

# МАКЕТ УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСОВ СУБНАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ.

## ELECTRON ACCELERATOR MOCK-UP FOR GENERATION OF SUBNANOSECOND PULSES

*А. Л. Юрьев, С. Л. Эльяш, Т. В. Лойко, Г. А. Полиенко, С. П. Пухов, Д. П. Николаев,  
А. Ф. Поколев, С. М. Лашманов*  
*A. L. Yuriev, S. L. Elyash, T. V. Loiko, S. P. Pukhov, G. A. Polienko, D. P. Nikolaev,  
S. M. Lashmanov, A. F. Pokolev*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,

пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics  
(RFNC-VNIEF),

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработан и исследован макет субнаносекундного ускорителя электронов на базе малогабаритного ускорителя ARSA 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. Длительность импульса тока электронного пучка не превышает 0,3 нс, амплитуда тока ~1 кА. Ускоритель будет использоваться для определения временного разрешения наносекундных детекторов электронного и тормозного излучения, аттестации измерительных каналов, а также для исследования электрофизических характеристик перспективных полупроводниковых гетерогенных структур.

RFNC-VNIEF has developed and studied a subnanosecond electron accelerator mock-up based on small-sized accelerator ARSA with a gas-filled former (nitrogen ~4 MPa). Accelerator's operation principle is based on charging of a short storage line and its subsequent discharging onto a step line with an accelerating tube, generating electrons. Electron beam pulse duration is not more than 0.3 ns, current amplitude ~1 kA. The subnanosecond accelerator will be used for time resolution determining of nanosecond pulse detectors for electron and bremsstrahlung radiation, certification and control of measuring channels' functionality, as well as a study of electrophysical characteristics promising semiconductor heterogeneous structures.

### Введение

Техника получения ультракоротких электронных пучков в настоящее время достаточно хорошо развита благодаря научным исследованиям [1], [2], [3]. В этих работах 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 (несколько минут) выдержки между импульсами. Ускорители на основе газовых обострителей позволяют не только значительно сократить время между импульсами, но и работать

в любом положении. Энергия электронов в этих ускорителях невелика, поэтому задача получения субнаносекундных электронных пучков с энергией до 1 МэВ с газонаполненными формирователями является актуальной.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработан макет субнаносекундного ускорителя электронов на базе малогабаритного ускорителя ARSA с газонаполненным формирователем. Назначение ускорителя – генерация субнаносекундных импульсов ускоренных электронов с энергией до 800 кэВ и длительностью 0,3 нс на полувысоте амплитуды.

### Конструкция субнаносекундного ускорителя

Внешний вид субнаносекундного ускорителя электронов приведен на рис. 1. Он состоит из за-

рядного 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.

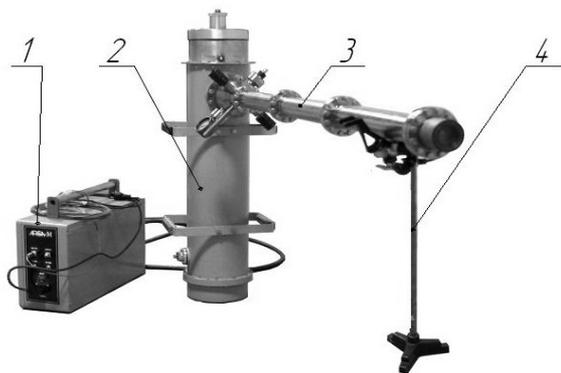


Рис. 1. Субнаносекундный ускоритель электронов: 1 – зарядное устройство; 2 – высоковольтный блок ускорителя АРСА; 3 – формирователю субнаносекундных импульсов; 4 – стойка

Для зарядки короткой накопительной линии формирователя использовался высоковольтный блок наносекундного ускорителя АРСА на напряжение 1 МВ [4]. С помощью формирователя 3 наносекундные импульсы преобразуются в высоковольтные импульсы субнаносекундной длительности, вызывая генерацию электронных пучков. Конструкция формирователя приведена на рис. 2.

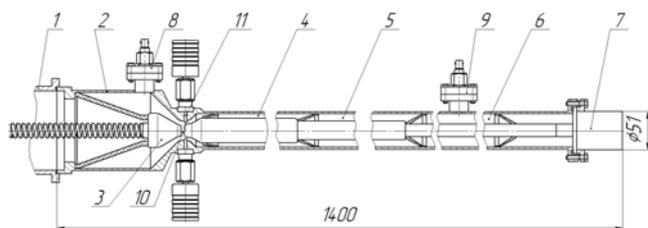


Рис. 2. Конструкция формирователя субнаносекундных импульсов: 1 – выходной патрубок ускорителя АРСА; 2 – узел биконических линий; 3 – короткая накопительная линия; 4, 5, 6 – ступенчатая линия; 7 – ускорительная трубка; 8, 9 – делители напряжения (нано- и субнаносекундный); 10 – обостряющий разрядник;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

Формирователь устанавливается на выходном патрубке 1 ускорителя АРСА и содержит узел биконических линий 2 с короткой накопительной линией 3, и ступенчатую линию, разделенную на секции 4, 5, 6 с волновыми сопротивлениями 18 Ом, 36 Ом и 60 Ом. Передающая линия подключена к ускорительной трубке 7. Для регистра-

ции 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, 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 3. После зарядки линии до максимального напряжения (около 800 кВ) искровой промежуток 10 между короткой накопительной линией и передающей линией пробивается, и короткая накопительная линия разряжается на согласованную с ней первую секцию 4 передающей линии. Благодаря малой протяженности короткой линии 3 в передающей линии происходит формирование субнаносекундного импульса напряжения. Его амплитуда, вследствие равенства волновых сопротивлений линии 3 и секции 4 передающей линии, вдвое меньшей 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 11 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 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

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 основным недостатком является низкая механическая прочность стеклянного изолятора, что не позволяет размещать трубку в среде сжатого газа, который является изолирующей средой в газонаполненном формирователе. Поэтому для макета субнаносекундного ускорителя совместно с предприятием ООО «Импульсные технологии» г. Рязань, была разработана и изготовлена металлокерамическая отпаянная вакуумная трубка СНИТ-1000 (см. рис. 3). Применение в ней изолятора из керамики ВК94-1 позволяет работать в среде сжатого газа.



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

Ускорительная трубка является частью передающей линии с тем же волновым сопротивлением, что позволяет устранить искажения субнаносекундного импульса.

### Расчет выходных характеристик субнаносекундного ускорителя

Выходные параметры субнаносекундного ускорителя рассчитывались при помощи двух компьютерных программ: программы схемотехнического анализа и пакета трехмерного моделирования физических процессов.

Программа схемотехнического анализа оперирует с элементами схемы замещения устройства. Ее преимуществами является возможность моделировать работу коммутирующих разрядников и процесс формирования субнаносекундного импульса. При помощи данной программы было рассчитано время зарядки короткой линии формирователя, оно составило  $\sim 5$  нс. Расчет изменения импульса напряжения при прохождении его по формирователю показал, что для выбранной кон-

струкции 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 по амплитуде проходящего импульса (17%) и уширение его длительности (на 0,05 нс) приходится на зону искрового промежутка между короткой накопительной линией и передающей линией. Применение биконических 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%, 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  $\sim 1$  ГГц и сводит к минимуму собственную индуктивность и межэлектродную емкость. Из-за однородности столба жидкости по длине происходит не только резистивное, но и емкостное, и индуктивное деление, поэтому напряжение на входе второй ступени нарастает в течение пикосекунд, и время разрешения всего делителя определяется второй ступенью и составляет  $\sim 1$  нс. Для дополнительного ослабления сигнала использовались делители СДНР5. Суммарное ослабление сигнала  $\sim 10^5$  раз. Осциллограмма импульса напряжения на входе субнаносекундного формирователя, зарегистрированная с помощью осциллографа TDS 3032 (полоса пропускания 300 МГц) приведена на рис. 4. Амплитуда импульса напряжения  $U \approx 800$  кВ, длительность первого пика  $\tau_{0,5} \approx 3,5$  нс.

Напряжение импульса зарядки короткой накопительной линии регистрировалось с помощью наносекундного емкостного делителя (рис. 5).

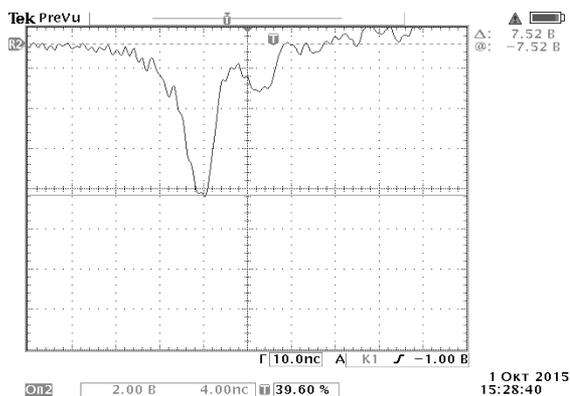


Рис. 4 Осциллограмма импульса напряжения на входе субнаносекундного формирователя (развертка – 4 нс на клетку)

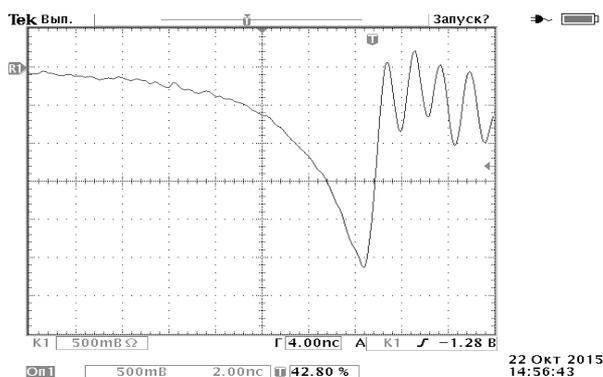


Рис. 5. Осциллограмма импульса напряжения зарядки короткой накопительной линии (развертка – 2 нс на клетку)

Напряжение на выходе формирователя (около трубки) регистрировалось с помощью субнаносекундного емкостного делителя. Осциллограмма импульса напряжения на выходе формирователя приведена на рис. 6

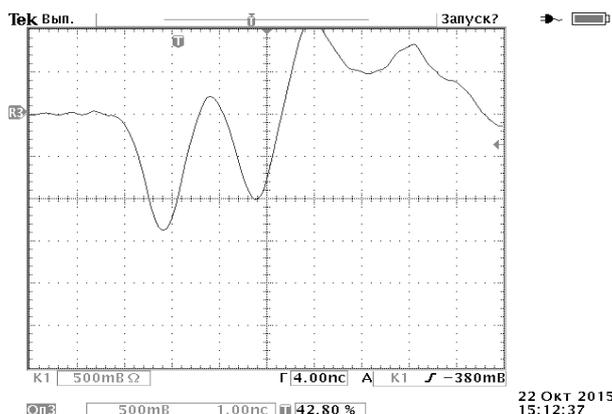


Рис. 6. Осциллограмма импульса напряжения на выходе формирователя (развертка – 1 нс на клетку)

Из рис. 6 видно, что сначала регистрируется падающий на трубку импульс напряжения, затем через время, равное двойному пробегу сигнала от делителя до трубки  $\sim 2$  нс, регистрируется отраженный от трубки импульс напряжения. При этом на трубке реализуется напряжение, равное сумме падающего и отраженного импульсов.

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 встроенный в разъем СР-75-155ФВ.

Временная калибровка шунта проводилась с помощью электронного пучка субнаносекундной длительности ( $\tau_{0,5} \sim 0,15$  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 LeCroy Wavemaster-8500A с полосой пропускания 5 ГГц. Для уменьшения амплитуды сигнала использовались ослабители СДНР 14-02. Типичная осциллограмма тока электронного пучка ускорителя СПИН-2, зарегистрированная шунтом, приведена на рис. 7. Измеренная длительность импульса тока составила  $\tau_{0,5} \sim 0,2$  нс. Из этих измерений можно оценить разрешающее время шунта  $\tau_{0,5} \sim 0,15$  нс.

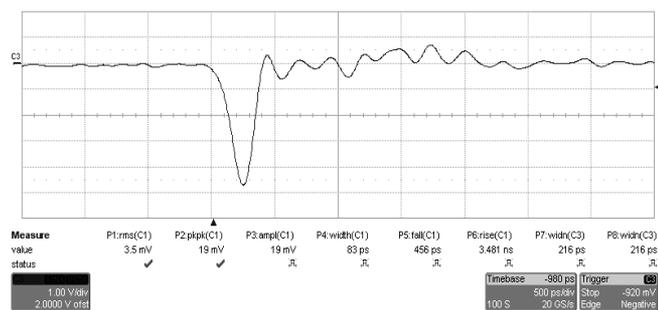


Рис. 7. Осциллограмма тока электронного пучка ускорителя СПИН-2, (развертка – 0,5 нс на клетку)

На рис. 8 приведена осциллограмма тока электронного пучка субнаносекундного ускорителя (трубка СНИТ-1000), зарегистрированная шунтом. Запись осциллограмм проводилась на осциллографе LeCroy (полоса пропускания 1,5 ГГц). Зарегистрированная длительность импульса тока составила  $\tau_{0,5} \approx 0,4$  нс. С учетом разрешающего времени осциллографа и шунта длительность тока электронного пучка не превышает  $\tau_{0,5} \approx 0,3$  нс. Амплитуда тока электронного пучка  $\sim 1$  кА.

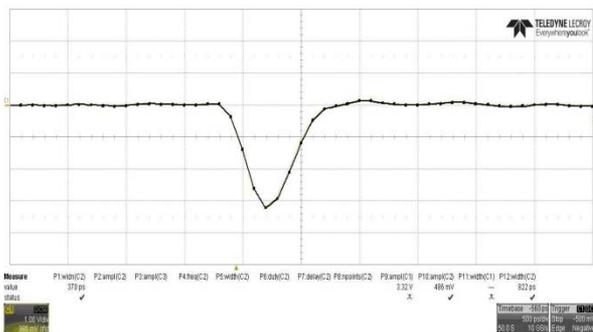


Рис. 8. Оциллограмма тока электронного пучка субнаносекундного ускорителя с трубкой СНИТ-1000, (развертка – 0,5 нс на клетку)

Структура электронного пучка ускорительной трубки регистрировалась с помощью дозиметрической пленки ЦВИД-01-1. На рис. 9а приведен автограф электронного пучка трубки СНИТ-1000. Для сравнения (рис. 9б) приведен автограф трубки ИМА3-150Э, которая используется в ускорителе СПИН-2.

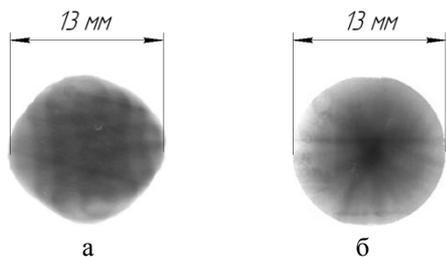


Рис. 9 – Автографы электронных пучков трубок: а – СНИТ-1000; б – ИМА3-150Э

Электронный пучок трубки СНИТ-1000 имеет более равномерное распределение, в нем отсутствует участок центральной фокусировки, как это имеет место в трубке ИМА3-150Э. Равномерность электронного пучка на окне увеличивает ресурс трубки и возможность работать при больших токах.

### Заключение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработан, изготовлен и исследован макет субнаносекундного ускорителя электронов на базе малогабаритного ускорителя АРСА с газонаполненным формирователем. Уско-

ритель АРСА на напряжение 1 МВ служит в качестве источника высоковольтного питания для зарядки короткой накопительной линии субнаносекундного газонаполненного формирователя.

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

Зарегистрирована длительность импульса тока  $\tau_{0,5} \approx 0,4$  нс. С учетом временного разрешения осциллографа и шунта длительность импульса тока не превышает 0,3 нс. Амплитуда тока электронного пучка составила  $\sim 1$  кА.

Субнаносекундный ускоритель будет использоваться для определения временного разрешения наносекундных детекторов импульсов электронного и тормозного излучения, аттестации и контроля работоспособности измерительных каналов, а также исследования электрофизических характеристик (время жизни, подвижность носителей) широкозонных диэлектриков и перспективных полупроводниковых гетерогенных структур.

### 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 // ПТЭ. 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., Калиновская Н. И. 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 // ПТЭ. 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 // ПТЭ. 2000. № 4. С. 86–88.