

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 3—1959

Х. А. ДЖЕРПЕТОВ, П. С. БУЛКИН, А. Р. АХМЕДОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА В ГЕЛИИ И В АРГОНЕ

Введение

Пространственное распределение параметров установившегося высокочастотного (ВЧ) разряда позволяет выяснить характер физических процессов, происходящих в нем.

Приэлектродные части ВЧ разряда должны при этом играть особенно существенную роль. Поэтому исследование распределения параметров приэлектродной части разряда, и особенно характера движения заряженных частиц в этой части разряда, представляет несомненный интерес.

Между тем нет экспериментальных работ, посвященных соответствующим исследованиям.

В настоящей работе приведены результаты измерения методом пространственного распределения потенциала, создаваемого пространственными зарядами в ВЧ разряде, температуры и концентрации электронного газа в аргоне на частоте 1,2 Мгц. Характер движения электронов в приэлектродных частях разряда исследован методом направленного зонда на частоте 5 Мгц в гелии.

Условия опыта

Для измерений был применен метод одиночного зонда с двумя противозондами, описанными в работе [1]. Высокочастотный разряд возбуждался в трубках из молибденового стекла посредством внешних электродов в виде колец, охватывающих трубку снаружи (рис. 1). Посредине трубки имелся отросток, в котором находился подвижной зонд. Зонд мог перемещаться по диаметру трубки и вращаться вокруг своей оси. По обе стороны от электродов внутри трубки были помещены подвижные противозонды из гофрированной никелевой жести, вделанные в стеклянные цилиндры. Трубка и все металлические части внутри ее тщательно обезгаживались перед опытом. После этого труб-

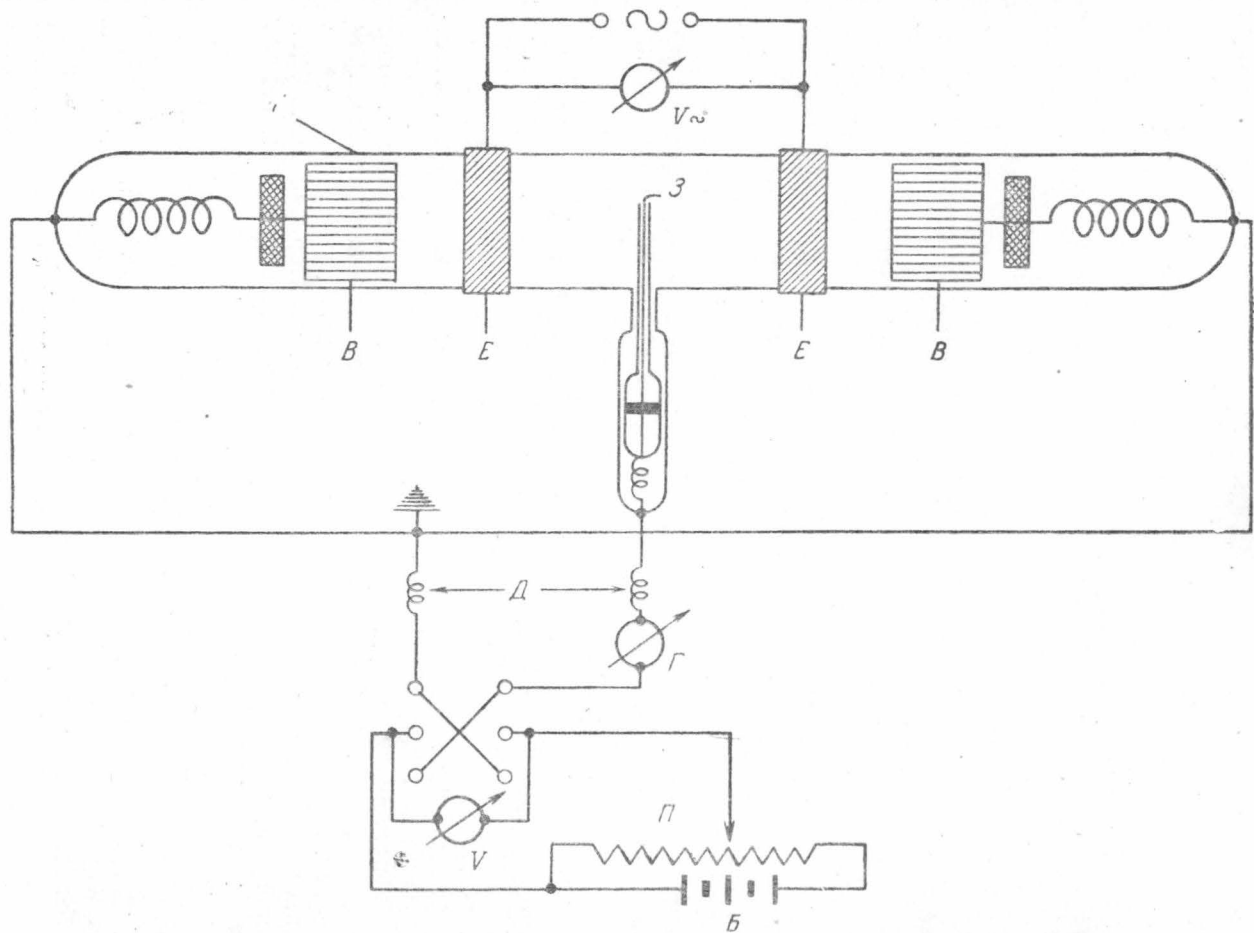


Рис. 1. Разрядная трубка и схема зондовых измерений: *T* — разрядная трубка, *E* — электроды, *B* — противозонды, *Z* — зонд, *V* — высокочастотный вольтметр, *Д* — дроссели, *Г* — гальванометр, *V* — вольтметр, *П* — потенциометр, *Б* — аккумуляторная батарея

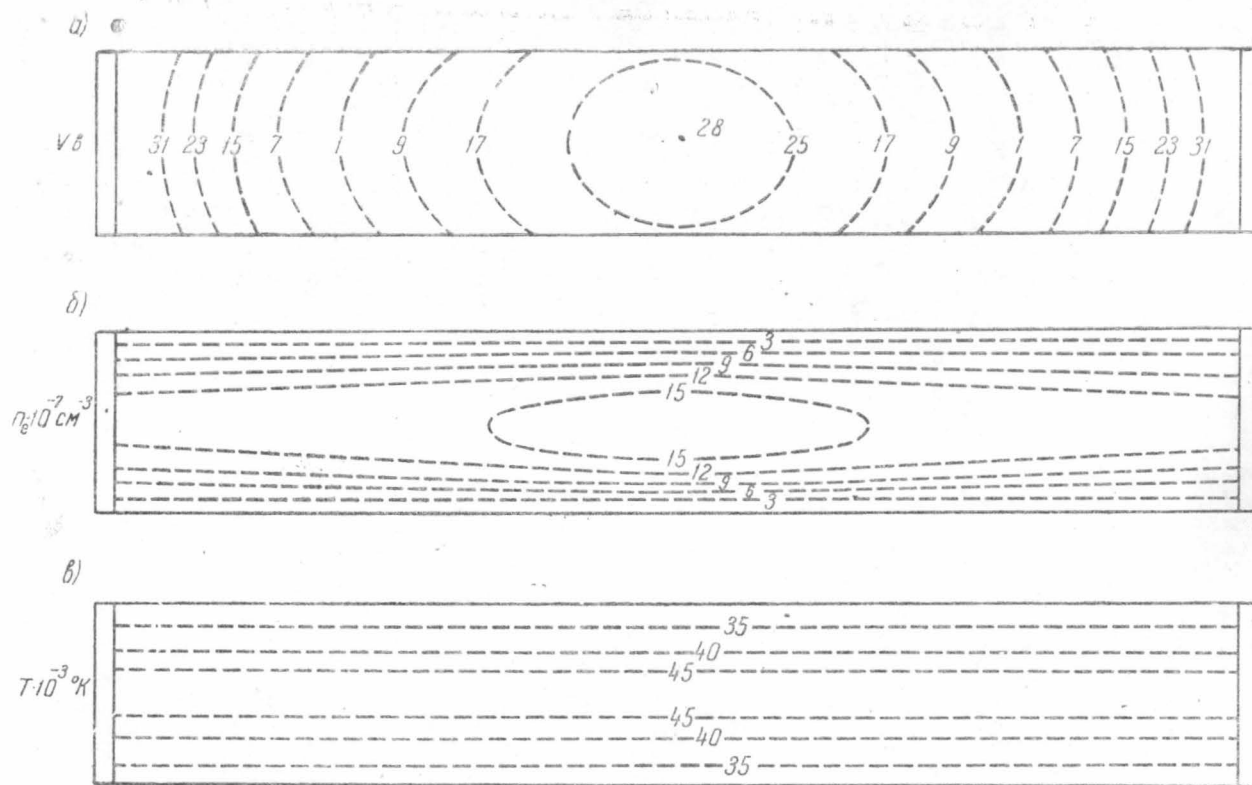


Рис. 2. Характеристика сплошного ВЧ разряда в сечении вдоль трубки в аргоне при давлении 4,4 мм рт. ст. и эффективном напряжении на электродах в 400 в: а — эквипотенциальные кривые (в вольтах), б — кривые постоянной концентрации электронов $n_e \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-3}$, в — изотермы электронного газа в тысячах градусов К

ка наполнялась спектрально чистым газом через холодильную ловушку и устанавливалось нужное давление.

Противозонды могли перемещаться вдоль разрядной трубки с помощью магнита. Таким образом, перемещая внешние электроды (кольца) и одновременно противозонды, можно было перемещать столб разряда относительно зонда, что эквивалентно перемещению зонда вдоль трубки. При этом расстояния как между электродами, так и между противозондами поддерживались неизменными. Также оставались неизменными и расстояния между каждым электродом и противозондом.

При фиксированном положении электродов и противозондов снимались зондовые характеристики вдоль диаметра разрядной трубки. Измерения были произведены в ряде сечений разряда. Таким путем были определены характеристики разряда в поперечном сечении и вдоль оси разряда: эквипотенциальные поверхности, поверхности одинаковой температуры и концентрации электронного газа.

В качестве параметров ВЧ разряда были выбраны амплитуда ВЧ напряжения, подаваемого на внешние электроды разрядной трубки, и давление газа. Во время измерения эти параметры разряда поддерживались неизменными.

Чтобы убедиться в том, что за время опытов условия не изменялись после нескольких циклов измерений, зонд возвращался в начальное положение и снимались проверочные зондовые характеристики.

Следует отметить, что полулогарифмические характеристики зондовых измерений в проведенных опытах показывали наличие близкого к максвелловскому распределения электронов по скоростям. Это позволяло легко определить характеристики высокочастотной плазмы.

Однородный разряд

Исследование однородного разряда было проведено в трубке длиной 1 м с внутренним диаметром 3 см в спектрально чистом аргоне на частоте 1,2 Мгц при двух давлениях — 4,4 и 1,8 мм рт. ст. Расстояние между электродами жестко фиксировалось эбонитовым стержнем. Оно было равно 24 см. Расстояние между противозондами составляло 28 см. Зонд имел цилиндрическую форму, диаметр его составлял 0,1 мм, длина 0,4 см. Отношение площади поверхности зонда к площади поверхности одного противозонда равнялось $8 \cdot 10^{-4}$.

На рис. 2 приведено распределение характеристик однородного разряда при давлении 4,4 мм рт. ст. при эффективном напряжении на электродах в 400 в. При этом давлении расслоения разряда не наблюдалось даже при увеличении напряжения до 1500 в. Во втором случае при напряжении в 1500 в наблюдалось слабое расслоение.

Разряд при этих двух давлениях и напряжении в 400 в имел вид однородного столба оранжевого цвета. У электродов наблюдалась довольно резкая граница столба.

При давлении 4,4 мм рт. ст. концентрация электронов остается вдоль трубки почти постоянной. При давлении 1,8 мм рт. ст. наблюдается небольшой градиент концентрации электронов вдоль оси трубки. Температура электронного газа в пределах ошибок измерения вдоль оси трубки также остается постоянной. Увеличение давления в указанном диапазоне заметно не влияет на пространственное распределение температуры электронного газа.

Распределение потенциала имеет максимум в центре трубки на

ее оси и опадает к электродам. При давлении 4,4 мм рт. ст. средний градиент потенциала по оси трубки равен 6 в/см, а при давлении 1,8 мм рт. ст.— 3 в/см.

Как нетрудно заметить на рис. 2, распределение эквипотенциальных поверхностей аналогично распределению в положительном столбе при постоянном токе [2].

На протяжении всей длины разряда наблюдается поперечный градиент потенциала. Это указывает на отличие пространственного заря-

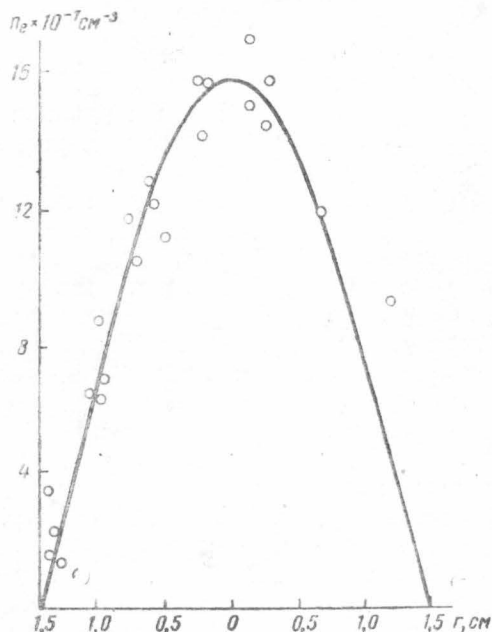


Рис. 3. Сравнение кривой Шоттки с распределением концентрации электронов по радиусу трубки в сплошном ВЧ разряде

да плазмы от нуля. Сделана оценка пространственного заряда для средней части разряда при давлении $p = 1,6$ мм рт. ст.

Распределение потенциала вдоль диаметра в середине трубки аппроксимировалось функцией вида

$$v(z) = 23(b) + 4 \cos \frac{\pi r}{rR} (b) \quad (1)$$

при изменении ее аргумента от 0 до R . Здесь R — радиус трубки. Пользуясь такой аппроксимацией для потенциала вдоль диаметра трубки, из уравнения Пуассона

$$\frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 4\pi\rho \quad (2)$$

были определены плотность и знак заряда ВЧ плазмы. ВЧ плазма оказалась заряженной положительно. Определенная таким путем величина разности концентраций ионов n_i и электронов n_e на оси трубки оказалась равной $n_i - n_e = n_p = 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$. Точность определения величины n_p зависит от точности измерения потенциала и в настоящих опытах составляла 10—15%.

Поперечное распределение концентрации электронов в однородной плазме остается без изменения по всей длине разрядной трубки. Это распределение соответствует формуле Шоттки.

На рис. 3 дано сравнение теоретической кривой Шоттки с экспериментальными данными в сечении трубки по диаметру на расстоянии 0; 0,5; 3,5 и 6,5 см от центра трубки при давлении 4,4 мм рт. ст. при напряжении на электродах 400 в.

Слоистый разряд

Измерения в слоистом разряде были произведены в той же разрядной трубке в аргоне.

При постепенном уменьшении давления, начиная от 1,5 мм рт. ст., однородный разряд в аргоне распадается на страты. По мере уменьшения давления число страт изменялось, при этом изменялось и свечение разряда; цвет разряда от оранжевого переходил в розово-белый, а затем в белый.

Была изучена в основном одна структура слоистого разряда, при которой разряд состоял из трех страт при расстоянии между электродами в 24 см. Такая структура была выбрана потому, что она была устойчива. Введение зонда в различные части разряда не изменяло существенно внешний вид разряда. При большем числе страт зонд вызывал слияние страт, заставляя их смещаться, а иногда приводил в движение. Следует отметить, что при наличии градиента плотности нейтральных частиц слои приходят в движение в сторону уменьшения плотности со скоростью потока нейтральных частиц.

На рис. 4 приведены графики распределения потенциала температуры и концентрации электронного газа в слоистом разряде в плоскости сечения вдоль оси трубки. Эти графики получены при давлении 0,045 мм рт. ст. и эффективном напряжении на электродах в 600 в. При других давлениях структура разряда иная.

В темном пространстве между стратами потенциал растет. Разность потенциалов в центре трубки по отношению к величине в приэлектродной части разряда 7—9 в. В центральной страте, на оси трубки, потенциал имеет наибольшее значение. Распределение потенциала симметрично относительно середины трубки. Распределение остальных характеристик по оси разряда повторяет внешний вид разряда и симметрично относительно середины трубки. Характер распределения концентрации электронов вдоль оси разряда указывает, что области наибольшей концентрации электронов расположены под электродами. В темных местах между слоями концентрации электронов меньше, чем в светлых частях разряда.

Характер поперечного распределения потенциала мало отличается от однородного разряда. Однако в этом случае поперечный градиент потенциала в слоистом разряде несколько больше, чем в однородном. По-видимому, это отличие вызвано несколько большей концентрацией электронов в слоистом разряде. В темных промежутках между слоями поперечный градиент потенциала несколько меньше, чем в ярких местах.

По всей длине разряда, за исключением приэлектродных частей в слоистом разряде, поперечное распределение концентрации электронов близко к распределению Шоттки.

На рис. 5 приведены графики поперечного распределения концентрации электронов вблизи электрода, полученные при давлении

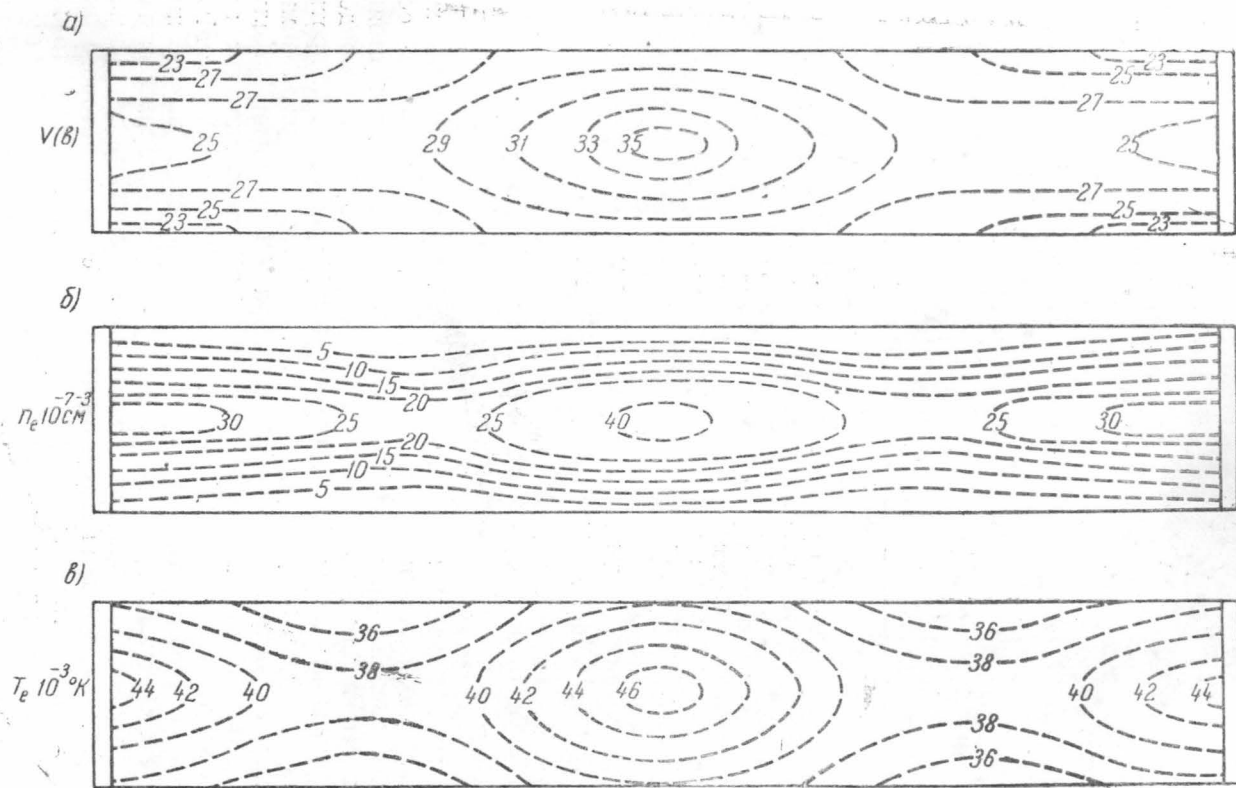


Рис. 4. Характеристики слоистого ВЧ разряда в сечении вдоль оси трубки в аргоне при давлении 0,045 мм рт. ст. и эффективном напряжении на электродах в 600 в: а — эквипотенциальные кривые в вольтах, б — кривые постоянной концентрации электронов $n_e \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-3}$, в — изотермы электронного газа в тысячах градусов К

0,07 мм рт. ст. и напряжении в 600 в, а также теоретическая кривая Шоттки. Как видно, вблизи электродов спад концентрации электронов от оси к стенкам более крутой, чем это следует по распределению Шоттки. Такое распределение концентрации электронов объясняется,

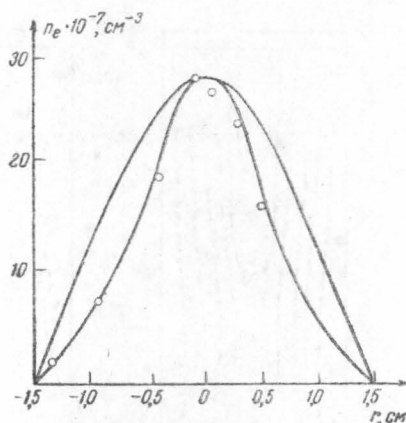


Рис. 5. Сравнение Шоттки с экспериментальным распределением концентрации электронов вдоль радиуса трубки вблизи электрода в аргоне при давлении 0,07 мм рт. ст. и эффективном напряжении на электродах в 600 в

по-видимому, наличием сильного радиального ВЧ поля вблизи электродов, которое в теории Шоттки не учитывается.

Исследование параметров однородного разряда в приэлектродной части

При малых давлениях яркая часть разряда вблизи колец, на которые подавалось высокочастотное напряжение, сжималась к оси трубки. Был проведен анализ этой части разряда с помощью постоянного магнитного поля. При этом оказалось, что из-под электродов (колец) устремляются потоки электронов к центру разряда и к противозонду. Как известно, направленный зонд позволяет измерять, помимо других характеристик, еще скорость дрейфа электронов [3]. Количественное исследование этого явления было проведено методом направленного зонда в спектрально чистом гелии на частоте 5 Мгц. В этом случае разрядная трубка имела длину 60 см и внутренний диаметр 5,2 см. В центре трубки имелся отросток, в котором мог перемещаться при помощи магнита подвижной зонд. Сам зонд имел форму диска из платины диаметром 3 мм, одна сторона которого была остеклована. Зонд мог перемещаться поперек трубки и в то же время поворачиваться на оси. Расстояние между электродами было 13,5 см, а расстояние между электродами и противозондами 2 см. Амплитуда ВЧ напряжения была 550 в, давление газа — $9 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Во время измерений эти параметры поддерживались строго постоянными.

На рис. 6 представлен продольный разрез приэлектродной части разряда, на котором нанесены эквипотенциальные линии и линии

равных концентраций электронов. На рис. 7 представлены распределения потенциала температуры и концентрации электронного газа по оси трубки от середины разряда до противозонда.

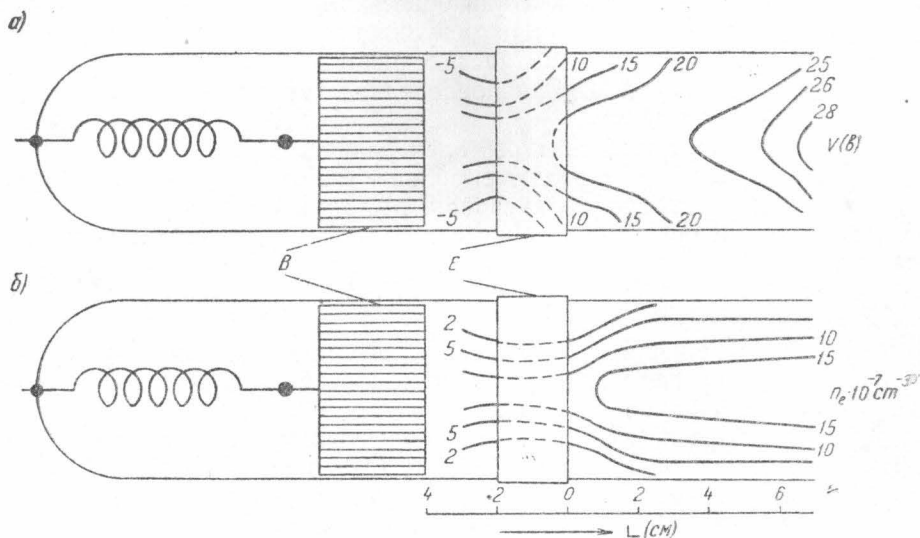


Рис. 6. Распределение некоторых характеристик ВЧ разряда в плоскости сечения трубки в гелии при давлении 0,09 мм рт. ст. и эффективном напряжении на электродах в 550 в: а — эквипотенциальные линии (в вольтах), б — линии равных концентраций электронов $n_e \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-3}$

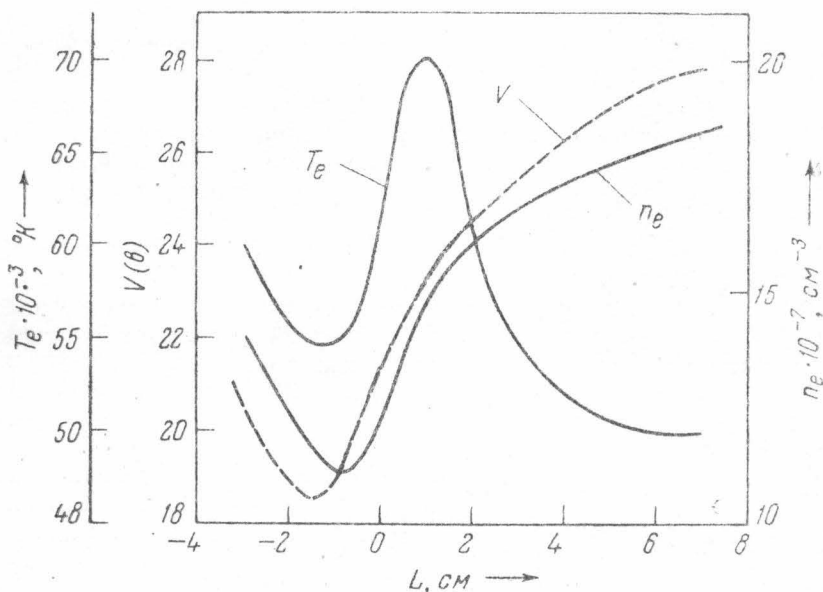


Рис. 7. Распределение по оси трубки в гелии при давлении 0,09 мм рт. ст. и эффективном напряжении на электродах в 550 в потенциала пространства, температуры и концентрации электронов

Как видно из графиков рис. 7, потенциал и концентрация электронов имеют как поперечный, так и продольный градиент, которые максимальны в прикольцевых областях.

Наличие большого поперечного и продольного градиента указанных характеристик разряда в этой области можно объяснить как за счет инерции положительных ионов, так и структурой поля у электрода. Положительные ионы, как более инертные, не успевают покинуть разрядный промежуток, в результате чего происходит накопление их между электродной частью разряда. Это способствует установлению специфического распределения характеристик разряда в приэлектродных частях.

Распределение температуры электронного газа по оси разряда показывает, что приэлектродные области являются местом существования наиболее быстрых электронов. Метод направленного зонда дал возможность непосредственно измерить величину и направление дрейфа электронов. Оказалось, что потоки электронов направлены от электродов в обе стороны. По мере удаления от электродов абсолютная величина скорости дрейфа уменьшается.

Из распределения характеристик разряда по оси трубки видно, что наряду с градиентом потенциала, способствующего направленному потоку электронов от колец к центру разряда и к противозонду, существует градиент концентрации электронов, способствующий обратной диффузии электронов. Поэтому был проведен подсчет скорости дрейфа электронов с учетом вышеуказанных условий.

Скорость дрейфа электронов должна выражаться формулой [3]:

$$v_e = K_e E - \frac{D_e}{n_e} \frac{dn_e}{dz}, \quad (3)$$

где K_e — подвижность электронов, E — градиент потенциала пространства, n_e — концентрация электронов, D_e — коэффициент диффузии электронов, dn_e/dz — градиент концентрации электронов по оси трубки.

Вычисленная по формуле (3) скорость дрейфа электронов оказалась равной $7 \cdot 10^6$ см/сек, а измерения направленным зондом $6,7 \cdot 10^6$ см/сек. Это дает нам уверенность в правильности определения экспериментальным методом направленного зонда величины и направления скорости дрейфа электронов.

Таким образом, можно утверждать, что приэлектродные области ВЧ стационарного разряда играют как бы роль катода, подобно стационарному тлеющему разряду на постоянном токе. Именно здесь образуются обладающие наибольшей энергией электроны, которые затем разлетаются в обе стороны от электродов.

Заключение

Измерения показали, что при ВЧ разряде и в однородном и в слоистом столбе распределение концентрации электронов по диаметру трубки хорошо следует формуле Шоттки везде, за исключением приэлектродных частей разряда. Сделана оценка положительного пространственного заряда на оси трубки, исходя из распределения потенциала вдоль диаметра трубки в случае однородного разряда.

Распределение эквипотенциальных поверхностей в однородном столбе разряда аналогично распределению в положительном столбе постоянного тока, но носит симметричный характер. Эквипотенциальные поверхности выгнуты в сторону электродов. По мере приближения к центру трубки этот прогиб уменьшается. В случае слоистого столба

эквипотенциальные линии замыкаются кольцами вокруг областей максимального свечения. При этом в местах наибольшего свечения потенциал, температура и концентрация электронов достигают максимальных значений.

В приэлектродных частях отмечена высокая концентрация электронов. Методом направленного зонда установлено, что в обе стороны от кольцевого электрода имеется дрейф электронов.

Авторы выражают благодарность проф. Н. А. Капцову за интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джерпетов Х. А. и Патеюк Г. М. ЖЭТФ, 28, № 3, 343, 1955.
2. Капцов Н. А. Электроника, 1954, стр. 277.
3. Грановский В. Г. Электронный ток в газах, стр. 288, 283, 1952.

Поступила в редакцию
26.12 1957 г.

Кафедра электроники