

УДК 621.384.654

## Малогабаритные высокопроизводительные ускорители АРСА для оперативных испытаний на радиационную стойкость ЭКБ\*

С. Л. Эльяш, С. П. Пухов, А. В. Родигин,  
А. Л. Юрьев

*Проведена модернизация малогабаритного импульсного ускорителя АРСА с целью повышения граничной энергии до 1,3 МэВ, дозы тормозного излучения до 3 Гр и длительности импульса до 10 нс, автоматизации управления ускорителем и комплексом измерительного оборудования, что позволяет использовать его в качестве высокопроизводительного источника тормозного излучения при оперативных испытаниях элементной базы на радиационную стойкость.*

*Ускоритель отличается стабильностью характеристик (разброс не более  $\pm 10\%$ ), высокой мощностью дозы тормозного излучения (до  $5 \cdot 10^{10}$  Р/с в пятне диаметром 1 см), возможностью интенсивной работы (сотни пусков в день), электромагнитной совместимостью с РЭА.*

*Разработан волоконно-оптический монитор-дозиметр, функционально связанный с пультом управления ускорителя АРСА. Для контроля формы импульсов тормозного излучения предусмотрен отдельный канал.*

### Введение

В настоящее время резко возрос объем испытаний изделий электронной техники на стойкость к воздействию импульсного ионизирующего излучения (ИИ). В соответствии с требованиями нормативных документов радиационная стойкость (РС) современных полупроводниковых приборов и интегральных схем (микропроцессоров, ПЛИС, ЦАП, АЦП и т. д.) должна определяться по наиболее чувствительным к воздействию ИИ параметрам в критических режимах работы изделий при заданном диапазоне температур окружающей среды. Решение подобных задач с использованием только мощных моделирующих установок (МУ) не представляется возможным ввиду значительных временных и материальных затрат. Результаты исследований, проведенных в последнее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ, ФГУП «НИИП» и других организациях [1], показали, что оптимальное сочетание малогабаритных высокопроизводительных ускорителей типа АРСА и мощных МУ позволит существенно уменьшить сроки и затраты на проведение радиационных испытаний, повысить достоверность и информативность получаемых результатов.

Не менее важным направлением использования малогабаритных высокопроизводительных установок в испытаниях изделий электронной техники представляется применение ускорителей типа АРСА для оперативного контроля ионизационного отклика интегральных микросхем (ИМС)

\* Доклад на Междунар. научной конф. «Харитоновские чтения». Саров, 2012.

в процессе их технологической разработки и производства в составе рабочего места в испытательных центрах системы Военэлектронсервт. В отличие от имитационных методов испытаний ИМС с использованием лазерного излучения применение ускорителя АРСА позволит приблизить условия технологического контроля к реальным [2].

### ***Краткое описание ускорителя АРСА***

АРСА – это малогабаритный импульсный ускоритель электронов прямого действия с масляной изоляцией на напряжение 1 МВ [3, 4] (рис. 1). Он состоит из высоковольтного блока 1 с ускорительной трубкой 4, расположенной в герметичном корпусе, зарядного устройства 2 и пульта управления 3. Особенностью использованного в ускорителе десятикаскадного генератора Маркса является импульсная зарядка накопительных конденсаторов. Коммутация тока в каскадах осуществляется при помощи металлокерамических разрядников высокого давления [5].

Отпаянная ускорительная трубка с прострельной мишенью представляет собой вакуумный диод с взрывоэмиссионным катодом и анодом, состоящим в рентгеновской трубке из танталовой мишени и титанового выводного окна, а в электронной трубке – только из тонкого титанового окна. Катод лезвийного типа диаметром 10 мм обеспечивает однородное пятно излучения. Замена трубки является простой операцией, не требующей специального инструмента, и производится обслуживающим персоналом за 10 минут.

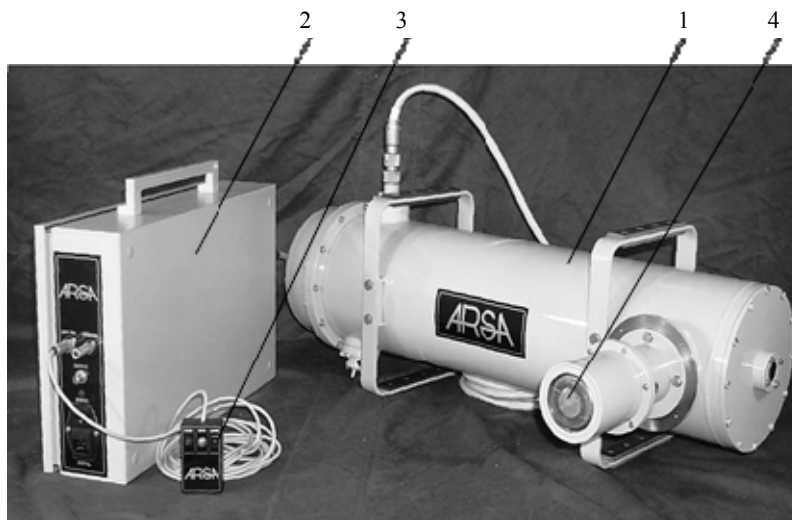


Рис. 1. Малогабаритный импульсный ускоритель АРСА

### ***Методики и результаты измерения параметров ускорителя АРСА***

Доза тормозного излучения измерялась термолюминесцентными детекторами ПСТ на основе стекла ИС-7 в стандартных контейнерах. Измерения проводились по методу дозиметрии ИКС с помощью стандартных детекторов для экспериментальных работ и измерительного прибора – дозиметра гамма-излучения ИКС-А. Диапазон регистрируемых доз от 0,5 до  $10^3$  сГр, погрешность измерений  $\pm 20\%$  при доверительной вероятности  $p = 0,95$ .

Поглощенная доза электронного излучения с погрешностью 12–15 % измерялась аттестованными полимерными пленочными дозиметрами типа СО ПД(Ф)Р-5/50.

Временные характеристики импульсов тормозного излучения ускорителя АРСА (длительность импульса излучения на полувысоте амплитуды) измерялись с помощью детектора СППД11-04 (чувствительность  $1,5 \cdot 10^{-17}$  Кл·см<sup>2</sup>/квант в диапазоне энергий гамма-квантов 0,06–10 МэВ).

Для регистрации сигналов с детектора использовался осциллограф Tektronix TDS3032В. Рентгеновский импульс ускорителя АРСА показан на рис. 2.

На рис. 3 и 4 представлены измеренные в эксперименте радиационные поля ускорителя АРСА в виде поверхностей равной дозы в воздухе.

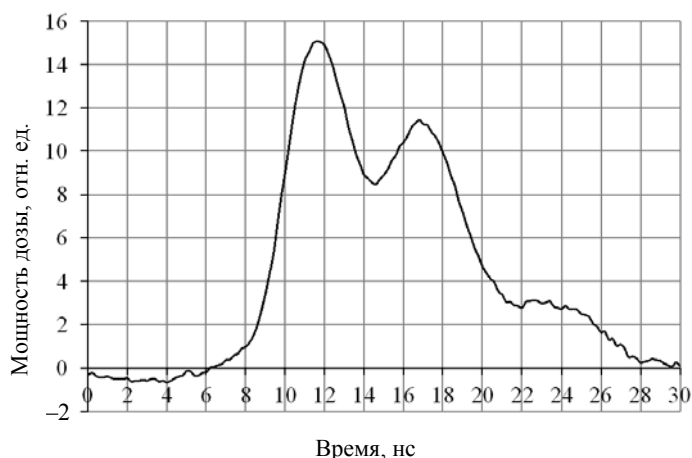


Рис. 2. Форма рентгеновского импульса ускорителя АРСА, зарегистрированная с помощью детектора СППД11-04

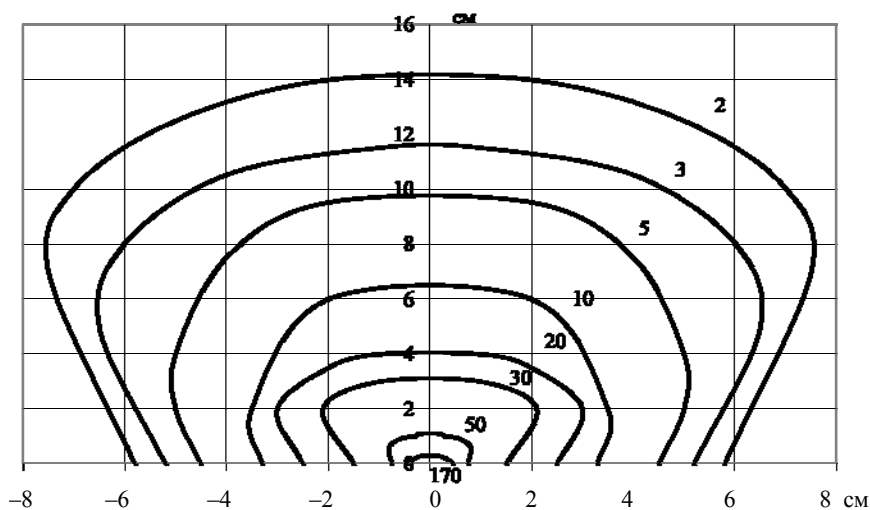


Рис. 3. Поверхности равной дозы (сГр/имп.) рентгеновского излучения ускорителя АРСА

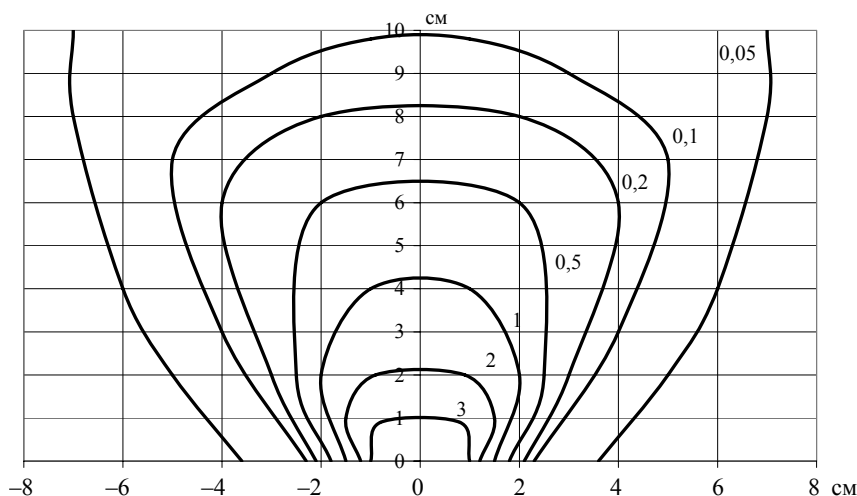


Рис. 4. Поверхности равной дозы (кГр/имп.) электронного излучения ускорителя АРСА

Регистрация рентгеновского пятна ускорительной трубки осуществлялась на измерительном стенде, содержащем сцинтилляционный экран, перископ и цифровую фотокамеру, подключенную к персональному компьютеру. Экран располагался непосредственно на окне трубки и обеспечивал линейное преобразование дозы излучения в видимый свет, интенсивность которого регистрировалась фотокамерой. Распределение дозы по пятну (структура пятна) определялось путем компьютерной обработки полученных изображений пятна при помощи программы обработки изображений ImageJ 1.41o и программы математических вычислений Mathcad 14. Графическое распределения дозы рентгеновского излучения на окне трубки приведено на рис. 5. Измерения показали, что уменьшение дозы рентгеновского излучения на краях области диаметром 10 мм не превышает 28 % от ее максимального значения.

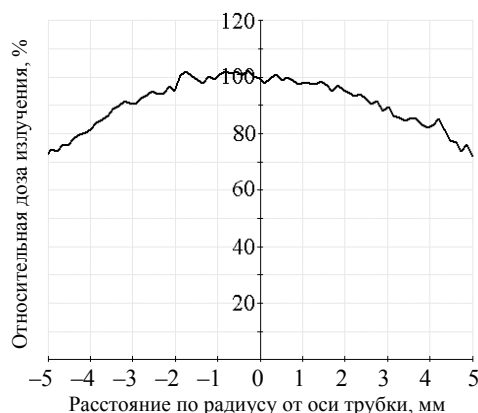


Рис. 5. Графическое распределение дозы рентгеновского излучения на окне трубки ускорителя АРСА

### ***Импульсный волоконно-оптический монитор-дозиметр с детекторным каналом для контроля формы импульса излучения***

Для оперативного контроля дозы малогабаритных импульсных ускорителей типа АРСА разработан волоконно-оптический монитор-дозиметр (МД) [6] (рис. 6). Он конструктивно объединен и используется совместно с пультом управления ускорителем. Для МД предусмотрена также возможность автономной работы в режиме контроля дозы.



Рис. 6. Волоконно-оптический монитор-дозиметр, совмещенный с пультом управления ускорителя АРСА

МД представляет собой комбинированное устройство, включающее:

- волоконно-оптический импульсный измеритель дозы рентгеновского излучения;
- счетчик количества импульсов с энергонезависимой памятью для контроля ресурса установки;

- устройство запоминания значений дозы для каждого импульса;

- сумматор дозы импульсов в серии;

- устройство блокировки пуска по достижении заданной дозы;

- порт для считывания накопленных данных в компьютер.

Волоконно-оптический импульсный дозиметр имеет ряд преимуществ:

- мгновенное получение результата измерений по сравнению с термолюминесцентным дозиметром (ИКС);

- высокая помехоустойчивость, малая деградация детектора по сравнению с измерителями на основе полупроводниковых диодов;

- наличие новых сервисных функций (счетчик, сумматор, энергонезависимая память, порт) благодаря использованию современного микропроцессора.

Детектором излучения в устройстве является «точечный» сцинтиллятор CsI(Tl) сечением около 1 мм<sup>2</sup>. Передача света от детектора к фотоприемнику осуществляется по пластмассовому оптоволокну диаметром 1 мм. В качестве фотоприемника используется pin-фотодиод. Особенностью конструкции МД является неразъемная сборка *сцинтиллятор–оптоволокну–фотоприемник*, что повышает стабильность измерений.

Исследовалась зависимость показаний МД от дозы рентгеновского излучения ускорителя АРСА. Из рис. 7 видно, что полученная зависимость является линейной и может использоваться для градуировки шкалы МД в сГр.

С целью мониторинга формы рентгеновских импульсов длительностью от единиц наносекунд в составе комплекта МД имеется быстродействующий волоконно-оптический сцинтилляционный детектор. Детектор обладает повышенной помехоустойчивостью к электромагнитным наводкам от импульсных физустановок и не требует применения высоковольтных источников питания. Он содержит субнаносекундный сцинтиллятор СПС-Б18 [7] диаметром и высотой 50 мм, пластмассовый волоконно-оптический кабель диаметром сердцевины 1 мм, pin-фотодиод типа

ФД-271 и субнаносекундный электронный усилитель. Выход усилителя подключается к регистратору. Осциллограмма рентгеновского импульса ускорителя АРСА, зарегистрированная на осциллографе LeCroy Wavemaster-8500А при помощи волоконно-оптического детектора, приведена на рис. 8.

По данным работы [7] радиационная стойкость оптоволоконна достаточна для долговременной работы МД и детектора формы импульса в условиях совместной работы с ускорителем АРСА.

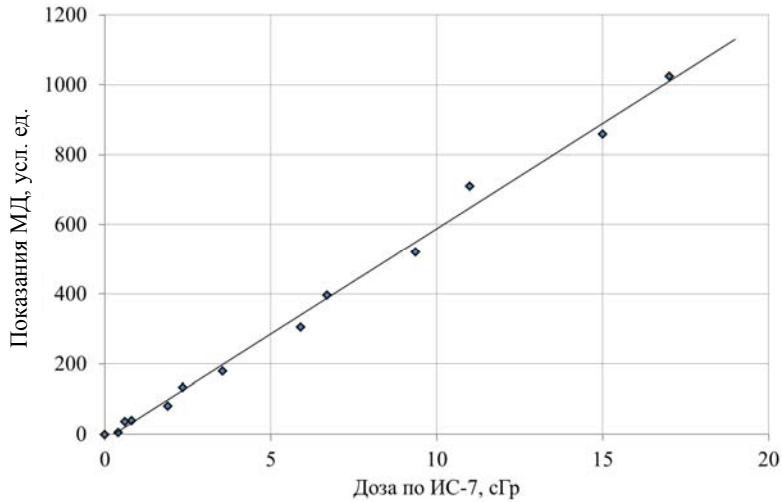


Рис. 7. Зависимость показаний МД от дозы рентгеновского излучения ускорителя АРСА

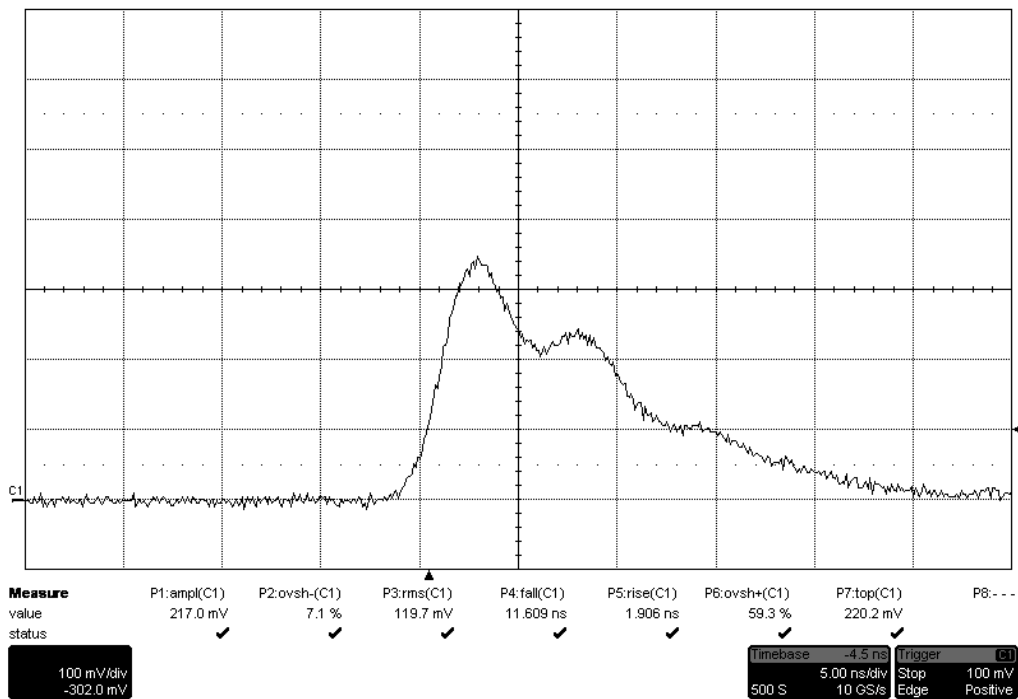


Рис. 8. Форма рентгеновского импульса ускорителя АРСА, зарегистрированная при помощи волоконно-оптического скintилляционного детектора

### Расчетное сопровождение экспериментов

Энергетические спектры и энерговыделение в облучаемых объектах рассчитывались методом Монте-Карло по программе ЭЛИЗА [8]. Исходными данными для расчета служили осциллограмма тока и спектр электронов, падающих на мишень трубки, измеренный с помощью полукругового магнитного спектрометра [9]. Ток электронов измерялся с помощью цилиндра Фарадея и малоиндуктивного шунта. Рис. 9, 10 демонстрируют типичные расчетные спектры электронного и рентгеновского излучения ускорителя АРСА.

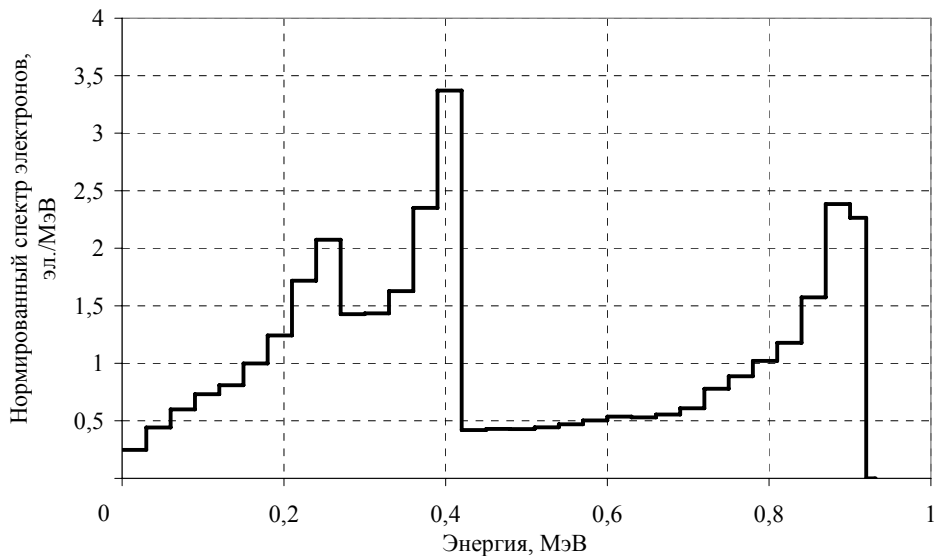


Рис. 9. Спектр электронного излучения ускорителя АРСА за выходным окном трубки

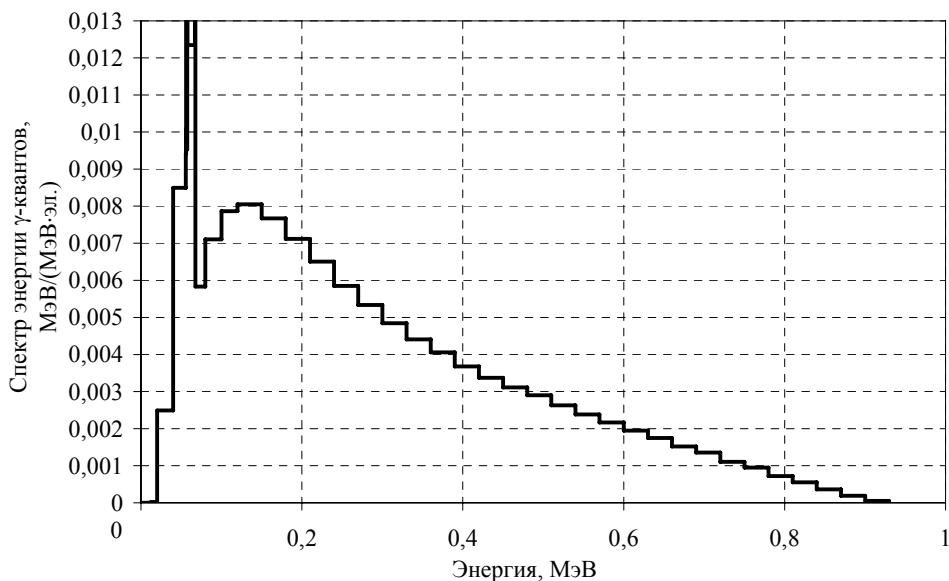


Рис. 10. Энергетический спектр рентгеновского излучения ускорителя АРСА

## Преимущества ускорителя АРСА

Многолетний опыт эксплуатации ускорителей АРСА выявил ряд их преимуществ по сравнению с другими подобными устройствами:

- высокая мощность дозы (до  $1 \cdot 10^{10}$  Р/с для рентгеновского излучения и до  $1 \cdot 10^{14}$  Р/с для электронного излучения);
- компактность и мобильность;
- простота эксплуатации и технического обслуживания;
- хорошая воспроизводимость дозовых характеристик ( $\pm 10\%$ );
- расчет распределения поглощенной дозы в облучаемом объекте;
- варьирование типа и параметров излучения путем замены отпаянной трубки;
- высокий ресурс (до  $10^6$  пусков);
- интенсивность работы (сотни пусков в день);
- экологическая безопасность;
- электромагнитная совместимость с электронной аппаратурой (создаваемый уровень электромагнитных помех на сигнальные кабели без специальных мер экранирования – не более 0,2 В).

Основные технические решения, использованные в ускорителе АРСА, защищены четырьмя патентами РФ и свидетельством на полезную модель. РФЯЦ-ВНИИЭФ получил лицензию № 77.99.15.002.Л.000056.03.10 от 30.03.2010 на проектирование, конструирование, размещение, эксплуатацию, техническое обслуживание и хранение ускорителя АРСА. По результатам аттестации ускоритель АРСА признан пригодным для использования при испытаниях радиационной стойкости аппаратуры, приборов, устройств, оборудования, изделий электронной техники.

## Список литературы

1. Членов А. М., Мордасов Н. Г., Иващенко Д. М. Направление развития экспериментальной базы по моделированию импульсного гамма-излучения в технологии радиационных испытаний // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2010. Вып. 1. С. 5–10.
2. Эльяш С. Л., Профе Л. П. Применение малогабаритного ускорителя АРСА для оперативного контроля показателей стойкости элементной базы к воздействию импульсного ионизирующего излучения // Тезисы докл. конф. «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость 2001». НИИ приборов, Лыткарино, 5–7 июня 2001 г. С. 201.
3. Эльяш С. Л., Калиновская Н. И., Донской Е. Н., Гончарова В. Ф. Малогабаритный импульсный ускоритель для стерилизации // Атомная энергия. 1995. Т. 79. Вып. 6. С. 462–464.
4. Эльяш С. Л., Калиновская Н. И., Гончарова В. Ф. и др. Малогабаритный импульсный ускоритель электронов АРСА для радиационных исследований // Труды 7-й Международ. конф. по электронно-пучковым технологиям ЕВТ-2003. Варна, 2003. С. 591.
5. Авилов Э. А., Юрьев А. Л. Газонаполненные металлокерамические разрядники высокого давления // ПТЭ. 2000. № 2. С. 78.
6. Пат. РФ на полезную модель № 90575 МПК G01T 1/20 G01T 1/208. Волоконно-оптический дозиметр / С. Л. Эльяш, А. В. Родигин, В. А. Пикарь // Бюл. № 1. 10.01.2010.



7. Zoufal T., Wick K. The damaging process in irradiated light guides and scintillating fibers // Nucl. Phys. 2003. В 208. Р. 471–475.
8. Донской Е. Н. Методика и программа ЭЛИЗА для решения задач совместного переноса гамма-излучения, электронов и позитронов методом Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Матем. моделирование физ. процессов. 1993. Вып. 1. С. 25.
9. Моренко С. А., Пухов С. П., Эльяш С. Л. Магнитный спектрометр для оперативного измерения спектра импульсных пучков электронов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2007. Вып. 3–4. С. 91–93.

## **Small-Size High-Performance ARSA Accelerators: Operational Testing of ECB for Radiation Resistance**

S. L. Elyash, S. P. Pukhov, A. V. Rodigin, A. L. Yuriev

*There was improved a small-size pulsed accelerator ARSA in order to increase boundary energy to 1.3MeV, bremsstrahlung dose on the accelerator tube window – to 3 Gy and pulse duration – to about 10 ns, to minimize the level of electromagnetic interference, to automate accelerator and measurement equipment complex control, what makes it possible to use it as a high-capacity bremsstrahlung source under prompt radiation resistance tests of electronic component base (ECB).*

*The accelerator is distinguished by stability of characteristics (spread is no more than  $\pm 10\%$ ), high power of bremsstrahlung dose (up to  $5 \cdot 10^{10}$  R/s in a spot 1cm in diameter), possibility of intense operation (several hundreds switchings a day), electromagnetic compatibility with radio electronic equipment.*

*There is developed a fiber-optic monitor-dosimeter functionally connected with a control panel of ARSA accelerator providing pulse measurement of bremsstrahlung dose, accumulation of the prescribed dose, data reading to the computer. To control shapes of bremsstrahlung pulses a separate channel is provided.*