

Модель функции передачи модуляции фоточувствительных СБИС при воздействии ОЗЧ

А.А. Пугачёв^{1,2}, Г.А. Иванова²

¹Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Пульсар», г. Москва
pugachev@pulsarnpp.ru

²Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, г. Москва

Аннотация — Важнейшим показателем качества фоточувствительных СБИС (ФЧ СБИС) является разрешающая способность (РС). ФЧ СБИС - это высокочувствительные детекторы, и воздействие внешних факторов может привести к существенному снижению РС. Предложен метод оценки деградации РС через расчет функции передачи модуляции ФЧ СБИС при действии одиночной заряженной частицы на основе приборно-технологического моделирования.

Ключевые слова — фотоприемная матричная СБИС; разрешающая способность; функция передачи модуляции; физико-топологическое моделирование, одиночная заряженная частица

I. ВВЕДЕНИЕ

Повышение разрешающей способности (РС) является одной из ключевых проблем проектирования фоточувствительных СБИС. Фоточувствительные СБИС (ФЧ СБИС) являются безальтернативной элементной базой гетерогенных оптико-электронных систем (ОЭС). Важнейшим показателем качества ФЧ СБИС является именно ее разрешающая способность (РС), которая, в конечном итоге, определяет разрешающую способность всей ОЭС. ФЧ СБИС являются высокочувствительными детекторами излучения, и поэтому очень уязвимы для различных внешних факторов: рентгеновского и гамма-излучений, одиночных заряженных частиц (ОЗЧ), космических лучей и т.д. [1]. Воздействие внешних факторов может привести к существенному снижению РС и в некоторых случаях к полному исчезновению изображения ФЧ СБИС. Таким образом, анализ зависимости РС ФЧ СБИС от внешних факторов является крайне актуальной задачей.

Как при накоплении дозы облучения, так и при воздействии одиночных заряженных частиц (ОЗЧ), в ФЧ СБИС в подзатворных диэлектриках и в объеме полупроводника возникают заряды, которые экранируют электрические поля управляющих электродов или перетекают между фоточувствительными элементами. При больших значениях этих зарядов изображение может либо исказиться, либо быть утеряно в деталях.

Результаты накопления дозы и действия ОЗЧ определяются не только физическими эффектами

взаимодействия «внешних факторов» с материалом СБИС, но и сложными объемными электрофизическими процессами перераспределения носителей заряда, генерированных этим внешним воздействием. Эти процессы зависят от конфигурации поверхностных проводящих и диэлектрических слоев, профиля легирующих примесей и электрического режима работы схемы. Для анализа фоточувствительных СБИС особенно актуальным является учет объемных эффектов перераспределения генерированных носителей заряда. Этот анализ недоступен для применяемых до настоящего времени аналитических моделей разрешающей способности.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основным интегральным показателем качества оптико-электронной системы (ОЭС) является её разрешающая способность (РС). Для малагабаритных ОЭС, предназначенных для систем технического зрения, систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), высокоточных бесконтактных измерительных систем и ряда других, разрешение ограничивается в основном разрешением электронного фотоприемного блока на основе фоточувствительной СБИС. В настоящее время фоточувствительные СБИС достигли уровня, характеризующегося размерами фотоприемных элементов менее 3×3 мкм². Вследствие этого стало очень сложно теоретически предсказать действие внешних факторов на качество изображения, формируемого ФЧ на приборах с зарядовой связью (ПЗС) из-за зависимости этого качества от очень большого числа факторов [2]. Требуются специальные экспериментальные исследования для каждого конкретного случая конструкции и области применения ПЗС. Как отмечается в [1], производители уже не могут с высокой степенью гарантировать радиационную стойкость своих фотоприемников. Уже в 1970 – 1980 г.г. было понято, что фоточувствительные ПЗС не являются радиационно-стойкими приборами при их применении в космосе и для военных целей.

В принципе, не существует понятия «отказ ФЧ СБИС». Для оценки воздействия различных внешних факторов на работу фотоприемника применяют понятие «снижение качества изображения»: это появление локальных дефектов на изображении,

снижение контраста, разрешения и т.д. Для оценки действия ОЗЧ на изображение, таким образом, требуется применить какой-либо критерий, позволяющий оценить снижение качества изображения. ОЗЧ воздействуют на кристалл СБИС за очень непродолжительное время (порядка единиц пикосекунд), однако сгенерированный «трек» частицы - «облако» электронов и дырок - затем «рассасывается» за время, сравнимое со временем накопления одного или даже нескольких кадров изображения. При этом на данных кадрах возможна локальная потеря изображения или общее ухудшение его информационного качества. Соответственно, одной из главных задач становится разработка критерия и числовой меры для оценки результата воздействия ОЗЧ на изображение, формируемое ФЧ СБИС.

III. МЕТРИКИ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

При проектировании ФЧ СБИС одной из важных задач является правильный выбор метрики для оценки её разрешающей способности. Метрика разрешения во многом определяет объем работ для ее достижения при проектировании ФЧ СБИС. Выбор метрики требует тщательного анализа характера объекта и требований задачи приема и обработки его изображения. В таблице 1 приведены основные метрики разрешения и соответствующие им классы систем наблюдения [3]. Некоторые задачи приема и обработки изображения требуют для оценки его качества применения сразу нескольких критериев – мер разрешения.

IV. ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА ФПМ ФЧ СБИС

Наиболее информативной числовой мерой разрешающей способности является Функция Передачи Модуляции – ФПМ [4].

Известно, что Функция Передачи Модуляции любой системы приема изображений определяется как зависящее от пространственной частоты (ПЧ) отношение максимальной модуляции выходного пространственного сигнала к максимальной модуляции периодического входного пространственного сигнала заданной формы [5]. Под модуляцией положительно определенного сигнала понимается отношение:

$$M = (A_{\max} - A_{\min}) / (A_{\max} + A_{\min}), \quad (1)$$

где A_{\max} и A_{\min} – максимальная и минимальная амплитуды сигнала, соответственно. ФПМ (MTF – modulation transfer function), таким образом, описывается выражением:

$$MTF(u) = M_{\text{вых}}(u) / M_{\text{вх}}(u), \quad (2)$$

где $M_{\text{вых}}$, $M_{\text{вх}}$ – модуляция выходного и входного сигналов, соответственно, u – пространственная частота.

Выходной сигнал (рассматривается двумерный сигнал в фокальной плоскости фотоприемника $g(x,y)$) есть результат свертки входного пространственного сигнала $f(x,y)$ с импульсным откликом фотоприемника $h(x,y)$, называемым «функцией рассеяния точки» (ФРТ, PSF - Point Spread Function):

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y), \quad (3)$$

где \otimes – символ операции свертки.

Таблица 1

Метрики разрешающей способности

№	Метрика	Описание	Применение
1	Критерий Рэля	Способность различить два соседних источника света	Телескопические системы
2	Диск Эйри	Диаметр выходного пятна от точечного источника, определяемый дифракционным пределом оптической системы	Характеристика качества любой оптической системы
3	Диаметр Блора	Реальный минимальный диаметр выходного пятна от точечного источника	Телескопические системы
4	Предельное разрешение	Пространственная частота, при которой функция передачи модуляции спадает до уровня 0,02 – 0,1	Фото - Видео камеры Системы ДЗЗ* Микроскопия
5	Телевизионное предельное разрешение	Максимальное число ТВ линий по вертикали	Телевизионные камеры и мониторы
6	Минимальный разрешенный размер на местности (объекте)	Одиночная тестовая цель минимального размера на местности (объекте), которую способна различить система	Системы ДЗЗ
7	Разрешение на местности (объекте)	Оценка минимального размера на местности (объекте), который различает система	Системы ДЗЗ Микроскопия
8	Рисэл (resel)	Область наименьшего размера с заданными свойствами, которую различает система	Системы ДЗЗ, Системы наблюдения на основе видеокамер

* - дистанционное зондирование Земли

Частотная зависимость выходного сигнала получается путем применения преобразования Фурье:

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v), \quad (4)$$

где $G(u, v)$, $F(u, v)$ и $H(u, v)$ – спектры выходного и входного сигналов и ФРТ соответственно, u, v – пространственные частоты. Соответственно:

$$H(u, v) = G(u, v) / F(u, v). \quad (5)$$

ФПМ по определению есть амплитуда $H(u, v)$ и представляет из себя модуль данной комплексной функции:

$$MTF(u, v) = |H(u, v)|. \quad (6)$$

Таким образом, согласно описанному выше определению, существует два метода расчета ФПМ: первый основан на анализе амплитуды выходного пространственного сигнала, второй – на выражении ФПМ через импульсный отклик фотоприемника.

Первый метод. Как правило, служит для вывода аналитических выражений ФПМ [6]-[7]. Входной световой поток задается в виде одномерной косинусоидальной или периодической ступенчатой функции, затем для каждого элемента массива рассчитывается величина собираемого элементом фотогенерированного заряда. Формально результат интегрирования входного потока в пределах площади элемента g_T представляет из себя свертку входного сигнала f с геометрическим откликом фотоприемного элемента h_T :

$$g_{\bar{A}}(x) = f(x) \otimes h_{\bar{A}}(x). \quad (7)$$

Затем рассчитывается перераспределение фотогенерированных носителей заряда между элементами путем решения уравнения диффузии в области равномерно легированной подложки. Полученное аналитическое выражение для результирующего распределения носителей g представляет свертку распределения g_T , (являющегося результатом геометрической выборки исходного сигнала f) с диффузионным откликом массива фотоприемных элементов h_D :

$$g(x) = g_T(x) \otimes h_D(x) = f(x) \otimes h_T(x) \otimes h_D(x), \quad (8)$$

которое в частотной области имеет вид:

$$G(u) = F(u) \cdot H_{\bar{A}}(u) \cdot H_{\bar{A}}(u). \quad (9)$$

В окончательном аналитическом выражении, связывающем выходной и входной сигналы, выделяются члены, которые и представляют ФПМ фотоприемника [6]. Ключевыми моментами данного метода являются:

- необходимость упрощения топологии и объемной структуры элемента

- тщательный выбор ограничений при решении уравнения диффузии.

К преимуществам моделей ФПМ с заданием входного сигнала в виде косинусоидальной либо периодической ступенчатой функции можно отнести:

- аналитическая форма для выражения ФПМ;
- малое время моделирования.

Данный метод не позволяет получить аналитические выражения ФПМ для двух важных случаев:

- при произвольном – не вдоль строк или столбцов матричного массива элементов - направлении входного пространственного сигнала;
- при несимметричных топологиях фотоприемных элементов и прямоугольной сетке расположения элементов в матрице.

Второй метод. Применяется при построении аналитических, численных и эмпирических моделей ФПМ [8], [9]-[12].

Входной сигнал задается в виде одной из форм δ – функции, т.е. точкой, линией либо ступенью. Тогда выходной сигнал определяется выражением:

$$g(x, y) = \delta(x, y) \otimes h(x, y), \quad (10)$$

и, следовательно, импульсный отклик равен производной от выходного сигнала:

$$h(x, y) = g'(x, y). \quad (11)$$

ФПМ получаем согласно выражению (6). В случае упрощенного представления топологии и внутренней структуры фотоприемного элемента [8], $g(x, y)$ может быть получена аналитически. В случае сложных топологий и профилей примесей требуется численное моделирование пространственного распределения фотогенерированных носителей заряда либо эмпирическое определение $g(x, y)$. При этом функция $g(x, y)$ будет дискретной и принимать значения в точках сетки с шагом, соответствующим шагу расположения элементов в фотоприемной матрице.

Ключевыми моментами данного метода являются:

- определение дискретной функции $g(x, y)$,
- аппроксимация дискретной функции $g(x, y)$.

Преимущества анализа ФПМ с помощью задания входного сигнала в виде δ - функции очевидны:

- анализ ФПМ для матриц элементов с произвольной топологией,
- возможность задания произвольного направления пространственного сигнала (ФПМ по произвольному направлению).

V. ОСНОВНАЯ ИДЕЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

Таким образом, из рассмотрения методов определения РС через ФПМ становится ясно, что для определения результатов воздействия ОЗЧ на РС фотоприемника необходимо применять ФПМ, определяемую через отклик на точечный сигнал с последующим определением ФПМ через функцию рассеяния точки – ФРТ.

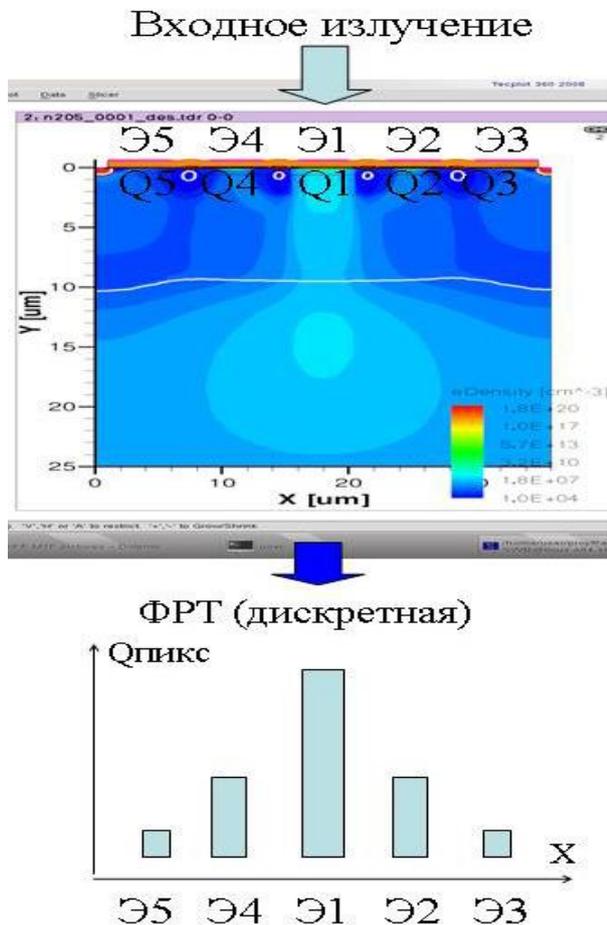


Рис. 1. Принцип построения краевой функции рассеяния для ФЧ СБИС

На рис. 1 дано двумерное распределение фотогенерированных носителей заряда в некоторый момент времени после поступления входного оптического сигнала. Фрагмент строки состоит из 5 фотоприемных элементов, а «точечный» входной сигнал захватывает полностью площадь элемента Э1. В результате диффузионного перераспределения носителей заряда в объеме подложки фотогенерированный заряд попадает также в элементы 2 – 5. По зарядам, накопленным в элементах 1-5, строится краевая функция рассеяния. Для случая оптического сигнала в качестве «эталона» часто выбирается сигнал именно рассмотренного вида. При этом обеспечивается полная определенность ситуации выбора формы сигнала и характера его проецирования на массив фотоприемных элементов.

Для случая моделирования воздействия ОЗЧ не существует общепринятого подхода к выбору формы входного сигнала, обеспечивающего однозначность, прежде всего, направлений падения ОЗЧ в фотоприемный элемент. Очевидно, что для обеспечения указанной однозначной определенности необходимо использовать некий аналог ФРТ от сигнала, порождаемого частицей или группой частиц. По аналогии с исследованием РС с помощью Функции Рассеяния Пиксела (ФРП) в [13] предлагается применять аналогичный подход на основе ФРП и для ОЗЧ.

Для исключения неопределенности формы входного сигнала ОЗЧ, и, прежде всего, с практической точки зрения, с целью обеспечения возможности сравнения конструкторско-технологических решений фотоприемных элементов предлагаются специальные «тест-сигналы» для ОЗЧ.

VI. ТЕСТ-СИГНАЛЫ ДЛЯ ОЗЧ

Предлагаются три тест-сигнала, отличающиеся углами входа траектории ОЗЧ в область фотоприемного элемента, рис. 2 (вертикальное сечение кристалла вглубь подложки). Данные тест-сигналы снимают пространственную неопределенность входного сигнала при воздействии ОЗЧ на массив фотоприемных элементов.

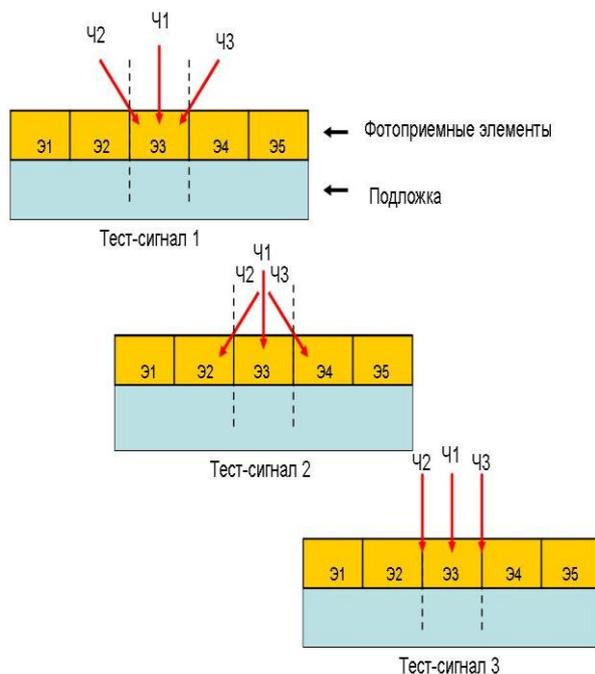


Рис. 2. Тест-сигналы для построения ФРТ для ОЗЧ

VII. ОЦЕНКА ПОТЕРЬ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

ФРТ для тест-сигнала означает, какие пространственные частоты содержатся в изображении данного тест сигнала. Это изображение будет «накладываться» на основное изображение. При этом в месте локализации тест-сигнала на основном изображении будут потеряны фрагменты с частотами,

величина модуляции которых меньше величины модуляции для аналогичных частот тест-сигнала. Таким образом, «наложив» ФПМ для входного сигнала на ФПМ для тестового ОЗЧ-сигнала можно будет определить диапазоны частот, для которых модуляция ОЗЧ-сигнала будет выше модуляции входного оптического сигнала. Эти частоты и могут быть потеряны на основном изображении при попадании ОЗЧ. Сравнивая ФПМ для входных сигналов различных вариантов конструкций пикселей можно выбрать наилучшее конструкторско-технологическое решение.

Таким образом, предлагаемый метод направлен на обеспечение возможности сравнения различных вариантов конструкций фотоприемных элементов.

VIII. МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предлагаемый метод состоит из следующих 4 шагов.

1. Выбор условий численного эксперимента:
 - параметры частицы,
 - управляющие напряжения фотоприемных ячеек,
 - характеристики процесса приема основного изображения (время накопления, мощность и пространственная частота входного сигнала).
2. Моделирование распределений электронов для тестовых входных сигналов.
3. Построение ФРТ для тестовых входных сигналов.
4. Оценка потерь разрешающей способности.

IX. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА

В качестве примера представлены результаты анализа потерь РС матричной фоточувствительной ПЗС СБИС, предназначенной для приема рентгеновских изображений и работающей в режиме прямого преобразования рентгеновских фотонов. Данная матрица имеет фоточувствительные элементы относительно больших размеров – около 20×20 мкм², что связано с особенностями ПЗС, предназначенных именно для приема рентгеновского излучения. В качестве заряженных частиц выступали протоны с энергией 1 МэВ.

На рис. 3 в горизонтальных рядах даны двумерные распределения электронов, генерированные предложенными тест-сигналами через 5 наносекунд, через 10 миллисекунд и в момент окончания стадии накопления после вхождения частиц соответственно для двух вариантов тест-сигналов. На рис. 4 представлены распределения электронов в момент окончания стадии накопления, по которым были получены ФРТ массива данных фотоприемных элементов. На рис. 5 даны ФПМ, построенные для данных двух тест-сигналов.

Из анализа ФПМ следует, что тест-сигнал рис. 3 верхнего ряда не позволит увидеть на изображении детали с пространственными частотами выше 6 лин/мм, а тест-сигнал рис. 3 нижнего ряда – даже ниже

2 лин/мм. Это говорит о том, что детали на изображениях с такими частотами будут не видны. Для подтверждения корректности выбора тест-сигналов на рис. 6. даны ФПМ для рентгеночувствительных ПЗС из [14].

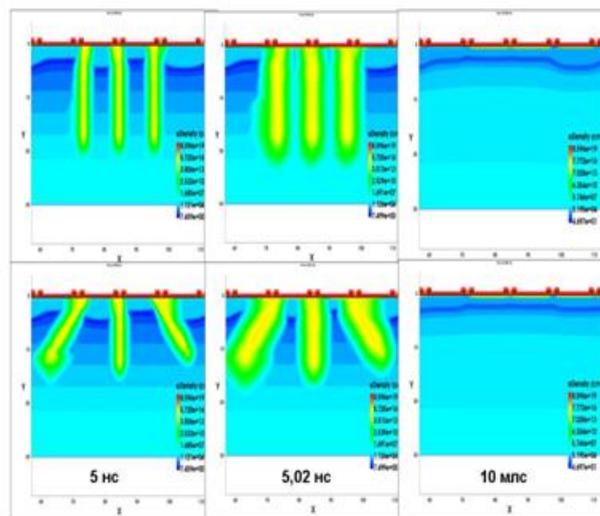


Рис. 3. Распределения электронов, генерированных тест-сигналами в различные моменты времени

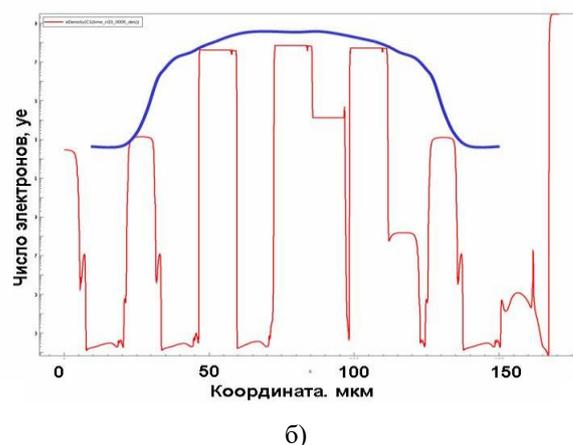
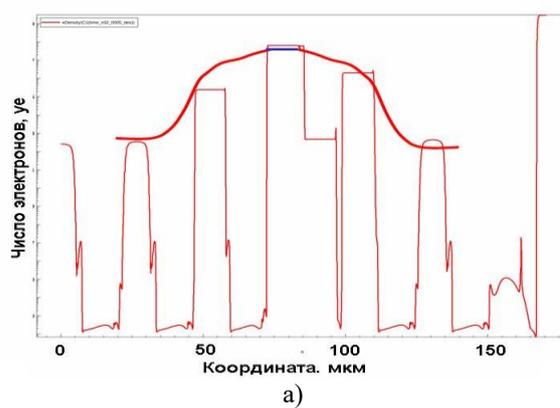


Рис. 4. Распределения электронов по элементам и их огибающие: а – тест-сигнал 1, б – тест-сигнал 2

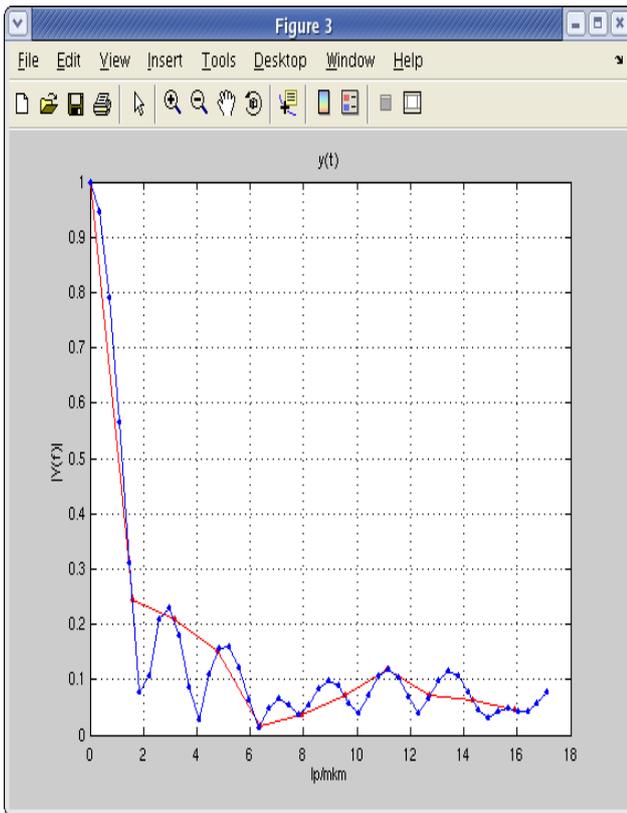


Рис. 5. ФПМ для тест-сигнала 1 (красный цвет) и тест-сигнала 2 (синий цвет)

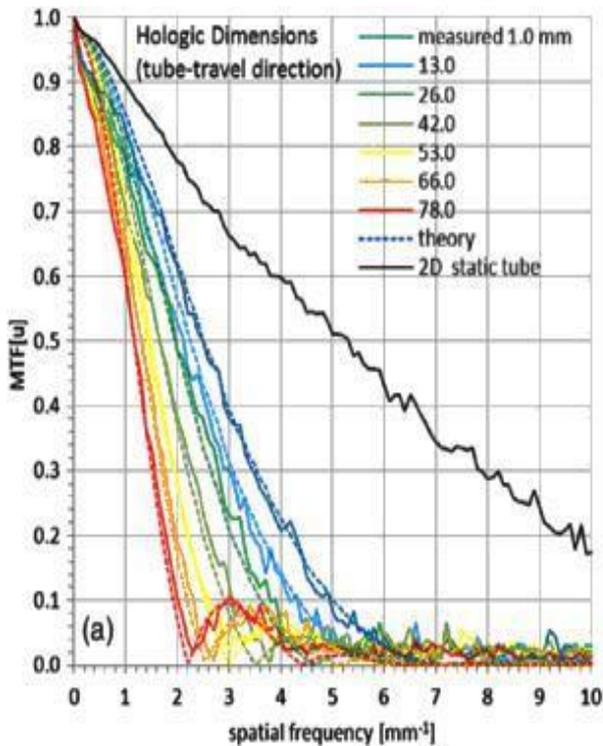


Рис. 6. ФПМ рентгеночувствительных ПЗС по ссылке [14]

Важным практическим выходом предлагаемого подхода является получение визуальной информации

о распределении генерированных носителей, что позволяет внести изменения в конструкцию фотоприемных элементов с целью ограничения сбора носителей заряда из глубины полупроводниковой подложки, тем самым повышая разрешающую способность ФЧ СБИС.

X. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА

Метод реализован в виде следующих объектов.

Алгоритмы моделирования:

- Накопления зарядов в фотоприемных элементах при воздействии ОЗЧ тест-сигналов – для Sentaurus TCAD (Synopsys).
- Расчета функции рассеяния точки по распределениям накопленных фотогенерированных зарядов в массиве фоточувствительных элементов СБИС – для Sentaurus TCAD (Synopsys).
- Расчета функции передачи модуляции по полученной функции рассеяния точки – для пакета MATLAB.

Разработаны программные модули, реализующие расчет функции передачи модуляции в пакете MATLAB и командные файлы и файлы исходных данных проектов для расчета накопленных зарядов для тест-сигналов - для Sentaurus TCAD (Synopsys)

XI. НОВИЗНА МЕТОДА

Новизна предлагаемого метода заключается в том, что впервые функция рассеяния точки, применяемая для расчета разрешающей способности, рассчитывается путем объемного физико-топологического моделирования распределений зарядов, генерированных в объеме полупроводниковой пластины в массиве элементов ФЧ СБИС.

Применение строго детерминированного «тест-сигнала» в сочетании с приборно-технологическим моделированием позволяет сравнивать различные конструктивные решения ФЧ СБИС без ограничений на конфигурацию профилей легирующих примесей и режимы функционирования, а применение известной методики Функции Рассеяния Точки дает возможность оценить, какие максимальные по размеру детали изображения могут быть потеряны в результате действия ОЗЧ.

XII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод моделирования действия одиночной заряженной частицы на разрешающую способность ФЧ СБИС сочетает известный метод анализа РС фоточувствительных СБИС в видимом диапазоне излучения на основе построения «функции рассеяния пиксела» и метод оценки характеристик электронных приборов с применением специальных тестовых сигналов.

Для построения функции рассеяния предложены три «тест сигнала входного воздействия»,

отличающиеся геометрией траектории падения частицы на поверхность фоточувствительного элемента. Применение таких строго детерминированных «тест-сигналов» позволяет сравнивать различные конструкции фоточувствительных элементов по критерию РС, что является ключевым моментом для выбора оптимального варианта конструкции при проектировании.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J.C.Pickel, A.H.Kalma, G.R.Hopkinson, C.J.Marshall, "Radiation Effects on Photonic Imagers – A –Historical Perspective," IEEE Trans. On Nuclear Science, vol. 50, No 3, pp. 671–688, June 2003
- [2] Кононов А.А., Поспелова М.А., Пугачёв А.А., Соколов С.В. «Применение приборно-технологического моделирования при проектировании фоточувствительных ПЗС и КМОП-фотодиодных СБИС.» международная конференция «Микроэлектроника 2015». Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение. г. Алушта, 2015 г. Сборник тезисов. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015.- С. 236-238.
- [3] Technical Note on the MTF of CCD Sensors. E2V Technologies corp., A1A-CCDTN105 Issue 5, June 2003.
- [4] B. Derickx, G. Meynants, D. Scheffer, "Near 100% fill factor CMOS active pixel," Proc. 1997 IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices & Advantage Image Sensors, Brugge. 1997.

- [5] G. Holst, "Electro-optical Imaging System Performance," 2nd ed, Washington. A Publication of SPIE, 2000, pp. 438.
- [6] Ю.П. Носов, В.А. Шилин, "Основы физики приборов с зарядовой связью". М.: Наука, 1986.
- [6] S. Lin, P. Mathur, F. Chang, "Analytical Charge Collection and MTF Model for Photodiode-Based CMOS Imagers," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 49, pp. 754-761, 2002.
- [7] K. Fliegel, "Modeling and Measurement of Image Sensor Characteristics," Radioengineering, vol. 13, pp. 27-34, 2004.
- [8] I. Shcherback, O. Yadid-Pecht, "Empirical CMOS APS MTF modeling," Proc. IEEE workshop on CCDs and advanced image sensors, Reno CA, USA, 2001.
- [9] I. Shcherback, O. Yadid-Pecht, "CMOS APS MTF Modeling," IEEE Transactions. On Electron Devices, vol. 48, 2001.
- [10] Shcherback, T. Danov, O. Yadid-Pecht, "A Comprehensive CMOS APS Crosstalk Study: Photoresponse Model, Technology and Design Trends," IEEE Transactions on Electron Devices, vol., 51, pp. 2033-2042, 2004.
- [11] P. Patra, N. Mishra, R. Chandrakanth, R. Ramachandran, "Image Quality Improvement through MTF Compensation," A Treatment to High Resolution Data, Indian Cartographer, vol.15, pp. 86 – 93, 2002.
- [12] I. Shcherback, O. Yadid-Pecht, "CMOS APS crosstalk characterization via a unique submicron scanning system," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 50, pp. 1994-1997, 2003.
- [13] N. W. Marshall and H. Bosmans.- 2012 *Phys. Med. Biol.* – 57.- 7629.doi:10.1088/0031-9155/57/22/

Modulation Transfer Function Model for Photosensitive VLSI under one Single Impact Particle Event

A.A. Pugachev^{1,2}, G.A. Ivanova²

¹“PULSAR” Scientific and Production Interprise Joint Stock Company, Moscow

pugachev@pulsarnpp.ru

²The Institute of design problems in microelectronics of RAS, Moscow

Abstract — The resolution is the main parameter of image sensors, and the modulation transfer function (MTF) is main figure of merit of resolution. The paper is about the new method for resolution degradation modeling under one single impact particle (SIP) event This method are based on 2-dimensional physical-topological simulation of photogenerated carriers distribution in photosensitive pixels. This model established the direct dependence between resolution (MTF) and topological and technological parameters of VLSI and parameters of impact particle. For MTF calculation under the SIC event condition the test-input signal have been developed. With this test signal the various constructions of photosensitive pixels may be compared.

The model gives new aids for photosensor design and overcomes restrictions of analytical resolution models. The simulation results confirm the universal character of the new MTF calculation method.

Key words— modulation transfer function, matrix image sensor, single impact particle, CCD VLSI design.

REFERENCES

- [1] J.C.Pickel, A.H.Kalma, G.R.Hopkinson, C.J.Marshall, "Radiation Effects on Photonic Imagers – A –Historical Perspective," IEEE Trans. On Nuclear Science, vol. 50, No 3, pp. 671–688, June 2003
- [2] Kononov A.A, Pospelova M.A. Pugachev A.A. Sokolov S.V. Technological-device modelling application in photosensitive CCD and CMOS-APS VLSI's Trudy Mezhdunarodnoi konferencii "Microelectronika-2015". Integralnie shemi I electronnie moduli: proektirovanie, proizvodstvo I primenienie. Alushta, TEHNOSFERA, Moscow, 2015, p.p. 236-238 (in Russian)
- [3] Technical Note on the MTF of CCD Sensors. E2V Technologies corp., A1A-CCDTN105 Issue 5, June 2003.
- [4] B. Derickx, G. Meynants, D. Scheffer, "Near 100% fill factor CMOS active pixel," Proc. 1997 IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices & Advantage Image Sensors, Brugge. 1997.

- [5] G. Holst, "Electro-optical Imaging System Performance," 2nd ed, Washington. A Publication of SPIE, 2000, pp. 438.
- [6] Nosov YU.R., Shilin V.A. Fundamental of charge-coupled devices physics". Moscow, "Nauka", 1986 (in Russian)
- [6] S. Lin, P. Mathur, F. Chang, "Analytical Charge Collection and MTF Model for Photodiode-Based CMOS Imagers," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 49, pp. 754-761, 2002.
- [7] K. Fliegel, "Modeling and Measurement of Image Sensor Characteristics," Radioengineering, vol. 13, pp. 27-34, 2004.
- [8] I. Shcherback, O. Yadid-Pecht, "Empirical CMOS APS MTF modeling," Proc. IEEE workshop on CCDs and advanced image sensors, Reno CA, USA, 2001.
- [9] I. Shcherback, O. Yadid-Pecht, "CMOS APS MTF Modeling," IEEE Transactions. On Electron Devices, vol. 48, 2001.
- [10] Shcherback, T. Danov, O. Yadid-Pecht, "A Comprehensive CMOS APS Crosstalk Study: Photoresponse Model, Technology and Design Trends," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 51, pp. 2033-2042, 2004.
- [11] P. Patra, N. Mishra, R. Chandrakanth, R. Ramachandran, "Image Quality Improvement through MTF Compensation," A Treatment to High Resolution Data, Indian Cartographer, vol.15, pp. 86 – 93, 2002.
- [12] I. Shcherback, O. Yadid-Pecht, "CMOS APS crosstalk characterization via a unique submicron scanning system," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 50, pp. 1994-1997, 2003.
- [13] N. W. Marshall and H. Bosmans.- 2012 *Phys. Med. Biol.* – 57.- 7629.doi:10.1088/0031-9155/57/22/