

04;10

## Радиографический источник излучения на основе плазмонаполненного стержневого пинч-диода

© С.А. Сорокин

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск  
E-mail: s.sorokin@rambler.ru

Поступило в Редакцию 23 ноября 2009 г.

Представлены результаты экспериментов на сильноточном генераторе МИГ (максимальное напряжение 1.3 MV, импеданс 0.65  $\Omega$ ) по формированию мощного сфокусированного электронного пучка в плазмонаполненном стержневом пинч-диоде. При использовании в качестве анода плазмонаполненного диода заточенного вольфрамового стержня диаметром 1.5 mm получен источник рентгеновского излучения размером около 1 mm и дозой в 1 метре от источника 2.4 rad за импульс. Проведены сравнительные выстрелы с инжекцией и без инжекции плазмы в диод.

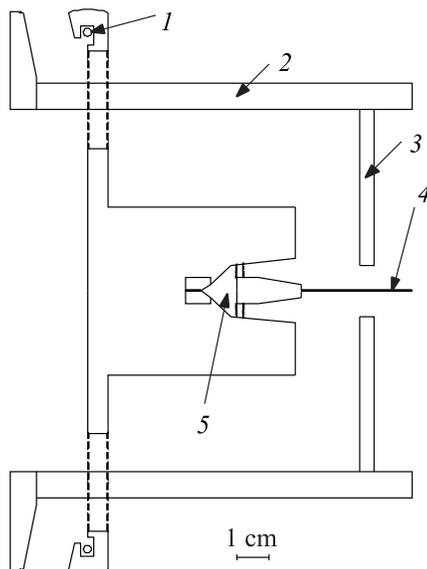
Мощные высоковольтные рентгеновские источники миллиметрового размера находят применение в радиографии взрывных гидродинамических процессов. Рентгеновское (и гамма) излучение генерируется при торможении импульсных релятивистских электронных пучков в веществе с большим атомным номером. Для исследования динамических радиографических объектов с различной массовой толщиной и скоростью движения требуется создание рентгеновских источников с широким набором параметров. К основным параметрам, характеризующим источник излучения, относятся: спектр излучения (определяет проникающую способность); доза излучения (определяет уровень сигнала на приемнике); длительность импульса и размер источника излучения (определяют временное и пространственное разрешение). Для фокусировки интенсивного потока электронов на излучающую мишень (получения источника излучения высокой яркости) применяют диоды нескольких конфигураций: пинч-диоды (self-pinch diode), стержневые пинч-диоды (rod-pinch diode), параксиальные диоды (paraxial diode) и

диоды с магнитной изоляцией (magnetically immersed diode). Принцип работы этих диодов рассмотрен, например, в обзорном докладе [1].

При энергии электронов менее 4 MeV несомненными преимуществами обладает конфигурация стержневого пинч-диода (СП-диод). В этой конфигурации размер и положение (фиксированное в пространстве) источника излучения определяются размером и положением кончика стержневого анода. Размер (диаметр) стержня определяется главным образом длиной экстраполированного пробега электронов (энергией электронов) и может быть меньше 2 mm при энергии электронов менее 4 MeV. Однако характерный импеданс вакуумных СП-диодов составляет 40–50  $\Omega$ , что при заданном (например, требуемым спектром излучения) напряжении на диоде существенно ограничивает ток электронного пучка и, следовательно, мощность дозы источника излучения. Высокий импеданс СП-диодов также ограничивает возможности использования в качестве их драйвера низкоимпедансных ( $\sim 1 \Omega$ ) сильноточных генераторов, разработанных и широко применяемых в экспериментах с Z-пинчами. Значительное снижение импеданса СП-диода может быть реализовано в его плазмонаполненной версии [2–4]. Так в работе [3] по мере увеличения плотности инжектированной плазмы импеданс плазмонаполненного стержневого пинч-диода (ПНСП-диода) во время максимума излучения изменялся от 7 до 0.6  $\Omega$ , что, в принципе, позволяет реализовать хорошее согласование с генератором Gamble II (2  $\Omega$ ).

В настоящей работе представлены эксперименты с ПНСП-диодом на сильноточном генераторе МИГ (максимальное напряжение 1.3 MV, импеданс 0.65  $\Omega$ ) [5]. Так как внутренние электроды водяных линий генератора МИГ заряжаются отрицательно, то для обеспечения вывода излучения из вакуумной камеры в приосевом направлении осуществлялось инвертирование положений катода и анода с помощью устройства „конволют“. Высоковольтный катод выносится за анод с помощью 6 стержней и отверстий в анодном диске вакуумной передающей линии, как показано на рис. 1.

Плазма создается с помощью капиллярного разряда и поступает в межэлектродный зазор через сопло кольцевого сечения. Отверстие капилляра диаметром 1 mm сделано в тefлоновой втулке. На выходе капилляра имеется конусное расширение. Схема питания плазменной пушки содержит конденсатор ИК40-5 ( $C = 5 \mu\text{F}$ ,  $V$  до 40 kV) и управляемый высоковольтный разрядник, соединенные с пушкой кабелем РК75-



**Рис. 1.** Схема эксперимента с ПНСП-диодом: 1 — магнитный зонд; 2 — стержни „конволюта“; 3 — катодный диск; 4 — анодный стержень; 5 — плазменная пушка.

9 длиной 10 м. Полупериод тока в разрядном контуре составляет около  $16 \mu\text{s}$ . Погонная масса инжектированной в межэлектродный зазор плазменной оболочки определяется зарядным напряжением конденсатора и задержкой запуска генератора относительно момента срабатывания плазменной пушки. Генератор запускается в тот момент времени, когда область между соплом (анодом) и катодным диском заполняется относительно плотной плазмой, а области кончика анодного стержня достигает лишь передний низкоплотный фронт плазменного потока.

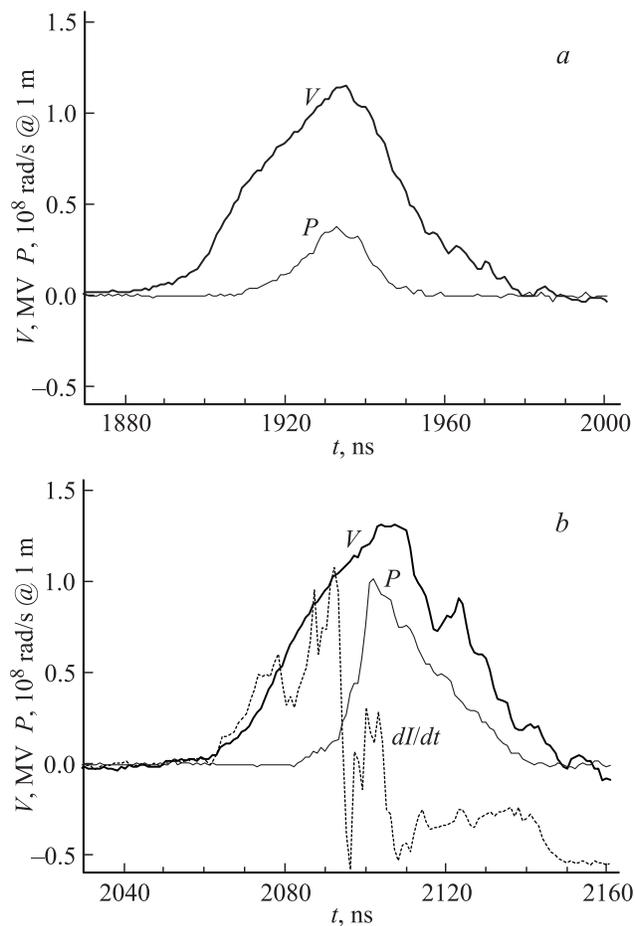
В начальной стадии разряда нагрузкой генератора, по сути, является плазменный лайнер (Z-пинч). Ток протекает от сопла к катодному диску по внешней границе плазменной струи, сгребая ее к оси. При этом происходит накопление магнитной энергии в индуктивном контуре. По мере выхода плазменной оболочки на ось (анодный стержень) начинается процесс аксиального движения токового слоя. Так как давление

магнитного поля обратно пропорционально квадрату радиуса, то этот процесс сопровождается отгеснением плазмы от анодного стержня в радиальном направлении и (как ожидается) завершается быстрым ростом импеданса (формированием диода) при выходе токового слоя на кончик анодного стержня.

С водяной стороны проходного „вода–вакуум“ изолятора установлен резистивный делитель напряжения. Для измерения тока применялись магнитные зонды. Мощность дозы рентгеновского излучения измерялась кремниевым  $p-i-n$ -диодом, а интегральная за импульс доза — LiF термолюминесцентным дозиметром (ТЛД). Измерения производились на оси диода в 1 метре от него. Для получения изображения источника излучения в собственных лучах применялась камера-обскура. Линия наблюдения камеры была направлена радиально на кончик анодного стержня. В качестве стержневого анода использовались вольфрамовый провод (диаметр 0.7 и 1.5 mm) и медный провод (диаметр 1.5 mm). Кончик стержней диаметром 1.5 mm затачивался на конус на длине 3–4 mm. Внутренний диаметр катодного диска — 16 mm. Проводились сравнительные выстрелы с инъекцией и без инъекции плазмы.

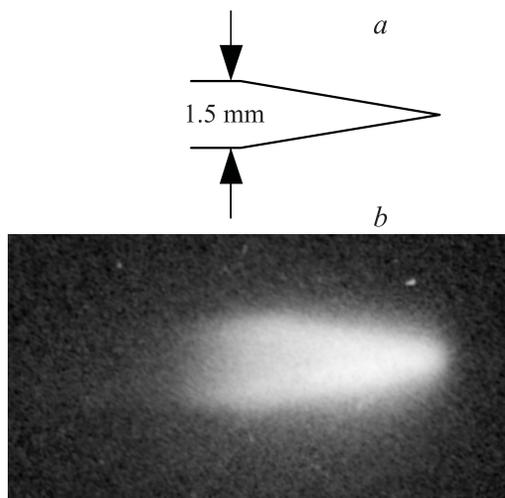
На рис. 2, *a* показаны осциллограммы активного делителя и  $p-i-n$ -диода для выстрела без инжестированной плазмы (анодный стержень — вольфрам диаметром 1.5 mm). В таких выстрелах измеренная мощность дозы соответствует напряжению  $V$  у проходного изолятора согласно скейлингу зависимости выхода излучения от напряжения на диоде (см., например, [6]) и величине критического тока для вакуумного стержневого пинч-диода [6]. Пиковая мощность дозы составляет около  $4 \cdot 10^7$  rad/s @ 1 m. Интегральная за импульс доза — 0.6 rad. На обскур-грамме наблюдается однородное излучение с конусной части анодного окончания (около 3 mm) с последующим по мере удаления от окончания затуханием излучения на длине 3–4 mm.

На рис. 2, *b* показаны осциллограммы активного делителя, магнитного зонда и  $p-i-n$ -диода для выстрела с инжестированной плазмой (анодный стержень — вольфрам диаметром 1.5 mm). Видно, что первые 35 ns сигнал магнитного зонда соответствует сигналу напряжения у изолятора, т.е. диод коротко замкнут плазмой. Излучение (сигнал с  $p-i-n$ -диода) в это время отсутствует. Затем происходят быстрая смена полярности сигнала магнитного зонда и рост сигнала  $p-i-n$ -диода. Разумно предположить, что к этому моменту происходит сгребание



**Рис. 2.** Осциллограммы активного делителя напряжения ( $V$ ), магнитного зонда ( $dI/dt$ ) и  $p-i-n$ -диода для выстрелов:  $a$  — без инжектированной плазмы и  $b$  — с инжектированной плазмой (анодный стержень — вольфрам диаметром 1.5 mm).

инжектированной плазмы (в режиме „снежного плуга“) к анодному окончанию и образование около него вакуумного зазора (диода). Пиковая мощность дозы составляет  $1 \cdot 10^8$  rad/s @ 1 m. Интегральная



**Рис. 3.** Профиль анодного стержня (*a*) и обскурограмма (*b*) для выстрела с ПНСП-диодом. Диаметр вольфрамового стержня 1.5 mm. Положения профиля стержня и обскурограммы в направлении вдоль оси диода совмещены.

за импульс доза — 2.4 rad. Таким образом, наблюдается 4-кратное увеличение дозы по сравнению с вакуумным режимом работы диода. На обскурограмме (рис. 3) наблюдается интенсивное излучение с самого кончика анода. С учетом конечного разрешения камеры-обскуры эффективный размер источника излучения (в направлении находящегося на оси диода приемника излучения) составляет около 1 mm. Заметим, что в этой серии выстрелов магнитный зонд был расположен в непосредственной близости от области „конволюта“ и источника излучения, поэтому его сигнал содержит артефакты и может быть использован лишь для качественного анализа процессов. В связи с этим восстановление напряжения на диоде по сигналу активного делителя напряжения с учетом индуктивной составляющей здесь не проводится. Проводилось исследование зависимости мощности дозы и дозы излучения от задержки между моментами запуска плазменной пушки и генератора. Значительное (как в рассмотренном выше выстреле) излучение присутствует лишь в том случае, когда к моменту запуска генератора только передний низкоплотный фронт плазменного

сгустка достигает кончика анода. При последовательном увеличении задержки выход излучения падает вплоть до полного его отсутствия (короткозамкнутый на плазменный пинч-режим).

Таким образом, в проведенных экспериментах продемонстрировано, что инжекция плазмы в СП-диод позволяет существенно увеличить плотность электронного тока на кончик анодного стержня как за счет более низкого импеданса плазмонаполненного диода, так и за счет более плотной фокусировки электронного пучка. Как результат, реализуется источник рентгеновского излучения с большей дозой и меньшими размерами по сравнению с вакуумным СП-диодом. Инжекция в межэлектродный зазор перед СП-диодом относительно более плотной плазмы позволяет обострить импульс напряжения на диоде. Для того чтобы на генераторе с отрицательной зарядкой формирующих линий обеспечить вывод из вакуумной камеры излучения стержневого диода в приосевом направлении, в настоящих экспериментах успешно применено устройство типа „конволют“.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 09-08-99055.

## Список литературы

- [1] *Maenchen J.E., Cordova S., Criffin F.* et al. // 13<sup>th</sup> Intern. Symposium on High Current Electronics. 2004. P. 27.
- [2] *Miller P.A., Poukey J.W., Wright T.P.* // Phys. Rev. Lett. 1975. V. 35. N 14. P. 940.
- [3] *Weber B.V., Comisso R.H., Cooperstein G.* et al. // Physics of Plasmas. 2004. V. 11. N 5. P. 2916.
- [4] *Weber B.V., Allen R.J., Comisso R.J.* et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. N 2. P. 443.
- [5] *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.
- [6] *Swanekamp S.B., Cooperstein G., Schumer J.W.* et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32. N 5. P. 2004.