

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СБОЕВ ЦИФРОВЫХ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОНИКАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Н. Ф. Асмолова, И. Ю. Забавичев, А. А. Потехин, А. С. Пузанов

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Введение

В соответствии с дорожной картой развития приборов и систем, представленной институтом инженеров электротехники и электроники [1], одним из приоритетных направлений развития современной электроники является уменьшение топологических размеров элементарных ячеек цифровых микросхем.

При этом усиливается влияние структурных дефектов, производимых проникающим излучением, так как характерный диаметр области разупорядочения становится сопоставимым с размером рабочей области полупроводникового элемента хотя бы по одному направлению [2–6].

Известно, что при воздействии нейтронного, протонного, электронного и гамма-излучений образуются комплексы дефектов, отжиг которых происходит при различной температуре. Источниками низкоинтенсивных проникающих излучений являются как космическое пространство, так и ядерные источники энергии на борту космических аппаратов. Возникающие при этом радиационные эффекты можно получить с использованием исследовательских ядерных реакторов. Такой подход позволяет смоделировать поведение микросхемы в условиях воздействия низкоинтенсивных проникающих излучений космического пространства и значительно снижает конечную стоимость готового продукта.

Достоверная оценка радиационной стойкости (как расчетная, так и экспериментальная) часто осложнена явлениями перемежающихся отказов и «окон прозрачности» отказов цифровых микросхем, в зависимости от интенсивности и суммарного значения воздействия проникающих излучений. Существует несколько теоретических интерпретаций указанных явлений, но ни одна из них в настоящее время не является доминирующей.

В связи с вышеизложенным, практический интерес представляет разработка феноменологической модели, опирающейся на базовые физические представления радиационной физики полупроводниковых приборов, и позволяющей адекватно интерпретировать экспериментальные данные, получаемые в ходе проведения облучательного эксперимента.

Для цифровой аппаратуры основным критерием работоспособности является вероятность сбоев и отказов логических ячеек, ввиду того, что воздействие проникающих излучений носит стохастический характер. Следует отметить, что при частичном пе-

рекрытии ячейки цифровой микросхемы комплексом радиационных дефектов она может сохранять свою работоспособность. Таким образом, отказ ячейки микросхемы обуславливается не только образованием комплекса дефектов, но и его положением в самой ячейке. Из литературы известно, что при образовании комплексов дефектов происходит увеличение сопротивления полупроводниковых материалов [7]. В условиях сохранения величины протекающего через ячейки тока, будет увеличиваться рассеиваемая мощность, а как следствие, и температура кристалла. В результате этого происходит частичный отжиг дефектов и снижение сопротивления с частичным восстановлением их структуры. Таким образом, частота сбоев может являться немонотонной функцией времени облучения микросхемы.

Методика эксперимента

В соответствии с нормативными документами [8, 9] необратимые изменения параметров изделий микроэлектроники при воздействии электронов и протонов моделируют последовательным облучением аппаратуры гамма- и нейтронными излучениями. При таком моделировании требования к радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов в виде потоков электронов и протонов космического пространства и их спектрально-энергетических характеристик пересчитывают в дозы, поглощенные в процессах ионизации и структурных повреждений. Расчет поглощенных доз осуществляют по материалу активных областей критичных электрорадиоизделий. Таким образом, получают требования к радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов, выраженные в поглощенных дозах.

Затем для конкретных моделирующих установок (с их спектрально-энергетическими характеристиками) вычисляют поток нейтронов (моделирует структурные повреждения воздействия протонов) и экспозиционную дозу гамма-излучения. При их воздействии на радиоэлектронную аппаратуру поглощаются ионизационная и структурная дозы, численно равные указанным выше соответствующим поглощенным дозам от электронного и протонного излучений. Экспозиционная доза должна определяться с учетом ионизирующего действия нейтронов и вклада сопутствующего гамма-излучения при испытаниях на ядерном реакторе.

Результаты и их обсуждение

Эксперимент состоял в подаче цифровых импульсов определенной амплитуды и частоты на цифровой усилитель, подвергающийся воздействию низкоинтенсивных проникающих излучений. При помощи автоматизированного комплекса проводилось определение параметров усиленного сигнала по типу норма/не норма. В результате на выходе получалась бинарная последовательность отсчетов. При первичной оценке необработанных данных получены графики, представленные на рис. 1.

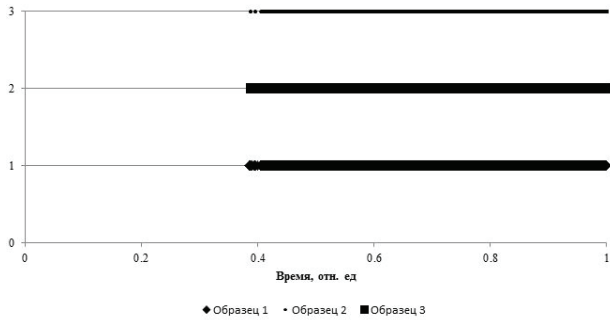


Рис. 1. Вид представления необработанных данных эксперимента

Как видно из графиков, они имеют достаточно низкую информативность ввиду трудности интерпретации полученных данных. Поэтому возникла задача обработки этих данных.

Достоверность оценки получаемых результатов при усреднении полученных данных методом скользящего окна определяется доверительной вероятностью среднего (частота сбоев), получаемого при усреднении. Результатом эксперимента стала бинарная дискретная функция (норма/не норма).

При больших значениях выборок, используемых в окне, неоднородность распределения сбоев в ходе эксперимента искажает полученный результат. Как видно из графика на рис. 2, функция достаточно изрезана и не дает представление о характере эксперимента. В обратном случае, при большом числе усредняемых отсчетов, возможен и обратный эффект – сглаживание характерных размеров неоднородностей, что ведет к неправильной трактовке эксперимента.

Поэтому одной из задач данной работы являлось нахождение параметров усреднения, позволяющих получить качественную картину эксперимента без потери основных зависимостей.

Доверительная вероятность определяется следующим образом [10]:

$$P(\tilde{a} - \varepsilon < a < \tilde{a} + \varepsilon) = \beta, \quad (1)$$

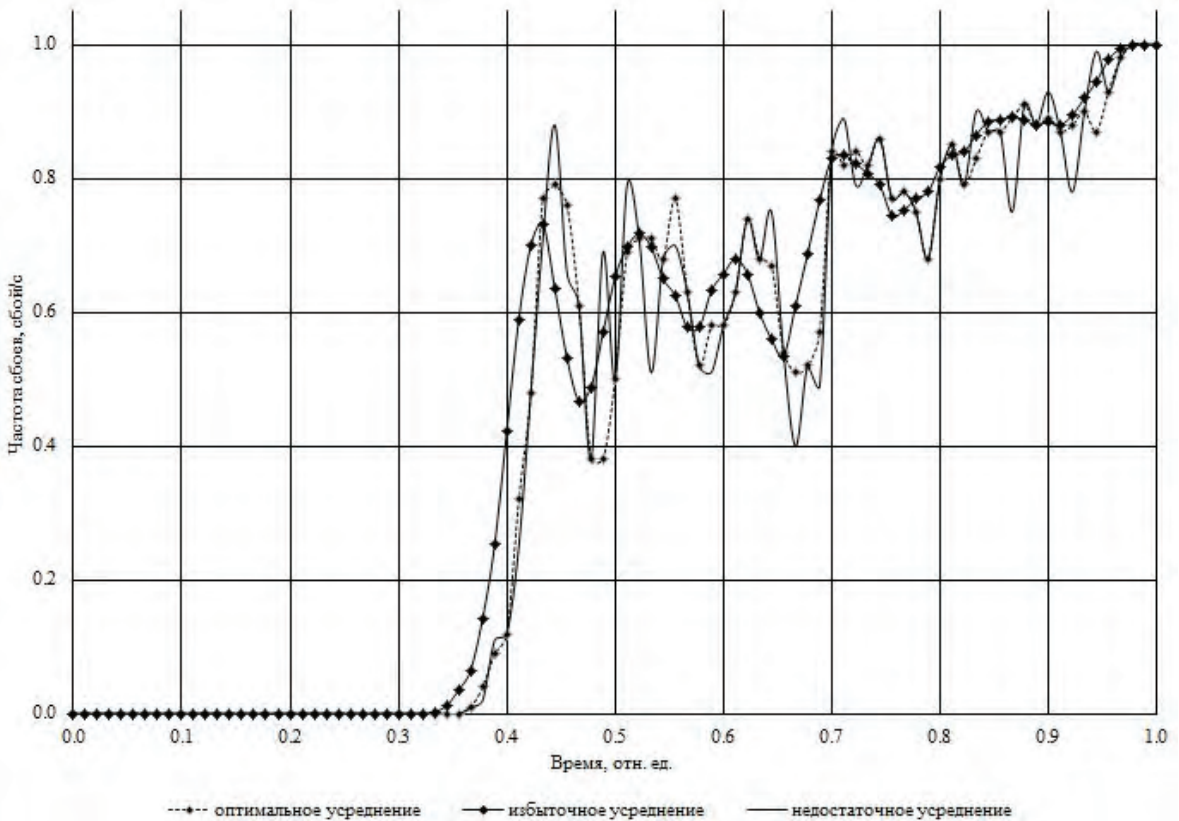


Рис. 2. Сравнение графиков с оптимальным и избыточным размером окон усреднения для образца № 1

где a – истинное значение параметра, \tilde{a} – полученная несмещенная оценка параметра a . Для оценки доверительного интервала, в который с заданной доверительной вероятностью попадает выбранная величина, необходимо определить тип полученного распределения. В соответствии с центральной предельной теоремой, при усреднении большого количества данных, распределение можно считать нормальным. Для обработки результатов данного эксперимента была выбрана доверительная вероятность, равная 99,9 %. Для его вычисления необходимо рассчитать оценку среднего и дисперсии внутри окна, а также среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (2)$$

$$\tilde{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(X_i - \tilde{m} \right)^2, \quad (3)$$

$$\sigma_{\tilde{m}} = \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}}, \quad (4)$$

где X_i – измеренная i -я величина, n – число отсчетов внутри окна усреднения.

При этом, доверительный интервал для заданного окна и типа случайного распределения внутри окна можно рассчитать по формуле:

$$\varepsilon_{\beta} = \sigma_{\tilde{m}} \arg \Phi^* \left(\frac{1+\beta}{2} \right). \quad (5)$$

При этом для обратного интерполирования функции Лапласа значение, соответствующее вероятности 99,73 % составляет 3.

Исходя из методики, приведенной выше, вычислено значение доверительного интервала для параметров окна усреднения, используемых в дальнейшем, см. рис. 3.

Стоит отметить, что значение доверительного интервала становится отличным от 0 тогда, когда вероятность появления ошибок отлична от 0. При подобных значениях доверительной вероятности можно считать полученный доверительный интервал достоверным значением измеряемой величины.

Частота сбоев и интенсивность отказов, прогнозируемые для данного вида цифровых усилителей, представлены на рис. 4.

Предполагается, что такое anomальное поведение микросхем, рис.5, обусловлено проявлением двух конкурирующих эффектов – накоплением дефектов при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений с материалом активной области прибора, а также диффузией и частичным отжигом дефектов при разогреве рабочей области в момент прохождения импульса тока. Стоит отметить, что не все дефекты подвержены влиянию низкотемпературного отжига. В случае, если эти образования имеют достаточно большой характерный размер и стабильную структуру, то при повышении температуры они могут не отжигаться. Предполагается, что именно накопление дефектов, не подверженных подобному типу отжига и привело к катастрофическому отказу в конце описываемого эксперимента для всех исследуемых образцов.

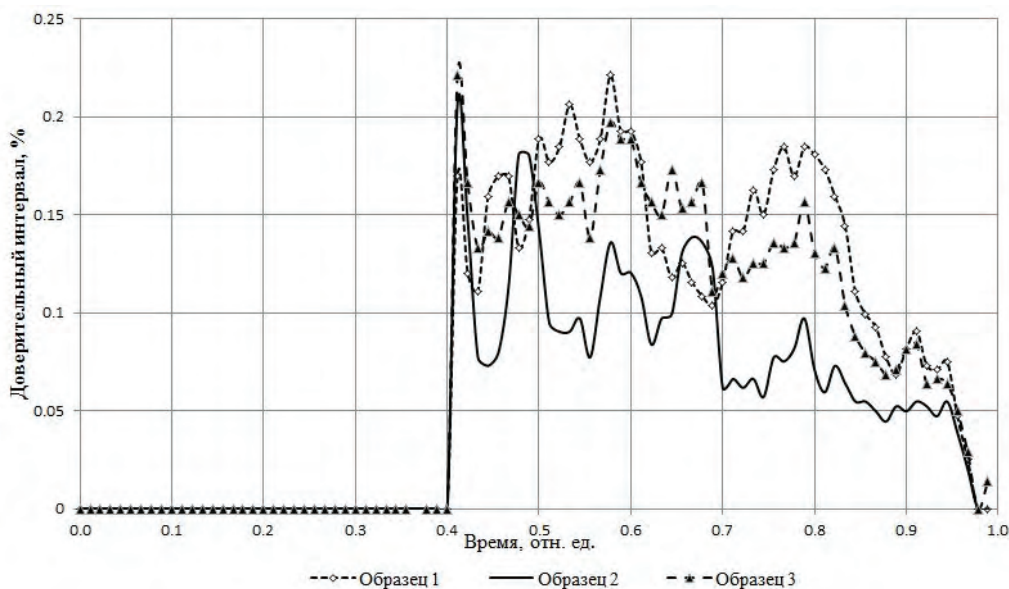


Рис. 3. Величина доверительного интервала в процентах для каждого усредненного значения для трех испытуемых образцов

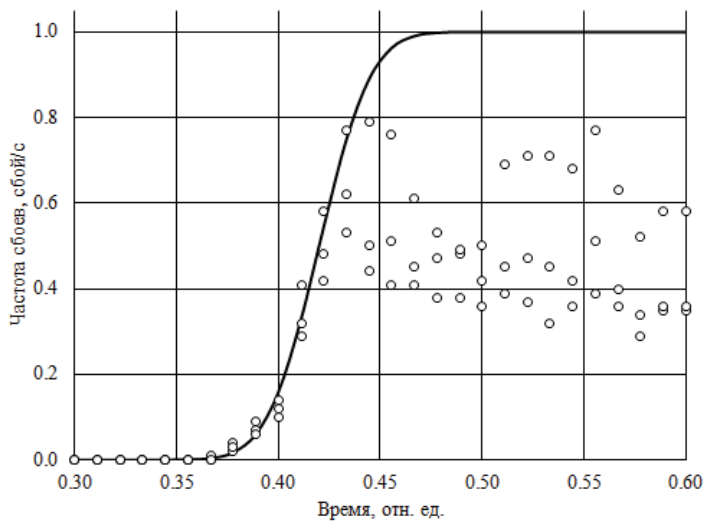


Рис. 4. Частота сбоев и частота отказов (прогнозируемые): экспериментальные обработанные данные, _____ расчетная ожидаемая частота отказов

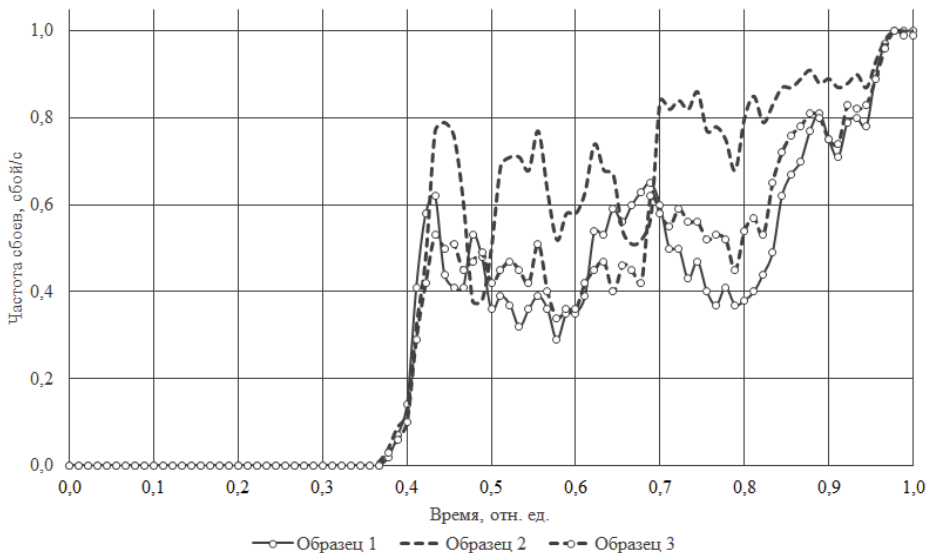


Рис. 5. Результаты эксперимента, усредненные методом скользящего окна с оптимальными параметрами усреднения (800 отсчетов) для 3 испытуемых образцов

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИЯРФ ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» за проведение облучательных экспериментов в рамках совместных исследований.

Литература

1. International roadmap for devices and systems: 2017 edition. More Moore.

2. Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. Перенос носителей заряда через тонкую базу гетеробиполярного транзистора при радиационном воздействии // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 1. С. 71–75.

3. Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А., Волкова Е. В., Павельев Д. Г. Высоочастотное

детектирование процессов формирования и стабилизации кластера радиационных дефектов в полупроводниковых структурах // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 12. С. 1585–1592.

4. Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. Влияние случайных неоднородностей в пространственном распределении кластеров радиационных дефектов на перенос носителей заряда через тонкую базу гетеробиполярного транзистора при нейтронном воздействии // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, № 12. С. 1706–1712.

5. Забавичев И. Ю., Оболенская Е. С., Потехин А. А., Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. Транспорт горячих носителей заряда в Si, GaAs, InGaAs и GaN субмикронных полупроводниковых структурах с нанометровыми кластерами радиационных дефектов // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1489–1492.

6. Забавичев И. Ю., Потехин А. А., Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. Деградация характеристик биполярных транзисторов на основе GaAs с тонкой базой при возникновении в них нанометровых кластеров радиационных дефектов под действием нейтронного облучения // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1520–1524.

7. Зеегер С. Физика полупроводников. М.: Мир, 1977.

8. ОСТ 134-1034-2003. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов.

Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам.

9. РД В 319.03.31-99. Изделия электронной техники, квантовой электроники, электротехнические изделия военного назначения. Рациональный состав и последовательность испытаний на радиационную стойкость.

10. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.