

## ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

Г. П. Мхеидзе, Е. Д. Корол

Обычные методы получения электронных пучков связаны с отбором электронов с твердых или плазменных эмиттеров и дальнейшей их транспортировкой. В последнее время появились сообщения о получении интенсивных импульсных электронных пучков<sup>1,2</sup>, обусловленных сильными полями в плазме.

Исследуя эффект ускорения ионов при пропускании тока через плазму, авторы обнаружили явление формирования электронных пучков<sup>3</sup>, привлекающее внимание большими значениями тока и плотности тока пучка ( $I \approx 4000$  а,  $j \approx 3 \cdot 10^4$  а/см<sup>2</sup>) и специфичностью условий реализации.

1. Экспериментальная установка схематически показана на рис. 1. Ускоряющий промежуток длиной  $l_0$ , образованный источником плазмы 1 и ускоряющим электродом 2, заполнялся плазмой через эмиссионное отверстие источника диаметром  $d_0$ , после чего на промежуток разряжалась емкость  $C_0$ , заряженная до напряжения  $U_0$ . В ускоряющем электроде помещался цилиндр Фарадея 3. Измерялись общий ток  $I_0$ , напряжение  $U$  на промежутке и ток  $I$  сквозь апертуру ускоряющего электрода (диаметром  $d_0$ ). Энергетический анализ проводился масс-анализатором Томсона.

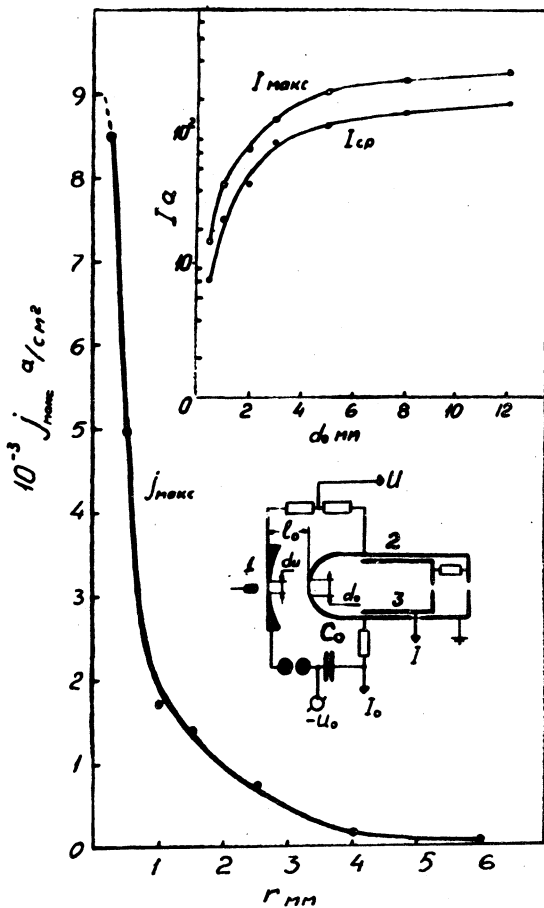
Характерные осциллограммы напряжения  $U$  и токов  $I_0$  и  $I$  представлены на рис. 2. Первоначально ток на цилиндр Фарадея медленно увеличивается, следуя общему току в промежутке:  $I \approx I_0(d_0/D)^2$  ( $D$  — диаметр ускоряющего электрода). Медленно растет

и напряжение на промежутке. При срыве общего тока <sup>3</sup> сопровождающемся быстрым увеличением напряжения до  $U \geq U_0$ , был обнаружен скачок тока на цилиндр Фарадея. Синхронность в нарастании  $U$  и  $I$  позволила предположить, что рост тока  $I$  обусловлен формированием электронного пучка. Действительно, энергетический анализ пучка показал, что энергия электронов  $W_e \approx eU_0$ . Формируемые пучки нестабильны от импульса к импульсу по величине тока<sup>\*</sup>), поэтому величину тока пучка следует характеризовать максимальными  $I_{\max}$  и средними  $I_{\text{ср}}$  (по числу импульсов) значениями. Зависимость тока пучка на цилиндр Фарадея от диаметра  $d_0$  апертуры ускоряющего электрода представлена на рис. 1. Там же дается зависимость максимальной плотности тока пучка  $J_{\max}$  от расстояния  $r$  до оси пучка, построенная по данным кривой  $I_{\max} = I(d_0)$ .

Плотность тока в приосевой области ( $d_0 = 1$  мм) уменьшается с увеличением длины  $l_0$  ускоряющего промежутка почти линейно (в 6 раз при увеличении  $l_0$  от 10 мм до 30 мм). Одновременно увеличивается длительность  $\tau_0$  переднего фронта импульса тока пучка ( $l_0 = 10$  мм,  $\tau_0 = (4-5) \cdot 10^{-9}$  сек;  $l_0 = 30$  мм,  $\tau_0 = 5 \cdot 10^{-8}$  сек).

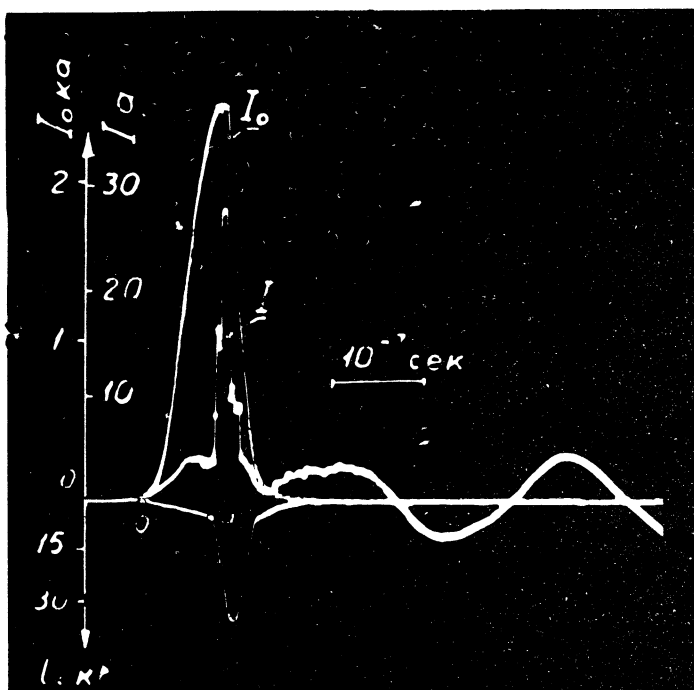
Под действием пучка ускоряющий электрод разрушался (независимо от материала электродов; рис. 3а). Распылению подвергался участок, расположенный против эмиссионного отверстия. Диаметр образованного кратера несколько больше (в 1,5-2 раза) диаметра отверстия эмиссии ( $d_{\text{и}} = 3$  мм). Местоположение кратера не зависело от геометрии ускоряющего электрода, хотя конфигурация поля (в отсутствие плазмы) в промежутке между источником плазмы и ускоряющим электродом при изменении формы последнего менялась значительно. Рис. 3б иллюстрирует этот качественный

\* ) Пучки нестабильны и по длительности. Эксперименты с целью стабилизации параметров пучка не проводились.



Р и с. 1. Зависимость тока на цилиндр Фарадея (максимального  $I_{\text{макс}}$  и среднего  $I_{\text{ср}}$ ) от диаметра апертуры ускоряющего электрода  $d_0$  и максимальной плотности тока  $j_{\text{макс}}$  от расстояния  $r$  до оси пучка.

эксперимент (пунктиром условно показаны траектории электронного пучка в предположении, что плазма в промежутке отсутствует, сплошной линией – действительное направление распространения пучка).



Р и с. 2. Осциллограммы напряжения  $U$ , общего тока  $I_0$  в промежутке и тока на цилиндр Фарадея  $I$ .  $l_0 = 10$  мм,  $d_0 = 0,5$  мм,  $U_0 = 30$  кв,  $C_0 = 5 \cdot 10^{-9}$  ф

Оценка тока пучка по энергии, необходимой для испарения материала ускоряющего электрода (при локальном нагреве пучком) дала величину  $\sim 40$  а. Для такой грубой оценки согласие с результатами электрических измерений ( $I_0 \approx 100$  а) неплохое.

Эксперименты по определению  $I$  проводились не в оптимальных (с точки зрения получения максималь-

ных токов пучка) условиях. При увеличении плотности плазмы в промежутке и емкости конденсатора  $C_0$  были получены токи  $I_{\text{макс}} = 4000$  а и плотность тока на оси порядка  $J_{\text{макс}} \approx 3 \cdot 10^4$  а/см<sup>2</sup>.

Ниже предлагается качественная картина явления формирования электронного пучка.

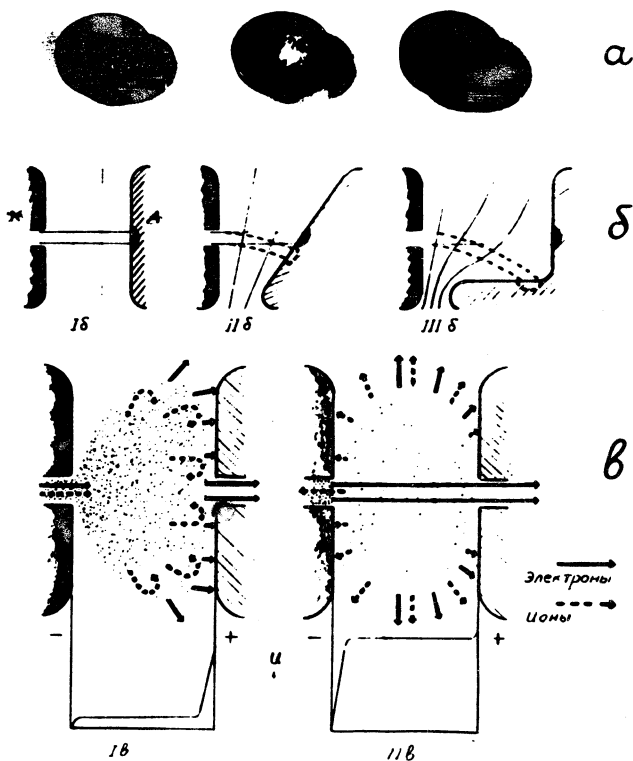
2. В начальной фазе протекания тока в промежутке электроны отбираются с плазменной границы, сосредоточенной у ускоряющего электрода. Срыв тока сопровождается формированием пучка (за время  $\sim 10^{-9}$  сек), его фокусировкой (до размеров 4–6 мм) и увеличением плотности тока (в  $10$ – $10^3$  раз). Представление об отборе электронов ускоряющим электродом с расположенной в непосредственной близости плазменной поверхности не объясняет факта фокусировки пучка, а с точки зрения формирования пучка в вакуумном диоде необъяснимы величина плотности тока пучка и независимость его направления от геометрии ускоряющего электрода (рис. 3б).

Экспериментальные факты не противоречат предположению, что система с анодным падением напряжения (начальная фаза протекания тока) переходит в систему с катодным перепадом напряжения<sup>\*)</sup>, при которой поверхностью отбора становится эмиссионное отверстие источника, а роль ускоряющего электрода начинает играть плазма, сосредоточенная в промежутке.

Можно предположить следующую качественную картину перебрасывания области локализации поля от ускоряющего электрода к источнику: по мере отбора электронов с развитой плазменной поверхности быстро нарастающим электрическим полем концентрация ионов в промежутке увеличивается. Это ведет к уменьшению градиента плотности плазмы и уменьшению потока ионов из источника, т.е. к появлению поля у эмиссион-

---

\*) Перебрасывание падения напряжения с анодной области в катодную наблюдали в длинных системах<sup>4</sup>, а также на установке с дуговым источником плазмы<sup>5</sup>.



Р и с. 3.

- а) Эрозия вставки ускоряющего электрода, вызванная пучком электронов (материал вставки – медь, сталь, тантал).
- б) Независимость направления движения пучка электронов от геометрии ускоряющего электрода. Пунктиром условно показана траектория электронов в условиях вакуумного диода.
- в) Электронные и ионные токи при прианодном (Iв) и прикатодном (IIв) падении напряжения.

ного отверстия и в результате — к отрыву плазмы от источника. Плазма, сосредоточенная в промежутке (назовем ее "анодной плазмой"), принимает потенциал ускоряющего электрода. Эмиттирующей становится поверхность плазмы, ограниченная отверстием источника ("катодная плазма"). Процесс этот представляется зависящим от длины промежутка. При увеличении  $l_0$  он затягивается во времени (зависимость  $\tau_\phi$  от  $l_0$ ) и реализуется при меньшей средней плотности "анодной плазмы". На рис. 3в условно показаны случаи прианодного (Iв) и прикатодного (IIв) падения напряжения. В условиях, когда электрическое поле на короткое время сосредоточено между двумя плазменными поверхностями, ограничения, связанные с электрическим пробоем, снимаются, и напряженность поля, зависящая от средней плотности  $\bar{n}$  "анодной плазмы" ( $\bar{n}$  связана с  $l_0$ , отсюда зависимость  $j_{\max}$  от  $l_0$ ), может быть высокой. Ток между "анодной" и "катодной" плазмами биполярный. Объемный заряд формируемого пучка в области отбора частично компенсируется обратным ионным потоком, а в эквипотенциальной области — ионной компонентой анодной плазмы\*).

Длительность импульса тока электронного пучка связана с распадом анодной плазмы и, возможно, с неустойчивостью, которая может развиться при прохождении пучка через анодную плазму.

Поступила в редакцию  
6 мая 1970 г.

---

\* ) В результате ускорения ионов<sup>5</sup> протяженность анодной плазмы увеличивается.

## Л и т е р а т у р а

1. Е. А. Сухомлин, В. А. Супруненко, Н. И. Рева, Физика плазмы и проблема управляемого термоядерного синтеза, вып. 4, Киев, 1965, стр. 148.
2. T.F. Stratton, H.M. Epstein, W.J. Gallagher, A.F. Rothenburg. Bull. Am. Phys. Soc., II, 13, 72 (1968).
3. Г. П. Мхеидзе, Е. Д. Короп, ЖТФ (в печати).
4. В. С. Койдан, Л. Н. Папырин, А. Г. Пономаренко, Б. А. Яблочников, Письма ЖЭТФ, 8, 8 (1968).
5. П. Е. Беленсов, А. Т. Капин, А. А. Плютто, В. Н. Рыжков. ЖТФ, 34, 2121 (1964).