УДК 621.382.049

МЕТОД ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ РЕНТГЕНОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СБИС НА ПРИБОРАХ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

Пугачёв А.А., Кононов А.А.

АО «НПП «Пульсар», Россия, Москва, 105187, Окружной проезд, д. 27

Разработан метод моделирования разрешающей способности рентгеночувствительных СБИС на приборах с зарядовой связью с прямым преобразованием излучения, основанный на имитации результата поглощения рентгеновского фотона результатом поглощения потока видимого излучения, дискретного в пространстве и во времени. Метод реализован в виде алгоритмов моделирования и программных модулей в среде моделирования MATLAB и файлов исходных данных для программного комплекса SENTAURUS TCAD (Synopsys).

Ключевые слова: *фотоприёмная матричная СБИС; прибор с зарядовой связью, разрешающая способность; функция передачи модуляции; физико-топологическое моделирование, метод моделирования; мягкое рентгеновское излучение*

Сведения об авторах: *Пугачёв Андрей Алексеевич, к.т.н., pugachev@pulsarnpp.ru; Кононов Алексей Андреевич, pugachev@pulsarnpp.ru*

.....

THE METHOD FOR TECHNOLOCAL-DEVICE MODELING OF X-RAY SENSITIVE CHARGE COUPLED DEVICE VLSI

Pugachev A.A., Kononov A.A.

S&PE Pulsar JSC, Russia, Moscow, 105187, Okruzhnoy pr., 27

In our research we developed the resolution simulation method for X-ray sensitive VLSI on charge-coupled devices with direct radiation conversion. Method is based on the imitation of the results of X-ray photon absorption with the results of the visible radiation absorption, discrete in space and time. Method is realized as MATLAB simulation algorithms and software modules and SENTAURUS TCAD (Synopsys) input files.

Keywords: *matrix VLSI photodetector, charge-coupled device, resolution, modulation transfer function, physical topological simulation, simulation method, soft X-rays*

Authors: *: Pugachev Andrey Alekseevich, Ph.D., pugachev@pulsarnpp.ru, Kononov Aleksey Andreevich, pugachev@pulsarnpp.ru*

Введение

Ключевыми задачами в области рентгеновской диагностики являются повышение разрешающей способности (РС) формирователей изображения и уменьшение дозовых нагрузок на пациентов. Эти задачи решаются с помощью приёмников рентгеновского излучения, сочетающих высокую чувствительность, разрешающую способность и возможности цифровой компьютерной обработки изображений. На современном этапе развития полупроводниковой технологии наиболее перспективной элементной

базой высокочувствительных приёмников, обеспечивающих цифровую обработку изображений, являются твердотельные полупроводниковые многоэлементные приёмники на базе рентгеночувствительных (РЧ) матричных и линейных сверхбольших интегральных схем (СБИС). Сегодня указанные РЧ микросхемы для диапазона излучения с энергией 1 – 70 кэВ изготавливаются по технологии приборов с зарядовой связью (ПЗС). Применение рентгеночувствительных ПЗС СБИС с прямым преобразованием рентгеновского излучения радикально расширяет функциональные возможности ап-

паратуры и улучшает её эксплуатационные характеристики.

Разрешающая способность (РС) – один из ключевых показателей качества фотоприёмной СБИС и всей оптико-электронной системы. Формально РС – это максимальная пространственная частота чёрно-белых штрихов, для которой достигается заданный контраст или величина модуляции выходного сигнала. Для расчёта РС необходимо получить зависимость величины модуляции от пространственной частоты – функцию передачи модуляции (ФПМ). Как и для фоточувствительных СБИС видимого диапазона излучения, повышение РС и чувствительности РЧ СБИС достигается оптимизацией объёмных структур их фотоприёмных элементов [1-3]. Однако модели поглощения рентгеновских фотонов в Sentaurus TCAD (Synopsys) отсутствуют. Данный программный продукт широко применяется при проектировании фоточувствительных ПЗС СБИС видимого диапазона, что делает актуальным разработку методов моделирования рентгеночувствительных ПЗС приёмников.

Предлагается метод моделирования в Sentaurus TCAD (Synopsys) разрешающей способности рентгеночувствительных СБИС на приборах с зарядовой связью с прямым преобразованием излучения, основанный на замене облака электронов, родившихся в результате поглощения рентгеновского фотона облаком электронов, порождённых потоком видимого излучения.

Новизна предлагаемого метода состоит в моделировании электронно-дырочного «облака», рождающегося в результате поглощения рентгеновского фотона с помощью источника видимого излучения, находящегося в объёме полупроводника. Это позволяет исключить сложные модели поглощения рентгеновских фотонов и рассчитывать основные параметры двумерного (трёхмерного) облака электронов с помощью известной аналитической модели.

Достоинства и возможности предложенного метода:

- возможность объёмного физико-топологического моделирования рентгеночувствительных ПЗС СБИС в режиме приёма рентгеновского излучения;
- возможность объективного сравнения РС различных вариантов конструкций элементов РЧ СБИС с помощью задания «сту-

пенчатого» источника рентгеновского излучения.

Метод впервые позволяет:

- рассчитать величину РС РЧ СБИС;
- исследовать зависимость РС РЧ СБИС от параметров структуры, параметров входного излучения и т.д.;
- проектировать РЧ СБИС по критерию максимизации разрешающей способности с учётом внешних факторов.

Модель генерации электронов в РЧ ПЗС

Особенности рентгеночувствительных ПЗС подробно описаны, например, в [4, 5]. Все подходы к моделированию РЧ ПЗС базируются на идее создания аналитических моделей. Одной из ключевых составляющих таких аналитических моделей является модель квантовой эффективности приёмной ячейки ПЗС при поглощении рентгеновского фотона с последующим моделированием числа собранных в ПЗС-ячейках электронов [7]. Для анализа и разрешающей способности РЧ ПЗС такие подходы практически непригодны: они не дают связи РС с реальными конструктивно-технологическими параметрами ПЗС СБИС и имеют ряд жестких ограничений на структуру фотоприёмных ячеек. А между тем разрешающая способность РЧ ПЗС СБИС относительно ПЗС видимого диапазона значительно ниже и приборно-технологические модели для её оценки могут стать эффективным средством проектирования.

К настоящему времени разработаны методы и модели для расчёта РС фоточувствительных ПЗС и КМОП-фотодиодных СБИС видимого диапазона (ВД) излучения [6]. Они базируются на так называемом «прямом» вычислении модуляции выходного сигнала фотоприёмных ячеек через распределение фотогенерированных электронов для специальных входных сигналов. Этот метод без каких-либо изменений применим и для рентгеночувствительных СБИС, так как изображение в них также и для ВД формируется потоком фотонов, генерирующих электронно-дырочные пары.

Основной особенностью РЧ ПЗС по сравнению с ПЗС ВД для приёма мягкого рентгеновского излучения (до 100 кэВ) является высокий квантовый выход: один рентгеновский фотон генерирует «облако» электронов. Число электронов q_0 в облаке в первом приближении [7] равно:

$$q_0 = E/w, \quad (1)$$

где E – энергия рентгеновского фотона (эВ), $w = 3,68$ эВ. Распределение электронов в облаке принимается Гауссовским и имеет 1δ -радиус r_i :

$$r_i = 0,0044E^{1,75}. \quad (2)$$

Моделирование исходного «облака» электронов производится следующим образом:

- параметры облака q_0 и r_i рассчитываются по (1) и (2);

- временной интервал разбивается на два: «подготовительную» стадию работы прибора для формирования исходного облака электронов и последующую «рабочую» стадию, на которой происходит растекание и накопление электронов облака в массиве фотоприёмных пикселей;

- последовательность формирования облака с помощью двумерного моделирования:

- а) задаются размер источника видимого излучения (меньший r_i) и глубина расположения этого источника, равная глубине поглощения рентгеновского фотона заданной энергии;

- б) подбираются моделированием энергия и время излучения источника видимого излучения для достижения равенства числа сгенерированных им электронов числу электронов, сгенерированных рентгеновским фотоном.

Расчёт разрешающей способности

После того, как параметры источника видимого излучения подобраны, разрешающая способность может быть рассчитана по известным методикам прямого моделирования [8]: методом функции рассеяния точки (ФРТ), методом краевой функции рассеяния (КФР) либо методом оценки модуляции выходного сигнала для входного сигнала с пространственной частотой, равной 0.5 частоты Найквиста.

Для анализа РС рентгеночувствительных ПЗС применён метод расчёта РС через краевую функцию рассеяния. В первом приближении принимается, что все рентгеновские фотоны, образующие «ступень», имеют одинаковую энергию и, соответственно, поглощаются на одной глубине. Плотность потока рентгеновских фотонов выбирается исходя из параметров источника рентгеновского излучения.

После моделирования стадии генерации исходного «ступенчатого» распределения фотогенерированных электронов моделируется стадия «накопления», во время которой происходит перераспределение фотогенерированных электронов между фотоприёмными ячейками. По полученному распределению накопленных в ПЗС-ячейках электронов строится краевая функция рассеяния и вычисляется функция передачи модуляции.

Метод реализован в виде программных модулей в среде моделирования MATLAB и файлов исходных данных для программного комплекса Sentaurus TCAD (Synopsys).

Пример практического применения метода

В качестве примера проведён расчёт разрешающей способности рентгеновского ПЗС-приёмника методом краевой функции рассеяния. Для этого произведён подбор параметров эквивалентного источника входного излучения видимого диапазона. Мощность входного потока света видимого диапазона для имитации рождённого рентгеновским фотоном облака электронов вычисляется исходя из условий:

1. число фотонов, рождённых видимым светом за время существования светового пятна, должно быть равно числу электронов, рождённых одним R-фотоном;

2. площадь светового пятна должна быть минимизирована по сравнению с результирующим диаметром облака;

3. диаметр расплывшегося пятна электронов за время его диффузионного растекания должен быть равен диаметру облака электронов; время диффузии определяется опытным путём при физико-топологическом моделировании.

Для анализа взят массив из 11 фотоприёмных ПЗС-ячеек размером 13 мкм с прямой засветкой.

Для создания облака в 1000 электронов установлены следующие параметры светового пятна: $t_{ce} = 10^{-6}$ с; $P_{ce} = 4,48$ Вт/см²; $S_{ce} = 0,01$ мкм²; $N_e = 0,75q_0$, где N_e – число электронов, которое должно быть сгенерировано источником видимого света, задаваемым в двумерной модели по сравнению с числом электронов в «реальном облаке». Это необходимо для корректного перехода от трёхмерного облака к двумерному. Все

указанные выше параметры уточняются численным экспериментом.

На рис. 1 дано распределение электронов, являющееся результатом фотогенерации от источника видимого излучения малого размера, находящегося в объёме кремния. Как видно, результат генерации через малый промежуток времени от начала возникновения светового потока представляет собой аналог сечения облака электронов, генерируемого рентгеновским

фотоном. Число электронов в облаке и его радиус могут быть заданы путём изменения следующих параметров источника: горизонтального размера излучающей площадки; времени излучения; мощности излучения.

Поглощение происходит во фрагменте матричного массива, состоящего из 3 фотоприёмных элементов – Эл1, Эл2 и Эл3 (рис. 1). Для двух значений энергии квантов облака электронов имеют параметры, указанные в таблице.

Таблица

Результаты накопления электронов в ПЗС-элементах для двух значений энергии кванта

Энергия кванта, кэВ	Число электронов	Радиус облака, мкм	Число электронов, накопленных в элементе	Мощность излучения видимого света, Вт/см²
5	1350	0,075	Эл1 – 115 Эл2 – 345 Эл3 – 115	0,45
50	13500	4,1	Эл1 – 1130 Эл2 – 3480 Эл3 – 1130	4,5

Рис. 1

Распределение электронов при имитации результата поглощения рентгеновского фотона с помощью источника видимого излучения

На рис. 2 и 3 даны результаты моделирования исходного облака электронов при их генерации рентгеновскими фотонами с энергией 5 кэВ (рис. 2) и 50 кэВ (рис. 3) соответственно. Как было указано, для имитации поглощения кванта с энергией 5 кэВ мощность источника видимого излучения $P_{\text{вид}}$ составила 0,45 Вт/см², а для кванта 50 кэВ – 4,5 Вт/см².

На рис. 4 даны распределения электронов, генерированных потоком рентгеновских фотонов с плотностью 100 частиц на пиксел за 1 миллисекунду. В качестве допущения

принято, что все рентгеновские фотоны поглощаются на одной глубине. На правом нижнем фрагменте рис. 4 дано распределение электронов по пикселям, которое служит для построения краевой функции рассеяния. На рис. 5 дана построенная по полученной КФР функция передачи модуляции. Из данной ФПМ разрешающая способность составляет 23 парлин/мм на глубине модуляции 0,3 рентгеновского излучения для приёмника с прямым преобразованием, имеющего элемент размером 13 мкм. Значение согласуется с данными из литературных источников [9].

Рис. 2

Диффузионное расплывание облака электронов, сгенерированного рентгеновским фотоном с энергией 5.0 кэВ

Рис. 3

Диффузионное расплывание облака электронов, сгенерированного рентгеновским фотоном с энергией 50.0 кэВ

Рис. 4

Распределения электронов от тестового рентгеновского источника и полученная краевая функция рассеяния

Рис. 5

Расчётная ФПМ и разрешающая способность исследуемого рентгеночувствительного ПЗС-приёмника

Заключение

Разработан новый метод приборно-технологического моделирования разрешающей способности рентгеночувствительных СБИС на приборах с зарядовой связью. Данный метод снимает ограничения, характерные для аналитических моделей, при задании реальных параметров технологического процесса изготовления ПЗС, топологии и режимов работы. Метод реализован в виде алгоритмов моделирования и программных модулей в среде моделирования MATLAB и файлов исходных данных для программного комплекса Sentaurus TCAD (Synopsys).

Литература

1. 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» (г. Алушта, 2015 г.) / Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение. Сборник тезисов. – М.: ТЕХНОСФЕРА. – 2015. – С. 236-238.
2. I. 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.
3. Djite I., Estribeau M., Magnan P., ROLLAND G., Petit S., Saint-Pe O Theoretical Models of modulation Transfer Function, Quantum Efficiency and Crosstalk for CCD and CMOS Image Sensors // IEEE Trans. Electron Devices, vol. 59, no.3, p.p. 729-739, 2012.
4. James R.Janesick Scientific Charge-Coupled Devices // SPIE Press monograph, ISBN 0-8194-3698-4, 907 p.
5. G. Prigozhin, A. Rasmussenb, M. Bautza, G. Rickera A model of the X-ray response of the ACIS CCD // Conference on X-Ray Optics, instruments, and Missions, San Diecto. California, July 1998, SPIE Vol. 3444, p.p.267-275.
6. Кононов А.А., Пугачёв А.А., Соколов С.В. Проектирование фоточувствительных СБИС с анализом разрешающей способности // III Международный форум «Микроэлектроника 2017» Международная научная конференция «Микроэлектроника – ЭКБ и электронные модули» (Алушта, 2–7 октября 2017 г.) / Интегральные схемы и электронные модули. Сборник тезисов. – М.: ТЕХНОСФЕРА. – 2017. – С. 360-363.
7. Kieran J. McCarthy, Alan Owens, A.D. Holland, Alan A.Wells Modelling the X-ray response of charge coupled devices // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 362 (1995) 538-546.
8. Technical Note on the MTF of CCD Sensors. E2V Technologies corp., A1A-CCDTN105 Issue 5, June 2003.
9. N. W. Marshall and H. Bosmans // 2012 Phys. Med. Biol.–57.-7629.doi:10.1088/0031-9155/57/22/

References

1. Kononov A.A., Pospelova M.A., Pugachev A.A., Sokolov S.V. Device and process simulation in the design of photosensitive CCD and CMOS photodiode VLSIs. International conference «Microelectronics 2015». International circuits and microelectronic modules: design, production and applications. Alushta, 2015. Collection of papers. Moscow: TEKHNOСFERA. 2015. pp.236-238.
2. I. 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.
3. Djite I., Estribeau M., Magnan P., ROLLAND G., Petit S., Saint-Pe O Theoretical Models of modulation Transfer Function, Quantum Efficiency and Crosstalk for CCD and CMOS Image Sensors // IEEE Trans. Electron Devices, vol. 59, no.3, p.p. 729-739, 2012.
4. James R.Janesick Scientific Charge-Coupled Devices // SPIE Press monograph, ISBN 0-8194-3698-4, 907 p.
5. Prigozhin, A. Rasmussenb, M. Bautza, G. Rickera A model of the X-ray response of the ACIS CCD // Conference on X-Ray Optics, instruments, and Missions, San Diecto. California, July 1998, SPIE Vol. 3444, p.p.267-275.
6. Kononov A.A., Pugachev A.A., Sokolov S.V. Design of photosensitive VLSI with resolution analysis. International Forum «Microelectronics 2017». 3-rd International scientific conference «Integrated circuits and electronic modules». Moscow: TEKHNOСFERA. 2017. pp.360-363.
7. Kieran J. McCarthy, Alan Owens, A.D. Holland, Alan A.Wells Modelling the X-ray response of charge coupled devices // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 362 (1995) 538-546.
8. Technical Note on the MTF of CCD Sensors. E2V Technologies corp., A1A-CCDTN105 Issue 5, June 2003.
9. N. W. Marshall and H. Bosmans // 2012 Phys. Med. Biol.–57.-7629.doi:10.1088/0031-9155/57/22/