

11;12

Исследование первеанса планарного диода с многоострийным катодом

© А.И. Пушкарёв

Научно-исследовательский институт высоких напряжений при Томском политехническом университете,
634050 Томск, Россия
e-mail: aipush@mail.ru

(Поступило в Редакцию 29 сентября 2006 г. В окончательной редакции 9 августа 2007 г.)

Приведены результаты экспериментальных исследований вольт-амперных характеристик планарного диода с многоострийным взрывоэмиссионным катодом в условиях согласования импеданса диода с выходным сопротивлением наносекундного генератора. Эксперименты выполнены на сильноточном импульсном электронном ускорителе ТЭУ-500 (350–500 keV, 60 ns, 250 J в импульсе). Измерен первеанс диода с игольчатым катодом (140 игл), многоострийным медным катодом и катодом из углеродной ткани в течение генерации электронного пучка. Выполнено сравнение вольт-амперных характеристик диода с многоострийным и сплошным катодом, выполненным из одного материала. Получено, что электронный ток диода удовлетворительно описывается соотношением Чайлда–Ленгмюра при учете сокращения анод-катодного зазора и увеличения площади эмиссионной поверхности расширяющейся плазмой, формфактора. Использование катода из углеродной ткани и многоострийного катода позволяет обеспечить режим работы диода с ограничением электронного тока объемным зарядом уже через 5–10 ns после приложения напряжения.

PACS 52.80.Vp

Введение

Исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодов с различными катодами (плоский, острый, многоострийный, кольцевой и др.), обзор которых приведен в монографии Г.А. Месяца [1], показали, что электронный ток описывается соотношением

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

где $A = 2.33 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$, U — напряжение, приложенное к диоду, S_0 — площадь катода, d — зазор анод–катод, F — формфактор, введенный для согласования экспериментальных данных с известным соотношением Чайлда–Ленгмюра.

Для планарного диода с плоским катодом $F = 1$. Большой интерес представляет работа диода с многоострийным катодом. Наличие неоднородностей на поверхности катода ведет к локальному увеличению напряженности электрического поля и значительному сокращению времени образования взрывоэмиссионной плазмы [1,2]. В работах [1,3] показано, что ВАХ для системы с плоскими электродами и одиночным катодным факелом, возникшим на месте искусственно созданного микровыступа ($U_0 = 20\text{--}40 \text{ kV}$, $d = 0.3\text{--}1 \text{ mm}$), описывается соотношением:

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

Это соотношение получается из уравнения (1) при условии, что площадь катода равна $\pi \cdot (v \cdot t)^2$, а формфактор $F = 6$. Цель выполненной работы — определение формфактора ВАХ планарного диода с многоострийными

катадами разной конструкции при работе диода в согласованном режиме.

1. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на импульсном электронном ускорителе ТЭУ-500 [4,5] с параметрами: ускоряющее напряжение 350–500 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 Hz. Отличительной особенностью конструкции ускорителя является использование повышающего трансформатора, включенного между двойной формирующей линией (ДФЛ) и диодом. насыщение сердечника трансформатора во время зарядки ДФЛ позволило значительно уменьшить амплитуду предимпульса и его влияние на работу диода без применения обостряющего разрядника. Выполненные исследования показали, что 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 и взрывоэмиссионной плазмы [6]. Это позволяет согласовать диод с генератором в течение формирования электронного пучка.

Для измерения тока, протекающего в нагрузке наносекундного генератора, использовался пояс Роговского (ПР). Для измерения напряжения использовался емкостной делитель, расположенный в маслonaполненной камере. Полный ток электронного пучка измерялся цилиндром Фарадея (ПФ), который откачивался вместе с

диодной камерой до давления не выше 0.05 Па. Точность измерения напряжения, тока диода, тока электронного пучка, частотные характеристики диагностического оборудования позволяют рассчитать первеанс и импеданс диода с точностью не хуже 10%. Для временной привязки электрических сигналов были выполнены специальные измерения в режиме короткого замыкания, при работе на резистивную нагрузку и в режиме генерации электронного пучка. 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 ($U = 350\text{--}500\text{ kV}$).

Исследования были выполнены для планарной конфигурации диода. Диаметр плоского катода — 43–60 мм, в качестве анода использовался плоский коллектор ЦФ диаметром 92 мм.

2. Исследование диода с игольчатым катодом

Для многоострийного катода, у которого расстояние между иглами много больше произведения скорости расширения плазмы на длительность импульса приложенного напряжения, отдельные иглы можно рассматривать как независимые эмиссионные источники электронов. Тогда из соотношения (1) получим выражение для суммарного первеанса диода при условии, что площадь одиночного эмиссионного центра равна $\pi(vt)^2$, зазор анод–катод сокращается движущейся плазмой, скорость расширения плазмы постоянна в течение формирования электронного пучка. Зазор между анодом и эмиссионной поверхностью будет уменьшаться со временем по закону $d(t) = d_0 - vt$ [1]. В этом случае первеанс диода равен

$$P = \frac{I}{U^{3/2}} = \frac{FN \cdot 2.33 \cdot 10^{-6} \pi (vt)^2}{(d_0 - vt)^2}, \quad (2)$$

где v — скорость разлета взрывоэмиссионной плазмы, d_0 — начальный анод–катодный зазор, N — число игл.

Электронный ток, ограниченный объемным зарядом электронов в анод–катодном промежутке диода с плоским катодом, описывается уравнением (1) при $F = 1$. Первеанс диода с учетом расширения эмиссионной поверхности тогда будет равен

$$P = \frac{2.33 \cdot 10^{-6} \pi (r_0 + vt)^2}{(d_0 - vt)^2}, \quad (3)$$

где r_0 — радиус катода.

Расчет экспериментальных значений первеанса диода выполнен по соотношению, учитывающему падение напряжения на индуктивности диодного узла L :

$$P_{\text{exp}} = \frac{I_e}{(U_{\text{cap}} - L \frac{dI}{dt})^{3/2}}.$$

Величина индуктивности при расчетах принималась равной 160 нН, это значение получено при калибровке диодного узла в режиме короткого замыкания.

Экспериментальные значения импеданса диода определялись по соотношению

$$Z_{\text{ex}} = \frac{U_{\text{cap}} - L(dI_{\text{br}}/dt)}{I_{\text{br}}}.$$

Расчет импеданса выполнен при условии, что диод работает в режиме ограничения тока объемным зарядом, анод–катодный промежуток сокращается, а площадь эмиссионной поверхности увеличивается за счет разлета взрывоэмиссионной плазмы. Расчет выполнен по соотношению

$$Z = \frac{(d_0 - vt)^2}{2.33 \cdot 10^{-6} F \pi (r_0 + vt)^2 \sqrt{U_k}},$$

где U_k — напряжение, приложенное к диоду.

Были выполнены экспериментальные исследования ВАХ планарного диода с игольчатым катодом, имеющим 140 вольфрамовых игл диаметром 1 мм. Высота игл 11 мм, расстояние между ними 4 мм. Общий диаметр многоострийного катода равен 43 мм. На рис. 1 приведены осциллограммы напряжения на выходе генератора и токов в диоде. Осциллограммы усреднены по десяти последовательным импульсам, следующим с частотой 0.5 Hz.

На рис. 2 показаны экспериментальные значения первеанса игольчатого диода в течение генерации электронного пучка и расчетные по соотношению (2) при $F = 6$ и $v = 3.5 \cdot 10^6\text{ cm/s}$ (кривая 2). Зависимость 3 соответствует расчету по соотношению (3), описывающему поведение игольчатого катода как однородной эмиссионной поверхности (с начальным диаметром 43 мм), которая расширяется с постоянной скоростью $3.5 \cdot 10^6\text{ cm/s}$. Для согласования экспериментальных и расчетных данных введен формфактор $F = 1.6 \pm 0.05$ в соотношение (3). Видно, что описание поведения игольчатого катода суммой независимых

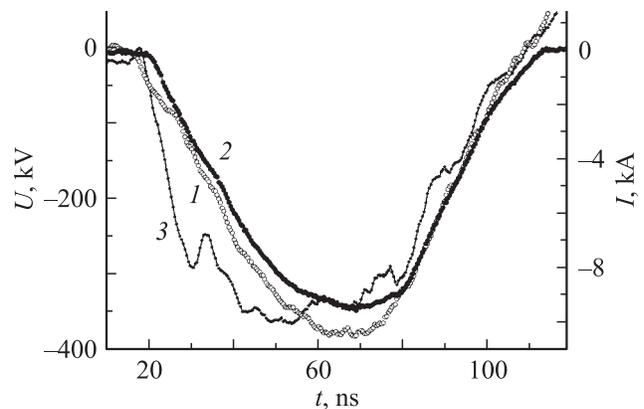


Рис. 1. Осциллограммы полного тока диода (I), тока электронного пучка (2) и напряжения (3). Игольчатый катод, зазор 12.5 мм.

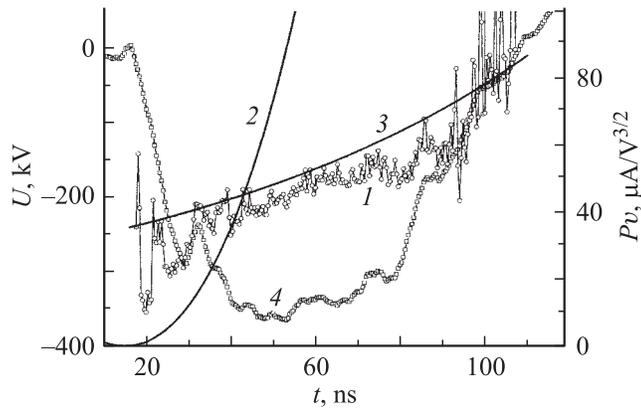


Рис. 2. Экспериментальные (1) и расчетные (2, 3) значения первеанса планарного диода с игольчатым катодом при зазоре 12.5 mm. Кривая 4 — осциллограмма напряжения.

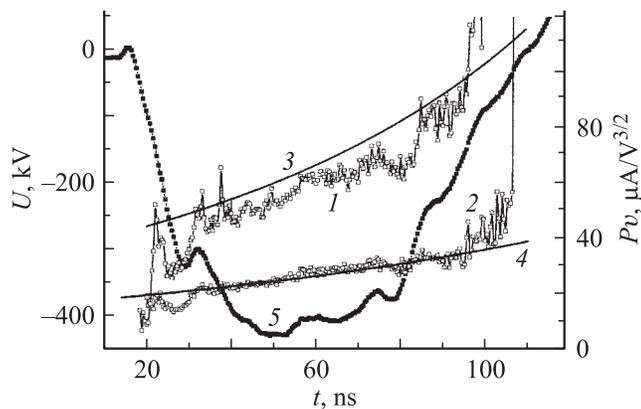


Рис. 3. Экспериментальные (1, 2) и расчетные (3, 4) значения первеанса планарного диода с игольчатым катодом при зазоре 10 mm (1, 3) и 16 mm (2, 4). Кривая 5 — осциллограмма напряжения, приложенного к диоду.

эмиссионных центров в нашем случае дает значительное расхождение с экспериментальными значениями первеанса диода.

При изменении анод-катодного зазора первеанс диода с игольчатым катодом хорошо описывается соотношением (3) при постоянной скорости разлета плазмы $3.5 \cdot 10^6$ cm/s и формфакторе 1.6 ± 0.05 . На рис. 3 показано изменение первеанса диода в течение формирования электронного пучка при разных значениях анод-катодного зазора. При скорости разлета катодной плазмы $3.5 \cdot 10^6$ cm/s соседние эмиссионные центры перекроются только через 40 ns после приложения напряжения к диоду. Но экспериментальные и расчетные значения (для сплошной эмиссионной поверхности) первеанса диода с игольчатым катодом совпадают (в пределах точности измерения) уже через 10 ns (см. рис. 2 и 3).

3. Исследование планарного диода с катодом из углеродной ткани

Графитовый катод имеет большой ресурс работы и малую скорость разлета плазмы. Но для образования сплошной эмиссионной поверхности на графите требуется более 20 ns, что усложняет работу диода при генерации коротких импульсов. В [7] предложено использовать углеродную ткань в качестве холодного катода. Выполненные исследования показали, что применение углеродной ткани позволяет значительно ускорить образование сплошной плазменной поверхности на катоде.

На рис. 4 приведены значения первеанса планарного диода с катодом из углеродной ткани. Для согласования экспериментальных и расчетных (по соотношению (3)) значений первеанса диода введен формфактор $F = 1.7 \pm 0.5$. На рис. 4 показаны также экспериментальные и расчетные по соотношению (3) при $F = 1$ значения первеанса планарного диода с плоским графитовым катодом. Скорость разлета плазмы при расчетах первеанса диода с катодом из графита и углеродной ткани принималась равной $2.5 \cdot 10^6$ cm/s. Через 10 ns после приложения напряжения к диоду с катодом из углеродной ткани электронный ток ограничивается только объемным зарядом в анод-катодном промежутке. Для катода из графита в течение 20–25 ns после приложения напряжения экспериментальные значения первеанса (и электронного тока) были меньше расчетных по соотношению (3), что соответствует ограничению электронного тока эмиссионной способностью катода. При диаметре катода из графитовой ткани 45 mm и зазоре 12 mm планарный диод обеспечивал согласованный режим работы наносекундного генератора с нагрузкой. При одинаковой геометрии планарного диода (диаметр и зазор) и одинаковом напряжении диод с катодом из углеродной ткани обеспечивал увеличение электронного тока почти в 1.5 раза (см. рис. 4).

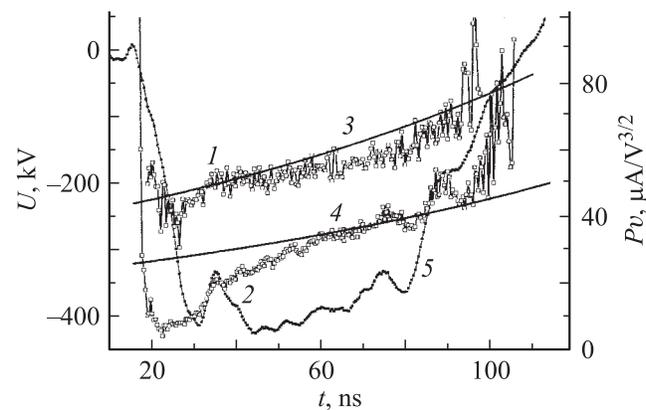


Рис. 4. Экспериментальные (1, 2) и расчетные (3, 4) значения первеанса планарного диода с катодом из углеродной ткани (1, 3) и графита (2, 4). Кривая 5 — напряжение, приложенное к диоду с графитовым катодом. Диаметр катода 45 mm, анод-катодный зазор 12 mm.

В течение образования взрывоэмиссионной плазмы на поверхности графитового катода импеданс диода очень большой — превышает 200–300 Ω . Наносекундный генератор при этом работает в режиме холостого хода, и выходное напряжение резко растет. Это характерно для наносекундного генератора с согласующим трансформатором на выходе. По окончании процесса плазмообразования величина электронного тока ограничивается объемным зарядом в зазоре при данном напряжении, что препятствует переходу диода в режим короткого замыкания. Отсутствие задержки плазмообразования для диода с катодом из углеродной ткани препятствует достижению высокого напряжения на выходе наносекундного генератора, смещая спектр электронов пучка в низкоэнергетическую область.

Удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных по соотношению (3) значений первеанса диода с катодом из углеродной ткани получено в широком диапазоне изменения анод-катодного зазора (рис. 5). При расчете первеанса принимали $F = 1.7 \pm 0.05$ и $v = 2.5 \cdot 10^6$ cm/s. Следует отметить увеличение первеанса выше расчетных значений в конце импульса при малых значениях анод-катодного зазора (рис. 5, кривая 1). Это может быть вызвано компенсацией объемного заряда электронов встречным потоком ионов из анодного факела. Аналогичный эффект был отмечен авторами работы [8] при исследовании изменения первеанса планарного диода с графитовым катодом в течение формирования электронного пучка (300 kV, 40 kA, 50 ns). Для диода с катодом из углеродной ткани изменение зазора от 10.5 до 14.5 mm соответствует изменению импеданса диода от 25 до 40 Ω , что близко к выходному сопротивлению наносекундного генератора (30 Ω) [3].

Удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных по соотношению (3) значений первеанса диода с катодом из углеродной ткани получено также и при увеличении диаметра катода. На рис. 6 показаны расчетные и экспериментальные значения первеанса диода

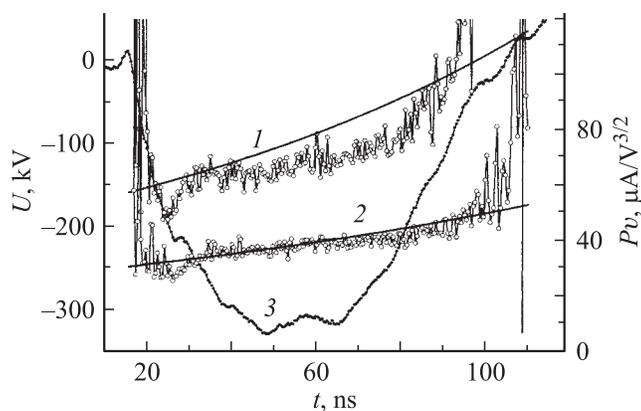


Рис. 5. Экспериментальные и расчетные значения первеанса планарного диода при зазоре анод-катод 10.5 (1) и 14.5 mm (2). Кривая 3 — напряжение, приложенное к диоду. Катод — углеродная ткань, диаметр 45 mm.

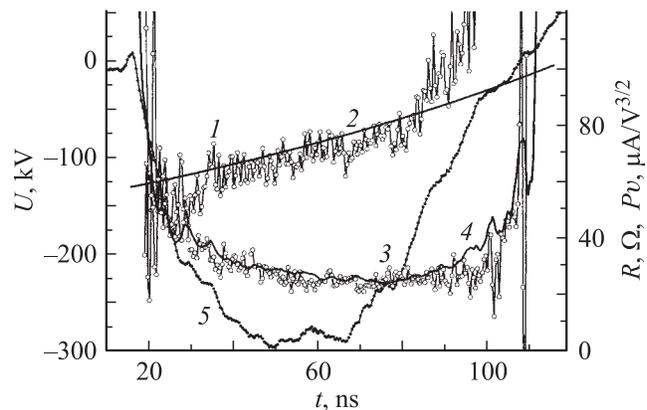


Рис. 6. Экспериментальные (1) и расчетные (2) значения первеанса, экспериментальные (3) и расчетные (4) значения импеданса планарного диода. Кривая 5 — напряжение, приложенное к диоду. Катод — углеродная ткань, диаметр 60 mm, зазор 14.5 mm.

с катодом из углеродной ткани диаметром 60 mm. При изменении анод-катодного зазора от 9.5 (импеданс 15 Ω) до 14.5 mm (импеданс 30 Ω) ВАХ диода также хорошо описывалась соотношением Чайлда–Ленгмюра при $F = 1.7 \pm 0.05$ и постоянной скорости разлета плазмы $2.5 \cdot 10^6$ cm/s.

Для катодов, выполненных из графита и углеродной ткани, для различных анод-катодных зазоров и диаметров катода экспериментальные значения первеанса диода хорошо описываются соотношением, учитывающим расширение взрывоэмиссионной плазмы с постоянной скоростью $2.5 \cdot 10^6$ cm/s. Скорость разлета взрывоэмиссионной графитовой плазмы близка к значению, полученному при статическом пробое вакуумных промежутков ($2 \cdot 10^6$ cm/s) [9]. Вольт-амперная характеристика диода с катодом из углеродной ткани удовлетворительно описывается соотношением Чайлда–Ленгмюра при введении форм-фактора, равного 1.7 ± 0.05 , учитывающего наличие микронеоднородностей на поверхности. Значение форм-фактора постоянно для всех исследованных анод-катодных зазоров и диаметров катода из углеродной ткани.

4. Исследование планарного диода с многоострийным медным катодом

Одной из распространенных конструкций многоострийных взрывоэмиссионных катодов является катод, выполненный из отрезков медной проволоки, установленных перпендикулярно поверхности [10]. При эрозии материала диаметр отдельных эмиттеров не меняется, что обеспечивает большой ресурс диода. Исследования первеанса диода были выполнены для катода, в котором отрезки медной проволоки диаметром 0.1 mm закреплены в стальной обойме диаметром 43 mm.

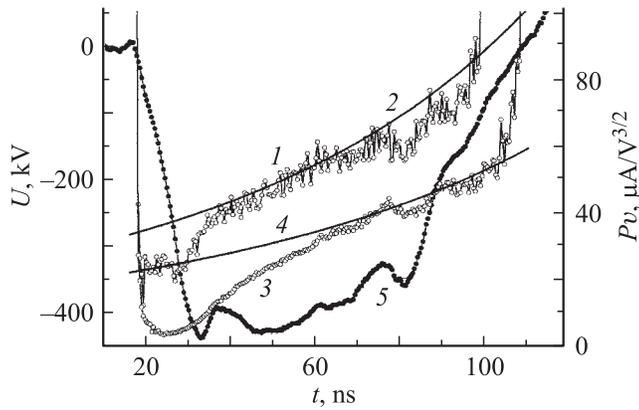


Рис. 7. Экспериментальные (1, 3) и расчетные (2, 4) значения первеанса планарного диода с многоострийным (1, 2) и сплошным медным катодом (3, 4). Кривая 5 — напряжение, приложенное к диоду с медным катодом. Диаметр медного катода 45 mm, анод-катодный зазор 13 mm. Диаметр многоострийного медного катода 43 mm, анод-катодный зазор 11.5 mm.

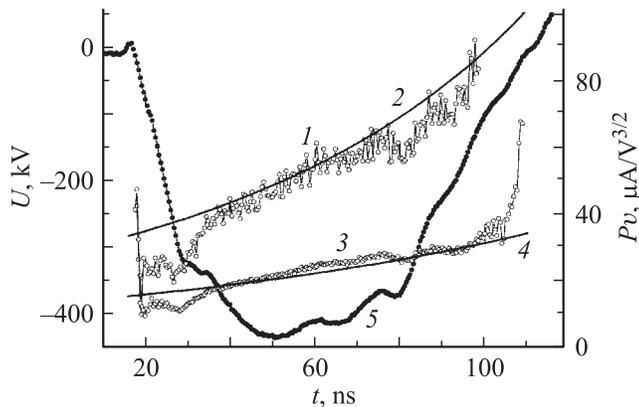


Рис. 8. Экспериментальные (1, 3) и расчетные (2, 4) значения первеанса планарного диода с многоострийным медным катодом при зазоре 11.5 mm (1, 2) и 17.5 mm (2, 4). Кривая 5 — напряжение, приложенное к диоду.

На рис. 7 показаны экспериментальные и расчетные (при $F = 1.3$) значения первеанса планарного диода с многоострийным медным катодом, приведены также экспериментальные и расчетные по соотношению (3) при $F = 1$ значения первеанса планарного диода со сплошным медным катодом. Скорость разлета плазмы при расчетах первеанса диода в обоих случаях принималась равной $4 \cdot 10^6$ cm/s, что больше величины, полученной при статическом пробое вакуумных промежутков ($2.5 \cdot 10^6$ cm/s) [9]. Для сплошного медного катода в течение 35–40 ns после приложения напряжения экспериментальные значения первеанса (и электронного тока) были меньше расчетных по соотношению (3), что соответствует ограничению электронного тока эмиссионной способностью катода.

Так же как для диода с игольчатым катодом и катодом из углеродной ткани, при изменении анод-катодного зазора в диоде с многоострийным медным катодом получено удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных по соотношению (3) значений первеанса. На рис. 8 показаны экспериментальные и расчетные значения первеанса диода при разных зазорах. Значения формфактора и скорости разлета взрывоэмиссионной плазмы при расчетах принимались равными $F = 1.3 \pm 0.05$ и $v = 4 \cdot 10^6$ cm/s. Изменение анод-катодного зазора от 11.5 до 17.5 mm соответствует изменению импеданса диода от 30 до 50 Ω .

Заключение

Выполненные исследования первеанса планарного диода с многоострийным катодом из различных материалов показали, что при согласовании импеданса диода с выходным сопротивлением наносекундного генератора ВАХ диода удовлетворительно описывается соотношением Чайлда–Ленгмюра при учете разлета плазмы и формфактора. Величина скорости разлета взрывоэмиссионной плазмы и формфактора определяются только материалом катода и постоянны при изменении анод-катодного зазора и диаметра катода. Наличие микронеровностей на поверхности многоострийного катода снижает время, в течение которого ток диода ограничивается эмиссионной способностью катода — с 30–40 до 5–10 ns.

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] Месяц Г.А., Литвинов Е.А. // Изв. вузов. Физика. 1972. Т. 154. № 8. С. 158.
- [3] Шубин А.Ф., Юрике Я.Я. // Изв. вузов. Физика. 1975. Т. 157. № 6. С. 134.
- [4] Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарев А.И. и др. // ПТЭ. 2004. № 3. С. 130.
- [5] Remnev G.E., Furman E.G., Pushkarev A.I. et al. // IEEE Transact on fundamentals and materials. 2004. Vol. 124. № 6. P. 491.
- [6] Ремнев Г.Е., Пушкарев А.И., Фурман Э.Г. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 14. С. 63.
- [7] Erickson G.F. and Mace P.N. // Rev. Sci. Instrum. 1983. Vol. 54. № 5. P. 586.
- [8] Parker R.K., Anderson R.E., and Duncan C.V. // J. of Appl. Phys. Vol. 45. N 6. P. 2463.
- [9] Месяц Г.А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.
- [10] Месяц Г.А., Прокурковский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984, 256 с.