

Источник жесткого рентгеновского излучения на основе низкоимпедансного стержневого пинч-диода

© С.А. Сорокин

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: s.sorokin@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 14 декабря 2015 г.)

Представлены результаты экспериментов по формированию низкоимпедансного диода в конфигурации стержневого пинч-диода, предварительно закороченного радиальной фольгой. Низкоимпедансный диод формируется при отрыве ускоряемой током сильноточного генератора фольги от анодного стержня. Показано, что изменением формы анодного кончика, толщины алюминиевой фольги и ее положения относительно анодного кончика в результате перезамыкания тока плазмой фольги и стержня могут быть получены от одного до нескольких последовательных импульсов жесткого рентгеновского излучения.

Введение

Стержневые пинч-диоды (СП) находят применение в создании точечных источников тормозного излучения для радиографических приложений [1,2]. Стержневой пинч-диод состоит из стержневого анода, который проходит сквозь кольцевой катод по его оси. В начале импульса, приложенного и нарастающего за конечное время напряжения ток в диоде и влияние магнитного поля на траекторию движения электронов малы. При этом ток в диоде протекает в режиме ограничения пространственным зарядом и для нерелятивистских энергий электронов пропорционален напряжению в степени $3/2$ (нерелятивистский ток Чайлда–Ленгмюра [3,4]). Так как с ростом напряжения на диоде отношение собственного магнитного поля тока диода к электрическому полю в диоде увеличивается пропорционально напряжению в степени $1/2$, при определенном уровне напряжения на диоде магнитное поле начинает существенно влиять на траекторию движения электронов. При протекании в диоде некоторого „критического тока“ эмитированные с катода электроны достигают анода по касательной траектории. Дальнейшее повышение напряжения на СП-диоде приводит к „сметанию“ электронов магнитным полем, их фокусировке на кончик анодного стержня и протеканию тока в диоде в магнитно-ограниченном режиме. Имеется 3 модели протекания тока в диоде в магнитно-ограниченном режиме, основанные на различных предположениях об орбитах электронов. Каждая из моделей (парапотенциальная, ламинарная и критического тока) дает аналитическое выражение для тока в магнитно-ограниченном режиме. В работе [5] показано, что выражение для критического тока дает наилучшее совпадение с PIC (particle-in-cell) расчетами. Для геометрии СП-диода критический ток составляет

$$I_{\text{crit}}(\text{kA}) = 8.5\alpha \frac{\sqrt{\gamma^2 - 1}}{\ln(r_C/r_A)}. \quad (1)$$

Здесь, γ — релятивистский фактор для электронов, r_C и r_A радиусы катода и анода, а коэффициент α учитывает геометрию (ее отличие от одномерной цилиндрической) СП-диода, пространственный заряд электронов и ионов и, согласно PIC-расчетам [5] для $r_A < 1$ мм составляет ~ 2 . Стержневой пинч-диод обладает рядом преимуществ по сравнению с другими типами вакуумных диодов (планарные пинч-диоды, параксиальные диоды и диоды с магнитной изоляцией) применяемых для формирования источников рентгеновского излучения миллиметрового размера. К этим преимуществам относятся сравнительно низкий импеданс диода, фиксированное положение и в какой-то степени размер источника излучения, которые определяются положением и размером кончика анодного стержня. Из (1) видно, что при заданном напряжении на диоде, которое, как правило, определяется требуемой энергией квантов излучения, ток диода в магнитно-ограниченном режиме определяется геометрическим фактором $\ln(r_C/r_A)$. Таким образом мощность электронного пучка и, как следствие, мощность дозы рентгеновского излучения могут быть увеличены уменьшением отношения r_C/r_A , то есть уменьшением радиуса катода r_C при заданном радиусе анода r_A . Однако известно, что при высоком уровне мощности электронного пучка на поверхности электродов диода образуется плотная плазма материала электродов, которая расширяется в межэлектродный зазор, изменяет импеданс диода и в конечном итоге закорачивает межэлектродный зазор. Характерная скорость v движения электродной плазмы (главным образом, анодной) составляет $(1-3) \cdot 10^6$ см/с, что при длительности импульса напряжения на диоде τ около 100 нс накладывает ограничение снизу на величину межэлектродного зазора $d > v \tau = 1-3$ мм. При напряжении на диоде 1 МВ, радиусе анода 0.5 мм и радиусе катода 2.5 мм импеданс диода в отсутствие межэлектродной плазмы составляет около 55 Ω . Несмотря на то что анодный кончик в СП-диоде вынесен вперед относительно положения катодного диска, протекание тока в

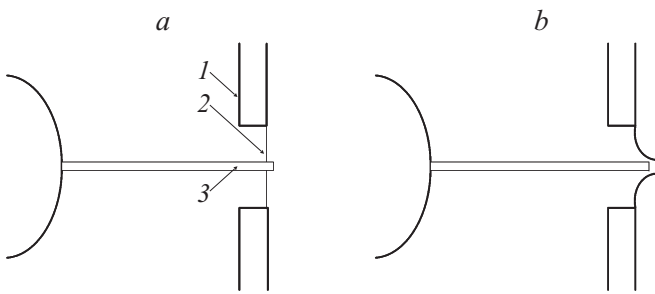


Рис. 1. Иллюстрация последовательности событий в исходно закороченном фольгой стержневом пинч-диоде, ведущих к формированию интенсивного электронного потока на кончик анода: 1 — катодный диск, 2 — радиальная фольга, 3 — анодный стержень. Начальное положение фольги (а) и выход плазмы фольги за анодный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

начале импульса в режиме ограничения пространственным зарядом приводит к генерации анодной плазмы на стержне напротив положения катодного диска и к последующему закорачиванию межэлектродного зазора. Как показали эксперименты с СП-диодом на генераторе SABRE (2.3 MV, 40 Ω, 70 ns) [6], при длительности импульса напряжения 70 ns снижение зазора до 2 mm и менее приводит к существенной деградации параметров импульса излучения.

Низкоимпедансный диод без замыкания вакуумного зазора электродной плазмой может быть реализован в конфигурации, где один из массивных электродов (на практике катод) заменен инжектированной плазмой или тонкой фольгой. В работах [7–10] значительное снижение импеданса СП-диода было реализовано в его плазмонаполненной версии. В плазмонаполненном стержневом пинч (ПНСП) диоде в область анодного кончика инжектируется плазма плотностью $\sim 10^{17} \text{ cm}^3$, так что в начале импульса напряжения диод короткозамкнут этой плазмой. Плазма сгребается $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ -силой к кончику стержневого анода. Так как величина $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ -силы обратно пропорционально квадрату радиуса, то этот процесс проявляется в отгеснении плазмы от анодного стержня в радиальном направлении и завершается формированием вакуумного зазора при выходе токового слоя на кончик анодного стержня. Характерный импеданс ПНСП-диода в зависимости от плотности инжектированной плазмы составляет от долей до единиц Ω, поэтому с учетом миниатюрных размеров диода плотности тока и энергии в электронном пучке практически на два порядка превышают их величину в традиционных вакуумных диодах.

В работе [11] предложен и апробирован другой способ формирования низкоимпедансного СП-диода. В рассматриваемом подходе СП-диод предварительно закорочен тонкой радиальной фольгой (рис. 1, а). Фольга ускоряется магнитным полем исходно в направлении кончика анодного стержня, а затем и радиально от стержня. Низкоимпедансный диод формируется при отрыве плазмы

материала фольги от стержня (рис. 1, б). При скорости плазмы фольги в момент отрыва $(1-3) \cdot 10^6 \text{ cm/s}$ ее движение (от стержня) в той или иной степени компенсирует разлет плотной плазмы с поверхности стержня, предотвращая или замедляя процесс замыкания вакуумного зазора.

Размер источника излучения существенно определяется формой (размером) кончика анодного стержня. Вместе с тем, как показали эксперименты с ПНСП-диодом, размер источника излучения не уменьшается пропорционально диаметру анодного кончика, так как увеличение плотности электронного тока на поверхность анода сопровождается увеличением скорости разлета анодной плазмы и, как следствие, увеличением эффективного размера источника излучения. Размер источника излучения важен в радиографических приложениях. Параметром, определяющим эффективность радиографического источника, является отношение излученной за импульс дозы к квадрату размера источника излучения.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов с закороченным фольгой СП-диодом, проведенные на сильноточном генераторе МИГ [12]. В процессе эксперимента изменялись форма анодного кончика, толщина алюминиевой фольги и ее положение относительно анодного кончика.

Экспериментальная установка и методика эксперимента

Генератор МИГ имеет волновой импеданс 0.65 Ω, а длительность импульса и напряжение в бегущей волне соответственно 80 ns и 1 MV. Индуктивность области проходного (вода–вакуум) изолятора, магнитоизолированной вакуумной передающей линии и нагрузочной области составляет около 30 nH. Схема эксперимента показана на рис. 2. Так как внутренние электроды водяных линий генератора МИГ заряжаются отрицательно, то для обеспечения вывода излучения из вакуумной камеры в приосевом направлении осуществляется 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. 2. 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 (50–90 ns) временную задержку от начала импульса генератора до момента формирования диода. Мощность дозы рентгеновского излучения измерялась кремниевыми $p-i-n$ -диодами СКД1 и СППДЗ, а интегральная за импульс доза — LiF термолюминесцентными дозиметрами (ТЛД). Излучение регистрировалось за алюминиевым окном вакуумной камеры толщиной 5 mm.

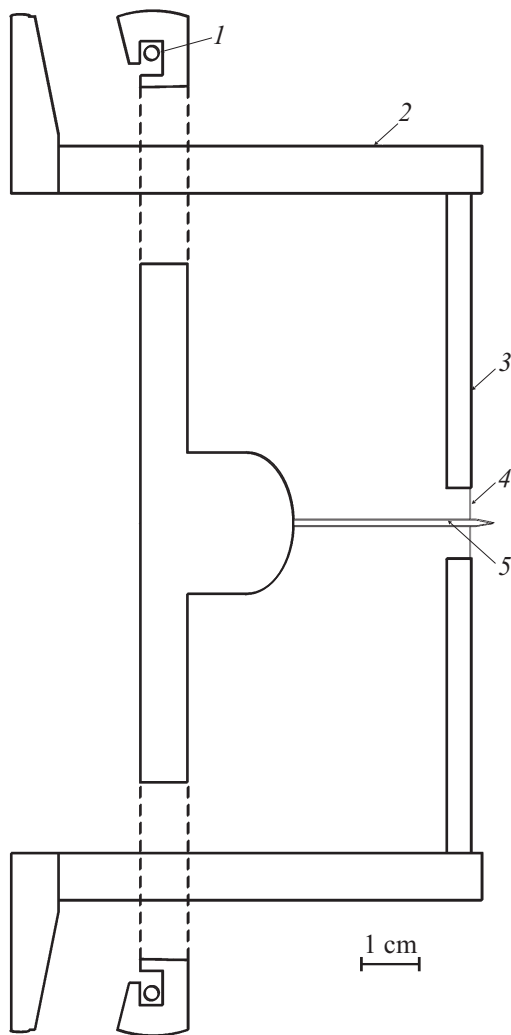


Рис. 2. Схема эксперимента с СП-диодом, закороченным радиальной фольгой: 1 — магнитный зонд, 2 — стержни «конволута», 3 — катодный диск, 4 — тонкая фольга, 5 — анодный стержень.

Напряжение у проходного изолятора вода–вакуум измерялось емкостным делителем напряжения. Для измерения тока и индуктивной составляющей напряжения ($L(dI/dt)$) у проходного изолятора применялись пояс Роговского и магнитные зонды. Напряжение на диоде V_d восстанавливалось вычитанием измеренной зондом индуктивной составляющей $L(dI/dt)$ (L — индуктивность электрического контура после места установки делителя напряжения, I — ток) из напряжения у проходного изолятора V (сигнала емкостного делителя). Интегральное по времени изображение источника излучения регистрировалось камерой-обскурой (для квантов с энергией > 20 keV). Линия наблюдения камеры была направлена радиально на кончик анодного стержня. В качестве стержневого анода использовался вольфрамовый провод диаметром 1 мм.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

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. 3 представлены напряжение у проходного изолятора V , его индуктивная составляющая $L(dI/dt)$ и мощность дозы рентгеновского излучения P в 1 м от источника, а на рис. 4 показаны положение фольги относительно стержневого анода и изображение, полученное в радиальном направлении с помощью камеры-обскуры. Индекс a на рис. 3 и 4 соответствует выстрелу с алюминиевой фольгой толщиной $15 \mu\text{m}$ (назовем его выстрел 1). В фольге имеется отверстие диаметром 1 мм. В исходном положении стержень входит в фольгу на 0,2 мм. 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). В фольге сделано отверстие диаметром 1,5 мм. Стержень входит в фольгу на 1,6 мм. В этом варианте между фольгой и стержнем имеется зазор 0,25 мм, а в область анодного кончика перед фольгой предварительно инжектируется плазма. 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. 3, 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 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 (0,2–0,3 Ω) в это время (до 75 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 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 МА. 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 приводит к последовательным перезамыканиям зазора, о чем свидетельствует последовательность пиков

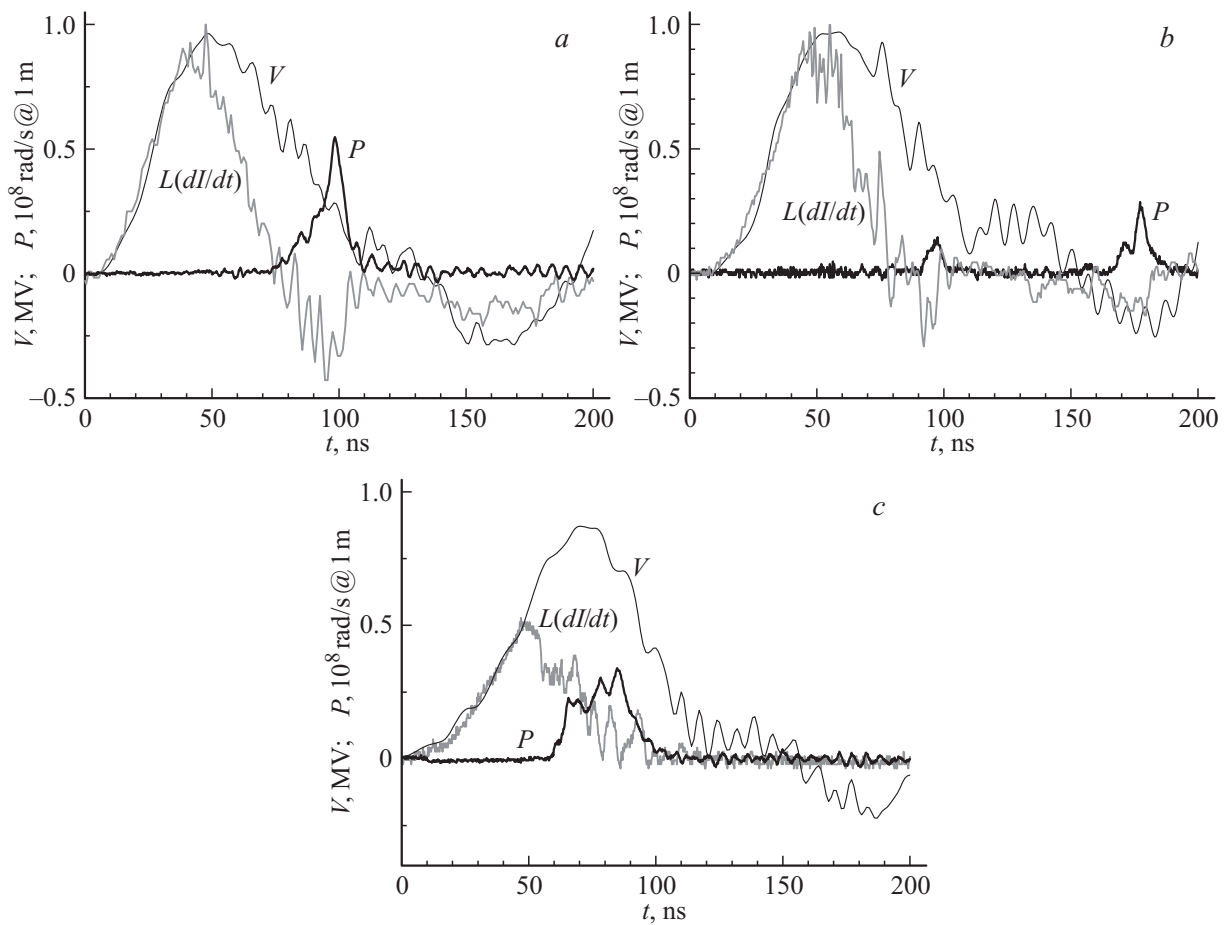


Рис. 3. Напряжение у проходного изолятора V , его индуктивная составляющая $L(dI/dt)$ и мощность дозы рентгеновского излучения P для трех выстрелов с исходными конфигурациями, показанными на рис. 4.

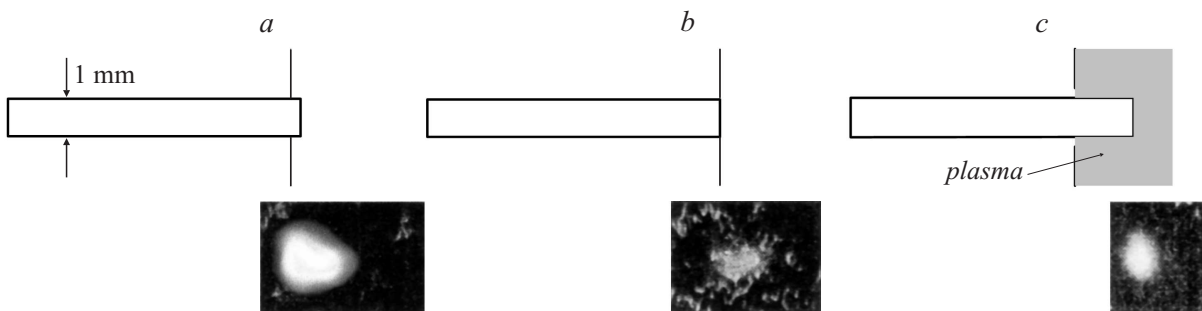


Рис. 4. Положение фольги относительно стержневого анода и изображение, полученное в радиальном направлении с помощью камеры-обскуры для трех выстрелов, обсуждаемых в тексте работы. Положения профиля стержня и обскурограммы в направлении вдоль оси диода совмещены.

на сигналах магнитного зонда и $p-i-n$ -диода с 75 по 110 ns. Слабая выраженность первых трех всплесков на сигнале $p-i-n$ -диода, скорее всего, связана с его конечным временным разрешением (около 3 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 0.4Ω .

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

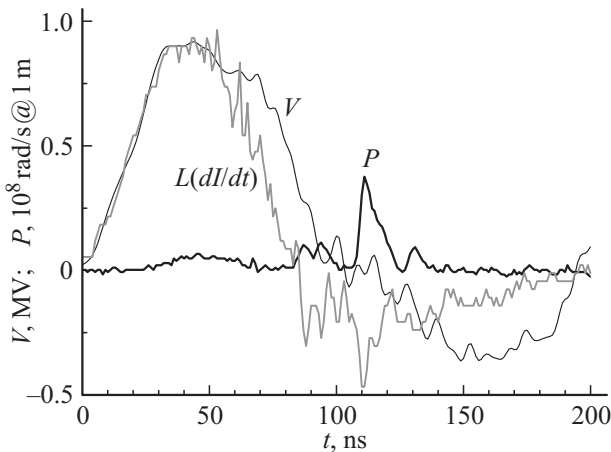


Рис. 5. Напряжение у проходного изолятора V , его индуктивная составляющая $L(di/dt)$ и мощность дозы рентгеновского излучения P для выстрела с исходной конфигурацией, показанной на рис. 6.

$15 \mu\text{m}$ 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 два обособленных излучающих сгустка. Более удаленный от стержня сгусток генерируется во время первого, а излучает во время второго импульса. В выстреле 3 в начале импульса генератора диод замкнут инжектированной сравнительно низкоплотной ($\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) плазмой. Вакуумный зазор формируется около 56 ns . В последующий промежуток времени около 30 ns на диоде поддерживается напряжение около 800 kV при уровне тока около 1.4 MA . То есть в это время импеданс нагрузки составляет около 0.6Ω , а энергия в нагрузку поступает от генератора (импеданс 0.65Ω) в квазисогласованном режиме. Сложное движение анодной плазмы и плазмы фольги в это время проявляется в виде колебаний импеданса нагрузки и мощности рентгеновского излучения (синхронные выбросы на сигналах магнитного зонда и $p-i-n$ -диоде). Выстрел в данной конфигурации демонстрирует возможность как укорочения длительности импульса излучения, так и согласования импеданса нагрузки (диоде) с импедансом силовоточного генератора.

Как отмечено выше, в рассмотренных выстрелах радиальное расширение плотной анодной плазмы при наблюдении в аксиальном направлении лишь незначительно увеличивает размеры источника излучения по сравнению с диаметром стержня. Размер источника составляет $1.1-1.2 \text{ mm}$. Так как в магнитно-ограниченном режиме протекания тока в диоде электроны фокусируются в основном на кончик анодного стержня, то размер источника излучения может быть снижен уменьшением диаметра стержня или применением заточенного на конус анодного кончика. На рис. 5 и 6 представлены результаты для

выстрела с алюминиевой фольгой толщиной $7.5 \mu\text{m}$ и вольфрамовым стержнем диаметром 1 mm , заточенным на конус на длине 1.5 mm . В фольге имеется отверстие диаметром 1 mm . В исходном положении цилиндрическая часть стержня входит в фольгу на 1.5 mm . В этом выстреле также наблюдается цуг из четырех последовательных импульсов излучения и соответствующих пиков на сигнале магнитного зонда (рис. 5). Во время третьего наиболее интенсивного пика излучения около 112 ns при уровне тока 1.5 MA напряжение на диоде ($V - L(di/dt)$) составляет 0.47 MV , что соответствует импедансу диода около 0.3Ω . На обскурограмме (рис. 6) видно, что излучение, главным образом, происходит с кончика анодного стержня. Размер источника излучения не превышает 0.5 mm . Во время основного импульса излучения напряжение у проходного изолятора V уже близко к нулю, т.е. энергия от генератора не поступает, и электронный пучок генерируется за счет накопленной энергии магнитного поля. Аналогичная ситуация реализовалась в рассмотренных выше выстрелах 1 и 2 с непосредственным электрическим контактом фольги и стержня. При таком позднем формировании вакуумного зазора в условиях данной серии экспериментов не удалось реализовать импеданс диода около и более 1Ω . Вместе с тем для эффективной конверсии накопленной в индуктивной нагрузке с $L = 30 \text{ nH}$ энергии магнитного поля в энергию электронного пучка за время τ около $10-20 \text{ ns}$ необходим импеданс диода $R_d \sim L/\tau = 1.5-3 \Omega$. Логично предположить, что для более раннего формирования вакуумного зазора и достижения более высокого импеданса диода необходимо уменьшать массу фольги и диаметр анодного стержня, т.е. увеличивать ускорение материала фольги у поверхности стержня. В качестве альтернативы уменьшению диаметра стержня (в отсутствие стержней меньшего диаметра) может быть использована конфигурация с контактом фольги с конусной частью заточенного на конус кончика стержня. К сожалению, в конфигурации блока нагрузки с конвоятом по техническим причинам контакт фольги с конусной частью стержня не может

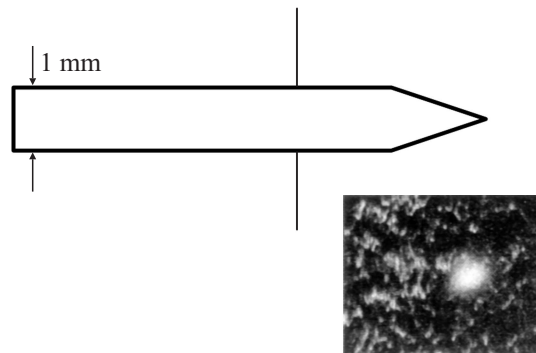


Рис. 6. Положение фольги относительно стержневого анода и изображение, полученное в радиальном направлении с помощью камеры-обскуры. Вольфрамовый стержень диаметром 1 mm заточен на конус на длине 1.5 mm .

быть реализован, так как при вакуумной откачке катод смещается на ~ 2 mm в направлении анодного кончика и образуется зазор между фольгой и стержнем. Выстрелы с контактом фольги и конусной части стержня были реализованы в конфигурации блока нагрузки без конволута (катод при вакуумной откачке смещается в направлении от анодного кончика). Снижение массы катодной плазмы может быть реализовано (в отсутствие доступной более тонкой фольги) заменой фольги набором радиальных проволочек. Результаты экспериментов без конволута и с многопроволочным катодом будут представлены в последующих публикациях.

Заключение

Анализ результатов экспериментов показывает, что в конфигурации СП-диода с радиальной фольгой может быть получен цуг коротких последовательных импульсов жесткого рентгеновского излучения. Количество импульсов и временной интервал между ними определяются толщиной фольги и ее исходным положением относительно стержня. В конфигурации с зазором между фольгой и стержнем и инжекцией плазмы в область анодного кончика перед фольгой реализована возможность как укорочения длительности импульса излучения, так и согласования импеданса диода с импедансом сильноточного генератора. Отметим, что, несмотря на значительный аксиальный разлет плазмы за время следования импульсов, эффективный размер источника излучения при его наблюдении в продольном 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. Использование заточенного на конус кончика стержня диаметром 1 mm позволяет снизить размер источника излучения до 0.5 mm.

Автор выражает благодарность Е.Н. Волкову и Ю.А. Суковатицыну за техническую поддержку настоящей работы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 13-08-98040 и 15-08-01261.

Список литературы

- [7] Weber B.V., Comisso R.J., Cooperstein G. et al. // Phys. Plasmas. 2004. V. 11. N 5. P. 2916–2927.
- [8] Weber B.V., Allen R.J., Comisso R.J. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. N 2. P. 443–455.
- [9] Сорокин С.А. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 8. С. 68–74.
- [10] Сорокин С.А. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 57–62.
- [11] Сорокин С.А. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 16. С. 22–28.
- [12] 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. Вып. 3–4. С. 149.

- [1] Mahaffey R., Golden J., Goldstein S.A., Cooperstein G. // Appl. Phys. Lett. 1978. Vol. 33. N 9. P. 795–797.
- [2] Cooperstein G., Boller J.R., Comisso R.J. et al. // Phys. Plasmas. 2001. Vol. 8. N 10. P. 4618–4636.
- [3] Child C.D. // Phys. Rev. Ser. I. 1911. Vol. 32. P. 492.
- [4] Langmuir I. // Phys. Rev. Ser. II. 1913. Vol. 2. P. 450.
- [5] Swanekamp S.B., Comisso R.J., Cooperstein G., Ottinger P.F., Schumer J.W. // Phys. Plasmas. 2000. Vol. 7. N 12. P. 5214–5222.
- [6] Menge P.R., Johnson D.L., Maenchen J.E. et al. // Rev. Sci. Instr. 2003. Vol. 74. N 8. P. 3628–3635.