

# СТАЦИОНАРНЫЙ НИТЕВИДНЫЙ СВЧ-РАЗРЯД ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ АРГОНА

*А. А. Скворода\*, А. В. Звонков*

*Российский научный центр «Курчатовский институт»  
123182, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 26 июня 2000 г.

Получен стационарный разряд в виде нити диаметром около 1 мм в кварцевой трубке диаметром 16 мм, проходящей через широкую стенку стандартного волновода, при 50 Вт СВЧ-мощности на частоте 7 ГГц в Ar при давлении 300 мм рт. ст. При увеличении мощности и давления происходит постепенное увеличение количества нитей от 1 до 7. Нити параллельны и ориентированы вдоль электрического поля волны. Они располагаются симметрично относительно экваториальной плоскости трубки. Расстояние между нитями уменьшается с увеличением их числа. Возникающие из-за ионизационно-перегревной неустойчивости стационарные нити могут быть качественно объяснены на основе интерференционно-равновесной модели, если предположить, что разряд организуется таким образом, чтобы обеспечить максимум поглощаемой мощности.

PACS: 52.80.Pi

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что СВЧ-разряд в газе при высоком давлении структурируется. Наблюдается большое разнообразие структур, но основными можно считать две — шарообразную и нитевидную. Широко известны такие структуры получили после работ П. Л. Капицы, в которых, в частности, способность СВЧ-разряда в атмосфере принимать сфероидную форму привлекалась для объяснения природного феномена шаровой молнии [1]. По-видимому, впервые нитевидная структура СВЧ-разряда наблюдалась в работе [2]. На стенках сферической колбы, наполненной аргоном и помещенной в СВЧ-поле радара, стационарно наблюдалось более десятка длинных параллельных ярко свящихся нитей. Красота и необъясненность наблюдаемого явления побудили Ховатсона привести изображение разряда из работы [2] в своей монографии по теории газового разряда [3]. Позже нити наблюдались во многих работах по импульсным СВЧ-разрядам (см. ссылки в работах [4–6]).

Возникновение нитей возможно по двум причинам. Первая связана с развитием ионизационно-

перегревной неустойчивости (ИПН), приводящей сразу к образованию длинных нитей. Вторая связана с развитием СВЧ-стримеров, когда нить вытягивается постепенно. Последняя причина характерна для импульсных разрядов большой мощности и не проявляется в стационарных маломощных разрядах, которым посвящена настоящая статья.

Теоретическое исследование линейной стадии ИПН было проведено в [7]. Было показано, что рост малых возмущений на однородном фоне в СВЧ-разряде начинается при таких давлениях газа, когда частота электромагнитных волн  $\omega$  становится меньше частоты столкновений электронов с нейтральными частицами газа  $\nu$ . Характерный пространственный масштаб неустойчивости оценивался величиной порядка среднего геометрического длины волны в вакууме и характерной диффузионной длины. Начальная нелинейная стадия ИПН носит взрывной характер [8]. Более сложный и совершенно неизученный вопрос — это вопрос о существовании стационарного решения, отвечающего многонитевой структуре. Эксперименты, описанные в [2] и обсуждаемые в настоящей работе, показывают, что такие решения существуют.

В разд. 2 дано описание экспериментальной установки и использованной диагностики. В разд. 3

\*E-mail: skovorod@nfi.kiae.su

приводятся экспериментальные результаты, наиболее интересными из которых мы считаем получение стационарной одиночной нити и наблюдение скачкообразного увеличения числа стационарных нитей при увеличении давления аргона и СВЧ-мощности. При этом нити почти параллельны и ориентированы вдоль электрического поля волны. Расположение нитей относительно экваториальной плоскости разрядной трубки (см. ниже) оказывается симметричным. В разд. 4 обсуждаются полученные результаты на основе равновесной теории СВЧ-разрядов в атмосфере с привлечением гипотезы о самоорганизации. В действительности плазма в нитях неравновесна, но мы предполагаем, что некоторые качественные черты эксперимента могут быть объяснены на основе равновесной модели.

**2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА**

На рис. 1 показана волноводная схема установки и конструкция разрядной камеры. Стационарное СВЧ-излучение с частотой 7 ГГц и максимальной мощностью 0.5 кВт подводилось к разрядной камере стандартным волноводом 15 × 35 мм<sup>2</sup>. Разрядная камера представляла собой герметизированную кварцевую трубку с внутренним диаметром 16 мм, толщиной стенки 1.5 мм и длиной 160 мм, пронизывающую волновод по центру в направлении узкой стенки, т.е. в направлении электрического поля волны. Снаружи волновода кварцевая трубка находилась в медной трубке с внутренним диаметром 19.2 мм, которая охлаждалась водой. В медной трубке были сделаны многочисленные маленькие отверстия для визуального наблюдения свечения плазмы за пределами волновода. На торцах трубки расположены герметичные оптические окна, через которые проводилась съемка разряда, и отверстия для откачки и напуска газа. В волновод подавался интенсивный поток воздуха для охлаждения расположенной внутри волновода части кварцевой трубки. Разряд осуществлялся в спокойном аргоне при давлении 0.05–1 атм.

В описываемых экспериментах проводилось измерение падающей, поглощенной и отраженной СВЧ-мощности с использованием направленных ответвителей и calorиметрических измерителей СВЧ-мощности МЗ-47, МЗ-71. Свечение регистрировалось бытовой видеокамерой с последующей покадровой оцифровкой полученных изображений. Съемка велась с выдержкой 1/2000 и сильным диафрагмированием, что устраняло засветку

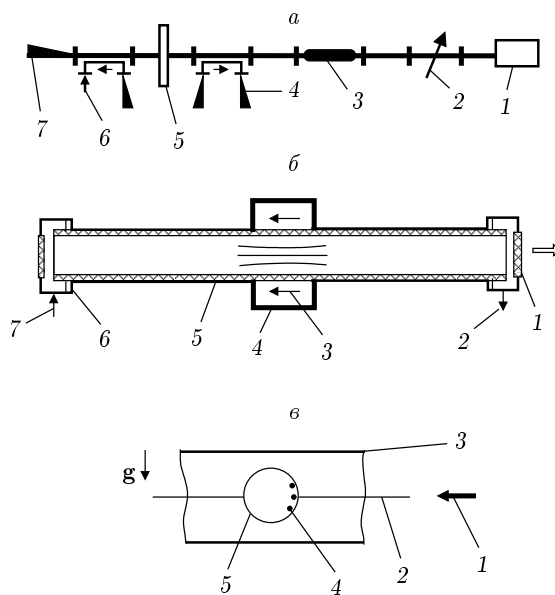
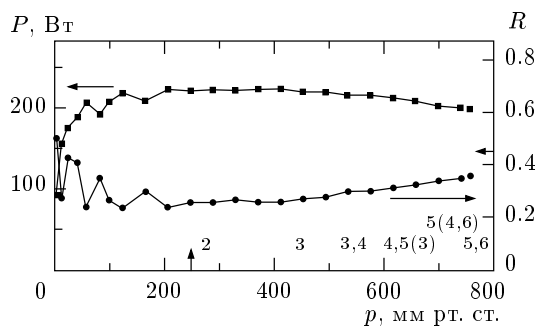


Рис. 1. *a* — Волноводная схема установки: 1 — клистрон, 2 — аттенуатор, 3 — ферритовый циркулятор, 4 — ответвитель отраженной волны с calorиметрическим измерителем мощности, 5 — разрядная камера, 6 — ответвитель прошедшей волны с кристаллическим детектором, 7 — calorиметрический измеритель прошедшей мощности. *б* — Волноводная схема разрядной камеры: 1 — торцевое окно и направление видеосъемки, 2 — откачка, 3 — направление электрического поля волны, 4 — стандартный волновод, 5 — медная трубка, 6 — кварцевая трубка с герметизацией, 7 — напуск газа. Показан вид разряда, содержащего три нити. *в* — Вид на торцевое окно: 1 — направление распространения СВЧ-мощности от клистрона, 2 — экваториальная плоскость разрядной камеры, 3 — волновод, 4 — три нити разряда, 5 — кварцевая трубка, *g* — направление силы тяжести

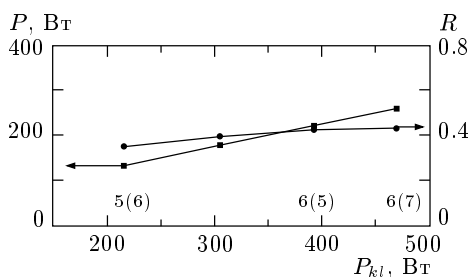
изображения и увеличивало глубину резкости. Временное поведение разряда контролировалось с помощью кристаллического детектора и ФЭУ.

**3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

На рис. 2 приведены зависимости поглощенной в плазме мощности и коэффициента отражения от давления аргона. Цифрами отмечены моменты появления соответствующего числа нитей. Покадровый просмотр непрерывных видеозаписей показал, что в течение одного-двух кадров (20–50 мс) число нитей всегда остается постоянным. С ростом давления число нитей в разных кадрах может быть различным.



**Рис. 2.** Зависимости поглощенной мощности  $P$  и коэффициента отражения  $R$  от давления  $p$ . Мощность клистрона 325 Вт. Стрелками на осях отмечены момент появления нитей и коэффициент отражения без плазмы. Цифры внизу — количество нитей при соответствующих им давлениях



**Рис. 3.** Зависимости поглощенной мощности  $P$  и коэффициента отражения  $R$  от мощности клистрона  $P_{kl}$ . Давление аргона 660 мм рт. ст.

Наличие на рис. 2 рядом двух цифр указывает на наблюдение в разные моменты времени разного количества нитей приблизительно с равной вероятностью. В скобках указано количество нитей, которое наблюдается редко.

Момент появления нитей с ростом давления находится в хорошем соответствии с предсказанием теории ИПН  $\omega \sim \nu$ , если учесть уменьшение плотности газа внутри нити из-за нагрева. С ростом давления количество нитей увеличивается. При этом поглощение и отражение волн меняются слабо. Отметим, что измерения прошедшей мощности с помощью быстрого кристаллического детектора не показали исчезновения поглощения при временных «перескоках» с одного количества нитей на другое.

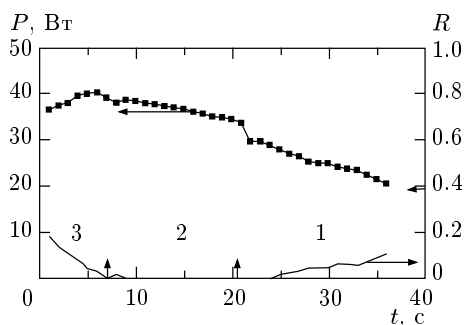
На рис. 3 показаны зависимости поглощенной мощности, коэффициента отражения и количества нитей от мощности клистрона. При максимальной мощности наблюдалось максимальное количество нитей — 7.

**Рис. 4.** Отдельные видеок cadры с изображением нитей. Съемка под углом  $10^\circ$  к направлению, показанному на рис. 1в, прямой линией отмечены экваториальная плоскость волновода и разрядной трубки, две вертикальных дуги — срез волновода по малому размеру 15 мм

На рис. 4 собраны отдельные кадры видеосъемки с количеством нитей от двух до семи. Съемка велась через оптическое окно (см. рис. 1б) под углом  $10^\circ$  к направлению, показанному на рис. 1в. Видно, что расположение нитей относительно экваториальной плоскости, показанной на рис. 1в и рис. 4, подчиняется симметрии, причем при нечетном числе нитей центральная нить всегда располагается на экваториальной плоскости. Нити незначительно выходят за пределы волновода и исчезают, немного расходясь. С увеличением числа нитей они располагаются все более тесно по периметру той стороны трубки, которая обращена к падающей СВЧ-мощности. На рис. 5 показан кадр с шестью нитями, снятый под углом  $0^\circ$ , т. е. строго вдоль оси трубки. Излучение падает на плазму справа. Двоение изображения нитей вызвано эффектом отражения от стенок кварцевой трубки. Анализируя рис. 4 и 5, можно получить характерные геометрические параметры нитей: диаметр 1–1.5 мм, длина 15–25 мм, расстояние между нитями 3–10 мм; ориентированы нити вдоль электрического поля, отстоят от стенки на расстоянии порядка диаметра нити.

С целью получения одной нити был поставлен специальный эксперимент, поскольку потребовался разряд на пороге погасания при низком давлении аргона и при малом уровне мощности клистрона. Схема эксперимента была такова. При давлении 300 мм рт. ст. зажигался разряд, и мощность клистрона понижалась до 49 Вт. После этого организовывалась медленная откачка газа и регистрация велась непрерывно вплоть до погасания разряда. На рис. 6 пока-

**Рис. 5.** Кадр, снятый под углом  $0^\circ$  (см. рис. 16). Радиус кривизны равен радиусу трубки 8 мм



**Рис. 6.** Изменение поглощенной мощности, коэффициента отражения и числа нитей во время эксперимента. Стрелками отмечены моменты изменения числа нитей и коэффициент отражения от разрядной камеры без плазмы. Аргон, 300 мм рт. ст., 50 Вт

зан результат такого эксперимента. В течение 20 с удавалось наблюдать одиночную нить, расположенную в экваториальной плоскости. При этом имеет место практически полное согласование разрядной камеры с падающим СВЧ-излучением и ступенчатое возрастание поглощения в момент удвоения нитей. Увеличение поглощения при утроении нитей не столь ярко выражено. Для существования одной нити достаточно 20–30 Вт поглощенной СВЧ-мощности. Увеличенная фотография одной нити показана на рис. 7. Измерения временной динамики интенсивности свечения одиночной нити с помощью ФЭУ показали ее полную стационарность.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперимент доказывает существование стационарного разряда в форме тонких нитей, вытянутых вдоль электрического поля волны **E** и расположенных возле стенки, на которую падает СВЧ-волна. Известна первопричина возникновения этих нитей — ИПН. Но надо объяснить причину устойчивости нитей, их визуальные геометрические

**Рис. 7.** Увеличенное изображение одиночной нити под углом  $0^\circ$ . Линия показывает положение внутренней стенки кварцевой трубки. ореол справа — эффект отражения от стенок. Параметры те же, что для рис. 6

характеристики, т. е. описать, хотя бы качественно, стационарный нитевидный СВЧ-разряд.

Хотя сильная пространственная неоднородность параметров плазмы нитевидного СВЧ-разряда не дает оснований использовать равновесную теорию СВЧ-разрядов, тем не менее мы постараемся получить из нее качественное объяснение наблюдаемых явлений, оставляя точный количественный анализ неравновесной теории.

Ориентация нитей вдоль электрического поля объясняется необходимостью протекания разогревающего нить тока. В нашем эксперименте ток на концах нитей замыкается токами смещения на стенки волновода через конденсаторы, образованные кварцевой трубкой. Поэтому вдоль нити напряженность электрического поля и ток постоянны. Об этом свидетельствует постоянство интенсивности свечения вдоль нити в пределах волновода. Поэтому при обсуждении мы используем модель бесконечной нити в поле плоской СВЧ-волны с линейной поляризацией вдоль нитей.

##### 4.1. Однородный цилиндр в поле плоской волны

Может ли равновесная модель разряда предсказать какой-либо характерный размер для нити на пороге погасания? Для ответа на этот вопрос проанализируем задачу нагрева и остывания бесконечного и однородного цилиндра в поле плоской электромагнитной волны, поляризованной вдоль цилиндра.

Нагрев может быть проанализирован с использованием давно решенной классической задачи рассе-

яния на бесконечном цилиндре (см., например, монографии [9–11]). Специфика нашей задачи состоит только в свойствах среды — плазмы, образующей цилиндр. Комплексный показатель преломления полностью определяется равновесной температурой плазменного цилиндра [12].

Представим мощность нагрева цилиндра на единицу длины в виде

$$P = (\sigma_t - \sigma_s)S, \quad (1)$$

где  $S$  — поток падающей мощности в плоской волне,  $\sigma_t - \sigma_s$  — сечение поглощения,  $\sigma_s$  — сечение рассеяния. Для сечений получены следующие выражения:

$$\sigma_t = \frac{4}{k} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \operatorname{Re} c_n, \quad \sigma_s = \frac{4}{k} \sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2, \quad (2)$$

где  $k$  — вакуумный волновой вектор и

$$c_n = \left[ 1 + i \frac{J_n(N\xi)N'_n(\xi) - NN_n(\xi)J'_n(N\xi)}{J_n(N\xi)J'_n(\xi) - NJ_n(\xi)J'_n(N\xi)} \right]^{-1}. \quad (3)$$

В (3)  $N$  — показатель преломления,  $J_n, N_n$  — функции Бесселя и Неймана,  $\xi = ka$ ,  $a$  — радиус цилиндра, штрих означает производную по аргументу.

Применим полученные формулы к расчету нагрева аргоновой плазмы. Для этого используем следующие равновесные зависимости, необходимые для получения  $N$ : частота столкновений электронов с нейтралами

$$\nu[\text{с}^{-1}] = 5.74 \cdot 10^{11} \frac{T_0}{T} \sqrt{T} \frac{p}{760},$$

температура цилиндра  $T$  и вне его  $T_0$  в  $10^3$  К, давление газа  $p$  в мм рт. ст.; концентрация электронов [12]

$$n_e[\text{см}^{-3}] = 1.54 \cdot 10^{20} \sqrt{\frac{p}{760}} \exp\left(-\frac{92.88}{T}\right).$$

На рис. 8 показаны рассчитанные зависимости безразмерного сечения поглощения

$$q = \frac{\sigma_t - \sigma_s}{2a}$$

и параметра  $|Nka| = |k_1a|$ , характеризующего скинирование поля внутри цилиндра, от температуры при фиксированном радиусе цилиндра  $a = 2$  мм для используемой в эксперименте длины волны 4.2 см (частота 7 ГГц). Видно, что максимум нагрева достигается при температуре, при которой параметр скинирования порядка единицы, т. е. размер спада поля внутри цилиндра равен радиусу. Определяя

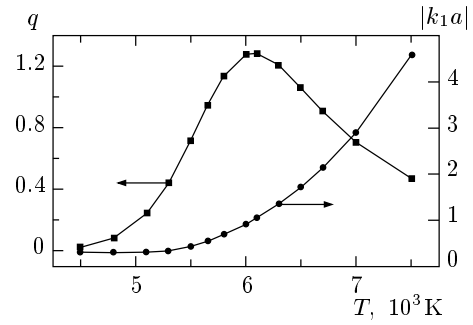


Рис. 8. Расчетные зависимости безразмерного сечения поглощения мощности в цилиндре и параметра скинирования поля в нем от температуры при радиусе цилиндра 0.2 см; Ar, 300 мм рт. ст., 7 ГГц

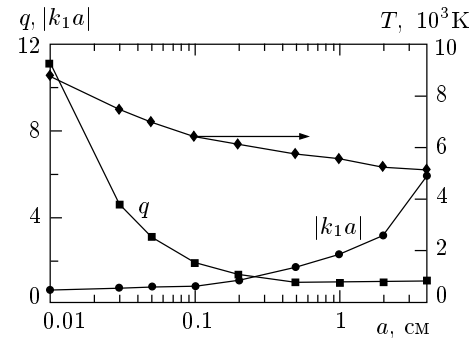


Рис. 9. Расчетная зависимость максимального сечения поглощения  $q$  от радиуса цилиндра  $a$ . Приведены температура и параметр скинирования, соответствующие максимальному значению  $q$ . Параметры те же, что для рис. 8

при каждом значении радиуса цилиндра  $a$  максимальное значение  $q$  и соответствующее ему значение температуры, построим зависимость, приведенную на рис. 9. На этом же рисунке показаны значения параметра скинирования для максимальных  $q$ . Видно, что с уменьшением радиуса происходит увеличение температуры и сечения поглощения при сохранении параметра скинированности близким к единице.

Плотность потока тепла с цилиндра, окруженно-го стенкой радиусом  $R_0$  с фиксированной температурой  $T_0$ , равна

$$Q = \frac{\lambda(T - T_0)}{a \ln(R_0/a)},$$

где  $\lambda[\text{эрг/см} \cdot \text{с} \cdot \text{К}] = 4 \cdot 10^{-4} \sqrt{T/T_0}$  — коэффициент теплопроводности аргона. Понятно, что нить может находиться в тепловом равновесии  $qS = Q$  только возле стенки, когда возможен достаточный сброс тепла. При уменьшении мощности падающей волны

$S$ , т. е. при приближении к порогу погасания, тепловой баланс может удовлетворяться путем уменьшения радиуса цилиндра. При этом в рассматриваемой модели не появляется каких-либо ограничений на диаметр нити. Эта ситуация коренным образом отличается от сферического СВЧ-разряда, где подобная модель приводит к появлению характерного радиуса плазменного образования [13], совпадающего с предсказанным ранее Капицей [1].

#### 4.2. Неоднородный цилиндр в поле цилиндрической волны

Для определения минимального радиуса цилиндра при погасании разряда должно быть проведено самосогласованное решение тепловой и электродинамической задач. При этом может быть использован тот факт, что при тонком цилиндре ( $\xi \ll 1$ ) в (3) достаточно учитывать только нулевую гармонику ( $n = 0$ ), т. е. решать задачу с цилиндрической симметрией.

Система уравнений имеет стандартный вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \lambda \frac{dT}{dr} \right) + \sigma E^2 &= 0, \\ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dE}{dr} \right) + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon E &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\sigma(T) = \frac{1}{4\pi} \frac{\omega_{pe}^2(T) \nu(T)}{\omega^2 + \nu^2(T)}$$

— проводимость плазмы,

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + i\nu)}$$

— диэлектрическая проницаемость,  $\omega_{pe}$  — плазменная частота. Предполагается, что электрическое поле направлено вдоль разряда. Уравнение теплопроводности может быть заменено условием взаимной компенсации теплового потока и потока электромагнитной энергии, определяемого вектором Пойнтинга:

$$-\lambda \nabla_r T + S_r = 0,$$

где  $\lambda$  — теплопроводность,  $r$  — радиальная координата,  $S_r$  — радиальный поток энергии. Граничными условиями для системы (4) служат температура  $T_0$  на стенке радиусом  $R_0$  и падающий из бесконечности поток цилиндрической электромагнитной волны [14]. На оси разряда  $\nabla_r T = S_r = 0$ .

На рис. 10 показан результат характерного расчета возле порога погасания, показывающий, что существуют стационарные решения задачи с нитью толщиной менее миллиметра. На рис. 11 показаны зависимости радиуса нити и коэффициента отражения от нити от падающей мощности при различных

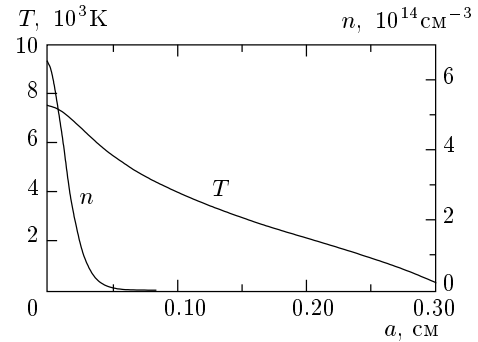


Рис. 10. Расчетные профили плотности электронов плазмы  $n$  и температуры  $T$  в пространстве от оси до стенки ( $R_0 = 0.3$  см) при комнатной температуре; Ar, 760 мм рт. ст., падающая мощность на единицу длины нити 100 Вт/см, 7 ГГц

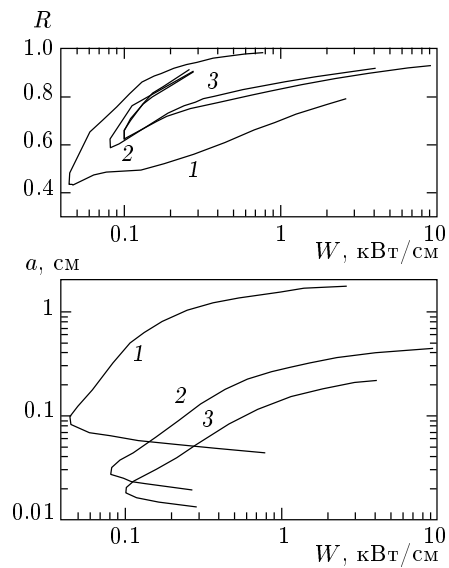


Рис. 11. Расчетные зависимости коэффициента отражения  $R$  и радиуса нити  $a$  от падающей на единицу длины нити мощности  $W$  при трех радиусах стенки: 1 — 2 см, 2 — 0.5 см, 3 — 0.3 см. Остальные параметры те же, что для рис. 10

расстояниях до стенки. Видно существование порога погасания, где размер нити может быть близким к наблюдаемому. Близким к экспериментальному значению оказывается и уровень пороговой мощности. С приближением к порогу улучшается согласование плазмы с падающей мощностью, что тоже наблюдается в эксперименте. Таким образом, простейшая модель достаточно хорошо предсказывает качественные характеристики разряда с одной нитью при условии задания расстояния от нити до стенки. Вопрос о самосогласованном установлении этого

расстояния, видимо, не может быть решен в рамках равновесной теории.

### 4.3. Множественность нитей

Вопрос о причинах изменения числа нитей является наиболее сложным. Нам представляется, что это явление вызывается интерференцией рассеянных нитями электромагнитных полей.

Рассмотрим пример с двумя нитями. В отличие от ситуации с одной нитью, каждая из двух нитей нагревается не только падающей волной, но и рассеянной от соседней нити. При этом изменение расстояния между нитями приводит к изменению фазы, с которой интерферируют эти две волны на нити. Таким образом, должно существовать такое расстояние между нитями, при котором мощность, поглощаемая двумя нитями, оказывается максимальной. Достаточно просто оценить это расстояние. С учетом того, что необходимая разность фаз должна составить  $2\pi$  и при рассеянии происходит изменение фазы приблизительно на  $\pi$ , расстояние между нитями должно составлять половину длины волны в вакууме. Важно, что в данном случае мощность поглощения превышает мощность, которая получилась бы при простом удвоении мощности, поглощаемой одиночной нитью. Поэтому при определенном уровне подводимой СВЧ-мощности состояние с двумя нитями оказывается энергетически более выгодным, чем с одной нитью. Покажем, что такая же ситуация сохраняется и для большего числа нитей.

Дифракция линейно поляризованной плоской электромагнитной волны на однородных бесконечных цилиндрах радиусом  $a$ , которые расположены на одинаковом расстоянии  $L$  в плоскости, перпендикулярной к падающей волне, хорошо изучена [10]. Воспользуемся упрощенным выражением, которое может быть получено из общих формул в приближении тонких цилиндров ( $ka \ll 1$ ), расположенных на достаточно больших расстояниях ( $a \ll L$ ). При этом мы учтем только нулевую гармонику ( $n = 0$  в формуле (3)) и первый порядок дифракции, т. е. пренебрегаем рассеянием рассеянных волн. Для коэффициента  $K$ , на который должно быть умножено безразмерное сечение поглощения для одной нити  $q$ , получаем соотношение

$$K \approx \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left| 1 + {}^1c_0 \sum_{i=1}^m \varepsilon H_0^{(1)}(|i-j|kL) \right|^2, \quad (5)$$

$${}^1c_0 = - \left\{ 1 + \frac{2i}{\pi} \left[ \frac{J_0(N\xi)}{N\xi J_1(N\xi)} + \ln \left( \frac{\xi}{2} \right) \right] \right\}^{-1}.$$

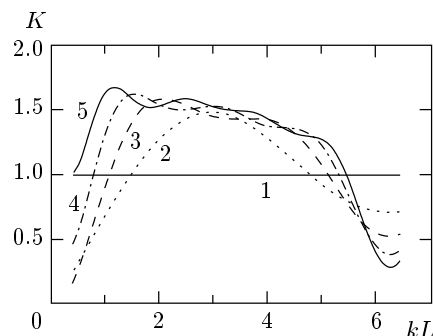


Рис. 12. Расчетные зависимости коэффициента  $K$  (5) от расстояния между нитями: число нитей от 1 до 5; Ar, 300 мм рт. ст., 7 ГГц,  $T = 6500$  К,  $a = 0.2$  см

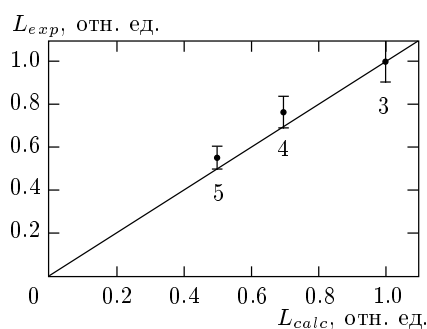


Рис. 13. Сравнение рассчитанного и измеренного относительного изменения расстояния между нитями. Цифры — количество нитей. Нормировка проведена для трех нитей

Здесь  $\varepsilon = 0$  при  $i = j$  и  $\varepsilon = 1$  во всех остальных случаях,  $m$  — число нитей,  $H_0^{(1)}$  — функция Ханкеля нулевого порядка. На рис. 12 приведен пример расчета зависимости коэффициента  $K$  от расстояния между нитями при различном количестве нитей. Видно, что максимальное значение  $K_{max}$  существенно превышает единицу. Значение  $K_{max}$  увеличивается с увеличением количества нитей. Расстояние между нитями, при котором реализуется  $K_{max}$ , существенно уменьшается с увеличением числа нитей. Это находится в качественном согласии с экспериментом. Об этом свидетельствует рис. 13, где показано сравнение рассчитанного и измеренного относительного изменения расстояния между нитями с ростом числа нитей. Достаточно хорошее согласие достигается при 3–5 нитях. Совпадение нарушается при двух нитях и большом количестве нитей, так как в последнем случае снижается точность расчета по формуле (5) из-за нарушения приближения  $a \ll L$ .

Рисунок 12 позволяет дать качественное объяснение наблюдаемых явлений. С ростом вкладываемой в плазму энергии, который происходит при увеличении падающей СВЧ-мощности или при уменьшении проводимости (увеличении давления газа), увеличение количества нитей при сокращении расстояния между ними позволяет поглотить большую мощность. Поскольку при достаточно большом количестве нитей отличие в «выгоде» для близких по количеству нитей разрядов оказывается незначительным (кривые на рис. 12 пересекаются), могут возникать «перескоки».

Для получения количественных характеристик должны быть решены полные электродинамическая и тепловая задачи с учетом неравновесности плазмы и геометрии разрядной камеры, т. е. наличия волновода и достаточно толстой кварцевой трубки. Надеемся, что это позволит объяснить существенную разницу между предсказываемым по формуле (5), (приблизительно 2 см) и наблюдаемым в эксперименте (около 0.8 см) расстоянием между двумя нитями. Хорошо изучены механизмы, вызывающие распространение плазменного фронта по направлению к источнику мощности [12]. Поэтому естественно, что нити концентрируются возле поверхности, которая препятствует их движению. Решение полной задачи для неравновесного разряда позволит самосогласованно определить расстояние от нити до стенки.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стационарный СВЧ-разряд в Ar в кварцевой трубке, проходящей через волновод, принимает форму параллельных нитей, ориентированных вдоль электрического поля волны. Стационарные нити наблюдаются в спокойной атмосфере аргона у стенки, обращенной к источнику СВЧ-мощности. При организации конвективного движения газа внутри разрядной трубки образуется разряд типа «клубок нитей».

Стационарная нить имеет диаметр около 1 мм. Количество стационарных нитей увеличивается от 1 до 7 при увеличении давления (начиная с 100 мм рт. ст.) и падающей мощности (начиная с 20 Вт). С увеличением числа нитей расстояние между нитями уменьшается. Нити располагаются симметрично относительно экваториальной плоскости разрядной трубки. Для грубой оценки поглощаемой плазмой мощности можно количество наблюдаемых нитей умножить на 30 Вт. Эксперименты в воздухе оказались невозможными при больших давлениях газа из-за плавления кварцевой трубки.

Некоторые свойства стационарного нитевидного разряда в аргоне при высоком давлении могут быть качественно объяснены на основе интерференционно-равновесной модели в предположении, что разряд организуется таким образом, чтобы обеспечить максимум поглощаемой мощности. Получение количественного совпадения модели с экспериментом требует решения полной самосогласованной электродинамической и тепловой задач с учетом неравновесности разряда и геометрии волновода.

Авторы благодарят Г. М. Батанова, В. Б. Гильденбурга и И. В. Соколова за интерес к работе и ее обсуждение. Большую помощь в проведении экспериментов оказал П. М. Косарев.

## ЛИТЕРАТУРА

1. П. Л. Капица, ДАН СССР **101**, 245 (1955).
2. J. Allison, A. L. Gullen, and A. Zavody, Nature **193**, 156 (1962).
3. А. М. Ховатсон, *Введение в теорию газового разряда*, Атомиздат, Москва (1980).
4. Г. В. Богомолов, Ю. Д. Дубровский, А. А. Летунов, В. Д. Песков, ЖЭТФ **93**, 519 (1987).
5. А. Л. Вихарев, В. Б. Гильденбург, С. В. Голубев и др., ЖЭТФ **94**(4), 136 (1988).
6. А. Л. Вихарев, А. М. Горбачев, А. В. Ким и др., *Физика плазмы* **18**, 1064 (1992).
7. В. Б. Гильденбург, А. В. Ким, *Физика плазмы* **6**, 904 (1980).
8. А. В. Ким, Г. М. Фрайман, *Физика плазмы* **9**, 613 (1983).
9. Р. Кинг, У. Тай-Цзунь, *Рассеяние и дифракция электромагнитных волн*, Изд-во иностр. лит., Москва (1962).
10. Е. А. Иванов, *Дифракция электромагнитных волн на двух телах*, Наука и техника, Минск (1968).
11. В. В. Никольский, Т. И. Никольская, *Электродинамика и распространение радиоволн*, Наука, Москва (1989).
12. Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда*, Наука, Москва (1987).
13. А. А. Скворода, ЖЭТФ **112**, 877 (1997).
14. А. В. Тимофеев, *Физика плазмы* **23**, 176 (1997).