

УДК 539.1

## **НИЗКОИМПЕДАНСНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СИЛЬНОТОЧНЫХ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ**

*А. В. Агафонов*

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

Приведены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования генерации низкоэнергетических (с энергией в десятки килоэлектронвольт) сильноточных (с токами до десятков килоампер) электронных пучков в низкоимпедансной системе, включающей в себя плазмонаполненный диод с протяженным плазменным анодом, вспомогательный термокатод и взрывоэмиссионный катод. Слаботочный низковольтный пучок от вспомогательного катода, находящегося во внешнем продольном магнитном поле, используется для создания протяженного плазменного анода, одновременно представляющего собой и канал для транспортировки пучка, посредством ионизации остаточного газа. Сильноточный электронный пучок формируется с взрывоэмиссионного катода, погруженного в предварительно сформированную плазму. Численное моделирование проведено с помощью PIC-кода программы KARAT.

Results of experimental investigations and computer simulations of low-energy high-current electron beam generation in a low-impedance system consisting of plasma-filled diode with a long plasma anode, an auxiliary thermionic cathode and an explosive emission cathode are given. The auxiliary cathode is used to form the long plasma anode by means of the residual gas ionization by low-current, low-voltage electron beam in an external longitudinal magnetic field. The high-current low-energy electron beam is generated from the explosive emission cathode embedded in prepared plasma. Computer simulation was performed using PIC code KARAT.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Сильноточные (1–20 кА) низкоэнергетические (10–50 кэВ) пучки электронов находят ряд технологических применений, прежде всего для модификации поверхностей материалов с помощью импульсов пучка. Для генерации таких пучков микросекундной длительности были разработаны плазмонаполненные диоды с взрывоэмиссионными катодами. Плазма в них может создаваться различными способами: внешней инжекцией из плазменных пушек, ионизацией остаточного или специально напущенного газа отражательным разрядом, вспомогательным слаботочным электронным пучком [1–12]. Использование вспомогательного пучка позволяет оперативно изменять параметры плазмы при их высокой воспроизводимости и управлять параметрами формируемого сильноточного пучка [8–12]. Основные исследования, результаты которых изложены ниже, были направлены, в первую очередь, на изучение особенностей работы плазмонаполненных сильноточных диодов, развитие методов генерации и формирования плазменного анода, пучков с параметрами, необходимыми для практического применения. Для этих целей был создан стенд, на котором плазма вначале формировалась плазменными пушками с пробоем по поверхности твердого диэлектрика, а затем был разработан новый плазмонаполненный диод с протяженным плазменным анодом, формируемым с помощью вспомогательного слаботочного электронного пучка.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

**1.1. Схема установки.** Схема установки приведена на рис. 1. Основу стенда составляет плазмонаполненный сильноточный диод с взрывоэмиссионным катодом и создаваемым тем или иным способом протяженным плазменным анодом. Ускорение электронного пучка в плазмонаполненном диоде происходит в тонком слое, который образуется вблизи примыкающей к поверхности катода плазме с началом импульса ускоряющего напряжения. В этом слое происходит основное падение приложенного напряжения. Возникающая при невысоком напряжении высокая напряженность электрического поля в тонком слое на границе с катодом позволяет реализовать режим взрывной эмиссии катода и сформировать электронный пучок высокой плотности. Применение плазменного анода также обеспечивает получение пучка с большой длительностью импульса за счет того, что катодная плазма, образуемая в результате взрывной эмиссии, может расширяться, не перемыкая, а сдвигая ускоряющий промежуток внутрь предварительно сформированного плазменного анода.

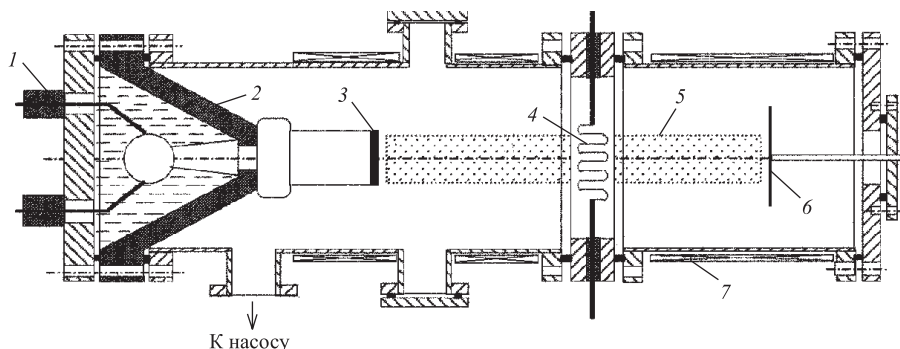


Рис. 1. Схема стенда с источником низкоэнергетичного слаботочного электронного пучка для ионизации остаточного газа и формирования плазменного канала

Ускоряющее напряжение от емкостного накопителя (ИК50-3, 50 кВ, 3 мкФ), заряжаемого до напряжения 10–40 кВ и коммутируемого газовым разрядником, подается на катод посредством коаксиальных кабелей 1, подсоединенных к установленному на изоляторе 2 катодному штоку с плоским катодом 3 из графита. Вспомогательный пучок электронов генерируется двусторонним электронным источником открытого типа с проволочным вольфрамовым термокатодом 4, установленным между двумя секциями вакуумной камеры. На катод источника подается импульсное напряжение отрицательной полярности с амплитудой до 350 В за 5–10 мкс до подачи высокого напряжения на основной диод. Нагрев W-нити осуществляется переменным напряжением через трансформатор. Ускоряемые электроны распространяются как в сторону катода диода, так и в сторону коллектора 6 в продольном магнитном поле, создаваемом однослойным соленоидом 7. Они ионизируют остаточный газ, формируя плазменный канал 5. Напряжение на основной сильноточный диод подается после формирования плазменного канала. Импульсный однослойный соленоид (время нарастания магнитного поля около 5 мс) с дополнительными компенсационными катушками, размещаемыми вблизи флан-

цев, используется для создания однородного магнитного поля в 250–300 Гс. Коллектор пучка сделан подвижным, он может быть заменен набором ленгмюровских зондов для измерения параметров создаваемого плазменного столба.

**1.2. Результаты предварительных исследований.** Измерения плотности плазмы в канале были проведены с использованием одиночных зондов из вольфрамовой проволоки диаметром 0,5 мм. Длина коллекторной части зонда составляла 1 см. Измерения проводились в двух сечениях камеры: вблизи диода и у коллектора (в конце камеры), т. е. с двух сторон от источника вспомогательного электронного пучка. Похожие данные, полученные двумя зондами, показывают, что формируемый плазменный канал имеет приблизительно одинаковые параметры с обеих сторон от источника электронного пучка. Оценки плотности ионов в канале, сделанные по измеренным величинам тока насыщения зондов при напряжении смещения –200 В, дают значения  $10^{11}–10^{12}$  см<sup>-3</sup> при давлениях остаточного газа 0,1–1 мТорр. После проведения измерения параметров плазмы в указанном диапазоне давлений были выполнены предварительные эксперименты по генерации сильноточного пучка. Плазменный анод создавался вспомогательным пучком, эмитированным с термокатода, имеющего форму плоского зигзага с рабочей областью диаметром 3 см и током эмиссии по 1 А в обе стороны. При давлении остаточного газа 0,1 мТорр были зарегистрированы сильноточные пучки электронов с пиковым током от 0,6 до 2 кА при длительности импульсов от 0,2 до 0,6 мкс и ускоряющем напряжении 20 кВ.

**1.3. Генерация сильноточного электронного пучка.** Для увеличения плотности плазмы и скорости ее наработки был увеличен ток вспомогательного пучка. Плазменный анод создавался 300-эВ электронным пучком с током по 3 А в каждую сторону. Катод низковольтной электронной пушки располагался в центре камеры на ее оси примерно на равных расстояниях (100 мм) от коаксиального взрывоэмиссионного диода и от коллектора тока. Длительность импульса напряжения на низковольтной пушке составляла около 7 мкс. Напряжение зарядки ГИНа было неизменным и составляло 22 кВ, а давление остаточного газа в камере поддерживалось на уровне  $(1–2) \cdot 10^{-3}$  Торр.

На осциллограммах (рис. 2) показаны формы импульсов напряжения на низковольтной пушке при отключенном накале (кривая 4) и при наличии эмиссии с вольфрамового катода (кривая 3), снятые при развертке в 1 мкс на клетку. Амплитуда напряжения равна 250 В. Кривые 1 и 2 показывают соответственно общий ток эмиссии, достигающий величины в 6 А, и ток с амплитудой в 3 А, измеряемый коллектором. Зависимость напряжения на пушке имеет характерный спад с выходом на плато в 70 В после достижения уровня насыщения тока эмиссии.

На рис. 3 приведены осциллограммы, характеризующие работу всей низкоимпедансной системы в целом, начиная с момента срабатывания ГИНа, снятые на развертке 200 нс/клетку. Кривая 1 представляет собой сигнал с высоковольтного делителя ускоряющего напряжения взрывоэмиссионного коаксиального диода. Сигнал с амплитудой 5 В соответствует уровню 15 кВ ускоряющего напряжения. Кривая 2 — сигнал с шунта коллектора тока. Уровень сигналов в 2 В соответствует амплитуде тока в 4,44 кА. Из последних осциллограмм видно, что максимальный ток пучка в 11,5 кА, регистрируемый коллектором, соответствует ускоряющему напряжению на диоде не менее 18 кВ.

Длительность основной части тока составляет около 400 нс при общей длительности ускоряющего напряжения не менее 1,6 мкс. Ток на коллекторе появляется с задержкой около 80 нс после начала импульса ускоряющего напряжения диода (кривая 1), как только уровень последнего достигает значения 16–18 кВ. Из этого следует, что плазма,

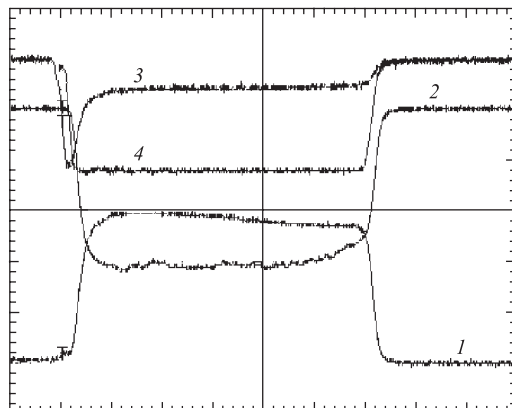


Рис. 2. Осциллограммы напряжения и тока вспомогательной пушки: 1 — общий ток эмиссии; 2 — ток, регистрируемый коллектором; 3 — поведение напряжения на пушке при включенном накале; 4 — поведение напряжения на пушке при отключенном накальном напряжении

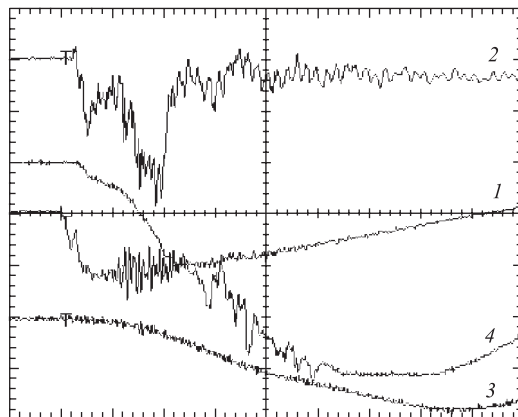


Рис. 3. Сигналы, регистрируемые при генерации сильноточного электронного пучка при наличии подготовленного плазменного анода. Развертка по времени 200 нс/клетку

сформированная заранее низковольтной электронной пушкой, не «закорачивает» высоковольтный диод, хотя ее проводимость достаточно велика (плотность плазмы составляет  $(2-4) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) и в ней формируется ускоряющий промежуток, в котором сосредотачивается все падение напряжения. Кривая 3 — сигнал общего тока ГИНа, регистрируемый поясом Роговского (ПР) на вводе в изолятор диода. Чувствительность ПР после интегрирования равна 0,5 В/кА. Максимум тока, регистрируемого ПР, соответствует минимуму ускоряющего напряжения на диоде и равен на данных осциллограммах 8 кА. Кривая 4 — проинтегрированный сигнал датчика азимутальной составляющей магнитного поля внутри камеры. Датчик расположен возле внутренней стенки камеры в области коллектора и регистрирует токи, текущие вдоль оси внутри камеры. Он выполнен в виде бескар-

касной соленоидальной катушки, помещенной в экран для предохранения от попадания частиц пучка и плазмы на его обмотку. Сигнал с датчика появляется одновременно с сигналом с коллектора (кривая 2).

**1.4. Краткое обсуждение результатов.** В данных экспериментах была показана возможность генерации сильноточных пучков электронов с энергией менее 20 кэВ во взрывоэмиссионном диоде с плазменным анодом. Получен пучок электронов с током 11,5 кА при длительности тока 400 нс и длительности импульса ускоряющего напряжения диода 1,6 мкс.

Полученные результаты следует рассматривать как предварительные, поскольку они должны быть подтверждены дополнительными измерениями. В первую очередь необходимо проведение одновременных измерений тока, регистрируемого коллектором, и рентгеновского излучения с коллектора, чтобы однозначно подтвердить получение пучка электронов с энергией, сравнимой с приложенным напряжением. Достигнутые значения тока пучка превышают предельный ток Альвена при данной энергии, что должно приводить к сильным поперечным колебаниям пучка либо его транспортировке за счет существенного изменения поперечной структуры (формирование трубчатого пучка), т. е. необходимы измерения энергетического спектра пучка и поперечных распределений тока, что представляет первостепенную важность при практическом применении, а также сопутствующих ВЧ-полей.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**2.1. Постановка задачи.** Формирование сильноточного пучка исследовалось на модели установки меньшего размера. В расчетах рассматривалась половина установки между сильноточным катодом и вспомогательным катодом. Диаметр сильноточного катода, так же как и диаметр камеры, был выбран в 2 раза меньшим. Считалось, что в начальный момент времени плазменный столб того же диаметра, что и сильноточный катод (1 см), полностью заполняет в продольном направлении пространство между сильноточным катодом и анодным электродом, который был размещен на месте вспомогательного катода.

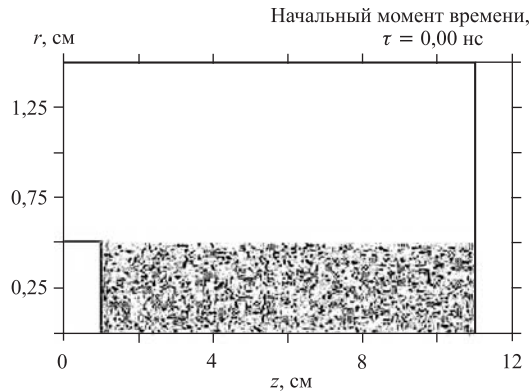


Рис. 4. Конфигурация системы в начальный момент времени

Плотность плазмы однородна в аксиальном и радиальном направлениях, начальная температура варьировалась в пределах 2–10 эВ. Приведенные ниже результаты получены для плотности плазмы  $3,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Напряжение, подаваемое на сильноточный катод, имело заданную форму: оно нарастало до 20 кВ за 10 нс и затем оставалось на постоянном уровне. С катодной и анодной поверхностей был разрешен выход электронов в плазму при наличии вытягивающего поля, превышающего заданное значение. Расчеты были проведены для водородной, азотной и ксеноновой плазмы при двух значениях внешнего магнитного поля: 500 Гс и 5 кГс, и для двух длин диода: 2 и 10 см. На рис. 4 показана конфигурация системы в начальный момент времени.

**2.2. Короткий диод.** Для оценки масштабов тока и влияния величины магнитного поля и состава плазмы на генерацию сильноточного пучка вначале были проведены расчеты для диода меньшего размера в аксиальном направлении (2 см вместо 10 см). На рис. 5, *а* показана динамика числа ионов (*i*) и электронов (*e*) плазмы и числа электронов пучка (*b*) в зависимости от времени для случая водородной плазмы и магнитного поля в 500 Гс. Соответствующие токи, поступающие на приосевую поверхность анода диаметром 1 см (коллектор), показаны на рис. 5, *б*.

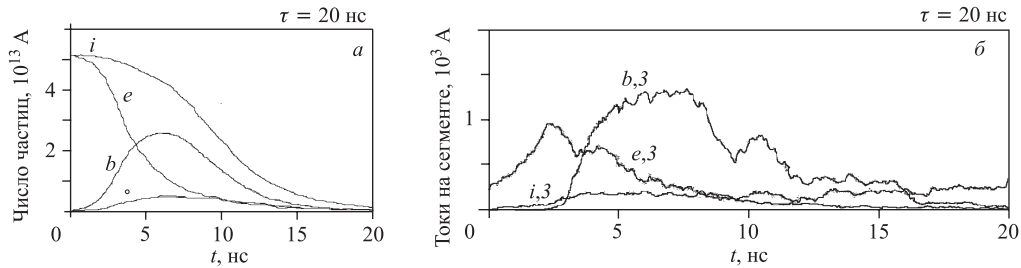


Рис. 5. Динамика числа частиц и токов для случая заполнения диода водородной плазмой

Максимальный ток пучка составляет 1,5 кА. Примерно такую же величину имеет пиковое значение тока плазменных электронов, хотя в данном случае нет смысла их разделять, поскольку энергетические спектры обеих компонент широки и перекрываются. Длительность импульса тока сильноточного пучка невелика из-за быстрого ухода легких ионов на электроды и уменьшения величины ускоряющего поля в расширяющемся ускоряющем промежутке. Увеличение магнитного поля до 5 кГс позволяет получить несколько больший ток с примерно той же длительностью импульса, поскольку продольное движение ионов в данном случае играет определяющую роль. Выбор более тяжелого газа (например азота) позволяет увеличить как длительность импульса, так и пиковый ток пучка.

**2.3. Длинный диод.** Длина плазменного столба в длинном диоде составляет 10 см. Результаты расчетов для водородной плазмы и магнитного поля 5 кГс показаны на рис. 6.

Поведение пучка существенно не отличается от случая короткого диода, за исключением длительности импульса тока. Она увеличивается в несколько раз, и, по крайней мере, до 100 нс величина тока пучка поддерживается на уровне 1 кА. Однако пиковый ток пучка остается на прежнем уровне. Основная причина состоит в том, что поле в ускоряющем промежутке поддерживается на невысоком уровне, а отток ионов на катод

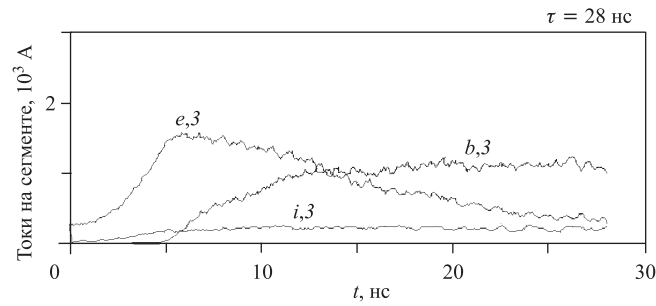


Рис. 6. Поведение токов, поступающих на коллектор, при заполнении длинного диода водородной плазмой

ведет к уменьшению плотности плазмы вблизи катода. Переход на более тяжелую плазму позволяет существенно увеличить как длительность, так и ток сильноточного пучка.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по гранту № 05-02-16442.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Озур Г. Е., Проскуровский Д. И.* Формирование субмикросекундных низкоэнергетичных сильноточных пучков в пушке с плазменным анодом // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. С. 413–423.
2. *Назаров Д. С., Озур Г. Е., Проскуровский Д. И.* Генерация низкоэнергетичных сильноточных электронных пучков в пушке с плазменным анодом // Изв. вузов. Сер. «Физика». 1994. № 3. С. 100–107.
3. *Озур Г. Е. и др.* Получение плотных электронных пучков в пушке с плазменным анодом на основе отражательного разряда // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. С. 42–47.
4. *Ozur G. E., Myagkov A. S., Proskurovsky D. I.* Transportation of a Low-Energy, High-Current Electron Beam in a Long Plasma Channel // Proc. of the 1st Intern. Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, Modification of Materials. Tomsk, 2000. V. 2. P. 115–118.
5. *Kreindel M. Yu. et al.* Formation and Transportation of a Microsecond High-Current Electron Beam in a Plasma-Anode Gun // Proc. of the 9th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. Washington, 1992. V. 2. P. 1111–1116.
6. *Ozur G. E. et al.* The Recent Results on Formation and Transportation of Low-Energy High-Current Electron Beams // Proc. of the 15th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. St. Petersburg, 2004. P. 115–118.
7. *Agafonov A. V., Krastelev E. G., Michalev P. S.* High-Current Non-relativistic Electron Beam Generation and Transport // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. 42: «Nuclear Physics Investigations». 1999. No. 3. P. 60–61.
8. *Агафонов А. В., Крестелев Е. Г., Михалев П. С.* Стенд для получения сильноточных нерелятивистских электронных пучков // Научная сессия МИФИ-99: Сб. МИФИ, 1999. Т. 4. С. 128–129.

9. Агафонов А. В., Крстелев Е. Г., Михалев П. С. Генерация высокопоточных нерелятивистских электронных пучков в диодах с протяженным плазменным анодом // Научная сессия МИФИ-2000: Сб. МИФИ, 2000. Т. 7. С. 197–180.
10. Agafonov A. V., Krastelev E. G., Michalev P. S. A High-Current Non-relativistic Electron Beam Generation in a Diode with Column-like Anode // Proc. of the 1st Intern. Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, Modification of Materials. Tomsk, 2000. V. 2. P. 118–120.
11. Agafonov A. V., Bogachenkov V. A., Krastelev E. G. High-Current Electron Beam Guiding by the Creation of Profiled Plasma Channel // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. 42: «Nuclear Physics Investigations». 2004. No. 1. P. 35–37.
12. Agafonov A. V., Bogachenkov V. A., Krastelev E. G. Low-Energy High-Current Electron Beam Generation and Guiding // Proc. of the 15th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. St. Petersburg, 2004. P. 143–146.