

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.316.933.6

АМПЛИТУДА И ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ИМПУЛЬСА ТОКА СВЕРХКОРОТКОГО
ЛАВИННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПРИ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ
АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2012 г. И. Д. Костыря, Д. В. Рыбка, В. Ф. Тарасенко

*Институт сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 02.06.2011 г.

После доработки 11.07.2011 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований параметров (амплитуды и длительности) сверхкороткого лавинного электронного пучка (с.л.э.п.), генерируемого в воздухе атмосферного давления. Показано, что длительность импульса тока пучка за фольгой со всей площади анодной фольги больше, чем с малых площадок, и зависит от конструкции катода. За Al-фольгой толщиной 10 мкм зарегистрировано $\sim 6 \cdot 10^{10}$ электронов, что соответствует при длительности импульса на полувысоте ~ 100 пс амплитуде с.л.э.п. ~ 100 А. При использовании анода из медной фольги толщиной 20 мкм получена экспозиционная доза рентгеновского излучения за импульс ~ 1.8 мР. Подтверждено, что длительность импульса с.л.э.п. на полувысоте не превышает ~ 50 пс с малых площадок фольги (диаметр ~ 7 мм и менее).

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] описан ускоритель электронов с газовым диодом СЛЭП-150. За счет оптимизации конструкции изолятора газового диода и катода в воздухе атмосферного давления за Al-фольгой толщиной 10 мкм, которая армировалась сеткой с высокой прозрачностью, было получено до $5 \cdot 10^{10}$ электронов. Если предположить, что длительность импульса тока на полувысоте ~ 100 пс, то это соответствует амплитуде с.л.э.п. ~ 80 А. Увеличение тока пучка убегающих электронов было достигнуто за счет оригинальной конструкции катода, разработанного для ускорителей с газовыми диодами [2]. Для увеличения общей длины кромки катода с малым радиусом кривизны при минимальном диаметре катода в качестве эмиттеров были использованы параллельно установленные проволочки.

В то же время параметры с.л.э.п., полученные в работах других научных групп, существенно отличаются от параметров тока пучка, которые приведены в статье [1] и обзоре [3]. Например, в работе [4], опубликованной в 2010 г., сообщалось о получении за фольгой всего $6 \cdot 10^8$ электронов, а амплитуда тока пучка не приводилась. При этом в работах [1, 4] использовался одинаковый обостренный разрядник Р-43.

Различие в числе электронов тока пучка связано со следующими существенными различиями в установках, описанных в [1, 4]. В [4] применялся плоский изолятор сравнительно большого диаметра (10 см), который увеличивал размеры газо-

вого диода и его индуктивность. Кроме того, использовался конический катод с одним локализованным эмиссионным центром, конструкция которого, как показано в [3], для генерации с.л.э.п. является неоптимальной. Эти отличия, по нашим оценкам, приводили к удлинению фронта импульса напряжения, потерям части тока пучка на боковых стенках газового диода и меньшей эмиссионной способности катода.

Также в известной литературе приводятся различные данные о длительности импульса тока пучка убегающих электронов при субнаносекундном пробое в воздухе атмосферного давления. Длительность импульса тока пучка в [4] при измерениях осциллографом TDS 3052B (500 МГц и 5 выборки за наносекунду) составила на полувысоте 0.8 нс, что существенно превышает реальную длительность. В работе [5] сообщалось, что длительность импульса тока пучка убегающих электронов, генерируемого при пробое воздуха атмосферного давления, не превышает 50 пс на полувысоте. В [5] приводится осциллограмма тока пучка за фольгой с длительностью импульса на полувысоте 45 пс, которая является минимальной для всех известных работ. При этой длительности импульса тока пучка его амплитуда составила 10–20 А, что соответствует $(3–6) \cdot 10^9$ электронов в пучке. Длительность тока пучка 45 пс была получена при ослаблении тока коллиматором, что позволило подключать коллектор без ослабителя непосредственно к осциллографу. В наших работах (см. например, [3]) минимальная длитель-

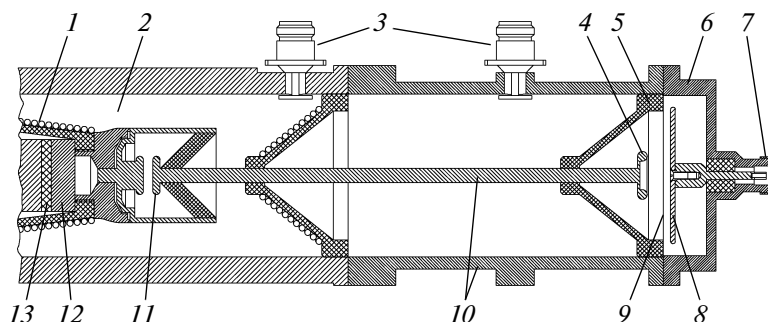


Рис. 1. Схема генератора СЛЭП-150. 1 – вторичная обмотка высоковольтного трансформатора; 2 – формирующая коаксиальная линия; 3 – емкостный делитель напряжения; 4 – катод; 5 – изолятор газового диода; 6 – корпус коллектора; 7 – радиочастотный разъем N-типа; 8 – приемная часть коллектора; 9 – анодная фольга; 10 – дополнительная коаксиальная линия; 11 – обострительный разрядник P-43; 12 – ферритовое кольцо; 13 – пластина из диэлектрика.

ность импульса с.л.э.п. составляла ~ 80 пс с малой площадки анодной фольги и ограничивалась временным разрешением осциллографа DPO 70604. Однако при регистрации тока пучка со всей поверхности фольги [6], при использовании SF₆ [3] и уменьшении амплитуды импульса напряжения [7] длительность импульса с.л.э.п. увеличивалась.

Цель данной работы – провести измерения амплитуды и длительности с.л.э.п., генерируемого в воздухе атмосферного давления, с помощью осциллографов с высоким временным разрешением и определить оптимальные размеры катода, позволяющего получать наибольшие амплитуды с.л.э.п.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА И МЕТОДИКИ

Все эксперименты были проведены с генератором СЛЭП-150, который был специально разработан для получения пучков электронов в газовых диодах [1]. Внутренним электродом высоковольтной формирующей коаксиальной линии генератора являлся корпус обострительного разрядника P-43. Это позволило уменьшить длину

формирующей линии и получить импульс напряжения в передающей линии с амплитудой в падающей волне ~ 140 кВ и длительностью на полувывоте ~ 1 нс. Длительность фронта импульса напряжения определялась обострительным разрядником и составляла ~ 250 пс на уровне 0.1–0.9. Формирующая линия имела волновое сопротивление ~ 20 Ом.

Применялись две сборки генератора. В первой сборке газовый диод устанавливался на минимальном расстоянии от обострительного разрядника и соединялся с ним короткой коаксиальной линией. Емкостный делитель напряжения был установлен около газового диода в выходной части генератора, которая заполнялась трансформаторным маслом. Расстояние от емкостного делителя до фланца газового диода, к которому крепилась фольга, равнялось 22 мм.

Во второй сборке между газовым диодом и обострительным разрядником устанавливалась дополнительная коаксиальная линия, которая заполнялась трансформаторным маслом (рис. 1). Длина дополнительной коаксиальной линии равнялась 13.3 см, а ее волновое сопротивление составляло 100 Ом. В коаксиальной линии был установлен второй емкостный делитель напряжения, что позволяло измерять падающую и отраженную волны напряжения и восстанавливать напряжение на промежутке [3].

Плоский анод газового диода был выполнен из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм, которая со стороны коллектора армировалась сеткой с прозрачностью 90%. Сетка состояла из стальных проволочек $\varnothing 30$ мкм, натянутых на жестком каркасе с шагом 300 мкм. При регистрации рентгеновского излучения алюминиевая фольга заменялась медной толщиной 20 мкм.

В качестве катода в газовом диоде применялись трубка $\varnothing 6$ мм из фольги толщиной 100 мкм (катод № 1) и катоды, подобные показанному на рис. 2 (катод № 2). Катоды изготавливались из нержавеющей стали. Как было установлено в [8], с

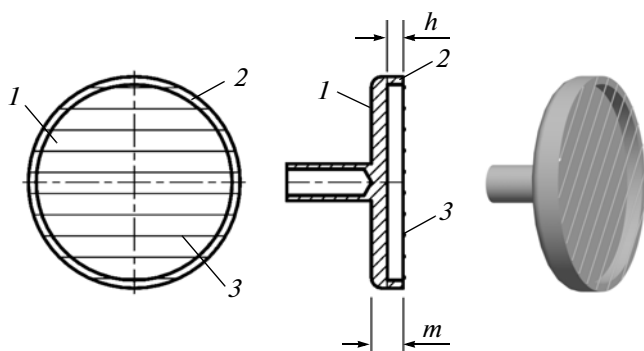


Рис. 2. Конструкция катода № 2 и его внешний вид. 1 – круглая пластина; 2 – кольцо; 3 – проволочки.

катодами из нержавеющей стали достигаются наибольшие амплитуды тока с.л.э.п. Основой катодов № 2 служили круглая пластинка, кольцо и проволочки из нержавеющей стали. Проволочки приваривались к кольцу с различным шагом и располагались параллельно. При испытаниях катода № 2 была проведена оптимизация диаметра проволочек, расстояния между проволочками, диаметра кольца и расстояния между круглой пластинкой и проволоками. Также был испытан катод, в котором проволочки устанавливались в виде сетки с квадратными ячейками.

Ток пучка (или число электронов) регистрировался с помощью коллекторов с диаметром приемной части 3, 5, 20 и 56 мм. Волновое сопротивление коаксиальной части коллекторов составляло 50 Ом. Полное число электронов пучка за фольгой измерялось коллектором с диаметром 56 мм. Кроме того, использовался коллектор-шунт сопротивлением 3 Ом с диаметром приемной части 50 мм, который был изготовлен из ~100 чип-резисторов. Временное разрешение коллектора с диаметром приемной части 3 мм составляло ~50 пс [9].

Для регистрации сигналов с емкостного делителя и коллекторов применялись осциллографы MSO 71254 (12.5 ГГц и 50 выборок в нс), TDS 6154C (15 ГГц и 40 выборок в нс) и DPO 70604 (6 ГГц и 25 выборок в нс). Следует отметить, что данный класс осциллографов содержит математический пакет, который позволяет автоматически проводить статистическую обработку измеряемых величин: минимальные, максимальные и средние значения, стандартное отклонение и распределение.

Электрические сигналы с емкостных делителей, шунтов и коллекторов снимались с помощью радиочастотных коаксиальных разъемов N-типа. Для ослабления электрических сигналов применялись аттенюаторы 142-NM фирмы Barth Electronics. Длина измерительных кабелей выбиралась минимальной. Как известно, при увеличении длины регистрационного кабеля длительность субнаносекундного импульса увеличивается, а его амплитуда уменьшается, см., например, данные по увеличению длительности с.л.э.п. в [3]. В работах [1, 3] и данной использовались радиочастотные кабели 5D-FB длиной ~1.3 м, волновым сопротивлением 50 Ом, которые имели ослабление 63 дБ на 100 м для сигнала с частотой 5 ГГц. Представленные ниже результаты получены в режиме однократных импульсов.

Экспозиционная доза рентгеновского излучения измерялась дозиметрами Agrow-Tech, Inc (Model 138), которые устанавливались на расстоянии 2–3 мм от анодной фольги. Чувствительность дозиметра при энергии квантов 16 кэВ составляет 80% от максимальной, достигает максимума при энергии квантов ~30 кэВ и существенно не изменяется в диапазоне энергий рентгенов-

ских квантов от 30 кэВ до 1 МэВ. Отметим, что при измерении экспозиционной дозы с тонкими анодными фольгами на дозиметр попадал электронный пучок, который мог влиять на показания за счет проникновения через корпус дозиметра высокоэнергетичных электронов. Кроме того, в регистрируемую экспозиционную дозу вносили вклад рентгеновские кванты, полученные при торможении электронов в корпусе дозиметра. Данные обстоятельства не учитывались в наших измерениях по следующим причинам. Показания дозиметра при замене Al-фольги толщиной 15 мкм на медную фольгу толщиной 20 мкм увеличились в 2–3 раза, а ток пучка при этом уменьшался в 5–10 раз. В этих условиях вклад пучка электронов в измеряемую экспозиционную дозу не превышал 30%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основываясь на результатах работы [1], где было достоверно установлено влияние давления и влажности воздуха на амплитуду или число электронов с.л.э.п., основные эксперименты проводились при стабильном давлении и влажности воздуха в помещении. Наибольшие амплитуды с.л.э.п. и экспозиционные дозы рентгеновского излучения были получены при малой влажности атмосферного воздуха (<40%). Проведенные исследования также подтвердили наши предыдущие результаты [8], что для получения максимальных амплитуд с.л.э.п. лучше использовать катоды из нержавеющей стали.

Кроме того, было проведено сравнение наибольших амплитуд тока пучка в сборках ускорителя СЛЭП-150 с дополнительной коаксиальной линией и без нее. В случае катода № 1 амплитуды с.л.э.п. при обеих сборках генератора были одинаковы. Использование двух емкостных делителей в сборке с дополнительной коаксиальной линией позволило оценить напряжение на промежутке по измерениям падающей и отраженной волн напряжения [3]. Наибольшие амплитуды тока пучка с катодом № 2 были получены без использования дополнительной коаксиальной линии. Установка дополнительной линии уменьшала максимальный ток разряда в газовом диоде, что, по-видимому, и приводило к уменьшению максимального тока с.л.э.п.

В данной работе была проведена калибровка всех коллекторов для определения их максимального разрешения. При использовании коллектора с диаметром приемной части 3 мм минимальная длительность импульса с.л.э.п. на полувысоте за диафрагмами с малыми диаметрами (7 мм и менее) составила ~50 пс (рис. 3а, 3б). Плотность тока пучка, регистрируемая этим коллектором с катодом № 1, достигала 20 А/см² при длительности импульса с.л.э.п. на полувысоте ~50 пс.

При использовании коллектора с диаметром приемной части 5 мм минимальная длительность импульса с.л.э.п. на полувысоте увеличилась. При использовании осциллографов TDS 6154C и MSO 71254 она составила 66 и 68 пс соответственно (рис. 3в, 3г), а с коллектором диаметром 20 мм – 77 пс (рис. 3д).

Увеличение длительности импульса при увеличении диаметра приемной части коллекторов можно связать как с ухудшением разрешающей способности коллекторов, так и с увеличением длительности импульса тока пучка с большей площади фольги. Проведенные эксперименты показывают, что при длительности импульсов тока пучка >50 пс на полувысоте с помощью коллектора с диаметром приемной части 3 мм можно измерять его длительность. Соответственно при диаметре приемной части 5 и 20 мм можно измерять пучки электронов с длительностью импульса на полувысоте >68 и >77 пс.

С катодом № 2 наблюдалось увеличение длительности регистрируемого импульса. Так, при приемной части коллектора 2 см длительность импульса с.л.э.п. на полувысоте с катодом № 2 ~91 пс (рис. 3). Таким образом, увеличение эмитирующей поверхности катода № 2 за счет увеличения его диаметра и применения проволок привело к увеличению длительности импульса, которая при регистрации только с центральной части фольги $\varnothing 2$ см была ~90 пс.

Точное измерение длительности импульса с.л.э.п. на полувысоте со всей поверхности фольги, которая служит анодом газового диода и имеет для генератора СЛЭП-150 диаметр ~50 мм, является весьма сложной задачей. Как мы показали ранее [3], при измерениях формы импульса коллектором с малым диаметром приемной части регистрируется только малая часть электронов за фольгой. Длительность импульса с.л.э.п. на полувысоте за диафрагмами с малыми диаметрами (7 мм и менее) составила в данных экспериментах не более 50 пс с катодом № 1. При увеличении диаметра приемной части коллектора длительность импульса с.л.э.п. на полувысоте увеличивается, но при этом ухудшается и временное разрешение коллектора.

Для уточнения длительности импульса с.л.э.п. на полувысоте были проведены измерения задержки импульса с.л.э.п. относительно сигнала с емкостного делителя. Коллектор с диаметром приемной части 3 мм устанавливался по центру или на периферии анодной фольги. В этих экспериментах использовался катод № 1, с которым были зарегистрированы меньшие длительности импульсов тока пучка за фольгой. На рис. 4 приведены осциллограммы с.л.э.п., зарегистрированные при установке коллектора на оси газового диода и на расстоянии 20 мм от оси. Там же приведены осциллограммы падающей волны импульса напря-

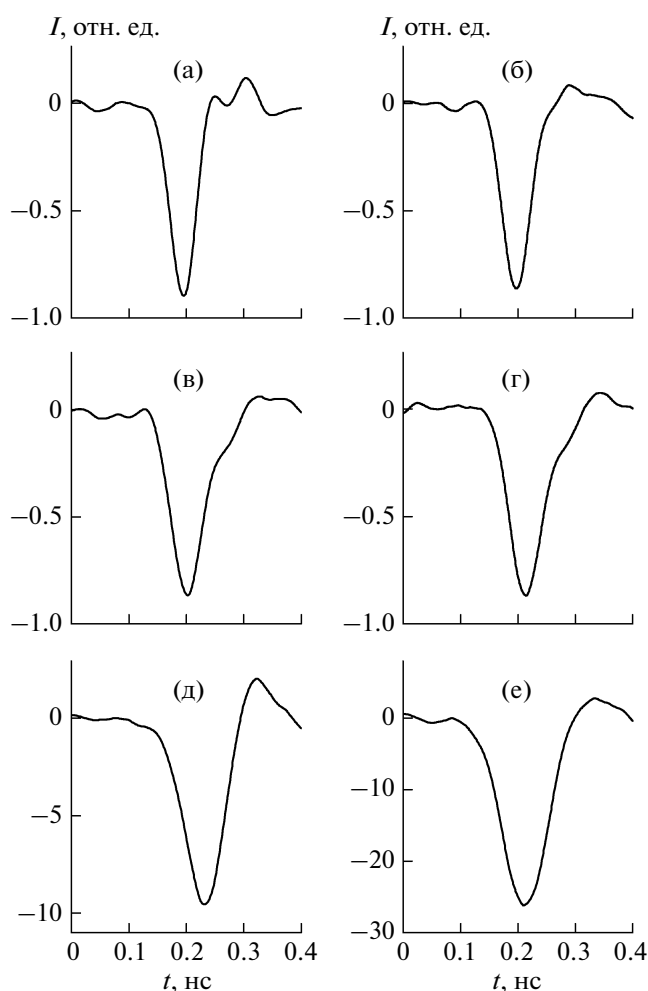


Рис. 3. Импульсы тока пучка при использовании катодов № 1 (а–д) и № 2 (е) с различных коллекторов: а, б – приемная часть коллектора $\varnothing 3$ мм; в, г – $\varnothing 5$ мм; д, е – $\varnothing 20$ мм; а, в, д, е – сигналы получены на осциллографе TDS 6154C (15 ГГц и 40 выборок в нс), б, г – на MSO 71254 (12.5 ГГц и 50 выборок в нс).

жения, от этих сигналов запускался осциллограф TDS 6154C в обоих опытах. Осциллограф работал в режиме усреднения и каждая из осциллограмм является средней из 50 импульсов. На рис. 4 импульсы тока пучка и напряжения привязаны друг к другу с пикосекундной точностью. Осциллограммы импульса напряжения, тока разряда и тока пучка для катода № 1 и генератора СЛЭП-150 с дополнительной линией, синхронизованные во времени, приведены также в обзоре [3].

На рис. 4 видна высокая стабильность работы ускорителя СЛЭП-150, что следует из малого изменения длительности усредненного импульса тока пучка относительно импульса с.л.э.п., который регистрируется за один импульс. Длительность импульса с.л.э.п. на полувысоте (средняя за 50 импульсов) составила в центре фольги 60 пс и на расстоянии 20 мм от центра 53 пс.

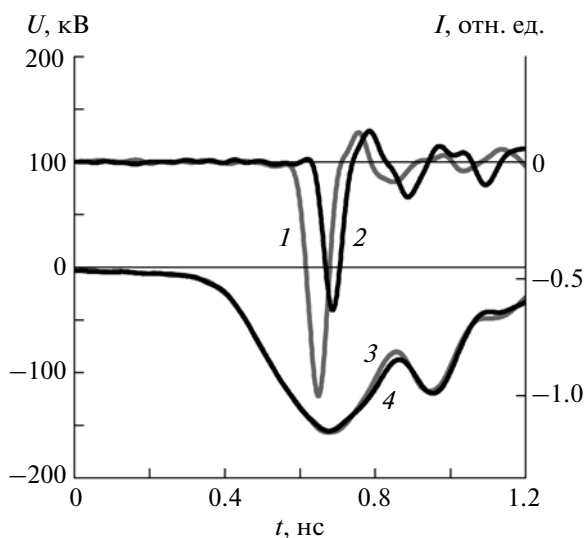


Рис. 4. Импульсы тока пучка (1, 2) и напряжения (3, 4). Первая сборка генератора, осциллограф TDS 6154C: 1 – с коллектора $\varnothing 3$ мм, установленного по центру фольги газового диода; 2 – с коллектора $\varnothing 3$ мм, установленного на расстоянии 20 мм от центра анодной фольги; 3, 4 – с делителя напряжения для сигналов 1 и 2 соответственно.

Главный результат, который следует из рис. 4, – это задержка импульса тока пучка при удалении коллектора на 20 мм от центра. Начало тока пучка стало запаздывать на 50 пс, а положение максимума тока с.л.э.п. – на ~ 40 пс. Амплитуда тока пучка с коллектора, установленного на оси газового диода, составила ~ 1.4 А, а на расстоянии 20 мм от центра фольги – 50 мА. Отметим, что площадь кольца фольги шириной 3 мм, удаленного на 18.5 мм от центра фольги, в 53 раза больше площади приемной части коллектора $\varnothing 3$ мм. Если допустить, что амплитуды тока пучка в центре и с поверхности фольги, имеющей форму кольца шириной 3 мм и удаленной на 18.5 мм от центра, одинаковы, то общая длительность импульса с.л.э.п. на полувысоте составит ~ 78 пс.

Подобные результаты были получены и с осциллографом MSO 71254, где амплитуда и задержка импульса с.л.э.п. регистрировались при дискретном перемещении коллектора $\varnothing 3$ мм от оси газового диода с шагом ~ 2 мм. Измерения проводились для 12 точек, задержка между максимумами тока пучка росла при удалении от центра фольги и достигла ~ 40 пс. Амплитуда импульса тока с коллектора при удалении от центра фольги также уменьшалась. Однако значительная доля тока с.л.э.п. регистрировалась на удалении от центра фольги за счет увеличения площади фольги.

Эксперименты по измерению задержки тока с.л.э.п. с различных участков фольги относительно импульса напряжения, как мы уже отмечали,

были проведены при использовании катода № 1, с которым регистрировались наименьшие длительности импульса с.л.э.п. При использовании катода № 2 длительность импульса, регистрируемая коллектором с диаметром приемной части 20 мм, была больше, чем с катодом № 1 (рис. 3д, 3е). Длительность импульса с.л.э.п. с катодом № 2 возросла до 91 пс, и этот рост обусловлен увеличением длительности тока пучка, а не конструкцией коллектора. С катодом № 1 и тем же коллектором длительность импульса составила 77 пс на полувысоте. Таким образом, реальная длительность импульса тока с.л.э.п. на полувысоте со всей площади фольги превышает 50 пс и зависит от конструкции катода.

Исследования различных конструкций катодов показали, что катоды, подобные приведенным в работе [2], позволяют получать наибольшие амплитуды с.л.э.п. Поэтому основное внимание было уделено оптимизации размеров данного катода. На рис. 2 показан катод, с помощью которого за фольгой газового диода было получено до $6.2 \cdot 10^{10}$ электронов. Если предположить, что длительность импульса с.л.э.п. на полувысоте ~ 100 пс, то амплитуда тока пучка за фольгой составляет ~ 100 А.

Увеличение амплитуды с.л.э.п. было достигнуто за счет оптимизации зазора h (рис. 2) между проволочками и пластинкой из нержавеющей стали (оптимальный $h = 1.5$ мм). Стальные проволочки 3 у оптимального катода имели диаметр 0.2 мм, были установлены на расстоянии 4 мм друг от друга и крепились к стальному кольцу с толщиной стенки 1 мм. Диаметр катода равнялся 40 мм. Также, по сравнению с катодом в [1], была уменьшена его толщина t до 3 мм. Применение сетчатого катода, в котором на катоде № 2 перпендикулярно имеющимся проволочкам устанавливались дополнительные проволочки с теми же диаметром и шагом, не давало существенного ($>10\%$) увеличения амплитуды с.л.э.п. Отметим, что число электронов за фольгой с катодом № 1 было в 10 раз меньше, чем с катодом № 2, а с катодом, подобным катоду № 1, но с диаметром трубки 20 мм, было меньше в 5 раз.

Коллектором-шунтом с диаметром приемной части 50 мм, который располагался в воздухе атмосферного давления, было зарегистрировано $6.2 \cdot 10^{10}$ электронов за один импульс (рис. 5а). Максимальные амплитуды сигналов на этом коллекторе были ~ 250 В. На коллекторе с диаметром приемной части 56 см амплитуда сигнала превышала 1500 В, а длительность импульса по основанию была >1 нс (рис. 5б). Это приводило в воздухе атмосферного давления к шунтирующему разряду между приемной частью коллектора и фольгой. Увеличение длительности импульса тока пучка обусловлено увеличением емкости коллектора.

Для регистрации наибольших амплитуд с данным коллектором его внутренняя полость отка-

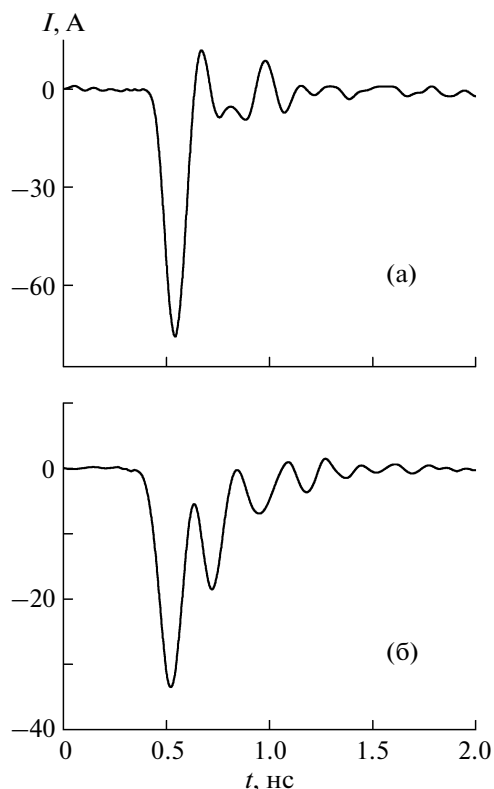


Рис. 5. Осциллограммы тока пучка: а — сигнал, регистрируемый коллектором-шунтом, б — сигнал, регистрируемый коллектором с приемной частью 56 мм.

чивалась форвакуумным насосом. В этом случае количество электронов, которое регистрировалось коллекторами с приемной частью 56 и 50 мм, совпадало. При определении среднего числа электронов в серии из произведенных подряд 60 импульсов было зарегистрировано $\sim 5 \cdot 10^{10}$ электронов при стандартном отклонении 20%.

С катодом № 2 были проведены измерения экспозиционной дозы рентгеновского излучения. Как было показано ранее [10], для увеличения экспозиционной дозы при “прострельном” аноде в газовых диодах надо использовать аноды из тяжелых металлов и подбирать толщину анода. В данных экспериментах мы использовали анод из медной фольги толщиной 20 мкм. Наибольшая экспозиционная доза составила 1.8 мР за импульс (средняя в серии из 20 импульсов при межэлектродном зазоре 5 мм). Оптимальный межэлектродный зазор для получения наибольшей амплитуды с.л.э.п. составляет ~ 4 мм. При увеличении межэлектродного зазора амплитуда с.л.э.п. уменьшается, но средняя энергия электронов увеличивается. Поэтому оптимальный межэлектродный зазор для получения наибольшей экспозиционной дозы был больше (~ 5 мм), чем для получения наибольшей амплитуды с.л.э.п.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования амплитуды и длительности тока с.л.э.п. показали, что оптимизация промежутка h между проволочками и задней стенкой катода, а также уменьшение общей толщины катода позволяют увеличить число электронов пучка за фольгой. При $h \sim 1.5$ мм за Al-фольгой толщиной 10 мкм зарегистрировано за импульс наибольшее количество электронов — $6.2 \cdot 10^{10}$, что соответствует при длительности импульса треугольной формы на полувысоте 100 пс амплитуде с.л.э.п. ~ 100 А.

Показано, что длительность импульса тока пучка за фольгой со всей площади анода больше, чем с малых площадок, и зависит от конструкции катода. Установлено, что задержка между фронтом импульса напряжения и максимумом амплитуды импульса с.л.э.п. для катода № 1 при удалении коллектора на 2 см от оси газового диода увеличивается на 40 пс. Подтверждено, что длительность импульса с.л.э.п. на полувысоте не превышает ~ 50 пс с малых площадок фольги (диаметр ~ 7 мм и менее). При использовании анода из медной фольги зарегистрирована экспозиционная доза рентгеновского излучения за импульс ~ 1.8 мР.

Авторы благодарят В.Г. Шпака за предоставление осциллографа TDS 6154С, сотрудника корпорации “Тектроникс” А. Стригуненко за предоставление осциллографа MSO 71254 и С.А. Шунайлова за помощь в экспериментах с осциллографом TDS 6154С. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 09-08-00030а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костыря И.Д., Бакирт Е.Х., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 2010. № 4. С. 84.
2. Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф. Патент RU на полезную модель 100694 U1 // БИ. 2010. № 35.
3. Tarasenko V.F., Baksh E.H., Burachenko A.G. et al. // Plasma Devices and Operation. 2008. V. 16. № 4. P. 267.
4. Бабич Л.П., Лойко Т.В. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 3. С. 287.
5. Месяц Г.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 4. С. 71.
6. Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Бакирт Е.Х. и др. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 21. С. 79.
7. Бакирт Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И. и др. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 1. С. 98.
8. Tarasenko V.F., Skakun V.S., Kostyrya I.D. et al. // Laser and Particle Beams. 2004. V. 22. № 1. P. 75.
9. Бакирт Е.Х., Балзовский Е.В., Климов А.И. и др. // ПТЭ. 2007. № 6. С. 100.
10. Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 2. С. 111.