

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 2 — 1973

УДК 537.525

А. А. КУЗОВНИКОВ, В. П. САВИНОВ

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТАЦИОНАРНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА

В работе приводятся результаты экспериментального исследования пространственного распределения параметров ВЧ-разряда в He ($p \sim 0,5$ мм рт. ст.) — концентрации и температуры электронов, потенциала стационарного электрического поля, напряженности переменного электрического поля, постоянной составляющей интенсивности интегрального свечения и амплитуды переменной составляющей интенсивности свечения плазмы разряда. Предлагается физический механизм, объясняющий интенсивную ицилляцию свечения на частоте ВЧ-поля в приэлектродных областях.

В настоящей работе исследовался стационарный ВЧ разряд в диапазоне радиочастот ($1 \div 15$ МГц), который происходил в стеклянных разрядных трубках диаметром порядка 10 см при давлении $\sim 0,5$ мм рт. ст. В качестве рабочего газа использовался спектрально чистый гелий, в котором примеси других газов (N_2 , O_2 , H_2 и Ne) не превышали 0,08%. Исследованный разряд был характерен простым механизмом баланса заряженных частиц: ионизация электронным ударом в единице объема уравнивалась единственным процессом — диффузионным уходом зарядов на стенки трубки; другие процессы дезэлектронизации (прилипание, объемная рекомбинация) отсутствовали.

Как было экспериментально установлено, стационарный разряд в гелии был наиболее устойчив по сравнению с разрядами в других инертных газах (Ar, Ne). Наличие в спектре излучения He трудновозбудимой линии (He II 4685 А) с потенциалом возбуждения 75,3 в также обусловило интерес к изучению разряда в этом газе в связи с дальнейшими экспериментами по исследованию механизма ВЧ-разряда.

Использовались плоские внутренние разрядные электроды диаметром 10 см, остеклованные для предотвращения распыления материала электродов. Большая часть измерений производилась при расстоянии между электродами (d), равном 6 см. Обеспечить большие значения отношения диаметра электродов к расстоянию между ними было сложно из-за технологических трудностей при изготовлении разрядных трубок. Вместе с тем достаточно хорошее приближение распределения концентрации электронов к косинусоидальному в случае слабого возмущения диффузионного режима движения зарядов (рис. 1,а) указывает на удовлетворительное соответствие геометрии разрядных электродов случаю плоской геометрии.

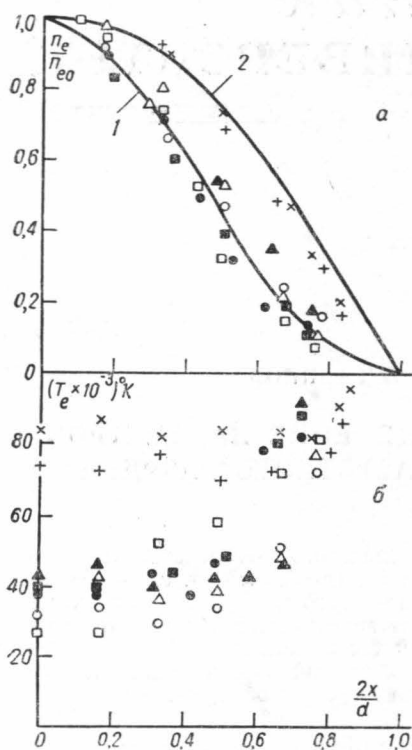


Рис. 1. Распределение параметров плазмы ВЧ-разряда вдоль разрядного промежутка. *a*: распределение $\frac{n_e}{n_{e0}} \left(\frac{2x}{d} \right)$,

- × — 12 МГц ($V_{\sim} = 160$ в, $n_{e0} = 1,8 \cdot 10^9$ см $^{-3}$),
- + — 10 МГц ($V_{\sim} = 200$ в, $n_{e0} = 2 \cdot 10^9$ см $^{-3}$),
- — 3 МГц ($V_{\sim} = 220$ в, $n_{e0} = 1,5 \cdot 10^8$ см $^{-3}$),
- ▲ — 5 МГц ($V_{\sim} = 200$ в, $n_{e0} = 4 \cdot 10^8$ см $^{-3}$),
- — 1,5 МГц ($V_{\sim} = 280$ в, $n_{e0} = 1,3 \cdot 10^8$ см $^{-3}$),
- — 3 МГц ($V_{\sim} = 440$ в, $n_{e0} = 1 \cdot 10^9$ см $^{-3}$),
- △ — 10 МГц ($V_{\sim} = 400$ в, $n_{e0} = 1,1 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$),
- — 1,5 МГц ($V_{\sim} = 680$ в, $n_{e0} = 1,9 \cdot 10^9$ см $^{-3}$);

б — распределение $T_e \left(\frac{2x}{d} \right)$; экспериментальные значения T_e соответствуют указанным в пункте *a* условиям в ВЧ-разряде. Кривая 1 — кривая «переходной» диффузии [4], кривая 2 — теоретическое распределение

$$\frac{n_e}{n_{e0}} = \cos \left(\frac{x}{\Lambda} \right)$$

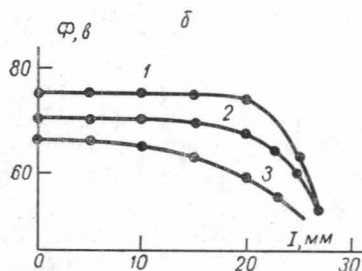
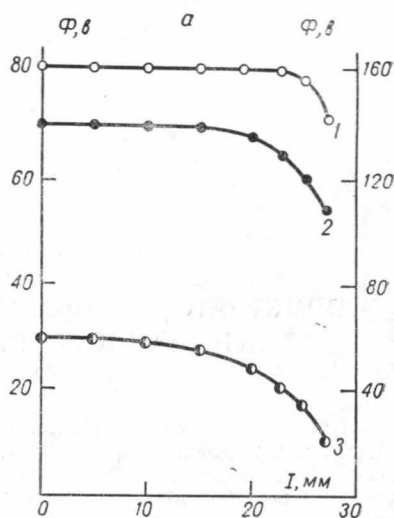


Рис. 2. Распределение постоянной составляющей потенциала электрического поля Φ вдоль разрядного промежутка в ВЧ-разряде. *a*: зависимость распределения $\Phi(x)$ от величины приложенного ВЧ-напряжения ($\omega = 5$ МГц, 1 — $V_{\sim} = 300$ в (ось ординат справа), 2 — $V_{\sim} = 120$ в, 3 — $V_{\sim} = 40$ в), *б* — зависимость распределения $\Phi(x)$ от частоты ω ($V_{\sim} = 120$ в, 1 — $\omega = 9$ МГц, 2 — $\omega = 5$ МГц, 3 — $\omega = 3$ МГц)

Исследовались в основном распределения параметров разряда в продольном направлении.

Приведены результаты экспериментального исследования пространственных распределений концентрации n_e и температуры T_e электронов, потенциала стационарного электрического поля Φ , напряженности переменного поля E_{\sim} , постоянной составляющей интенсивности интегрального свечения плазмы $I_{св}$, а также амплитуды переменной составляющей интенсивности свечения A_{ω} в разрядном промежутке.

Экспериментальные результаты

Пространственное распределение параметров газоразрядной плазмы. Параметры газоразрядной плазмы T_e и n_e измерялись методами одиночного лэнгмюровского цилиндрического зонда с противозондом и двойного цилиндрического зонда [1]. В большинстве измерений использовался метод двойного зонда, как вносящий в плазму наименьшие возмущения. Как известно, этот метод позволяет правильно определять среднюю энергию электронов и их концентрацию лишь в случае максвелловского распределения электронов по энергиям.

Однако, как показали экспериментальные исследования [2], [3], в ВЧ-разряде функция распределения электронов по энергиям $f_e(\epsilon)$ может отличаться от максвелловской. Оценка погрешности метода двойного зонда, полученная с помощью определенной экспериментально по методике Драйвстейна [1] функции $f_e(\epsilon)$ приведена ниже.

Результаты исследования распределений концентрации и температуры электронов по длине разрядного промежутка при пониженных электронных концентрациях показаны на рис. 1; там же приведена теоретическая кривая распределения электронной концентрации для случая «переходной» диффузии [4], когда в центре разряда диффузия заряженных частиц близка к амбиполярной, а в приэлектродных областях — к свободной.

Как видно из рис. 1,а, при малых значениях приложенного ВЧ-напряжения V_{\sim} и концентрации электронов (в центре разрядного промежутка $n_{e0} = 1,3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$) экспериментальные точки распределения концентрации электронов близки к кривой «переходной» диффузии.

Повышая частоту ВЧ-поля, можно при достаточно малых значениях амплитуды приложенного ВЧ-напряжения ($V_{\sim} \leq 200 \text{ в}$) получить плазму с концентрацией заряженных частиц, достаточной для установления режима амбиполярной диффузии ($n_{e0} \geq 10^9 \text{ см}^{-3}$). Распределения концентрации и температуры электронов для такого случая приведены на рис. 1,а,б. Одновременно с экспериментально полученным распределением концентрации в разрядном промежутке приведена теоретическая кривая распределения концентрации для режима амбиполярной диффузии, рассчитанная в предположении постоянства T_e вдоль разрядного промежутка и отсутствия в исследуемом направлении каких-либо полей, за исключением поля пространственного заряда [5]:

$$n_e(x) = n_{e0} \cos(x/\Lambda), \quad (1)$$

где n_{e0} — концентрация электронов в центре разрядного промежутка, $\Lambda = d/\pi$ — диффузионная длина, d — расстояние между электродами.

Из графика рис. 1,а видно, что полученное экспериментально распределение концентрации близко к теоретическому распределению (1).

При малых ВЧ-напряжениях ($V_{\sim} \leq 200 \text{ в}$) распределение электронов по энергиям мало отличалось от максвелловского, и параметры

плазмы в этих условиях измерялись методом двойного зонда с обычной погрешностью ($\sim 25-30\%$).

При повышении амплитуды ВЧ-напряжения ($V_{\sim} \geq 300$ в) характер распределения концентрации электронов в разрядном промежутке становится более сложным (рис. 1,а). В этих условиях $f_e(\epsilon)$ уже существенно отличалась от максвелловской, и абсолютные значения параметров плазмы ВЧ-разряда измерялись методом двойного зонда со значительными погрешностями. Так, установлено, что при изменении V_{\sim} в интервале $200 \div 500$ в «эффективная» температура $T_e^{\text{эфф}}$, измеряемая методом двойного зонда и средняя энергия электронов

$$\bar{\epsilon} = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon f_e(\epsilon) d\epsilon}{\int_0^{\infty} f_e(\epsilon) d\epsilon},$$

определенная по известной функции $f_e(\epsilon)$, различались в $2 \div 10$ раз. При этом метод двойного зонда давал систематически заниженные значения средней энергии электронов. Величина n_e , определенная методом двойного зонда, в этих условиях отличалась от правильной величины в $1,5 \div 3,5$ раза, будучи завышенной.

Из графика рис. 1,а видно, что при $V_{\sim} \geq 300$ в распределение электронной концентрации в разрядном промежутке приобретает «колоколообразный» характер, существенно отличаясь от распределения (1).

Исследование радиального распределения концентрации электронов в ВЧ-разряде в режиме амбиполярной диффузии показало, что экспериментальные точки располагались весьма близко к теоретической кривой Шоттки [6]:

$$n_e(r) = n_{e0} J_0\left(2,4 \frac{r}{R}\right), \quad (2)$$

где R — радиус разрядной трубки, $J_0\left(2,4 \frac{r}{R}\right)$ — функция Бесселя нулевого порядка.

Распределение электрических полей в разрядном промежутке. Исследование пространственного распределения Φ — постоянной составляющей потенциала электрического поля — производилось с помощью схемы, аналогичной описанной в работе [7]. При этом измерялась постоянная разность потенциалов между разрядным электродом и областью плазмы, в которой находился измерительный заряд. Значения Φ отсчитывались относительно потенциала электрода, постоянная составляющая которого условно принималась равной нулю ($\Phi_{\text{эл}} = 0$).

Измерения проводились с помощью электростатического вольтметра типа С-95, защищенного от воздействия ВЧ-поля подключением ВЧ-дресселей и шунтирующей емкости. Поскольку разряд был симметричным, измерения можно было производить от любого электрода к центру разрядного промежутка.

Результаты измерений представлены на рис. 2. Как видно из приведенных кривых, с увеличением V_{\sim} распределение Φ в разряде становится «столообразным».

Таким образом, почти все падение величины Φ сосредоточено в приэлектродных областях. Продольный градиент Φ в центральной области не превышал долей (в/см), т. е. был существенно меньше, чем в положительном столбе тлеющего разряда постоянного тока [6].

Напряженность переменного электрического поля E_{\sim} измерялась методом тройного цилиндрического зонда [8]. В работе [1] отмечались недостатки этой методики, однако характерное значение E_{\sim} таким способом, по-видимому, можно определить. Распределение $E_{\sim}(x)$ исследовалось лишь в центральной области разряда, где E_{\sim} меняется с координатой относительно медленно, так как разрешающая способность тройного зонда в пространстве из-за его собственной протяженности невелика. Полученное распределение $E_{\sim}(x)$ приведено на рис. 3.

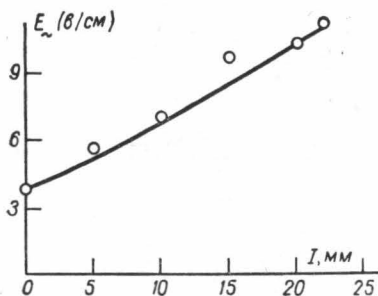


Рис. 3. Распределение напряженности ВЧ-поля E_{\sim} вдоль разрядного промежутка в ВЧ-разряде (He, $p = 0,48$ мм рт. ст., $\omega = 6$ Мгц, $V_{\sim} = 600$ в)

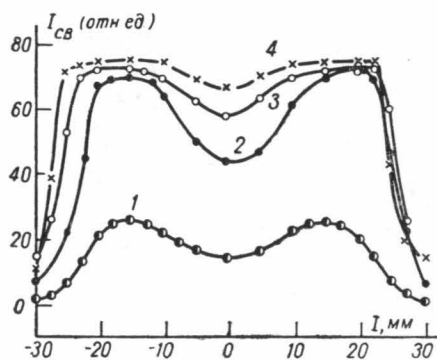


Рис. 4. Распределение постоянной составляющей интенсивности интегрального свечения вдоль разрядного промежутка в ВЧ-разряде при различных напряжениях V_{\sim} . He, $p = 0,5$ мм рт. ст., $\omega = 10$ Мгц, $d = 60$ мм. 1 — $V_{\sim} = 40$ в, 2 — $V_{\sim} = 120$ в, 3 — $V_{\sim} = 160$ в, и 4 — $V_{\sim} = 200$ в

Отсюда видно, что в центральной области разрядного промежутка падает лишь небольшая часть всего приложенного ВЧ-напряжения.

Изменение интегрального свечения плазмы ВЧ-разряда вдоль разрядного промежутка. Исследование поведения интенсивности интегрального свечения плазмы в ВЧ-разряде производилось с помощью схемы с фотоэлектронным умножителем.

При изучении распределения постоянной составляющей интенсивности свечения в разрядном промежутке измерялась стрелочным прибором величина фототока в нагрузке ФЭУ в зависимости от положения входной щели ФЭУ относительно разрядных электродов.

Полученное распределение постоянной составляющей интенсивности свечения $I_{cb}(x)$ по длине разрядного промежутка при различных значениях приложенного ВЧ-напряжения приведено на рис. 4.

Зависимость интенсивности свечения плазмы от времени исследовалась с помощью схемы (рис. 5,а), включавшей в себя ФЭУ с катодным повторителем и селективный вольтметр В6-1, частотный диапазон которого (150 кГц ÷ 30 МГц) позволял обнаруживать переменные составляющие напряжения (пропорционального фототоку) на нагрузке ФЭУ, как на основной частоте ВЧ-поля ω , так и на ее гармониках.

В приэлектродных областях ВЧ-разряда была зафиксирована осцилляция интенсивности свечения на частотах ω и 2ω . При этом амплитуда осцилляций на частоте ω превосходила амплитуду осцилляций на удвоенной частоте на два порядка величины.

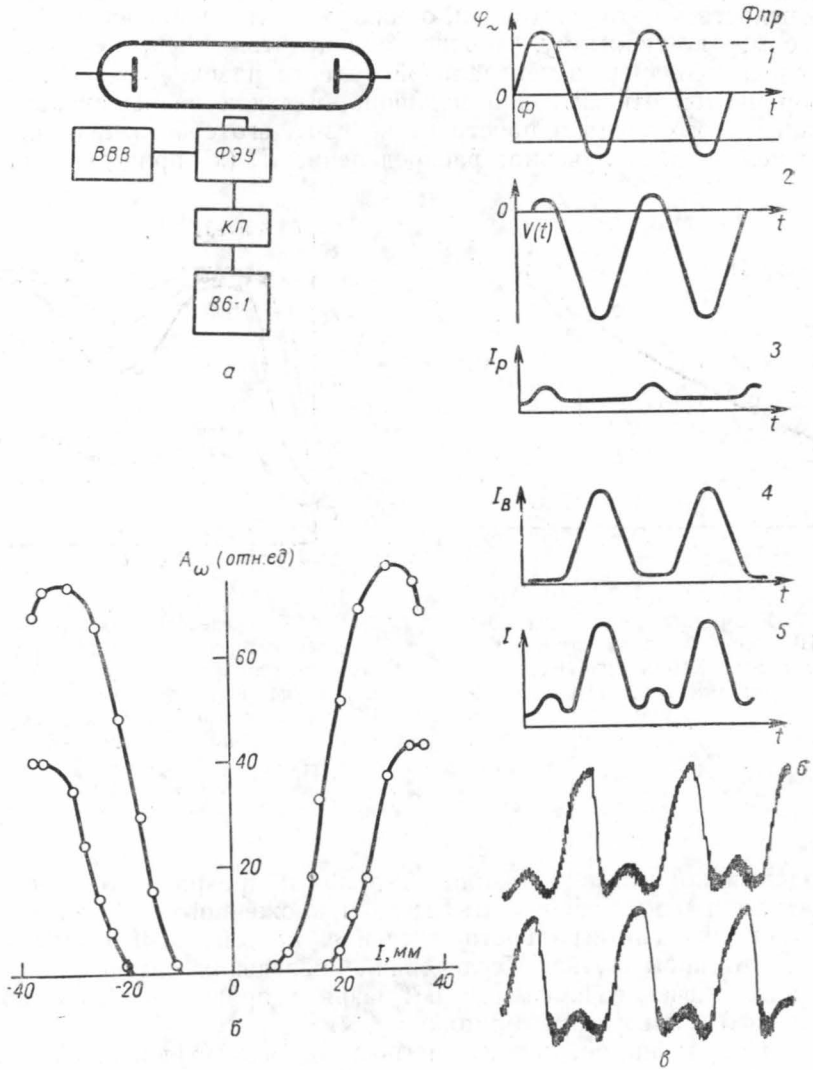


Рис. 5. Схема экспериментального изучения изменения интенсивности интегрального свечения плазмы ВЧ-разряда во времени. *а* — экспериментальная схема; *б* — распределение амплитуды A_{ω} осцилляции интенсивности свечения на основной частоте ВЧ-поля ω вдоль разрядного промежутка в ВЧ-разряде ($\omega = 8 \text{ МГц}$): 1 — $V_{\sim} = 150 \text{ в}$, 2 — $V_{\sim} = 280 \text{ в}$; v — качественное построение кривой изменения интенсивности свечения плазмы во времени в приэлектродных областях ВЧ-разряда: 1 — переменная (φ_{\sim}) и постоянная (Φ_0) составляющие электрического потенциала электрода, 2 — изменение во времени суммарного потенциала электрода $V(t) = \Phi_0 + \varphi_{\sim}(t)$, 3 — изменение во времени составляющей интенсивности свечения I_p , обусловленной поляризацией плазмы вблизи электрода, 4 — изменение во времени составляющей интенсивности свечения I_b , обусловленной пульсирующим потоком быстрых электронов, 5 — результирующая кривая зависимости интенсивности свечения плазмы ($I = I_p + I_b$) в приэлектродной области от времени, 6 — осциллограммы изменения интенсивности свечения у обоих разрядных электродов [15]

Распределение амплитуды A_0 осцилляции интенсивности свечения на частоте $\omega = 8 \text{ Мгц}$ по длине разрядного промежутка показано на рис. 5,б.

Обсуждение экспериментальных результатов

Полученные в настоящей работе экспериментальные результаты показывают, что свойства стационарного ВЧ-разряда в радиочастотном диапазоне существенно зависят от амплитуды приложенного ВЧ-напряжения. Это объясняется тем, что при повышении ВЧ-напряжения возрастают и начинают играть существенную роль собственные стационарные электрические поля в ВЧ-разряде. При малых ВЧ-напряжениях ($V_{\sim} \leq 200 \text{ в}$) свойства плазмы ВЧ-разряда близки к свойствам плазмы положительного столба, в частности, функция распределения электронов по энергиям близка к максвелловской, диффузионное распределение концентрации электронов в пространстве в этих случаях одинаковое (см. рис. 1,а).

При повышенных ВЧ-напряжениях ($V_{\sim} > 200 \text{ в}$) условия в плазме ВЧ-разряда и положительного столба различаются: распределение электронов по энергиям в плазме ВЧ-разряда становится немасвелловским, распределение концентрации электронов в разрядном промежутке приобретает характерную «колоколообразную» форму (см. рис. 1,а), плазма ВЧ разряда отличается очень малыми градиентами стационарного электрического поля (см. рис. 2).

Характер распределения параметров ВЧ-разряда указывает на важную роль приэлектродных областей в поддержании разряда. Действительно, в окрестности электродов сосредоточены почти полностью как постоянная, так и переменная составляющие электрического поля, действующего в ВЧ-разряде; в приэлектродных областях отмечались наиболее высокие значения энергии электронов и интенсивности стационарного свечения; в этих областях наблюдались существенное изменение диффузионного режима движения электронов и интенсивная осцилляция свечения газоразрядной плазмы.

Обнаруженное «колоколообразное» распределение электронной концентрации вдоль разрядного промежутка, в частности, может быть обусловлено значительным нагревом электронов в окрестности электродов и увеличением коэффициента диффузии [9], а также существенным увеличением протяженности приэлектродных слоев пространственного заряда. Известно, что при увеличении абсолютного значения отрицательного относительно потенциала пространства плазмы потенциала электрода $|\varphi_0|$ толщина слоя $d_{\text{сл}}$ также увеличивается по следующему закону [10]:

$$d_{\text{сл}} \sim \left(\frac{|\varphi_0|}{T_e} \right)^{3/4},$$

где T_e — электронная температура в электрон-вольтах.

В радиальном направлении, которое перпендикулярно направлению вектора напряженности \vec{E}_{\sim} приложенного ВЧ-поля, физические условия в ВЧ-разряде аналогичны условиям в положительном столбе тлеющего разряда [6], на что указывает, в частности, близость диффузионного распределения концентрации $n_e(r)$ к распределению Шоттки.

Ранее уже отмечалось [2, 7], что исследуемый тип ВЧ-разряда имеет ряд свойств, аналогичных свойствам тлеющего разряда на постоянном токе. Действительно, в ВЧ-разряде приэлектродные падения стационарного электрического потенциала имели такую же величину,

что и катодные падения в тлеющем разряде. Наблюдалось интенсивное распыление материала электродов, обусловленное бомбардировкой их тяжелыми частицами. Распределение постоянной составляющей интенсивности свечения в приэлектродных областях ВЧ-разряда было аналогичным распределению свечения в катодном падении, имея характерный вид «мениска» на конце. При раздвижении разрядных электродов на расстояния порядка 10 см и более между областями с максимальной интенсивностью свечения около каждого электрода появлялась протяженная область однородного, относительно малоинтенсивного свечения — аналог положительного столба тлеющего разряда.

Как уже указывалось [2] в данном типе ВЧ-разряда в окрестности разрядных электродов должны возникать электронные пучки. Обнаруженная в настоящей работе малость градиентов потенциала постоянного электрического поля в ВЧ-разряде подкрепляет это предположение, так как эта же особенность была установлена в разряде в полном катоде [11] и в области отрицательного свечения тлеющего разряда [6], где также имелись пучки быстрых электронов.

Отметим еще осцилляцию интенсивности свечения в приэлектродных областях ВЧ-разряда с частотами ω и 2ω .

Слабую осцилляцию свечения с частотой 2ω естественно связать с нагревом электронов приложенным ВЧ-полем. Малая интенсивность этих осцилляций объясняется выполнением условия [12]: $\omega \gg \delta v_{en}$, где ω — частота ВЧ-поля, δ — средняя доля энергии, передаваемой электроном при соударениях с нейтральными атомами, v_{en} — число соударений электрона с нейтральными атомами.

Наличие осцилляции свечения на частоте ω требует более детального рассмотрения.

Одной из причин этого явления может быть периодическая поляризация плазмы под действием внешнего ВЧ-поля, что наблюдалось, например, в работе [13], где изучалось влияние слабого внешнего ВЧ-поля на свойства плазмы положительного столба. Заметим, что в упомянутой работе в области поляризации плазмы не наблюдалось локального увеличения интенсивности стационарного свечения, которое монотонно спадало от оси разрядной трубки к стенке с внешним электродом.

В ВЧ-разряде области максимальной интенсивности стационарного свечения и максимальной амплитуды осцилляции свечения совпали в пространстве.

Осцилляцию свечения на частоте ω помимо периодической поляризации плазмы могут вызывать и другие факторы.

Ранее уже отмечалось, что в приэлектродных областях ВЧ-разряда кроме приложенного извне ВЧ-поля имеется также постоянное электрическое поле. Разность потенциалов $V(t)$ между разрядным электродом и какой-либо областью плазмы, характеризующейся определенным потенциалом пространства ($\Phi_{пр}$), в каждый момент времени определяется приложенным к электроду ВЧ-потенциалом $\varphi_{\sim}(t)$ и постоянной, отрицательной относительно потенциала пространства плазмы, составляющей потенциала электрода Φ_0 (см. рис. 5, в; 1, 2). Можно показать [14], что с учетом обычного «плавающего» потенциала мгновенное значение суммарного потенциала электрода всегда остается отрицательным относительно потенциала пространства плазмы.

Наряду с поляризацией плазмы (см. рис. 5, в; 3), наличие на разрядных электродах последовательных отрицательных импульсов потенциала (см. рис. 5, в; 2) должно приводить к формированию потоков

ускоренных электронов, возникающих вследствие γ -процессов на поверхностях электродов и потоков электронов, выталкиваемых из приэлектродной области во время очередного отрицательного импульса потенциала на электроде.

Поскольку амплитуда этих импульсов достигает нескольких сотен вольт, то в приэлектродной области основная масса электронов (а не только γ -электроны) должна приобретать большие энергии, существенно превосходящие потенциалы возбуждения и ионизации нейтральных атомов.

Таким образом, несмотря на то что в отрицательные полупериоды ВЧ-поля приэлектродные области должны обедняться электронами, интенсивность свечения в эти полупериоды должна возрасти вследствие возбуждения нейтральных атомов электронами, выталкиваемыми из этой области с большими скоростями. Предполагаемый характер изменения интенсивности свечения вследствие воздействия электронов, ускоренных во время отрицательных полупериодов ВЧ-поля, качественно изображен на рис. 5, в; 4.

Суммарная картина предполагаемого изменения интенсивности свечения во времени в приэлектродной области, обусловленная поляризацией и ускорением электронов, представлена на рис. 5, в; 5.

Одновременное осциллографирование интенсивности свечения у обоих разрядных электродов в ВЧ-разряде производилось в работе [15]. Как видно из рис. 5, в; 6), характер изменения интенсивности свечения во времени совпадает с полученной кривой $I_{св}(t)$ (см. рис. 5, в; 5).

Расширение области осцилляции свечения при увеличении ВЧ-напряжения (см. рис. 5, б) в свете предложенного механизма осцилляции свечения объясняется увеличением амплитуды отрицательных импульсов потенциала, выталкивающих электроны из приэлектродных областей с большей силой.

Более достоверно существование электронных пучков, а также их роль в механизме поддержания ВЧ-разряда можно установить, детально исследуя характер распределения электронов по энергиям в ВЧ-разряде. Результаты соответствующих экспериментальных исследований приведены в работах авторов [2, 3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Каган Ю. М., Перель В. И. «Успехи физических наук», 81, вып. 3, 1963.
2. Кузовников А. А., Савинов В. П. Сб. «Вопросы физики низкотемпературной плазмы». Минск, 1970, стр. 162.
3. Кузовников А. А., Савинов В. П. «Радиотехника и электроника» № 4, 1973.
4. Allis, Rose. «Phys. Rev.», 93, 84, 1954.
5. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. М., Госатомиздат, 1961.
6. Энгель А. Ионизованные газы. М., Физматгиз, 1959.
7. Левитский С. М. ЖТФ, 27, 1001, 1957.
8. Kojima, Takayama, Shimachi. «J. Phys. Soc. Japan», 8(1), 55, 1953.
9. Eskert H. J. Appl. Phys., 33, No. 9, 1962.
10. Альперт Я. Л., Гуревич А. В., Пятаевский Л. П. Искусственные спутники в разреженной плазме. М., «Наука», 1964.
11. Бородин В. С., Каган Ю. М., Лягущенко Р. И. ЖТФ, 36, вып. 7, 1966.
12. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М., Физматгиз, 1960.
13. Тарасова В. В. Автореферат кандид. диссертации, 1969.
14. Годяк В. А., Кузовников А. А. «Нелинейное взаимодействие ВЧ поля со слоями пространственного заряда». Доклад на Межвузовской конференции по химии и физике низкотемпературной плазмы. М., 1967.
15. Андреев А. Д. «Вестн. Белорус. ун-та», № 2, 78, 1969.