Вестник
МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
№ 3 — 1967

УДК 537.525

Г. В. СМИРНИЦКАЯ, Р. П. БАБЕРЦЯН

О ПОТОКАХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ К КАТОДУ В РАЗРЯДЕ ТИПА ПЕННИНГА В ВЫСОКОМ ВАКУУМЕ

Исследуются ионные токи в разряде с холодными катодами типа Пеннинга при помощи коллектора, состоящего из концентрических, изолированных друг от друга колец, помещенного в пространстве за одним из катодов, в центре которого имеется малое отверстие. Исследуются также токи электронов, вылетающих через отверстие в катоде и попадающих в цилиндр Фарадея, помещенный за катодом. Электронные токи наблюдаются при низких давлениях и сильных магнитных полях. Приведены кривые распределения ионов и электронов по энергиям в разряде при разных параметрах.

Введение

В работах [1—4] исследовался пучок ионов, выходящий из разряда типа Пеннинга через отверстие в центре одного из катодов; при этом измерялся в основном ионный пучок, идущий вдоль оси разряда. В работах [5, 6, 10] показано, что при низких давлениях ионы вылетают через отверстие в центре катода расходящимся пучком. В настоящей работе исследуется угловое распределение ионов в пучке, а также условия, при которых через отверстие в центре катода выходят электроны. Нами ранее было показано [6], что измерение максимальной энергии ионов в пучке при помощи коллектора, состоящего из изолированных друг от друга концентрических колец, позволяет определить потенциал центра и распределение потенциала по радиусу в плоскости симметрии разряда. Измерение описанным методом распределения ионов пучка по углам и по энергиям дает топографию электрического поля в разряде.

Наличие электронов с повышенной энергией в разряде типа Пеннинга с накаленным катодом описано в работе [7]. В работах [3, 4] наблюдался выход электронов из разряда типа Пеннинга с холодными катодами вдоль оси z при давлении ниже 10^{-4} *тор* и относительно больших магнитных полях (больше 500 *эрст*). В этих работах авторы объясняют выход электронов понижением потенциала при определенных условиях отрицательным объемным зарядом. Измерение электронных токов через центр катода в трубках с различной геометрией показало, что выход электронов (без вытягивания) зависит от геометрии разрядного промежутка и от параметров разряда (V_a, P, H). Измерение энергии электронов подтверждает, что при условиях, когда наблюдается электронный ток, потенциал в центре разряда понижается объемным

зарядом. Все измерения проводились в воздухе. Очевидно в других газах распределение потенциала и положение областей ионизации несколько изменится.

Ионные характеристики

Ионные токи снимались в разрядных трубках с электродной системой, показанной на рис. 1. Ионы, образовавшиеся на оси, попадали на центральный стержень коллектора, ионы, возникшие на некотором расстоянии от оси, вблизи плоскости симметрии разряда составляют основной ионный ток и попадают на соответствующие кольца коллектора [6].

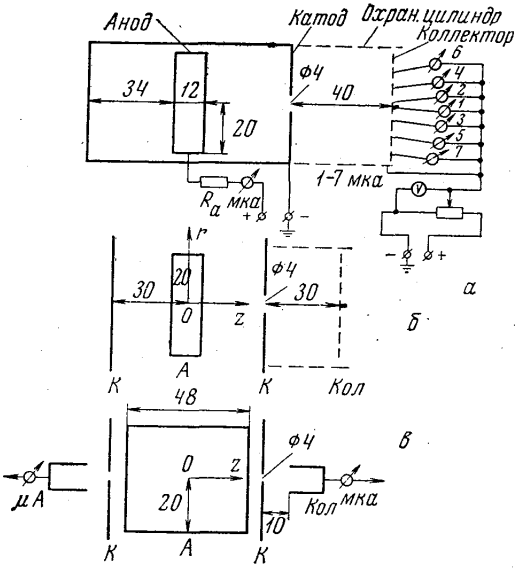

Рис. 1. Схема расположения электродов в трех типах разрядных трубок с коллекторами и схема измерения. Средние радиусы колец секционированного коллектора. $R_1=-0{,}15$, $R_{2+3}=0{,}56$, $R_4=0{,}87$, $R_5=1{,}2$, $R_6=1{,}6$, $R_7=2$ *см*

На рис. 2 (*а, б*) приведены типичные кривые зависимости разрядного тока и радиального распределения плотности ионного тока от магнитного поля. Из рисунков видно, что ход суммарного ионного тока повторяет ход разрядного тока. Для каждого кольца коллектора максимум тока достигается при определенной напряженности магнитного поля (H), которое тем больше, чем больше радиус соответствующего кольца коллектора. Такой характер кривых объясняется следующим образом. При слабом H (~200 *эрст* при $V_a=3000$ *в*) ионизация осуществляется в основном электронами вблизи оси и нарастает с приближением к плоскости симметрии разряда. При увеличении H в ионизации начинают принимать участие электроны, образовавшиеся на некотором расстоянии от оси, и более быстрые электроны, летевшие от катода и получившие большие радиальные скорости в результате упругих соударений. Возникшие при ионизации положительные ионы движутся в поле по r и по z к катодам; часть из них попадает в центр катода и выходит из отверстия в нем расходящимся пучком [5, 6]. Для каждого значения радиуса r_i имеется $H_{кр}$, при котором ионизация на данном радиусе максимальна. При $H>H_{кр}$ для данного r уменьшение циклотронного радиуса ухудшает условия ионизации на этом расстоянии и создает возможность для участия в ионизации более быстрых электронов и электронов, образовавшихся на большем расстоянии от оси. Это приводит к приближению области ионизации (внешней границы «виртуального катода») к аноду.

Ионы, возникшие в анодной области разряда на различных расстояниях от оси, движутся к оси, повышают потенциал центра [6] и улучшают условия ионизации осевыми электронами, колеблющимися вдоль оси. Ионный ток на центральном стержне коллектора растет. При определенном значении H для данного V_a образование большого отрица-

тельного объемного заряда в форме кольца вблизи анодного цилиндра приведет к понижению потенциала центра и радиального поля в значительной части объема в области анода. Условия ионизации в разряде как осевыми, так и радиальными электронами ухудшаются. При этом наблюдается минимум разрядного тока и падение ионных токов на всех кольцах коллектора. Дальнейшее увеличение H ведет к возникновению сильного электрического поля между виртуальным катодом и анодом, достигающего такой величины, что магнитное поле не может удержать электроны на крайнем радиусе «виртуального катода». Часть электронов уходит из этой области, плотность отрицательного объемного заряда по радиусу уменьшается, ионизация осевыми и радиальными электронами усиливается. Этим объясняется появление следующего небольшого максимума в кривых ионных и разрядных токов. Последующее уменьшение токов объясняется аналогично.

Из рис. 2 видно, что плотность ионного тока спадает по радиусу разряда, так как чем дальше от оси возник электрон, тем легче он уходит на анод и тем меньше вероятность участия его в ионизации. При увеличении анодного напряжения максимумы плотности ионных токов сдвигаются в сторону больших H.

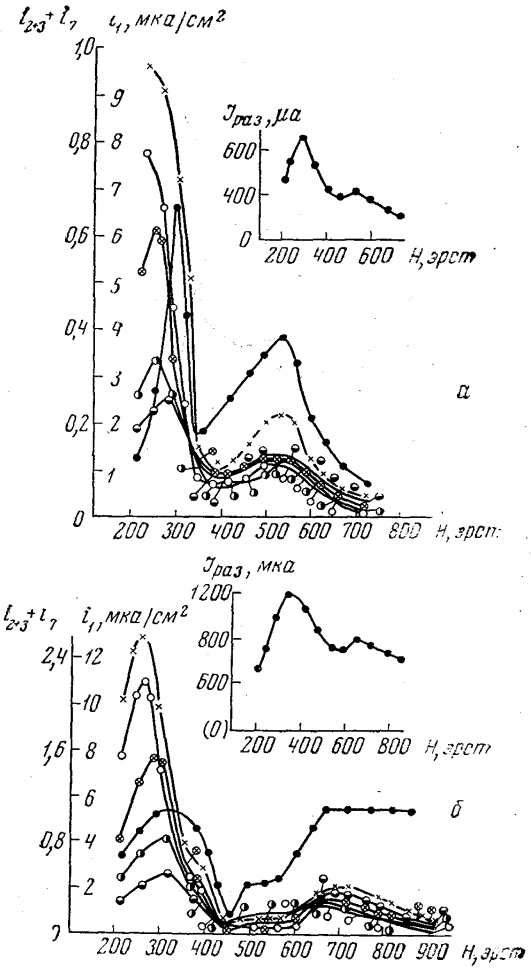

Рис. 2. Зависимость разрядного тока и плотностей ионных токов на кольца коллектора от магнитного поля. a — $V_a = 2$ *кв*, $P = 1 \cdot 10^{-5}$ *тор*, $б$ — $V_a = 3$ *кв*, $P = 1 \cdot 10^{-5}$ *тор*. ● — i_1, × — i_{2+3}, ○ — i_4, ⊗ — i_5, ◑ — i_6, ◒ — i_7.

На кривых распределения ионов по энергиям обнаруживается ряд ступенек, что указывает на существование дискретных групп ионов и дискретных областей ионизации. Разность потенциалов между областями ионизации порядка 100—200 *в*. Измерение распределения по энергиям ионов, попадающих на центральный стержень, позволяет определить распределение областей ионизации вдоль оси z, а ионов, падающих на остальные кольца — распределение областей ионизации по поперечному сечению разряда. В случае трубки с катодом, охватывающим анод (рис. 1, a), потенциал центра ниже (более отрицателен), чем в случае открытого анода (рис. 1, $б$); при достаточно низких давлениях и слабом магнитном поле потенциал центра падает до значения 100—200 *в* относительно катода (рис. 3, a). Тогда ионизация в разряде

осуществляется в основном электронами, участвующими в циклоидальном движении; разрядный ток при этом мал. При увеличении H ионизация по радиусу и повышение потенциала центра ионами, движущимися по радиусу к оси, приводят к появлению новой области ионизации на оси. Число областей ионизации по радиусу также растет; разрядный ток и ионные токи на коллектор увеличиваются.

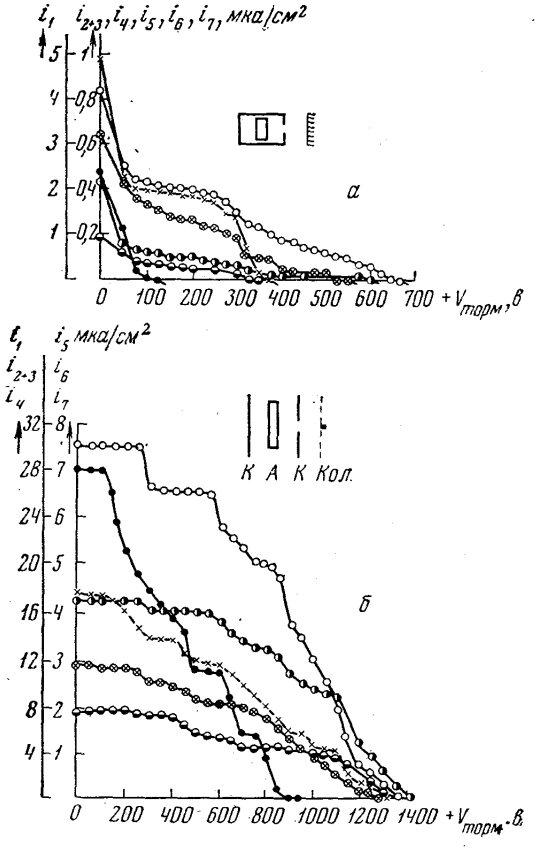

Рис. 3. Кривые распределения ионов по энергиям в ионном пучке. a — $V_a = 3$ *кв*, $P = 9 \cdot 10^{-6}$ *тор*, $H = 210$ *эрст*, $I_{раз} = 210$ *мка*, ● — i_1, × — i_{2+3}, ○ — i_4, ⊗ — i_5, ◑ — i_6, ◒ — i_7; $б$ — $V_a = 3$ *кв*, $P = 3 \cdot 10^{-4}$ *тор*, $H = 630$ *эрст*, $I_{раз} = 1600$ *мка*, ● — i_1, × — i_{2+3}, ⊗ — i_4, ○ — i_5, ◑ — i_6, ◒ — i_7

В случае открытой трубки (рис. 1, *б*) потенциал центра высок $V_0 = 850$ *в* (см. рис. 3, *б*); ионизация в разряде осуществляется тогда как электронами, осциллирующими вдоль оси z, так и колеблющимися внутри анода. Токи на центральном стержне коллектора и на радиальных кольцах показывают существование ряда областей ионизации. Значение потенциала коллектора, при котором ток на данное кольцо обращается в нуль, определяет потенциал в точках плоскости симметрии разряда, находящихся на соответствующем расстоянии r_i от оси [6]. Исследуя компоненты ионного пучка по энергиям, можно отделить осевые области ионизации от радиальных и получить картину распределения областей ионизации в разряде.

Электронные характеристики

Исследования разряда в трубках с разной геометрией показало, что в трубках *a* и *b* (рис. 1) при давлении $p < 10^{-5}$ *тор* и $H > 500$ *эрст* наблюдается выход электронов. При использованных значениях параметров в трубке типа (*б*) электронный ток за катод отсутствовал. На рис. 4 приведены характеристики электронных токов на коллектор и разрядный ток в зависимости от магнитного поля для двух разрядных промежутков. При малых H, когда разрядный ток с ростом H растет, на коллектор попадал пучок ионов.

Увеличение H ведет к образованию отрицательного объемного заряда внутри анодного цилиндра и к уменьшению потенциала центра; ионный и разрядный токи при этом уменьшаются. Возникающий отрицательный объемный заряд и интенсивные колебания могут сделать средний потенциал в центре разряда ниже потенциала катода; тогда из отверстия в катоде идет преимущественно электронный ток. Выход электронов сопровождается падением разрядного тока.

Ионы из разряда при этих условиях попадают не в центральную область катодных дисков, а на периферию [3, 5]; вторичные электроны, освобожденные ими из частей поверхности катодов, удаленных от центра, легче уходят на анод и условия ионизации в объеме ухудшаются.

Опыты показали, что в трубке с разрядным промежут-

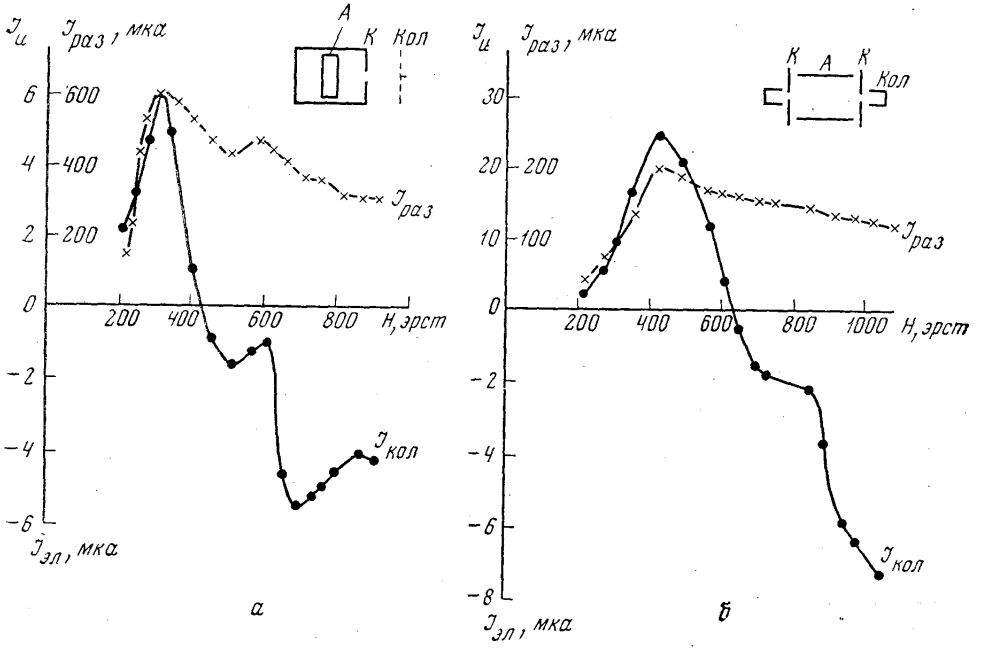

Рис. 4. Разрядный ток и ток на коллектор в зависимости от магнитного поля. $V_a = 2$ *кв*, $P = 1{,}2 \cdot 10^{-5}$ *тор*; *а* — для трубки с разрядным промежутком типа (*а*), *б* — для трубки с промежутком типа (*в*)

ком (*а*) (рис. 1), электроны выходят через катод при меньшем значении H, чем в трубке с разрядным промежутком (*в*). Это объясняется тем, что в первом случае потенциал центра ниже, чем во втором и для понижения потенциала центра ниже потенциала катода в случае (*а*) требуется меньшее H. В трубке с разрядным промежутком (*б*) (рис. 1) электронный ток при используемых значениях $\widetilde{P}$ и H не наблюдался. В этом случае открытого разрядного промежутка (когда стенки разрядной трубки удалены) отрицательный объемный заряд расплывается и плотность его внутри анодного кольца меньше, поэтому для понижения потенциала центра требуются значительно большие H. Возможность выхода электронов через катод и их энергия при заданной геометрии разрядного промежутка определяется величиной H анодного напряжения V_a и давления газа P. Измерения энергии электронов $u_{эл}$ показали, что она уменьшается с ростом P. Это объясняется тем, что при увеличении P облегчается уход электронов на анод за счет соударений с молекулами газа. Образующиеся в результате ионизации положительные ионы движутся к оси и способствуют нейтрализации отрицательного объемного заряда, $u_{эл}$ уменьшается.

При больших магнитных полях и низких давлениях (H—1000 *эрст* и $P \sim 10^{-6}$ *тор*) в наших опытах энергия электронов достигала ~ 70 *эв*. Электроны с такими энергиями способны вызвать вторичную электронную эмиссию с катода.

На рисунке 5 приведены зависимости разрядного тока (рис. 5, *а*), тока на коллектор (рис. 5, *б*) и энергии электронов от анодного напряжения при двух значениях магнитного поля. Ток на коллектор с изменением V_a периодически меняет знак. При малом V_a (~1000 *в*) и большом H (840 *эрст*) ионизация внутри анодного кольца происходит в основном около оси. Ионы, образующиеся в результате ионизации, уходят на катод, а уход электронов на анод затруднен действием магнитного поля.

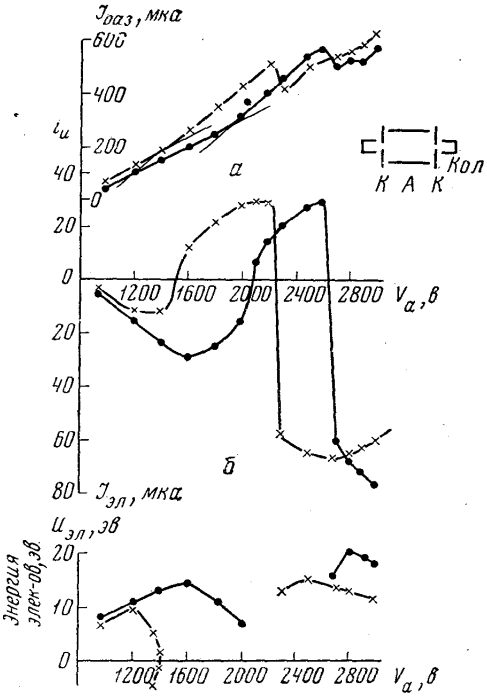

Рис. 5. Разрядный ток (*а*), ток на коллектор (*б*), энергия электронов как функции анодного напряжения

Вблизи оси образуется отрицательный объемный заряд, и при среднем потенциале центра ниже потенциала катода на коллектор идет электронный ток. При этом ионизация электронами вдоль оси прекращается. Электроны из области отрицательного объемного заряда движутся к катодам.

Опыты показали, что при отражении пучка электронов от одного из коллекторов (см. рис. 1, *в*) ток второго коллектора увеличивается в два раза, а разрядный ток не изменяется. Это говорит о том, что при отрицательном потенциале центра осевые электроны не принимают участия в ионизации газа, последняя осуществляется электронами, вращающимися внутри анодного цилиндра. При этом положительные ионы попадают на периферийные части катода под разными углами, а в центр катода (ϕ~2 *мм*) идет пучок электронов. Этим, по-видимому, можно объяснить появление мало распыленного участка в центральной части катода, наблюдаемое при низких давлениях и сильных H [4, 8—10].

В случае, когда по оси идет ионный пучок, в центре катода появляется углубление.

При увеличении V_a растет радиальный компонент скорости электронов и ионизация по радиусу увеличивается. Разрядный ток при этом растет.

Уход электронов на анод и нейтрализация отрицательного объемного заряда ионами, движущимися в радиальном направлении, приводит к повышению потенциала центра и при $V_0>0$ наблюдается ионный ток. При положительном потенциале центра в ионизации газа вновь начинают принимать участие электроны, осциллирующие вдоль оси. Это ведет к более быстрому росту разрядного тока с увеличением анодного напряжения (рис. 5, *а*). При дальнейшем увеличении V_a усиливается ионизация по радиусу, а магнитное поле удерживает медленные электроны, образовавшиеся при ионизации. Это приводит к возникновению на некотором расстоянии от оси кольцевого отрицательного объемного заряда, который может сделать потенциал центра ниже потенциала катода. Условия ионизации в разряде при этом ухудшаются,

разрядный ток скачком уменьшается, а на коллекторе вновь наблюдается электронный ток. При дальнейшем увеличении V_a вновь облегчается уход электронов на анод, снижается плотность отрицательного объемного заряда, повышается потенциал центра и т. д. При увеличении магнитного поля экстремумы токов и энергий электронов смещаются в сторону больших V_a.

Рассмотренные здесь характеристики токов на коллектор, помещенный вне разряда — в закатодном пространстве, — позволяют понять влияние различных параметров на механизм разряда с осциллирующими электронами. Полученные сведения необходимо учитывать при использовании разряда в различных применениях.

Авторы приносят благодарность проф. Э. М. Рейхруделю за ценные советы и обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рейхрудель Э. М., Чернецкий А. В., Михневич В. В., Васильева И. А. ЖТФ, **22**, № 12, 1952.
2. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Васильева М. Н. «Радиотехника и электроника», **5**, вып. 4, 662, 1960.
3. Крейндель Ю. Е., Ионов А. С. ЖТФ, **34**, № 7, 1199, 1964.
4. Hirsch E. H., Brit. J. Appl. Phys., **15**, № 12, 1535, 1964; **15**, 909, 1964.
5. Смирницкая Г. В., Баберцян Р. П. ЖТФ, **36**, вып. 7, 1217, 1966.
6. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Баберцян Р. П. Новый метод измерения распределения потенциала в разряде типа Пеннинга. «Тр. 7-й международной конференции по явлениям в ионизованных газах». Белград, 1965.
7. Поляк И. М. «Радиотехника и электроника», **6**, вып. 3, 395, 1961.
8. Крейндель Ю. Е. ЖТФ, **35**, вып. 2, 315, 1965.
9. Helmer J. C., Jepsen R. L. Proc. IRE, **49**, 12, 1961.
10. Knauer W. J. Appl. Phys., **33**, 6, 2093, 1962.

Поступила в редакцию
7. 2 1966 г.

Кафедра
общей физики для биологов