

06

## Исследование планарного диода в режиме ограничения эмиссии

© А.И. Пушкарев, Р.В. Сазонов

НИИ высоких напряжений при ТПУ, Томск  
E-mail: aipush@mail.ru

В окончательной редакции 13 августа 2007 г.

Выполнены экспериментальные исследования ВАХ плоского диода с графитовым взрывоэмиссионным катодом в начальный период формирования электронного тока. Получено аналитическое выражение для суммарной площади дискретных эмиссионных центров в приближении сотовой структуры и постоянства числа центров в течение формирования импульса тока. Показано, что рост электронного тока при дискретной эмиссионной поверхности катода удовлетворительно описывается модифицированным соотношением Чайлда–Ленгмюра при уменьшении форм-фактора от 6 до 1.

PACS: 52.80.Vp

Планарные диоды с взрывоэмиссионным катодом широко используются для генерации электронных пучков с плотностью тока выше  $100 \text{ А/см}^2$ . Исследования ВАХ диодов с разными катодами (плоский, острый, многоострый, кольцевой и др.), обзор которых приведен в монографии Месяца Г.А. [1], показали, что величина электронного тока ограничивается эмиссионной способностью катода и объемным зарядом в анод-катодном зазоре. По модифицированному соотношению Чайлда–Ленгмюра электронный ток при неограниченной эмиссии электронов со всей поверхности катода описывается уравнением [1]:

$$I_{\text{Ch-L}} = AU^{3/2} \frac{S_0}{d_0^2} F, \quad (1)$$

где  $A = 2.33 \mu\text{А/В}^{3/2}$ ,  $U$  — напряжение, приложенное к диоду,  $S_0$  — площадь катода,  $d_0$  — начальный зазор анод-катода,  $F$  — форм-фактор, введенный для согласования экспериментальных данных с известным соотношением Чайлда–Ленгмюра.

При скорости разлета катодной плазмы, равной  $v$ , зазор между анодом и эмиссионной поверхностью будет уменьшаться со временем

по закону  $d(t) = d_0 - vt$  [1,2]. Взрывоэмиссионная плазма расширяется и в направлении поперек зазора, что приводит к увеличению площади эмиссионной поверхности. Тогда соотношение (1) при сплошной эмиссионной поверхности на катоде:

$$I_{\text{Ch-L}} = AU^{3/2} \frac{\pi(r_0 + vt)^2}{(d_0 - vt)^2} F. \quad (2)$$

В [3] приведены результаты экспериментальных исследований ВАХ планарного диода с взрывоэмиссионным катодом из графита в условиях согласования импеданса диода с выходным сопротивлением наносекундного генератора. Получено, что через 20–25 ns после приложения импульса напряжения (400 kV, 60 ns) к диоду образуется сплошная эмиссионная поверхность на катоде и ВАХ диода описывается соотношением (2) при  $F = 1$ . Исследования показали, что скорость разлета плазмы постоянна в течение генерации импульса электронного тока и составляет  $2.5 \cdot 10^6$  cm/s для графитового катода диаметром 45 и 60 mm и при разных анод-катодных зазорах.

Изменение величины электронного тока в планарном диоде с момента приложения напряжения до образования сплошной эмиссионной поверхности мало изучено. В [4,5] выполнен теоретический анализ изменения средней плотности электронного тока в планарном диоде с дискретной эмиссионной поверхностью на катоде в течение ее эволюции от отдельных эмиттеров до сплошной плазменной поверхности. Цель представленной работы — экспериментальное исследование ВАХ планарного диода с дискретной эмиссионной поверхностью на катоде.

Эксперименты проводились на импульсном электронном ускорителе ТЭУ-500 [6] с параметрами: напряжение 350–450 kV, длительность импульса на полувысоте 60 ns, суммарная кинетическая энергия электронов в импульсе до 250 J. Частота следования импульсов в экспериментах составляла 0.5 — 1 imp/s. Отличительной особенностью конструкции ускорителя является использование согласующего трансформатора, включенного между двойной формирующей линией (ДФЛ) и диодом. В случае предварительного размагничивания сердечника согласующего трансформатора форма импульса напряжения, формируемого наносекундным генератором (ДФЛ и трансформатор), близка к оптимальной, учитывающей уменьшение импеданса диода за счет разлета взрывоэмиссионной плазмы [7]. Это позволяет согласовать диод с генератором в течение формирования электронного пучка. Для

измерения напряжения использовали емкостной делитель. Полный ток электронного пучка измеряли цилиндром Фарадея, плоский коллектор которого использовали в качестве анода. Погрешность временной привязки электрических сигналов не превышала 0.5 ns. Калибровка диагностического оборудования показала, что оно корректно отражает работу ускорителя в режиме короткого замыкания ( $U = 50\text{--}60\text{ kV}$ ), при работе на резистивную нагрузку до  $60\ \Omega$  ( $U = 150\text{--}200\text{ kV}$ ) и при работе на планарный диод ( $U = 350\text{--}500\text{ kV}$ ).

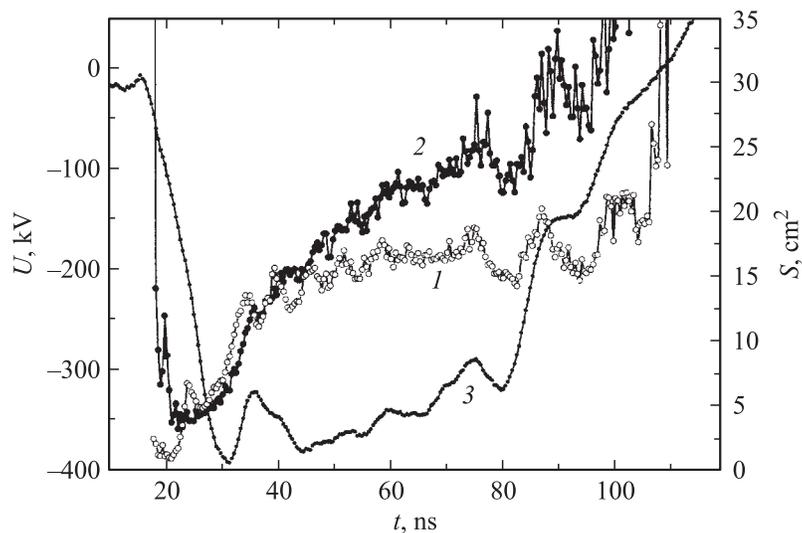
Допустим, что электронный ток ограничивается объемным зарядом в анод-катодном зазоре с момента подачи напряжения на диод и рост тока электронного пучка до насыщения обусловлен увеличением дискретной эмитирующей поверхности катода от 0 до геометрической площади плоского катода. Такой подход использован авторами работы [4] при моделировании изменения средней плотности электронного тока в течение генерации электронного пучка в планарном диоде с дискретной эмиссионной поверхностью катода. Тогда величину площади эмитирующей поверхности графитового катода с дискретной эмиссионной поверхностью можно рассчитать из отношения экспериментальных значений тока электронного пучка к расчетным по соотношению (2):

$$S(t) = S_0 \frac{I_e}{I_{\text{Ch-L}}} = \frac{I_e r_0^2 (d_0 - vt)^2}{AU^{3/2} (r_0 + vt)^2},$$

где  $S_0$  — геометрическая площадь катода, равная  $\pi(r_0)^2$ .

Полученные зависимости при  $v = 2.5 \cdot 10^6\text{ cm/s}$  показаны на рис. 1. Для графитовых катодов с разным диаметром процесс увеличения дискретной эмитирующей площади в начале генерации электронного пучка идет одинаково. Для катода с меньшим диаметром за длительность импульса напряжения взрывоэмиссионная плазма успевает заполнить всю поверхность катода. Для графитового катода площадью  $28\text{ cm}^2$  за 80 ns эмитирующая плазменная поверхность в наших экспериментальных условиях успевает сформироваться только к концу импульса напряжения.

При изменении анод-катодного зазора скорость увеличения дискретной плазменной поверхности на катоде меняется незначительно. На рис. 2 показано изменение площади эмитирующей поверхности графитового катода в течение генерации импульса электронного тока для катода диаметром 60 mm при анод-катодном зазоре 10.5–15 mm. На рис. 2 приведена также зависимость увеличения эмитирующей



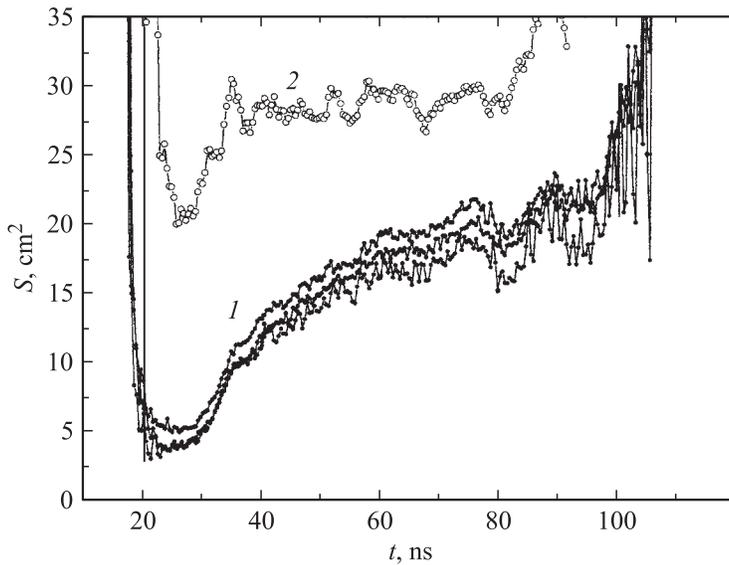
**Рис. 1.** Изменение площади эмитирующей поверхности катода в течение генерации импульса электронного тока для графитового катода диаметром 45 mm,  $S = 16 \text{ cm}^2$  (1) и 60 mm,  $S = 28 \text{ cm}^2$  (2). Кривая 3 — осциллограмма напряжения.

поверхности для катода диаметром 60 mm, выполненного из углеродной ткани. Наличие микрон неоднородностей на поверхности такого катода значительно облегчает и ускоряет образование сплошной плазменной поверхности. Скорость увеличения дискретной эмитирующей площади на катоде определяется свойствами катода, а не параметрами наносекундного генератора.

При моделировании изменения площади дискретной эмитирующей поверхности были приняты следующие допущения: эмитирующие центры расположены на одинаковом расстоянии друг от друга в виде сотовой структуры, они формируются одновременно и их число остается неизменным в течение генерации электронного пучка. Количество эмитирующих центров можно определить по отношению площади катода к площади одного шестигранника. Тогда количество эмиттеров

$$N = \frac{\pi r_0^2}{3.46(vt_1)^2} = \frac{0.91r_0^2}{(vt_1)^2},$$

где  $t_1$  — время соприкосновения соседних эмиссионных центров.



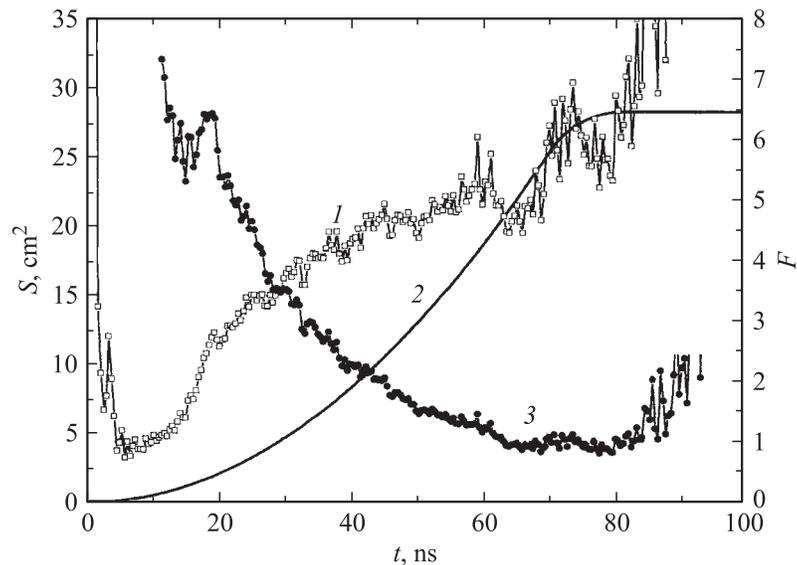
**Рис. 2.** Изменение площади эмитирующей поверхности катода в течение генерации импульса электронного тока для катода диаметром 60 мм ( $S = 28 \text{ cm}^2$ ), выполненного из графита (1) и углеродной ткани (2).

Площадь одиночного эмитирующего центра равна площади окружности с радиусом, равным произведению скорости разлета взрывоэмиссионной плазмы на время с момента образования центра [1]. Данная зависимость корректна, пока эмитирующий центр не перекрывается с соседним, т.е. не выходит за границы шестигранника, в который он вписан. Далее необходимо из площади окружности вычесть площадь 6 сегментов, которые будут выходить за пределы шестигранника. Тогда суммарная эмитирующая площадь катода равна:

$$S_{\text{расч}} = N(vt)^2 [\pi - 3(\alpha - \sin \alpha)], \quad (3)$$

где  $\alpha = 2\arccos(t_1/r)$ , в радианах.

На рис. 3 показана расчетная зависимость изменения суммарной площади дискретной эмиссионной поверхности. Расчет выполнен по соотношению (3) для катода диаметром 60 мм, скорости разлета плазмы



**Рис. 3.** Экспериментальные (1) и расчетные (2) значения площади эмитирующей поверхности катода в течение генерации импульса электронного тока для графитового катода диаметром 60 мм при зазоре 12 мм; изменение форм-фактора  $F$  (3).

$2.5 \cdot 10^6$  см/с и  $t_1 = 70$  нс. На рис. 3 показано также изменение величины форм-фактора, равного отношению экспериментальных значений электронного тока к расчетным по соотношению (2) при  $v = 2.5 \cdot 10^6$  см/с. В начальный период времени, когда отношение радиуса эмиссионного центра к расстоянию между соседними центрами менее 0.14 ( $t < 20$  нс на рис. 3), величина форм-фактора постоянна (в пределах точности измерения) и равна 6. С увеличением размера эмиссионного центра величина  $F$  уменьшается до 1, что соответствует сплошной эмиссионной поверхности графитового катода [3]. Аналогичное изменение величины форм-фактора получено и для других зазоров.

В работах [1,2] показано, что ВАХ для системы с плоскими электродами и одиночным эмиттером, возникшим на месте искусственно созданного микровыступа ( $U = 20\text{--}40$  кВ,  $d = 0.3\text{--}1$  мм), с хорошей точностью ( $\sim 10\%$ ) в начальной фазе эволюции эмиттера,

когда  $vt \leq d/3$ , описывается соотношением

$$I_{\text{Ch-L}} = 44.4 \cdot 10^{-6} \cdot U^{3/2} \left( \frac{vt}{d} \right)^2.$$

Это соотношение получается из уравнения (1) при условии, что площадь катода равна  $\pi(vt)^2$ , а форм-фактор  $F = 6$ .

Выполненные исследования показали, что экспериментальная ВАХ планарного диода с графитовым катодом в начальный период времени (при дискретной эмиссионной поверхности катода) удовлетворительно описывается модифицированным соотношением Чайлда–Ленгмюра при условии одновременного возникновения отдельных эмиттеров и увеличения их радиуса с постоянной скоростью. В начальный период времени, когда радиус эмиттера гораздо меньше расстояния между соседними эмиттерами, величина форм-фактора в модифицированном соотношении Чайлда–Ленгмюра соответствует экспериментальным значениям, полученным при исследовании одиночного эмиссионного центра. С ростом размера эмиттера величина форм-фактора снижается до 1, что соответствует ВАХ планарного диода со сплошной эмиссионной поверхностью на катоде.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 06-08-00147 и 06-03-46002.

## Список литературы

- [1] *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
- [2] *Шубин А.Ф., Юрике Я.Я.* // Изв. вузов. Физика. 1975. Т. 157. № 6. С. 134.
- [3] *Пушкарев А.И., Ремнев Г.Е., Ежов В.В., Гончаров Д.В.* // Изв. вузов. Физика. 2006. Т. 49. № 11. Приложение. С. 144.
- [4] *Беломятцев С.Я., Коровин С.Д., Пегель И.В.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 6. С. 97.
- [5] *Djogo G., Gross J.D.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. N 4. P. 617–624.
- [6] *Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарев А.И.* и др. // ПТЭ. 2004. № 3. С. 130.
- [7] *Ремнев Г.Е., Пушкарев А.И., Фурман Э.Г.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 14. С. 63.