

УДК 533.9.03;537.56

СТАЦИОНАРНЫЙ СВЧ РАЗРЯД В КВАЗИОПТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ

А. Л. Вихарев, О. А. Иванов, В. Е. Семенов, А. Н. Степанов

Приведены результаты исследования стационарного СВЧ разряда, зажигаемого в гелии в диапазоне давления $1 \ll p < 150 \text{ Torr}$ в квазиоптическом резонаторе. Измерены напряженности микроволнового электрического поля, необходимые для пробоя газа и поддержания разряда на частоте 35 ГГц . С помощью зондовых измерений и резонаторного метода определены концентрация N_e и температура электронов T_e в разрядной плазме, а также их пространственное распределение.

1. Изучению газового разряда, получаемого в сверхвысокочастотных электромагнитных полях, посвящено достаточно много работ (см., например, [^{1,2}]). Интерес к СВЧ разряду обусловлен в первую очередь широтой его практического применения (плазмохимия [³], газоразрядные лазеры [⁴]) вследствие наличия сильно неравновесных условий ($T_e \gg T_g$) в разрядной плазме. СВЧ разряд рассматривается также как один из возможных путей нагрева плазмы до термоядерных температур [⁵] и как способ создания радиоотражающих областей искусственной ионизации в атмосфере [⁶].

Исследования СВЧ разряда проводились в различных условиях локализации области пробоя (откачиваемый отрезок волновода, трубка, пересекающая волновод, открытый конец волновода, объемный резонатор). Для изучения СВЧ разряда в миллиметровом диапазоне электромагнитных волн, на наш взгляд, удобной является экспериментальная установка с применением открытого резонатора типа Фабри—Перо. Применение резонансной системы с высокой добротностью позволяет получать электрические поля большой напряженности с помощью сравнительно маломощного генератора. Импульсный СВЧ разряд в таких экспериментальных условиях был получен ранее в широком диапазоне давлений [⁷]. В работе [⁷] были измерены только пробойные характеристики, так как при возникновении разряда происходиластройка резонатора образующейся плазмой и нарушалось согласование с генератором. В непрерывном режиме работы СВЧ генератора возможно поддержание разряда с плотностью плазмы, перестраивающей резонатор на частоту порядка ширины резонансной кривой. Однако в этом случае электронную концентрацию N_e во время горения разряда можно увеличить, осуществляя плавную подстройку к частоте генератора длиной открытого резонатора. Например, в объемном цилиндрическом резонаторе регулируемой длины подобным путем были получены значения плотности плазмы $N_e \simeq (1 \div 10) N_{\text{cr}}$, где $N_{\text{cr}} = m\omega^2/4\pi e^2$ — критическая концентрация (разряд создавался в тонкой трубке на оси резонатора) [^{8,9}]. Конструктивные особенности открытого резонатора (легкость доступа к области разряда) позволяют предложить его для получения неравновесной плазмы с плавно меняющейся плотностью в различных плазменных исследованиях и прикладных задачах.

2. Настоящая работа посвящена изучению стационарного СВЧ разряда в гелии в открытом резонаторе в диапазоне миллиметровых волн. Схема установки приведена на рис. 1. Открытый резонатор, образован-

ный двумя круглыми сферическими зеркалами одинаковой кривизны, имел следующие размеры: диаметр зеркал $d = 15 \text{ см}$, радиус кривизны $R = 10 \text{ см}$, расстояние между зеркалами $L = 19 \text{ см}$. Резонатор помещался в вакуумную камеру с окнами для наблюдения и ввода диагностической аппаратуры. Генератор СВЧ колебаний (магнетрон) мощностью до 10 Вт на частоте $35,4 \text{ ГГц}$ соединялся с резонатором волноводным трактом, состоящим из направленных ответвителей, двух циркуляторов, конического рупора с линзой и сетки отверстий связи в одном из зеркал резонатора. В резонаторе возбуждался основной тип колебаний TEM_{00q} ($q = 45$). Настройка резонатора в резонанс осуществлялась перемещением одного из зеркал и контролировалась с помощью направленного ответвителя по уменьшению отраженного сигнала.

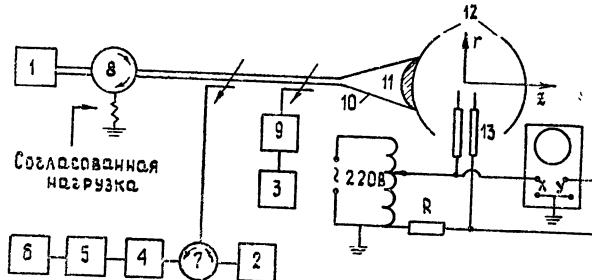


Рис. 1. Схема установки: 1 — магнетрон, 2 — кистронный генератор, 3 — спектр-анализатор С4-27, 4 — аттенюатор, 5 — волномер, 6 — измеритель мощности М4-3, 7, 8 — циркуляторы, 9 — проходной резонатор, 10 — рупор, 11 — линза, 12 — открытый резонатор, 13 — двойной зонд.

Из известных способов возбуждения открытого резонатора, для введения наибольшей мощности от магнетрона в резонатор, нами было выбрано перфорированное зеркало. Возбуждение осуществлялось системой из рупора и линзы. Этим достигалось согласование поля на входе (после линзы) с полем основной моды на поверхности зеркала. Перфорация на зеркале состояла из квадратной сетки отверстий (расстояние между ближайшими отверстиями 4 мм , радиус отверстий $1,55 \text{ мм}$, толщина зеркала 3 мм , число отверстий 260). Добротность резонатора находилась путем измерения ширины резонансной кривой с помощью спектра-анализатора С4-27, без разряда она равнялась $Q_0 = 5,1 \cdot 10^4$. При таком способе возбуждения удалось получить почти полное согласование ($\sim 90\%$) холодного (без разряда) резонатора с питающим трактом.

Среднеквадратичное значение напряженности электрического поля в центре резонатора определялось по формуле

$$E = [4\omega_0 W / \pi c \epsilon_0 L V 2RL (1 - L/2R)]^{1/2}. \quad (1)$$

Энергия, запасенная в резонаторе, W находилась из определения добротности: $Q = \omega_0 W / P_{\text{п}}$. Учитывая, что мощность потерь $P_{\text{п}}$ равна сумме поглощаемой в резонаторе P и теряемой из резонатора через систему связи $P_{\text{св}}$ мощности, а также свойство полностью согласованного резонатора ($P = P_{\text{св}}$), энергия, запасенная в резонаторе, определялась через измеряемые величины*:

$$\omega_0 W = 2QP/(2 - Q/Q_0), \quad (2)$$

* Формулу (2) можно вывести из точного расчета одномерного резонатора Фабри—Перо или эквивалентной схемы длинной линии, нагруженной колебательным контуром.

где Q — добротность нагруженного резонатора (без разряда $Q = Q_0$). Формулы (1) и (2) справедливы и для резонатора с плазмой, так как распределение электрического поля в резонаторе, возмущалось слабо (сдвиг резонансной кривой был мал по сравнению с разностью частот двух соседних собственных мод резонатора, а плотность плазмы N_e — мала по сравнению с критической N_{cr}).

Мощность, вводимая в резонатор, P определялась с помощью термисторного моста М4-3 путем измерения мощности отраженного сигнала (см. рис. 1). В вакуумную камеру, предварительно откаченную до давления 10^{-2} Torr, напускался гелий до требуемого давления из дьюара с жидким гелием, что обеспечивало чистоту рабочего газа не хуже 0,1%*.

3. Возникновение разряда в резонаторе регистрировалось визуально (по свечению) и по изменению уровня отраженного сигнала. В наших экспериментальных условиях разряд наблюдался в диапазоне давлений $1 \leq p \leq 150$ Torr. При высоких давлениях разряд возникал в нескольких соседних пучностях поля в центральной области резонатора и имел форму дисков. С понижением давления число пучностей с пробоем увеличивалось и достигало $\sim 10 \div 12$ при давлении $p \approx 10$ Torr, а при более низких давлениях разряд становился квазиоднородным.

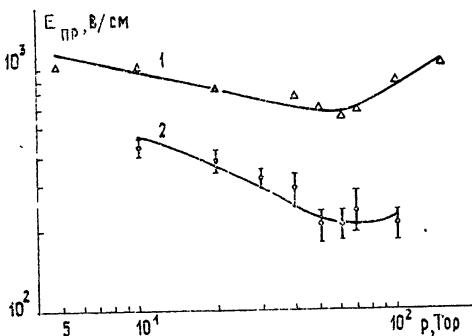


Рис. 2.

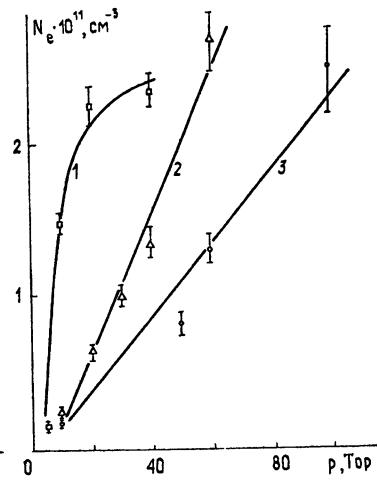


Рис. 3.

Рис. 2. Зависимость электрического поля, необходимого для пробоя (кривая 1) и поддержания разряда (кривая 2) от давления гелия.

*Рис. 3. Зависимость электронной концентрации от давления газа при постоянной вводимой в резонатор мощности; 1 — 1,5 Bт, 2 — 0,8 Bт, 3 — 0,5 Bт.

Для определения критических напряженностей электрического поля в зависимости от давления гелия в вакуумной камере в эксперименте регистрировалась минимальная вводимая в резонатор мощность P , при которой возникал разряд. По формулам (1) и (2) определялась соответствующая величина электрического поля в центре резонатора. Полученная зависимость пробойного поля $E_{пр}$ от давления p приведена на рис. 2 (кривая 1). Рост величины пробойного поля в области малых давлений ($p < 50$ Torr) имеет типичный характер для пробоя, когда основным механизмом потерь электронов является их диффузия из области волнового пучка (см., например, [1]).

После зажигания в резонаторе поддерживалось стационарное горение разряда. Ограничение лавинообразного роста электронной концентрации на некотором стационарном уровне в гелии вызывалось двумя

* Влияние примеси азота на свойства СВЧ разряда в гелии было рассмотрено в работе [10].

причинами: уменьшением частоты ионизации электронным ударом и увеличением рекомбинационных потерь. Образование плазмы в резонаторе приводило к его расстройке от фиксированной частоты магнетрона, в результате чего уменьшалась вводимая в резонатор мощность, следовательно, происходило снижение электрического поля. По измерениям добротности резонатора с плазмой и вводимой в резонатор мощности из формул (1) и (2) была получена зависимость электрического поля поддержания разряда E_p от давления гелия (кривая 2, рис. 2). Поддерживающее разряд поле значительно меньше пробойного, уменьшение поля связано со сменой характера диффузии электронов из области волнового пучка (от свободной к амбиполярной).

4. По сдвигу резонансной частоты резонатора была измерена плотность разрядной плазмы. Для этого одновременно с мощным сигналом в резонатор вводился частотно-модулированный сигнал от кристаллического генератора (рис. 1). Отраженный от резонатора зондирующий сигнал через направленный ответвитель и проходной резонатор подавался на спектр-анализатор С4-27. Проходной резонатор, настроенный на полосу зондирующего сигнала, применялся для уменьшения помех от магнетрона. На экране анализатора на зоне генерации кристаллона была видна перевернутая резонансная кривая, которая при возникновении разряда сдвигалась на некоторую величину Δf . По шкале анализатора измерялась с точностью $\pm 0,1 \text{ МГц}$ сдвиг максимума резонансной кривой и определялась добротность резонатора с плазмой Q .

Как известно, при концентрации электронов N_e , меньшей критической N_{cr} , и при малой расстройке резонатора по сравнению с разностью частот двух соседних типов колебаний сдвиг резонансной частоты Δf может определяться по теории возмущений [11]:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{1 + v^2/\omega_0^2} \frac{\int_{V_{pl}} N_e(r, z) E_k^2 dV}{2N_{cr} \int_{V_p} E_k^2 dV}, \quad (3)$$

где V_{pl} — объем плазмы, V_p — объем резонатора, E_k — напряженность зондирующего поля, v — частота столкновений электронов. Для нахождения пространственного распределения электронной концентрации вдоль оси резонатора были использованы две зондирующие моды с продольными индексами, различающимися на единицу:

$\text{TEM}_{00q+1}(f_1 = 36,2 \text{ ГГц})$ и $\text{TEM}_{00q+2}(f_2 = 37,1 \text{ ГГц})$.

Распределение поля в центре резонатора для моды TEM_{00q+2} совпадало с распределением поля мощной волны (мода TEM_{00q}), а для моды TEM_{00q+1} максимумы поля приходились на ее узлы. В присутствии разряда частотные сдвиги Δf для зондирующих мод слабо различались между собой (на 20%) при всех давлениях. Это свидетельствовало о квазиоднородном распределении плотности плазмы вдоль резонатора в отличие от светимости. Положение наблюдаемых областей светимости разряда определялось распределением поля мощного сигнала. Выявленное таким образом пространственное распределение электронной концентрации учитывалось для вычисления по формуле (3) величины N_{etm} в центре резонатора. Зависимость электронной концентрации N_{etm} от давления при постоянной вводимой в резонатор мощности (рис. 3) была получена, считая $N_e(r) = \text{const}$, а $N_e(z) = N_{etm}(1 - z^2/a^2)$, где a — ширина всей плазмы вдоль оси резонатора. При подстройке резонатора с плазмой к частоте магнетрона его длиной вводимая мощность возрасала, что приводило к увеличению электронной концентрации (рис. 3).

5. Квазиоднородный характер распределения плотности плазмы вдоль оси резонатора был подтвержден также зондовыми измерениями. Двойной зонд был сделан из молибденовой проволоки радиуса $r_0 = 20 \text{ мкм}$ и имел длину открытой части электродов 0,5 см. Зонд располагался в резонаторе так, чтобы электроды были перпендикулярны вектору напряженности электрического поля. Такое расположение обеспечивало слабое возмущение резонатора, что контролировалось с помощью спектра-анализатора по изменению доброкачественности резонатора. На зонд подавалось переменное напряжение с частотой 50 Гц и амплитудой до 10 В, это же напряжение подавалось на горизонтальную развертку осциллографа. На вертикальные пластины подавалось напряжение, пропорциональное зондовому току, которое снималось с нагрузочного соотивления, равного 200 кОм. Таким образом, на экране осциллографа наблюдалась вольт-амперная характеристика двойного зонда, по которой определялась электронная температура в разрядной плазме [12]:

$$kT_e/e = I_{hi}/2(dI/du)_{u=0}, \quad (4)$$

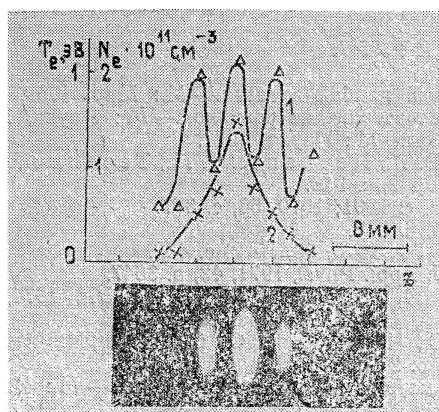


Рис. 4.

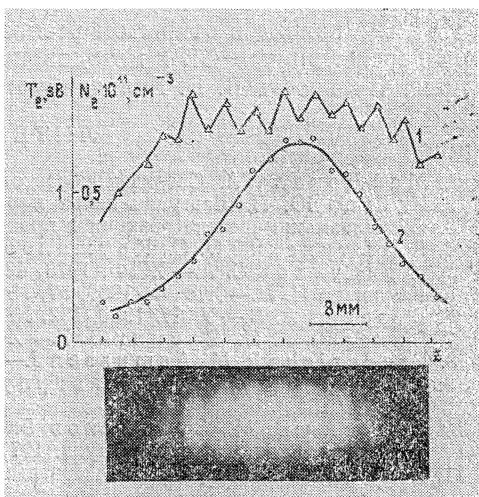


Рис. 5.

Рис. 4. Распределения электронной концентрации, температуры и светимости плазмы вдоль оси резонатора: $p = 40 \text{ Torr}$, $P_{\text{погл}} = 1,5 \text{ Вт}$, кривая 1 — T_e , 2 — N_e .

Рис. 5. Распределения электронной концентрации, температуры и светимости плазмы вдоль оси резонатора: $p = 1 \text{ Torr}$, $P_{\text{погл}} = 2,8 \text{ Вт}$, кривая 1 — T_e , 2 — N_e .

где k — постоянная Больцмана, I_{hi} — ионный ток насыщения. Измерения T_e были выполнены в диапазоне давлений $p = 1 \div 50 \text{ Torr}$. Исследования характеристик зонда в переходном режиме, проведенные в работах [13—15], свидетельствуют о малом влиянии столкновений на результаты измерений электронной температуры. Микроволновое поле также не оказывало влияния на измерения T_e , так как период СВЧ поля был меньше времени пролета электронов и ионов через призондовый слой [16]. Пространственное распределение электронной температуры в плазме $T_e(z)$ снималось при перемещении зонда вдоль оси резонатора. По ионному току насыщения $I_{hi}(z)$ и электронной температуре $T_e(z)$ было получено пространственное распределение плотности плазмы вдоль оси резонатора с помощью упрощенного соотношения для ионного тока насыщения [12]:

$$I_{hi}(z) = \text{const } N_e(z) T_e^*(z), \quad (5)$$

где показатель степени α равен $\alpha = 0,5$ в бесстолкновительном случае при $l_i/r_0 \gg 1$ и $\alpha = 1$ в переходном режиме при $l_i/r_0 \ll 1$ (l_i — длина свободного пробега ионов, $l_i \approx r_0$ при $p \approx 10$ Torr в нашем случае). На рис. 4 и 5 приведены фотографии разряда совместно с распределением электронной концентрации и температуры вдоль оси резонатора. Абсолютное значение N_e было найдено резонансным методом. Как видно из рисунков, температура электронов имеет неоднородное распределение, а плотность плазмы — квазиоднородна. Квазиоднородное распределение электронной концентрации обусловлено диффузией электронов из областей генерации плазмы (пучностей поля). При высоких давлениях наблюдавшиеся области светимости разряда (рис. 4) сосредоточены в пучностях поля, так как длина электронной теплопроводности $l_t = l/\sqrt{\delta}$ (где l — длина свободного пробега электронов, δ — доля теряемой энергии при столкновениях), определяющая масштаб неоднородности электронной температуры, меньше размера неоднородности электрического поля вдоль оси резонатора ($a_z \approx \lambda/2$). При низких давлениях ($p < 10$ Torr), где $l_t > a_z$, электроны вне пучностей поля остыдают слабо, поэтому свечение плазмы квазиоднородно из всего разряда (рис. 5).

Проведенные эксперименты, на наш взгляд, свидетельствуют о том, что СВЧ разряд в открытом резонаторе можно рассматривать как один из перспективных СВЧ методов получения плазмы. Авторы выражают признательность В. Б. Гильденбургу за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

- Мак-Дональд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах.— М.: Мир, 1969.
- Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов.— М.: Наука, 1974.
- Сб. Плазмохимические реакции и процессы.— М.: Наука, 1977.
- Васютинский О. С., Кружалов В. А., Перчанок Т. М., Терехин Д. К., Фридрихсон С. А.— ЖТФ, 1978, 48, № 2, с. 318
- Капица П. Л.— ЖЭТФ, 1969, 57, № 6, с. 1801; 1970, 58, с. 377
- Гуревич А. В.— УФН, 1980, 132, № 4, с. 685.
- Вихарев А. Л., Еремин Б. Г.— ЖЭТФ, 1975, 68, № 2, с. 452.
- Fredericks R. M., Asmussen J.— J. Appl. Phys., 1971, 42, p. 3647.
- Асмуссен М. Л., Маллаварпу, Хэманин, Парк— ТИИЭР, 1974, 62, № 1, с. 134.
- Батенин В. М., Зродников В. С., Чиннов В. Ф. Сб. Плазмохимические реакции и процессы.— М.: Наука, 1977, с. 279.
- Голант В. Е Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы.— М.: Наука, 1968.
- Козлов О. В. Электрический зонд в плазме.— М.: Атомиздат, 1969.
- Петерсон.— Ракетная техника и космонавтика, 1971, 9, № 7, с. 246.
- Кирхгоф, Петерсон, Толбот.— Ракетная техника и космонавтика, 1971, 9, № 9, с. 30.
- Чан П., Телбот Л., Турян К. Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме.— М.: Мир, 1978.
- Иванов Ю. А., Лебедев Ю. А., Полак Л. С.— ЖТФ, 1976, 46, № 7, с. 1459.

Институт прикладной физики
АН СССР

Поступила в редакцию
15 апреля 1981 г.

STATIONARY VHF DISCHARGE IN A QUASI-OPTICAL RESONATOR

A. L. Vikharev, O. A. Ivanov, V. E. Semenov, A. N. Stepanov

Investigation results are given of a stationary VHF discharge in helium in the pressure range $1 < p < 150$ Torr in an quasi-optical resonator. Microwave electric field strength have been measured which are necessary for the gas breakdown and keeping the discharge at the frequency 35 GHz. Concentrations N_e and the temperature of electrons T_e are defined as well as their space distribution by probe measurements and resonant method.