

РЕГИСТРАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО СУБНАНОСЕКУНДНЫМ УСКОРИТЕЛЕМ

© 2019 г. С. Л. Эльяш^{а,*}, Т. В. Лойко^а, А. Л. Юрьев^а, А. А. Селезнев^а

^а РФЯЦ-ВНИИ экспериментальной физики

Россия, 607188, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

*e-mail: elyash@expd.vniief.ru

Поступила в редакцию 05.11.2018 г.

После доработки 05.11.2018 г.

Принята к публикации 03.12.2018 г.

Зарегистрированы характеристики электронного пучка, генерируемого субнаносекундным ускорителем с двойным обострением в схеме формирования импульса напряжения. Длительность импульса тока электронного пучка составила 240–270 пс, амплитуда тока ~ 1.5 кА, максимальная энергия электронов ~ 0.95 МэВ. Определены импульсные характеристики полупроводниковых детекторов рентгеновского излучения СППД29к и СППД29-02: длительности на полувысоте амплитуды $\tau_{0.5}$ составили соответственно $\sim 320 \pm 30$ пс и $\sim 450 \pm 30$ пс.

DOI: 10.1134/S0032816219030169

ВВЕДЕНИЕ

Для определения временного разрешения наносекундных детекторов импульсов электронного и тормозного излучения, аттестации и контроля работоспособности измерительных каналов в РФЯЦ-ВНИИЭФ разработан субнаносекундный ускоритель электронов с газонаполненным формирователем [1]. В качестве источника импульсов напряжения наносекундной длительности с амплитудой ~ 0.9 МВ использовался высоковольтный блок ускорителя АРСА. С помощью формирователя наносекундные импульсы преобразовывались в высоковольтные импульсы субнаносекундной длительности.

В настоящей работе напряжение на выходе высоковольтного блока было увеличено до 1.1 МВ и применено дополнительное обострение в схеме формирования, что позволило сократить длительность импульса электронного излучения при сохранении амплитуды тока электронного пучка.

СУБНАНОСЕКУНДНЫЙ ГАЗОНАПОЛНЕННЫЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ

Конструкция формирователя с двумя обостряющими разрядниками приведена на рис. 1. Формирователь, заполненный азотом до давления 4 МПа, устанавливается на выходном патрубке высоковольтного блока 1 ускорителя АРСА и содержит узел обострения 2, короткую накопительную линию 3 и ступенчатую линию, разделенную на секции 4, 5 и 6 с волновыми сопротивлениями 18, 36

и 60 Ом соответственно. Передающая линия подключена к ускорительной трубке 7.

Формирователь работает следующим образом. С высоковольтного блока ускорителя АРСА через развязывающую катушку индуктивности δ на формирующую линию 9 поступает импульс напряжения с длительностью фронта $\tau_f < 10$ нс. При пробое межэлектродного зазора первого обостряющего разрядника 10 происходит зарядка короткой накопительной линии 3 за время $\tau < 1$ нс. После зарядки линии до максимального напряжения ~ 1.1 МВ межэлектродный зазор второго обостряющего разрядника 12 между короткой накопительной и передающей линиями пробивается, и короткая накопительная линия разряжается на согласованную с ней первую секцию 4 передающей линии. Благодаря малой протяженности короткой накопительной линии в передающей линии происходит формирование субнаносекундного импульса напряжения с амплитудой, вдвое меньшей амплитуды зарядки короткой накопительной линии. Этот импульс через ступенчатую линию поступает на ускорительную трубку 7, вызывая генерацию электронного излучения.

Для газонаполненного формирователя специально разработана и изготовлена вакуумная отпаянная ускорительная трубка СНИТ-1000 с керамическим изолятором, предназначенная для эксплуатации в атмосфере сжатого газа. Она выполнена с распределенными волновыми параметрами и является частью секции 6 передающей линии с тем же волновым сопротивлением. Многоострыйный

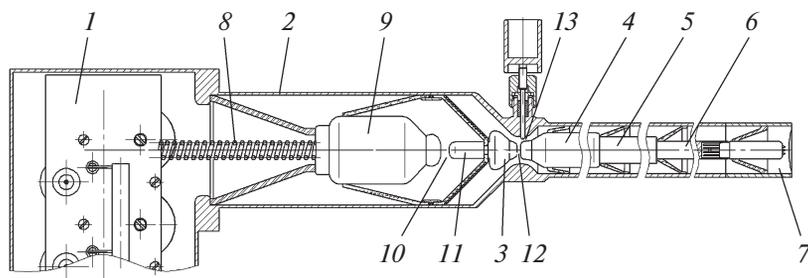


Рис. 1. Конструкция формирователя субнаносекундных импульсов. 1 – ускоритель АРСА; 2 – узел обострения; 3 – короткая накопительная линия; 4–6 – секции ступенчатой передающей линии; 7 – ускорительная трубка; 8 – развязывающая катушка индуктивности; 9 – формирующая линия; 10, 12 – обостряющие разрядники; 11 – промежуточная линия; 13 – срезающий разрядник.

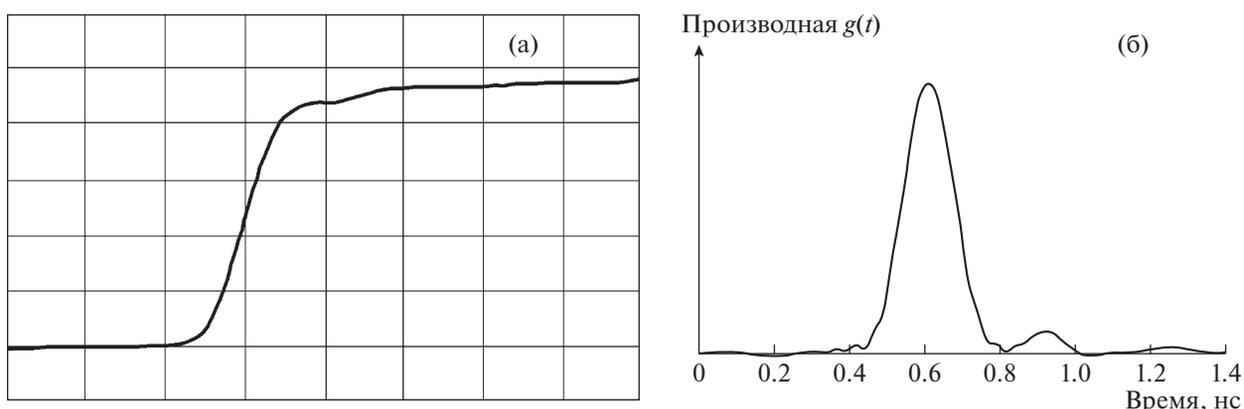


Рис. 2. Оциллограмма отклика сигнала калибратора с каналом регистрации (1 деление – 200 пс) (а) и производная этого сигнала (б).

взрывоэмиссионный катод имеет диаметр 10 мм. Анодом служит выходное окно трубки, выполненное из титановой фольги толщиной 50 мкм.

Возрастание волновых сопротивлений секций ступенчатой линии и рассогласованный режим работы трубки (сопротивление которой в несколько раз больше сопротивления последней секции передающей линии) приводят к росту амплитуды напряжения на трубке практически до значения амплитуды зарядки короткой накопительной линии. Срезающий разрядник 13 пробивается на максимуме напряжения субнаносекундного импульса, замыкая на себя избытки энергии высоковольтного блока ускорителя АРСА и укорачивая срез субнаносекундного импульса.

КАЛИБРОВКА КАНАЛОВ РЕГИСТРАЦИИ

Для регистрации импульсов субнаносекундной длительности использовались широкополосные каналы регистрации. Предварительно были измерены переходные характеристики кабеля и канала регистрации рентгеновского излучения с помо-

щью калибратора осциллографов Fluke 9500В (далее – калибратор) с различными импульсами напряжения в форме “ступеньки” с временами нарастания 25 ± 4 пс и 70 ± 15 пс.

Канал регистрации включал в себя кабельную линию связи (кабель РК-50-4-21 длиной ~5 м, кабель РК-50-2-22 длиной ~0.1 м) и разделительную емкость – керамический чип-конденсатор (0.01 мкФ, 2 кВ). Напряжение регистрировалось с помощью цифрового осциллографа с полосой пропускания 5 ГГц. Типичная оциллограмма отклика сигнала калибратора (время нарастания 25 пс) с каналом регистрации приведена на рис. 2а.

В импульсной технике при определении временного разрешения используют как переходную характеристику $h(t)$ – реакцию на воздействие ступенчатого импульса, так и импульсную $g(t)$ – реакцию на воздействие дельта-импульса. Они связаны соотношением

$$g(t) = dh(t)/dt.$$

За временное разрешение принимается ширина на полувысоте $\tau_{0,5}$ сигнала импульсной харак-

Таблица 1. Результаты измерений с калибратора (время нарастания 25 пс, 70 пс) и расчетов импульсных характеристик кабеля и канала регистрации

Калибратор	Объект измерений	Время нарастания фронта, пс		Длительность импульса продифференцированной переходной характеристики $\tau_{0,5\text{диф}}$, пс	Импульсная характеристика (расчет) $\tau_{0,5\text{имп}}$, пс
		$\tau_{0,1-0,9}$	$\tau_{0,2-0,8}$		
25 пс	Без кабеля	108	73	115	—
	РК-50-4-21	138	90	125	49
	Канал регистрации	203	125	160	111
70 пс	Без кабеля	113	77	120	—
	РК-50-4-21	144	94	130	50
	Канал регистрации	204	128	165	113

теристики $g(t)$, которая более информативна и наглядна по сравнению с переходной характеристикой $h(t)$ [2], поэтому измеренные переходные характеристики дифференцировались (рис. 2б). Результаты измерений и расчетов приведены в табл. 1.

Из таблицы следует, что разрешающее время кабеля РК-50-4-21 (длина ~ 5 м) составляет ~ 50 пс, а канала регистрации рентгеновского излучения ~ 110 пс.

АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ СУБНАНОСЕКУНДНОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

Для регистрации формы импульса тока использовался монитор с коаксиальным коллектором диаметром 3 мм. Подобное устройство, представленное в работе [3], имеет разрешение ~ 25 пс. Сигнал передавался по кабелю РК-50-4-21 длиной ~ 5 м и регистрировался осциллографом (полоса пропускания 5 ГГц).

Типичная осциллограмма импульса тока электронного пучка приведена на рис. 3а. Длительность зарегистрированного импульса тока электронов на полувысоте амплитуды находится в диапазоне 240–270 пс. Разброс длительности в основном связан с работой срезающего разрядника субнаносекундного ускорителя. С учетом временного разрешения тракта регистрации электронного пучка длительность импульса тока электронов на половине высоты амплитуды составила $\tau_{0,5} \approx 220 \pm 20$ пс.

Ток электронного пучка измерялся с помощью датчика тока, который состоял из коллектора в виде диска диаметром 12 мм и малоиндуктивного коаксиального шунта, собранного из двадцати параллельно соединенных высокочастотных чип-резисторов (общее сопротивление 0,3 Ом). Шунт располагался вблизи выходного окна трубки. В связи с ограничением амплитуды сигнала, ре-

гистрируемого быстродействующим цифровым осциллографом, возможно измерение только части полного тока пучка. Измерение проводилось с использованием диафрагмы диаметром 2 мм, расположенной на окне по оси трубки. Осциллограмма импульса тока электронного пучка приведена на рис. 3б. Амплитуда тока составила 45 А.

Для определения полного тока пучка необходимо знать распределение тока на выходном окне трубки. Для этого за один импульс регистрировался автограф пучка с помощью дозиметрической пленки СО ПД(Э)–1/10. Распределение то-

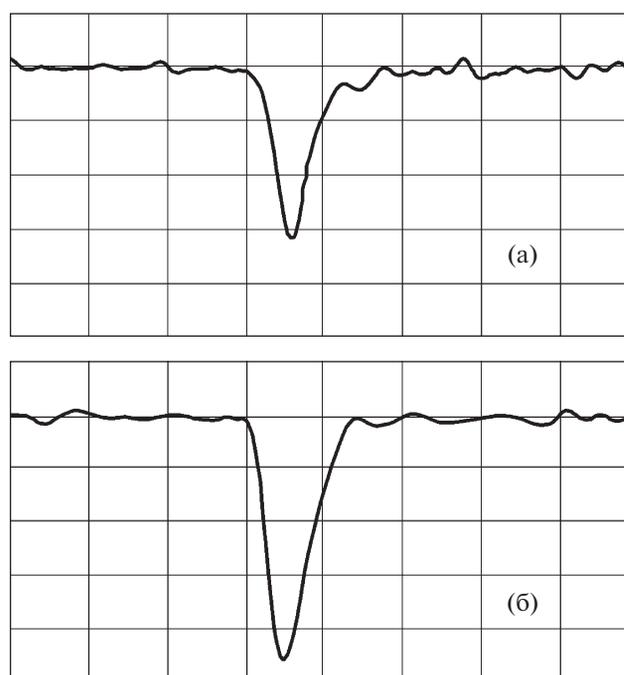


Рис. 3. Осциллограммы тока электронного пучка, полученные с использованием: а – монитора, б – датчика тока. Масштаб по горизонтали – 500 пс на деление, масштаб по вертикали – 1 В на деление.

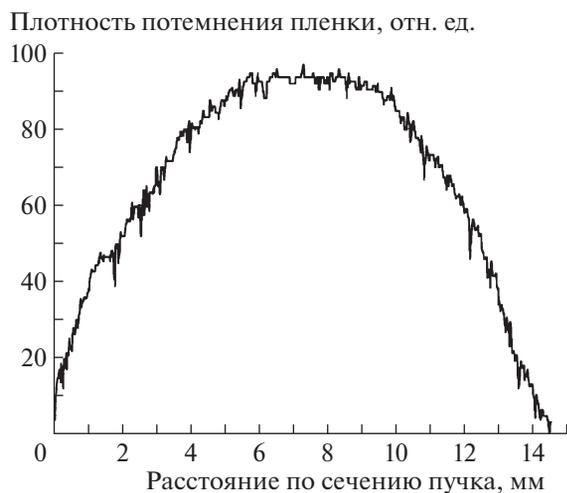


Рис. 4. Распределение тока электронов по сечению пучка.

ка электронов по сечению электронного пучка определялось сканированием пленки (рис. 4).

Согласно рис. 4, электронный пучок субнаносекундного ускорителя имеет осевую симметрию, обусловленную конструкцией катода. Полный ток электронов определялся с учетом величины тока, измеренного через диафрагму диаметром 2 мм, и распределения тока по сечению пучка. Интегрирование проводилось численно методом трапеций. Для этого автограф пучка разделялся на концентрические кольца, число которых определялось числом пикселей изображения. Величина полного тока пучка электронов с распределением, приведенным на рис. 4, составила ~ 1.5 кА.

Максимальная энергия электронов определялась методом поглощающих фильтров с помощью компактного устройства для оперативной оценки энергии электронов [4]. Устройство размещалось на выходном окне трубки. В качестве детектора электронов использовался цветовой пленочный индикатор ЦВИД-3. Максимальная энергия электронов составила ~ 0.95 МэВ.

РЕГИСТРАЦИЯ СУБНАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С развитием наносекундной высоковольтной техники появилась необходимость в регистрации интенсивных потоков рентгеновского излучения наносекундной длительности, что привело к появлению полупроводниковых детекторов с субнаносекундным временным разрешением. Для определения временного разрешения таких детекторов можно использовать субнаносекундный ускоритель электронов в режиме рентгеновского излучения.

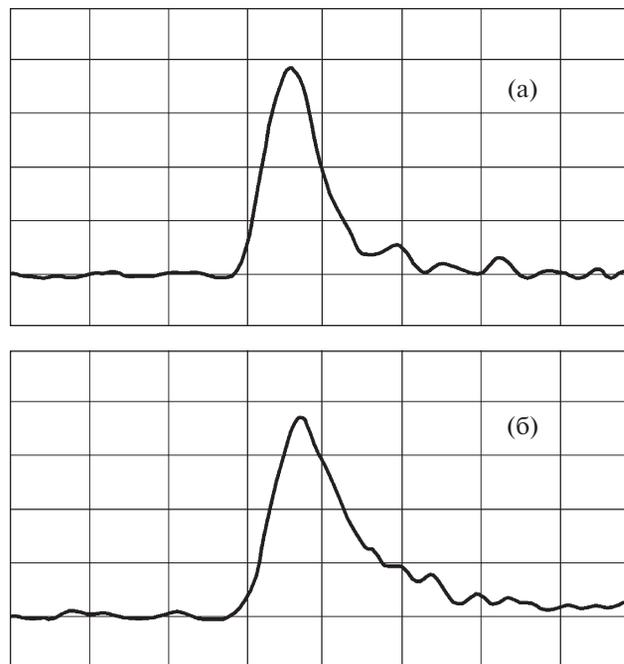


Рис. 5. Осциллограммы импульсов рентгеновского излучения, зарегистрированных: а — СППД29к, б — СППД29-02. Масштаб по горизонтали — 500 пс на деление, масштаб по вертикали — 1 В на деление.

Генерация рентгеновского излучения происходит при торможении электронов во внешней мишени (танталовая фольга толщиной 50 мкм), которая размещена на выходном окне трубки. Электроны, прошедшие фольгу, поглощаются в фильтре из алюминия толщиной 2 мм. Излучение регистрируется с помощью CdTe-детекторов (СППД29к и СППД29-02) [5]. Детекторы изготовлены в корпусе разъема СР50-1ФВ. Корпус позволяет подсоединять кабельную линию с разъемами СР50-74ФВ.

Темновой ток детектора при рабочем напряжении в нормальных условиях ≤ 100 мкА. Максимальный импульсный линейный выходной ток на сопротивлении нагрузки 50 Ом при отклонении от линейности 10% — не менее 0.5 А. Напряжение питания 1200 В. Детекторы размещены на расстоянии 3 см от окна трубки. Осциллограммы импульсов рентгеновского излучения приведены на рис. 5а, 5б.

Длительности зарегистрированных импульсов на полувысоте амплитуды $\tau_{0.5}$ для СППД29к составили 400–450 пс, а для СППД29-02 — 500–550 пс. С учетом калибровки тракта регистрации и длительности электронного излучения импульсные характеристики полупроводниковых детекторов СППД29к и СППД29-02 составили на половине высоты амплитуды $\tau_{0.5} \approx 320 \pm 30$ пс и $\approx 450 \pm 30$ пс соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зарегистрированы характеристики электронного пучка, генерируемого субнаносекундным ускорителем с двойным обострением в схеме формирования импульса напряжения. Длительность импульса тока электронного пучка составила 240–270 пс, амплитуда тока ~ 1.5 кА, максимальная энергия электронов ~ 0.95 МэВ.

Определены импульсные характеристики полупроводниковых детекторов рентгеновского излучения, которые составили для СППД 29к $\tau_{0.5} \approx 320 \pm 30$ пс, а для СППД29-02 $\sim 450 \pm 30$ пс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрьев А.Л., Эльяш С.Л., Лойко Т.В., Пухов С.П., Николаев Д.П., Селезнев А.А. // ПТЭ. 2017. № 6. С. 78. doi 10.7868/S0032816217050147
2. Альбинов З.А., Веретенников А.И., Козлов О.В. Детекторы импульсного ионизирующего излучения. М.: Атомиздат, 1978.
3. Балзовский Е.В., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 2015. № 5. С. 62. doi 10.7868/S003281621505002X
4. Юрьев А.Л., Лойко Т.В., Эльяш С.Л., Пухов С.П. // ПТЭ. 2014. № 3. С. 87. doi 10.7868/S0032816214020232
5. Поляков А.И. Патент № 2103765 РФ. Класс Н01121/02 // БИ. 1998. № 3.