

ЭФФЕКТ ФРАНЦА–КЕЛДЫША В СТРУКТУРАХ КРЕМНИЙ–СВЕРХТОНКИЙ (3.7 нм) ОКИСЕЛ–ПОЛИКРЕМНИЙ

© 2023 г. Д. А. Белорусов^а, Е. И. Гольдман^а, Г. В. Чучева^{а, *}

^а *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация*

^{*}*E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru*

Поступила в редакцию 02.05.2023 г.

После доработки 02.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Обнаружено проявление эффекта Франца–Келдыша при освещении непрямым дневным светом структур $\text{Al}-n^+-\text{Si:P}-\text{SiO}_2-(100)$ n -Si со сверхтонким (3.7 нм) окислом. Показано, что использование подсветки даже при малых полевых напряжениях (до 3 В) приводит к росту туннельного тока через окисел по сравнению с током в условиях темноты на три порядка. Построена модель влияния излучения на процесс туннелирования электронов через сверхтонкий изолирующий слой. Сначала в результате эффекта Франца–Келдыша происходит захват кванта излучения электроном и туннелирование данного носителя заряда через барьер на более высоком, по сравнению с темнотой, уровне. После попадания носителя заряда в полупроводник его энергии хватает для нескольких актов рождения пар электрон–дырка в ходе ударной ионизации кремния.

DOI: 10.31857/S0033849423090036, EDN: SBHPRG

ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые пластины, покрытые сверхтонкими, менее 5 нм, изолирующими слоями SiO_2 , — это основная часть современных и будущих устройств наномасштабного диапазона [1]. В структурах металл–окисел–полупроводник (МОП) прозрачность барьера такого изолятора уже при нулевом напряжении между полевым электродом и полупроводником ($V_g = 0$) настолько велика, что в отличие от толстых окислов эффекты туннелирования сквозь потенциальный рельеф в диэлектрике проявляются при измерениях вольт-амперной характеристики (ВАХ) сразу же после нарушения детального равновесия. В частности, известно [2, 3], что электроны, попавшие туннельным образом из затвора в кремний n -типа, оказываются в полупроводнике сильно разогретыми и их термализация приводит к росту темпа генерации электронно–дырочных пар за счет ударной ионизации.

Цель данной работы — изучить влияние освещения полупроводника на проводящие свойства сверхтонкого окисла. Оказывается, что воздействие света приводит к увеличению на порядки туннельного тока через SiO_2 . Мы обсудим экспериментальные результаты наблюдения этого явления и физический механизм его проявления.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Опыты проводили на образцах из группы структур, служивших объектами исследований [4, 5], у которых реакция на полевое воздействие, типа повреждение, практически отсутствует, т.е. с увеличением продолжительности выдержки при полевых напряжениях разной полярности, вплоть до перехода в состояние мягкого пробоя, у объектов практически не изменяются ни проводимость через окисел, ни распределение встроенного заряда. Высокое качество SiO_2 у этих объектов подтверждено и низкими токами утечки через изолирующий слой за счет туннельной проводимости. Si-МОП-структуры имели полевые электроды $\text{Al}-n^+-\text{Si:P}$ (концентрация доноров в поликремнии $N_d^+ \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$, площадь полевого электрода $S = 1.6 \times 10^{-3} \text{ см}^2$), изолированные от (100) n -Si-подложек слоем полученного при высокотемпературном окислении SiO_2 с оптической толщиной 3.7 нм.

Эксперименты проводили при комнатной температуре на автоматизированной установке [6], они включали в себя измерения ВАХ и высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) объектов на частотах 1 МГц (C_1) и 0.5 МГц (C_2) с использованием прецизионного измерителя LCR Agilent E4980A. Были получены два типа

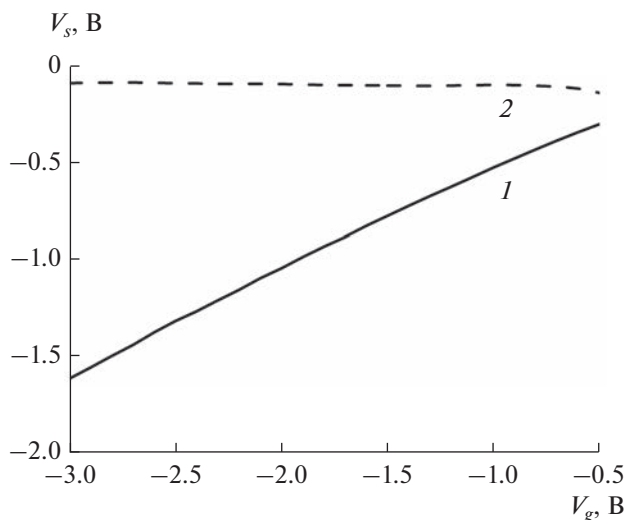


Рис. 1. Полевая зависимость обедняющего изгиба зон в кремнии: 1 — характеристика в темноте, 2 — характеристика при подсветке.

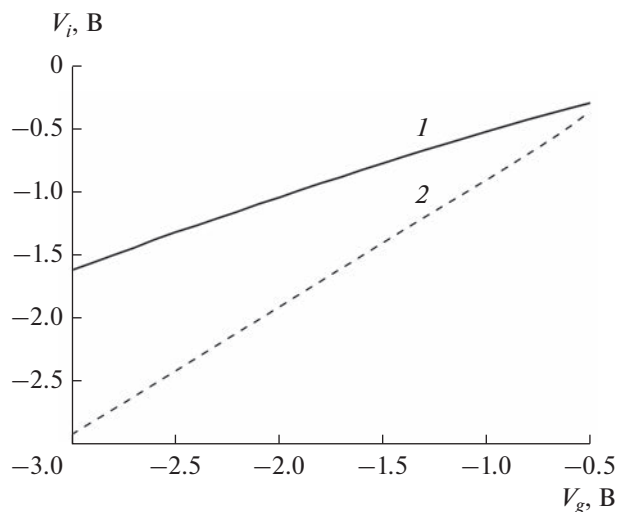


Рис. 2. Полевая зависимость падения напряжения на окисле: 1 — характеристика в темноте, 2 — характеристика при подсветке.

характеристик: темновые — при измерениях на образцах, находящихся под светонепроницаемым колпаком, и при подсветке — на образцы попадало дневное освещение (свет из окон в отсутствие прямого солнечного облучения). Опыты проводили в нестационарном специальном режиме [4], когда значения высокочастотных емкостей и тока при их фиксации отвечают практически одному и тому же состоянию образца. Схема опыта: для каждой точки измерений из положения полевого напряжения $V_g = 0$ на образец подавали заданное смещение V_g ; после окончания RC-процессов (менее 0.3 с) фиксировался ток через окисел I , а затем в течение 3 с емкости C_1 и C_2 . После этого поданное напряжение сбрасывали до нуля, и структуру выдерживали 6 с. Общая продолжительность измерений тока и емкостей при одном и том же значении напряжения на полевом электроде существенно меньше, чем характерное время переходного процесса, связанного с перезарядкой локализованных электронных состояний на границе раздела (ГР) Si–SiO₂, (более 15 с). Такая процедура позволяет при измерениях минимизировать длительность пребывания образца в предпробойных условиях. Данные ВФХ, соответствующие двум высоким частотам, дают возможность провести паспортизацию образца [6, 7] — определить концентрацию доноров у ГР Si–SiO₂, сопротивление полупроводниковой подложки и построить зависимости от полевого напряжения изгиба зон V_s в полупроводнике и падения внешнего напряжения на изолирующем слое V_i [8].

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. МОДЕЛЬ ЯВЛЕНИЯ

Результаты обработки измеренных значений тока в функции от напряжения на окисле и связи этого напряжения, а также изгиба зон в полупроводнике с внешним смещением показаны на рис. 1–3. Диапазон представленных данных соответствует области обеднения полупроводника, где явление высокой светочувствительности сверхтонкого окисла выражено наиболее ярко.

Уже первые два рисунка указывают на существенную разницу состояний поверхности кремния при одинаковых полевых воздействиях в темноте и при подсветке. В условиях темноты внешнее поле-вое напряжение V_g делится между полупроводником и окислом; при подсветке практически все V_g приложено к SiO₂, обеднение фактически не проявляется, максимальный изгиб зон не превышает $4T/q$, где T — температура в энергетических единицах, q — элементарный заряд. Основной полученный экспериментальный результат — это изменение ВАХ образца в результате подсветки (см. рис. 3). Туннельный ток при освещении превосходит темновой на три порядка, и это при одних и тех же падениях напряжения на окисле; т.е. если сравнивать ВАХ при одинаковом поле-вом напряжении, то разница токов при подсветке и в темноте еще более возрастет, поскольку в опыте под светозащитным колпаком V_g делится между кремнием и окислом.

Такая картина объясняется двумя обстоятельствами.

Во-первых, рассмотренным в [2, 3] рождением электронно-дырочных пар при ударной иониза-

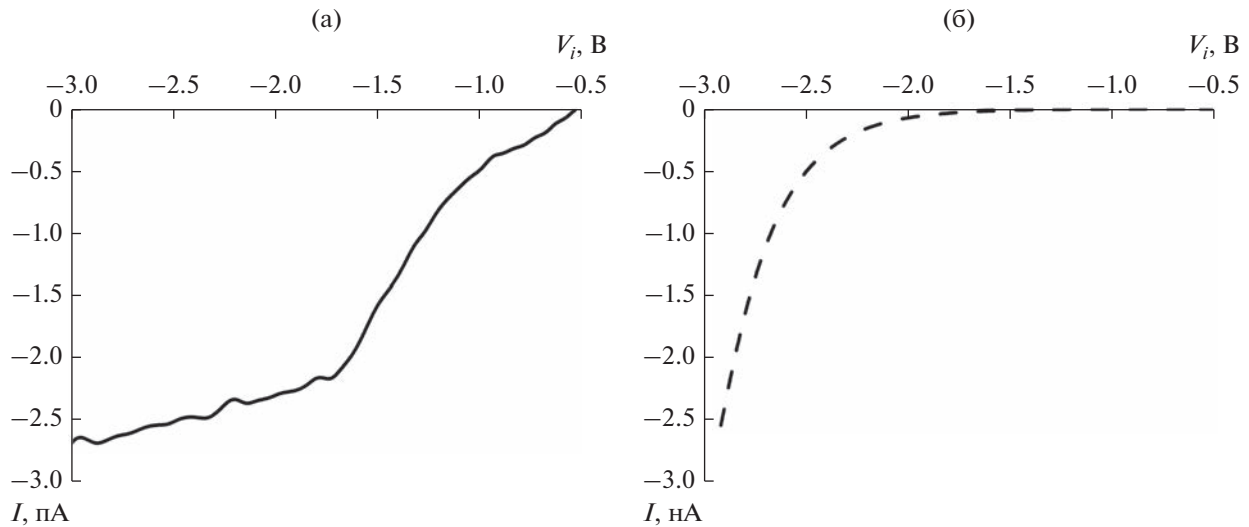


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики изолирующего промежутка Si-МОП-структуры: а — характеристика в темноте, б — характеристика при подсветке.

ции кремния носителями заряда, попавшими в полупроводник туннельным образом из полевого электрода, см. зонную схему структуры на рис. 4¹. Причем, поскольку энергии одного такого носителя заряда достаточно для участия в актах генерации нескольких пар², то имеет место эффект умножения: число рождающихся в единице объема пар электрон–дырка больше, чем плотность потока туннельных электронов. Из опыта следует (см. рис. 1, кривая 2), что темп генерации неосновных носителей заряда при подсветке настолько велик, что концентрации дырок, скапливающихся у ГР Si–SiO₂ достаточно, чтобы практически компенсировать заряд слоя обеднения и уменьшить его толщину до размера порядка длины экранирования Дебая. Отметим, что, когда скорость рождения дырок возрастет и достигнет некоторой пороговой величины, то в процессе переноса носителей заряда обоих типов вместо слоя обеднения у ГР Si–SiO₂ образуется область с локальной квазинейтральностью, в которой будет происходить рекомбинация дырок и электронов. Поскольку методика обработки высокочастотных ВФХ [8] основана на распределении основных носителей заряда по Больцману, то ее результаты становятся не применимы в условиях образования подобных неравновесных областей с локальной квазинейтральностью при больших V_g .

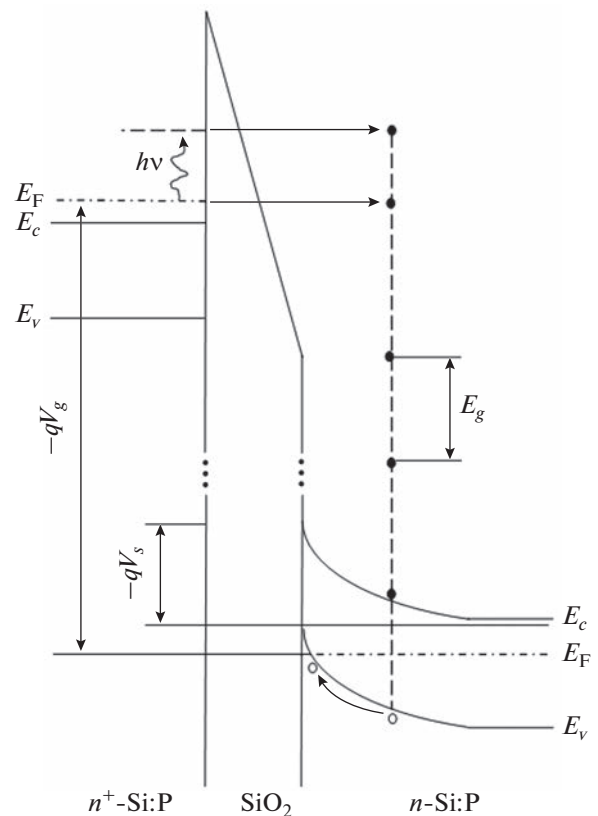


Рис. 4. Зонная схема Si-МОП-структуры со сверхтонким окислом в состоянии обеднения: E_c — дно зоны проводимости, E_v — потолок валентной зоны, E_g — ширина запрещенной зоны в кремнии, E_F — уровень Ферми, h — постоянная Планка, ν — частота падающей световой волны.

¹ Данный рисунок практически повторяет рис. 1 из работы [3], но с важным изменением, касающимся иллюстрации воздействия света на процесс туннелирования.

² Энергия электрона, попавшего при туннелировании из полевого электрода в кремний, существенно превышает необходимую для генерации одной пары ширины запрещенной зоны в Si.

Во-вторых, супернелинейная и гораздо более резкая по сравнению с темновой зависимость тока от поля в окисле при освещении (см. рис. 3) свидетельствует о прямом воздействии света на процесс туннелирования электронов через барьер, создаваемый изолирующим слоем Si МОП-структуры. Такое поведение естественно связать с эффектом Франца–Келдыша [9–11]. Поглощение кванта электромагнитного поля электроном в полевом электроде разрешено, так как волновые функции свободных носителей заряда здесь не плоские волны и существенно провисают в классически недоступную область под барьером. Перекрывание этих функций в подбарьерной области и определяет вероятность поглощения световой энергии и туннелирования электрона на более высоком уровне через пониженный барьер (рис. 4).

Отметим, что структуры со сверхтонкими туннельно проводящими изолирующими слоями — это удачные объекты для проявления эффекта Франца–Келдыша. В них высокие внутренние поля и наблюдение результатов воздействия света возможно при небольших внешних напряжениях практически сразу после нарушения детального равновесия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруженная высокая чувствительность Si-МОП-структур со сверхтонким окислом к подсветке при использовании малых внешних напряжений ставит вопрос о возможности применения данных объектов в качестве датчиков электромагнитного излучения. Наличие или отсутствие конкурентных преимуществ таких структур по сравнению с имеющимися приборами фиксации электромагнитного поля в различных частотных диапазонах может выясниться только после детальных исследований результатов воздействия излучения. Необходимо получить спектральные данные о чувствительности Si-МОП-структур со сверхтонким окислом к облучению и порогах реакции этих объектов в разных частотных диапазонах. Отметим, что при теоретическом анализе в

ходе выполнения этих работ следует учитывать, что реальная форма потенциального барьера в сверхтонком изолирующем слое SiO_2 далека от прямоугольной [12, 13]. Поэтому непосредственное применение формул современной теории [11] к экспериментальным результатам изучения эффекта Франца–Келдыша в Si-МОП-структурах со сверхтонким окислом невозможно и потребуются модификация необходимых выражений.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (№ 075-01110-23-01).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zwanenburg F.A., Dzurak A.S., Simmons M.Y. et al. // *Rev. Mod. Phys.* 2013. V. 85. № 3. P. 961.
2. Векслер М.И., Грехов И.В., Шулекин А.Ф. // *ФТП*. 2000. Т. 34. № 7. С. 803.
3. Ждан А.Г., Чучева Г.В., Гольдман Е.И. // *ФТП*. 2006. Т. 40. № 2. С. 195.
4. Гольдман Е.И., Левашов С.А., Чучева Г.В. // *ФТП*. 2019. Т. 53. № 4. С. 481.
5. Белорусов Д.А., Гольдман Е.И., Нарышкина В.Г., Чучева Г.В. // *ФТП*. 2021. Т. 55. № 1. С. 24.
6. Гольдман Е.И., Левашова А.И., Левашов С.А., Чучева Г.В. // *ФТП*. 2015. Т. 49. № 4. С. 483.
7. Гольдман Е.И., Левашов С.А., Нарышкина В.Г., Чучева Г.В. // *ФТП*. 2017. Т. 51. № 9. С. 1185.
8. Гольдман Е.И., Кухарская Н.Ф., Левашов С.А., Чучева Г.В. // *ФТП*. 2019. Т. 53. № 1. С. 46.
9. Franz W. // *Z. Naturforschung*. 1958. V. 13a. № 2. P. 484.
10. Келдыш Л.В. // *ЖЭТФ*. 1957. Т. 33. № 4. С. 994.
11. Жёлтиков А.М. // *Успехи физ. наук*. 2017. Т. 187. № 11. С. 1169.
12. Гольдман Е.И., Ждан А.Г., Кухарская Н.Ф., Черняев М.В. // *ФТП*. 2008. Т. 42. № 1. С. 94.
13. Гольдман Е.И., Чучева Г.В., Шушарин И.А. // *ФТП*. 2022. Т. 56. № 3. С. 328.