

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 ≈ 100 кА, со средней энергией электронов свыше 0.7 MeV при амплитуде ускоряющего напряжения ≈ 1 MV. Диаметр генерируемого пучка ≈ 1 см. Электронный пучок плазмонаполненного диода позволяет реализовать высокую плотность мощности на аноде $> 10^{10}$ W/cm² 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 ≈ 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 ~ 1 см обеспечивал протекание тока в низкоомной стадии ≈ 100 кА с временем нарастания ≈ 150 ns. В высокоомной стадии формируется импульс напряжения с амплитудой ≈ 1 MV. В диоде рассеивается энергия ≈ 5 кДж с пиковой мощностью ≈ 100 GW. Использование плазмонаполненного диода позволило увеличить выходное напряжение и мощность линейного трансформатора в ≈ 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.

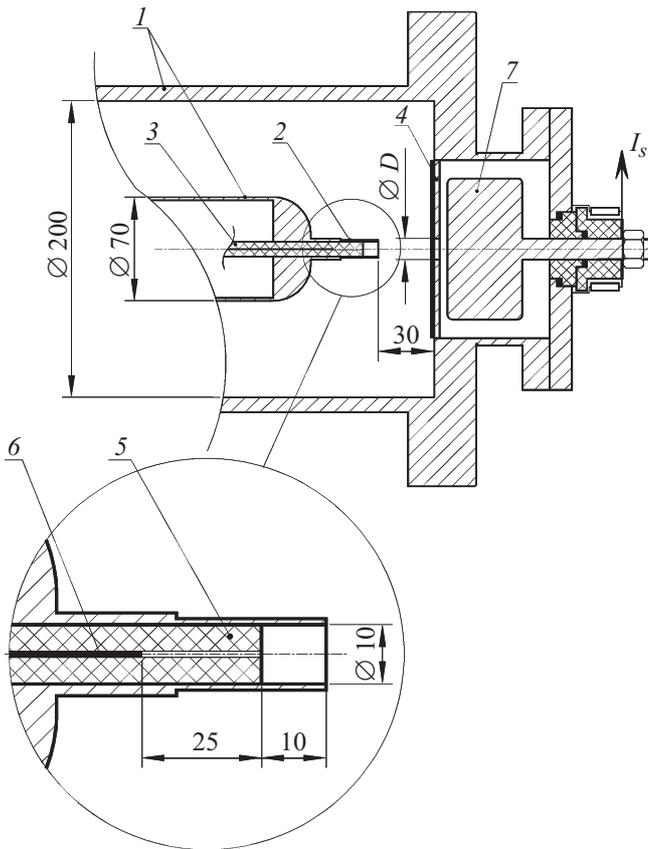


Рис. 1. Конструкция плазмонаполненного диода: 1 — передающая линия, 2 — катод, 3 — плазменная пушка, 4 — анод, 5 — изолятор плазменной пушки, 6 — центральный электрод плазменной пушки, 7 — коллектор для измерения тока пучка.

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 γ — релятивистский фактор, β — 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

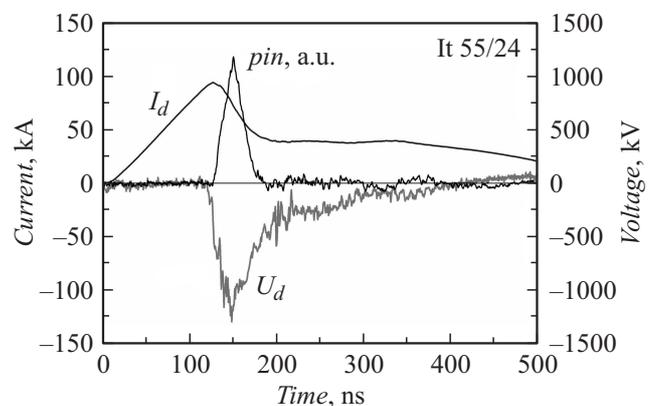


Рис. 2. Напряжение на диоде U_d , ток диода I_d и сигнал с детектора рентгеновского излучения.

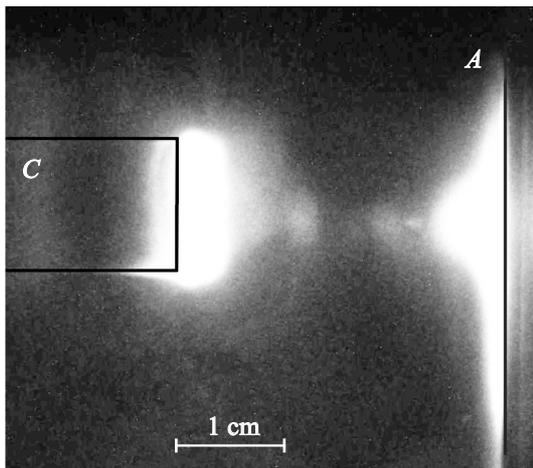


Рис. 3. Фотография диодного промежутка в момент максимума напряжения. *A* — анод, *C* — катод.

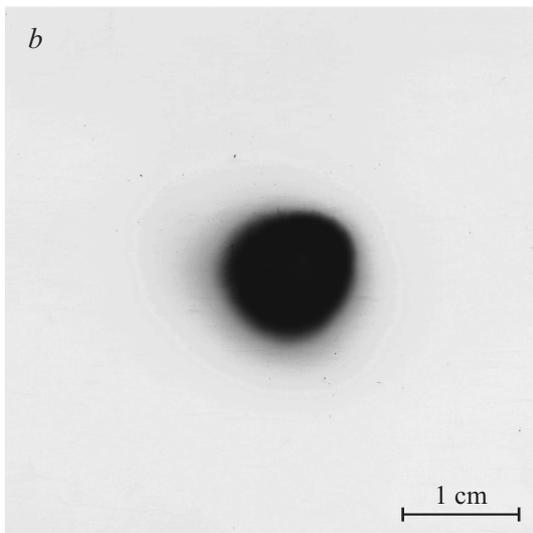
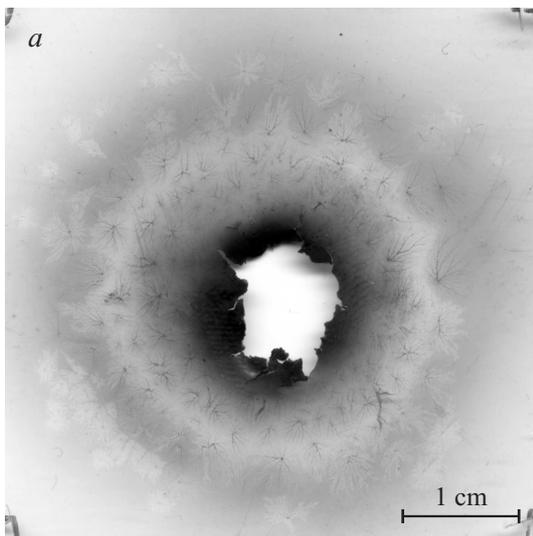


Рис. 4. Автограф пучка на винипрозе за фольгами из нержавеющей стали толщиной: *a* — 100 μm; *b* — 300 μm.

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 ≈ 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 kA, θ — отклонение угла вхождения электронов в мишень от нормали. Измеряемая мощность соответствует средней энергии электронов пучка ≈ 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 ≈ 300 и ≈ 700 keV, соответственно. Автограф пучка за фольгой 100 μm имеет кольцевую структуру. Диаметр внешнего кольца ≈ 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

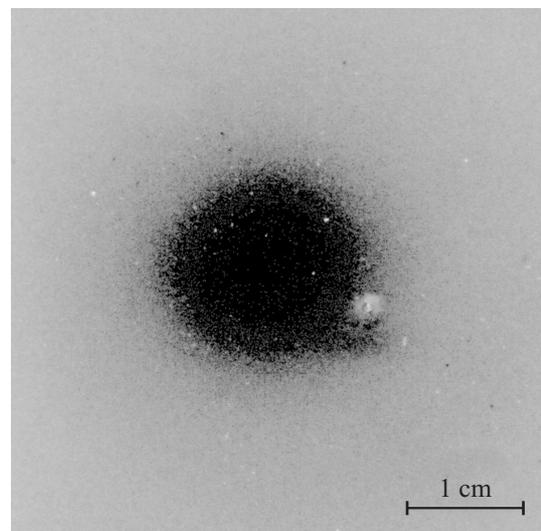


Рис. 5. Снимок анода в рентгеновском свете.

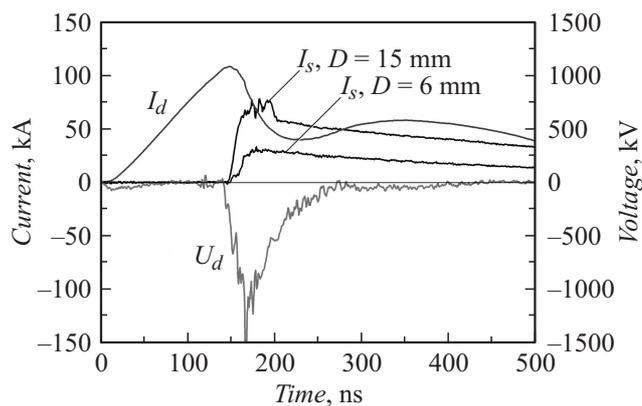


Рис. 6. Ток электронного пучка I_s за фольгой из нержавеющей стали толщиной $100 \mu\text{m}$.

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 mm , по центру которой выполнено отверстие. Осциллограммы тока пучка при использовании диафрагм с отверстием диаметром 15 и 6 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 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 mm . К моменту достижения напряжением амплитудного значения $\approx 50\%$ тока пучка протекает внутри диаметра 6 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 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. 11th 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. 15th 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.