

04;10;11;12

Эффективность работы планарного диода с взрывоэмиссионным катодом при задержке плазмообразования

© А.И. Пушкарев, Ю.Н. Новоселов, Р.В. Сазонов

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

(Поступило в Редакцию 25 апреля 2007 г.)

Представлены результаты сравнительного анализа баланса тока и энергии в диодном узле сильнооточного импульсного электронного ускорителя (350–500 keV, 60 ns, 250 J в импульсе) с взрывоэмиссионным катодом, выполненным из графита, меди, углеродной ткани и многоострийным медным катодом. Показано, что несмотря на задержку образования плазменной поверхности на катоде планарный диод со сплошным катодом (графитовым или медным) обеспечивает высокую эффективность преобразования подводимой энергии в кинетическую энергию электронов (более 90%). При согласовании импеданса планарного диода с выходным сопротивлением наносекундного генератора эффективность работы диода не зависит от времени формирования плазмы на катоде. Задержка плазмообразования при использовании графитового катода снижает долю низкоэнергетичных электронов в формируемом электронном пучке и уменьшает потери электронов в анодной фольге при выводе пучка из вакуумного объема диодной камеры в реактор.

PACS: 52.80.Vp

Введение

Планарные диоды со взрывоэмиссионным графитовым катодом широко используются для генерации электронных пучков большого сечения с плотностью тока выше 100 А/см². Графитовый катод имеет большой ресурс работы и малую скорость разлета взрывоэмиссионной плазмы [1], что позволяет уменьшить вероятность пере-мыкания анод-катодного зазора плазмой. Но для образования сплошной эмиссионной поверхности на графите требуется более 20 ns, что усложняет работу диода при генерации коротких импульсов. Известно, что электронный ток ограничивается эмиссионной способностью катода и объемным зарядом в анод-катодном зазоре [1]. Очевидно, что режим ограничения тока только объемным зарядом обеспечивает более стабильную работу диода, так как величина тока в этом случае определяется только геометрией планарного диода (анод-катодный зазор и диаметр катода) и приложенным напряжением. Кроме того, при малом влиянии эмиссионной способности катода на работу диода распределение тока электронного пучка по сечению будет более однородным. В работе [2] было предложено использовать углеродную ткань в качестве холодного катода. Выполненные исследования показали, что катод из углеродной ткани позволяет ускорить процесс образования взрывоэмиссионной плазмы и сократить время работы диода в режиме ограничения электронного тока эмиссионной способностью катода [3]. Для определения влияния задержки образования взрывоэмиссионной плазмы на эффективность работы диода проведено сравнение режима его работы с катодом, выполненным из графита, меди, углеродной ткани и с многоострийным медным катодом.

1. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на импульсном электронном ускорителе ТЭУ-500 [4] со следующими параметрами: ускоряющее напряжение 350–450 kV, длительность импульса на полувысоте 60 ns, полная энергия электронов в импульсе до 200 J. Исследования были выполнены для наиболее простой конфигурации диода — плоский катод, в качестве анода использовался коллектор цилиндра Фарадея (ЦФ) диаметром 93 mm, который откачивался вместе с диодной камерой до давления не выше 0.05 Pa. Для измерения напряжения на выходе наносекундного генератора использовался емкостной делитель, расположенный в маслonaполненной камере. Ток, потребляемый диодным узлом, измерялся поясом Роговского. Калибровка диагностического оборудования показала, что оно корректно отражает работу ускорителя в режиме короткого замыкания ($U = 50–60$ kV), при работе на резистивную нагрузку до 60 Ω (150–200) и при работе на планарный диод (350–450). Погрешность синхронизации электрических сигналов не превышала 0.5 ns. Точность измерения напряжения, тока диода, тока электронного пучка, частотные характеристики диагностического оборудования позволяют рассчитать изменение тока и энергии в диодном узле с погрешностью не хуже 10%.

2. Измерение задержки плазмообразования

На рис. 1 приведены типичные осциллограммы напряжения и полного тока пучка. Осциллограммы усреднены по 10 импульсам, следующим с частотой 1 pps/s. Видно, что для катода из графита формирование электронного

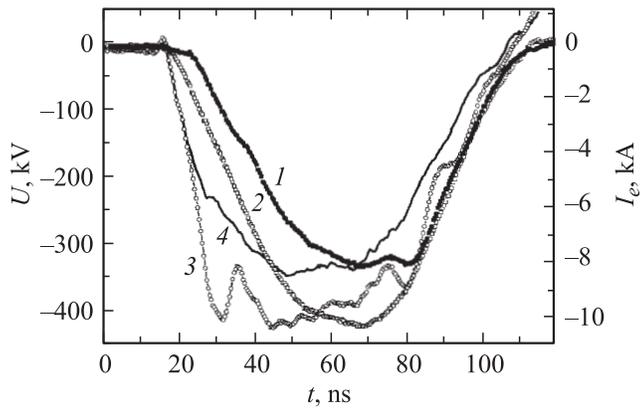


Рис. 1. Осциллограммы электронного тока (1, 2) и напряжения (3, 4) для диода с катодом из графита (1, 3) и углеродной ткани (2, 4). Диаметр катода 45, зазор 12 mm.

пучка начинается позже, чем для катода из углеродной ткани. Рост электронного тока может быть вызван расширением эмиссионной поверхности на катоде и увеличением приложенного напряжения. Поэтому анализ режима работы планарного диода и измерение времени формирования сплошной плазменной поверхности на катоде проводился по первеансу. При ограничении тока электронного пучка только объемным зарядом в анод-катодном зазоре и бесконечной эмиссионной способности всей поверхности катода ВАХ планарного диода описывается соотношением Чайлда–Ленгмюра [1]. С учетом расширения взрывоэмиссионной плазмы к аноду и поперек анод-катодного зазора первеанс планарного диода можно записать в виде [5]:

$$Pv_{\text{calc}} = \frac{I_e}{(U)^{3/2}} = \frac{F \cdot 2.33 \cdot 10^{-6} \pi (r_0 + vt)^2}{(d_0 - vt)^2} \quad (1)$$

где r_0 — радиус катода, d_0 — начальный анод-катодный зазор, v — скорость расширения взрывоэмиссионной плазмы, F — формфактор, учитывающий структуру катода.

Делитель напряжения расположен в масляном объеме, он измеряет сумму напряжения, приложенного к зазору, и падения напряжения на индуктивности катододержателя. Поэтому расчет экспериментальных значений первеанса диода выполнен по соотношению

$$Pv_{\text{exp}} = \frac{I_e}{(U_{\text{cap}} - L \frac{dI_d}{dt})^{3/2}},$$

где I_e — ток электронного пучка; I_d — ток, потребляемый диодным узлом; L — индуктивность катододержателя, равная 160 nH.

Исследования первеанса планарного диода с катодом из различных материалов показали, что при согласовании импеданса диода с выходным сопротивлением наносекундного генератора ВАХ диода удовлетворительно описывается соотношением (1). В табл. 1 приведены полученные значения v и F для разных катодов [5].

Таблица 1. Скорость разлета плазмы и формфактор для разных катодов

Катод	Формфактор	Скорость плазмы, cm/s
Графитовый сплошной	1 ± 0.05	$2.5 \cdot 10^6$
Углеродная ткань	1.7 ± 0.05	
Медный сплошной	1 ± 0.05	$4 \cdot 10^6$
Медный многоострый	1.3 ± 0.05	

Получено, что скорость разлета взрывоэмиссионной плазмы определяется только материалом катода, а формфактор — его конструкцией (сплошной или многоострый). Они постоянны в течение импульса, при изменении анод-катодного зазора и диаметра катода.

На рис. 2 показаны экспериментальные и расчетные (при $F = 1$ для графита, 1.7 — для углеродной ткани) значения первеанса планарного диода. Совпадение экспериментальных и расчетных значений первеанса соответствует сплошной эмиссионной поверхности на катоде. Наличие неоднородностей на поверхности катода из углеродной ткани снижает время, в течение которого ток диода ограничивается эмиссионной способностью катода, с 30–40 до 5–10 ns. Кроме того, искажение электрического поля на неоднородностях поверхности катода значительно снижает ограничение электронного тока объемным зарядом в анод-катодном зазоре. При одинаковых геометрических размерах (зазор и диаметр) и приложенном напряжении диод с катодом из углеродной ткани обеспечивает формирование тока с амплитудой, в 1.7 раз большей, чем в случае использования сплошного графитового катода. При согласовании импеданса диода с выходным сопротивлением наносекундного генератора (что обеспечивает максимальную эффективность

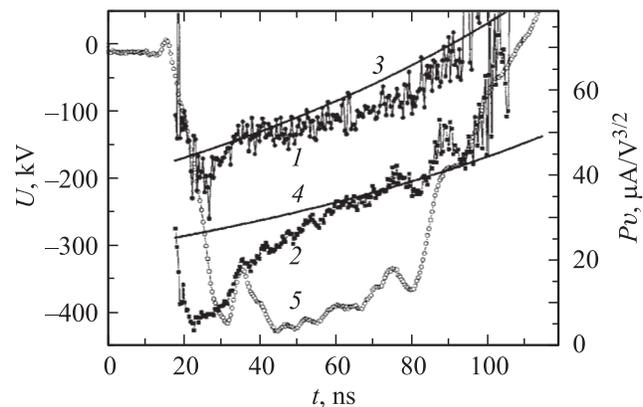


Рис. 2. Экспериментальные (1, 2) и расчетные (3, 4) значения первеанса планарного диода с катодом из углеродной ткани (1, 3) и графитовым катодом (2, 4). Кривая 5 — напряжение, приложенное к диоду с графитовым катодом. Диаметр катода 45, зазор 12 mm.

передачи энергии) это позволяет значительно увеличить зазор между анодом и катодом из углеродной ткани.

3. Исследование баланса энергии в диодном узле ускорителя

Выполненные исследования показали, что задержка образования сплошной эмиссионной поверхности на катоде не отражается на эффективности работы диода, мощность электронного пучка слабо зависит от материала катода. На рис. 3 приведены зависимости мощности электронного пучка, рассчитанные из осциллограмм тока пучка и ускоряющего напряжения (рис. 1).

На рис. 4 показан баланс энергии в диодном узле ускорителя. Увеличение энергии электронного пучка в течение его формирования рассчитывалось интегрированием мощности электронного пучка (рис. 3). Изменение полной энергии, поступающей в диодный узел от наносекундного генератора в течение формирования импульса напряжения, рассчитывалось по соотношению

$$E(t_1) = \int_0^{t_1} I_d U_{\text{cap}} dt.$$

Изменение энергии в индуктивности в течение импульса равно

$$E_{\text{ind}}(t_1) = L \int_0^{t_1} (I_d - I_c) \frac{dI_d}{dt} dt,$$

ток перезарядки емкости диодного узла I_c равен

$$I_c = C \frac{dU_{\text{cap}}}{dt},$$

где C — емкость диодного узла, равная 50 пФ.

Снижение потерь энергии в диодном узле в конце импульса связано с выделением энергии, накопленной в его реактивных элементах (емкости и индуктивности). Но, к сожалению, этот процесс рекуперации не является полезным при выводе электронного пучка из диодного узла через фольгу, так как энергия в реактивных элементах накапливается на переднем фронте импульса при большом ускоряющем напряжении на катоде, но преобразуется в кинетическую энергию электронов с малой энергией, которые будут поглощаться в анодной фольге.

Выполненные исследования показали [5], что потери энергии в диоде к концу импульса пропорциональны величине анод-катодного зазора. На рис. 5 представлены результаты для диода с катодом диаметром 45 мм, выполненным из графита и углеродной ткани. Общий характер зависимости для катодов из разного материала указывает, что потери энергии в диоде связаны не с процессом формирования взрывоэмиссионной плазмы на катоде, а с процессом транспортировки электронов пучка.

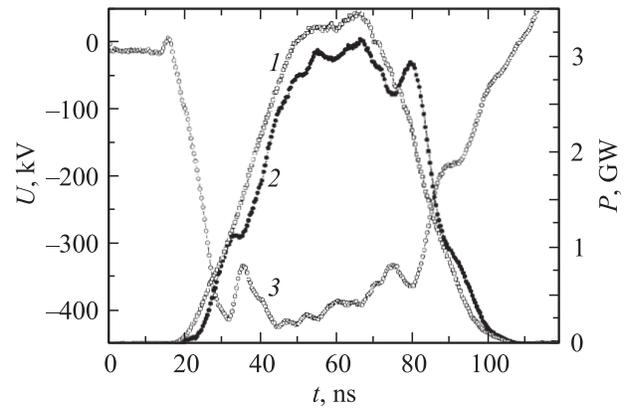


Рис. 3. Изменение мощности электронного пучка для катода из углеродной ткани (1) и графита (2). Кривая 3 — напряжение, приложенное к диоду с графитовым катодом.

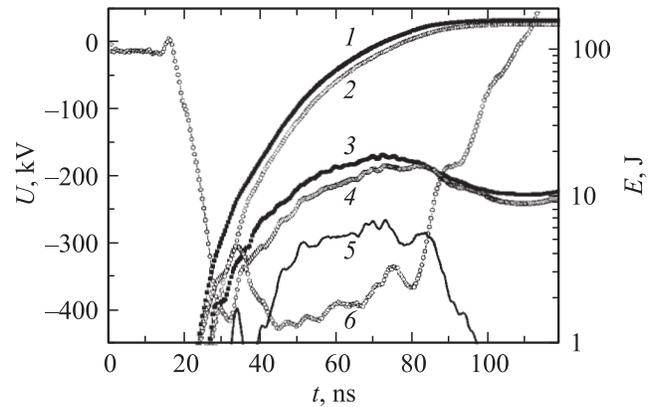


Рис. 4. Изменение энергии в диодном узле в течение формирования электронного пучка: энергия от генератора (1), энергия электронного пучка (2), потери энергии для катода из углеродной ткани (3) и графитового катода (4), энергия в индуктивности (5). Кривая 6 — напряжение, приложенное к диоду с графитовым катодом.

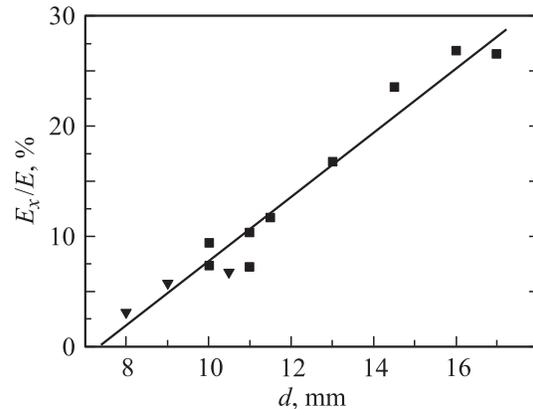


Рис. 5. Зависимость потерь энергии в диодном узле, нормированных на полную энергию, подведенную к диоду к концу импульса, от анод-катодного зазора для катода из углеродной ткани (▼) и графита (■).

Таблица 2. Баланс энергии в диоде к концу импульса

Катод	E, J	E_e, J	E_x, J	$E_x/E, \%$
Графитовый сплошной	204	188	16	7.8
Углеродная ткань	188	174	14	7.5
Медный сплошной	150	142	8	5.3
Медный многоострыйный	154	143	11	7.2

Примечание. E — энергия, поступающих в диодный узел, E_e — энергия электронного пучка.

В табл. 2 приведены значения энергий в диодном узле и относительная величина потерь энергии к концу импульса для диода с разными катодами.

4. Исследование потерь тока в диодном узле ускорителя

С целью определения влияния материала катода на потери при выводе электронного пучка из вакуумного объема диодной камеры в плазмохимический реактор были выполнены эксперименты с использованием поддерживающей анодной решетки (прозрачность 70%) и разделительной алюминиевой фольги толщиной 130 μm . В данной серии экспериментов полный ток выведенного электронного пучка измерялся цилиндром Фарадея, расположенным за анодной решеткой на расстоянии 5 мм. На рис. 6 показан баланс тока в диодном узле.

Полные потери (кривая 1) рассчитывались по соотношению:

$$K = 100 \frac{I_d - I_e - I_c}{I_d}, \% \quad (2)$$

Для определения потерь электронного пучка в опорной решетке были выполнены измерения без разделительной фольги между решеткой и ЦФ. Потери в опорной решетке в течение генерации электронного пучка, которые рассчитывались по соотношению (2), показаны на рис. 6 (кривая 2). Коэффициент потерь электронного тока при этом выше оптической непрозрачности анодной решетки (30%), что вызвано потерями электронного пучка при генерации и на пути от эмиссионной поверхности катода до выходного окна диодной камеры. Их вклад одинаков для различных катодов и не превышает 10%.

Полученные данные позволяют рассчитать потери электронного пучка в анодной фольге как разность полных потерь тока пучка и потерь в анодной решетке (рис. 6, кривая 3). Использование катода из углеродной ткани снижает задержку плазмообразования и начала генерации электронного пучка, но приводит к увеличению потерь электронов пучка в анодной фольге за счет увеличения доли низкоэнергетичных электронов. В течение периода образования взрывоэмиссионной плазмы на поверхности графитового катода импеданс диода очень большой — превышает 200–300 Ω . Наносекундный генератор при этом работает в режиме холостого хода,

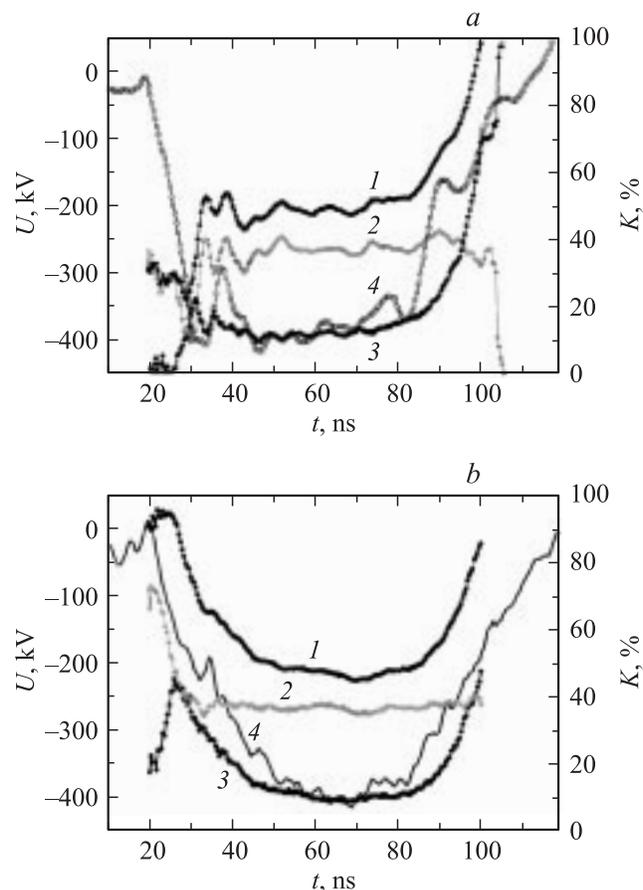


Рис. 6. Изменение потерь тока электронного пучка при выводе из диода в течение генерации электронного пучка: 1 — полные потери, 2 — потери в решетке, 3 — потери в фольге, 4 — напряжение. Катод: а — графит, зазор 10 мм, б — углеродная ткань, зазор 13 мм.

и выходное напряжение резко растет. Это характерно для генератора с согласующим трансформатором на выходе [4]. Отсутствие задержки плазмообразования для диода с катодом из углеродной ткани препятствует достижению высокого напряжения на выходе наносекундного генератора.

Результаты анализа потерь тока в диоде при выводе электронного пучка подтверждаются данными баланса энергии. Сравнение потерь энергии при выводе электронного пучка из диодной камеры для серии экспериментов с разными катодами диаметром 45 мм приведено в табл. 3. Потери энергии электронов в фольге для диода с графитовым катодом значительно ниже, чем при использовании катода из углеродной ткани.

5. Исследование планарного диода с медным катодом

Одной из распространенных конструкций взрывоэмиссионных катодов является катод, выполненный из отрезков медной проволоки, установленных перпендикулярно

Таблица 3. Баланс энергии при выводе электронного пучка

Материал катода	Подводимая энергия	Энергия пучка		Потери	
		без фольги	с фольгой	на решетке	в фольге
Графит	255–264 J	151–165 J	124 J	104–113 J	18–36 J
	100%	57–64%	47–49%	36–43%	6–11%
Углеродная ткань	229–248 J	154 J	112–118 J	75–95 J	17–61 J
	100%	62–67%	45–51%	33–38%	12–13%

поверхности катода [6]. При эрозии материала диаметр отдельных эмиттеров не изменяется, что обеспечивает большой ресурс катода. Исследования были выполнены для катода, в котором отрезки медной проволоки диаметром 0.1 mm закреплены в обойме диаметром 43 mm. Использован режим согласования импеданса планарного

диода с выходным сопротивлением наносекундного генератора (35–40 Ω [4]). Диаметр медного катода 45 mm, анод-катодный зазор 13 mm; диаметр многоострийного медного катода 43 mm, анод-катодный зазор — 11.5 mm. В качестве анода использовался коллектор цилиндра Фарадея.

Экспериментально получено, что для сплошного медного катода, как и для катода из графита, генерация электронного пучка начинается позже, чем для многоострийного медного катода. На рис. 7 показаны экспериментальные и расчетные по соотношению (1) значения первеанса планарного диода с многоострийным и сплошным медным катодом.

Для сплошного медного катода задержка формирования плазменной поверхности составляет 15 ns, а для многоострийного — превышает 40 ns. Но задержка плазмообразования также слабо сказывается на эффективности работы диода, потери энергии в обоих случаях близки и не превышают 10% от подводимой к диоду энергии (см. табл. 2 и рис. 8). На рис. 8 показано изменение энергии, подводимой к диоду от наносекундного генератора, и энергии формируемого электронного пучка.

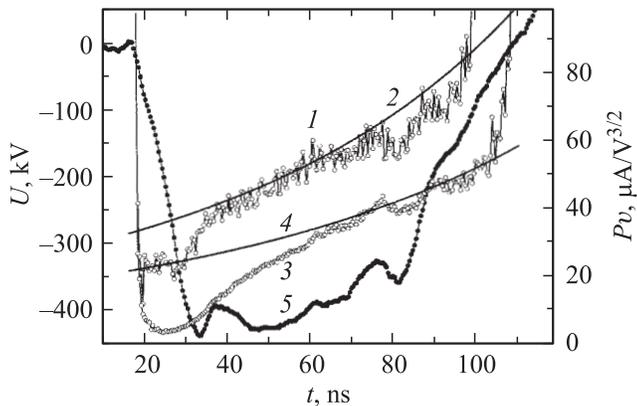


Рис. 7. Экспериментальные (1, 3) и расчетные (2, 4) значения первеанса планарного диода с многоострийным медным катодом (1, 2) и сплошным медным катодом (3, 4). Кривая 5 — напряжение, приложенное к диоду с медным катодом.

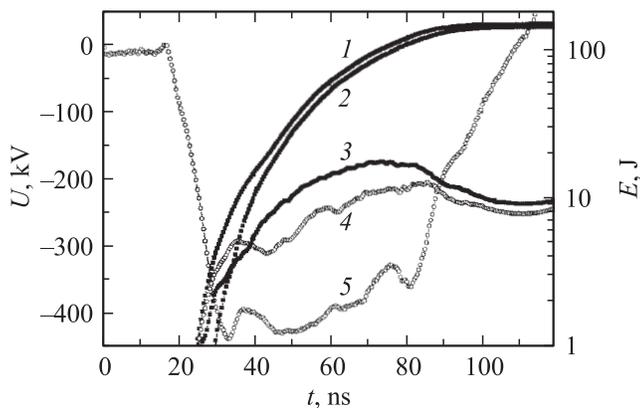


Рис. 8. Баланс энергии в диодном узле в течение формирования импульса электронного тока: энергия от генератора (1), энергия электронного пучка (2), потери энергии для многоострийного медного катода (3) и сплошного медного катода (4). Кривая 5 — напряжение.

6. Исследование планарного диода с катодом диаметром 60 mm

Выполненные исследования показали, что для графитовых катодов с различным диаметром процесс увеличения дискретной эмитирующей площади в начале генерации электронного пучка идет одинаково [5]. Для катода с меньшим диаметром за длительность импульса напряжения взрывоэмиссионная плазма успевает заполнить всю поверхность катода. Для графитового катода диаметром 60 mm эмитирующая плазменная поверхность в наших экспериментальных условиях успевает сформироваться только к концу импульса напряжения. На рис. 9 показаны экспериментальные и расчетные (при $F = 1$ для графита, 1.7 — для углеродной ткани) значения первеанса планарного диода; диаметр катода 60 mm, анод-катодный зазор 12 mm. На рис. 10 показано изменение энергии, подводимой к диоду от наносекундного генератора, и энергии формируемого электронного пучка.

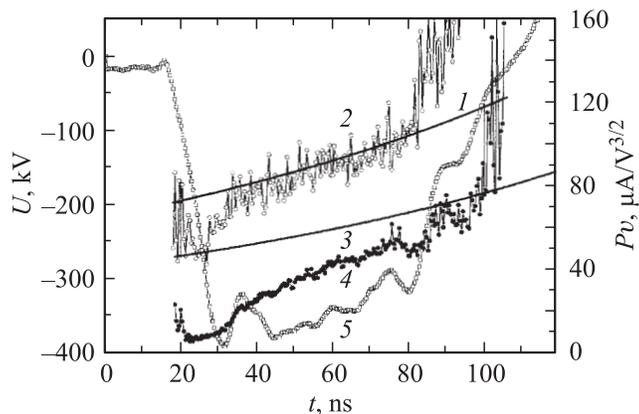


Рис. 9. Расчетные (1, 3) и экспериментальные (2, 4) значения перванса планарного диода с катодом из углеродной ткани (1, 2) и графитовым катодом (3, 4). Кривая 5 — напряжение, приложенное к диоду с графитовым катодом диаметром 60 mm.

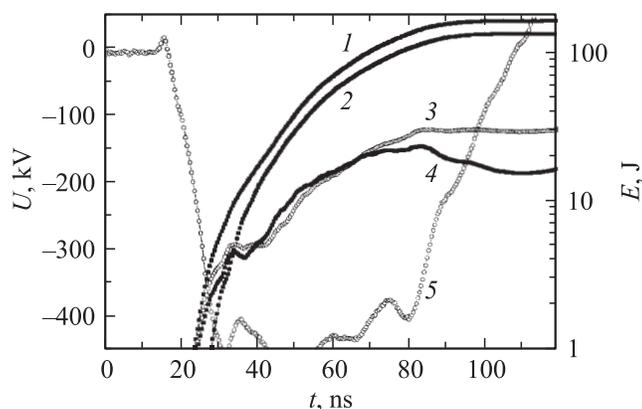


Рис. 10. Баланс энергии в диодном узле в течение формирования импульса электронного тока: энергия от генератора (1), энергия электронного пучка (2), потери энергии для графитового катода (3) и для катода из углеродной ткани, 4 — напряжение. Диаметр катода 60 mm. 5 — напряжение, приложенное к диоду с графитовым катодом.

Выполненные исследования баланса энергии в диоде с катодом диаметром 60 mm показали, что даже в случае отсутствия сплошной плазменной поверхности на катоде потери энергии в диодном узле мало отличаются от потерь в диоде со сплошной эмиссионной поверхностью на катоде.

Заключение

Выполненные измерения баланса тока и энергии в планарном диоде с взрывоэмиссионным катодом показали, что эффективность преобразования подводимой энергии в кинетическую энергию электронов слабо зависит от процесса формирования эмиссионной поверхности на катоде. В сравнимых условиях работы (импеданс диода, материал и диаметр катода) материал катода не

влияет на КПД диода. При использовании сплошного катода (графитового или медного) характерно наличие задержки плазмообразования, что приводит к снижению доли низкоэнергетичных электронов в спектре формируемого пучка и соответственно — к снижению потерь электронного пучка при выводе из диодной камеры в плазмохимический реактор.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 06-08-00147.

Список литературы

- [1] Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
- [2] Erickson G.F. and Mace P.N. // Rev. Sci. Instr. 1983. Vol. 54. N 5. P. 586.
- [3] Пушкарев А.И., Сазонов Р.В. // Изв. Томского политехн. ун-та. 2007. Т. 310. № 1. С. 70.
- [4] Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарев А.И., Карпузов С.Б., Кондратьев Н.А., Гончаров Д.В. // ПТЭ. 2004. № 3. С. 130.
- [5] Пушкарев А.И., Ремнев Г.Е., Ежов В.В., Гончаров Д.В. // Изв. вузов. Физика. 2006. Т. 49. № 11 (Приложение). С. 144.
- [6] Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.