys Chem Chem Phys* 2017. V. 19(24) P. 15833–15841.
13. *Аристов В.Ю., Чайка А.Н., Молодцова О.В. и др.* Наноструктурированный графен на SiC/Si(001): атомная и электронная структура, магнитные и транспортные свойства (Миниобзор). *Письма в ЖЭТФ*. 2021. T113(3), С. 189–209.
14. *Somani P.R., Somani S.P., Umeno M.* Planer nanographenes from camphor by CVD. *Chemical Physics Letters*. 2006. V. 430 P. 56–59.
15. *Obraztsov A.N., Obraztsova E.A., Tyurnina A.V., Zolotukhin A.A.* Chemical vapor deposition of thin

- graphite films of nanometer thickness. *Carbon*. 2007. V. 45 P. 2017–2022.
16. Yu Q., Lian J., Siriponglert S., et al. Graphene segregated on Ni surfaces and transferred to insulators. *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 93. 113103.
 17. Reina S., Thiele S., Jia X., et al. Growth of large-area single- and bi-layer graphene by controlled carbon precipitation on polycrystalline Ni surfaces. *Nano Res.* 2009. V. 2. P. 509–516.
 18. Sun Z., Raji A.R., Zhu Y., et al. Large-area Bernal-stacked bi-, tree- and tetralayer graphene. *ACS Nano*. 2012. V. 6(11) P. 9790–9796.
 19. Liu L., Zhou H., Cheng R., et al. High-yield chemical vapor deposition growth of high-quality large-area AB-stacked bilayer graphene. *ACS Nano*. 2012. V. 6(9) P. 8241–8249.
 20. Yan K., Peng H., Zhou Y., et al. Formation of bilayer Bernal graphene: Layer-by-layer epitaxy via chemical vapor deposition. *Nano Lett.* 2011. V. 11(3). P. 1106–1110.
 21. Bae S., Kim H., Lee Y., et al. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. *Nature Nanotechnology*. 2010. V. 5. P. 574–578.
 22. Bhutan S.A., Uddin N., Islam M., et al. Synthesis of graphene. *Int. Nano Lett.* 2016. V. 6. P. 65–83.
 23. Nandamuri G., Roumimov S., Solanki R. Remote plasma assisted growth of graphene films. *Applied Physics Letters*. 2010. V. 96. 54101.
 24. Kim J., Ishihara M., Koga Y., et al. Low-temperature synthesis of large-area graphene-based transparent conductive films using surface wave plasma chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters*, 2011. V. 98. 091502.
 25. Chan S.H., Chens S.H., Lin W.T., et al. Low-temperature remote plasma-enhanced atomic layer deposition of graphene and characterization of its atomic-level structure. *Nanoscale Research Letters*. 2013. V. 8. P. 285–289.
 26. Kuo C., Chen S., Ji H.; et al. Millimeter-size single-crystal graphene by suppressing evaporative loss of Cu during low pressure chemical vapor deposition. *Adv. Mater.* 2013. V. 25. P. 2062–2065.
 27. Zhang Y., Ren W., Jiang Z., et al. Low-temperature remote plasma-enhanced atomic layer deposition of graphene and characterization of its atomic-level structure. *J. Mater. Chem.* 2014. V. 2. P. 7570–7574.
 28. Mishra N., Forti S., Fabbri F., et al. Wafer-Scale Synthesis of Graphene on Sapphire: Toward Fab-Compatible Graphene. *Small*. 2019. V 151904906.
 29. Peng Z., Yan Z., Yao J., et al. Growth of graphene from solid carbon sources. *Nature*. 2010. V. 468. P. 549–552.
 30. Peng Z., Yan Z., Sun Z., Tour J.M. Direct growth of bilayer graphene on SiO₂ substrates by carbon diffusion through nickel. *ACS Nano*. 2011. V. 5(10). P. 8241–8247.
 31. Prekodravac J., Markovic Z.S., Jovanović S. et al. The effect of annealing temperature and time on synthesis of graphene. *Synthetic Metals*. 2015. V. 209. P. 461–467.
 32. Wang H., Zhang X., Takamatsu H. Ultraclean suspended monolayer graphene achieved by in situ current annealing. *Nanotechnology*. 2017. V. 28. 045706.
 33. Karlsson L., Birch J., Mockute A. et al. Graphene on graphene formation from PMMA residues during annealing. *Vacuum*. 2017. V. 137. P. 191–194.
 34. Zhu Z., Zhan L., Shih T., et al. Critical annealing temperature for stacking orientation of bilayer graphene. *Small*. 2018. V. 14. 1802498.
 35. Bleu Y., Bourquard F., Loir A.C., et al. Raman study of the substrate influence on graphene synthesis using a solid carbon source via rapid thermal annealing. *J Raman Spectrosc.* 2019. V. 50. P. 1630–1641.
 36. Li H., Li X., Weia J., et al. Crystalline transformation from ta-C to graphene induced by a catalytic Ni layer during annealing. *Diamond a. related materials*. 2020. V. 101. 107556.
 37. Zhizhin E.V., Pudikov D.A., Rybkin A.G. et al. *Physics of the Solid State*. 2015. V. 57(9). P. 1888–1894.
 38. Kovalenko S.L., Pavlova T.V., Andryushechkin B.V. et al. Epitaxial growth of a graphene single crystal on the Ni(111) surface. *JETP Letters*. 2017. V. 105. P. 185–188.
 39. Xu J., Fujita D., Sagisaka K., et al. Production of extended single-layer graphene. *ACS Nano*. 2011. V. 5(2). P. 1522–1528
 40. Шустин Е.Г., Исаев Н.В., Лузанов В.А., Темиряева М.П. Формирование тонких графитовых пленок при диффузии углерода через никель. *ЖТФ*. 2017. Т. 87(7) С. 1053–1056.
 41. Сорокин И.А., Колодко Д.В., Лузанов В.А., Шустин Е.Г. Получение тонких пленок графита на диэлектрической подложке с помощью гетероэпитаксиального синтеза. *Письма в ЖТФ*. 2020. Т. 46(10). С. 38–41.
 42. Сорокин И.А., Колодко Д.В., Шустин Е.Г. Синтез пленок нанокристаллического графита в разряде с полым катодом. *ЖТФ*. 2018. Т. 88(8). С. 1191–1194.
 43. Zhang L., Feng S., Xiao S., et al. Layer-controllable graphene by plasma thinning and post-annealing. *Applied Surface Science*, 2018. V. 441 P. 639–646.
 44. Shen Y.L.; Zhou P.; Wang L.H.; Sun Q.Q., et al. The annealing effect of chemical vapor deposited graphene. *IEEE10th International Conference on ASIC*. 2013.
 45. Tolochko A.V., Larionova T.V., Kozlova M.V. et al. Variation of the resistivity and chemical composition of CVD graphene under annealing in a reductive atmosphere. *Journal of Physics: Conf. Series*, 2017. V. 816. 012012.
 46. Son J., Choi M., Honga J., Yangy B. Raman study on the effects of annealing atmosphere of patterned graphene. *J. Raman Spectrosc.* 2018. V. 49. P. 183–188.
 47. Kaplas T., Jakstas V., Biciunas A., et al. Effect of High-Temperature Annealing on Graphene with Nickel Contacts, *Condens. Matter*. 2019. V. 4. P. 21–27.
 48. Park C.S. Disorder induced transition of electrical properties of graphene by thermal annealing. *Results in Physics*. 2018. V. 9. P. 1534–1536.
 49. Tosic D., Markovic Z., Jovanovic C., et al. Rapid thermal annealing of nickel-carbon nanowires for graphene nanoribbons formation, *Synthetic Metals*. 2016. V. 218. P. 43–49.
 50. Kumar N., Salehiyan R., ChaukeV. et al. Top-down synthesis of graphene: A comprehensive review. *Flat.Chem*. 2021. V. 27. 100224.
 51. Zhang F., Yang K., Liu G., Chen Y. Recent advances on graphene: Synthesis, properties and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2022. V.160. 107051.
 52. Urade A.R., Lahiri I., Suresh K.S. Graphene Properties, Synthesis and Applications: A Review. *Journal of the Minerals, Metals a. Materials Society*. 2023. V. 75(3). P. 614–630.

PRODUCING OF GRAPHENE: DEPOSITION AND ANNEALING

© 2024 E. G. Shustin^{1,*}¹ V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Fryazino branch

*E-mail: shustin2005@ya.ru

The review is devoted to the analysis of the role of high -temperature annealing as a technological procedure in technologies for obtaining graphene films and creating structures for nanoelectronics based on them. As is well known, one of the ways to obtain graphene is a high -temperature annealing of the SiC single crystals. This method allows you to obtain high quality graphene films, but the significant disadvantages of this method are the high annealing temperature, which creates serious problems of sampling pollution, and the small sizes of monocrystalline domains of the resulting graphene. The method of obtaining graphene by annealing structures with solid carbon layers deposited onto the nickel film on the dielectric substrate was widespread. In this case, graphene is obtained between a nickel film and a substrate. The annealing of graphene films, regardless of the method of their obtaining, is a means of cleaning the surface of graphene from adsorbed pollution and improving its crystalline structure. It was revealed that annealing can lead to different results for isolated graphene films and for graphene structures used in nanoelectronics devices.

Keywords: nano electronics, 2D materials, technology of production, graphene

REFERENCES

1. *Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*. 2004. V. 306. P. 666–669.
2. *Geim A.K., Novoselov K.S.* The rise of graphene. *Nat Mater*. 2007. V. 6(3). P. 183–191.
3. *Randviir E.P., Brownson D.A.C., Banks C.E.* A decade of graphene research: production, applications and outlook. *Materials Today*. 2014. V. 17(9). P. 426–432.
4. *Bhuyan S.A., Uddin N., Islam M., et al.* Synthesis of graphene. *Int. Nano Lett.* 20. V. 6. P. 65–83.
5. *Lee H. C., Liu W.W., Chai S.P. et al.* Review of the synthesis, transfer, characterization and grow mechanisms of single and multilayer graphene. *RSC Adv*. 2017. V. 7. 15644.
6. *Zhu Y., Ji H., Cheng H.M., Ruoff R.S.* Mass production and industrial applications of graphene materials. *National Science Review*. 2018. V. 5. P. 90–101.
7. *Huang Y., Li X., Cui H., Zhou Z.* Bi-layer graphene: structure, properties, preparation and prospects. *Current Graphene Science*. 2018. V. 2. P. 97–105.
8. *Ohta T., Bostwick A., Seyller T., et al.* Controlling the electronic structure of bilayer graphene. *Science* 2006. V. 313(5789) P. 951–954.
9. *Cao Y., Fatemi V., Fang S., et al.* Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. *Nature*. 2018. V.556(7699) P. 43–50.
10. *Hass J., de Heer W.A., Conrad E.H.* The growth and morphology of epitaxial multilayer graphene, *J. Phys. Cond. Matter*. 2008. V. 20 323202.
11. *Emtsev K.V., Bostwick A., Horn K., et al.* Towards wafer-size graphene layers by atmospheric pressure graphitization of silicon carbide. *Nat. Mater*. 2009. V. 8 (3). P. 203–207.
12. *Landois P., Wang T., Nachawaty A., et al.* Growth of low doped monolayer graphene on SiC(0001) via sublimation at low argon pressure *Phys Chem Chem Phys* 2017. V. 19(24) P. 15833–15841.
13. *Aristov V.Yu., Tchayka A.N., Molodtsova O.V. et al.* Nano structured graphene on SiC (Minireview) *JhETP Letts* 2021 113(3), P. 189–209.
14. *Somani P.R., Somani S.P., Umeno M.* Planer nanographenes from camphor by CVD. *Chemical Physics Letters*. 2006. V. 430 P. 56–59.
15. *Obraztsov A.N., Obraztsova E.A., Tyurnina A.V., Zolotukhin A.A.* Chemical vapor deposition of thin graphite films of nanometer thickness. *Carbon*. 2007. V. 45 P. 2017–2022.
16. *Yu Q., Lian J., Siriponglert S., et al.* Graphene segregated on Ni surfaces and transferred to insulators. *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 93. 113103.
17. *Reina S., Thiele S, Jia X., et al.* Growth of large-area single- and bi-layer graphene by controlled carbon precipitation on polycrystalline Ni surfaces. *Nano Res*. 2009. V. 2. P. 509–516.
18. *Sun Z., Raji A.R., Zhu Y., et al.* Large-area Bernal-stacked bi-, tree- and tetralayer graphene. *ACS Nano*. 2012. V. 6(11) P. 9790–9796.
19. *Liu L., Zhou H., Cheng R., et al.* High-yield chemical vapor deposition growth of high-quality large-area AB-stacked bilayer graphene. *ACS Nano*. 2012. V. 6(9). P. 8241–8249.
20. *Yan K., Peng H., Zhou Y., et al.* Formation of bilayer Bernal graphene: Layer-by-layer epitaxy via chemical vapor deposition. *Nano Lett.* 2011. V.11(3). P. 1106–1110.
21. *Bae S., Kim H., Lee Y., et al.* Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. *Nature Nanotechnology*. 2010. V. 5. P. 574–578.
22. *Bhutan S.A., Uddin N., Islam M., et al.* Synthesis of graphene. *Int. Nano Lett*. 2016. V. 6. P. 65–83.
23. *Nandamuri G., Roumimov S., Solanki R.* Remote plasma assisted growth of graphene films. *Applied Physics Letters*. 2010. V. 96. 54101.
24. *Kim J., Ishihara M., Koga Y., et al.* Low-temperature synthesis of large-area graphene-based transparent conductive films using surface wave plasma chemical

- vapor deposition. *Applied Physics Letters*, 2011. V. 98. 091502.
25. *Chan S.H., Chens S.H., Lin W.T., et al.* Low-temperature remote plasma-enhanced atomic layer deposition of graphene and characterization of its atomic-level structure. *Nanoscale Research Letters*. 2013. V. 8. P. 285–289.
 26. *Kuo C., Chen S., Ji H., et al.* Millimeter-size single-crystal graphene by suppressing evaporative loss of Cu during low pressure chemical vapor deposition. *Adv. Mater.* 2013. V. 25. P. 2062–2065.
 27. *Zhang Y., Ren W., Jiang Z., et al.* Low-temperature remote plasma-enhanced atomic layer deposition of graphene and characterization of its atomic-level structure. *J. Mater. Chem.* 2014. V. 2. P. 7570–7574.
 28. *Mishra N., Forti S., Fabbri F., et al.* Wafer-Scale Synthesis of Graphene on Sapphire: Toward Fab-Compatible Graphene. *Small*. 2019. V. 15 1904906.
 29. *Peng Z., Yan Z., Yao J., et al.* Growth of graphene from solid carbon sources. *Nature*. 2010. V. 468. P. 549–552.
 30. *Peng Z., Yan Z., Sun Z., Tour J.M.* Direct growth of bilayer graphene on SiO₂ substrates by carbon diffusion through nickel. *ACS Nano*. 2011. V. 5(10). P. 8241–8247
 31. *Prekodravac J., Markovic Z., S. Jovanović S. et al.* The effect of annealing temperature and time on synthesis of graphene. *Synthetic Metals*. 2015. V. 209. P. 461–467.
 32. *Wang H., Zhang X., Takamatsu H.* Ultraclean suspended monolayer graphene achieved by in situ current annealing. *Nanotechnology*. 2017. V. 28. 045706.
 33. *Karlsson L., Birch J., Mockute A., et al.* Graphene on graphene formation from PMMA residues during annealing. *Vacuum*. 2017. V. 137. P. 191–194.
 34. *Zhu Z., Zhan L., Shih T., et al.* Critical annealing temperature for stacking orientation of bilayer graphene. *Small*. 2018. V. 14. 1802498.
 35. *Bleu Y., Bourquard F., Loir A.C., et al.* Raman study of the substrate influence on graphene synthesis using a solid carbon source via rapid thermal annealing. *J Raman Spectrosc.* 2019. V. 50. P. 1630–1641.
 36. *Li H., Li X., Weia J., et al.* Crystalline transformation from ta-C to graphene induced by a catalytic Ni layer during annealing. *Diamond a. related materials*. 2020. V. 101. 107556.
 37. *Zhizhin E.V., Pudikov D.A., Rybkin A.G. et al.* Physics of the Solid State. 2015. V. 57(9). P. 1888–1894.
 38. *Kovalenko S.L., Pavlova T.V., Andryushechkin B.V. et al.* Epitaxial growth of a graphene single crystal on the Ni(111) surface. *JETP Letters*. 2017. V. 105. P. 185–188.
 39. *Xu J., Fujita D., Sagisaka K., et al.* Production of extended single-layer graphene. *ACS Nano*. 2011. V. 5(2). P. 1522–1528.
 40. *Isaev N.V., Luzanov V.A., Temiryazeva M.P.* Formation of thin graphite films upon carbon diffusion through nickel. *Technical Physics*, 2017, Vol. 62, No 7, pp. 1069–1072.
 41. *Sorokin I.A., Kolodko D.V., Luzanov V.A., Shustin E.G.* Growth of thin graphite films on a dielectric substrate using heteroepitaxial synthesis. *Technical Physics Letters*, 2020, Vol. 46, No 5, pp. 497–500.
 42. *Sorokin I.A., Kolodko D.V., Shustin E.G.* Synthesis of Nano-Crystalline Graphite Films in Hollow Cathode Discharge. *Technical Physics*, 2018, Vol. 63, No 8, pp. 1157–1159.
 43. *Zhang L., Feng S., Xiao S., et al.* Layer-controllable graphene by plasma thinning and post-annealing. *Applied Surface Science*, 2018. V. 441 P. 639–646.
 44. *Shen Y.L.; Zhou P.; Wang L.H.; Sun Q.Q., et al.* The annealing effect of chemical vapor deposited graphene. *IEEE 10th International Conference on ASIC*. 2013.
 45. *Tolochko A.V., Larionova T.V., Kozlova M.V., et al.* Variation of the resistivity and chemical composition of CVD graphene under annealing in a reductive atmosphere. *Journal of Physics: Conf. Series*, 2017. V. 816. 012012.
 46. *Son J., Choi M., Honga J., Yangy B.* Raman study on the effects of annealing atmosphere of patterned graphene. *J. Raman Spectrosc*, 2018. V. 49. P. 183–188.
 47. *Kaplas T., Jakstas V., Biciunas A., et al.* Effect of High-Temperature Annealing on Graphene with Nickel Contacts, *Condens. Matter*. 2019. V. 4. P. 21–27.
 48. *Park C.S.* Disorder induced transition of electrical properties of graphene by thermal annealing. *Results in Physics*. 2018. V. 9. P. 1534–1536.
 49. *Tosic D., Markovic Z., Jovanovic C., et al.* Rapid thermal annealing of nickel-carbon nanowires for graphene nanoribbons formation, *Synthetic Metals*. 2016. V. 218. P. 43–49.
 50. *Kumar N., Salehiyan R., Chauke V., et al.* Top-down synthesis of graphene: A comprehensive review. *Flat. Chem.* 2021. V. 27. 100224.
 51. *Zhang F., Yang K., Liu G., Chen Y.* Recent advances on graphene: Synthesis, properties and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2022. V. 160. 107051.
 52. *Urade A.R., Lahiri I., Suresh K.S.* Graphene Properties, Synthesis and Applications: A Review. *Journal of the Minerals, Metals a. Materials Society*. 2023. V. 75(3). P. 614–630.