

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ

УДК 537.525.99

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАЗМЫ В СТОЛБЕ СВЧ-РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ, ПОДДЕРЖИВАЕМОГО СТОЯЧЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНОЙ

© 2023 г. В. И. Жуков^{а,*}, Д. М. Карфидов^а^а Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

*e-mail: zhukov.vsevolod@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

После доработки 31.05.2023 г.

Принята к публикации 31.05.2023 г.

Исследована структура поддерживаемого стоячей поверхностной волной (ПЭВ) СВЧ-разряда низкого давления в кварцевой трубке, заполненной аргоном. Для формирования стоячей волны использовалась система из двух плоских металлических зеркал, образующих открытый резонатор ПЭВ. Исследованы профиль плотности плазмы и структура электрического поля ПЭВ в диапазоне давлений от 0.25 до 10 Торр. Возбуждение стоячей волны позволило независимо исследовать продольную E_z и поперечную E_r компоненты вектора напряженности электрического поля ПЭВ. Экспериментально подтверждено, что фазы колебаний компонент поля стоячей ПЭВ сдвинуты на π . Возбуждение стоячей волны на плазменном столбе приводит к формированию локальных минимумов и максимумов плотности плазмы, период которых равен половине длины поверхностной волны. При этом пространственный период модуляции плотности близок к распределению E_z компоненты стоячей поверхностной волны. Установлено, что время формирования модулированной структуры плотности плазмы близко к характерному времени диффузии, а степень модуляции растет с ростом давления. Экспериментально продемонстрирована возможность создания плазменного столба с модуляцией плотности плазмы $n_{\text{emax}}/n_{\text{emin}} \approx 5$ и длиной около 10 длин волн.

Ключевые слова: поверхностная электромагнитная волна, низкотемпературная плазма, СВЧ-разряд низкого давления, стоячая поверхностная волна, резонанс, дисперсия поверхностной волны

DOI: 10.31857/S0367292123600462, EDN: HZHVBO

1. ВВЕДЕНИЕ

Разряды на поверхностных электромагнитных волнах (ПЭВ) в диэлектрических трубках широко используются благодаря их способности создавать длинные стационарные плазменные столбы в широком диапазоне рабочих частот (от 1 МГц до 10 ГГц) и давлений (от 10 мТорр до атмосферного давления) [1]. СВЧ-энергия с высокой эффективностью трансформируется в поверхностную волну, которая самосогласованным образом поддерживает плазменный столб. Поле поверхностной волны, распространяющейся по границе раздела плазма–диэлектрик, экспоненциально затухает по обе стороны от границы [2]. ПЭВ относятся к “медленным” волнам, фазовая скорость которых меньше скорости света в окружающей плазменном столбе диэлектрике. Такая плазма нашла множество применений, включая CVD-осаждение алмазных пленок [3], дезинфекцию и стерилизацию материалов [4], создание плазменных антенн [5, 6]. Для работы в широком диапазоне частот и мощностей было создано

множество аппликаторов ПЭВ [7]: коаксиальный резонатор (сурфатрон), робокс, волноводный сурфатрон, волноводный аппликатор. Хотя конкретная конструкция аппликатора ПЭВ не влияет на параметры плазмы, она играет существенную роль в устройстве источника плазмы: определяет эффективность передачи мощности от генератора к плазме, и в некоторых случаях, задает моду распространяющейся поверхностной волны [8].

В настоящей работе используется волноводный аппликатор, являющийся наиболее оптимальным аппликатором для работы на частоте 2.45 ГГц. В данной работе выполнялось соотношение $f \times r < 2 \text{ ГГц} \times \text{см}$, где f – частота поля, а r – радиус трубки, что позволяло возбуждать только аксиально-симметричную $m = 0$ моду [9]. В случае холодной слабостолкновительной плазмы ($v_{\text{en}}/\omega \ll 1$, где v_{en} – частота столкновения электронов с нейтральными атомами, а ω – круговая частота СВЧ-волны) стационарный разряд представляет собой плазменный столб, концентрация электронов n_e в котором преимущественно

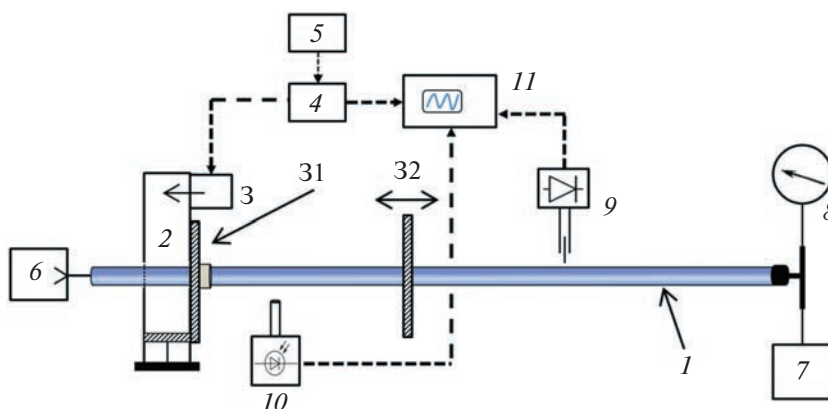


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – кварцевая трубка; 2 – волноводный аппликатор; 3 – магнетрон; 4 – модулятор; 5 – генератор задержанных импульсов; 6 – форвакуумный насос; 7 – натекатель; 8 – вакуумметр; 9 – СВЧ-зонд; 10 – коллимированный фотодетектор; 11 – осциллограф; 31 – неподвижное зеркало; 32 – подвижное зеркало.

но линейно [10] спадает от аппликатора вплоть до критической концентрации [11] $n_{\min} = (1 + \epsilon_d)n_c$ (ϵ_d – диэлектрическая проницаемость трубки; n_c – критическая концентрация плазмы), ниже которой невозможно распространение поверхностной волны. Формирование стоячей поверхностной волны позволяет независимо исследовать продольную E_z и поперечную E_r компоненты вектора напряженности электрического поля ПЭВ как снаружи кварцевой трубки, так и внутри плазмы, а также определить их вклад в поддержание разряда. В случае $m = 0$ моды для плазменного столба, поддерживаемого стоячей поверхностной волной, характерно наличие продольной модуляции плотности плазмы, зависящей от параметров разряда.

В ряде работ исследовались разряды, поддерживаемые стоячей поверхностной волной $m = 0$ моды [12–14], где была зарегистрирована продольная модуляция плотности плазмы. В настоящей работе проведено исследование модулированной структуры и процесса ее образования. Подробно измерена структура поля ПЭВ вне разряда. Измерения плотности плазмы проводились только бесконтактными методами, так как введение в плазму диагностических устройств, например зондов, вносит значительные возмущения в структуру поля и плазмы разряда. Численная модель, созданная в программе CST Microwave Studio [15], позволяет получить картину распределения поля ПЭВ как снаружи плазмы, так и внутри нее. Эксперименты проводились при давлениях 0.25 Торр и 6.5 Торр ($v_{en} \ll \omega$). Рост давления приводит к падению энергии на образование пары электрон-ион, и в связи с этим происходит значительный рост плотности плазмы и “вытеснение” из нее поля ПЭВ [16]. Увеличение давления приводит к изменению характера радиально-

го и продольного профилей плотности плазмы разряда при его поддержании поверхностной волной.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Разряд осуществлялся в кварцевой трубке 1 длиной 2 м, с внутренним диаметром 10 мм, внешним – 14 мм. ПЭВ возбуждалась волноводным аппликатором [17] – 2, подключенным к магнетрону 3, мощностью 800 Вт, генерирующему СВЧ-импульсы на частоте 2.45 ГГц. Напряжение на магнетрон поступало от модулятора 4. Режим работы магнетрона регулировался генератором задержанных импульсов 5. Магнетрон работал в режиме генерации одиночных прямоугольных СВЧ-импульсов длительностью 50 мс. Для откачки воздуха из трубки использовался форвакуумный насос 6. Подача газа регулировалась газовым натекателем 7, давление измерялось цифровым вакуумметром 8. Эксперименты проводились в аргоне в диапазоне давлений от 0.25 до 10 Торр.

Система генерации стоячей волны состоит из двух плоскопараллельных зеркал [15], установленных на разрядную трубку: экрана, совмещенного с волноводным аппликатором (31) и подвижного зеркала (32), свободно перемещаемого вдоль трубки. Зеркало 32 состоит из двух элементов – внешнего и внутреннего зеркал (рис. 1), которые могут перемещаться независимо друг от друга. Внешние зеркала представляют собой плоские медные диски диаметром 15 см, с центральным отверстием, диаметр которого равен внешнему диаметру трубки. Внутреннее зеркало 32 с диаметром, равным внутреннему диаметру трубки, выполнено из медной сетки. При подаче СВЧ-энергии от аппликатора распространяется

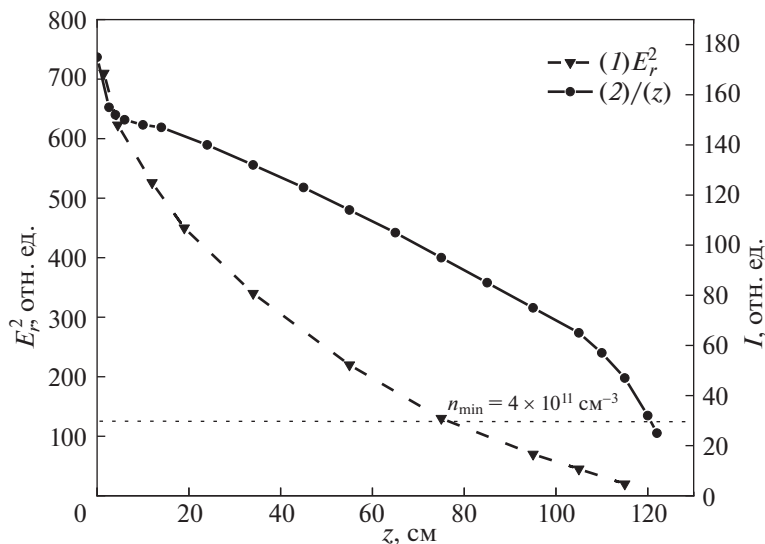


Рис. 2. Распределения квадрата радиальной $E_r^2(z)$ компоненты напряженности электрического поля ПЭВ — 1 и интегральной светимости плазмы — 2 $I(z) \sim n_e(z)$, измеренные вдоль свободного плазменного столба при $p = 0.25$ Торр. Пунктирная линия соответствует минимальной концентрации электронов $n_{\min}$ для распространения ПЭВ. Погрешность измерений составляет не более 30%.

столб плазмы, поддерживаемый поверхностной волной. Начальный этап представляет собой процесс распространения разряда по направлению к зеркалу 32, при достижении которого между зеркалами формируется плазменный столб, поддерживаемый стоячей ПЭВ. При удалении зеркала 32 происходит свободное распространение разряда. Для возбуждения стоячей волны с большим значением коэффициента стоячей волны напряженности поля (КСВН) расстояние между зеркалами устанавливалось кратным целому числу половолн ПЭВ.

Измерения компонент напряженности электрического поля проводились с помощью СВЧ-зондов, сконструированных для приема радиальной E_r и продольной E_z компонент поля. Сигнал с зондов регистрировался супергетеродинным приемником с квадратичным детектированием.

Относительные значения средней плотности плазмы по радиальному сечению в столбе измерялись по интенсивности светового излучения плазмы, при этом считается, что при постоянной температуре электронов T_e интенсивность света пропорциональна плотности плазмы [17, 18]. Для измерения интегральной светимости плазмы в поперечном сечении использовался коллимированный фотодетектор (спектральный диапазон длин волн 700–1100 нм, временное разрешение 7 нс), обеспечивающий пространственное разрешение 0.5 см.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Разряды низкого давления, поддерживаемые распространяющейся поверхностной электромагнитной волной, характеризуются линейным профилем плотности в основной части плазменного столба [10]. На рис. 2 представлен типичный профиль плотности по координате z по длине разрядной трубки, измеренный при давлении 0.25 Торр. Профиль линейно спадает вплоть до критической плотности $n_{\min} = (1 + \epsilon_d)n_c = 4 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Резкий скачок плотности вблизи аппликатора связан с выносом плазмы из аппликатора и формированием ПЭВ [19]. Электрическое поле ПЭВ затухает по мере удаления от источника, теряя энергию на поддержание разряда.

В настоящей работе стоячая поверхностная волна возбуждалась в открытом резонаторе с длинами $5/2 \lambda_s$ при 6.5 Торр и $7/2 \lambda_s$ при 0.25 Торр. Экспериментальные распределения компонент электрического поля E_r и E_z приведены на рис 3а, б. Длина ПЭВ λ_s заметно укорачивается относительно длины СВЧ-волны в свободном пространстве $\lambda_0 = 12.25 \text{ см}$: $\lambda_s = 11.1 \text{ см}$ (6.5 Торр) и $\lambda_s = 8.3 \text{ см}$ (0.25 Торр). Наряду с экспериментальными данными построены распределения E_r и E_z , полученные в результате численного моделирования в программе CST Microwave Studio, предназначенной для моделирования электромагнитных полей, и основанной на методе конечных элементов, где была создана численная модель аппликатора ПЭВ, аналогичная используемому в эксперименте. В численной модели не рассмат-

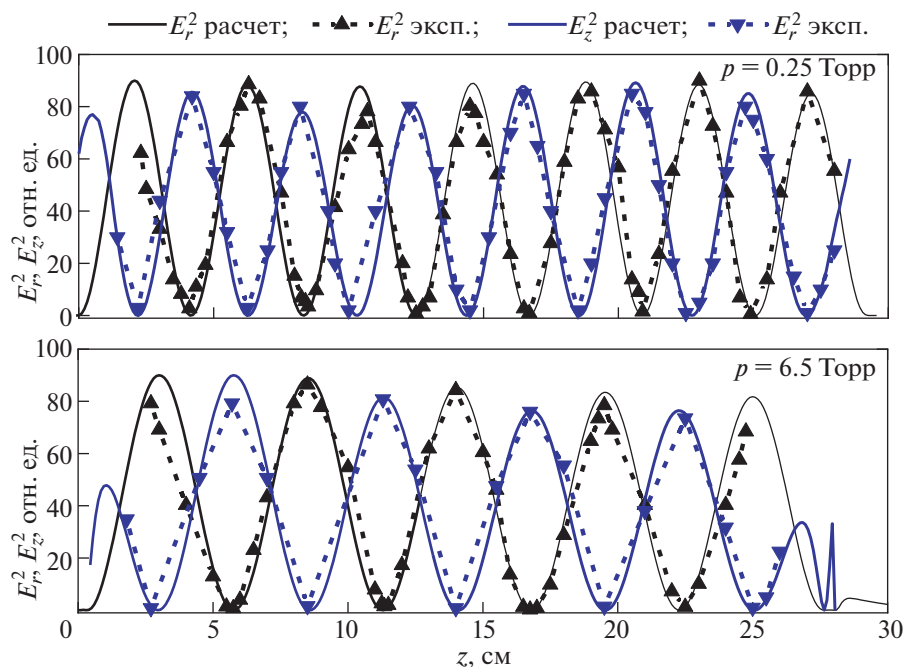


Рис. 3. Распределения радиальной E_r^2 и продольной E_z^2 компонент напряженности электрического поля вдоль плазменного столба, ограниченного зеркалами, при давлении 0.25 и 6.5 Торр. Сплошные кривые – результат моделирования. Пунктирные – экспериментальные данные.

ривались процессы образования плазмы. Использовалась модель холодной плазмы Друде с заранее заданными параметрами n_e и ν_{en} , которые не изменялись в процессе симуляции. В программе была воссоздана модель возбуждения стоячей ПЭВ аналогичная экспериментальной, полностью воспроизводящая параметры эксперимента: размеры аппликатора, рабочая частота, радиус трубки, расстояние между зеркалами. Плотность плазмы задавалась исходя из данных, полученных в эксперименте. Результаты эксперимента и численного моделирования находятся в хорошем согласии. Численное моделирование показало, что усредненное отношение амплитуд вне плазмы $E_r/E_z = 2$ при 0.2 Торр и $E_r/E_z = 5$ при 6.5 Торр. Возбуждение стоячей волны позволяет зарегистрировать сдвиг фаз компонент электрического поля ПЭВ E_r и E_z друг относительно друга, который составляет 180° . Величина КСВН достигает около 30 при 6.5 Торр и 25 при 0.25 Торр. При резонансе происходит накопление энергии между зеркалами, уровень которой превышает уровень энергии в свободном разряде в 5–8 раз, что приводит к относительному уменьшению уровня шумового объемного сигнала. Рассчитанные по дисперсионному соотношению для ПЭВ $m = 0$ моды [9], на основании измеренных значений λ_s , средние значения плотности плазмы n_e при 0.25 Торр и 6.5 Торр равны $2.4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $4 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ со-

ответственно. Измеренные поперечные распределения E_z (рис. 4) хорошо согласуются с распределениями, полученными из численной модели.

Распределения средней по сечению плотности, измеренной по интенсивности свечения плазмы, представлены на рис. 5 и 6. Можно видеть, что формирование стоячей поверхностной волны приводит к значительной модуляции плотности плазмы, возрастающей с ростом давления. Максимумы и минимумы плотности плазмы совпадают с максимумами и минимумами продольной компоненты электрического поля E_z и сдвинуты на 180° относительно E_r . Данный результат измерений свидетельствует об определяющей роли компоненты E_z в поддержании разряда. Распределения электрического поля в сечениях, соответствующих максимумам E_r и E_z , полученные в результате численного моделирования (рис. 7), свидетельствуют о доминирующем вкладе E_z в поддержании разряда. Экспериментально была продемонстрирована возможность создания длинного ($L = 84 \text{ см}$, $\lambda_s \approx 10.5 \text{ см}$) стационарного плазменного столба с высокой степенью модуляции $n_{\text{emax}}/n_{\text{emin}} \approx 5$ (рис. 8), полученного при давлении 9 Торр.

Процесс формирования модулированной структуры исследовался тремя независимыми методами: зондированием проходящими волнами, по интегральному световому излучению плазмы и

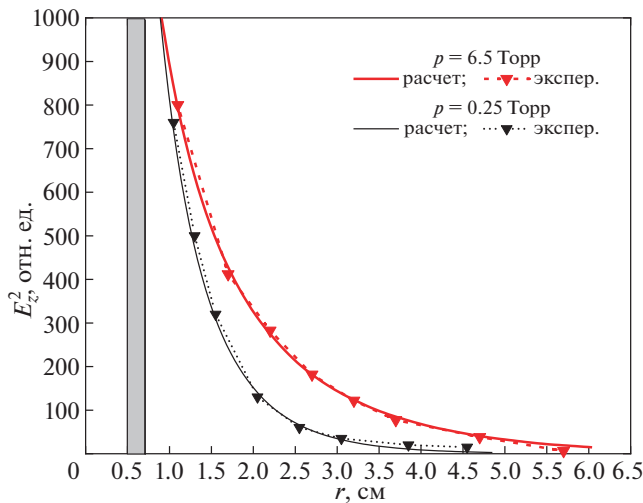


Рис. 4. Радиальные распределения продольной компоненты напряженности электрического поля ПЭВ $E_z^2(r)$ снаружи разрядной трубки при 0.25 и 6.5 Торр. Сплошные кривые — результат моделирования. Точки соответствуют экспериментальным результатам.

измерению характеристик электрического поля ПЭВ. Для реализации метода проходящих волн был использован прямоугольный волновод 35×15 мм с диаметрально расположенными отверстиями в широкой стенке радиусом 1.5 см. Разрядная трубка проходила через центр этих отверстий. Волновод мог свободно перемещаться вдоль трубки. Через волновод передавалось диагностическое СВЧ-излучение ($f_d = 5.5\text{--}7.5$ ГГц), регистрируемое супергетеродинным приемником. Измерялся коэффициент прохождения диагностического сигнала. Для нормировки использовалась металлическая трубка. Прохождение диагностического СВЧ-излучения через разрядную плазму было смоделировано в программе CST Microwave Studio (рис. 9а). Моделирование автоматически учитывало особенности используемой диагностической системы (каустика, рефракция и отражение), а также позволяло задавать плазму как с докритической, так и сверхкритической концентрацией. Концентрация электронов вычислялась путем совмещения экспериментальных данных прохождения диагностического сигнала с численным моделированием. Измерения проводились только при $p = 0.25$ Торр, так как при $p = 6.5$ Торр концентрации электронов $n_e > 10^{13}$ см $^{-3}$, и точность метода сильно снижается. Результаты измерений в точках $z_{\min}$ и $z_{\max}$, соответствующих произвольным соседним минимуму и максимуму плотности плазмы, представлены на рис. 8а, б. Отсчет времени ведется от момента, соответствующему началу регистрации фронта разряда. В течение первых 2 мкс происходит свобод-

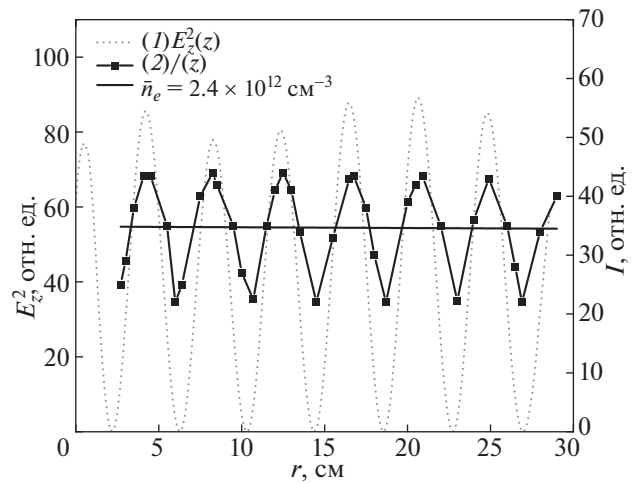


Рис. 5. Пунктирная кривая — распределение продольной компоненты напряженности электрического поля стоячей ПЭВ $E_z^2(z)$ из рис. 3 (а). Точки соответствуют измеренному между зеркалами распределению интегральной светимости плазмы $I(z) \sim n_e(z)$. Сплошная линия — среднее значение плотности плазмы $\bar{n}_e = 2.4 \times 10^{12}$ см $^{-3}$. Давление $p = 0.25$ Торр. Погрешность измерений составляет не более 30%.

ное распространение разряда, поддерживаемого бегущей поверхностной волной. При достижении разрядом второго зеркала образуется стоячая волна, что приводит к модуляции плотности плазмы. Изменение структуры поля и плотности плазмы разряда является самосогласованным процессом, выходящим на стационар за время $\tau \approx 10$ мкс, коррелирующему с характерным временем амбиполярной диффузии [20] $\tau_d = 4.55 \times 10^2 pr^2 T_m^{-1} (T_m +$

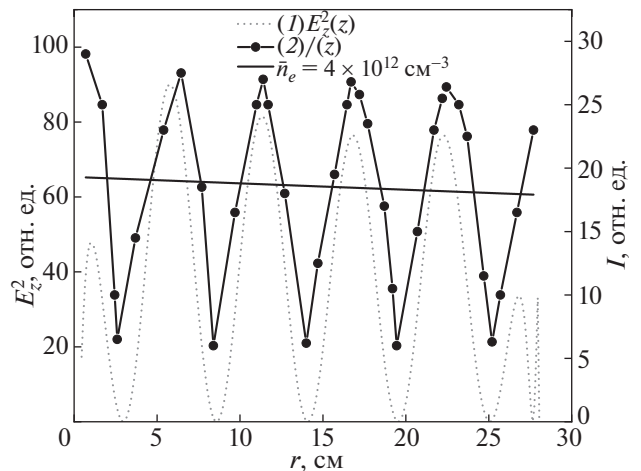


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, но при $p = 6.5$ Торр. Погрешность измерений составляет не более 30%.

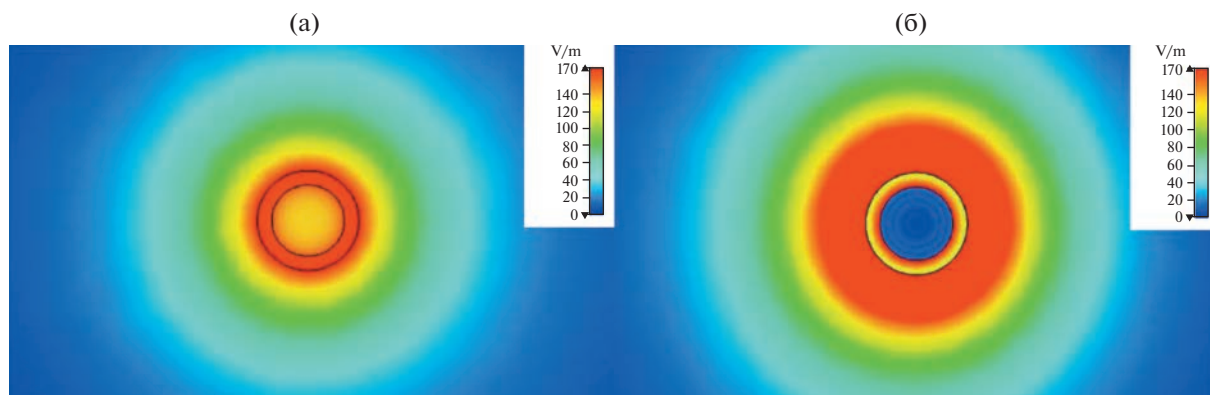


Рис. 7. Распределения интенсивности электромагнитного поля стоячей ПЭВ в поперечных сечениях разряда при $p = 0.25$ Торр (результат моделирования в CST Microwave Studio), соответствующих; а) — максимуму E_z ; б) — максимуму E_r .



Рис. 8. Фото разряда, поддерживаемого стоячей ПЭВ ($p = 9$ Торр). Расстояние между зеркалами $L = 84$ см.

$+ T_e)^{-1} \approx 3.7$ мкс, где T_m — температура нейтрального газа, а T_e — температура электронов. Измеренная по интегральной светимости (рис. 9в) степень модуляции равна $n_{\text{emax}}/n_{\text{emin}} = 1.5$. В данном эксперименте было использовано только внешнее подвижное зеркало. Проходящий диагностический сигнал (6 ГГц) ослаблялся на 68% в максимуме и на 30% в минимуме, что после сопоставления с результатами численного моделирования (зависимость коэффициента прохождения от частоты в максимуме представлена на рис. 9а) соответствует $n_{\text{emax}} = 2.4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $n_{\text{emin}} = 1.5 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Для повышения точности аналогичные измерения были проведены и для других частот в диапазоне от 5.5 ГГц до 7.5 ГГц. Полученные методом проходящих волн концентрации электронов хорошо согласуются с измерениями относительной плотности по световому излучению плазмы и с величиной средней плотности $\bar{n}_e = 2.2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, определенной по дисперсии ПЭВ на основании измеренной длины волны.

Измерение радиального профиля плотности плазмы проводилось не возмущающим плазму методом поперечных снимков плазменного столба с последующей обработкой с помощью преобразования Абеля [21]. При обработке снимков в радиальное распределение учитывались погрешности обусловленные прохождением оптически-

го излучения через кварцевую трубку. Для калибровки метода была использована бактерицидная лампа длиной 90 см, с внутренним диаметром 24 мм, внешним — 25 мм. В лампе реализовывался тлеющий разряд с помощью стандартного пускорегулирующего аппарата (ПРА). Радиальный профиль плотности плазмы в тлеющем разряде хорошо известен и описывается бесселевой функцией $n_e(r) \sim J_0(2.4r/a)$, где a — радиус трубки [21]. На рис. 10а приведены экспериментально измеренный и эталонный профили плотности в бактерицидной лампе, демонстрирующие близкий характер. Распределения в условиях нашего эксперимента представлены на рис. 10б. Данные распределения были измерены в середине линейной части свободного разряда (рис. 2), где плотность плазмы близка к средней по столбу $\bar{n}_e = 1.4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Характер радиального распределения концентрации электронов зависит от давления. При 0.25 Торр профиль плотности имеет столбовидный вид с незначительным провалом к центру трубки. При увеличении давления до 6.5 Торр наблюдается значительный провал концентрации на оси трубки. Измеренные при данных давлениях значения средних концентраций электронов, определяющие глубину проникновения поля ПЭВ в плазму, отличаются более чем на порядок (при 6.5 Торр $\bar{n}_e = 1.6 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$).

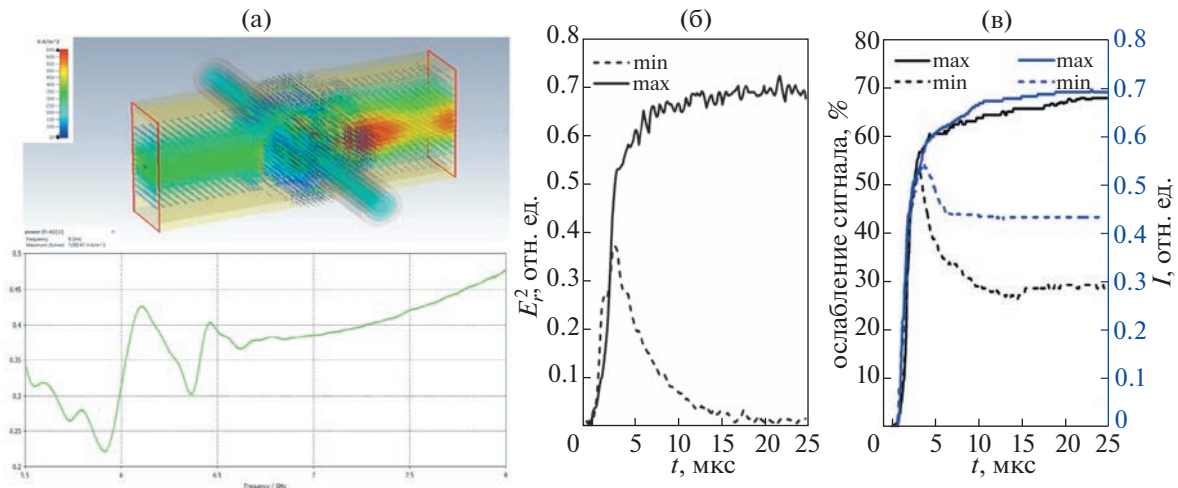


Рис. 9. Процесс формирования модулированной структуры ($p = 0.25$ Торр). а) Скриншот численной модели в CST Microwave Studio по симуляции прохождения диагностического СВЧ-сигнала через разряд. Нижний рисунок демонстрирует результаты расчета коэффициента прохождения диагностического СВЧ-сигнала в диапазоне от 5.5 ГГц до 8 ГГц. б) Временная зависимость $E_r^2(t)$, измеренная в положениях, соответствующих узлам (пунктирная кривая) и пучностям (сплошная линия) компоненты E_r стоячей ПЭВ. в) Временные зависимости прохождения диагностического СВЧ-излучения (6 ГГц) и интенсивности свечения плазмы, измеренные в положениях, соответствующих минимуму (пунктирные кривые) и максимуму (сплошные кривые) плотности плазмы.

Радиальные распределения компоненты E_z , вносящей доминирующий вклад в поддержание разряда, получены в результате численного моделирования в CST Microwave Studio (рис. 10б). Из приведенных результатов видно, что характер распределения плотности плазмы коррелирует с распределением электрического поля ПЭВ, определяющего процессы ионизации. Радиальный профиль определяется балансом между процессами амбиполярной диффузии и объемной диссоциативной рекомбинации, приводящими к формированию более плавного по сравнению с полем градиенту. При пониженном давлении (0.25 Торр) диффузия превалирует над рекомбинацией $v_d = 2.7 \times 10^5 \text{ с}^{-1} \gg v_r$, а распределение поля близко к однородному. В области повышенного давления (6.5 Торр) профиль поля сильно неоднороден и падает практически до нуля к центру трубки. В то же время профиль плотности спадает менее резко, что, по-видимому, определяется балансом процессов диффузии и рекомбинации. Рассчитанное значение частоты диффузии $v_d = 5.2 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$. Значение частоты рекомбинации, измеренное в схожих условиях [22] близко к частоте диффузии и равно $v_r \approx 7 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Используя полученные в работе [23] выражения для энергии ПЭВ, проникающей в плазму W_{pl} и энергии ПЭВ в окружающем плазменный столб пространстве W_{vac} , был проведен расчет отношения W_{pl}/W_{vac} . В условиях нашего эксперимента

отношение W_{pl}/W_{vac} равно 0.25 при 0.25 Торр и 0.04 при 6.5 Торр. Расчет проводился для средней по свободному плазменному столбу плотности плазмы. Распределения энергии ПЭВ внутри и снаружи плазменного столба были получены и в результате численного моделирования (рис. 11). Данные моделирования хорошо согласуются с расчетными данными W_{pl}/W_{vac} . Результаты моделирования и расчета отношения W_{pl}/W_{vac} были подтверждены экспериментально. Для этого стоячая волна возбуждалась как при совмещенных внутреннем и внешнем зеркалах, так и при их раздельном использовании. Перемещение внутреннего зеркала при высоком давлении (6.5 Торр) не приводит к значительным изменениям КСВН и профиля плотности плазмы, что подтверждает малую долю энергии ПЭВ внутри плазмы $W_{pl} \ll W_{vac}$. В эксперименте с пониженным давлением (0.25 Торр) максимальные значения КСВН = 25, и степени модуляции $n_{emax}/n_{emin} = 2$ были достигнуты при одновременной установке внешнего и внутреннего зеркал. Использование только внешнего зеркала уменьшает величину КСВН, а степень модуляции достигает $n_{emax}/n_{emin} = 1.5$, тогда как при использовании только внутреннего зеркала $n_{emax}/n_{emin} = 1.3$. Видно, что в таких условиях эффект от зеркал складывается. Степень влияния внутреннего и внешнего зеркал на модуляцию плотности плазмы и поля поверхностной волны напрямую связано с долями энергии поверхностной волны внутри плазмы и вне ее.

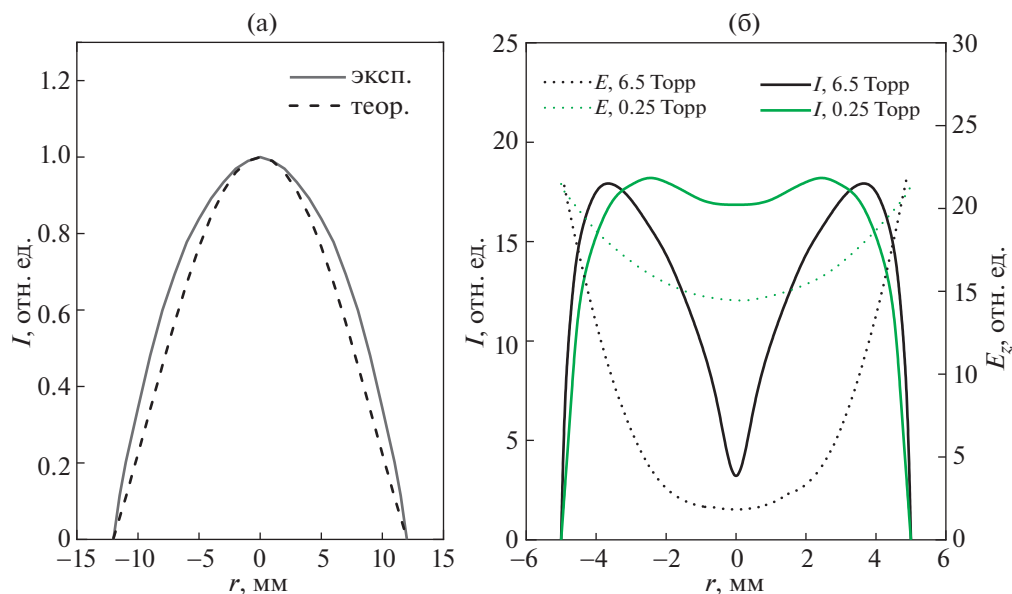


Рис. 10. а) — Радиальные распределения плотности плазмы в бактерицидной лампе (тлеющий разряд). Пунктирная кривая — распределение, измеренное методом поперечных снимков. Сплошная кривая — теоретическое распределение. б) — Сплошные кривые — измеренные методом поперечных снимков распределения плотности плазмы в разряде на поверхностной волне. Пунктирные кривые — радиальные распределения напряженности электрического поля $E(r)$ внутри плазменного столба (результаты численного моделирования).

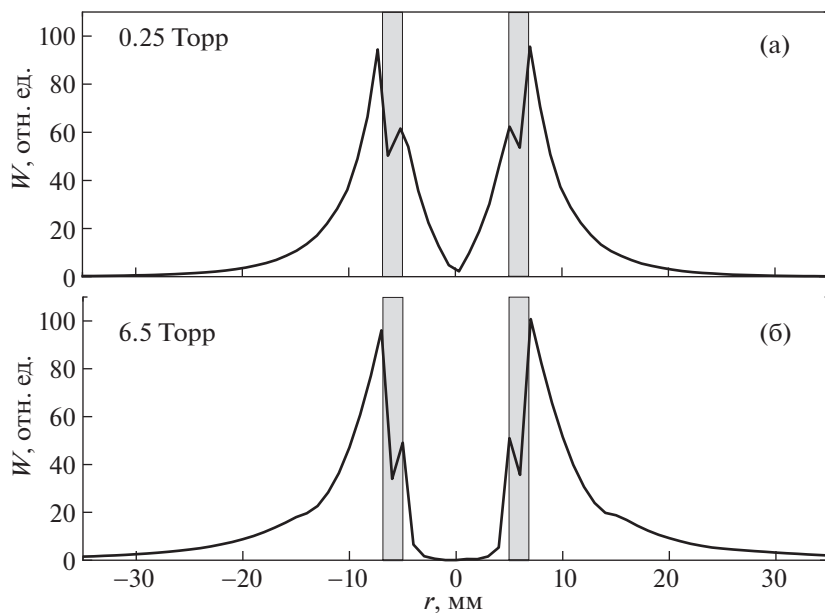


Рис. 11. Результаты моделирования радиального распределения энергии ПЭВ внутри и снаружи плазменного столба. а) $p = 0.25$ Торр; $n_e = 1.4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. б) $p = 6.5$ Торр; $n_e = 1.6 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Выражение для мощности поверхностной волны, расходуемой в плазме свободного разряда $P_{\text{pl}} = P_0 - P_{\text{vac}} - P_{\text{loss}}$, где P_{vac} — мощность ПЭВ в вакууме, а $P_0 = 800$ Вт — мощность источника. Уровень потерь, связанный с отражением внутри ап-

пликатора и излучением с конца разряда не превышает 30% ($P_{\text{loss}} \approx 200$ Вт) [24]. Используя ранее рассчитанные значения $W_{\text{pl}}/W_{\text{vac}}$ мощность ПЭВ поглощаемую в плазме можно оценить как $P_{\text{pl}} \approx 110$ Вт при 0.25 Торр и $P_{\text{pl}} \approx 22$ Вт при 6.5 Торр.

Мощность, затрачиваемая на создание пары электрон-ион, может быть рассчитана как в [25]:

$\theta = P_{\text{pl}} / \pi \bar{n}_e l a^2$, где l — длина плазменного столба. Учитывая измеренные поперечные профили плотности плазмы, были получены следующие оценки: $\theta \approx 1.1 \times 10^{-14}$ Вт (6.5 Торр) и $\theta \approx 6.7 \times 10^{-13}$ Вт (0.25 Торр), находящиеся в хорошем согласии с теоретическими моделями и экспериментальными данными θ для аргона из других работ [20, 26, 27].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован СВЧ-разряд низкого давления в аргоне, поддерживаемый поверхностной электромагнитной волной. Проведены измерения компонент электрического поля ПЭВ вне плазмы, экспериментально получены значения плотности плазмы и ее пространственные распределения. В программе CST Studio Suite создана численная модель, позволяющая исследовать поле ПЭВ как внутри, так и снаружи плазменного столба. С увеличением давления в 20 раз наблюдается значительное уменьшение доли энергозаклада на образование пары электрон-ион, что наряду с ростом концентрации электронов приводит к “вытеснению” поля ПЭВ — изменению отношения энергии ПЭВ в плазме и вакууме с $W_{\text{pl}}/W_{\text{vac}} = 0.25$ до $W_{\text{pl}}/W_{\text{vac}} = 0.04$. Измеренные радиальные профили плотности плазмы с увеличением давления демонстрируют изменение от столбовидного вида до неоднородного с провалом на оси трубки. Профиль плотности определяется распределением электрического поля, а также процессами амбиполярной диффузии и объемной рекомбинации. Возбуждение стоячей поверхностной волны на плазменном столбе позволило детально исследовать продольную E_z и радиальную E_r компоненты электрического поля ПЭВ, сдвинутые друг относительно друга на 180° . Достаточно высокое значение КСВН приводит к образованию модуляции плотности плазмы вдоль столба, максимумы и минимумы которой совпадают с максимумами и минимумами продольной компоненты E_z . Установлено, что время формирования модулированной структуры близко к характерному времени диффузии, а степень модуляции растет с ростом давления и может достигать $n_{\text{emax}}/n_{\text{emin}} = 5$.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РЦНИ, проект № 20-5804019 Бел_мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schluter H., Shivarova A. // Physics Reports. 2007. V 443. № 4–6. P. 121–255. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.12.006>
2. Sommerfeld A. // Ann. der Physik und Chem. 1899. Vol. 67. № 2. P. 233.
3. Borges C.F.M., Airolidi V.T., Corat E.J., Moisan M., Schelz S., Guay D. // Journal of Applied Physics. 1996. V. 80. № 10. <https://doi.org/10.1063/1.363600>
4. Moisan Michel, Karim Boudam, Denis Carignan, Danielle Kéroack, Pierre Levif, Jean Barbeau, Jacynthe Séguin, et al. // The European Physical Journal Applied Physics. 2013. V. 63. № 1. P. 10001. <https://doi.org/10.1051/epjap/2013120510>
5. Istomin E.N., Karfidov D.M., Minaev I.M., Rukhadze A.A., Tarakanov V.P., Sergeichev K.F., Trefilov A.Yu. // Plasma Physics Reports. 2006. V. 32, № 5. P. 388–400. <https://doi.org/10.1134/S1063780X06050047>
6. Zhao Jiansen, Zhen Sun, Yuxiang Ren, Lu Song, Shengzheng Wang, Wei Liu, Zhe Yu, and Yuhuan Wei. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2019. V. 52. № 29. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab1b0a>
7. Moisan M., Zakrzewski Z. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1991. V. 24. P. 1025. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/24/7/001>
8. Moisan M., Shivarova A., Trivelpiece A.W. // Plasma Phys. 1982. V. 24. № 11. P. 1331. <https://doi.org/10.1088/0032-1028/24/11/001>
9. Margot-Chaker J., Moisan M., Chaker M., Glaude V.M.M., Lauque P., Paraszczyk J., Sauve G. // J. Appl. Phys. 1982. V. 66. № 9. P. 4134. <https://doi.org/10.1063/1.343998>
10. Zhelyazkov I., Benova E., Atanassov V. // Journal of Applied Physics. 1986. V. 59. № 5. P. 1466–1472. <https://doi.org/10.1063/1.336501>
11. Trivelpiece A.W. // The DP degree Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, 1958.
12. Rogers J., Asmussen J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1982. V. PS-10. № 1. P. 11. [https://doi.org/0093-3813/82/0300-0011\\$00.75](https://doi.org/0093-3813/82/0300-0011$00.75)
13. Wolinska-Szatowska J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1988. V. 21. № 6. P. 937. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/21/6/012>
14. Rakem Z., Leprince P., Marec J. // Rev. Phys. Appl. (Paris). 1990. V. 25. № 1. P. 125. <https://doi.org/10.1051/rphysap:01990002501012500>
15. Жуков В.И., Карфидов Д.М. // Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 3. С. 260–269. <https://doi.org/10.1134/S1063780X22601651>
16. Солнцев Г.С., Булкин П.С., Мокеев М.В., Цветкова Л.И. // Вестник Московского университета. 1997. Сер. 3. № 6. С. 36.
17. Moisan M., Beaudry C., Leprince P. // Physics Letters A. 1974. V. 50. № 2. P. 125. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(74\)90903-7](https://doi.org/10.1016/0375-9601(74)90903-7)
18. Жуков В.И., Карфидов Д.М., Сергейчев К.Ф. // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 8. С. 1. <https://doi.org/10.31857/S0367292120080120>
19. Moisan M., Levif P., Nowakowska H. // International Workshop “Microwave Discharges: Fundamentals and Applications” (MD): 3–7 September 2018, Zvenigorod, Russia: Proceedings. Moscow: Yanus-K, 2018.

20. *Cotrino J., Gamero A., Sola A., Saez M., Colomer V., Sanz-Medel A., Uria J.E.* // *Mikrochimica Acta*. 1989. V. 99. № 3–6. P. 179.
<https://doi.org/10.1007/BF01244672>
21. *Moisan M., Ferreira C.M., Hajlaoui Y., Henry D., Hubert J., Pantel R., Ricard A., Zakrzewski Z.* // *Revue de Physique Appliquée*. 1982. V. 17. № 11. P. 707–27.
<https://doi.org/10.1051/rphysap:019820017011070700>
22. *Cotrino J., Gamero A., Sola A., Colomer V.* // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1988. V. 21. № 9. P. 1377–1383.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/21/9/010>
23. *Кондратенко А.Н.* // Поверхностные и объемные волны в ограниченной плазме. М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 17.
24. *Nowakowska H., Lackowski M., Moisan M.* // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2020. V. 48. № 6. P. 2106.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2020.2995475>
25. *Moisan M., Nowakowska H.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2018. V 27. № 7. 073001.
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/aac528>
26. *Moisan M., Ganachev I.P., Nowakowska H.* // *Physical Review E*. 2022. V. 106. № 4. 045202.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.045202>
27. *Ferreira C.M., Moisan M.* // *Physica Scripta*. 1988. V. 38. № 3. P. 382–399.
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/38/3/008>