

## Исследование параметров электронного пучка плазмонаполненного диода

© А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Н.Н. Педин

Институт сильноточной электроники СО РАН.  
634055 Томск, Россия  
e-mail: andzh@oit.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 26 июня 2013 г.)

Исследованы свойства сильноточного релятивистского сфокусированного электронного пучка, формируемого в электронном источнике на основе плазмонаполненного диода и линейного импульсного трансформатора. Параметры пучка определены из измерений тормозного рентгеновского излучения и тока пучка, снимков диодного промежутка в оптическом диапазоне и анода в рентгеновском свете, автографов пучка. Получен пучок с током  $\approx 100$  кА, со средней энергией электронов свыше 0.7 MeV при амплитуде ускоряющего напряжения  $\approx 1$  MV. Диаметр генерируемого пучка  $\approx 1$  см. Электронный пучок плазмонаполненного диода позволяет реализовать высокую плотность мощности на аноде  $> 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> для целей возбуждения ударных волн и получения высоких давлений, а также генерации мощного рентгеновского излучения.

### Введение

Первые исследования диода с предварительным плазменным заполнением выполнены в 60-х годах прошлого века [1]. Отличительной особенностью такого диода является наличие фазы низкоомного разряда с сопротивлением много меньше волнового сопротивления питающего генератора, предшествующей высокоомной фазе. Нелинейные свойства сопротивления плазмонаполненного межэлектродного промежутка в дальнейшем были широко использованы для устранения высоковольтного предимпульса [2], уменьшения времени нарастания тока [3] и увеличения выходной мощности в генераторах с промежуточным индуктивным накоплением энергии [4–7].

Интерес к плазмонаполненному диоду с точки зрения формирования сильноточного электронного пучка обусловлен возможностью увеличения плотности тока при заданном напряжении в сравнении с вакуумным диодом [8]. Эксперименты на генераторе Gamble II с планарным диодом при отрицательной полярности центрального проводника [9] и с коаксиальным диодом со стержневым центральным электродом положительной полярности [10] подтверждают возможность увеличения плотности тока и как следствие мощности тормозного рентгеновского излучения. Схема построения генератора Gamble II основана на использовании промежуточной накопительной линии с жидким диэлектриком, которая обеспечивает малое время нарастание тока в низкоомной фазе диода  $\approx 50$  ns. При этом напряжение на диоде в высокоомной фазе 1–1.8 MV определяется зарядным напряжением линии.

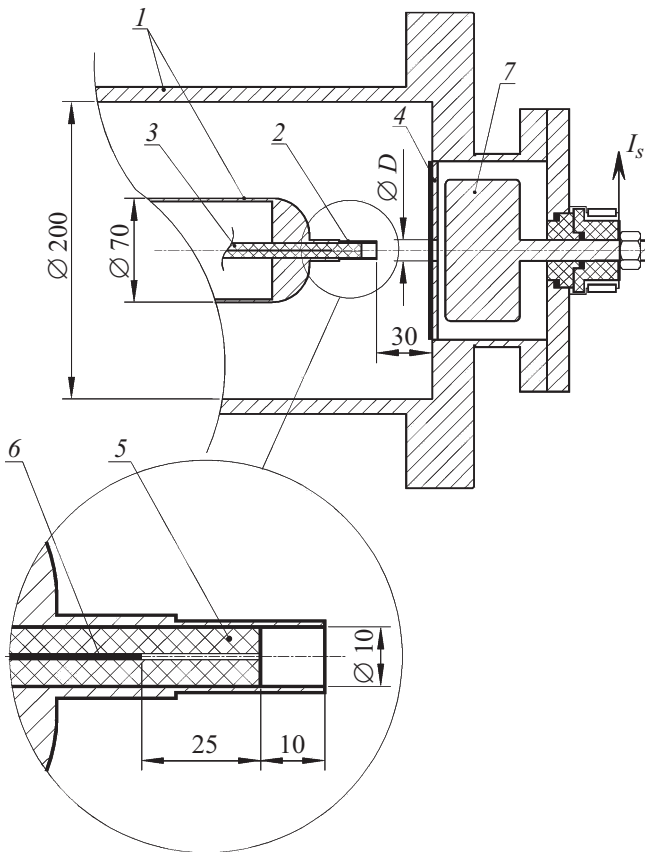
Применение техники линейных импульсных трансформаторов [11,12] позволяет исключить промежуточную линию с жидким диэлектриком и осуществить прямую запитку плазмонаполненного диода при длительности низкоомной фазы 100–150 ns. За счет совмещения

функций диода и прерывателя тока решается проблема согласования сопротивления диода с малым волновым сопротивлением трансформатора (как правило,  $< 10 \Omega$ ), а также может быть реализован режим увеличения выходного напряжения и мощности. В результате достигается существенное упрощение конструкции, снижение габаритов и стоимости электронного ускорителя. Данный подход апробирован в работе [13]. Плазмонаполненный диод с единичным плазменным каналом диаметром  $\sim 1$  см обеспечивал протекание тока в низкоомной стадии  $\approx 100$  кА с временем нарастания  $\approx 150$  ns. В высокоомной стадии формируется импульс напряжения с амплитудой  $\approx 1$  MV. В диоде рассеивается энергия  $\approx 5$  кДж с пиковой мощностью  $\approx 100$  GW. Использование плазмонаполненного диода позволило увеличить выходное напряжение и мощность линейного трансформатора в  $\approx 2.5$  раза в сравнении с режимом разряда на согласованную нагрузку. Дальнейшие эксперименты были направлены на исследование характеристик электронного пучка, формируемого в этом плазмонаполненном диоде. Результаты выполненных исследований представлены в настоящей работе.

### 1. Схема эксперимента

Исследования проводились на линейном импульсном трансформаторе с шестью последовательно включенными ступенями с воздушной изоляцией [14]. Параметры выходного импульса трансформатора при работе на согласованную нагрузку: амплитуда тока 110 кА, передний фронт 115 ns, амплитуда напряжения 370 кВ, пиковая мощность 40 GW.

Конфигурация плазмонаполненного диода показана на рис. 1. Источник плазмы 3 расположен на потенциальном центральном электроде вакуумного коаксиала линейного трансформатора 1. Инжекция плазмы осуществляется вдоль оси диода в направлении анода 4.



**Рис. 1.** Конструкция плазмонаполненного диода: 1 — передающая линия, 2 — катод, 3 — плазменная пушка, 4 — анод, 5 — изолятор плазменной пушки, 6 — центральный электрод плазменной пушки, 7 — коллектор для измерения тока пучка.

Такой вариант целесообразней с точки зрения практического использования генерируемого электронного пучка и позволяет сводить несколько сфокусированных пучков на общую мишень, наращивая удельную мощность энерговыделения на аноде. Плазма образуется в результате разряда в канале диэлектрика 5 между центральным электродом коаксиальной пушки 6 и катодом диода 2. Материал диэлектрика — силиконовая резина. Диаметр канала в диэлектрике 0,4 мм, длина канала 25 мм. Расстояние между катодом 2 и анодом диода 4 30 мм. За анодом расположен коллектор 7 для измерения тока пучка.

Плазменная пушка запитывается от генератора на основе конденсаторного блока емкостью 16 нФ [15]. Амплитуда тока через пушку и длительность первой полуволны составляе  $\approx 3.5 \text{ kA} \approx 700 \text{ ns}$ .

## 2. Электрические параметры плазмонаполненного диода

Включение трансформатора на плазмонаполненный диод демонстрирует рис. 2. В низкоомной стадии ток в диоде  $I_d$  нарастает до амплитудного значения  $\approx 100 \text{ kA}$

за время  $\approx 150 \text{ ns}$ . Переход в высокоомную стадию сопровождается резким ростом напряжения на диоде  $U_d$  свыше 1 MV и генерацией электронного пучка с пиковой мощностью  $\approx 100 \text{ GW}$ .

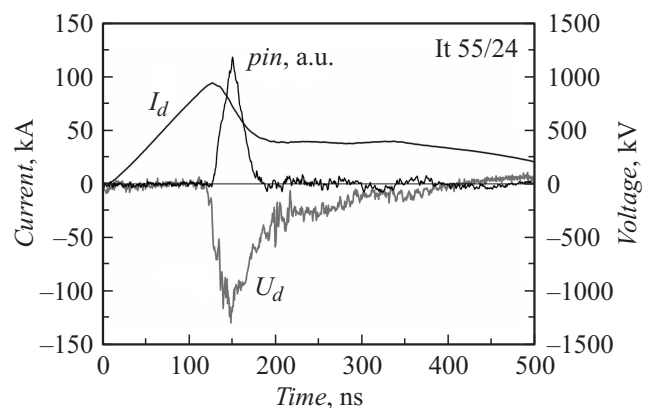
Ток в диоде более чем в 2 раза превышает ток Альфвена  $I_A = 17\beta\gamma < 45 \text{ kA}$ , где  $\gamma$  — релятивистский фактор,  $\beta$  — отношение продольной скорости электронов к скорости света. Эффективность распространения пучка с таким током и параметры пучка будут зависеть от условий зарядовой и токовой нейтрализации [16]. Оценочная концентрация электронов в пучке в высокоомной фазе:  $n_b = j/e\beta c \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , где  $j \sim 100 \text{ kA/cm}^2$  — плотность тока. Концентрация нашей плазмы  $n_i \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  достаточна для удовлетворения условия зарядовой нейтрализации  $f_e = n_i/n_b > 1/\gamma^2$ . Вопрос о токовой нейтрализации остается открытым.

## 3. Параметры электронного пучка

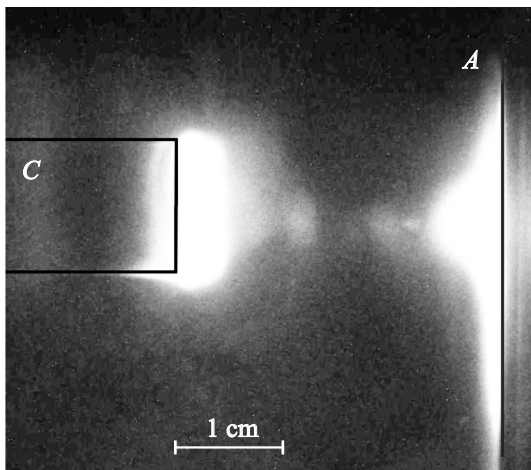
Информация о параметрах пучка получена из измерений тормозного рентгеновского излучения, измерений тока пучка, снимков диодного промежутка в оптическом диапазоне и анода в рентгеновском свете, а также автографов пучка на винипрозе.

На рис. 3 приведена фотография диодного промежутка в момент времени достижения напряжением амплитудного значения (150 ns после начала протекания тока в диоде). Снимок получен с помощью высокоскоростной цифровой камеры HSFC PRO с временем экспозиции 3 ns. В течении низкоомной фазы формируется плотная электродная плазма. При этом на аноде плазма интенсивнее образуется в приосевой области диаметром  $< 10 \text{ mm}$ . Поскольку яркость свечения электродной плазмы существенно выше инжектируемой плазмы, однозначно судить о месте формирования и структуре потенциального слоя в плазме нельзя. Согласно фотографии рис. 3, вероятное расположение слоя — центр межэлектродного промежутка.

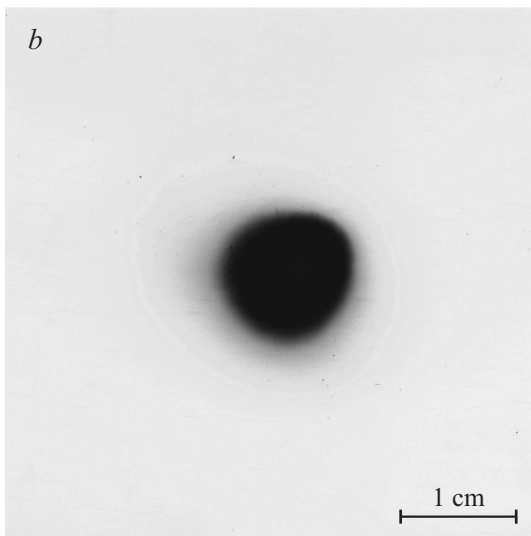
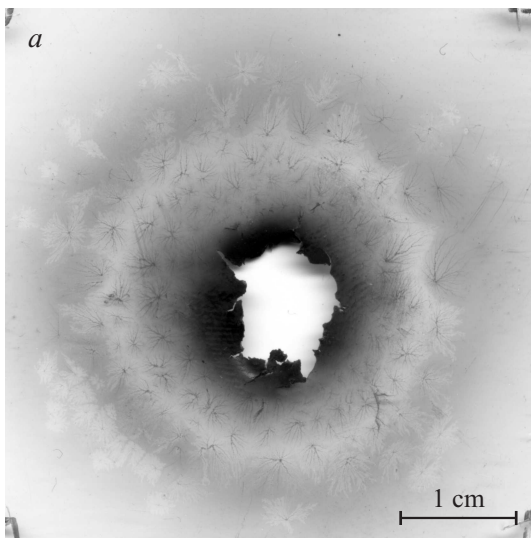
Выполнены измерения тормозного рентгеновского излучения. Измерения проводились на оси диода при



**Рис. 2.** Напряжение на диоде  $U_d$ , ток диода  $I_d$  и сигнал с детектора рентгеновского излучения.



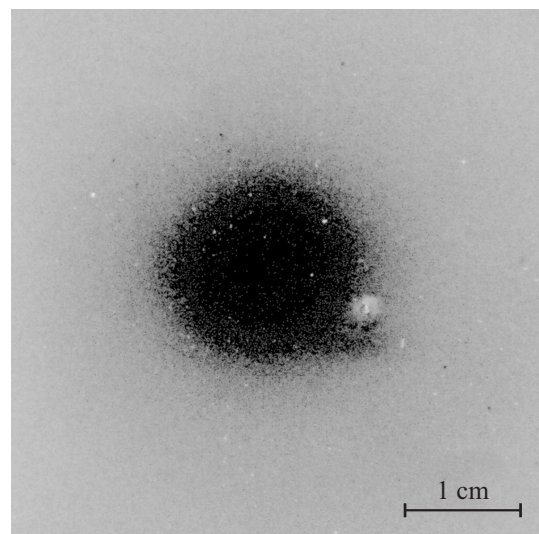
**Рис. 3.** Фотография диодного промежутка в момент максимума напряжения. *A* — анод, *C* — катод.



**Рис. 4.** Автограф пучка на винипрозе за фольгами из нержавеющей стали толщиной: *a* — 100 μm; *b* — 300 μm.

снятом коллекторе тока 7. На рис. 2 показан сигнал с полупроводникового детектора излучения. Сигнал повторяет по форме импульс генерируемого напряжения. На расстоянии 1 м за анодом из тантала толщиной 300 μm мощность излучения  $\approx 0.4 \cdot 10^8$  R/s. Доза излучения за импульс  $\approx 0.8$  R. Эмпирическое выражение для мощности излучения на расстоянии 1 м за мишенью из тантала [7]:  $D = 1.7 \cdot 10^6 IU^{2.65} \exp(-0.25 \sin(\theta)\gamma)$ , где  $U$  — энергия электронов пучка в MeV,  $I$  — ток пучка в кА,  $\theta$  — отклонение угла вхождения электронов в мишень от нормали. Измеряемая мощность соответствует средней энергии электронов пучка  $\approx 0.7$  MeV при  $\theta = 0^\circ$ . Очевидно, что  $\theta > 0^\circ$  и средняя энергия электронов выше.

О радиальных размерах и структуре электронного пучка можно судить по автографам на винипрозе, расположенном на аноде за металлической фольгой. На рис. 4 показаны автографы за фольгами из нержавеющей стали толщиной 100 (рис. 4, *a*) и 300 μm (рис. 4, *b*). Толщина фольг соответствует экстраполированному пробегу моноэнергетического пучка электронов с энергией  $\approx 300$  и  $\approx 700$  keV, соответственно. Автограф пучка за фольгой 100 μm имеет кольцевую структуру. Диаметр внешнего кольца  $\approx 35$  mm соответствует диаметру плазменного канала в области анода, формируемого до включения основного генератора. По центру область интенсивного потемнения и разрушения винипроза имеет диаметр  $< 15$  mm. За фольгой толщиной 300 μm диаметр автографа не превышает 10 mm. С помощью камеры Обскура получено изображение анода в рентгеновском свете (рис. 5). Камера располагалась за анодом из нержавеющей стали, толщиной 1 mm. Анод пропускает излучение с энергией  $> 100$  keV практически без ослабления. Максимальная интенсивность излучения реализуется в области с характерным диаметром  $< 15$  mm. Из полученных изображений следует, что в диоде реализуется сжатие пучка. Диаметр пучка более чем в 2 раза меньше



**Рис. 5.** Снимок анода в рентгеновском свете.

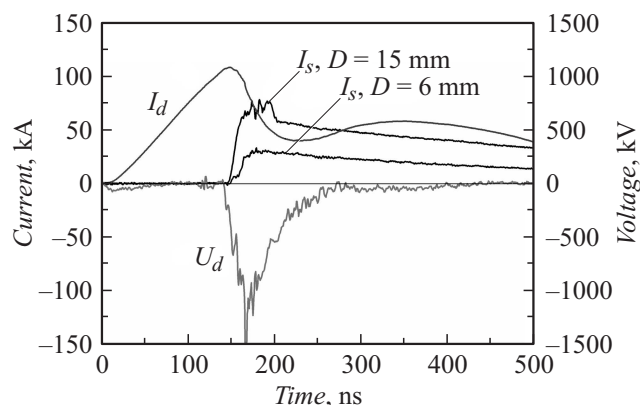


Рис. 6. Ток электронного пучка  $I_s$  за фольгой из нержавеющей стали толщиной  $100 \mu\text{m}$ .

диаметра предварительно инжектируемой плазмы в области анода. В генерируемом пучке высокоэнергетичные электроны (с энергией  $\geq 700 \text{ keV}$ ) находятся на диаметре  $< 10 \text{ mm}$ . Если принять, что внутри этой области замыкается основная часть тока, то оценочная средняя плотность мощности на аноде  $> 10^{10} \text{ W/cm}^2$ .

Измерен ток электронного пучка с помощью коллектора за фольгой из нержавеющей стали толщиной  $100 \mu\text{m}$  (рис. 1). За фольгой размещалась металлическая диафрагма толщиной  $1 \text{ mm}$ , по центру которой выполнено отверстие. Осциллограммы тока пучка при использовании диафрагм с отверстием диаметром  $15$  и  $6 \text{ mm}$  приведены на рис. 6. Мы вынуждены были делать зазор между коллектором и фольгой достаточно малым ( $\approx 1 \text{ mm}$ ), чтобы снять ограничение тока пучка пространственным зарядом. Поэтому через время порядка  $30 \text{ ns}$  после начала генерации пучка зазор между коллектором и фольгой выкорачивался. Тем не менее можно видеть, что весь ток пучка протекает на диаметре менее  $15 \text{ mm}$ . К моменту достижения напряжением амплитудного значения  $\approx 50\%$  тока пучка протекает внутри диаметра  $6 \text{ mm}$ . Выполненные измерения согласуются с данными автографов электронного пучка и также свидетельствуют о сжатии пучка в течение высокоомной фазы.

## Заключение

Плазмонаполненный диод является эффективным источником сильнооточного релятивистского сфокусированного электронного пучка со средней плотностью мощности на аноде  $> 10^{10} \text{ W/cm}^2$ .

По совокупности результатов исследований можно заключить, что в течение высокоомной фазы происходит сжатие пучка до диаметра  $\approx 1 \text{ cm}$ . Средняя энергия электронов пучка превышает  $0.7 \text{ MeV}$  при амплитуде ускоряющего напряжения  $\approx 1 \text{ MV}$ .

Электронный пучок плазмонаполненного диода может быть использован для реализации высоких плотностей энергии и мощности на аноде, возбуждения ударных

волн и получения высоких давлений, а также генерации мощного рентгеновского излучения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-08-00501-а.

## Список литературы

- [1] Суладзе К.В., Цхадая Б.А., Плюто А.А. // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 10. Вып. 6. С. 282–285.
- [2] Mendel C.W., Goldstein S.A. // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48. N 3. P. 1004–1006.
- [3] Stringfield R., Schneider R., Genuario R.D., Roth I., Childers K., Stallings C., Dakin D. // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. N 3. P. 1278–1284.
- [4] Meger R.A., Comisso R.J., Cooperstein G., Goldstein S.A. // Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 42. N 11. P. 943–945.
- [5] Weber B.V., Comisso R.J., Cooperstein G., Grossmann J.M., Hinshelwood D.D., Mosher D., Neri J.M., Ottinger P.F., Stephanakis S.J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1987. Vol. 15. N 6. P. 635–648.
- [6] Bugaev S.P., Volkov A.M., Iskol'dsky A.M., Kim A.A., Kovalchuk B.M., Kokshenev V.A., Mesyats G.A., Novikov A.A., Yakovlev V.P. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1990. Vol. 18. N 1. P. 115–118.
- [7] Weber B.V., Comisso R.J., Goodrich P.J., Grossmann J.M., Hinshelwood D.D., Ottinger P.F., Swanekamp S.B. // Phys. Plasmas. 1995. Vol. 2. N 10. P. 3893–3901.
- [8] Kormilitzin A.I., Diyankov V.S. // Proc. 11<sup>th</sup> IEEE Int. Pulsed Power Conf. Baltimore, 1997. P. 796–800.
- [9] Weber B.V., Hinshelwood D.D., Murphy D.P., Stephanakis S.J., Harper-Slaboszewicz V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. Vol. 32. N 5. P. 1998–2003.
- [10] Weber B.V., Comisso R.J., Cooperstein G., Hinshelwood D.D., Mosher D., Ottinger P.F., Ponce D.M., Schumer J.W., Stephanakis S.J., Strasburg S.D., Swanekamp S.B., Young F.C. // Phys. Plasmas. 2004. Vol. 11. N 5. P. 2916–2926.
- [11] Batrikov A.N., Vizir V.A., Volkov S.N., Durakov V.G., Efremov A.M., Zorin V.B., Kim A.A., Kovalchuk B.M., Kumpyak E.V., Loginov S.V., Sinebryukhov V.A., Tsou N.V., Chervyakov V.V., Yakovlev V.P., Mesyats G.A. // Laser. Part. Beams. 2003. Vol. 21. N 2. P. 295–299.
- [12] Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Zherlitsyn A.A., Kumpjak E.V., Tsoy N.V., Vizir V.A., Smorudov G.V. // Laser. Part. Beams. 2009. Vol. 27. N 3. P. 371–378.
- [13] Kovalchuk B.M., Zherlitsyn A.A., Pedin N.N. // Laser. Part. Beams. 2010. Vol. 28. N 4. P. 547–552.
- [14] Zherlitsyn A.A., Kovalchuk B.M., Smorudov G.V., Tsoy N.V., Vizir V.A., Zorin V.B. // Proc. 15<sup>th</sup> Int. Symp. High Current Electronics. Tomsk., 2008. P. 296–298.
- [15] Жерлицын А.А., Ковальчук Б.М., Смородов Г.В. // ПТЭ. 2009. № 6. С. 1–13.
- [16] Рудаков Л.И. Генерация и фокусировка сильнооточных релятивистских электронных пучков. М.: Атомиздат, 1990. С. 192–199.
- [17] Oliver B.V., Short D., Cooper G., McLean J., O'Malley J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. Vol. 33. N 2. P. 704–711.