

Физика

УДК 537.523.74

Р. П. БАБЕРЦЯН, Э. И. ТЕР-ГЕВОРКЯН,  
Г. А. ЕГИАЗАРЯН, С. А. АРУТЮНЯН

О РОЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ  
В РАЗРЯДЕ ТИПА ПЕННИНГА

Установлено, что изменение длины разрядного промежутка приводит к перераспределению электрических полей и изменению областей интенсивной ионизации, что влияет на движение ионов и степень коллимации выходящего ионного пучка. Определены оптимальные значения длины разрядного промежутка, при которых обеспечиваются формирование и выход узкого коллимированного ионного пучка.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы получения ионных пучков приобрели особенно важное значение в связи с возможностью их широкого применения в ряде областей науки и техники [1].

Впервые на возможность получения ионных пучков в пеннинговском разряде было указано в [2], поэтому ячейка иногда называлась ионной пушкой.

В [3] отмечена возможность получения естественно-коллимированного интенсивного ионного пучка со строго определенной энергией. В ранее выполненных работах [4—8] было указано на существенную коллимирующую роль диаметра анода разрядного промежутка.

Настоящая работа посвящена изучению влияния длины разрядного промежутка на электрические характеристики разряда и процессы формирования ионных пучков для широкого интервала значений магнитных полей и анодных напряжений.

**Методика эксперимента.** Эксперименты проводились в ячейке Пеннинга с плавно меняющейся длиной анода. Выбор диаметра анода был обоснован предыдущими исследованиями [4—8].

Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. Она представлена цилиндрическим анодом 1, подвижным 2 и неподвижным 3 молибденовыми катодами по обеим сторонам цилиндрического анода. В центре неподвижного катода имеется осевое отверстие диаметром 2,5 мм. К неподвижному катоду примыкает коллектор 4, внутри которого располагаются сетки 5, 6 и центральный электрод 7. Ионы, вышедшие из отверстия в центре неподвижного катода, формируют ионный пучок. Величина ионного тока пучка измерялась путем подавления электронной составляющей полного тока из отверстия с помощью сеток 5 и 6, на которые подавался соответствующий отрицательный потенциал.

Полный ионный ток  $J_{отв}$  из отверстия катода является суммой токов на коллектор  $J_k$ , на центральный электрод  $J_{ос}$  и на сетки  $J_c$ .

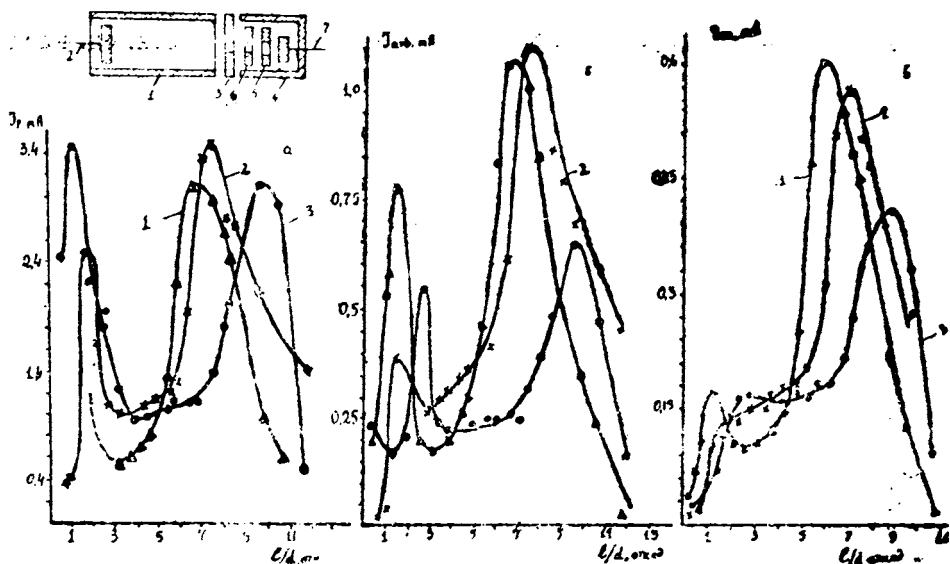


Рис. 1. Принципиальная схема ячейки Пеннинга. Зависимости разрядного тока (а), ионного тока (б) из отверстия в центре катода и его осевого компонента (в) от длины разрядного промежутка при различных значениях магнитного поля при  $U_a = 3 \text{ кВ}$ ,  $p = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Тор}$ ,  $B(\text{Гс})$ : 1—800, 2—1000, 3—1600.

Разрядный ток представляется суммой токов в катодной цепи и токов из отверстия в центре катода 3. Измерения проводились в остаточной атмосфере воздуха. Длина промежутка с помощью специального устройства, не указанного на чертеже, менялась в пределах от 0,5 до 11 относительных единиц, при следующих параметрах  $U_a = 1 \div 3 \text{ кВ}$ ,  $B = 400 \div 1500 \text{ Гс}$  и давлении  $p = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Тор}$ . Электродная система коллектора позволяла измерять токи пучка частиц из отверстия, идущих под разными углами к оси разряда.

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** На рис. 1—3 представлены зависимости разрядного тока  $J_p$ , тока из отверстия в центре катода  $J_{отв}$ , осевого тока пучка  $J_{ос}$  и отношения  $\frac{J_{ос}}{J_{отв}}$  от относительной длины разрядного промежутка  $\frac{l}{d}$  при различных значениях анодного

напряжения и магнитного поля. Из рис. 1 и 2 видно, что ход кривых  $J_{отв}$  и  $J_{ос}$  для исследованного интервала анодных напряжений и магнитных полей аналогичен ходу зависимости разрядного тока от длины разрядного промежутка. На всех кривых наблюдаются два максимума, охватывающие различные интервалы разрядного промежутка. Это свидетельствует об изменении области интенсивной ионизации в зависимости от длины разрядного промежутка.

Для получения информации об этих областях отдельно представлены на рис. 2б, в, г полный ток из отверстия в центре катода  $J_{отв}$  и токи на центральный электрод  $J_{ос}$  и сетки  $J_c$ .

Видно, что максимальные значения токов  $J_{отв}$  и  $J_{ос}$  соответствуют одним и тем же интервалам разрядного промежутка.

С увеличением анодного напряжения увеличивается доля осевой компоненты  $J_{отв}$ . Причем, при  $U_a = 3 \text{ кВ}$  наблюдается смещение максимального значения отношения  $\frac{J_{ос}}{J_{отв}}$  (рис. 3а) в сторону больших длин,

а при меньших  $U_a$  (кр. 1, 2 рис. 3а) начиная с  $\frac{l}{d} > 2$  отн. ед. наблю-

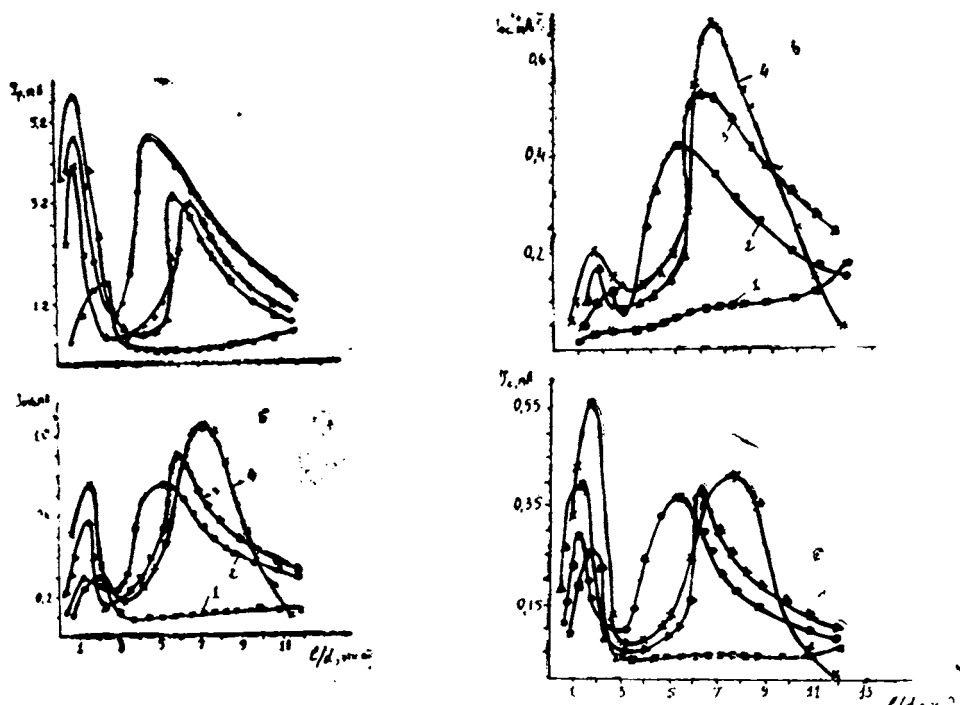


Рис. 2. Зависимости разрядного тока (а), ионного тока из отверстия в центре катода (б), его осевого компонента (в) и тока на сетки (г) от длины разрядного промежутка для различных значений анодного напряжения при  $p = 4 \cdot 10^{-4}$  Тор,  $V = 980$  Гс и  $U_a$  (кВ): 1—1,5, 2—2, 3—2,4, 4—3.

дается его постоянство. Подсчет плотности тока из отверстия  $j_p$  показал, что максимум ее, равный  $31 \text{ мА/см}^2$  при  $U_a = 3$  кв и  $V = 1500$  Гс, приходится на большие относительные длины (рис. 3 б). При этом разрядные токи принимают максимальные значения в интервалах  $0,5 \div 2,0$  отн. ед. и  $5,5 \div 8,5$  отн. ед. На те же интервалы приходятся и максимальные значения полного тока из отверстия  $J_{отв}$  и его осевой компоненты  $J_{ос}$  (рис.

1—3). Из этих результатов видно, что относительная длина  $\frac{l}{d}$  играет

существенную роль в формировании областей интенсивной ионизации. А в зависимости от положения области интенсивных ионизационных процессов пучок, выходящий из отверстия в центре катода, будет иметь разную степень расходимости. Если такой областью является приосевая часть ячейки, то самопроизвольно вышедший пучок является коллимированным с небольшим углом расходимости. Если же преобладают ионизационные процессы по радиусу на некотором расстоянии от оси, то вышедший пучок имеет большую расходимость. Действительно, как известно [4], кинетика ионов в разрядном промежутке определяется физическими и геометрическими параметрами, и за время движения к катоду от точки его образования ион совершает колебания относительно оси разряда с постоянной амплитудой и попадает на катод под разными углами:

$$\text{tg} \varphi = \frac{r_0 N_0}{V d^2 - z_0^2},$$

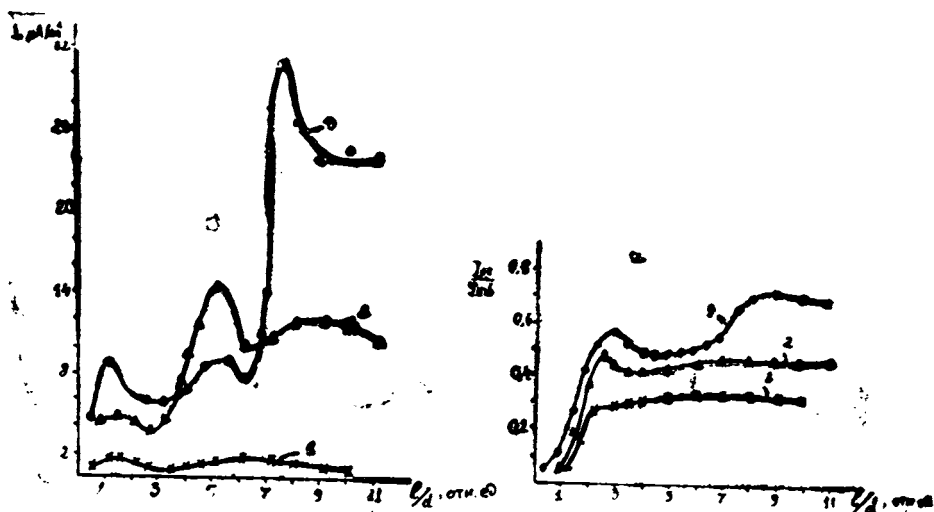


Рис. 3. Зависимости отношения осевого компонента ионного тока из отверстия к полному ионному току (а) и плотности ионного тока из отверстия в центре катода (б) от длины разрядного промежутка при  $p = 4 \cdot 10^{-4}$  Тор,  $V = 1500$  Гс и  $U_a$  (кВ): 1—1, 2—2, 3—3.

где  $r_0$  и  $z_0$ —координаты точки образования иона,  $N_0 = \frac{d}{r} \left( \frac{U_a - U_0}{U_0} \right)^{1/2} 2d$ —

расстояние между катодами,  $U_a$  и  $U_0$ —потенциалы анода и в центре оси соответственно. В центр катода могут попасть только те ионы, которые образовались в определенных дискретных плоскостях с координатами  $z_i$ , плотность которых увеличивается по мере приближения к плоскости симметрии разрядного промежутка. С увеличением длины его увеличивается число таких плоскостей, что должно привести к увеличению ионного тока из отверстия  $J_{отв}$ .

С другой стороны, как было показано в работе [8], потенциал в центре на оси разрядной ячейки  $U_0$  растет с ростом длины разрядного промежутка. Это в свою очередь приводит к перераспределению электрических полей по оси  $\bar{E}_z$  и по радиусу  $\bar{E}_r$  ( $\bar{E}_z = \frac{U_0}{d}$ ,  $\bar{E}_r = \frac{U_a - U_0}{r}$ ). С

изменением длины разрядного промежутка доля вклада в ионизационные процессы каждого из полей соответственно меняется. К примеру, на основе рис. 2в можно сказать, что область интенсивной ионизации является приосевая область.

Приняв эту точку зрения, можно объяснить наблюдаемые зависимости  $J_p = f\left(\frac{l}{d}\right)$ ,  $J_{отв} = f\left(\frac{l}{d}\right)$ ,  $J_{ос} = f\left(\frac{l}{d}\right)$  При коротких длинах разрядного промежутка  $\left(\frac{l}{d} = 0,5 \div 2 \text{ отн. ед.}\right)$  потенциал центра мал и бо-

лее сильно влияние радиального электрического поля  $\bar{E}_r$ , играющего решающую роль в ионизационных процессах. Поле же  $\bar{E}_z$  еще достаточно для обеспечения  $j$ -процессов. При этом область интенсивной ионизации является прианодная область и доля осевых ионов составляет всего 25% от  $J_{отв}$  (при  $U_a = 3$  кВ,  $V = 980$  Гс на рис. 2б, г). С увеличением относительной длины разрядного промежутка  $\left(\frac{l}{d} = 5,5 \div 8,5\right)$

поле по радиусу  $\bar{E}_r$  уменьшается, а  $\bar{E}_z$ , наоборот,—увеличивается: Последнее приводит к увеличению интенсивности ионизационных процессов в приосевой области. при этом  $J_{oc}$  может достичь 70% от  $J_{отв}$  (кр. 3 рис. 3а). С увеличением анодного напряжения абсолютная величина  $J_{oc}$  растет, с ростом же индукции магнитного поля—падает, причем в обоих случаях наблюдается смещение максимальных значений в сторону больших длин разрядного промежутка (рис. 2в). Дальнейшее увеличение разрядного промежутка ( $\frac{l}{d} > 8,5$  отн. ед.) приводит к значительному спаду всех токов из-за резкого уменьшения радиального поля  $\bar{E}_r$ . При этом ослабляется интенсивность лавинообразования по радиусу несмотря на значительное осевое поле.

Таким образом, приведенные зависимости (рис. 1—3) свидетельствуют о возможности коллимации ионов, формирующих пучок, выходящий из отверстия в центре катода при отсутствии дополнительных вытягивающих и фокусирующих устройств, изменением длины разрядного промежутка. Изменение длины разрядного промежутка приводит к изменению областей интенсивной ионизации, что влияет на дальнейшее движение ионов и степень коллимации выходящего ионного пучка.

Кафедра общей физики

Поступила 8.10.1987

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Габович М. Д. Извлечение ионов из плазменных ионных источников и первичное формирование ионных пучков.—Приборы и техника эксперимента, 1963, № 2, с. 5—19.
2. Penning F. M. Ein neues manometr fur niedrige gasdrucke, insbesondere zwisch 10<sup>-3</sup> und 10<sup>-5</sup> mm.—Physika—4, 1937, 2, p. 71.
3. Helmer J. C., Jepsen R. L. Electrical Characteristics of a Penning Discharge.—Proc. of the IRE. 1961, 49, p. 1920—1925.
4. Смирницкая Г. В., Баберцяи Р. П. О кинетике положительных ионов в разряде типа Пеннинга.—ЖТФ, 1966, т. 36, № 7. с. 1217—1225.
5. Смирницкая Г. В., Баберцяи Р. П. О потоках заряженных частиц к катоду в разряде типа Пеннинга в высоком вакууме.—Вестник МГУ, 1967, № 3, с. 23—28.
6. Баберцяи Р. П., Бадалян Э. С., Тер-Геворкян Э. И. Ионные токи ионного источника с осциллирующими электронами—ЖТФ, 1979, т. 49, № 7, с. 1445—1449.
7. Баберцяи Р. П., Бадалян Э. С., Тер-Геворкян Э. И. Метод усиления токов заряженных частиц, попадающих в центр катода в разряде Пеннинга.—ЖТФ, 1983, т. 53, № 4, с. 665—669.
8. Баберцяи Р. П., Тер-Геворкян Э. И., Бадалян Э. С., Егизарян Г. А., Майтесян В. П., Чобанян А. К. Электрические характеристики разряда Пеннинга в зависимости от длины анода.—Сб.: Физика. Изд-во ЕГУ, 1985, вып. 5, с. 34—41.

#### Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Գիտական և գործնական տեսակետից մեծ հետաքրքրություն է ներկայացնում կոլիմացված ինտենսիվ իոնային հոսքերի ստացումը: Ներկա աշխատանքում հետազոտվում է տատանվող էլեկտրոնների պարզման ժա-

մանակ (Պեննինգի տիպի պարպում) էլեկտրական դաշտի բաղադրիչների ազդեցությունը ինտենսիվ իոնացման տիրույթների առաջացման վրա:

Փորձի ընթացքում անմիջականորեն փոփոխվում է պարպման տիրույթի երկարությունը, որը բերում է էլեկտրական դաշտի առանցքային և շառավղային բաղադրիչների վերաբաշխմանը: Վերջինս իր հերթին ազդում է պարպման էլեկտրական բնութագրերի և հետևաբար առաջացող իոնային փնջի պարամետրերի հատկությունների վրա: Փորձը հաստատում է, որ դուրս եկող փնջի լիցքակիր մասնիկների տեսակները և նրա կոլիմացիայի աստիճանը էապես կախված են պարպման տիրույթի երկարությունից: Չափումները կատարվել են 1—3 կՎ անոդային լարումների և 600—1060 Գս մագնիսական դաշտի ինդուկցիայի դեպքում, օդի մնացորդային ճնշումը եղել է  $4 \cdot 10^{-4}$  Տոր:

## SUMMARY

In the preceding paper the discharge current, the axial component of the ion current and the formation of naturally collimated intense ion beam of Penning's cell center in dependence of anode length have been investigated experimentally.

It has been established that in the given cell ( $d_1 = 13$  mm) the change of the anode length leads to a new distribution, which influences on the ions motion and collimation degree of the ion beam.

The optimal values of the anode length have been determined when the formation and collimation of the narrow ion beam is received.