



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.14>

УДК: 621.384.6

17-я Международная конференция

«Газоразрядная плазма и ее применения»

Екатеринбург, Россия, 8-12 сентября 2025

ПИКОСЕКУНДНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 3 МЭВ И МОЩНОСТЬЮ 40 ГВт

**В.Е. Патраков, Л.Н. Лобанов, М.С. Педос, С.Н. Рукин,
К.А. Шарыпов, С.А. Шунайлов, С.П. Тимошенко, М.И. Яландин**

**Институт электрофизики Уральского отделения РАН
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106**

Статья поступила в редакцию 2 октября 2025 г.

Аннотация. Представлены результаты экспериментов по получению мультигигаваттных электронных пучков пикосекундной длительности с помощью серийного отпаянного вакуумного диода ИМАЗ-150Э с выводом пучка в атмосферу. В качестве источника питающего импульса выступал генератор S-100 на основе твердотельного драйвера на SOS-диодах и четырех ступеней сжатия импульса на основе нелинейных линий передачи с ферритом. Пиковая мощность питающего импульса достигает 100 ГВт при длительности около 100 пс. В результате эксперимента был получен пучок со следующими параметрами: максимальная энергия 3.2 МэВ, пиковый ток около 12 кА, длительность импульса тока 85 пс. Пиковая мощность пучка составляет около 40 ГВт. Представлено распределение плотности тока пучка по сечению, полученное в результате оцифровки автографа пучка на дозиметрической пленке ЦВИД, и угловое распределение плотности тока пучка, полученное с применением коллекторного датчика тока. Было установлено, что ресурс диода

в таком режиме ограничен интенсивной эрозией фольговых катодов, а также что конструктивные элементы диода способны без пробоя выдерживать импульс напряжения, задающий электрические поля 5-10 МВ/см.

Ключевые слова: пикосекундный электронный ускоритель, вакуумный диод, ферритовая линия передачи, пикосекундный импульс, сильноточный пучок.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-19-00407, <https://rscf.ru/project/24-19-00407/>

Автор для переписки: Патраков Виталий Евгеньевич, patrakov@iep.uran.ru

Введение

Пикосекундные сильноточные электронные пучки находят применение в задачах радиационной физики и химии [1,2], для получения мощных вспышек рентгеновского излучения [3] и возбуждения импульсной катодолуминесценции [4], а также для генерации мощных СВЧ импульсов [5,6]. Получение электронных сгустков пикосекундной длительности производится с применением ускорения в высокочастотных полях [7] и в высоковольтных ускорителях прямого действия [8-11]. Для последнего подхода актуальна разработка новых источников мощных пикосекундных высоковольтных импульсов, позволяющих достигать более высоких импульсных мощностей пучка при уменьшении длительности. В последние годы исследования по компрессии мультигигаваттных импульсов в нелинейных линиях с ферритом [12,13] позволили создать импульсный генератор S-100 [14], обеспечивающий пиковую мощность импульса около 100 ГВт при длительности около 100 пс. В отличие от традиционного подхода к генерированию высоковольтных пикосекундных импульсов, основанного на применении накопительных линий с жидкостными или газовыми разрядниками высокого давления [6,10,15], усиление мощности импульса в генераторах с ферритовыми линиями происходит без использования коммутаторов, в процессе распространения импульса вдоль линии. Это позволяет формировать принципиально более короткие импульсы, поскольку минимальная длительность в данном случае определяется временем распространения

электромагнитной волны между проводниками линии в поперечном направлении [14,16,17]. Отсутствие газоразрядных коммутаторов позволяет получать более высокие значения скорости нарастания мощности (до 2 ТВт/нс), и при использовании твердотельного драйвера создавать полностью твердотельные генераторы мощных пикосекундных импульсов.

Численное исследование возможности получения мощного электронного пучка с применением генератора S-100 и серийного вакуумного диода ИМАЗ-150Э описано в работе [18]. По результатам расчета была установлена возможность формирования пучка с пиковой энергией 2.6 МэВ при токе 21 кА (пиковая мощность около 50 ГВт). В настоящей работе описаны результаты экспериментального исследования такой системы.

1. Описание экспериментальной установки

Конструкция и параметры генератора S-100 подробно описаны в [14]. Генератор состоит из твердотельного драйвера на основе SOS-диодов, генерирующего первичный импульс с пиковой мощностью 8 ГВт и длительностью 7 нс, и четырех ступеней компрессии импульса на основе нелинейных коаксиальных линий с ферритом. После четвертой ступени компрессии пиковая мощность импульса достигает 103 ГВт, а длительность снижается до 100 пс. Такое значение пиковой мощности соответствует амплитуде импульса 2.2 МВ при волновом сопротивлении 48 Ом выходной коаксиальной линии генератора с диаметрами проводников 50 и 15 мм (рис. 1). Импульс с выходной линии подается через конический переход длиной 50 мм на подводящую линию вакуумного диода ИМАЗ-150Э [19] с диаметрами проводников 28 и 7 мм. Диод представляет собой отпаянную ускорительную трубку с коваровым корпусом, стеклянным проходным изолятором, градиентным экраном и двумя соосными цилиндрическими катодами из фольги толщиной 20 мкм (рис. 1). Длина ускорительного промежутка составляет 6 мм для внутреннего катода и 7 мм для внешнего катода. В качестве анода выступает бериллиевая пластина толщиной 0.2 мм, что позволяет выводить формируемый электронный пучок

в атмосферу при энергиях электронов более ~ 150 кэВ. Электродинамический анализ описанной конструкции с применением численного моделирования представлен в [18].

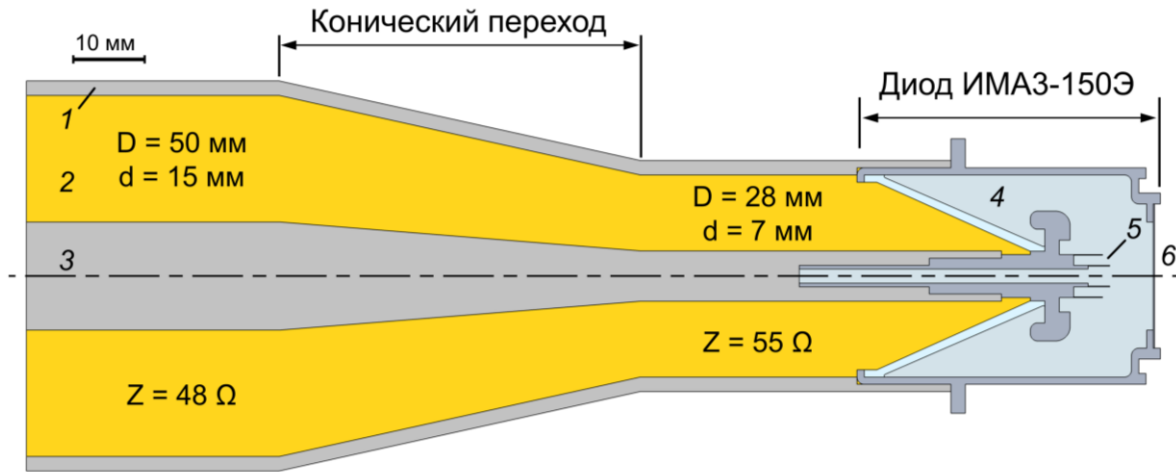


Рис. 1. Конструкция узла подключения вакуумного диода ИМАЗ-150Э к выходной линии генератора S-100. 1, 3 – внешний и внутренний проводники коаксиальной линии; 2 – трансформаторное масло; 4 – вакуум; 5 – фольговые катоды; 6 – анодное окно.

Для регистрации подаваемого на диод импульса напряжения применялись емкостные делители напряжения зонтичного типа, установленные в выходной коаксиальной линии генератора. Форма импульса тока пучка регистрировалась датчиком с коллектором диаметром 13 мм, представлявшим собой торец ступенчатой коаксиальной линии [20,21]. Сигналы подавались на осциллограф по высокочастотным кабельным сборкам Easop 4C и Sucoflex 126A с граничной частотой 26 ГГц; длина сборок не превышала 5 метров. Для ослабления сигнала использовались высоковольтные аттенюаторы Barth Electronics 142 Series с полосой пропускания 30 ГГц и аттенюаторы Aeroflex 23-30-34 с полосой пропускания 18 ГГц. Регистрация сигналов проводилась осциллографом Tektronix TDS6154C с частотой дискретизации в двухканальном режиме 20 Гвыб/с. Номинальное время нарастания осциллографа по уровням 0.1-0.9 составляет 35 пс.

2. Результаты экспериментов

При подаче импульса на диод наблюдалась генерация интенсивного электронного пучка, сопровождаемая свечением воздуха у выходного окна диода. На рис. 2а представлена характерная фотография свечения. Согласно [22], фиолетовый цвет свечения воздуха при воздействии импульсного электронного пучка обусловлен преимущественно возбуждением молекулярного азота и однозарядных ионов N_2^+ . Хаотичная засветка отдельных пикселей на фотографиях, отсутствовавшая на кадрах, снятых в отсутствие пучка, свидетельствует о генерации рентгеновского излучения. На рис. 2б представлен контурный профиль интенсивности свечения. Значения интенсивности были получены путем преобразования рис. 2а в оттенки серого. Построение профиля интенсивности позволяет количественно оценить форму и геометрические параметры свечения. Свечение оканчивается на расстоянии ~ 13 см от выходного окна диода и в наиболее широкой части имеет поперечные размеры около 5 см. Форма светящейся области близка к представленной в работе [9], полученной на аналогичном диоде при напряжениях около 0.6 МВ. Относительно быстрое затухание свечения при удалении от выходного окна можно связать с торможением электронов положительным зарядом, наведенным на выходном окне [23] и с быстрым снижением интенсивности пучка в связи с его расхождением по мере распространения. Была отмечена небольшая пространственная вариация формы свечения от импульса к импульсу, что говорит о разбросе положений центров эмиссии на катоде диода.

Максимальная энергия пучка оценивалась с помощью набора алюминиевых фильтров различной толщины и коллекторного датчика тока. Наибольшая толщина фильтра, за которой регистрировался ток электронов, составила 7.35 мм, что соответствует энергии электронов 3.2 МэВ [24]. Типичные осциллограммы импульса напряжения падающей волны и импульсов электронного тока при минимальной (0.35 мм) и максимальной (7.35 мм) толщинах фильтра приведены на рис. 3. При этом длительность импульсов тока на полувысоте составляет 85 и 67 пс соответственно. Укорочение импульса тока за фильтром большей

толщины связано с тем, что достаточно высокую для прохождения такого фильтра энергию приобретает лишь фракция электронов, ускоренная вблизи вершины приложенного к катоду колоколообразного импульса напряжения.

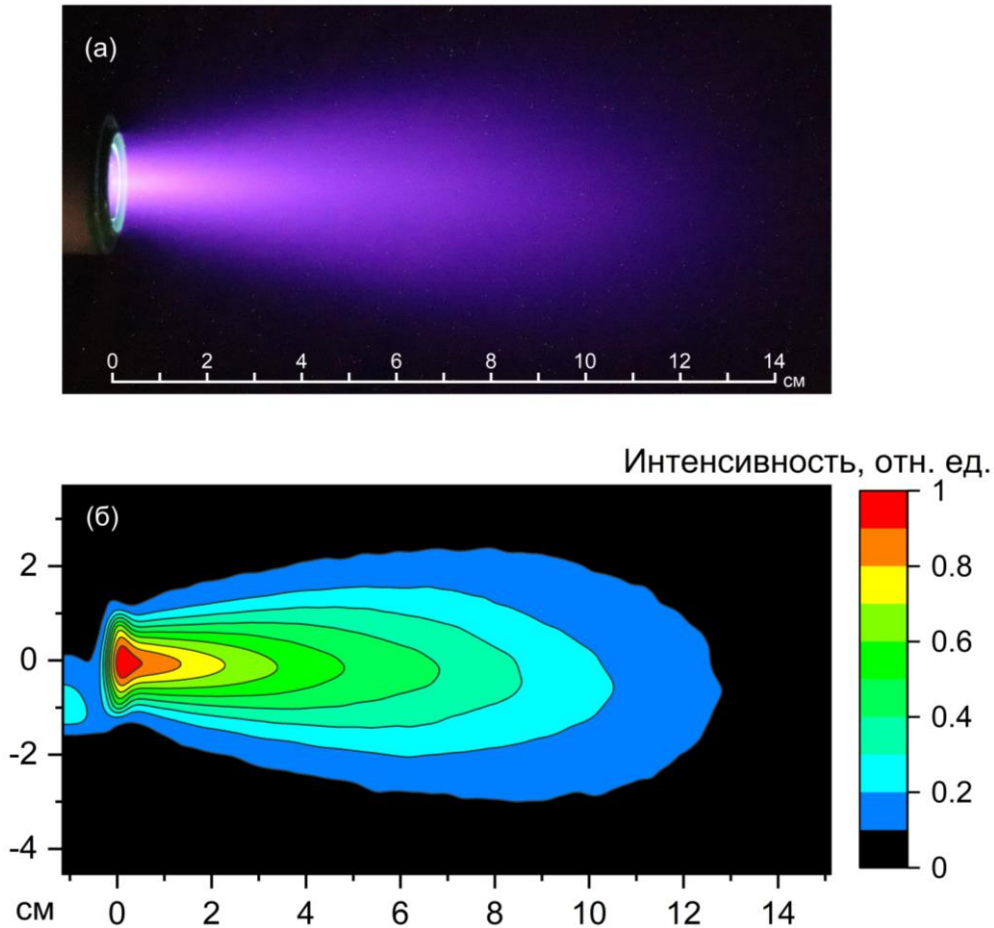


Рис. 2. (а) – фото свечения воздуха под воздействием электронного пучка; (б) – профиль интенсивности свечения.

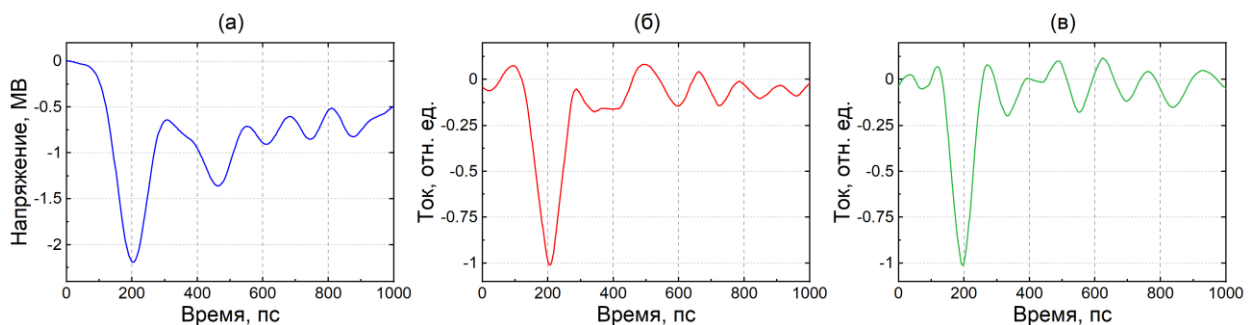


Рис. 3. Осциллограммы напряжения падающей волны (а) и тока пучка за алюминиевыми фильтрами толщиной 0.35 мм (б) и 7.35 мм (в)

Как упоминалось выше, при предварительном численном моделировании системы максимальная энергия электронов формируемого пучка была оценена как 2.6 МэВ при токе диода 21 кА. Различие в расчетной и экспериментальной

энергиях говорит о том, что импеданс диода в эксперименте имеет более высокое значение относительно взятого при моделировании, из-за чего наблюдается больший прирост напряжения питающего импульса при достижении им ускорительного промежутка. После получения экспериментальных данных параметры диода в модели были скорректированы так, чтобы максимальное напряжение на диоде составило 3.2 МВ. При этом было учтено, что при мегавольтных уровнях напряжения сильноточные вакуумные диоды имеют вольтамперную характеристику (ВАХ), определяемую степенным показателем напряжения в диапазоне от 1.5 до 1 [8,25]. С учетом этого диапазон пиковых токов диода в модели при максимальной энергии 3.2 МэВ составил от 11.0 до 12.5 кА, что соответствует пиковой мощности 35-40 ГВт.

Распределение плотности тока пучка по сечению на выходном окне диода было установлено по отпечатку пучка на дозиметрической пленке ЦВИД (рис. 4а), для которой воздействие электронного излучения приводит к изменению цвета с желтого на красный. В связи с геометрией диода распределение носит приблизительно осесимметричный характер. После сканирования пленки был проведен цифровой анализ полученного изображения. При составлении модели для анализа было принято, что изменение цвета пленки в некоторой области определяется средней долей молекул красителя, изменивших цвет при взаимодействии с электронами в данной области. На основании этого цвет каждого пикселя изображения в кодировке RGB можно представить в виде линейной комбинации RGB-значений цвета исходной пленки (цвет «А») и цвета наиболее окрашенного участка (цвет «Б»):

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = (1-x) \times \begin{pmatrix} R_A \\ G_A \\ B_A \end{pmatrix} + x \times \begin{pmatrix} R_B \\ G_B \\ B_B \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где R, G, B – цветовые значения пикселя, R_A, G_A, B_A – цветовые значения исходной пленки, R_B, G_B, B_B – цветовые значения наиболее окрашенного участка, x – искомая доля цвета «Б» в линейной комбинации. Искомая доля x вычислялась

по методу наименьших квадратов для взвешенного учета вклада каждого из цветовых каналов в соответствии со следующей формулой:

$$x = \frac{(R_B - R_A) \times (R - R_A) + (G_B - G_A) \times (G - G_A) + (B_B - B_A) \times (B - B_A)}{(R_B - R_A)^2 + (G_B - G_A)^2 + (B_B - B_A)^2}. \quad (2)$$

Без учета зависимости диаграммы направленности электронного излучения от ускоряющего напряжения на катоде, найденную таким образом долю x можно принять за относительную величину плотности тока в данной точке пленки. Реконструкция исходных цветов пикселей на основе полученных коэффициентов линейной интерполяции x и $(1-x)$ показала, что погрешность интерполяции цвета для всех пикселей исследованного изображения не превышает 5 %.

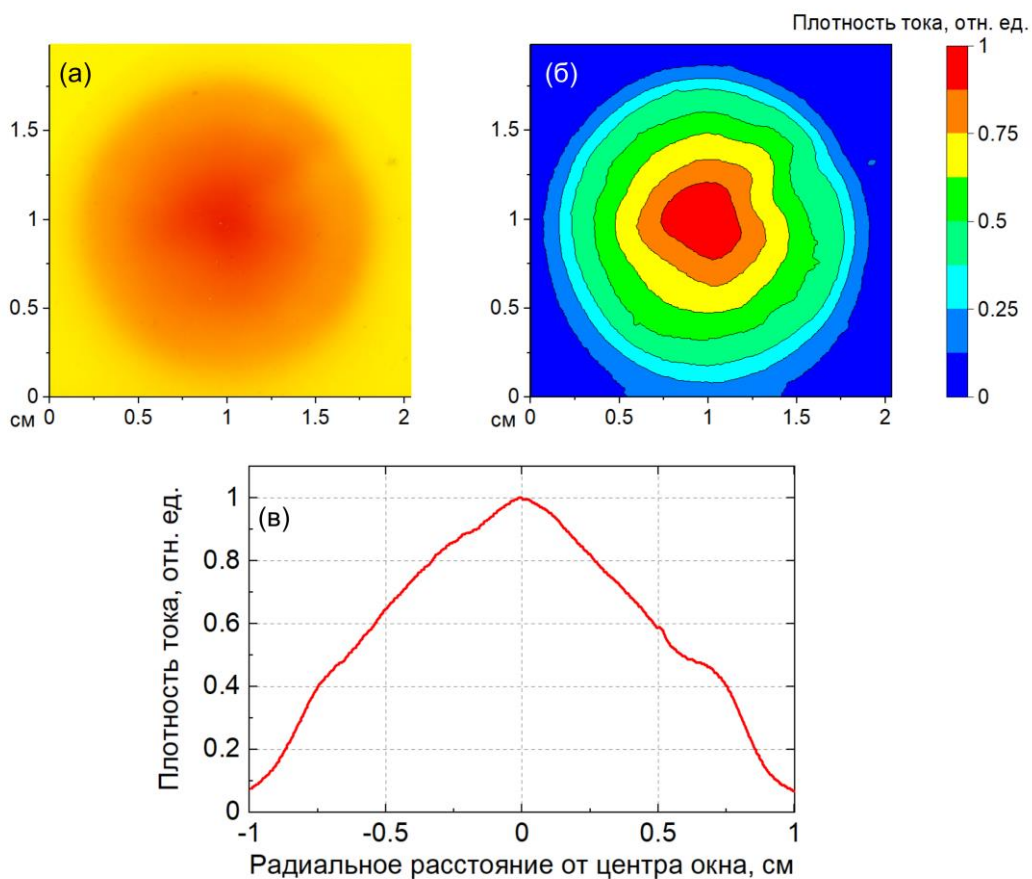


Рис. 4. Автограф пучка на пленке ЦВИД (а);
распределение плотности тока, полученное путем оцифровки автографа (б);
профиль распределения плотности тока по диаметру окна (в).

Контурное распределение плотности тока пучка по поперечному сечению, полученное на основе описанного метода, представлено на рис. 4б. Характерный профиль распределения по диаметру окна показан на рис. 4в. Анализ фактических значений RGB показал, что для используемого типа пленки $(R_A \ G_A \ B_A) = (255 \ 245 \ 0)$ и $(R_B \ G_B \ B_B) = (235 \ 36 \ 0)$, то есть при засветке фактически отсутствует изменение интенсивности синего канала, интенсивность красного канала изменяется незначительно, а самое большое изменение интенсивности происходит в зеленом канале. Вследствие этого для упрощенных оценок распределение можно строить без применения линейной интерполяции, исключительно по вариации интенсивности зеленого канала, либо по вариации полной интенсивности изображения, найденной преобразованием в оттенки серого. Было установлено, что профили, полученные такими методами, практически не отличаются от показанного на рис. 4в.

Прямое измерение пикового тока пучка в проведенном эксперименте было затруднено в связи с тем, что предельно допустимая амплитуда импульса тока для используемого датчика составляла около 200 А. Это не позволяло проводить измерения тока на расстояниях ближе 10 см от выходного окна диода. В связи с этим для оценки пикового тока было исследовано угловое распределение плотности тока пучка и распределение плотности тока пучка вдоль оси системы. Знание углового распределения позволяет перейти от локальной плотности тока на оси к полному току путем интегрирования [26].

Угловое распределение пиковой плотности тока, полученное на расстоянии $R = 50$ см от окна с помощью коллекторного датчика, показано на рис. 5а. Плотность тока определялась как отношение тока, измеренного коллекторным датчиком, к площади его апертуры. Полный угол расхождения пучка составил около 90 градусов. Расчет полного тока основан на том, что угловое распределение представляет собой распределение плотности тока пучка на поверхности сферы радиусом R , вследствие чего полный ток можно найти интегрированием распределения по поверхности сферы. При этом на основании данных рис. 4 допустимо считать распределение осесимметричным.

Тогда при совпадении оси пучка и оси отсчета азимутального угла сферической системы координат интеграл будет записываться следующим образом:

$$I = 2\pi R^2 \int_0^{\theta_{\max}} J(\theta) \sin \theta d\theta, \quad (3)$$

где I – полный ток пучка, θ – азимутальный угол, R – радиус сферы (расстояние от выходного окна до датчика), $J(\theta)$ – осесимметричное распределение плотности тока по азимутальному углу, $\theta_{\max}$ – половинный угол расхождения пучка. Численное интегрирование для распределения, представленного на рис. 5а, показало, что (3) можно представить как:

$$I = 0.783 \times R^2 J_0, \quad (4)$$

где R (м) – расстояние до окна; I (кА) – полный ток пучка на расстоянии R ; J_0 (кА/м²) – плотность тока пучка на оси системы на расстоянии R от окна; 0.783 – безразмерный коэффициент, характеризующий форму углового распределения пучка.

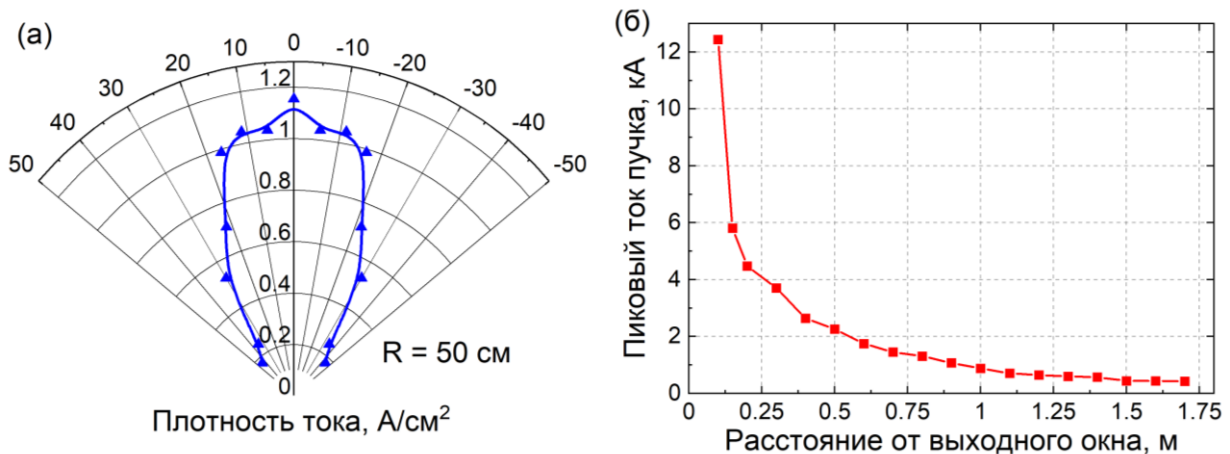


Рис. 5. Угловое распределение плотности тока пучка на расстоянии 50 см (а) от окна диода; зависимость полного тока пучка от расстояния до окна (б).

Исследование распределения пиковой плотности тока вдоль оси системы показало, что плотность тока снижается при увеличении расстояния R приблизительно по закону $1/R^3$, что говорит о наличии дополнительного механизма снижения пиковой плотности тока помимо простого расхождения в

фиксированный телесный угол, соответствующего зависимости $1/R^2$. В качестве таких механизмов могут выступать, например, взаимодействие электронов с молекулами воздуха и кинематическое расплывание электронного сгустка из-за широкого энергетического спектра, получаемого при ускорении электронов колоколообразным импульсом напряжения. Зависимость полного тока пучка от расстояния, полученная в соответствии с (4), показана на рис. 5б. Видно, что рассчитанное значение амплитуды полного тока пучка быстро падает при удалении от выходного окна диода. Это является следствием того, что измеренные значения плотности тока при удалении от окна снижаются пропорционально $1/R^3$, в связи с чем, как следует из (4), рассчитанное значение снижается приблизительно как $1/R$. Максимальное значение амплитуды тока, полученное на наименьшем из исследованных расстояний до окна (10 см), составило 12.4 кА, что соответствует диапазону пиковых токов, полученному при моделировании. При анализе осциллограмм было отмечено, что импульс тока, измеренный коллекторным датчиком на оси системы, действительно испытывает сильное кинематическое расплывание с увеличением расстояния. В связи с этим значения полного тока, приведенные на рис. 5б, можно считать оценками снизу.

За время эксперимента на диод было подано около 100 одиночных импульсов, после чего было отмечено значительное возрастание амплитуды отраженной от диода волны напряжения. Это говорит об изменении внутренней геометрии диода и соответствующем возрастании его импеданса. Вскрытие диода показало, что центральный фольговый катод (см. рис. 1) стал короче на 1 мм по сравнению с первоначальной длиной, в результате чего его торец сравнялся с торцом внешнего фольгового катода. Укорочение катода свидетельствует о его сильной электрической эрозии при работе системы. Укорочение внешнего катода составило не более 0.2 мм по сравнению с первоначальной длиной. Следы эрозии наблюдаются на торцах обоих катодов и на поверхности градиентного экрана, обращенной к выходному окну. Несмотря на это, запыления стеклянного изолятора диода не наблюдалось, и за время проведения экспериментов не было отмечено пробоев в диоде, что говорит

о принципиальной способности подводящей линии, стеклянного разделительного изолятора, и вакуумных изоляционных промежутков диода выдерживать воздействие импульсов напряжения с амплитудой 2-3 МВ при длительности импульса около 100 пс (электрические поля около 5-6 МВ/см в подводящей линии и 8-10 МВ/см на градиентном экране).

Заключение

Проведенные эксперименты показали принципиальную возможность получения сильноточного электронного пучка пикосекундной длительности с применением компактного ускорительного диода ИМАЗ-150Э и твердотельного генератора S-100 с мощностью выходного импульса 100 ГВт при длительности около 100 пс. Максимальная энергия электронов, оцененная с помощью алюминиевых фильтров, составила около 3.2 МэВ. Установлено, что вывод пучка в атмосферу вызывает интенсивное свечение на расстоянии до 13 см от выходного окна и генерацию сопутствующего рентгеновского излучения. Наибольшие трудности при регистрации параметров пучка были сопряжены с измерением амплитуды импульса тока. Длительность импульса тока составила около 85 пс, а оценка амплитуды тока на основании интегрирования углового распределения плотности тока пучка составила около 12 кА. Таким образом, пиковая мощность пучка составляет около 40 ГВт.

Было установлено, что ограничивающим ресурс диода фактором является интенсивная эрозия фольгового катода, из-за которой наблюдалось значительное изменение импеданса диода после подачи около 100 одиночных импульсов. Тем не менее, отсутствие пробоев в системе говорит о принципиальной способности конструктивных элементов диода выдерживать приложение напряжения около 2-3 МВ при длительности импульса около 100 пс.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-19-00407, <https://rscf.ru/project/24-19-00407/>.

Литература

1. Vaisburd D. I. and Evdokimov K. E. Creation of excitations and defects in insulating materials by high-current-density electron beams of nanosecond pulse duration // *Phys. Status Solidi C*. – 2005. – V. 2. – No. 1. – P. 216–222.
2. Lushchik A., Lushchik Ch., Schwartz K., et al. Creation and clustering of Frenkel defects at high density of electronic excitations in wide-gap materials // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*. – 2012. – V. 277. – P. 40–44.
3. Комяк Н. И., Морговский Л. Я., Пеликс Е. А. Импульсные рентгеновские аппараты серии МИРА // *Дефектоскопия*. – 1978. – № 3. – С. 108-110.
4. Solomonov V. I., Michailov S. G., Lipchak A. I., et al. CLAVI Pulsed Cathodoluminescence Spectroscopy // *Laser Physics*. – 2006. – V. 16. – No. 1. – P. 126-129.
5. Rostov V. V. and Yalandin M. I. Modeling of a multi-gigawatt Ka-band superradiant source with a slow traveling wave // *IEEE Electron device Lett.* – 2024. – V. 45. – No. 7. – P. 1329-1332.
6. Morton D., Banister J., Levine J., et al. A 2MV, < 300ps Risetime, 100Hz Pulser for Generation of Microwaves // *Proc. of the IEEE Int. Power Modulator and High Voltage Conf.* – 23-27 May 2010. – Atlanta, GA. – P. 361-364.
7. Ginzburg N. S., Fedotov A. E., Kuzikov S. V., et al. Demonstration of High-gradient Electron Acceleration Driven by Subnanosecond Pulses of Ka-band Superradiance // *Phys. Rev. Accel. Beams*. – 2023. – V. 26. – No. 6. – Art. No. 060401.
8. Желтов К. А. Пикосекундные сильноточные электронные ускорители (М.: Энергоатомиздат, 1991).
9. Лойко Т. В., Недойкаш Ю. М., Павловская Н. Г. и др. Источник импульсов электронного и рентгеновского излучений субнаносекундной длительности // *ПТЭ*. – 2000. – №. 4. – P. 86-88.
10. Юрьев А. Л., Эльяш С. Л., Лойко Т. В. и др. Сильноточный субнаносекундный ускоритель электронов с газонаполненным формирователем // *ПТЭ*. – 2017. – №. 6. – С. 78-82.

11. Lobanov L. N., Sadykova A. G., Sharypov K. A., et al. Cascade acceleration of an explosive-emission subnanosecond electron beam // *Phys. Plasmas*. –2025. – V. 32. – No. 3. – Art. no. 033103.
12. Ulmaskulov M. R., Shunailov S. A., Sharypov K. A., and Yalandin M. I. Multistage converter of high-voltage subnanosecond pulses based on nonlinear transmission lines // *J. Appl. Phys.* – 2019. – V. 126. – No. 8. – Art. no. 084504.
13. Alichkin E. A., Pedos M. S., Ponomarev A. V., et al. Picosecond solid-state generator with a peak power of 50 GW // *Rev. Sci. Instrum.* – 2020. – V. 91. – No. 10. – Art. no. 104705.
14. Patrakov V. E., Pedos M. S., Ponomarev A. V., et al. A 100 GW, 100 ps solid-state pulsed power system based on semiconductor opening switch generator and magnetic compression lines // *Rev. Sci. Instrum.* – 2024. – V. 95. – No. 8. – Art. no. 084709.
15. Mesyats G. A., Rukin S. N., Shpak V. G., and Yalandin M. I. // *Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics 4* (IEEE Cat. No. 98EX112). – 1999. – P. 1-9.
16. Патраков В. Е., Рукин С. Н. Собственная волноводная дисперсия ферритовых коаксиальных линий // *Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*. – 16-21 Sept. 2024. – Tomsk: TPU Publishing House, 2024. – P. 457-462.
17. Patrakov V. E. Numerical Investigation of Higher Order Propagation Modes in High-Power Magnetic Compression Lines // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2025. – V. 53. – No. 7. – P. 1531-1542.
18. Patrakov V. E., Rukin S. N., Shunailov S. A., and Yalandin M. I. Simulation of the Output Stage of Picosecond Multi-Gigawatt Electron Accelerator // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2024. – V. 88. – No. Suppl 4. – P. S538-S545.
19. Павловская Н. Г., Кудрявцева Т. В., Дронь Н. А. и др. Малогабаритная трубка с холодным катодом для получения быстрых электронов // *ПТЭ*. – 1973. – № 1. – С. 22-24.

20. Reutova A. G., Sharypov K. A., Shpak V. G., et al. Current probes for picosecond electron beams // Proc. of 15-th Int. Symp. on High Current Electronics. – 2008. – P. 111-114.
21. Yalandin M. I., Lobanov L. N., Osipenko E. A., et al. Picosecond resolution collector sensor for diagnostics of subrelativistic electron bunches // IEEE Trans. Instrum. Measur. – 2023. – V. 72. – Art. no. 1008808.
22. Здешиц В. М., Тарасов М. Д., Цукерман В. А. Спектрально-временные исследования свечения воздуха, возбуждаемого быстрыми электронами // ЖТФ. – 1989. – Т. 59. – № 5. – С. 51–55.
23. Желтов К. А., Зданович И. Г., Нечаев М. Н. Динамика электронного пучка пикосекундного сильноточного ускорителя // ЖТФ. – 1999. – Т. 69. – №. 5. – С. 111-115.
24. Баранов В. Ф. Дозиметрия электронного излучения (М.: Атомиздат, 1974).
25. Ivey H. F. Space charge and transit time considerations in planar diodes for relativistic velocities // J. Appl. Phys. – 1952. – V. 23. – No. 2. – P. 208-211.
26. Эльяш С. Л., Лойко Т. В., Юрьев А. Л., Селезнев А. А. Регистрация импульсов электронного излучения, генерируемого субнаносекундным ускорителем // ПТЭ. – 2019. – №. 4. – С. 79-83.

Для цитирования:

Патраков В.Е., Лобанов Л.Н., Педос М.С., Рукин С.Н., Шарыпов К.А., Шунайлов С.А., Тимошенков С.П., Яландин М.И. Пикосекундный ускоритель электронов с энергией 3 МэВ и мощностью 40 ГВт. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.14>