

СИЛЬНОТОЧНЫЙ СУБНАНОСЕКУНДНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ HIGH-CURRENT SUBNANOSECOND ELECTRON ACCELERATOR

С. Л. Эльяш, А. Л. Юрьев, Т. В. Лойко, С. П. Пухов, Д. П. Николаев, П. С. Першин, А. А. Селезнев

S. L. Elyash, A. L. Yuriev, T. V. Loyko, S. P. Pukhov, D. P. Nikolaev, P. S. Pershin, A. A. Seleznev

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработан субнаносекундный ускоритель электронов с газонаполненным формирователем (азот ~ 4 МПа). В качестве источника импульсов напряжения наносекундной длительности использовался высоковольтный блок ускорителя АРСА. Применение дополнительного обострения в схеме формирования позволило сократить длительность импульса электронного излучения до 0,23 нс при сохранении выходных параметров ускорителя. Генерация рентгеновского излучения происходила при торможении электронов во внешней мишени на окне трубки. Излучение регистрировалось с помощью CdTe-детекторов (СППД-29к и СППД-29-02). Импульсные характеристики детекторов СППД-29к и СППД-29-02 составили на половине высоты амплитуды $\tau_{0,5} \approx 320 \pm 30$ пс и $\tau_{0,5} \approx 450 \pm 30$ пс соответственно.

RFNC-VNIIEF has developed a subnanosecond electron accelerator with a gas-filled former (nitrogen ~ 4 MPa). ARSA high-voltage accelerator unit is used as a voltage nanosecond pulse source. The application of additional sharpening in the forming circuit allows reduction of the electron radiation pulse length to 0.23 ns, while keeping the output accelerator parameters.

X-ray radiation is generated during electron slowing-down in the external target located on the tube output window. The radiation is registered with the aid of CdTe-detectors (SPPD-29k and SPPD-29-02). The pulse characteristics of detectors SPPD-29k and SPPD-29-02 were $\tau_{0,5} \approx 320 \pm 30$ ps and $\tau_{0,5} \approx 450 \pm 30$ ps (FWHM), respectively.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ был разработан макет субнаносекундного ускорителя электронов с газонаполненным формирователем (азот ~ 4 МПа) [1]. В качестве источника импульсов напряжения наносекундной длительности использовался высоковольтный блок ускорителя АРСА на напряжение ~1 МВ [2]. С помощью формирователя наносекундные импульсы преобразуются в высоковольтные импульсы субнаносекундной длительности, которые подаются на специально разработанную ускорительную трубку.

В настоящей работе приведена усовершенствованная конструкция формирователя с дополнительным обострением (см. рис. 1). Применение двойного обострения в схеме формирования позволило сократить длительность импульса электронного излучения при сохранении выходных параметров ускорителя.

Формирователь устанавливается на выходном патрубке 1 высоковольтного блока 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 Ом, 36 Ом и 60 Ом соответственно. Передающая линия подключена к ускорительной трубке 7. Для регистрации напряжения зарядки короткой накопительной линии 3, на корпусе узла 2 установлен емкостной делитель 8 с наносекундным разрешением. Регистрация импульсов напряжения на ускорительной трубке производится при помощи субнаносекундного емкостного делителя 9.

Формирователь работает следующим образом. С высоковольтного блока ускорителя АРСА через развязывающую катушку индуктивности 10 на формирующую линию 11 поступает импульс напряжения с длительностью фронта $\tau_{\phi} < 10$ нс. При пробое межэлектродного зазора первого обостряющего разрядника 12 происходит зарядка короткой накопительной линии за время $\tau < 1$ нс, что

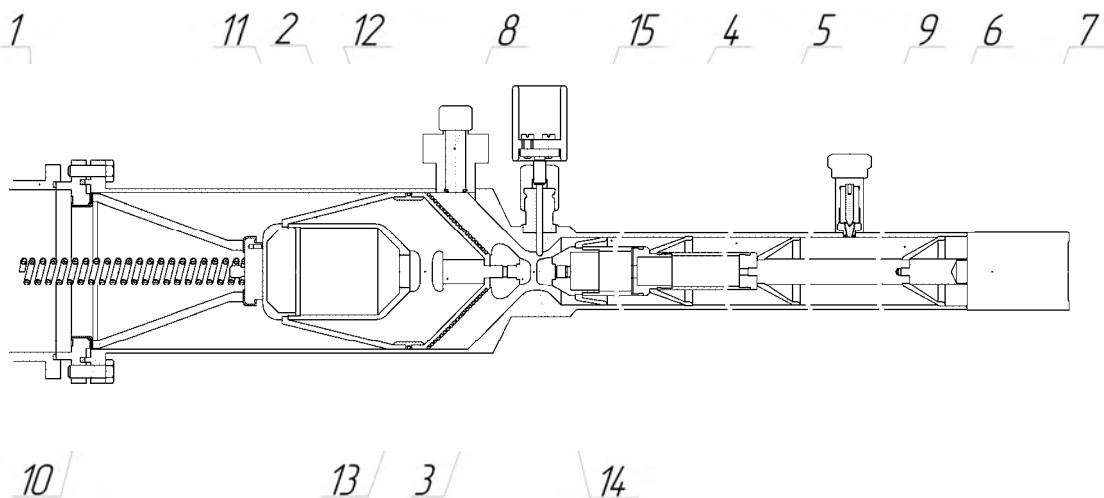


Рис. 1. Конструкция формирователя субнаносекундных импульсов: 1 – выходной патрубок высоковольтного блока ускорителя АРСА; 2 – узел обострения; 3 – короткая накопительная линия; 4, 5, 6 – ступенчатая линия; 7 – ускорительная трубка; 8, 9 – делители напряжения; 10 – развязывающая катушка индуктивности; 11 – формирующая линия; 12, 14 – обостряющие разрядники; 13 – промежуточная линия; 15 – срезающий разрядник

позволяет повысить электропрочность рабочего газа формирователя и предотвратить нештатные пробои внутреннего проводника короткой накопительной линии на корпус. После зарядки линии до максимального напряжения, межэлектродный зазор второго обостряющего разрядника 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, вызывая генерацию электронного излучения. Возрастание волновых сопротивлений секций ступенчатой линии и рассогласованный режим работы трубки (сопротивление которой в несколько раз больше сопротивления последней секции передающей линии) приводит к возрастанию амплитуды напряжения на трубке практически до значения амплитуды зарядки короткой накопительной линии. Срезающий разрядник 15 отрегулирован таким образом, чтобы пробиваться на максимуме напряжения субнаносекундного импульса, замыкая на себя избытки энергии высоковольтного блока ускорителя АРСА и укорачивая срез субнаносекундного импульса.

Для газонаполненного формирователя были специально разработаны и изготовлены металло-керамическая ускорительная трубка СНИТ-1000,

емкостные делители напряжения с нано- и субнаносекундным разрешением. Все указанные узлы предназначены для эксплуатации в атмосфере сжатого газа. Ускорительная трубка выполнена с распределенными волновыми параметрами и является частью передающей линии с тем же волновым сопротивлением, что позволяет устранить искажения субнаносекундного импульса. С помощью разработанных емкостных делителей проводилась регистрация импульса напряжения на выходе высоковольтного блока, импульса напряжения зарядки короткой накопительной линии формирователя и на ускорительной трубке. Измеренные импульсы напряжения сравнивались с расчетными.

Расчет проводился в программе схемотехнического анализа электронных схем [3], преимуществом которой является возможность моделировать работу коммутирующих разрядников и процесс формирования импульса. Рассчитаны амплитудно-временные характеристики импульса напряжения на выходе высоковольтного блока и импульса напряжения зарядки короткой накопительной линии. Рассчитанный и зарегистрированный импульсы напряжения на выходе высоковольтного блока ускорителя АРСА приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что зарегистрированный импульс напряжения (длительность первого пика $\tau_{0,5} \approx 3,5$ нс) соответствует рассчитанному $\tau_{0,5} \approx 3,6$ нс.

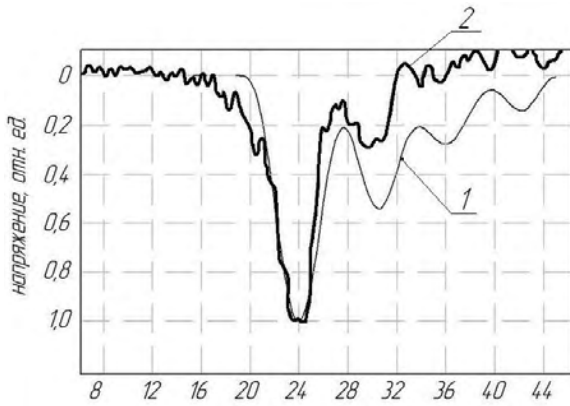


Рис. 2. Импульс напряжения на выходе высоковольтного блока ускорителя: 1 – рассчитанный, 2 – зарегистрированный

На рис. 3 приведены рассчитанный и зарегистрированный импульсы напряжения зарядки короткой накопительной линии.

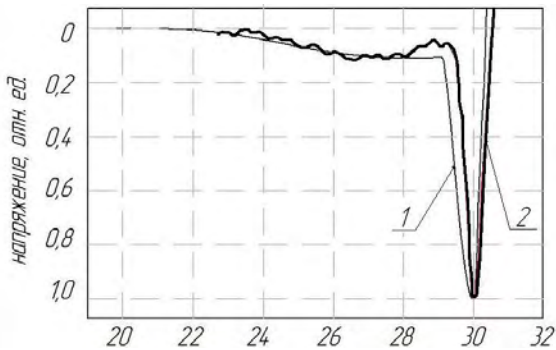


Рис. 3. Импульс напряжения зарядки короткой накопительной линии: 1 – рассчитанный, 2 – зарегистрированный

Из рис. 3 видно, что рассчитанный импульс напряжения ($\tau_{0,5} \approx 0,7$ нс) коррелирует с измеренным ($\tau_{0,5} \approx 0,8$ нс).

На рис. 4 приведена осциллограмма импульса напряжения на выходе формирователя, полученная с помощью субнаносекундного делителя, расположенного на расстоянии 30 см от ускорительной трубки. Регистрация проводилась осциллографом (полоса пропускания 1,5 ГГц).

Из рис. 4 видно, что сначала регистрируется падающий на трубку импульс напряжения, затем через время, равное двойному пробегу сигнала от делителя до трубки ~ 2 нс, регистрируется отраженный от трубки импульс напряжения. При этом на трубке реализуется напряжение, равное сумме падающего и отраженного импульсов. Длительность первого пика на половине амплитуды составила $\tau_{0,5} = 0,5$ нс, что свидетельствует о субнаносе-

кундном временном разрешении разработанного делителя.

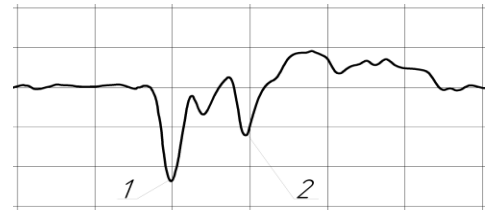


Рис. 4. Осциллограмма импульса напряжения на выходе формирователя: 1 – падающий импульс напряжения, 2 – отраженный импульс напряжения (развертка – 2 нс на клетку)

Ток электронного пучка измерялся малоиндуктивным шунтом на основе высокочастотного металлодиэлектрического резистора С2-10-0,5Вт сопротивлением 1 Ом. Типичная осциллограмма импульса тока электронного пучка приведена на рис. 5. Запись осциллограмм проводилась на осциллографе (полоса пропускания 5 ГГц). Длительность зарегистрированного импульса тока электронов на полувысоте амплитуды находится в диапазоне (0,23 - 0,27) нс. Разброс длительности в основном связан с работой срезающего разрядника субнаносекундного ускорителя. Амплитуда тока электронного пучка $\sim 1,5$ кА.

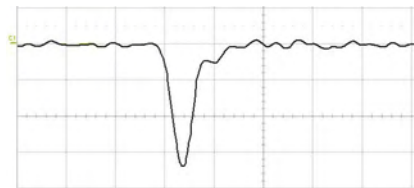
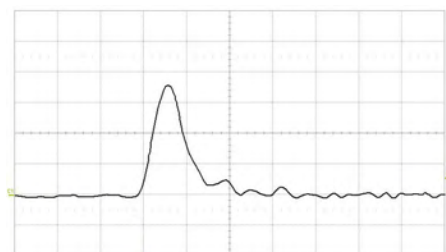


Рис. 5. Осциллограмма тока электронного пучка субнаносекундного ускорителя с трубкой СНИТ-1000, (развертка – 0,5 нс на клетку)

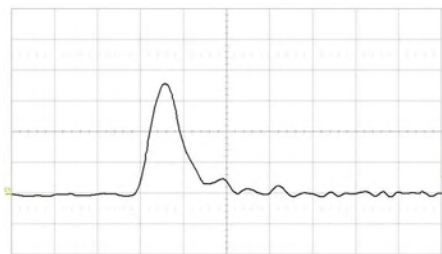
Максимальная энергия электронов определялась методом поглощающих фильтров с помощью компактного устройства для оперативной оценки энергии электронов [4]. Устройство располагалось на выходном окне трубки. В качестве детектора электронов использовался цветовой индикатор дозы ЦВИД-3. Максимальная энергия электронов составила ~ 850 кэВ.

Генерация рентгеновского излучения субнаносекундного ускорителя происходила при торможении электронов во внешней мишени (танталовая фольга толщиной 50 мкм), которая располагалась на выходном окне трубки. Электроны, прошедшие фольгу, поглощались в фильтре из алюминия толщиной 2 мм. Излучение регистриро-

валось с помощью CdTe-детекторов (СППД-29к и СППД-29-02) [5]. Детекторы изготовлены в корпусе разъема СР50-1ФВ. Корпуса позволяют подсоединять кабельные линии с разъемами СР50-74ФВ. Темновой ток детектора при рабочем напряжении в нормальных условиях – не более 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 располагались на расстоянии 3 см от окна трубки. Осциллограммы импульсов рентгеновского излучения приведены на рис. 6, а, б.



а



б

Рис. 6. Осциллограммы импульсов рентгеновского излучения: а – СППД-29к, б – СППД-29-02 (развертка – 500 пс на клетку)

Длительности зарегистрированных импульсов на полувысоте амплитуды $\tau_{0,5}$ составили для СППД-29к – (400...450) пс и для СППД-29-02 –

(500...550) пс. С учетом калибровки тракта регистрации и длительности электронного излучения импульсные характеристики детекторов СППД-29к и СППД-29-02 составили на половине высоты амплитуды $\tau_{0,5} \approx 320 \pm 30$ пс и $\tau_{0,5} \approx 450 \pm 30$ пс соответственно

Субнаносекундный ускоритель будет использоваться для определения временного разрешения импульсных детекторов электронного и тормозного излучения, калибровки трактов регистрации, в исследованиях при изучении быстропротекающих радиационно-наведенных процессов, а также исследования электрофизических характеристик полупроводниковых гетерогенных структур.

Список литературы

1. Юрьев А. Л., Эльяш С. Л., Лойко Т. В и др. Макет ускорителя электронов для генерации импульсов субнаносекундной длительности // Труды международной конференции XVIII Харитоновские чтения. 2016. С. 286–290.
2. Эльяш С. Л., Александрин А. И., Донской Е. Н., Калиновская Н. И. Ускоритель АРСА - малогабаритный источник импульсов рентгеновского и электронного излучений // Сборник научных трудов ядерных центров России. 1996. № 5. С. 229–237.
3. Селезнев А. А., Лойко Т. В., Эльяш С. Л., Юрьев А. Л., Расчет и измерение амплитудно-временных характеристик высоковольтных импульсов напряжения субнаносекундного ускорителя электронов // Молодежь в науке: Сборник тезисов XVI научно-технической конференции. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. С. 78–79.
4. Юрьев А. Л., Лойко Т. В., Эльяш С. Л., Пухов С.П. Устройство для оперативного измерения максимальной энергии электронов // ПТЭ. 2013. № 3. С. 87–88.
5. Поляков А. И. Патент № 2103765 РФ. Класс Н01L 21/02//БИ. 1998. № 3.