

Моделирование электрических схем с учетом влияния ТЗЧ в САПР «КИПАРИС»

С. Кокин¹, В. Перминов², С. Волков³, С. Морозов³

УДК 621.382 | ВАК 05.13.12

Длительность активной эксплуатации космической аппаратуры во многом определяется надежной работой микроэлектронных компонентов. Переход к субмикронным размерам ИС приводит не только к уменьшению зависимости характеристик интегральных МОП-транзисторов от полной накопленной дозы, но и к увеличению частоты сбоев от тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ). Для преодоления влияния ионизирующих излучений космического пространства на характеристики интегральных схем наряду с технологическими и конструктивно-топологическими методами применяют схемотехнические. В статье рассматривается новый подход к решению проблемы схемотехнического моделирования сбоев от ТЗЧ в интегральных схемах, который позволяет проектировать библиотечные элементы ИС с заданным уровнем радиационной стойкости.

Для полноценного схемотехнического проектирования цифровых схем была разработана процедура поиска уязвимых при воздействии ТЗЧ узлов в библиотечных элементах ИС для технологии кремний на изоляторе (КНИ) с субмикронными размерами (0,25 мкм). Процедура основана на моделировании поведения схемы с использованием отечественной САПР «КИПАРИС», разработанной ООО «Интегральные Решения». Основные компоненты САПР «КИПАРИС»:

- графический редактор электрических схем SymCAP;
- программа SPICE-моделирования электрических схем SymSPICE;
- программа визуализации результатов моделирования SymProbe.

Для передачи информации в другие системы проектирования, например САПР от Cadence, используется база данных OpenAccess.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЗЧ

Заряженная частица, проникающая в толщу полупроводника, вызывает ионизацию его атомов. В результате генерируются электронно-дырочные пары, которые начинают двигаться под действием внешнего электрического поля. Таким образом, на достаточно короткий промежуток времени может открыться проводящий канал в закрытом транзисторе или измениться величина тока, что может привести к ложному срабатыванию электрической схемы. Функцию потери и пространственного разброса энергии

можно определить с помощью программы расчета пробега ионов в веществе с использованием данных об энергии исходной ТЗЧ. В результате рассчитывается справочная таблица для потери энергии любой ТЗЧ в данном веществе.

Скорость, с которой ТЗЧ теряет энергию за счет возбуждения и ионизации атомов, определяется энергией торможения [1, 2]. Величина энергии, расходуемой на торможение ТЗЧ в единице пути, – так называемая линейная потеря энергии (ЛПЭ, или LET – Linear Energy Transfer) – прямо пропорциональна квадрату атомного номера частицы и обратно пропорциональна ее энергии.

Для определения ЛПЭ наиболее часто используют формулу [3]:

$$LET = (1/\rho) (dE/dx),$$

где ρ – плотность материала, dE/dx – потеря энергии в материале на единицу длины трека частицы (энергия торможения).

Интегрирование LET вдоль длины трека дает полную энергию рассеивания.

На рис. 1 показан механизм формирования заряда в КНИ-структуре [4].

Учет влияния ТЗЧ на поведение цифровых библиотечных элементов цифровых ИС традиционно основан на добавлении в узлы схемы источников тока, имитирующих генерацию и последующее растекание электрических зарядов при попадании ТЗЧ в ИС. Однако, как показывает практика, такой подход не позволяет точно описывать поведение библиотечных элементов.

В процессе моделирования путем задания линейной потери энергии и характеристического радиуса

¹ ООО «Интегральные Решения», директор по науке, kokinsa@mail.ru.

² ООО «Интегральные Решения».

³ ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН.

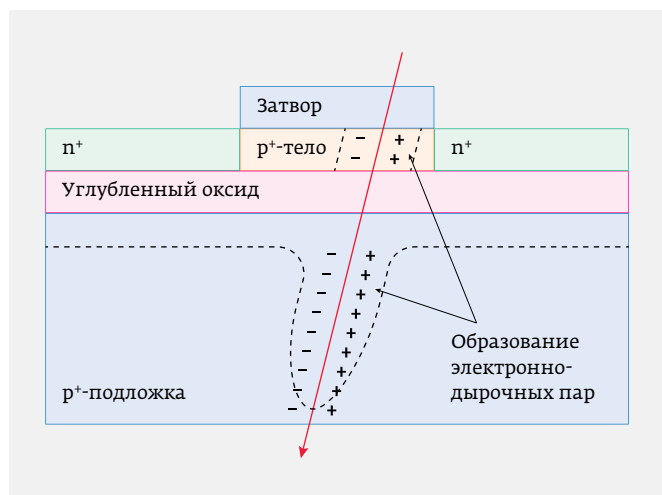


Рис. 1. Механизм формирования заряда в КНИ-структуре

распределения генерируемых электронно-дырочных пар было получено семейство временных зависимостей токов на электродах (исток, затворе, стоке и теле) транзистора при воздействии ТЗЧ (рис. 2). С помощью расчета пробега ионов в веществе получены данные для ионов ксенона, криптона и аргона с линейной потерей энергии 70, 40 и 16 МэВ·см²/мг соответственно. Затем было выполнено трехмерное моделирование воздействия ТЗЧ для шести вариантов транзисторов (пяти n-канальных и одного p-канального), используемых при разработке библиотек стандартных элементов

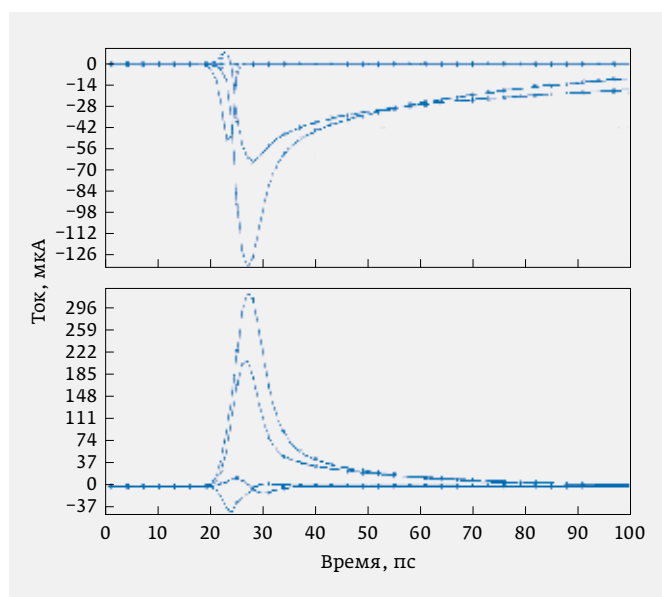


Рис. 2. Токи, генерируемые ТЗЧ, в зависимости от режима работы транзистора: сверху – напряжение смещения на стоке включено; внизу – напряжение питания отключено

ИС. Результаты трехмерного моделирования, например с помощью ПО TCAD компании Synopsys, служат входными данными для программы SymSPICE.

Во всех случаях при моделировании принималось, что ТЗЧ внедрялись приблизительно по центру подзатворной области транзистора. Моделирование выполнялось как при отсутствии смещения на стоке и затворе, так и в случае положительного (для n-канальных транзисторов) и отрицательного (для p-канальных транзисторов) смещения.

Направление движения ТЗЧ характеризуется углом отклонения от направления, перпендикулярного поверхности пластины, и углом поворота пластины относительно оси абсцисс X.

В отличие от традиционного подхода в данной работе для моделирования влияния ТЗЧ предлагается использовать вектор токов, протекающих через все электроды транзистора, который возникает при попадании ТЗЧ в активную область транзистора. Поскольку на электроды транзистора могут подаваться различные уровни напряжений в зависимости от режимов работы схемы, то и вектор токов будет менять свое значение во времени (растекание зарядов), а также зависеть от условий работы схемы. Рассчитанный набор векторов токов для транзисторов разных геометрических размеров при различных значениях потенциалов на электродах служит входной информацией для программы схемотехнического моделирования SymSPICE.

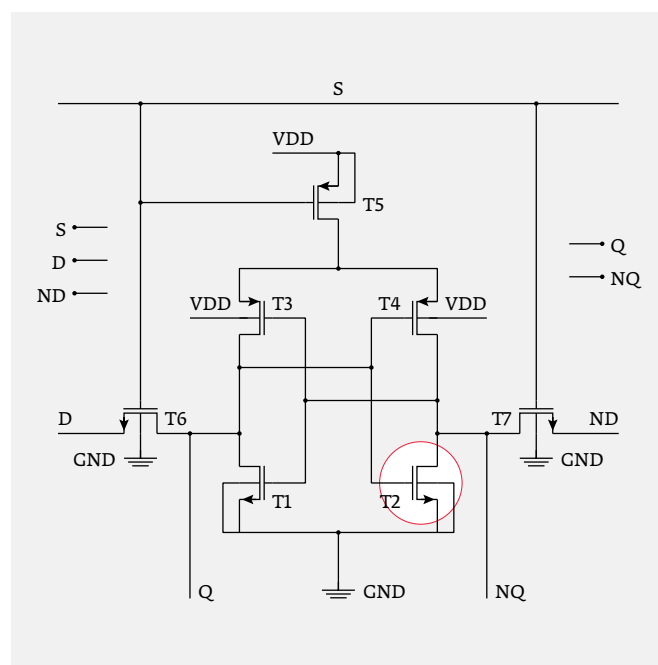


Рис. 3. Синхронный усилитель считывания (выделен транзистор, в который попадает заряженная частица)

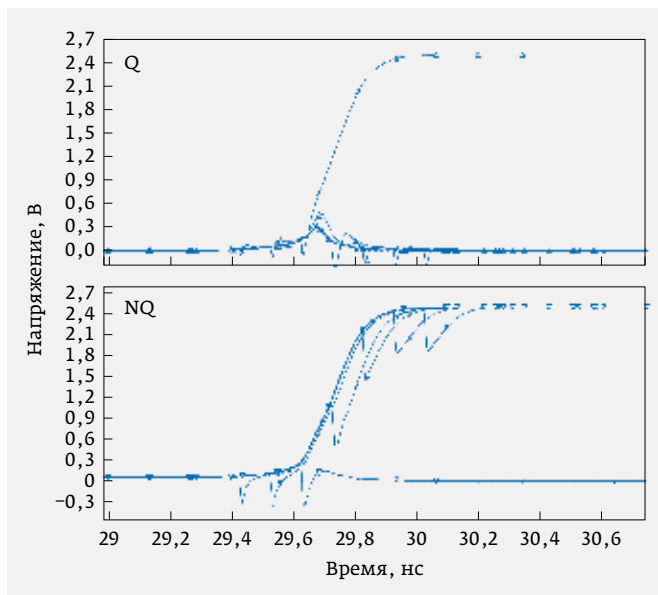


Рис. 4. Результаты моделирования влияния ТЗЧ на работу усилителя считывания

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЗЧ НА ПОВЕДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ

Моделирование влияния ТЗЧ было выполнено на примере синхронного усилителя считывания (рис. 3). Результаты моделирования в программе SymSPICE показаны на рис. 4, на котором приведены временные диаграммы сигналов на выводах Q и NQ (см. рис. 3), характеризующие поведение синхронного усилителя считывания при попадании ТЗЧ в транзистор T2 в разные моменты времени. Как видно на рис. 4, в статическом режиме усилитель не чувствителен к ТЗЧ. Однако в момент подачи на входы усилителя управляющих воздействий сбой возможен в узком временном диапазоне. Для устранения сбоя достаточно разнести фронты двух входных импульсов.

На рис. 5 и 6 представлены результаты схемотехнического моделирования значительно более сложной схемы – скан-триггера, содержащего несколько десятков транзисторов. В схеме был найден элемент, наиболее чувствительный к попаданию заряженной частицы. В случае, когда ЛПЭ иона, внедренного в этот элемент схемы,

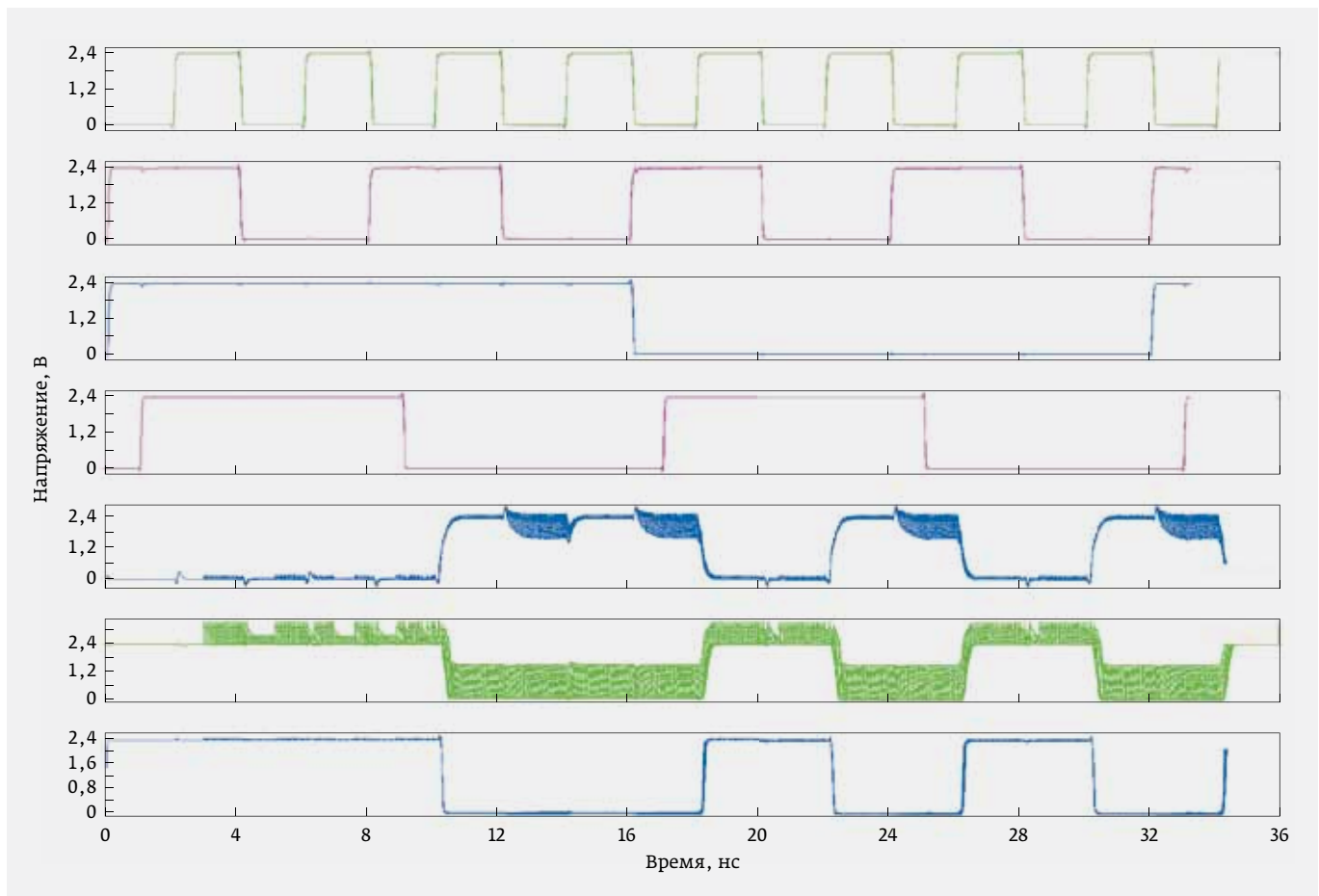


Рис. 5. Временные диаграммы моделирования скан-триггера при воздействии иона с ЛПЭ $44 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$, недостаточной для сбоя

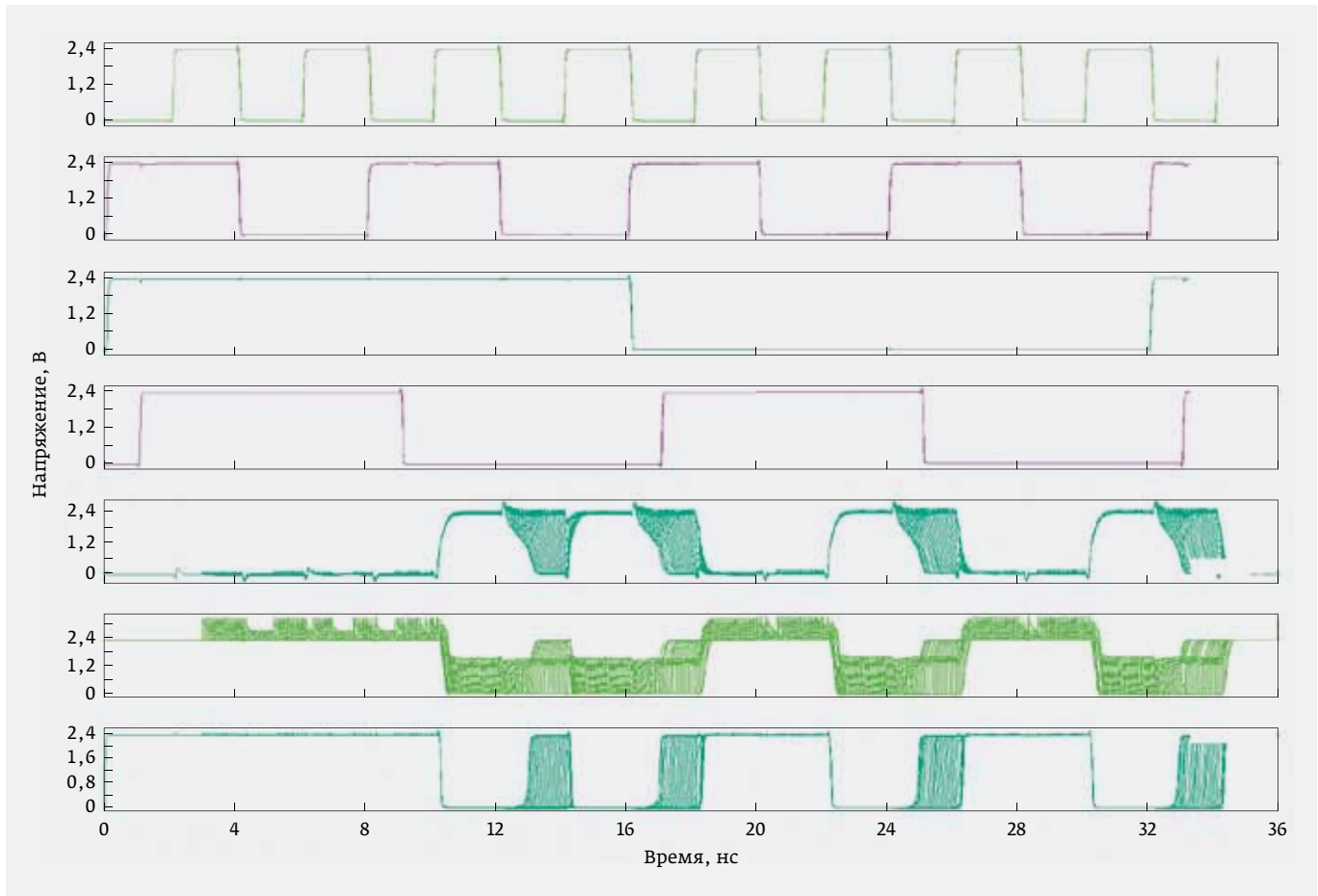


Рис. 6. Временные диаграммы моделирования скан-триггера при воздействии иона с ЛПЭ $46 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$, приводящей к сбою

составляет $44 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$, сбой скан-триггера не происходит. Сбой проявляется при воздействии иона с ЛПЭ, равной $46 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ (см. рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявление чувствительных элементов схем, оказавшихся по результатам моделирования наиболее уязвимыми, позволяет внести изменения в схему для повышения стойкости к воздействию ТЗЧ. В ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН описанный выше подход был использован для коррекции библиотечных элементов памяти, результатом чего стало значительное повышение их стойкости не только в режиме хранения, но и в динамическом режиме работы. Кроме того, удалось исключить влияние передних и задних фронтов тактового сигнала на поведение схемы при воздействии ТЗЧ. Таким образом, элементы памяти после коррекции чувствительных к сбоям узлов схем отличаются стойкостью к воздействию ТЗЧ с граничным значением ЛПЭ, равным $44 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$.

С помощью отечественной САПР «КИПАРИС» (www.is-eda.ru), или Symica (www.symica.com)

в англоязычном сегменте Интернета, были разработаны оригинальные интерфейсы программы схемотехнического моделирования SymSPICE, используемые для подключения наборов векторов токов и управления ими.

ЛИТЕРАТУРА

1. **O'Bryan M., Label K., Reed R., Barth J.** et al. Single Event Effect and Radiation Damage Results For Candidate Spacecraft. – IEEE NSREC Conference, 1998.
2. **Label K.** et al. Commercial Microelectronics Technologies for Applications in the Satellite Radiation Environment. – <http://flick.gsfc.nasa.gov/radhome.htm>, Nov. 1999.
3. **Schwank J. R., Shaneyfelt M. R., Dodd P. E.** Sandia Radiation Hardness Assurance Testing of Microelectronic Devices and Integrated Circuits: Radiation Environments, Physical Mechanisms, and Foundations for Hardness Assurance. – Sandia National Laboratories Document SAND-2008-6851pp.
4. **McLean F. B., Oldham T. R.** Charge funneling in n- and p-type Si substrates. – IEEE Trans. Nucl. Sci. 1982. Vol. 29. No. 6. PP. 2018–2023.