

А К А Д Е М И Я   Н А У К   С С С Р

---

# ЖУРНАЛ ТЕХНИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ТОМ XXVII

*ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК*



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

---

МОСКВА

1 9 5 7

ЛЕНИНГРАД

## О КОМПЕНСАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

В. И. Волосок и Б. В. Чуриков

В настоящей работе изучалась компенсация пространственного заряда электронного пучка ионами, образующимися при ионизации остаточного газа. Изучение проводилось в импульсном режиме путем измерения электрического поля объемного заряда пучка. Обнаружено, что в течение некоторого времени в пучке сохраняется виртуальный катод. В работе дается качественное объяснение наблюдавшихся явлений.

Если дан произвольный объем, окруженный металлическими эквипотенциальными стенками (анодом), то максимальный электронный ток, который можно пропустить через этот объем, ограничивается собствен-

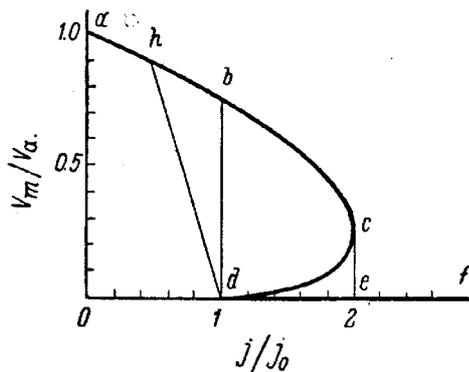


Рис. 1. Зависимость минимального потенциала в одномерном пучке от плотности тока.

$$j_0 = 9.32 \cdot 10^{-6} \frac{V_a^{3/2}}{l^2}, \quad V_a \text{ — анодное напряжение, в вольтах; } l \text{ — расстояние между сетками, в см; } j_0 \text{ — плотность тока, в а/см}^2.$$

ным объемным зарядом пучка электронов. Простейшим примером подобных пучков является электронный пучок, проходящий между двумя эквипотенциальными параллельными сетками, поперечные размеры которого значительно больше расстояния между сетками (одномерный пучок). В работе [1] дано полное решение задачи о пространственном распределении потенциала для такого пучка. Это решение удобно давать в виде графика зависимости минимального потенциала в пучке ( $V_m$ ) от плотности электронного тока ( $j$ ) (рис. 1). Потенциал катода принят равным нулю. При наличии в пучке виртуального катода, т. е. области, где  $V_m = 0$ , под  $j$  понимается арифметическая сумма токов, текущих в обоих направлениях на участке катод—виртуальный катод. В дальней-

шем ток пучка и его плотность будут пониматься именно в этом смысле.

В работах [2, 3] решены задачи о распределении потенциала в прямоугольных и цилиндрических пучках без виртуального катода. Были рассмотрены также некоторые другие задачи о подобных пучках (см. обзоры [4, 5]). В работах [2, 6] экспериментально изучались прямоугольные и цилиндрические пучки с виртуальным катодом. Сопоставляя результаты перечисленных работ, можно прийти к выводу, что во всех исследованных случаях зависимость минимального потенциала пучка от тока описывается графиком, аналогичным рис. 1. Нужно отметить, что в этих работах не учитывалась ионизация остаточного газа электронным пучком, которая приводит к компенсации объемного заряда электронов

в тех случаях, когда ионы не могут уходить из пучка. Ранее изучалась подобная компенсация для пучков без виртуального катода [7].

В настоящей работе исследовалась компенсация цилиндрического электронного пучка с виртуальным катодом.

### Методика исследования

Измерения проводились в аксиально-симметричной системе, схематический разрез которой дан на рис. 2. Плоский спиральный вольфрамовый катод давал ток до 4 а; меняя накал катода, можно было регулировать электронный ток в пучке. Высокое напряжение подавалось на катод в виде импульсов с фронтом нарастания  $\sim 0.1$  мксек. и временем спада  $\sim 3000$  мксек.; время между импульсами было  $\sim 1 \div 2$  сек. Амплитуда импульсов ( $V_a$ ) могла плавно меняться от 500 в до 10 кв. Вся система была помещена в продольное магнитное поле напряженностью около 1600 эрст. Как показали контрольные опыты, наблюдавшиеся в работе явления практически не зависели от величины магнитного поля при его изменении в широких пределах (от 400 до 2000 эрст. при  $V_a = 1 \div 5$  кв). Неоднородность поля вдоль пучка не превышала 10%.

Ток пучка измерялся на нагрузочном сопротивлении  $R_2$ , включенном в цепь коллектора. Для измерения электрического поля объемного заряда пучка внутри анода помещался зонд в виде кольца, расположение и схема включения которого видны на рис. 2. Электрическое поле находилось по формуле

$$E = \frac{4\pi CV}{S_{\text{эф}}}, \quad (1)$$

$E$  — напряженность, в в/см;  $V$  — напряжение на зонде, в вольтах;  $C$  — емкость конденсатора, в см;  $S_{\text{эф}}$  — эффективная площадь зонда, в см<sup>2</sup>. Вследствие краевых эффектов на зонде  $S_{\text{эф}}$  в данной системе была больше геометрической площади в 1.5 раза, как это показали специальные измерения. Показания зонда могли искажаться токами ионов или электронов, идущих из пучка на зонд. Поэтому в процессе измерений мы постоянно следили за тем, чтобы эти токи были малы. Преимущество данного зонда состоит в том, что он практически не искажает процессов в электронном пучке, так как его потенциал значительно меньше потенциала пучка. Все наблюдения велись с помощью импульсного осциллографа.

### Результаты измерений

Поведение электронного пучка во времени изучалось по осциллограммам электрического поля пучка и тока на коллектор.

При достаточно малых токах наблюдалась обычная компенсация объемного заряда (аналогично работе [7]): напряженность поля сразу после включения высокого напряжения начинала убывать, а ток на

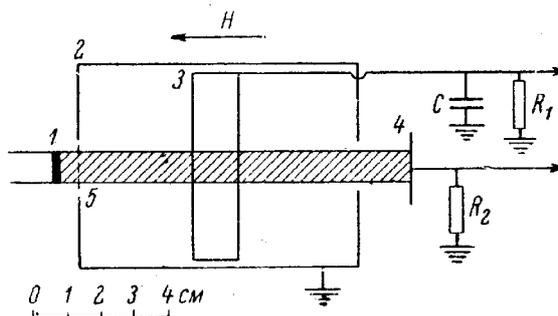


Рис. 2. Схема установки.

1 — спиральный катод; 2 — цилиндрический анод; 3 — зонд; 4 — коллектор; 5 — сетка;  $R_1 = 1$  мгом;  $R_2 = 7$  ом;  $C = 1200$  пф. Заштрихована область, занятая электронным пучком.

коллектор все время оставался постоянным. Если ток в пучке возрастал и становился больше некоторого  $I_{кр.}$ , то ход осциллограмм менялся. Напряженность поля некоторое время после включения высокого напряжения оставалась практически постоянной, а затем скачком уменьшалась, тогда как ток на коллектор все время нарастал, достигая в момент скачка своего стационарного значения. После скачка в пучке наблюдалась обычная компенсация (рис. 3). Тот факт, что до скачка часть тока не доходит до коллектора, может объясняться только наличием в пучке виртуального катода, отражающего часть электронов назад. При токах значительно больше  $I_{кр.}$  на обеих осциллограммах появлялись колебания с широким спектром частот (от  $10^4$  до  $10^8$  гц и, возможно, выше), амплитуда которых возрастала с увеличением тока. При этом скачок напряженности уже не различался на их фоне. Величина тока, при котором начинались колебания, лежала в пределах

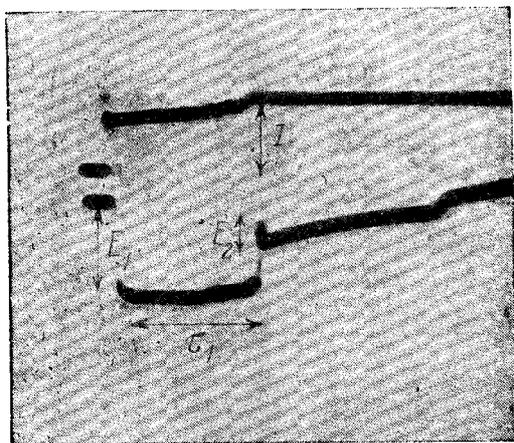
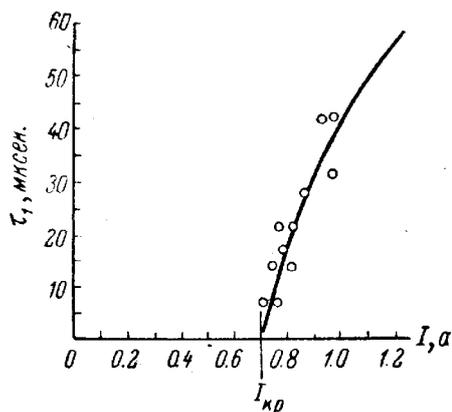


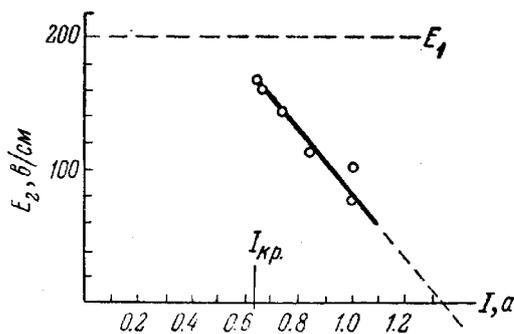
Рис. 3.

$E_1 = 150$  в/см;  $I = 0.54$  а;  $V_{a.} = 1.5$  кв;  
 $p = 1.6 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.;  $\tau = 35.5$  мксек.

$1.5 \div 2 I_{кр.}$ . Результаты измерений, приводимые ниже, относятся к пучку с виртуальным катодом без колебаний. Напряженность электрического поля пучка ( $E_1$ ) не зависела от давления в системе (давление менялось от  $5 \cdot 10^{-7}$  до  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.) и была пропорциональна высокому

Рис. 4. Зависимость  $\tau_1$  от тока пучка.

$V_{a.} = 2.5$  кв;  $p = 1.5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.

Рис. 5. Зависимость  $E_2$  от тока пучка.

$V_{a.} = 2.5$  кв;  $p = 1.5 \cdot 10^{-6}$  мм. рт. ст.

напряжению ( $1 \text{ кв} < V_{a.} < 10 \text{ кв}$ ). В тех же пределах  $I_{кр.}$  пропорционален  $V_{a.}^{3/2}$  и равен

$$I_{кр.} [\text{а}] \approx 0.16 V_{a.}^{3/2} [\text{кв}]. \quad (2)$$

Время от момента включения высокого напряжения до скачка электрического поля будем в дальнейшем называть временем жизни виртуального катода и обозначать через  $\tau_1$ . Это время изменялось обратно пропорционально давлению в системе (давление  $10^{-6} \div 4 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.) и слабо зависело от высокого напряжения; при  $V_{a.} \approx 2$  кв  $\tau_1$  имело

минимум; при  $V_a \simeq 10$  кв возрастало на 10% и при  $V_a \simeq 500$  в — на 50%. Зависимость  $\tau_1$  от тока пучка дана на рис. 4. За ток пучка принималось стационарное значение тока на коллектор (см. рис. 3), что соответствует току пучка непосредственно перед скачком напряженности. В начальный момент ток пучка несколько больше, так как часть электронов отражается от виртуального катода.

Напряженность электрического поля непосредственно после скачка ( $E_2$ ) не зависела от давления остаточного газа и падала приблизительно линейно с ростом тока (рис. 5).

Было измерено время ( $\tau_2$ ), в течение которого происходит скачок напряженности поля. Для этого сигнал с зонда (рис. 2) подавался на дифференцирующие цепочки с различными значениями постоянной времени, усиливался и затем затягивался с помощью кристаллического диода. Длительность переходного процесса определялась с точностью около 30% по зависимости амплитуды затянутого импульса от величины постоянной времени дифференцирующей цепочки. Получены следующие значения для  $\tau_2$  при различных анодных напряжениях; при  $V_a = 0.6$  кв  $\tau_2 = 1.5 \cdot 10^{-7}$  сек.; при  $V_a = 1.8$  кв  $\tau_2 = 5 \cdot 10^{-8}$  сек. и при  $V_a = 4.8$  кв  $\tau_2 = 3.5 \cdot 10^{-8}$  сек.

Для сравнения укажем, что среднее время пролета электрона через систему составляет при напряжении 1.8 кв около  $9 \cdot 10^{-9}$  сек.

### Обсуждение результатов

Интерпретация полученных экспериментальных данных может быть проведена на основе следующих упрощающих предположений.

1. Примем, что зависимость электрического поля пучка от его тока аналогична зависимости  $V_m(j)$  (рис. 1), как это следует из совокупности упомянутых выше работ, а также из наших экспериментов.<sup>1</sup>

2. Будем считать, что накопление ионов в пучке эквивалентно уменьшению электронного тока;<sup>2</sup> тем самым весьма сложная задача о распределении потенциала в электронном пучке с ионами будет сведена к чисто электронной задаче, лишь с тем отличием, что электронный ток  $I$  заменится на  $I' = I - I_d$ , где  $I_d$  — добавка к току, связанная с наличием ионов. Если бы пространственное распределение электронов и ионов совпадало, то такое приближение явилось бы точным.

Сравнение  $\rho_i$  и  $\rho_e$  для одномерного электронного пучка с виртуальным катодом дано на рис. 6 (предполагается, что  $\rho_i \ll \rho_e$ ; для удобства сравнения кривые даны в различных масштабах).

Для цилиндрического пучка различие будет, по-видимому, несколько больше, так как траектории ионов не совпадают с электронными; в частности, ионы могут вообще выходить за пределы электронного

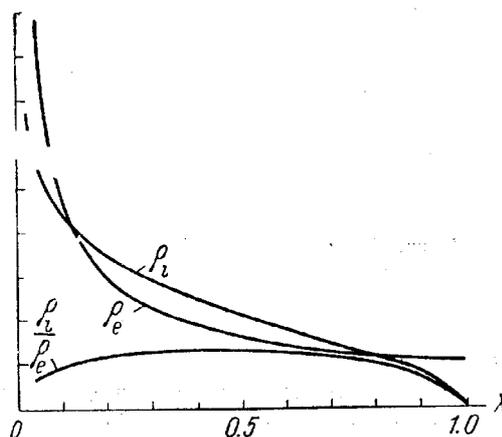


Рис. 6. Пространственное распределение электронов и ионов в одномерном пучке.  $X=0$  соответствует виртуальному катоду;  $X=1$  — сетке. Принимаем, что сечение ионизации не зависит от энергии электронов.

<sup>1</sup> Эта зависимость может быть получена, например, из осциллограмм рис. 7.

<sup>2</sup> Аналогичное предположение высказано также в работе [8].

пучка. Вследствие некоторого различия распределений ионов и электронов точность принятого приближения будет ухудшаться с ростом доли ионов в пучке. Выражение для  $I_d$  может быть получено приравнованием полного заряда этой добавки тока ( $I_d l/v$ ) фактическому заряду ионов ( $eN_i$ ). Отсюда

$$I_d \approx \frac{eN_i v}{l}, \quad (3)$$

где  $N_i$  — полное число ионов в пучке;  $l$  — длина пучка внутри анода;  $v$  — средняя скорость электронов, способ усреднения которой не уточняется ввиду приближенности рассмотрения.

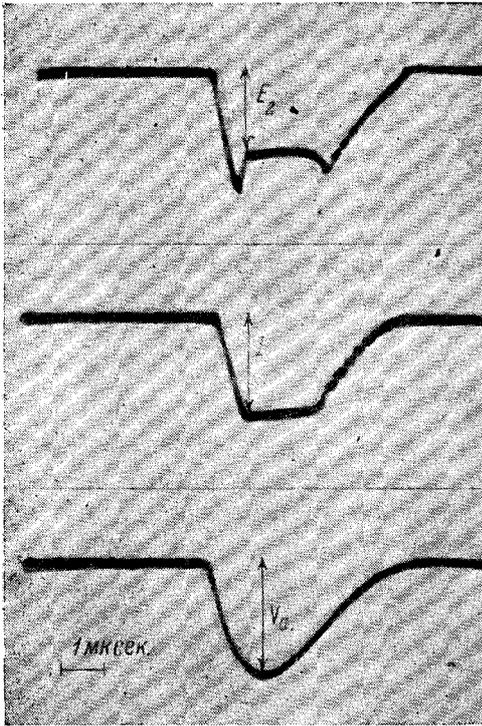


Рис. 7.

$V_a = 5$  кв;  $I = 0.56$  а;  $E_2 = 112$  в/см;  $p = 3.5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.

Рассмотрим теперь вид осциллограмм напряженности поля и тока на коллектор. В первый момент после включения высокого напряжения пучок находится в состоянии с виртуальным катодом, что соответствует участку  $df$  на рис. 1; на коллектор идет ток, меньший тока пучка, за счет того, что часть электронов отражается от виртуального катода и совершает колебания на участке катод—виртуальный катод. Состояние с виртуальным катодом будет существовать до тех пор, пока в пучке не накопится столько ионов, что  $I' = I - I_d$  станет меньше  $I_{кр.}$ , после чего произойдет быстрый (за время порядка времени пролета электронов через систему) переход в состояние без виртуального катода. Накопленное к моменту  $I' = I_{кр.}$  количество ионов в пучке равно (см. (3))

$$N_i \approx \frac{I_d l}{e v_1} = \frac{(I - I_{кр.}) l}{e v_1}, \quad (4)$$

здесь  $I$  — ток пучка непосредственно перед скачком;  $v_1$  — средняя скорость электронов в тот же момент времени.

Количество электронов в пучке ( $N_e$ ) равно  $Il/e v_1$ ; поэтому обозначая через  $\tau_0$  среднее время, в течение которого каждый электрон производит одну ионизацию в остаточном газе, получим

$$\frac{\tau_1}{\tau_0} \approx \frac{N_i}{N_e} \approx \frac{I - I_{кр.}}{I},$$

откуда

$$\tau_1 \approx \tau_0 \left(1 - \frac{I_{кр.}}{I}\right). \quad (5)$$

По порядку величины  $\tau_0$  совпадает с временем компенсации электронного пучка без виртуального катода [7]. Отличие состоит в том, что  $\tau_0$  значительно слабее зависит от анодного напряжения, если последнее не слишком мало ( $> 1$  кв). Это объясняется тем, что при наличии виртуального катода в электронном пучке всегда есть области с максимальным сечением ионизации ( $100 \text{ в} \div 1 \text{ кв}$ ); по оценке ( $1 \text{ кв} < V_a < 10 \text{ кв}$ )  $\tau_0$  [сек.]  $\approx 1.0 \cdot 10^{-10}/p$  [мм рт. ст.]; эксперимент дал  $\tau_0$  [сек.]  $\approx 2.0 \times$

$\times 10^{-10}/p$  [мм рт. ст.]. На рис. 4 произведено сравнение расчетной и экспериментальной зависимостей  $\tau_1(I)$  (для  $\tau_0$  принято экспериментальное значение).

Время жизни виртуального катода может оцениваться по формуле ( $1 \text{ кв} < V_a < 10 \text{ кв}$ )

$$\tau_1 [\text{сек.}] = \frac{2.0 \cdot 10^{-10}}{p [\text{мм рт. ст.}]} \cdot \left(1 - \frac{I_{\text{кр.}}}{I}\right). \quad (6)$$

Необходимо также отметить, что если скачок напряженности, связанный с исчезновением виртуального катода для чисто электронного случая, характеризуется вертикальной линией  $db$  (рис. 1), то при наличии в пучке ионов этот же переход характеризуется наклонной линией  $dh$ . Это непосредственно видно из формулы (3), согласно которой добавка  $I_d$  увеличивается после скачка из-за увеличения средней скорости электронов ( $v$ ). Физически это означает, что после скачка прежнему электронному току соответствует меньшее число электронов, вследствие чего относительная доля ионов возрастает.

Чем больше  $I$  относительно  $I_{\text{кр.}}$ , тем больше ионов накопится в пучке к моменту скачка, тем сильнее изменится  $I$  и электрическое поле после скачка (рис. 5). Величина  $E_2$  пропорциональна полному заряду частиц в пучке

$$E_2(I) \sim N_e - N_i. \quad (7)$$

Предполагая, что количество ионов за время скачка существенно не меняется, получим, учитывая (4),

$$E_2(I) \sim \frac{I}{v_2} - \frac{I - I_{\text{кр.}}}{v_1}, \quad (8)$$

где  $v_2$  — средняя скорость электронов в пучке после скачка; отсюда

$$E_2(I) \simeq E_2(I_{\text{кр.}}) \left[1 - \left(\frac{I}{I_{\text{кр.}}} - 1\right) \left(\frac{v_2}{v_1} - 1\right)\right]. \quad (9)$$

Применяя эту формулу к экспериментальным данным (рис. 5), получим, что  $v_2/v_1 = 2.0$ .

### О гистерезисе

Для чисто электронного пучка (без ионов) был дополнительно рассмотрен вопрос о „гистерезисе“, т. е. неоднозначной зависимости электрического поля от тока пучка. На катод подавался короткий „треугольный“ импульс высокого напряжения (рис. 7).

Совпадение осциллограмм электрического поля при различных давлениях ( $V_a = 8 \text{ кв}$ ;  $p$  от 2 до  $5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.) указывало, что в данном случае ионами действительно можно пренебречь. Согласно безразмерному графику (рис. 1), при нарастании высокого напряжения  $j/j_0$  уменьшается (плотность тока  $j$  постоянна) и скачок происходит по линии  $db$ , тогда как при уменьшении анодного напряжения  $j/j_0$  увеличивается и скачок происходит по линии  $ce$ . Наличие такого гистерезиса отрицалось в работах [9, 10]. Осциллограммы электрического поля, тока на коллектор и высокого напряжения приведены на рис. 7. Явное различие обоих скачков на осциллограмме электрического поля доказывает наличие гистерезиса в электронном пучке.

**Литература.**

- [1] В. Бурсиан и В. Павлов. ЖРФХО, 55, 71, 1923; см. также: Л. Н. Добрецов. Электронная и ионная эмиссия, 1950. — [2] A. Haeff. Proc. IRE, 27, 586, 1939. — [3] L. Smith, P. Hartman. J. Appl. Phys., 11, 220, 1940. — [4] М. Д. Габович. УФН, 56, 215, 1955. — [5] H. F. Ivey. Advances in Electronics and Electron Phys., 6, 137, 1954 (см. перевод: ПСФ, № 6, 6, 1956). — [6] В. Н. Руткевич. Диссертация, ФТИ АН УССР. — [7] E. G. Linder, K. G. Hernqvist. J. Appl. Phys., 21, 1088, 1950. — [8] С. Д. Гвоздовер, В. Н. Слудский. Вестн. МГУ, № 2, 37, 1956. — [9] C. S. Bull. J. IEE, 92, ч. III, 86, 1945; 95, ч. III, 17, 362, 1948. — [10] В. С. Лукошков. ЖТФ, VI, 624, 1936.

Поступило в Редакцию  
12 февраля 1957 г.