

04;12

## Генерация мощных импульсов жесткого рентгеновского излучения в стержневом пинч-диоде с радиальной фольгой

© С.А. Сорокин

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

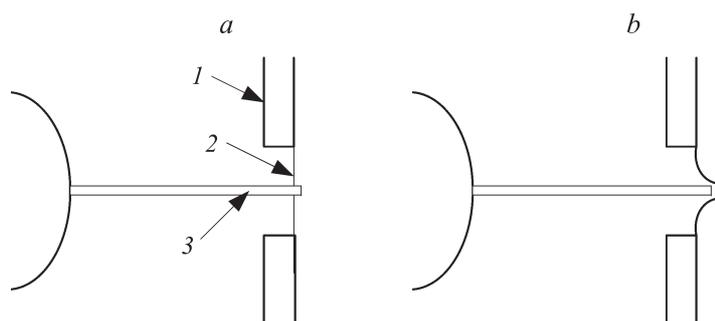
E-mail: s.sorokin@rambler.ru

Поступило в Редакцию 21 марта 2014 г.

Предложен и апробирован способ формирования низкоимпедансного стержневого пинч-диода. В рассматриваемом подходе стержневой пинч-диод предварительно закорочен тонкой радиальной фольгой. Низкоимпедансный диод формируется при отрыве ускоряемой током сильноточного генератора фольги от анодного стержня. Показано, что в такой конфигурации в результате ряда последовательных замыканий тока плазмой фольги и стержня может быть получен цуг коротких импульсов жесткого рентгеновского излучения.

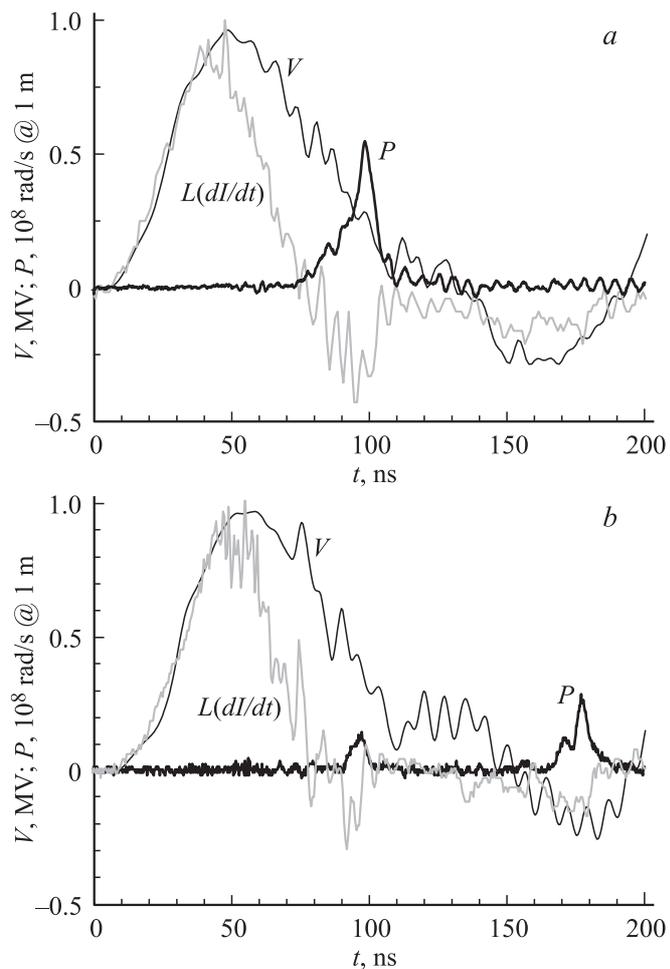
Фокусировка электронов на мишень в низкоимпедансном плазмонаполненном стержневом пинч-диоде (ПНСП) позволяет получать высокие плотности мощности ( $\sim 100 \text{ TW/cm}^2$ ) электронного пучка, а также плотности выделенной в материале анода энергии ( $> 10 \text{ MJ/cm}^3$ ) [1–5]. Благодаря потенциально высоким по сравнению с вакуумными диодами удельным параметрам низкоимпедансные стержневые пинч-диоды представляют практический интерес как инструмент для импульсной рентгеновской радиографии. Кроме того, в связи с высокой плотностью энергии электронного пучка, формируемого в плазмонаполненном стержневом пинч-диоде, такое устройство может быть использовано для генерации сгустков плазмы с высокой плотностью энергии. В данной работе предложен и апробирован другой способ формирования низкоимпедансного стержневого пинч-диода. В рассматриваемом подходе стержневой пинч-диод предварительно закорочен тонкой радиальной фольгой (рис. 1, *a*). Фольга ускоряется магнитным полем исходно в направлении кончика анодного стержня, а затем и радиального стержня.

Низкоимпедансный диод формируется при отрыве плазмы материала фольги от стержня (рис. 1, *b*). При скорости плазмы фольги в момент отрыва  $(1-3) \cdot 10^6 \text{ cm/s}$  ее движение (от стержня) в той или иной



**Рис. 1.** Иллюстрация последовательности событий в исходно закороченном фольгой стержневом пинч-диоде, ведущих к формированию интенсивного электронного потока на кончик анода: 1 — катодный диск, 2 — радиальная фольга, 3 — анодный стержень. Начальное положение фольги (а) и выход плазмы фольги за анодный кончик и формирование вакуумного зазора (интенсивного электронного пучка) (b).

степени компенсирует разлет плотной плазмы с поверхности стержня, предотвращая или замедляя процесс замыкания вакуумного зазора. Эксперименты с закороченным фольгой стержневым пинч-диодом проведены на сильноточном генераторе МИГ [6]. Генератор МИГ имеет волновой импеданс  $0.65 \Omega$ , а длительность импульса и напряжение в бегущей волне соответственно  $80 \text{ ns}$  и  $1 \text{ MV}$ . Индуктивность области проходного (вода–вакуум) изолятора, магнитоизолированной вакуумной передающей линии и нагрузочной области составляет около  $30 \text{ nH}$ . В начальной стадии импульса генератора, пока диод замкнут фольгой, энергия накапливается в индуктивной нагрузке. Это позволяет укоротить длительность импульса напряжения на диоде. Массовая толщина фольги и расстояние от фольги до кончика анодного стержня выбирались так, чтобы они обеспечивали существенную ( $50\text{--}90 \text{ ns}$ ) временную задержку от начала импульса генератора до момента формирования диода. Мощность дозы рентгеновского излучения измерялась кремниевыми  $p\text{--}i\text{--}n$ -диодами СКД1 и СППД3, а интегральная за импульс доза — LiF термолюминесцентным дозиметром (ТЛД). Излучение регистрировалось за алюминиевым окном вакуумной камеры толщиной  $5 \text{ mm}$ . Напряжение у проходного изолятора вода–вакуум измерялось резистивным и емкостным делителями напряжения. Для измерения тока и индуктивной составляющей напряжения ( $L(di/dt)$ )



**Рис. 2.** Напряжение у проходного изолятора  $V$ , его индуктивная составляющая  $L(dI/dt)$  и мощность дозы рентгеновского излучения  $P$  для 3 выстрелов с исходными конфигурациями, показанными на рис. 3.

у проходного изолятора применялись пояс Роговского и магнитные зонды. Интегральное по времени изображение источника излучения регистрировалось камерой-обскурой (для квантов с энергией  $> 20$  keV).

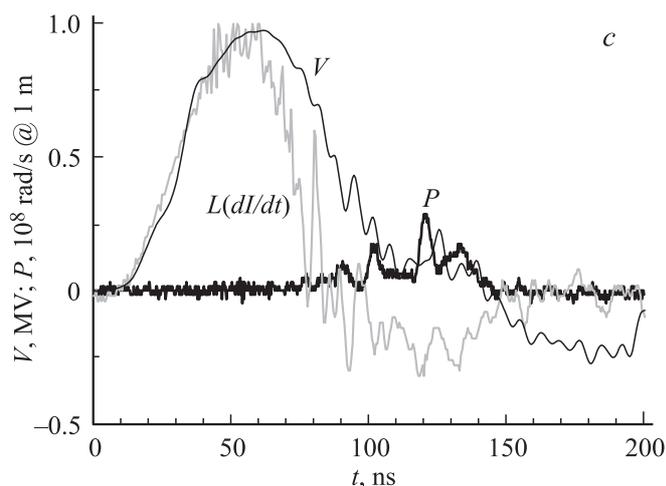


Рис. 2 (продолжение).

В обсуждаемой в этой статье серии выстрелов в качестве анода использовался вольфрамовый стержень диаметром 1 мм. Ниже представлены результаты для 3 выстрелов, в которых, в зависимости от толщины и исходного положения фольги, реализуются существенно отличающиеся сценарии последовательности событий в диоде. На рис. 2 представлены напряжение у проходного изолятора  $V$ , его индуктивная составляющая  $L(dI/dt)$  и мощность дозы рентгеновского излучения  $P$ , а

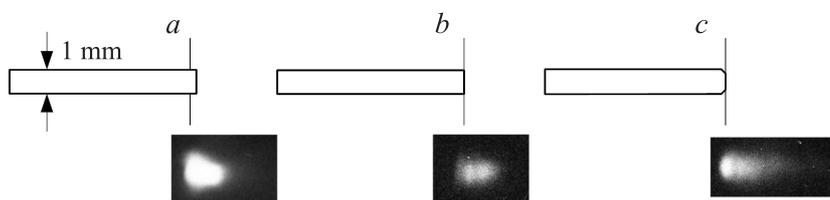


Рис. 3. Положение фольги относительно стержневого анода и изображение, полученное в радиальном направлении с помощью камеры-обскуры для 3 выстрелов, обсуждаемых в тексте статьи. Положения профиля стержня и обскурограммы в направлении вдоль оси диода совмещены.

на рис. 3 показаны положение фольги относительно стержневого анода и изображение, полученное в радиальном направлении с помощью камеры-обскуры. Индекс  $a$  на рис. 2 и 3 соответствует выстрелу с алюминиевой фольгой толщиной  $15\ \mu\text{m}$  (назовем его выстрел 1). В фольге имеется отверстие диаметром  $1\ \text{mm}$ . В исходном положении стержень входит в фольгу на  $0.2\ \text{mm}$ . Индекс  $b$  соответствует выстрелу также с алюминиевой фольгой толщиной  $15\ \mu\text{m}$  (выстрел 2). Исходно фольга плотно прижата к торцу стержня. Индекс  $c$  соответствует выстрелу с алюминиевой фольгой толщиной  $7.5\ \mu\text{m}$  (выстрел 3). Фольга плотно прижата к торцу стержня. На стержне сделана факса, так что диаметр стержня в месте контакте с фольгой составляет  $0.7\ \text{mm}$ . Разность  $V - L(dI/dt)$  есть напряжение на активной нагрузке. Активный импеданс включает импеданс диода и импеданс  $dL/dt$ , связанный с движением токового слоя. На рис. 2,  $a$  видно, что в начале импульса тока диод коротко замкнут фольгой и напряжение у проходного изолятора имеет только индуктивную составляющую. С началом движения плазмы фольги (около  $50\ \text{ns}$ ) индуктивное напряжение становится меньше полного напряжения. В этот период времени излучение отсутствует, т.е. вакуумный зазор между плазмой фольги и стержнем еще не сформировался. Значительная величина импеданса  $dL/dt$  ( $0.2\text{--}0.3\ \Omega$ ) в это время (до  $75\ \text{ns}$ ) может быть объяснена движением плазмы фольги, наиболее интенсивно ускоряемой в прианодной области. Расширение и соответствующее разрежение этой плазмы приводит к формированию вакуумного зазора и интенсивного электронного пучка (около  $75\ \text{ns}$ ). Как только напряжение на зазоре становится достаточно высоким (ток диода достигает критической величины), эмитированные с катода электроны сметаются магнитным полем и фокусируются на кончик анодного стержня. В это время ток в нагрузке составляет около  $1.7\ \text{MA}$ . Если предположить, что основная часть тока переносится электронным пучком, то плотность тока на анодный кончик достигает  $40\text{--}80\ \text{MA/cm}^2$ . Под действием интенсивного электронного пучка материал анода взрывается, и плазма анода расширяется в образовавшийся зазор. Конкуренция процессов затекания в зазор анодной и катодной плазмы и ее сметания магнитным полем приводят к последовательным перезаключениям зазора, о чем свидетельствует последовательность пиков на сигналах магнитного зонда и  $p-i-n$ -диода с  $75$  по  $110\ \text{ns}$ . Слабая выраженность первых 3 всплесков на сигнале  $p-i-n$ -диода, скорее всего, связана с его конечным временным разрешением (около  $3\ \text{ns}$ ), так как временной интервал между пиками

в этом выстреле составляет 5 ns. Во время наиболее мощного пика излучения около 100 ns напряжение на диоде достигает 0.7 MV, что соответствует импедансу диода около 0.4  $\Omega$ . На рентгеновском изображении видно, что плотная плазма с анодного кончика движется в основном в аксиальном направлении. Ее радиальное расширение, по-видимому, сдерживается азимутальным магнитным полем. Средняя скорость аксиального движения плотной плазмы составляет около  $5 \cdot 10^6$  cm/s, так как за время импульса излучения (около 30 ns) плазма пролетает около 1.5 mm. В выстреле 2 с фольгой толщиной 15  $\mu$ m после первого, сравнительно слабоинтенсивного, импульса излучения (рис. 2, *b*) диод закорачивается на довольно продолжительное время. Второй (сдвоенный) более интенсивный импульс излучения следует только через 80 ns. На рентгеновском изображении (рис. 3, *b*) наблюдается 2 обособленных излучающих сгустка. Более удаленный от стержня сгусток генерируется во время первого, а излучает во время второго импульса. В выстреле 3 наблюдается цуг из 4 (или более) импульсов с интервалом 12–18 ns. Длительность отдельных импульсов составляет около 5 ns, а общая длительность цуга импульсов — около 50 ns. Присутствуют также 2 относительно слабых импульса излучения, предшествующие 4 основным. Несмотря на то что уровень сигнала *p-i-n*-диола для этих импульсов находится на уровне „шума“, об их присутствии свидетельствуют и соответствующие выбросы на сигналах магнитного зонда и делителя напряжения, а также слабоинтенсивное излучение в головной части плазменного сгустка (рис. 3, *c*).

Анализ результатов для 3 рассматриваемых выстрелов показывает, что в конфигурации стержневого пинч-диола с радиальной фольгой может быть получен цуг коротких последовательных импульсов жесткого рентгеновского излучения. Количество импульсов и временной интервал между ними определяются толщиной и исходным положением фольги относительно стержня. Отметим, что, несмотря на значительный аксиальный разлет плазмы за время следования импульсов, эффективный размер источника излучения при его наблюдении в приосевом направлении практически не изменяется и остается близок к диаметру анодного стержня. Это обстоятельство, а также короткая длительность (около 5 ns) генерируемых импульсов излучения важны с точки зрения радиографических применений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 13-08-98040.

## Список литературы

- [1] *Weber B.V., Comisso R.J., Cooperstein G. et al. // Phys. Plasmas. 2004. V. 11. N 5. P. 2916–2927.*
- [2] *Weber B.V., Allen R.J., Comisso R.J. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. N 2. P. 443–455.*
- [3] *Сорокин С.А. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 8. С. 68–74. (Sorokin S.A. // Tech. Phys. Lett. 2010. V. 36. N 4. P. 379–381.)*
- [4] *Сорокин С.А. // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 7. С. 57–62. (Sorokin S.A. // Technical Physics. 2011. V. 56. N 7. P. 957–962.)*
- [5] *Sorokin S.A. // Radiography: Methods, Theory and Applications. New York: Nova Science Publishers, 2012. P. 143.*
- [6] *Кабламбаев Б.А., Лучинский А.В., Петин В.К., Ратахин Н.А., Сорокин С.А., Федущак В.Ф., Чайковский С.А., Шляхтун С.В. // Вопросы атомной науки и техники. 2001. В. 3–4. С. 149. (Kablambaev B.A., Luchinskii A.V., Petin V.K., Ratakhin N.A., Sorokin S.A., Fedushchak V.F., Chaikovskii S.A., Shlyakhtun S.V. // Vopr. At. Nauki Tekhn. 2001. N 3–4. P. 149.)*