

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С ПЛОТНОСТЬЮ ТОКА 10—50 А/СМ² В ВАКУУМНОМ ДИОДЕ

Э. Н. Абдуллин, В. М. Заславский, С. В. Логинов

Интерес к формированию микросекундных электронных пучков с относительно высокой плотностью тока обусловлен возможностями их применения при разработке эксимерных лазеров, в технологии, решении экологических задач. Численные расчеты формирования таких пучков в отсутствие внешнего ведущего магнитного поля выполнены в [1]. В настоящей работе приводятся результаты экспериментов по генерации пучка в указанном диапазоне плотностей тока.

Для получения пучка использовались многоострый и лезвийный катоды, а также катоды с гладкой эмиттирующей поверхностью из бархата или углеграфитового войлока [2, 3]. Многоострый катод состоял из основания в виде прямоугольного параллелепипеда размерами $40 \times 110 \times 210$ мм и одного или трех рядов эмиттеров, установленных в прорезях на большой грани. Материал основания — графит. Эмиттерами служили карандашные графитовые стержни. Высота острый над поверхностью катода $h = 20$ мм. Число острий в ряду N изменялось от 5 до 17, расстояние между рядами острий 40 мм, длина ряда 180 мм. Лезвийный катод состоял из аналогичного основания и одного или трех лезвийных эмиттеров в виде полосок танталовой фольги толщиной 30 мкм и длиной 180 мм, углеграфитовой ткани или фторопласта толщиной 3 мм. Высота лезвий h изменялась в пределах 5—20 мм. Наконец, гладкий катод представлял собой диск из нержавеющей стали диаметром 170 мм, на основание которого наклеивался квадрат со стороной 100 мм из листа углеграфитового войлока толщиной 5 мм. В другом варианте вся плоская поверхность диска, обращенная к аноду, закрывалась бархатом. Анодом служили диск из нержавеющей стали диаметром 300 мм, закрываемый в части экспериментов титановой фольгой толщиной 50 мкм с размещенной за ней винипровозой пленкой для регистрации структуры пучка, а также щелевая решетка с геометрической прозрачностью 85 % для моделирования прохождения пучка через пространство дрейфа. Расстояния между катодом и анодом d , а также между решеткой и коллектором l изменялись в пределах 30—50 мм. Источником напряжения являлся ГИН Маркса, состоящий из 20 ступеней с емкостью в ударе $20 \cdot 10^{-9}$ Ф. Индуктивность разрядной цепи $13 \cdot 10^{-6}$ Гн, зарядное напряжение $U_3 = 25—50$ кВ. Регистрация напряжения и тока в диоде осуществлялась с помощью делителя напряжения и поясов Роговского.

Эксперименты показали, что при напряжении на диоде 300—400 кВ длительность импульса электронного тока составляет 10^{-6} с и более (рис. 1, 2). Первеанс диода нарастает в течение импульса. При сопоставимых напряжениях и плотностях тока пучка наиболее быстрый рост первеанса наблюдается в случае использования острых катодов либо лезвийных с лезвиями из фторопласта. Наименьшей скоростью роста первеанса характеризуется работа диодов с гладкими катодами. Время формирования эмиссионной границы у гладких катодов, а также у лезвийных с лезвиями из танталовой фольги или углеграфитовой ткани мало: первеанс достигает квазистационарного значения через ~ 100 нс после начала протекания тока.

Согласно [4], малое время формирования эмиссионной границы катодной плазмы в диоде со взрывоэмиссионным катодом, а также малая скорость роста первеанса обусловлены большим числом эмиссионных центров, одновременно функционирующих на катоде. В диоде с лезвийными катодами причиной этого является, очевидно, высокая напряженность поля на кромке лезвия. В диоде с катодом из углеграфитового войлока количество эмиссионных центров также велико из-за присутствия множества микроскопически тонких графитовых волокон на поверхности, а также относительно высокого объемного сопротивления материала, что стимулирует образование новых центров в процессе работы катода. Влияние бархатного покрытия, по-видимому, заключается в усилении электрического поля на поверхности металла в области контакта с диэлектриком и увеличении благодаря этому числа эмиссионных центров. Поступление плазмы металла непосредственно в межэлектродный промежуток сквозь покрытие затруднено, в результате имеет место стабилизация первеанса в течение импульса.

Оценки показывают, что значения первеанса диода с гладким катодом на основе углеродистого войлока, достигаемое к $t \approx 100-150$ нс, равно или несколько больше величины, получаемой из закона степени $3/2$ для плоского диода при поперечном сечении пучка, равном площади поверхности войлока (рис. 2). Рост первеанса в квазистационарной фазе соответствует заполнению плазмой межэлектродного зазора со скоростью $\sim 5 \cdot 10^6$ см/с. Обращает на себя внимание слабая зависимость тока диода с многоострийным катодом от числа острий в ряду. Видно, что изменение N от 5 до 17 не приводит к изменению первеанса диода. Этот результат может быть следствием взаимной электростатической экранировки острий, в результате чего увеличение числа острий сопровождается уменьшением электрического поля и соответственно тока, отбираемого с острия.

Структура пучка мало отличается от наблюдаемой в наносекундном диапазоне времени. В диоде с многоострийным катодом «автограф» пучка на аноде представляет собой ряд наложенных друг на друга кругов либо эллипсов при малых (1–2 см) расстояниях между остри-

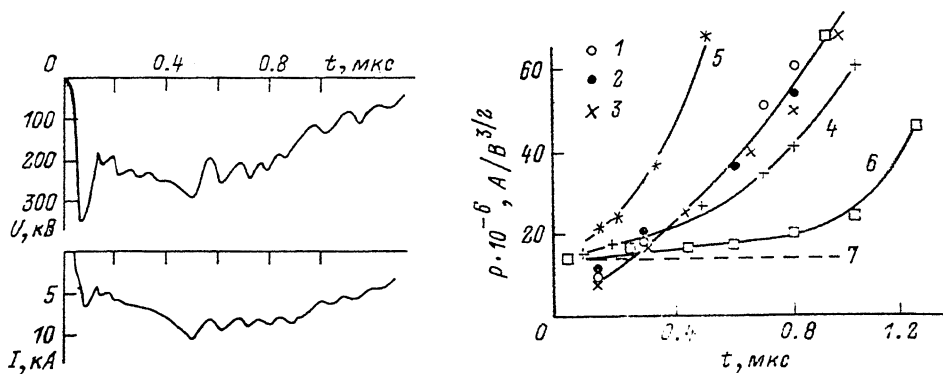


Рис. 1. Осциллограммы напряжения и тока в диоде с катодом, закрытым бархатом. $U_0 = 30$ кВ, $d = 33$ мм.

Рис. 2. Зависимости первеанса от времени для диода с катодом, содержащим $N=5$ (1), 9 (2) и 17 (3) расположенные в один ряд острия или лезвия из Та фольги (4), многоострийным катодом с тремя рядами острий ($N=9$) (5), катодом на основе войлока (6) и расчетное значение первеанса (7).

U , кВ: 4 — 350, 5 — 300, 6 — 370; d , мм: 4 — 35; 5, 6 — 40.

ями. Большая ось эллипса ориентирована перпендикулярно ряду острий и приблизительно равна диаметру круга. При расстояниях между остриями 1 см, а также в диодах с лезвийными катодами на отпечатках пучка появляются полосы, ориентированные перпендикулярно ряду острий, свидетельствующие об уплотнении пучка [6]. Длина полос не превышает ширины пучка. В отсутствие экранировки соседними остриями радиус пучка на аноде, формируемого с единичного острия, хорошо соответствует значениям, получаемым из формулы [6]

$$r = 2\sqrt{hd}.$$

Значения r оказываются также достаточно близкими полуширине пучка на аноде в диоде с лезвийным катодом (рис. 3). При прохождении пучком пространства дрейфа радиус кругов или полуширина пучка в случае лезвийного катода увеличивается в соответствии с [6] приблизительно на величину $i\sqrt{h/d}$.

Электронные пучки, формируемые с гладких катодов, характеризуются однородностью и малой расходимостью, что может быть обусловлено образованием на катоде плазменной поверхности, близкой к сплошной. В случае катода на основе углеродистого войлока размер пучка на аноде составляет 130×130 мм при $d=40$ мм. В диоде с катодом, покрытым бархатом, структура пучка более сложна. В центральной части пучок близок к однородному, однако на периферии распределение пучка неравномерно по углу, что приводит к появлению на отпечатках следов в виде радиальных полос на границе пучка. При $d=33$ мм диаметр центральной части пучка на аноде составляет ~ 150 мм, диаметр области в которой происходит перенос практически всего тока пучка ~ 200 мм.

Полученные данные показывают, что в формировании пробоя диода важная роль принадлежит катодной плазме. Об этом свидетельствует наличие зависимости динамики роста первеанса диода от вида катода. В то же время в условиях, когда распространение катодной

плазмы ограничивается, например, за счет распределения тока по большому числу центров с помощью графитового войлока, применения бархата, формирование пробоя может быть стимулировано образованием в диоде анодной плазмы. Источником такой плазмы на начальных стадиях разряда является газ, десорбированный с анода электронным пучком. На зависимостях первеанса от времени образование анодной плазмы проявляется как увеличение скорости роста первеанса через некоторое время t_3 от начала протекания тока. В соответствии

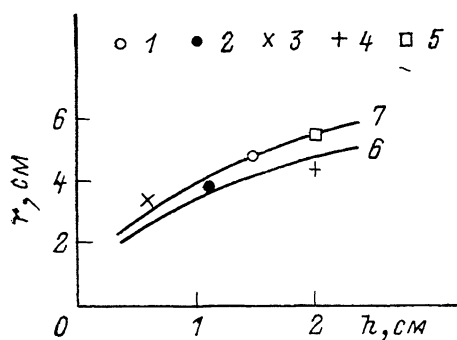


Рис. 3. Значения радиуса круга и полуширины пучка на аноде в зависимости от высоты эмиттера в диоде с лезвием из танталовой фольги при $d=4$ (1) и 3 см (4), углерграфитовой ткани при $d=4$ см (2), фторопласта при $d=35$ мм (3), а также с катодом, содержащим один ряд стержней $N=5$, при $d=35$ мм (5). Зависимости $r(h)$, рассчитанные из (1) при $d=3$ (6) и 4 см (7).

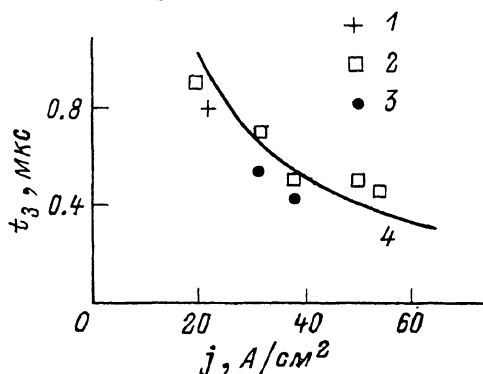


Рис. 4. Значения времени t_3 в зависимости от j для диода с катодом, содержащим одно лезвие из Та фольги (1), гладким катодом с покрытием войлоком (2) и бархатом (3). Зависимость $t_3 = \text{const}/j$ (4).

d , мм: 1 — 35, 2 — 30—40, 3 — 33; U , В: 1 — 312, 2 — 270—400, 3 — 280—320.

с [4] время t_3 обратно пропорционально плотности тока пучка j на аноде. Зависимость $t_3(j)$ для некоторых катодов иллюстрируется рис. 4. Видно, что экспериментальные точки лежат достаточно близко к зависимости $t_3 = \text{const}/j$. Это, очевидно, может быть определенным свидетельством в пользу влияния на формирование пробоя анодной плазмы.

Таким образом, в результате выполнения данной работы продемонстрирована возможность реализации электронных пучков длительностью более 10^{-6} с с относительно высокой плотностью тока пучка на аноде $10-50$ А/см². Показано, что катоды с гладкой эмиттирующей поверхностью на основе углерграфитового войлока, а также бархата могут быть успешно применены для получения таких пучков.

Список литературы

- [1] Абдуллин Э. Н., Астрелин В. Т., Беломытцев С. Я. и др. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 1. С. 184—187.
- [2] Бузаев С. П., Кассиров Г. М., Ковальчук Б. М., Месяц Г. А. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. Вып. 2. С. 82—85.
- [3] Гудович В. А., Димов И. А., Кленов Г. И., Матвеев С. П. // Тез. докл. VII Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1988. Ч. I. С. 52—53.
- [4] Абдуллин Э. Н., Баженов Г. П., Ерохин Г. П., Ладыженский О. Б. // Импульсный разряд в диэлектриках. Новосибирск: Наука, 1985. С. 42—55.
- [5] Беломытцев С. Я., Ильин В. П., Литвинов Е. А., Месяц Г. А. // Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков. Новосибирск: Наука, 1976. С. 93—95.
- [6] Абдуллин Э. Н., Беломытцев С. Я. // Деп. в ВИНТИ. № 4362-83. М., 1983.

Институт сильноточной электроники
СО АН СССР
Томск

Поступило в Редакцию
23 июля 1990 г.