

# Применение электронного пучка ускорителя АРСА для испытаний стойкости интегральных микросхем

*Показана возможность эффективного применения электронного пучка ускорителя АРСА для испытаний радиационной стойкости интегральных микросхем при уровнях нагружения по дозе до  $2,5 \cdot 10^5$  рад (Si), по мощности дозы до  $3 \cdot 10^{13}$  рад (Si)/с.*

**А. Н. Панченко, Ю. Г. Кудрявцев,  
С. Л. Эльяш, С. П. Пухов, Е. Т. Батова,  
А. Ю. Копкин, А. В. Тетеревков**

Различные модификации ускорителя АРСА [1] находят широкое применение для исследований радиационных эффектов, отработки методик и испытаний интегральных микросхем (ИМС) при воздействии ионизирующего излучения. Область применения ускорителя АРСА для испытаний стойкости ИМС значительно ограничивают, в первую очередь, относительно невысокие дозовые и мощностные характеристики его тормозного излучения. Максимальные значения дозы и мощности дозы тормозного излучения ускорителя АРСА  $D\gamma = 300$  Р,  $P\gamma = 3 \cdot 10^{10}$  Р/с вполне достаточны для определения уровня бессбойной работы микросхем на объемном кремнии. Вместе с тем для современных микросхем на объемном кремнии выдвигаются требования сохранения параметров и восстановления работоспособности при гораздо более высоких уровнях дозового и мощностного воздействия импульсного гамма-рентгеновского излучения. Для определения уровня бессбойной работы (УБР) или времени потери работоспособности (ВПР) микросхем, изготовленных по технологии КМОП/КНС, требуются еще более высокие уровни дозово-мощностного воздействия. Отработка и физическое обоснование методов моделирования ионизационных эффектов в интегральных микросхемах с использованием электронного пучка ускорителя АРСА позволит значительно расширить дозово-мощностной диапазон его применения как для исследований радиационных эффектов, так и для испытаний стойкости микросхем к воздействию высокоинтенсивного импульсного гамма-излучения с предельными значениями дозы и мощности дозы. В основу таких испытаний может быть положен принцип равноэффективности поглощенных в активных объемах ИМС ионизационных доз различных видов ионизирующего излучения. В отечественной практике радиационных испытаний ИМС электронные пучки практически не ис-

пользуются. Опубликованные к настоящему времени немногочисленные работы направлены на исследование и отработку методов испытаний ИМС с использованием электронных пучков [2–8]. Согласно данным зарубежных источников [9–11], импульсные и импульсно-периодические электронные пучки достаточно давно применяются для радиационных исследований и испытаний ИМС, а методы испытаний и условия использования электронных пучков определены военным стандартом [12].

Расчетно-экспериментальными исследованиями, проведенными разными авторами, была установлена оптимальная для радиационных испытаний интегральных микросхем энергия электронов, 7–10 МэВ. При облучении ИМС электронами такой энергии несложно создать условия, при которых в кремниевой или сапфировой подложке генерируется распределение поглощенной дозы, очень близкое к аналогичному распределению в условиях воздействия гамма-излучения с максимальной энергией квантов 1 МэВ [7]. Кроме того высокая энергия электронов позволяет использовать для дозиметрии термолюминесцентные детекторы стандартных размеров, например, на основе стекла ИС-7 [13], размещая их непосредственно перед ИМС.

Средняя энергия спектра электронов ускорителя АРСА составляет 820 кэВ, что на порядок ниже оптимальных значений. В работах [2, 3] отмечается, что при воздействии электронного излучения такого спектра имеет место значительное поглощение электронов в элементах конструкции ИМС и измерительной схемы. Генерируемые при этом ложные электрические сигналы могут не только оказать влияние на результаты испытаний, но и привести к катастрофическому отказу ИМС. Возникают также и дополнительные проблемы с дозиметрическим сопровождением [5].

В рамках данной работы при воздействии электронного пучка ускорителя АРСА отработаны методы измерений ВПР, уровня бессбойной работы, импульсного ионизационного тока потребления КМОП и КМОП/КНС микросхем, сдвига порогового напряжения интегральных МОП транзисторов. В измерениях использованы различные микросхемы, в том числе, современные БИС производства ОАО НПЦ «ЭЛВИС» (1657РУ1У – КМОП ОЗУ) и ОАО «Ангстрем» (1620РУ2 – КМОП/КНС ОЗУ).

Для варьирования уровня дозово-мощностного нагружения ИМС, подавления электромагнитных помех на линиях связи и снижения амплитуды электрических наводок в элементах конструкции ИМС использовалась система коллиматоров, позволяющая направлять поток электронов только на кристалл микросхемы и достаточно плавно регулировать его плотность без изменения энергии электронов.

Дозиметрия электронного пучка осуществлялась расчетно-экспериментальным способом с использованием ТЛД дозиметров ИС-7 стандартного размера и последующих расчетов поглощенной дозы в активных объемах ИМС методом Монте-Карло по программе «Триада» [14]. В расчетах использовался спектр электронов ускорителя АРСА, измеренный магнитным спектрометром (рис. 1).

На рис. 2 изображено распределение поглощенной дозы по толщине кремниевой подложки микросхем при облучении со стороны коваровой крышки толщиной 0,1 мм. Приведенные на рис. 2 данные показывают, что вариации поглощенной дозы по толщине кремниевой подложки не превышают 5 % от среднего значения.

На рис. 3 представлены осциллограммы, зарегистрированные в измерениях времени потери работоспособности КМОП ОЗУ 1617РУ6 и 1657РУ1У при воздействии электронного пучка ускорителя АРСА. После воздействия обе микросхемы восстановили функционирование через 10 и 30 мкс. Ток потребления ОЗУ 1617РУ6 вернулся к исходному значению.

На рис. 4 изображены осциллограммы, зарегистрированные в измерениях времени потери работоспособности и уровня сохранности информации в одной из ячеек КМОП/КНС ОЗУ 1620РУ2. Уровень нагружения превышал по дозе  $2,5 \cdot 10^5$  рад (Si).

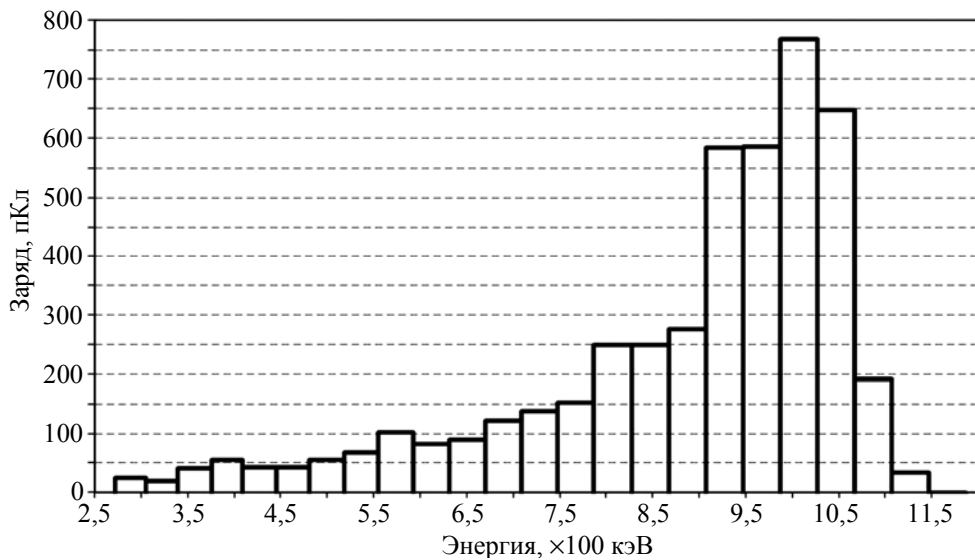


Рис. 1. Спектр электронов ускорителя ARCA, измеренный магнитным спектрометром

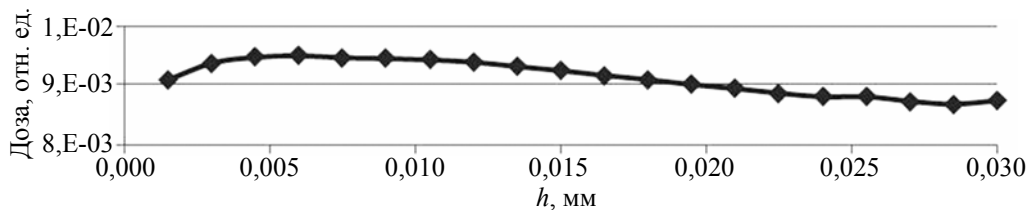
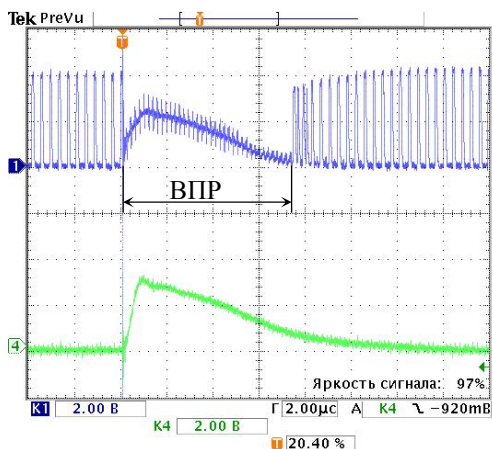
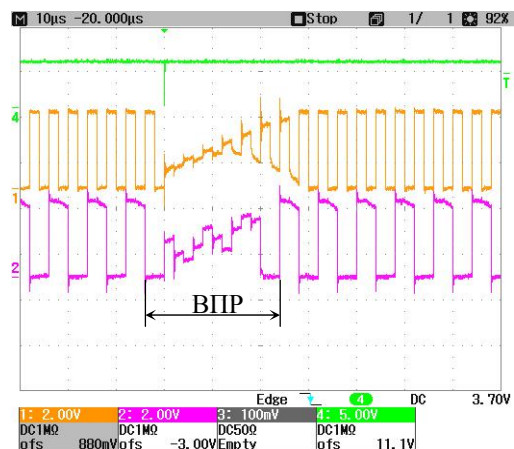


Рис. 2. Распределение поглощенной дозы по толщине кремниевой подложки микросхем при облучении со стороны коваровой крышки толщиной 0,1 мм



$D_e = 1,5 \cdot 10^3$  рад (Si), 1 – выходной сигнал,  
4 – ток потребления  
а



$D_e = 3 \cdot 10^6$  рад (Si), 1 – сигнал управления,  
2 – выходной сигнал, 4 – синхримпульс излучения  
б

Рис. 3. Временная потеря работоспособности КМОП ОЗУ 1617РУ6 (а) и 1657РУ1У (б) (см. цветную вкладку)

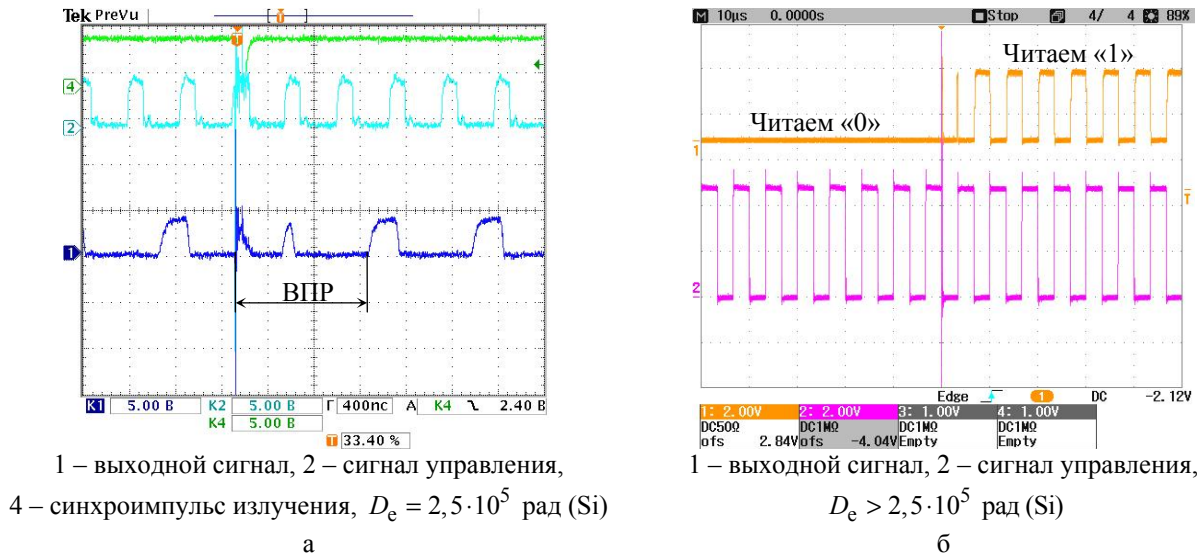


Рис. 4. Временная потеря работоспособности (а) и сбоя данных в ячейке (б) КМОП/КНС ОЗУ 1620PУ2 при воздействии электронного пучка ускорителя АРСА (см. цветную вкладку)

На рис. 5 приведена зависимость сдвига порогового напряжения *n*-канального транзистора КМОП инвертора 1526ЛН2 от дозы, измеренная при воздействии электронного пучка ускорителя АРСА.

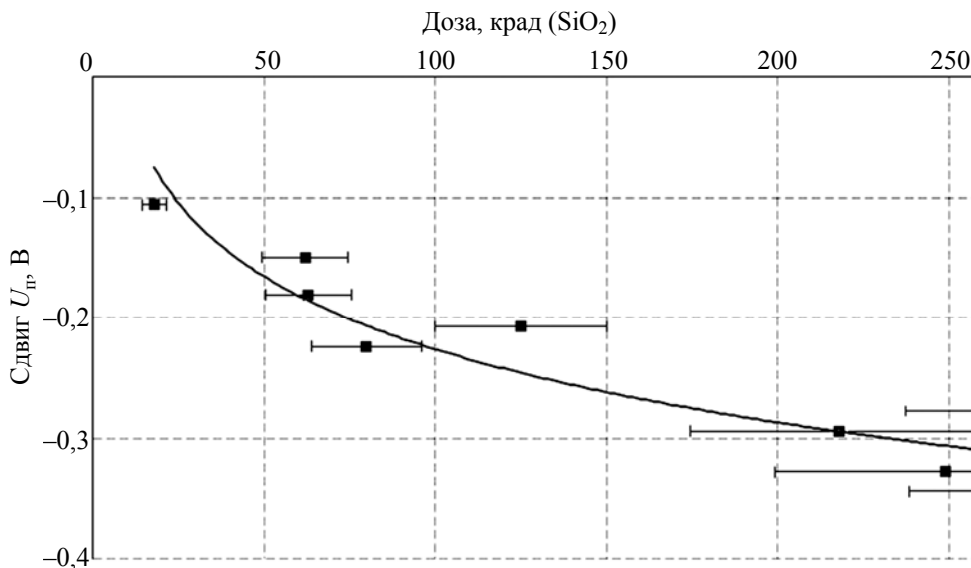


Рис. 5. Зависимость сдвига порогового напряжения *n*-канального транзистора КМОП инвертора 1526ЛН2 от дозы при воздействии электронного пучка ускорителя АРСА

Представленные экспериментальные данные свидетельствуют об эффективности подавления электромагнитных помех и защиты регистрирующей аппаратуры при выводе электронного пучка в атмосферу. Некомпенсированный заряд электронов, поглощенный в элементах конструкции микросхем, не вызвал катастрофического отказа ни одной из них.

Таким образом, результаты проведенных исследований указывают на возможность применения электронного пучка ускорителя АРСА для радиационных исследований и испытаний импульсной дозовой стойкости микросхем, испытаний по определению уровня бессбойной работы КМОП/КНС микросхем, испытаний стойкости к воздействию максимальной мощности дозы высокоинтенсивного импульсного гамма-излучения при уровнях нагружения по дозе до  $2,5 \cdot 10^5$  рад (Si), по мощности дозы до  $3 \cdot 10^{13}$  рад (Si)/с.

### *Список литературы*

1. Эльяш С. Л., Гончарова В. Ф., Калиновская Н. И., Пухов С. П. Малогабаритный импульсный ускоритель электронов АРСА для радиационных исследований // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2005. Вып. 9. С. 128–131.
2. Зинченко В. Ф., Улимов В. Н., Членов А. М. Методические особенности использования электронных пучков для моделирования воздействия импульсного ионизирующего излучения на изделия электронной техники // VIII межотраслевая конференция по радиационной стойкости: сборник докладов. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2007. С. 48–52.
3. Зинченко В. Ф., Лаврентьев К. В., Улимов В. Н., Шиян В. Д. Вторичные электромагнитные эффекты при моделировании воздействия импульсного ионизирующего излучения на полупроводниковые приборы с помощью сильноточных электронных пучков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – Москва: ФГУП НИИП. 2008. Вып. 1. С. 37–39.
4. Бакулин Ю. П., Зинченко В. Ф., Романенко А. А., Улимов В. Н., Терентьев Н. И., Черепухин В. Г. Возможности использования ускорителя «Электроника У-003» для моделирования действия импульсного ионизирующего излучения на изделия электронной техники // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – Москва: ФГУП НИИП. 2007. Вып. 3–4. С. 72–74.
5. Фигуров В. С., Байков В. В., Шелковников В. В., Тулисов Е. В. Апробация методики радиационных испытаний интегральных схем на моделирующих установках в режиме вывода электронного пучка // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – Москва: ФГУП НИИП. 2005. Вып. 3–4. С. 54–56.
6. Зинченко В. Ф., Деревянко Ю. Б., Лаврентьев К. В. Использование электронных пучков ускорителей ЛИУ-10 и АРСА для моделирования ионизационных эффектов в изделиях электронной техники // X межотраслевая конференция по радиационной стойкости: сборник докладов. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2012. С. 192–197.
7. Кудрявцев Ю. Г., Грунин А. В., Ежова И. Л., Алексеев Г. Г., Копкин А. Ю., Тельнов А. В. Отработка расчетно-экспериментальных методов испытаний дозовой стойкости КМОП микросхем с использованием пучков высокоэнергетических электронов моделирующих установок // IX межотраслевая конференция по радиационной стойкости: сборник докладов. – Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ». 2010. Т. 2. С. 60–67.
8. Кудрявцев Ю. Г., Цыганков Б. В., Панченко А. Н., Копкин А. Ю., Алексеев Г. Г., Ситников Н. П. Применение электронного пучка ускорителя ЛУ-10-20 для испытаний импульсной дозовой стойкости КМОП микросхем установок // X межотраслевая конференция по радиационной стойкости: сборник докладов. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2012. С. 118–124.

9. Smith A. J., Smith G. Electron beam simulation of pulsed photon effects in electronic devices of very high dose and dose rate // IEEE TNS. 1985. Vol. 32, N 2. P. 1198–1203.
10. Brucker G. J., Van Gunten O., Stassinopoulos E. G., August L. S., Jordan T. M. The damage equivalence of electrons, protons, and gamma-rays in MOS devices // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1982. Vol. 29, N 6. P. 1966–1969.
11. Balasinski A., Jakubowski A., Brozek T., Iniewski K. On radiation and electron beam dose and gate oxide thickness dependence of radiation defects in MOS capacitors // Physic Status Solid. 1986. P. 2–6.
12. MIL-STD-883 Test Method Standard Microcircuits / Method 1020.1.
13. Бочвар И. А., Гимадова Т. И., Кеирим-Маркус и др. Метод дозиметрии ИКС. – Москва: Атомиздат, 1977.
14. Шмаров А. Е. Программа VISUAL TRIADA – инструмент численного моделирования совместного переноса гамма-квантов, электронов и позитронов в веществе методом Монте-Карло // VI Межотраслевая конференция по радиационной стойкости. Сборник докладов. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2003. С. 129–135.

## **The application of the electron beam of accelerator ARSA for determination of dose tolerance of the integrated microcircuit**

A. N. Panchenko, U. G. Kudryavtsev, S. L. Elyash, S. P. Puhov, E. T. Batova,  
A. U. Kopkin, A. V. Teterevko

*The extract describes the possibility of the effective application of the electron beam of accelerator ARSA for determination of dose tolerance of the integrated microcircuit (under the level of loading according to the dose up to  $2.5 \cdot 10^5$  rad (Si), dose rate up to  $3 \cdot 10^{13}$  rad (Si)/s.*