

Сравнительное исследование ионизационных эффектов в стабилизаторе напряжения TEN5-2423 от протонного и гамма-излучения

А.Я. Борисов^{1,2}, Л.Н. Кессаринский^{1,2}

¹Институт экстремальной прикладной электроники НИЯУ МИФИ, г. Москва

²ОАО «ЭНПО СПЭЛС», г. Москва (aybor@spels.ru)

Аннотация — Исследована деградация параметров гибридных стабилизаторов напряжения при облучении протонами и гамма-излучением. Показано влияние ионизационных эффектов и эффектов структурных повреждений от протонного излучения на основе анализа внутренней структуры. Проведен пересчет микродозовых эффектов от протонов к эффектам поглощенной дозы. Показана высокая потенциальная чувствительность гибридных стабилизаторов напряжения к эффектам структурных повреждений.

Ключевые слова — ионизационные и неионизационные потери, гибридный стабилизатор напряжения, дозовые радиационные эффекты, структурные повреждения, микродозовый эффект.

I. ВВЕДЕНИЕ

Протонное излучение широко используется для оценки стойкости электронной компонентной базы (ЭКБ) к одиночным эффектам от космических излучений. Методика проведения таких экспериментов для набора достоверной статистики одиночных событий рекомендует облучать каждое изделие ЭКБ до набора флюенса порядка $10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-2}$. При этом энергия протонов при взаимодействии тратится на ионизацию и структурные повреждения. Первичная ионизация от протонов приводит к одиночным дозовым ионизационным эффектам («микродозовым»). Структурные повреждения (процесс упругого взаимодействия с атомами материалов) приводят к накоплению дефектов и вторичным одиночным локальным ионизационным эффектам от выбитых из узлов решетки атомов материала (например, выбитых атомов кремния в кремниевых микросхемах) [1]. Таким образом, при проведении исследований на протонах актуальной является задача оценки дозовой деградации образцов ЭКБ. Данная работа посвящена анализу влияния ионизационных эффектов и структурных повреждений от протонного излучения в гибридных стабилизаторах напряжения. В качестве объекта исследований был выбран гибридный импульсный стабилизатор напряжения TEN5-2423 (Traco Power).

II. ОБЛУЧЕНИЕ ПРОТОНАМИ

Облучение гибридных стабилизаторов напряжения протонами с энергией 1ГэВ проводилось на испытательном стенде на базе синхротрона 1ГэВ протонов в ПИЯФ (г. Гатчина). Все образцы облучались при максимальном входном напряжении (напряжении питания) 36 В, без нагрузки до флюенса $7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Задание электрического режима и контроль работоспособности образцов в процессе облучения выполнялось с помощью специального контрольно-измерительного автоматизированного комплекса на основе модульных приборов стандарта PXI (National Instruments) под общим управлением специального программного обеспечения, разработанного в среде LabVIEW. Связь с автоматизированной системой осуществлялась с помощью удаленного рабочего стола по сети Ethernet из операторской комнаты. Таким образом решалась задача обеспечения радиационной безопасности испытателей во время работы синхротрона. Подробно разработанный программно-аппаратный комплекс описан в [2], [3].

Основная задача эксперимента заключалась в контроле одиночных эффектов: катастрофического отказа, тиристорного эффекта, одиночных переходных процессов. В стабилизаторах TEN5-2423 не было зафиксировано одиночных эффектов, образцы сохранили работоспособность. Тем не менее, наблюдалась деградация параметров объектов исследования, в частности по мере набора флюенса увеличивалась величина тока потребления стабилизаторов с 13 до 19 мА. На рис. 1 приведен типовой график зависимости тока потребления образца TEN5-2423 от флюенса протонов.

По результатам оперативного анализа в ходе эксперимента было высказано предположение, что такое поведение стабилизаторов напряжения может быть связано либо с ионизационными дозовыми эффектами и, прежде всего, с деградацией мощного МОП транзистора (микродозовый эффект), либо с эффектами дефектообразования в оптоприборах (оптопаре) в его составе [1], [4], [5], [16].

Для дальнейшего анализа причин изменения параметров стабилизаторов, а также выявления доминирующего механизма радиационного поведения при облучении протонами, потребовался расчет полученной ионизационной и неионизационной дозы.

Ионизационную дозу от протонов можно оценить по формуле 1 [1], [6] перехода от локального энерговыделения к общей поглощенной дозе.

$$D = 1,6 \cdot 10^{-5} \times ЛПЭ(SiO_2) \times \Phi \times f_y \quad (1)$$

где D – поглощенная ионизационная доза; $ЛПЭ(SiO_2)$ – линейная потеря энергии протонов с заданной энергией в оксиде кремния; Φ – флюенс протонов; f_y – вероятность выхода электронно-дырочной пары после первичной рекомбинации вдоль трека протонов (приблизительно равна 100% для 1 ГэВ протонов).

Таким образом, основная задача сводилась к определению первичных линейных ионизационных потерь энергии протонами, которая была решена с использованием широко применяемой для подобных задач программы расчета SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) [7]. При расчете в качестве «мишени» использовался библиотечный материал SiO_2 . В качестве налетающего использовался ион водорода с энергией 1 ГэВ, что соответствует характеристикам пучка экспериментальной установки. В результате были получены основные характеристики взаимодействия, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики падения пучка протонов на оксид кремния

Характеристика взаимодействия протонов и оксида кремния	Значение
Энергия протонов, МэВ	1000
Ионизационные линейные потери энергии (ЛПЭ), МэВ/(мг·см ⁻²)	$1,88 \cdot 10^{-3}$
Неионизационные линейные потери энергии, МэВ/(мг·см ⁻²)	$2,77 \cdot 10^{-7}$
Длина свободного пробега, м	1,65
Расхождение пучка, мм	42

Таким образом, при подстановке результатов численного моделирования в формулу (1), для флюенса $7 \cdot 10^{10}$ см⁻² было получено значение ионизационной дозы 2,1 крад.

III. ОБЛУЧЕНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ

Для определения степени влияния ионизационных эффектов на деградацию параметров дополнительные образцы TEN5-2423 были облучены гамма-излучением в испытательном центре ОАО «ЭНПО СПЭЛС» на

изотопной установке «Гамма-панорама МИФИ» в том же электрическом режиме (36 В, без нагрузки). Гамма-излучение взаимодействует с материалом образца только по механизму ионизации, что дало возможность оценить вклад ионизационных потерь энергии в деградацию стабилизаторов [1]. В ходе эксперимента контролировалась деградация параметров тока потребления и выходного напряжения образцов стабилизаторов. Зависимость изменения тока потребления от поглощенной дозы приведена на рис. 2. На рис. 3 приведен сводный график деградации тока потребления для облучения протонами и гамма-излучением.

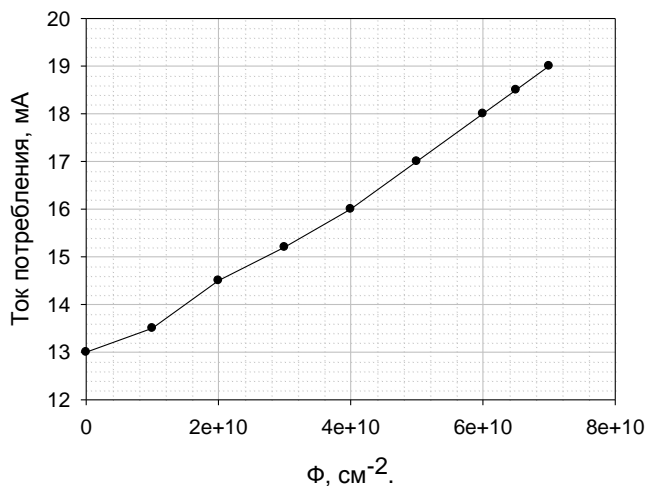


Рис. 1. График зависимости тока потребления TEN5-2423 от флюенса протонов

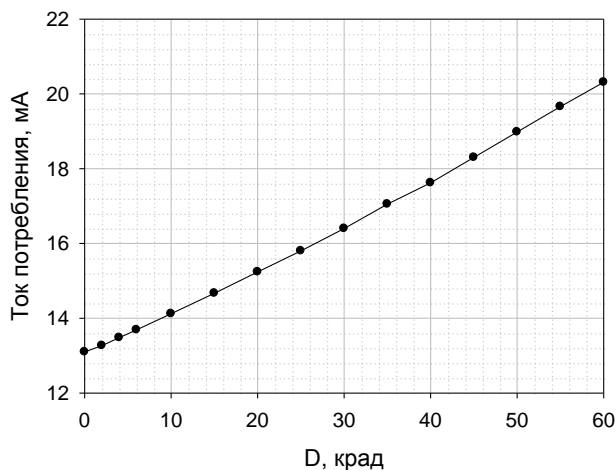


Рис. 2. График зависимости тока потребления TEN5-2423 от поглощенной дозы гамма-излучения

Изменение тока потребления образцов при облучении протонами до флюенса $7 \cdot 10^{10}$ см⁻² соответствует изменению при облучении гамма-квантами до уровня поглощенной дозы 50 крад. Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что вклад ионизационной составляющей от протонного излучения не может быть причиной

наблюдаемой деградации параметров стабилизаторов TEN5-2423 в целом. В частности, наблюдаемое поведение не может быть объяснено микродозовым эффектом в МОП транзисторе в составе изделия.

Таким образом, можно сделать предположение, что наиболее вероятным механизмом деградации стабилизаторов TEN5-2423 при облучении протонами является процесс дефектообразования.

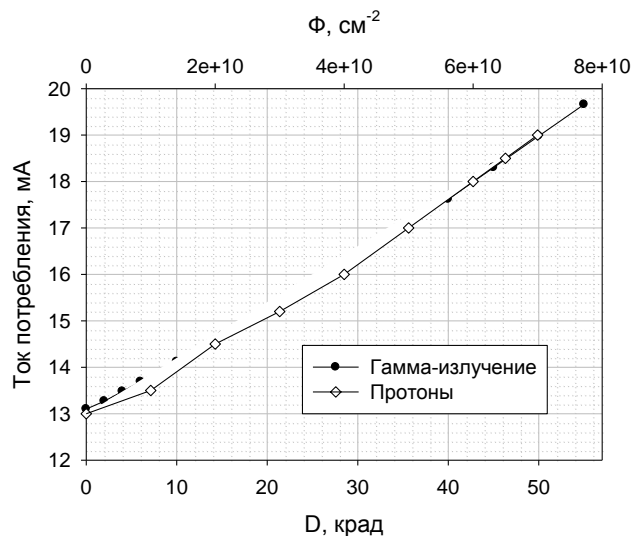


Рис. 3. Сводный график зависимости тока потребления TEN5-2423 от поглощенной дозы гамма-излучения (значения внизу) и флюенса протонов (значения сверху)

IV. АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наиболее чувствительными элементами современных гибридных импульсных стабилизаторов напряжения к структурным повреждениям (дефектообразованию) являются оптоприборы (оптопары). Большинство производителей радиационно-стойких стабилизаторов исключают оптопары из структуры изделий, применяя миниатюрные трансформаторные развязки [1]. В случае, когда исключить оптоприбор из конструкции гибридного импульсного стабилизатора невозможно, используют специализированные дорогие радиационно-стойкие оптопары, которые значительно увеличивают стоимость изделия. Таким образом, была поставлена задача провести анализ структуры TEN5-2423 для обнаружения и идентификации найденных оптоприборов.

Анализ внутренней структуры состоял из нескольких этапов. На первом этапе была проведена рентгеноскопия образцов TEN5-2423 с целью определения местоположения корпусов активных элементов для оптимизации процесса химического травления компаунда – заполнителя внутренней части металлического корпуса. На рис. 4 показан рентгеновский снимок внутреннего содержимого стабилизатора.

После установления расположения всех корпусов внутри стабилизатора была проведена механическая декапсуляция с последующим химическим травлением компаунда образцов TEN5-2423 с полным открытием корпусов активных элементов без повреждения маркировки. На рис. 5 показана фотография вскрытого образца стабилизатора.

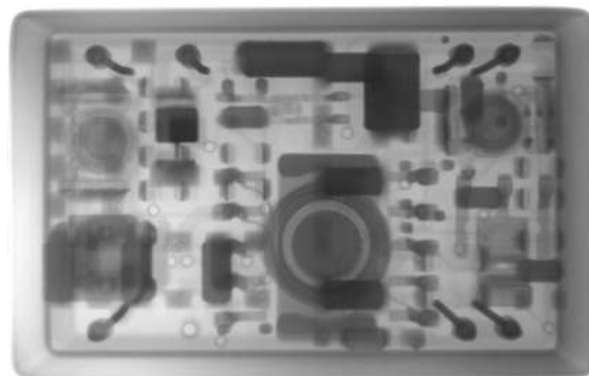


Рис. 4. Рентгеновский снимок стабилизатора TEN5-2423

В результате анализа внутренней структуры образцов TEN5-2423 была обнаружена и идентифицирована оптопара серии PC3N7 (SHARP), внешний вид которой приведен на рис. 6.



Рис. 5. Фотография вскрытого стабилизатора TEN5-2423

Вопросам радиационной деградации оптоприборов вследствие эффектов структурных повреждений посвящено достаточное количество статей. Обзор теоретических работ и экспериментальных данных по облучению протонами однотипных оптопар (например, [8], [9]) показывает, что при флюенсах протонов $10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-2}$ коэффициент передачи большинства оптопар падает до уровня 0,2...0,4 от первоначального значения. С учетом того, что оптопары в составе современных импульсных стабилизаторов напряжения применяют в цепи обратной связи для гальванической развязки входного и выходного сигналов, указанная деградация

параметров приводит к постепенному изменению выходного напряжения стабилизатора одновременно с ростом входного тока [5], [10], [15]. Снижение коэффициента передачи приводит к ложному детектированию ШИМ-контроллером стабилизатора падения выходного напряжения, и, как следствие, увеличивает коэффициент заполнения сигнала управления ключевым элементом первичной обмотки трансформатора (МОП транзистора). Таким образом, снижение коэффициента передачи оптопары приводит к увеличению входного тока стабилизатора (тока потребления).

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе эксперимента с облучением протонами гибридных импульсных стабилизаторов напряжения TEN5-2423 был обнаружен эффект увеличения тока потребления по мере набора флюенса. Предварительный анализ показал, что данный эффект мог быть связан с дозовой деградацией МОП транзистора от ионизационных потерь протонного излучения (микродозовый эффект) или со структурными повреждениями в оптопаре от неионизационных потерь (дефектообразование). С помощью среды SRIM была рассчитана ионизационная доза от протонного излучения. Было проведено облучение стабилизаторов гамма-излучением, чтобы установить чувствительность образцов к ионизационной поглощенной дозе. Результаты анализа расчетных и экспериментальных данных показали, что деградация параметров стабилизаторов не могла быть вызвана ионизационными потерями от протонов. Был проведен анализ внутренней структуры образцов TEN5-2423 и обзор литературных данных по структурным повреждениям оптопар. Анализ показал, что характерное изменение параметров оптопар для использованных флюенсов приводит к увеличению тока потребления гибридных импульсных стабилизаторов напряжения.

В дальнейшем планируется облучить образцы TEN5-2423 нейтронным излучением для уточнения степени влияния структурных повреждений на параметры стабилизатора.

Одним из важных результатов работы является обнаруженная низкая стойкость гибридных стабилизаторов напряжения TEN5-2423, по сравнению с однотипными изделиями. Таким образом, показана необходимость учитывать вклад дефектообразования при оценке соответствия данного типа изделий требованиям по стойкости к космическим радиационным факторам.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. 319 с.
 [2] Бобровский Д.В., Давыдов Г.Г., Петров А.Г., Яненко А.В., Ахметов А.О., Боруздина А.Б., Калашников О.А., Кессаринский Л.Н., Некрасов П.В., Никифоров А.Ю., Уланова А.В. Реализация базовых методов

радиационных испытаний ЭКБ на основе аппаратно-программного комплекса аппаратуры National Instruments // Известия высших учебных заведений. Электроника. М.: МИЭТ. 2012. № 5 (97). С. 91-104.
 [3] Кессаринский Л.Н., Соковишин М.А., Борисов А.Я. Автоматизированный контрольно-измерительный стенд для испытаний аналоговых и силовых ЭРИ // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments – 2012: Сборник трудов XI международной научно-практической конференции. 2012. С. 26-28.
 [4] Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. М.: Радио и связь, 1994. 164 с.
 [5] Кессаринский Л.Н., Бойченко Д.В., Никифоров А.Ю. Анализ радиационного поведения импульсных стабилизаторов напряжения // Микроэлектроника. М.: Наука. 2012. Т. 41. № 4. С. 275-283.
 [6] Buchner S., Marshall P., Kniffin S., LaBel K. Proton test guideline development // NASA electronic parts and packaging program. 2002. P. 69.
 [7] URL: <http://www.srim.org> (дата обращения: 01.02.2014).
 [8] Johnston A.H., Rax B.G. Proton damage in linear and digital optocouplers // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1999. № 47 (3). P. 437-443.
 [9] Johnston A.H. Reliability and Radiation Effects in Compound Semiconductors // World Scientific. 2010. P. 360.
 [10] Кессаринский Л.Н., Бойченко Д.В., Никифоров А.Ю. Модель реакции импульсных стабилизаторов напряжения при воздействии космических радиационных факторов // Известия высших учебных заведений. Электроника. М.: МИЭТ. 2012. № 5 (97). С. 55-59.
 [11] Chumakov A.I., Skorobogatov P.K., Artamonov A.S., Barbashov V.M. The influence of electrical impulse on IC transient radiation-induced effects // European Space Agency, (Special Publication) ESA SP(536). 2004. art. № EP1. P. 403-406.
 [12] Chumakov A.I., Nikiforov A.T., Telets V.A., Gerasimov V.F., Yanenko A.V., Sogoyan A.V. IC space radiation effects experimental simulation and estimation methods // Radiation Measurements. 1999. V. 30. № 5. P. 547-552.
 [13] Chumakov A.I., Nikiforov A.Y., Skorobogatov P.K., Sogoyan A.V. IC's radiation effects modeling and estimation // Microelectronics Reliability. 1999. V. 40. № 12. P. 1997-2018.
 [14] Belyakov V.V., Pershenkov V.S., Zebrev G.I., Sogoyan A.V., Chumakov A.I., Nikiforov A.Y., Skorobogatov P.K. Methods for the Prediction of Total-Dose Effects on Modern Integrated Semiconductor Devices in Space: A Review // Russian Microelectronics. 2003. V. 32. № 1. P. 25-39.
 [15] Кессаринский Л.Н., Бойченко Д.В., Вавилов В.А. Исследование стойкости импульсных стабилизаторов к действию ионизирующего излучения и тяжелых заряженных частиц // Радиационная стойкость. Научно-технический сборник. М.: МИФИ, 2008. Вып. 11. С. 89-90.
 [16] Кессаринский Л.Н., Бойченко Д.В., Братко Д.В., Ванжа М.М., Орлов А.А. Оценка радиационной стойкости преобразователей напряжения по результатам испытаний типовых представителей // Радиационная стойкость. Научно-технический сборник. М.: МИФИ, 2009. Вып. 12. С. 29-30.