

УДК 537.525

Э. М. РЕЙХРУДЕЛЬ, Г. В. СМИРНИЦКАЯ, А. Н. МАВЛЯНОВ

## ИЗМЕРЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ТОКА НА КАТОД В РАЗРЯДЕ С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Измерено распределение плотности ионного и электронного токов по поверхности катода в разряде с осциллирующими электронами при различных значениях параметров. Получено распределение электронов по энергиям. Обсуждается механизм электронных токов на катод.

Для уточнения отдельных сторон механизма разряда с осциллирующими электронами и выяснения условий, существенных при использовании разряда в ионных насосах, манометрах, источниках ионов и электронов, представляет интерес измерение распределения плотности заряженных частиц по поверхности катода.

Расчет распределения плотности ионного тока по поверхности катода приведен в работе [1]. В [2] с помощью секционированного катода измерено распределение плотности разрядного тока по радиусу катода, установлено, что при определенных значениях параметров ( $H$ ,  $p$ ,  $V_a$ ) плотность тока является наибольшей вблизи центра катода. В [3] показано, что в центральную часть катода наряду с ионами идут также электроны. Задерживая электроны полями, создаваемыми сетками, в [3] было получено радиальное распределение плотности ионного тока. В [4] с помощью зондов, помещенных за отверстием в центре катода, установлено, что ионы попадают на катод под разными углами. В [5] определено угловое распределение энергий ионов, попадающих в центр катода, и предложен «ионно-кинетический» метод измерения распределения потенциала в разряде. В [6] получены кривые распределения плотности ионных токов, идущих из центрального отверстия в катоде, по углам и по энергиям. Показано, что при определенных значениях параметров разряда электронный ток в центральной части катода больше ионного; измерены энергии этих электронов. Однако при измерениях ионного тока не исключалась электронная составляющая. В [7] приведено распределение плотности ионного тока по радиусу катода для ионов, падающих на катод нормально и под разными углами. Измерения проводились в стандартной ячейке ионного насоса НЭМ — 100 при  $V_a = 7$  кв,  $H = 700$  эрст. В [8] при измерении распределения плотности ионного тока по катоду не учитывалась электронная составляющая тока. В [9] произведено разделение тока, идущего в центральную часть катода,

на электронную и ионную составляющие; показано, что часть электронов приходит сюда непосредственно с противоположного катода.

В настоящей работе измерены компоненты токов по поверхности катода при различных условиях в разряде. Во избежание потерь заряженных частиц из измерительной схемы исключены сетки и промежуточные диафрагмы.

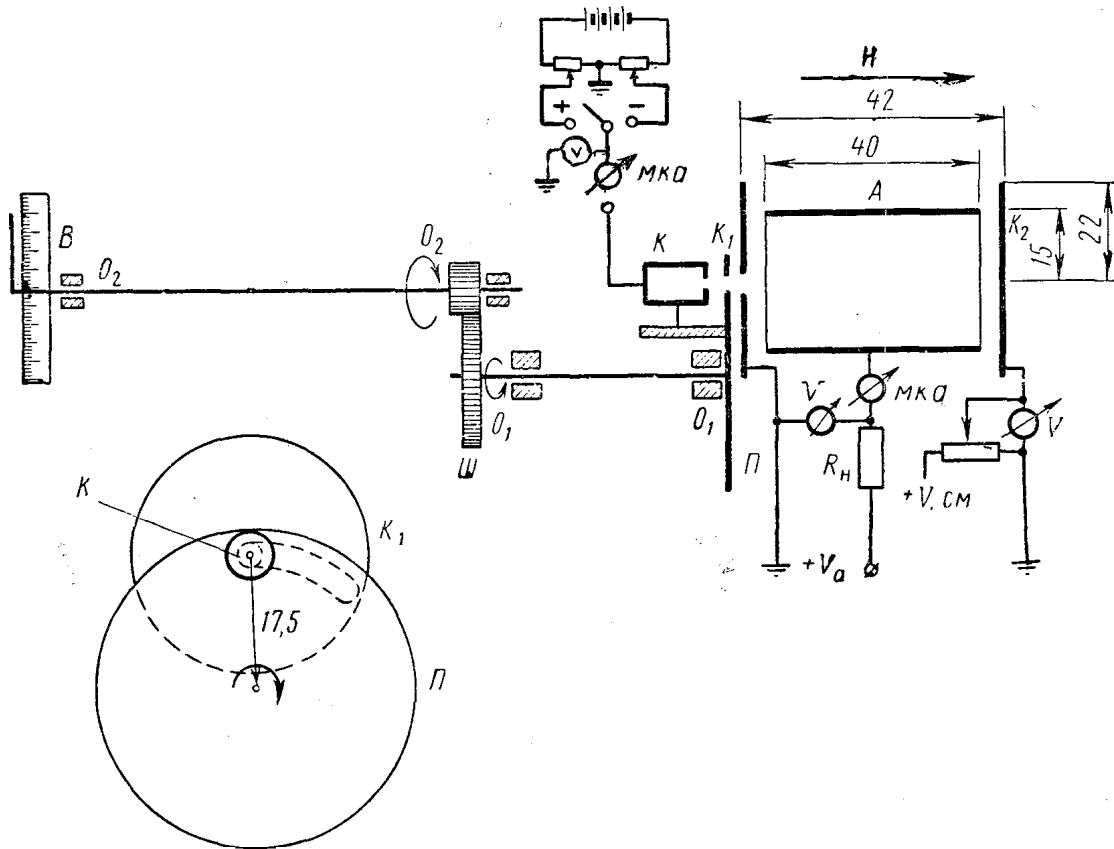


Рис. 1. Схема измерительной трубки с подвижным коллектором.  $A$  — анод (цилиндрический),  $K_1$ ,  $K_2$  — катоды,  $K$  — коллектор,  $P$  — подвижная пластина (диск),  $Ш$  — шестерня,  $O_1O_1$  и  $O_2O_2$  — оси,  $B$  — шкала отсчета

### Эксперименты и их обсуждение

Схема измерений представлена на рис. 1. В одном из катодов ( $K_1$ ) прорезана кривая щель, направленная от центра к периферии. Подвижная пластина  $P$  с отверстием  $\phi = 2$  мм вплотную прилегает к катоду  $K_1$ . За пластиной  $P$  на расстоянии 1 мм от нее помещен коллектор  $K$  (цилиндр Фарадея), улавливающий все заряженные частицы, проходящие через отверстие под различными углами (от 0 до  $80^\circ$ ). Коллектор жестко скреплен с пластиной  $P$  и может поворачиваться вокруг оси  $O_1O_1$ . При повороте отверстие в пластине перемещается вдоль щели и коллектор  $K$  измеряет распределение токов по радиусу катода. Ось  $O_1O_1$  связана с осью  $O_2O_2$  зубчатой передачей. Поворот оси  $O_2O_2$  осуществляется через вакуумное уплотнение. Вся длина щели проходит при повороте  $O_2O_2$  на  $540^\circ$ ; при повороте на  $6^\circ$  отверстие смещается по радиусу катода на 0,16 мм.

Полный ток на коллекторе равен

$$I_{\text{общ}} = I_i - I_e + I_{e\gamma} - I_{e\text{отв}}, \quad (1)$$

где  $I_i$  — ионный ток, поступающий на коллектор из разряда и с поверхности анода;  $I_e$  — электронный ток, идущий с противоположного катода

и из разрядного промежутка;  $I_{ey}$  — электронный ток, возникающий вследствие ионно-электронной эмиссии с коллектора  $K$ ;  $I_{e\text{ отв}}$  — электронный ток вторичной эмиссии с края отверстия катода  $K_1$ .

Подавая напряжение  $V_{см}$  между катодами  $K_1$  и  $K_2$  и задерживающий потенциал  $V_3$  между коллектором и катодом  $K_1$ , можно разделить и измерить указанные выше компоненты общего тока на коллектор.

При  $V_{см}=0$ ,  $V_3<0$  задерживаются электроны, идущие на коллектор из разряда и с краев отверстия катода:

$$I_{1\text{общ}} = I_i + I_{ey}. \quad (2)$$

При  $V_{см}>0$ ,  $V_3=0$  исключается электронный ток  $I_e$ . Тогда

$$I_{2\text{общ}} = I_i + I_{ey} - I_{e\text{ отв}}. \quad (3)$$

При  $V_{см}>0$ ,  $V_3>0$  исключаются токи  $I_e$  и  $I_{ey}$ .

$$I_{3\text{общ}} = I_i - I_{e\text{ отв}}. \quad (4)$$

Из уравнений (1)—(4) можно определить компоненты тока.

В экспериментах  $V_{см}$  менялось от 20 до 30 в,  $V_3$  — от  $\pm 10$  до 75 в; при этих значениях  $V_{см}$  и  $V_3$  сила разрядного тока не изменялась. Измерения производились при анодных напряжениях  $V_a = 1000—3000$  в, магнитных полях  $H = 200—2000$  эрст в воздухе и в инертных газах в диапазоне давления  $10^{-5}—10^{-7}$  тор. Данный метод позволяет получить достаточно точные значения компонентов тока только в первом режиме [10] разряда, когда потенциал центра высок. В этом случае наложение сдвигающего напряжения между катодами ( $V_{см}$ ) и тормозящего потенциала ( $V_3$ ) между катодом и коллектором не влияет существенным образом на энергию ионов.

В случае второго режима разряда, когда потенциал центра мал (порядка 10—30 в), используемые значения  $V_{см}$  и  $V_3$  могут сильно изменить энергии ионов, образовавшихся вблизи оси. Однако доля последних во всем потоке частиц, идущих в центральную часть катодной поверхности, во втором режиме составляет лишь несколько процентов. Поэтому во втором режиме разряда неточность в определении компонентов токов для центральной части катода радиуса ( $r_k \approx 3—4$  мм) может достигать 20—25%. При этом значения ионных токов получаются завышенными, а электронных — заниженными.

Опыты показали, что токи  $I_{ey}$  и  $I_{e\text{ отв}}$  составляют 10—30% от тока  $I_i$ .

В настоящей работе рассматриваются только компоненты тока  $I_i$  и  $I_e$ .

На рис. 2 приведены кривые разрядного тока  $I_p$  (рис. 2, а), плотности полного тока  $j_{i+e}$  на катод и плотностей электронного  $j_e$  и ионного  $j_i$  токов на различных расстояниях  $R$  от центра катода, как функции  $H$ .

В [10] было показано, что при  $V_a = \text{const}$  и  $p = \text{const}$  в зависимости от  $H$  разряд может существовать в двух режимах. В области слабых  $H$  в разряде преобладает отрицательный объемный заряд, плотность которого при увеличении  $H$  возрастает. Увеличение радиального падения потенциала сопровождается при этом ростом разрядного тока, который достигает максимального значения при  $V_a - V_0 \approx V_a$ , где  $V_0$  — потенциал центра разрядного промежутка. При дальнейшем увеличении  $H$  радиус циклоид, описываемых электронами, колеблющимися вблизи оси, уменьшается настолько, что энергия, набираемая ими при движении по  $r$ , недостаточна для ионизации газа. Вблизи оси возникает область слабой

ионизации — «виртуальный катод». При этом осевое падение потенциала и скорость ухода ионов на катод сильно уменьшаются. Положительный заряд ионов поднимает кривую распределения потенциала по радиусу в той части разрядного промежутка, где имеет место ионизация газа. Радиальное падение потенциала здесь уменьшается; это сопровождается падением разрядного тока (2-й режим разряда).

Из рис. 2 видно, что плотность ионного тока  $j_i$  максимальна в центральной части поверхности катода радиусом 2 мм. Плотность ионного

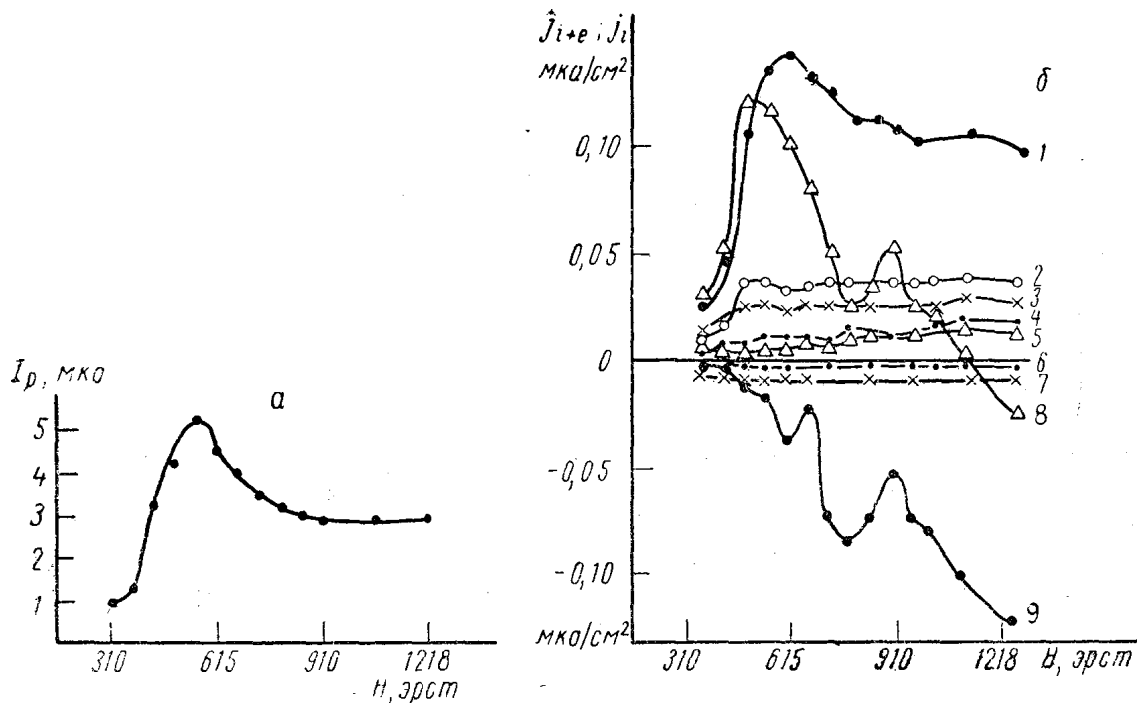


Рис. 2. Зависимость разрядного тока ( $I_p$ ) от напряженности  $H$  магнитного поля (а); зависимости плотностей ионного и электронного токов  $j_{i+e}$  и  $j_i$  на коллектор как функции от  $H$  при различных значениях  $R$  (б);  $V_a=2000$  в,  $p=4 \cdot 10^{-7}$  тор; 1 —  $j_i$  при  $R=0$ ; 2 —  $j_i$  при  $R=5,5$  мм; 3 —  $j_{e+i}$  при  $R=5,5$  мм; 4 —  $j_i$  при  $R=12$  мм; 5 —  $j_{e+i}$  при  $R=12$  мм; 6 —  $j_e$  при  $R=12$ ; 7 —  $j_e$  при  $R=5,5$ ; 8 —  $j_{e+i}$  при  $R=0$ ; 9 —  $j_e$  при  $R=0$

тока на периферийные части катода несколько увеличивается при больших  $H$ , так как область ионизации с ростом  $H$  приближается к катоду и предельный угол падения ионов на катод становится больше. Общий ход кривой разрядного тока (рис. 2, а) повторяет ход кривой ионного тока, идущего на центральную часть поверхности катода (рис. 2, б при  $R=0$  и  $R=2$  мм, где  $R$  есть расстояние центра отверстия коллектора от центра катода). Это указывает на то, что ионный ток, идущий в эту часть катода, является основной составляющей разрядного тока.

В первом режиме разряда плотность электронного тока, идущего в центр катода, составляет несколько процентов от плотности ионного тока. Во втором режиме плотность электронного тока вблизи оси увеличивается и становится сравнимой с плотностью ионного тока. На кривой электронных токов  $j_e=f(H)$  наблюдаются несколько максимумов. Появление этих экстремумов сопровождается возникновением интенсивных низкочастотных колебаний и шумов.

На рис. 3 приведены кривые разрядного тока и плотностей электронного и ионного токов для разных  $R$  как функции давления газа в первом (рис. 3, а) и во втором (рис. 3, в) режимах разряда.

При слабых  $H$  (1-й режим) разрядный ток, а также плотность ионного тока на центральную часть катода в области давления  $10^{-5}$ — $10^{-7}$  тор линейно зависят от  $p$ . Однако, начиная с некоторого значения  $R$ , при уменьшении  $p$  наблюдается отклонение кривой  $j_i=f(p)$  от линейности. По мере увеличения  $R$  это отклонение наступает при больших значениях  $p$ .

Линейная зависимость разрядного и ионного тока от давления имеет место, если основным механизмом ухода электронов на анод являются

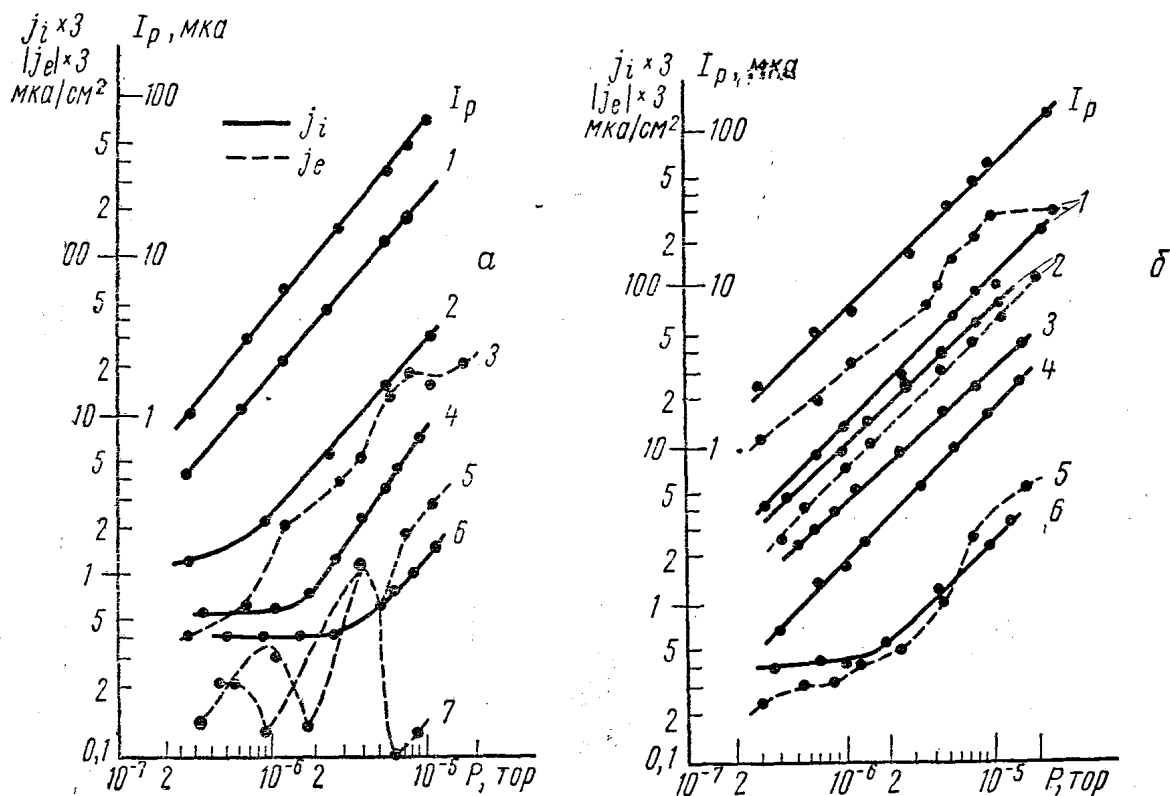


Рис. 3. Зависимости  $I_p$ ,  $j_i$ ,  $j_e$  от давления  $p$ , а — первый режим разряда,  $V_a=2000$  в;  $H=310$  эрст, 1 и 3 — при  $R=0$ ; 2 и 5 при  $R=6$  мм; 4 и 7 при  $R=10$  мм; 6 — при  $R=12$  мм; б — второй режим разряда,  $V_a=2000$  в,  $H=1218$  эрст; 1 — при  $R=0$ ; 2 — при  $R=2$  мм; 3 и 5 — при  $R=8$  мм; 4 — при  $R=12$  мм; 6 — при  $R=14$  мм

их соударения с атомами газа [11]. С изменением давления изменяется лишь время пребывания электронов в объеме и частота соударений; общее же число ионизирующих соударений на пути к аноду остается неизменным. Для того чтобы электроны могли уходить из объема лишь за счет соударений, траектории их должны быть замкнутыми, т. е. проекции траекторий их на плоскость, перпендикулярную к оси, должны представлять замкнутые кривые. В этом случае электрон движется так долго, пока не выполнит соответствующий средний свободный пробег и не испытает соударение.

При слабых  $H$  условие замкнутости траекторий выполняется только для электронов, вышедших из центральной части катода. Для остальных электронов данное  $H$  может оказаться недостаточным, чтобы удержать их на определенном радиусе, и траектории этих электронов будут незамкнутыми. При малых  $H$  такие электроны могут уйти на анод прежде, чем испытают соударение с атомом газа. Возможность ухода на анод электронов не только за счет соударений с атомами газа приводит при уменьшении давления к сокращению для данного радиуса размера области ионизации в осевом направлении и к отступлению зависимости

$j_i = f(p)$  от линейности. Чем больше  $R$ , тем быстрее уходят электроны на анод, и тем при больших  $p$  наступает отклонение от линейности.

Из рис. 3, а видно, что в кривой плотности ионного тока на периферийные части катода наблюдается некоторое насыщение. Последнее говорит о том, что этот ионный ток не связан с процессами, имеющими место в объеме; он может быть объяснен, например, как фоновый ионный ток с анода, возникающий при бомбардировке быстрыми электронами поверхности анода, покрытой адсорбированными пленками. Хотя ионный ток на периферийные части катода нелинейно зависит от  $p$ , разрядный ток в этой области давлений пропорционален  $p$ . Отсюда можно заключить, что основная ионизация при этих значениях полей происходит вблизи оси, и разрядный ток определяется в основном процессами, происходящими здесь. Периферийная часть катода не играет существенной роли в развитии лавины и в поддержании разряда.

При больших  $H$  (II-режим) в ионизации газа принимают участие также электроны, вышедшие с периферийных частей катода и образовавшиеся в объеме при больших  $r$ , так как магнитное поле достаточно, чтобы сделать траектории замкнутыми. Плотности ионных токов при этих полях линейно зависят от  $p$  для больших расстояний от центра катода (рис. 3, в).

Распределение плотностей ионных и электронных токов по поверхности катода для разных значений  $p$  в двух режимах разряда даны на рис. 4. Электронные и ионные токи возрастают с ростом давления. Электронный ток максимален в центральной части катода, имеющей радиус  $\sim 2$  мм, причем для первого режима разряда при слабых  $H$  максимум смещен от оси на  $\sim 2$  мм (рис. 4, а). Положение максимума зависит от магнитного поля; с ростом  $H$  оно смещается ближе к центру. Смещение максимума может быть объяснено наличием отверстия в одном из катодов и электронно-оптическими свойствами аксиального магнитного поля [9].

Во втором режиме разряда плотность электронного тока в центральной части катода может превысить плотность ионного тока (рис. 4, б).

В первом режиме ( $H < 500$  эрст) относительная плотность ионных токов на катоде уменьшается плавно с увеличением  $R$  (рис. 4, в). Во втором режиме ( $H > 500$  эрст) в кривой распределения ионного тока появляется «ступенька», которая становится все отчетливее с ростом  $H$ .

Такой ход кривой  $j_{iR}/j_{i0}$  объясняется отмеченным выше изменением распределения потенциала в горящем разряде.

В первом режиме разряда распределение потенциала по радиусу является квадратичной функцией  $r$  и отрицательный пространственный заряд распределен равномерно. Во втором режиме вблизи оси возникает область «виртуального катода», а ионизация по  $r$  начинается с некоторого расстояния от оси. Положение «ступеньки» на кривой  $\frac{j_{iR}}{j_{i0}} = f(R)$

приблизительно соответствует внешней границе «виртуального катода» [10]. В кривой  $j_e = f(R)$  на том же расстоянии от оси наблюдается уменьшение электронного тока.

При измерениях наблюдалось также изменение состава газа в горящем разряде. Опыты, проведенные с помощью омегатрона (ИПДО-1), подтвердили, что некоторая доля ионов газа сорбируется на периферийных частях катода.

Для выяснения природы электронных токов, идущих на катод, были измерены энергии электронов у катода в двух режимах разряда. Типичные кривые приведены на рис. 5. В первом режиме ( $H = 310$  эрст)

распределение электронов по энергиям имеет вид обычный для вторичных электронов, возникших при бомбардировке катода положительными ионами; максимальная энергия электронов равна  $\sim 10-15$  эв. При подаче между катодами небольшой разности потенциалов ( $10-20$  в) энергия электронов в этом режиме изменяется на такую же величину. Это служит подтверждением того, что в первом режиме разряда электроны,

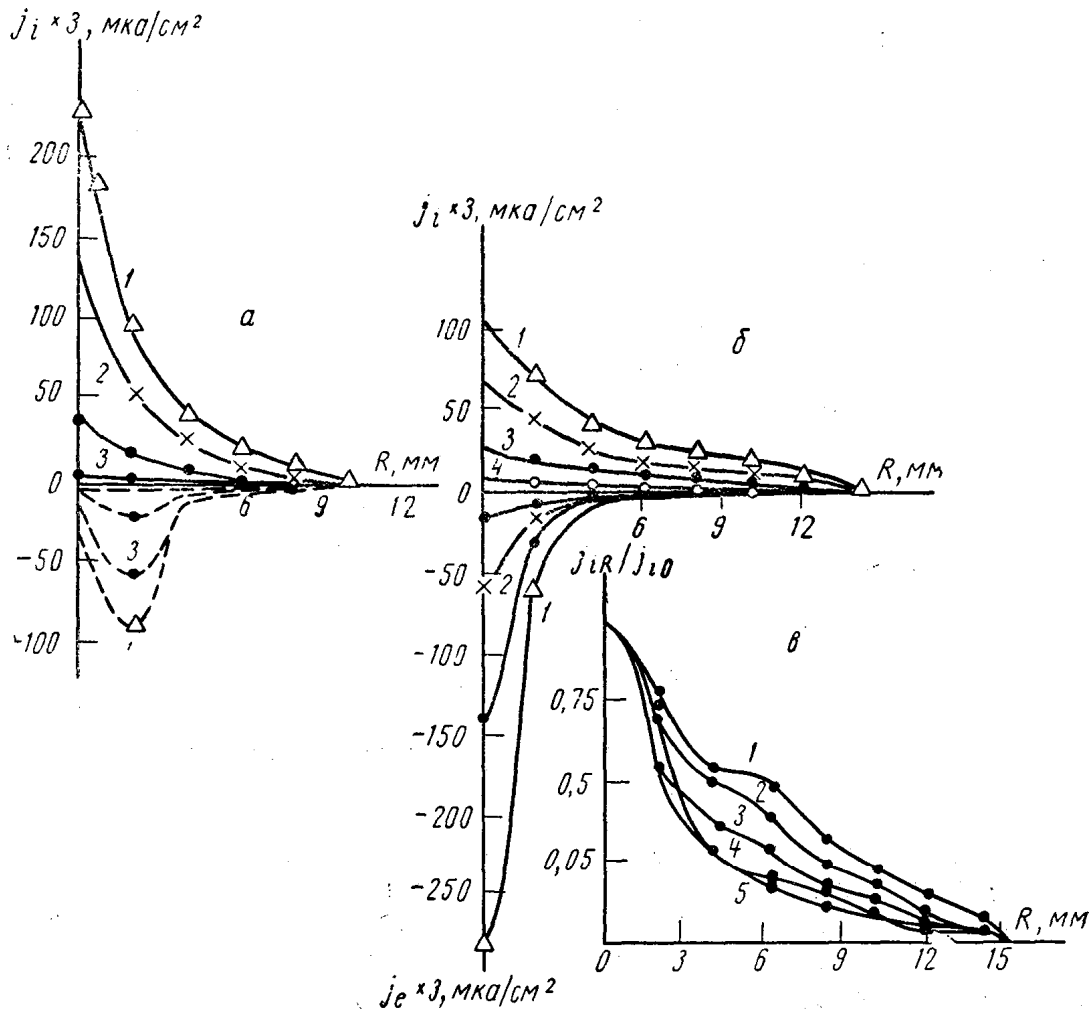


Рис. 4. Распределение  $j_i$  и  $j_e$  по радиусу катода. Параметр — давление газа. а — первый режим ( $V_a = 2000$  в,  $H = 310$  эрст); б — второй режим ( $V_a = 2000$  в,  $H = 1218$  эрст), 1 —  $p = 1 \cdot 10^{-5}$ , 2 —  $p = 5,6 \cdot 10^{-6}$ , 3 —  $p = 2,4 \cdot 10^{-6}$  и 4 —  $p = 4 \cdot 10^{-7}$  торр; в — кривая  $j_i R / j_i 0 = f(R)$ . Параметр  $H$  ( $V_a = 2000$  в,  $p = 4 \cdot 10^{-7}$  торр), 1 —  $H = 1218$ , 2 — 910, 3 — 615, 4 — 310, 5 — 500 эрст

уловленные коллектором, приходят сюда с противоположного катода. Эти электроны не испытали соударения с атомами газа и, обладая некоторой начальной энергией, попадают на противоположный катод.

Во втором режиме ( $H = 1780$  эрст) увеличивается число быстрых электронов; максимальная энергия их может достигать 100 эв, при этом изменяется также наклон кривой  $\ln j_e = f(V_a)$  (рис. 5, в). При подаче между катодами разности потенциалов  $V_{см}$  в этом случае наблюдается изменение энергии электронов, не соответствующее приложенной разности потенциалов (рис. 5, а,  $H = 1218$  эрст). Следовательно, среди электронов, идущих на катод в этом режиме разряда, имеются также электроны, образовавшиеся в результате ионизации внутри разрядного промежутка. Дополнительную энергию для попадания на катод эти электро-

ны могут получить за счет высокочастотных и низкочастотных колебаний, которые имеют место в этом режиме. Выделяя электронный или ионный компонент тока на коллектор и подавая напряжение с сопротивления через широкополосный усилитель на вход двухлучевого импульсного осциллографа, можно наблюдать шумы с частотами

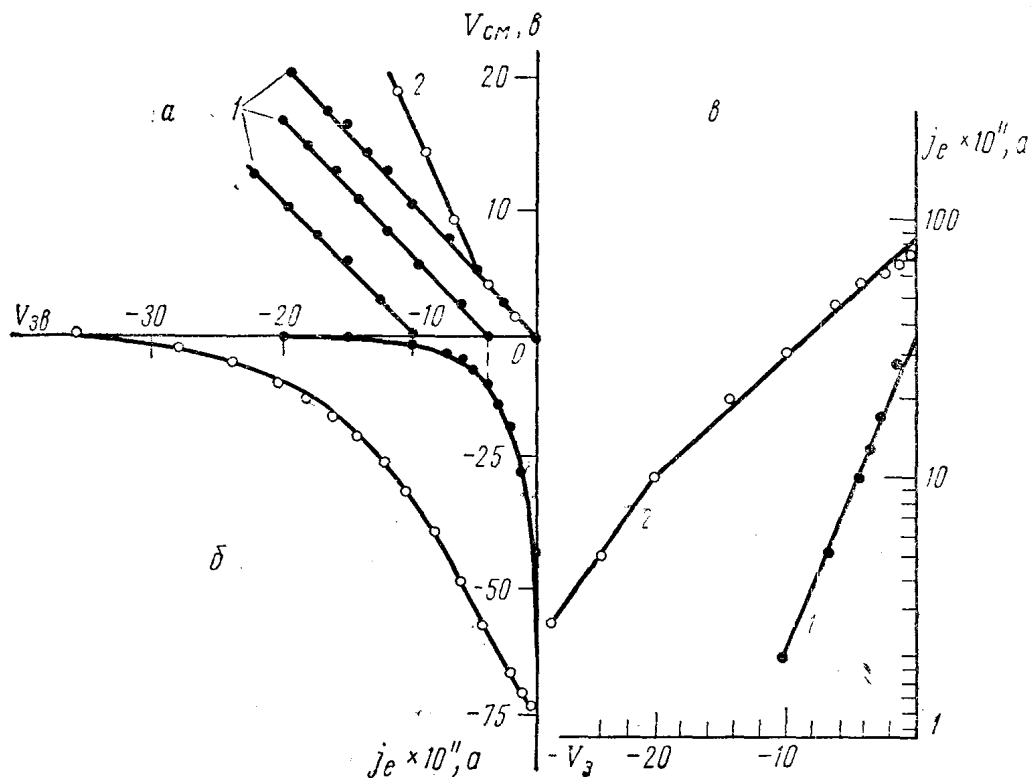


Рис. 5. Распределение электронов, поступающих на катод, по энергиям для двух режимов разряда ( $V_a=2000$  в,  $p=4,2 \cdot 10^{-7}$  тор). 1 — первый режим (а, б, в —  $H=310$ ); 2 — второй режим (а —  $H=1218$ ; б и в —  $H=1780$  эрст)

$2-4 \cdot 10^4$  гц, сопровождающие лишь электронную составляющую тока. Можно предположить, что низкочастотные шумы связаны с колебаниями анодного падения потенциала. Изменения потенциала центра, происходящие при этом, приводят к тому, что в определенные моменты времени электроны могут достигнуть катода. При этом выход электронов на катоды из разрядного промежутка носит импульсный характер.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Смирницкая Г. В., Нгуен Хыу Ти. Rep. on the 4-th Internat. Vac. Congr., Manchester, 43, 1968.
2. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Борисенко А. И. «Радиотехника и электроника», 1, № 2, 253, 1956.
3. Крейнделъ Ю. Е., Ионов А. С. ЖТФ, 34, вып. 7, 1966.
4. Крауер W. J. Appl. Phys., 33, 6, 2093, 1962.
5. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Баберцян Р. П. ЖТФ, 36, вып. 7, 1226, 1966.
6. Смирницкая Г. В., Баберцян Р. П. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 3, 23, 1967.
7. Курбатов О. К. ЖТФ, 36, вып. 9, 1665, 1966.
8. Рудницкий Е. М. ЖТФ, 37, вып. 5, 927, 1967.
9. Кучеренко Е. Т., Саенко В. А. ЖТФ, 37, № 1, 112, 1967.
10. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Нгуен Хыу Ти. Rep. on the 8-th Internat. Conf. on Phenomena in Ionized. Gases. Vienna 187, 1967.
11. Нгуен Хыу Ти. Реферат кандид. диссертации. МГУ, 1968.

Поступила в редакцию  
18.11 1968 г.

Кафедра  
общей физики