

6000 К (жёлтый); 2) основа поверхности звезды – светлая, по всей поверхности относительно равномерно распределены более тёмные области; 3) фрагменты поверхности непрерывно изменяют свой цвет по синусоидальному закону вокруг положения равновесия, своего для каждого фрагмента поверхности; 4) визуальный эффект возникновения, развития и исчезновения гранул достигается тем, что соседние фрагменты флуктуируют с различным периодом.

В качестве основы для конечного изображения поверхности используется чёрно-белая текстура, содержащая белый шум.

В качестве генератора периодов колебаний цвета элементов поверхности взята следующая хэш-подобная функция:

1. На входе текстурные координаты фрагмента поверхности;
2. На выходе частота флуктуации;
3. Для близких чисел должны даваться различные результаты;
4. Изменяя число возможных состояний выхода генератора,

можно влиять на плавность «течения» поверхности.

Флуктуации поверхности реализуются в виде уникального для каждого фрагмента добавочного коэффициента.

**Выводы.** Шейдеры предоставляют возможности для визуализации виртуальных миров с применением разнообразных эффектов. Эксперименты с программным кодом шейдеров могут приводить к открытию новых интересных графических эффектов. Сложные с точки зрения расчётов модели физических процессов можно имитировать, добиваясь достаточно схожего изображения при небольших вычислительных затратах.

УДК 621.382

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДИНОЧНОГО СБОЯ В МОП-ТРАНЗИСТОРЕ**

студент Ловшенко И. Ю.,

*Научн. руководитель - канд. техн. наук, доцент, Стелпицкий В. Р.*

Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники  
Минск, Беларусь

С развитием полупроводниковых технологий, когда постоянно уменьшаются размеры и напряжение питания интегральных микро-

схем (ИМС), а тактовая частота растет, задача повышения радиационной стойкости становится важной для производителей коммерческой микроэлектроники. Ее решение требует принятия мер на всех уровнях разработки ИМС: синтеза и верификации, трассировки шин питания, конструирования библиотечных элементов схем, технологического процесса изготовления. Моделирование радиационных эффектов позволяет значительно сократить время и затраты на разработку радиационно стойких ИМС.

Одиночный сбой (ОС, англ. Single-event Upset, SEU) является наиболее распространенным и наименее опасным последствием ионизирующего воздействия. Обычно ОС происходят, когда тяжелые частицы (космические лучи, протоны, электроны, альфа-частицы, термические нейтроны и т.д.) попадают в ИМС. Проникая вглубь полупроводникового материала, они оставляют за собой след свободных носителей заряда [1-2]. В случае обычных МОП-схем в подзатворном диэлектрике происходит генерация электронно-дырочных пар. Импульс тока, вызванный рекомбинацией индуцированных ионом дырок и электронов, изменяет состояние логического элемента. С уменьшением размеров транзисторов уменьшается и величина ионизирующего заряда, достаточного для ОС, который зависит от напряжений на электродах прибора и линейной передачи энергии (ЛПЭ, англ. Linear energy transfer, LET). Основные принципы учета радиационных эффектов при моделировании ИС изложены в [3]. Моделирование технологического маршрута формирования и электрических характеристик структуры мощного МОП-транзистора выполнялось с использованием программного комплекса компании SILVACO [4].

ОС вызван частицей с линейной энергией транспорта равной  $37,2 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$  (что соответствует иону брома [1]), проходящей в центре устройства ( $x = 0$ ). В момент удара напряжение на затворе равно  $-13,9 \text{ В}$ , на коллекторе  $30 \text{ В}$ .

Распределение концентрации дырок через 5, 50 и 150 пикосекунд после радиационного воздействия показаны на рис. 1. Результаты моделирования тока коллектора представлены на рис. 2. Результаты моделирования показывают, что отдельная ядерная частица (ОЯЧ) вызывает генерацию дополнительных носителей заряда.

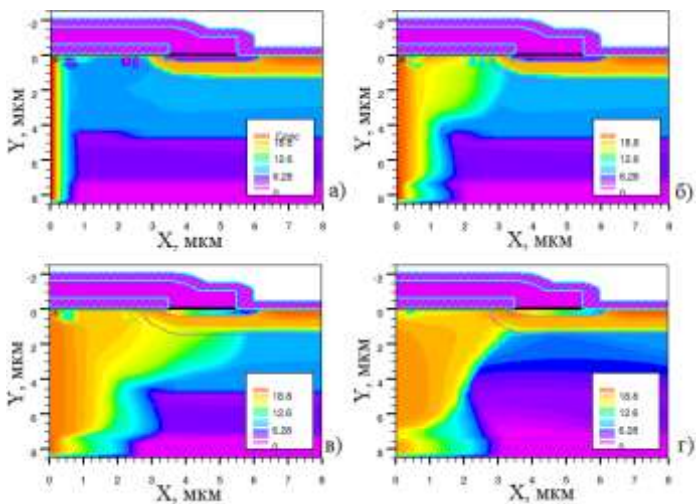


Рис. 1. Распределение концентрации дырок в структуре мощного МОП-транзистора в момент времени  $t = 0$  с (а),  $t = 5 \cdot 10^{-12}$  с (б),  $t = 50 \cdot 10^{-12}$  с (в),  $t = 150 \cdot 10^{-12}$  с (г).

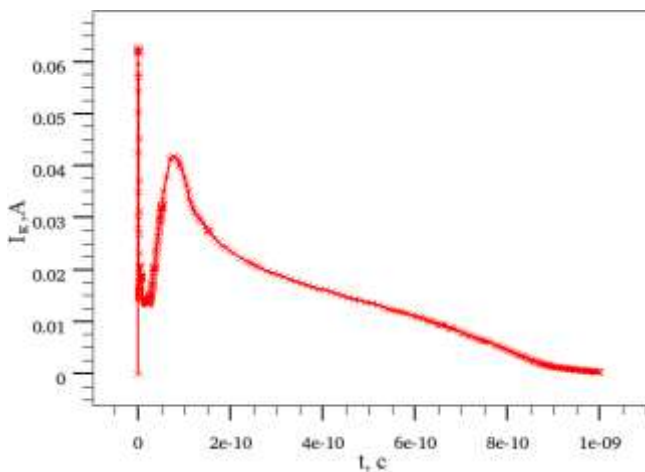


Рис. 2. Динамика изменения тока коллектора

Эти носители заряда являются причиной увеличения тока коллектора до значения 60 мА. В дальнейшем ток коллектора снижается до первоначальной величины (момент времени  $t = 9 \cdot 10^{-10}$  с).

Один из распространенных способов борьбы с ОС и накоплением индуцированного излучением заряда — изготовление ИС по технологии «Кремний на изоляторе» (КНИ, англ. Silicon-on-insulator, SOI).

### *Литература*

1. Никифоров А. Ю. Радиационные эффекты в КМОП ИС. М., 1984.
2. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М., 2004.
3. Петросянец К. О., Самбурский Л. М., Харитонов И. А. Компактная макромодель КНИ/КНС МОП-транзистора, учитывающая радиационные эффекты // Известия вузов. Электроника. 2011. № 1. С. 20–27.
4. SILVACO. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://silvaco.com/> – Дата доступа: 20.01.2014.

УДК 004.4

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИФФУЗИОННО-ДРЕЙФОВОЙ МОДЕЛИ**

студенты Боровик А.М., Чан Туан Чунг,

*Научн. руководитель - канд. техн. наук, доцент, Стемпичкий В.Р.*

Белорусский государственный университет информатики

и радиоэлектроники

Минск, Беларусь

Каждый переход к новым технологическим нормам проектирования приводит к появлению новых физических эффектов в МОП-транзисторах, для учета которых необходимо создавать новые либо адаптировать существующие модели. Оптимизация как эффективный алгоритм, позволяющий получить область экстремума целевой функции с заданной точностью, является основной областью использования методов и результатов проведения статистического