

# Сильноточный субнаносекундный ускоритель электронов с газонаполненным формирователем

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

*Разработан и исследован субнаносекундный ускоритель электронов на базе малогабаритного ускорителя АРСА с газонаполненным формирователем (азот ~4 МПа). Принцип работы формирователя заключается в зарядке короткой накопительной линии и ее разрядке на ступенчатую линию с ускорительной трубкой, генерирующей электроны. Зарегистрированная длительность импульса тока электронного пучка составила  $t_{0,5} = 0,3$  нс, амплитуда тока – не менее 1,5 кА, максимальная энергия электронов ~850 кэВ.*

## *Введение*

Техника получения ультракоротких электронных пучков в настоящее время достаточно хорошо развита благодаря многочисленным научным исследованиям. В частности, в работах [1–3] приведены теоретические предпосылки получения пучков с минимальной длительностью и примеры создания субнаносекундных ускорителей с использованием масляных (напряжение до 1 МВ) и газовых (напряжение до 300 кВ) формирователей, которые успешно применяются в различных областях науки и техники.

Использование масляных обострителей требует их периодической прокачки и, как следствие, большого времени выдержки (несколько минут) между импульсами. Ускорители на основе газовых обострителей позволяют значительно сократить время между импульсами и могут работать в любом положении, однако энергия электронов в этих ускорителях невелика, поэтому актуальна задача получения субнаносекундных электронных пучков с энергией ~1 МэВ с газонаполненными формирователями.

## *Конструкция субнаносекундного ускорителя*

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработан субнаносекундный ускоритель электронов на базе высоковольтного блока малогабаритного ускорителя АРСА [4] на напряжение 1 МВ с газонаполненным

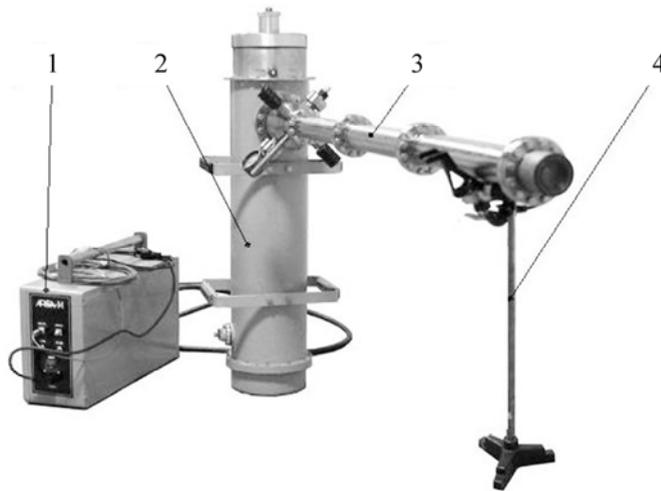


Рис. 1. Субнаносекундный ускоритель электронов: 1 – зарядное устройство; 2 – высоковольтный блок ускорителя АРСА; 3 – формирователь субнаносекундных импульсов; 4 – стойка

формирователем (рис. 1). Он состоит из зарядного устройства 1 и высоковольтного блока 2 ускорителя АРСА с установленным на нем формирователем субнаносекундных импульсов 3 с ускорительной трубкой. Для обеспечения устойчивости ускорителя служит стойка 4.

Высоковольтный блок ускорителя АРСА используется в качестве источника импульсов напряжения наносекундной длительности. С помощью формирователя 3 наносекундные импульсы преобразуются в высоковольтные импульсы субнаносекундной длительности, вызывая генерацию электронных пучков. Схема конструкции формирователя показана на рис. 2.

Формирователь устанавливается на выходном патрубке 1 ускорителя АРСА и содержит узел конических линий 2 с короткой накопительной линией 11, и ступенчатую линию, разделенную на секции 5, 6, 8 с волновыми сопротивлениями 18, 36 и 60 Ом. Передающая линия подключена к ускорительной трубке 9. Для регистрации напряжения зарядки короткой накопительной линии 11 на корпусе узла 2 установлен емкостной делитель 3 с наносекундным разрешением. Регистрация им-

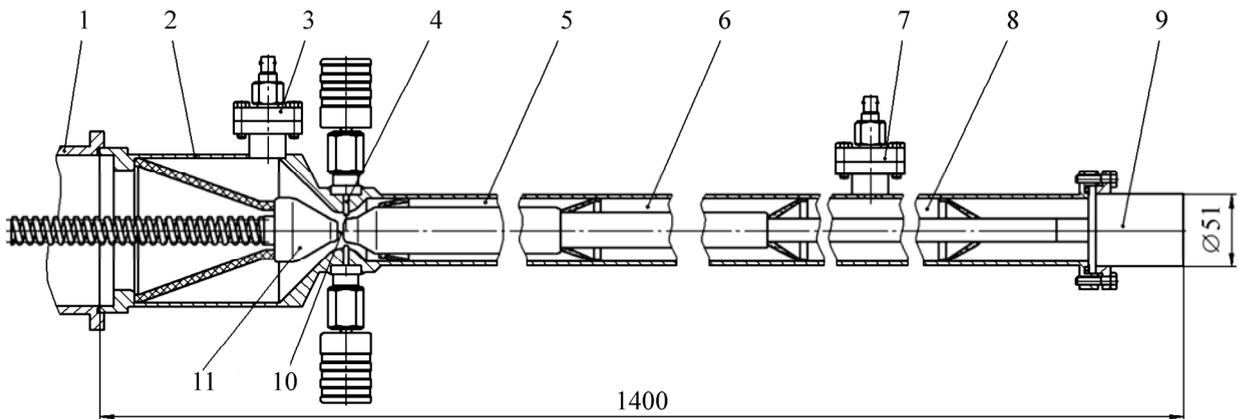


Рис. 2. Конструкция формирователя субнаносекундных импульсов: 1 – выходной патрубков ускорителя АРСА; 2 – узел конических линий; 3, 7 – делители напряжения (нано- и субнаносекундный); 4 – срезающий разрядник; 5, 6, 8 – ступенчатая линия; 9 – ускорительная трубка; 10 – обостряющий разрядник; 11 – короткая накопительная линия

пульсов напряжения на ускорительной трубке осуществляется с помощью субнаносекундного емкостного делителя 7, установленного на расстоянии 300 мм от катода трубки. После сборки формирователь заполняется азотом до давления 4 МПа (40 атм).

Формирователь работает следующим образом. После срабатывания каскадного генератора ускорителя АРСА происходит импульсная зарядка короткой накопительной линии 11. После зарядки линии до максимального напряжения искровой промежуток 10 между короткой накопительной линией и передающей линией пробивается и короткая накопительная линия разряжается на согласованную с ней первую секцию 5 передающей линии. Благодаря малой протяженности короткой линии 11 в передающей линии происходит формирование субнаносекундного импульса напряжения. Вследствие равенства волновых сопротивлений линии 11 и секции 5 передающей линии его амплитуда вдвое меньше амплитуды зарядки короткой накопительной линии. Субнаносекундный импульс напряжения 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 4 отрегулирован таким образом, чтобы пробиваться на максимуме напряжения субнаносекундного импульса, замыкая на себя избытки энергии каскадного генератора ускорителя АРСА и укорачивая срез субнаносекундного импульса.

Для газонаполненного формирователя были специально разработаны и изготовлены металлокерамическая ускорительная трубка СНИТ-1000, емкостные делители напряжения с нано- и субнаносекундным разрешением. Все указанные узлы предназначены для эксплуатации в атмосфере сжатого газа.

Ускорительная трубка является одним из важнейших узлов формирователя. В настоящее время промышленностью выпускается только один тип отпаянной вакуумной трубки (ИМА3-150Э), пригодной для формирования коротких импульсов электронов. Ее основной недостаток – низкая механическая прочность стеклянного изолятора – не позволяет размещать трубку в сжатом газе – изолирующей среде в газонаполненном формирователе. Поэтому для субнаносекундного ускорителя совместно с предприятием ООО «Импульсные технологии» (г. Рязань) была разработана и изготовлена металлокерамическая отпаянная вакуумная трубка СНИТ-1000 (рис. 3). Благодаря применению в ней изолятора из керамики ВК94-1 вакуумная трубка способна работать в среде сжатого газа. Ускорительная трубка является частью передающей линии с тем же волновым сопротивлением, что позволяет устранить искажения субнаносекундного импульса.



Рис. 3. Ускорительная трубка СНИТ-1000: а – вид сбоку, б – вид сзади

### ***Расчет выходных характеристик субнаносекундного ускорителя***

Предварительная оценка выходных параметров субнаносекундного ускорителя проводилась при помощи двух компьютерных программ: программы схемотехнического анализа и пакета трехмерного моделирования физических процессов.

Программа схемотехнического анализа оперирует элементами схемы замещения устройства. Ее достоинство – возможность моделировать работу коммутирующих разрядников и процесс формирования субнаносекундного импульса. С помощью данной программы было рассчитано время зарядки короткой линии формирователя (~5 нс). Расчет изменения формы и амплитуды импульса напряжения при прохождении его по формирователю показал, что для выбранной конструкции амплитуда импульса напряжения на ускорительной трубке близка к амплитуде напряжения зарядки короткой накопительной линии.

Влияние неоднородностей в виде элементов конструкции формирователя (канавки в проводниках, изоляторы и т. д.) проанализированы в пакете трехмерного моделирования физических процессов при прохождении через формирователь импульса гауссовой формы с длительностью на полувысоте 0,2 нс. Расчеты показали, что наибольшие потери амплитуды проходящего импульса (на 17 %) и уширение его длительности (на 0,05 нс) приходится на зону искрового промежутка между короткой накопительной и передающей линиями. Применение конических линий позволяет уменьшить эти потери примерно в 3 раза. Потери на опорных изоляторах, а также на канавках и проточках, необходимых для закрепления изоляторов, не превышают 1 %, поэтому ими можно пренебречь.

### ***Экспериментальные исследования характеристик субнаносекундного ускорителя***

В данной работе для измерения мегавольтного импульса напряжения на выходе высоковольтного блока ускорителя АРСА, подаваемого на субнаносекундный формирователь, использовался двухступенчатый резистивный делитель, первая ступень которого заполнялась раствором медного купороса до сопротивления 1,2 кОм [5]. Проводящий слой первой ступени выполнен в виде трубки, что практически исключает влияние скин-эффекта на частотах ~1 ГГц и сводит к минимуму собственную индуктивность и межэлектродную емкость. Из-за однородности столба жидкости по длине коэффициенты резистивного, емкостного и индуктивного деления равны. Время разрешения делителя определяется второй ступенью и не превышает 1 нс. Для дополнительного ослабления сигнала использовали делители СДНР5. Осциллограмма импульса напряжения на входе субнаносекундного формирователя, зарегистрированная с помощью осциллографа с полосой пропускания 300 МГц, приведена на рис. 4. Амплитуда импульса напряжения составила 850 кВ, длительность первого пика  $t_{0,5} \approx 3,5$  нс.

Напряжение импульса зарядки короткой накопительной линии регистрировали с помощью наносекундного емкостного делителя (рис. 5). Длительность фронта импульса составила 6 нс. При

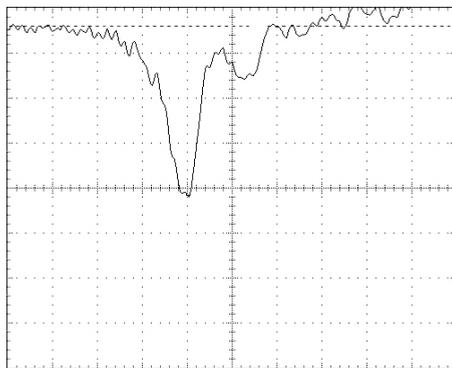


Рис. 4. Осциллограмма импульса напряжения на входе субнаносекундного формирователя (развертка – 4 нс на клетку)

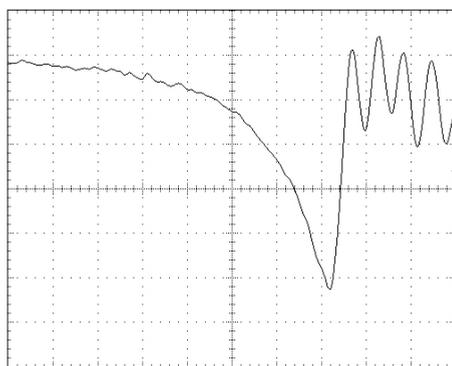


Рис. 5. Осциллограмма импульса напряжения зарядки короткой накопительной линии (развертка – 2 нс на клетку)

достижении пробивного напряжения обостряющего разрядного промежутка происходит его пробой, регистрируемый на осциллограмме напряжения как резкий спад. В результате короткий накопитель подключается к передающей линии.

Для измерения формы и амплитуды импульса электронного излучения ускорительной трубки СНИТ-1000 использовался малоиндуктивный токовый шунт на основе высокочастотного металлодиэлектрического резистора С-2-10-0,5 сопротивлением 1 Ом, встроенного в разъем СР-75-155ФВ. В обкладках резистора предварительно были просверлены отверстия, через которые пропущена центральная жила коаксиального кабеля РК 50-4-21. Она припаяна к металлической обкладке, служащей коллектором электронов (диаметр 8 мм, толщина 1 мм). От заземленной обкладки центральная жила изолирована диэлектрической трубкой. Электронный пучок, падающий на коллектор, ограничивался свинцовой диафрагмой (диаметр 2,5 мм, толщина 0,3 мм).

Временная калибровка тракта регистрации с шунтом проводилась с помощью электронного пучка субнаносекундной длительности ( $t_{0,5} \sim 0,15$  нс) ускорителя СПИН-2 [6]. Шунт располагался на расстоянии 10 мм от выходного окна электронной трубки ИМАЗ-150Э. Сигнал с шунта по кабелю РК50-4-21 длиной 5 м с двойной экранировкой подавался на осциллограф с полосой пропускания 5 ГГц. Для уменьшения амплитуды сигнала использовали делители СДНР 14-02. Типичная

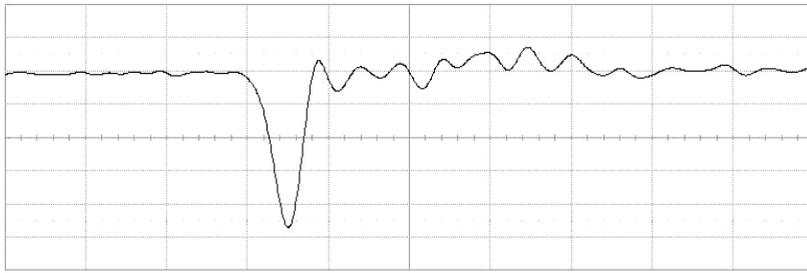


Рис. 6. Осциллограмма тока электронного пучка ускорителя СПИН-2 с трубкой ИМА3-150Э (развертка – 0,5 нс на клетку)

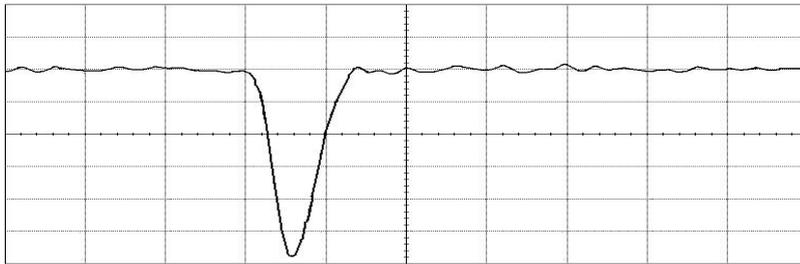


Рис. 7. Осциллограмма тока электронного пучка субнаносекундного ускорителя со срезающим разрядником и трубкой СНИТ-1000 (развертка – 0,5 нс на клетку)

осциллограмма тока электронного пучка ускорителя СПИН-2, зарегистрированная шунтом, приведена на рис. 6. Длительность импульса тока составила  $t_{0,5} = 0,2$  нс, по ней можно оценить разрешающее время тракта регистрации  $t_{0,5} \sim 0,13$  нс.

Длительность импульса тока электронного пучка субнаносекундного ускорителя с трубкой СНИТ-1000 без использования срезающего разрядника составила  $t_{0,5} \sim 0,4$  нс. Настройка срезающего разрядника за счет регулировки длины его искрового промежутка позволяет дополнительно укоротить импульс тока пучка. Типичная осциллограмма тока электронного пучка при срабатывании срезающего разрядника приведена на рис. 7. Длительность импульса тока уменьшилась до  $t_{0,5} = 0,3$  нс, при этом амплитуда тока практически не изменилась и составила  $\sim 1,5$  кА.

Структура электронного пучка ускорительной трубки регистрировалась с помощью дозиметрической пленки ЦВИД-01-1. На рис. 8,а показан автограф электронного пучка трубки СНИТ-1000. Для сравнения на рис. 8,б показан автограф трубки ИМА3-150Э, которая используется в ускорителе СПИН-2. Электронный пучок трубки СНИТ-1000 имеет более равномерное распределение, в нем

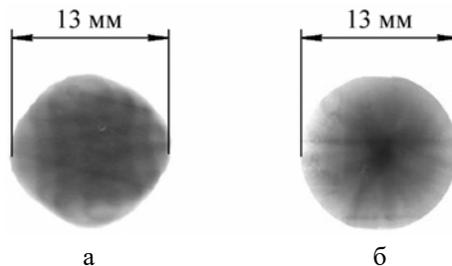


Рис. 8. Автографы электронных пучков трубок СНИТ-1000 (а) и ИМА3-150Э (б)

отсутствует участок центральной фокусировки, как это имеет место в трубке ИМАЗ-150Э. Равномерность электронного пучка на окне увеличивает ресурс трубки и дает возможность работать при больших токах.

Максимальная энергия электронов, определенная с помощью компактного устройства для оперативной оценки энергии электронов [7], расположенного на выходном окне трубки, составила ~850 кэВ. В качестве детектора электронов использовался цветовой пленочный индикатор ЦВИД-3.

### **Заключение**

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработан, изготовлен и исследован субнаносекундный ускоритель электронов на базе высоковольтного блока малогабаритного ускорителя АРСА с газонаполненным формирователем.

Для формирователя были разработаны и изготовлены металлокерамическая ускорительная трубка и емкостные делители напряжения с нано- и субнаносекундным разрешением.

Зарегистрирован импульс тока электронного пучка длительностью 0,3 нс и амплитудой ~1,5 кА; максимальная энергия электронов ~850 кэВ.

Субнаносекундный ускоритель может использоваться для определения временного разрешения наносекундных детекторов импульсов электронного и тормозного излучения, а также аттестации и контроля работоспособности измерительных каналов.

### **Список литературы**

1. Желтов К. А. Пикосекундные сильноточные ускорители. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Ковальчук Б. М., Месяц Г. А., Шпак В. Г. Генератор высоковольтных субнаносекундных электронных пучков // Приборы и техника эксперимента. 1976. № 6. С. 73–75.
3. Месяц Г. А., Яландин М. И. Пикосекундная электроника больших мощностей // Успехи физических наук. 2005. Т. 175, № 3. С. 226–246.
4. Эльяш С. Л., Александрин А. И., Донской Е. Н. и др. Ускоритель АРСА – малогабаритный источник импульсов рентгеновского и электронного излучений // Сборник научных трудов ядерных центров России. 1996. № 5. С. 229–237.
5. Лойко Т. В., Эльяш С. Л., Калиновская Н. И. Регистрация импульсов высокого напряжения с субнаносекундным разрешением // Приборы и техника эксперимента. 1981. № 2. С. 98–99.
6. Лойко Т. В., Недойкаш Ю. М., Павловская Н. Г. и др. Источник импульсов электронного и рентгеновского излучений субнаносекундной длительности // Там же. 2000. № 4. С. 86–88.
7. Юрьев А. Л., Лойко Т. В., Эльяш С. Л., Пухов С. П. Устройство для оперативного измерения максимальной энергии электронов // Там же. 2014. № 3. С. 87–88.

## **High-Current Subnanosecond Electron Accelerator with Gas-Filled Former**

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

*A subnanosecond electron accelerator prototype based on ARSA small-size accelerator with gas-filled former (nitrogen  $\sim 4$  MPa) has been developed and studied. A former's operation principle is charging a short storage line and its discharge to a stepped line with an accelerating tube, generating electrons. Electron beam current pulse length is 0.3 ns, current amplitude  $\sim 1.5$  kA, maximal electron energy  $\sim 850$  keV.*