УДК 621.382.3:004.942

МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СБИС С УЧЁТОМ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

А.А. Пугачёв

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

Разработаны три метода приборно-технологического моделирования разрешающей способности фоточувствительных СБИС с учётом воздействия внешних факторов: гамма-излучения, одиночной заряженной частицы и мягкого рентгеновского излучения. Методы реализованы на базе комплекса приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD (Synopsys) и предназначены для разработки фоточувствительных СБИС на приборах с зарядовой связью (ПЗС) и КМОП-фотодиодных элементах (КМОП-ФД).

Ключевые слова: фоточувствительная СБИС; разрешающая способность; внешний фактор, функция передачи модуляции; Sentaurus TCAD (Synopsys); приборно-технологическое моделирование; ПЗС; КМОП-ФД

Сведения об авторах: Пугачёв Андрей Алексеевич, к.т.н., pugachev@pulsarnpp.ru
.....

THE METHODS FOR PHOTOSENSITIVE VLSI DESIGN RESOLUTION SIMULATION WITH SPECIAL FACTORS EFFECTS CONSIDERATION

A.A. Pugachev

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

The algorithms for photosensitive VLSI resolution analysis with special factors effects consideration are developed. The algorithms are based on the new methods of technological-device modeling of photosensitive VLSI's resolution with Sentaurus TCAD (Synopsys). The algorithms were applied in numerous CCD and CMOS image sensors practical design.

Keywords: photosensitive VLSI, resolution, algorithm of design, special factor, TCAD, technological-device modeling

Authors: Pugachev Andrey Alekseevich, Candidate of Engineering Sciences, pugachev@pulsarnpp.ru

Введение

Важнейшим показателем качества фоточувствительных (ФЧ) СБИС является её разрешающая способность (РС). ФЧ СБИС являются высокочувствительными детекторами излучения, и поэтому они очень уязвимы для различных внешних факторов: рентгеновского и гамма-излучений, одиночных заряженных частиц (ОЗЧ), космических лучей и т.д. Воздействие внешних факторов может привести к существенному снижению РС и полному исчезновению изображения ФЧ СБИС. Таким образом, анализ зависимости РС ФЧ СБИС от внешних факторов является крайне актуальной задачей.

В настоящее время проектирование ФЧ СБИС ведётся по пути максимизации динамического диапазона и чувствительности [1]. При этом в процессе проектирования для повышения именно РС каких-либо целенаправленных изменений в конструкции и технологии не принимается. Это обусловлено тем, что традиционные математические модели оценки РС являются аналитическими и фактически не дают связи реальных параметров техпроцесса изготовления ФЧ СБИС и её топологии с разрешающей способностью. Для решения данной проблемы предложен подход, реализованный в методах моделирования, изложенных в [2-4]. Подход базируется

на расчёте функции передачи модуляции (ФПМ) и функции рассеяния точки (ФРТ) фотоприёмных матриц через распределения накопленных фотогенерированных носителей заряда [5].

На базе этого подхода разработаны три метода приборно-технологического моделирования разрешающей способности ФЧ СБИС с учётом воздействия различных внешних факторов. Все методы реализованы в средах моделирования Sentaurus TCAD (Synopsys) и MATLAB.

Модель РС ФЧ СБИС с учётом накопленной дозы облучения

При накоплении дозы облучения в ФЧ СБИС в подзатворных диэлектриках возникают заряды, которые экранируют электрические поля управляющих электродов, и при больших значениях этих зарядов потенциальные ямы, накапливающие и хранящие фотогенерированные заряды, исчезают, и изображение теряется. При этом результат накопления дозы определяется не только эффектами взаимодействия излучения с материалом СБИС, но и сложными объёмными электрофизическими эффектами, зависящими от конфигурации поверхностных проводящих и диэлектрических слоёв, профиля легирующих примесей и электрического режима работы схемы. Разработан метод физико-топологического моделирования разрешающей способности (РС) фоточувствительных СБИС на приборах с зарядовой связью и на КМОП-фотодиодных элементах с учётом накопленной дозы облучения.

Новизна подхода заключается в том, что краевая функция рассеяния (КФР), применяемая для расчёта разрешающей способности, вычисляется с учётом накопленной дозы путём объёмного физико-топологического моделирования распределений фотогенерированных зарядов в массиве элементов ФЧ СБИС.

Суть предложенного метода состоит в разделении стадии моделирования процессов накопления заряда в поверхностных диэлектриках при облучении и стадии численного физико-топологического моделирования разрешающей способности ФЧ СБИС с полученным накопленным зарядом с учётом объёмных электрофизических эффектов.

При этом применяемая для расчёта разрешающей способности краевая функция рассеяния (КФР) впервые рассчитывается с учётом накопленной дозы путём объёмного физико-топологического моделирования распределений фотогенерированных зарядов в массиве элементов ФЧ СБИС.

Достоинства и возможности предложенного метода:

- даёт прямую связь разрешающей способности с параметрами технологического процесса и топологией ФЧ СБИС без упрощений, присущих аналитическим моделям РС;

- принципиальная возможность учёта геометрических эффектов при накоплении дозы за счёт двух- или трёхмерного моделирования процессов накопления;

- существенное снижение времени моделирования, так как при моделировании процесса накопления не будет моделироваться разрешение ФЧ СБИС, а, в свою очередь, при моделировании разрешающей способности будут использоваться готовые данные по поверхностным зарядам в диэлектриках;

- возможность создания базы данных для результатов накопления зарядов для широкого диапазона доз и видов излучения для любых вариантов конструкций поверхностных диэлектрических слоёв, что ускоряет процесс практического проектирования ФЧ СБИС;

- возможность поиска оптимальной объёмной структуры фотоприёмных элементов ФЧ СБИС по критерию максимизации разрешающей способности с учётом накопленной дозы. Это даёт принципиально новый инструмент в руки разработчиков фоточувствительных СБИС.

Метод был применён в процессе проектирования фотоприёмных СБИС на приборах с зарядовой связью (ПЗС) с тонкой подложкой, оценка пределов работоспособности которой при воздействии гамма-облучения является особенно актуальной.

На рис. 1 дано распределение заряда, накопленного в подзатворных диэлектриках прибора с зарядовой связью (ПЗС) при различных напряжениях, приложенных к соседним электродам.

Рис. 1

Распределение заряда, накопленного в диэлектрике ПЗС-структуры при гамма-облучении

Рис. 2

Зависимость величины относительной модуляции ПЗС от дозы гамма-облучения

На рис. 2 дана зависимость величины относительной модуляции сигнала данной ПЗС-структуры от дозы гамма-облучения. По данной зависимости модуляции от накопленного заряда можно легко определить предельно допустимую дозу накопления. Она равна примерно 25 Крад. Для упрощения моделирования «заполнение» потенциальной ямы производилось сигналом с большой мощностью (5000 лк) в течение короткого промежутка времени (0,5 мс) вместо облучения мощностью 1 лк в течение 20 мс (реальное время накопления кадра).

Модель РС ФЧ СБИС с учётом воздействия одиночных заряженных частиц

Как при накоплении дозы облучения, так и при воздействии одиночных заряженных частиц в ФЧ СБИС в подзатворных диэлектриках и в объёме возникают заряды, которые экранируют электрические поля управляющих электродов и перетекают между фоточувствительными элементами. Предложен метод моделирования зависимости разрешающей способности ФЧ СБИС от воздействия одиночной заряженной частицы на её фоточувствительный элемент.

Новизна подхода заключается в том, что впервые функция рассеяния точки, применяемая для расчёта разрешающей способности, рассчитывается путём пространственного физико-топологического моделирования распределений зарядов, генерированных в объёме полупроводниковой пластины в массиве элементов ФЧ СБИС с учётом зарядов, сгенерированных ОЗЧ.

Суть предложенного метода состоит в следующем: входной сигнал ФЧ СБИС задаётся в виде тест-сигналов из трёх частиц. Тест-сигналы отличаются друг от друга углами падения одиночных заряженных частиц на поверхность фоточувствительного элемента. Такие строго детерминированные тест-сигналы позволяют применить известный метод расчёта РС с помощью ФРТ.

Достоинства и возможности предложенного метода:

– применение тест-сигнала в сочетании с численным решением фундаментальной системы уравнений полупроводника в двумерном (трёхмерном) приближении позволяет устранить неопределённость, связанную с произвольным положением траектории за-

ряженной частицы, и, таким образом, впервые дать сравнительные оценки различных конструкций объёмных структур фотоприёмных элементов ФЧ СБИС с точки зрения деградации их РС в результате попадания ОЗЧ;

– повышение точности учёта геометрических эффектов при воздействии ОЗЧ за счёт двух- или трёхмерного моделирования процессов накопления;

– прямая связь разрешающей способности с параметрами технологического процесса и топологией ФЧ СБИС без упрощений, присущих аналитическим моделям РС.

Предлагаются три тест-сигнала для двумерного приборно-технологического моделирования, отличающихся углами входа траекторий ОЗЧ в область фотоприёмного элемента (рис. 3). Первый: все три траектории перпендикулярны поверхности, причём одна траектория проходит через центр, а две через края элемента; второй: две крайние траектории направлены «внутрь» объёма элемента; третий: две крайние траектории направлены наружу из объёма элемента. Данные тест-сигналы снимают пространственную неопределённость входного сигнала при попадании ОЗЧ на массив фотоприёмных элементов.

Рис. 3

Тест-сигналы для модели РС с учётом воздействия ОЗЧ

На рис. 4 в горизонтальных рядах даны двумерные распределения электронов, генерированных предложенными тест-сигналами через 5 нс, через 10 мс и в момент окончания стадии накопления (40 мс) после вхождения частиц в подложку, соответ-

ственно для двух вариантов тест-сигналов. На рис. 5 представлены поэлементные распределения накопленных электронов в момент окончания стадии накопления, по которым были получены ФРТ массива данных фотоприёмных элементов.

Рис. 4

Распределения электронов, генерированных тест-сигналами для различных моментов времени

Рис. 5

Поэлементные распределения накопленных электронов для двух тестовых сигналов

На рис. 6 даны ФПМ, построенные для данных двух тест-сигналов: красный график – для сигнала рис. 5а, синий – для сигнала рис. 5б.

Рис. 6

ФПМ для двух тест-сигналов рис. 4

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. Косвенное подтверждение корректности выбора представленных тест-сигналов даёт сравнение этих ФПМ с ФПМ рентгеночувствительных ПЗС из [6].

Важным практическим выходом предлагаемого метода является получение визуальной информации о распределении генерированных носителей, что позволяет внести изменения в конструкцию фотоприёмных элементов с целью ограничения сбора носителей заряда из глубины полупроводниковой подложки, тем самым повышая разрешающую способность ФЧ СБИС.

Модель РС рентгеночувствительных кремниевых СБИС

Ключевой и непреходящей задачей в области рентгеновской диагностики является повышение разрешающей способности при одновременном уменьшении дозовых нагрузок. Основным путём её решения являются оптимизация объёмных структур рентгеночувствительных (РЧ) элементов кремниевых матричных СБИС с целью повышения их чувствительности и разрешения, что ведёт к уменьшению времени исследования и повышению объёмов информации, извлекаемой из рентгеновских изображений.

Предложен метод моделирования разрешающей способности рентгеночувствительных СБИС на приборах с зарядовой связью с прямым преобразованием излучения [7], основанный на имитации результата поглощения рентгеновского фотона результатом поглощения потока видимого излучения, дискретного в пространстве и во времени.

Новизна предлагаемого метода состоит в моделировании электронно-дырочного «облака», являющегося результатом поглощения рентгеновского фотона, с помощью источника видимого излучения, находящегося в объёме полупроводника. Это позволяет исключить сложные модели поглощения рентгеновского фотона из физико-топологической модели рентгеночувствительной СБИС.

Суть метода состоит в моделировании двумерного (трёхмерного) облака электронов, параметры которого определяются с помощью аналитической модели, с помощью специального источника видимого излучения, находящегося в объёме полупроводникового материала. Замена производится следующим образом:

1. Параметры облака рассчитываются по известным аналитическим моделям для рентгеновских фотонов.
2. Облако формируется путём:
 - а) задания соответствующего источника видимого излучения в объёме полупроводниковой подложки;
 - б) последующего «растекания» исходного облака электронов до размеров, оценённых аналитически.
3. Производится эквивалентная замена облака электронов, сгенерированного рентгеновским фотоном, на облако электронов, сгенерированное фотонами видимого излучения.
4. Временной интервал разбивается на два: «подготовительную» стадию работы прибора для формирования исходного облака электронов и последующую «реальную» стадию накопления облака в массиве фотоприёмных пикселей.
5. Рассчитывается РС для заданных параметров входного сигнала и управления ФЧ СБИС методом функции рассеяния точки, методом краевой функции рассеяния либо методом оценки модуляции выходного сигнала для входного сигнала с пространственной частотой, равной 0.5 частоты Найквиста.

Достоинства и возможности предложенного метода:

- возможность объёмного физико-топологического моделирования рентгеночувствительных ПЗС СБИС в режиме приёма рентгеновского излучения;
- с помощью задания «ступенчатого» источника рентгеновского излучения возможно объективное сравнение РС различных вариантов конструкций элементов РЧ СБИС.

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.

Результаты моделирования подробно описаны в [7].

Заключение

Предложены три метода моделирования разрешающей способности ФЧ СБИС с учётом внешних факторов. Методы снимают ограничения существующих аналитических моделей и впервые позволяют проводить проектирование ФЧ СБИС по критерию максимизации её разрешающей способности с возможностью учёта реальных конструктивно-технологических параметров и различных внешних факторов.

Разработаны:

1. Метод моделирования разрешающей способности фоточувствительных СБИС с учётом накопленной дозы гамма-облучения.
 2. Метод анализа разрешающей способности фоточувствительных СБИС на приборах с зарядовой связью с учётом действия одиночных заряженных частиц, основанный на применении специальных тест-сигналов из трёх ОЗЧ.
 3. Метод моделирования разрешающей способности рентгеночувствительных СБИС с прямым преобразованием излучения, основанный на моделировании «облака» электронов с помощью источника видимого излучения.
- Методы реализованы 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». Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение (28 сентября – 3 октября 2015 г., Алушта). Сборник тезисов. – М.: ТЕХНОСФЕРА. – 2015. – С. 236-238.
2. Иванова Г.А., Пугачёв А.А., Пузырьков Д.В., Щелоков А.Н. Физико-топологическое моделирование разрешающей способности фотоприёмных СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 2. – С. 246-254.
3. Иванова Г.А., Пугачёв А.А. Метод моделирования функции передачи модуляции матричных фотоприёмных СБИС // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2014 // Сборник трудов под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН. – 2014. – Ч. I. – С. 65-70.
4. Кононов А.А., Пугачёв А.А., Соколов С.В. Проектирование фоточувствительных СБИС с анализом разрешающей способности // Международный форум «Микроэлектроника 2017». 3-я Международная научная конференция «Интегральные схемы и электронные модули» (2-7 октября 2017 г., Алушта). – М.: ТЕХНОСФЕРА. – 2017. – С. 360-363.
5. G. Holst, “Electro-optical Imaging System Performance,” 2nd ed, Washington. A Publication of SPIE, 2000, pp. 438.
6. B. Derickx, G. Meynants, D. Scheffer, “Near 100% fill factor CMOS active pixel,” Proc. 1997 IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices & Advanced Image Sensors, Brugge. 1997.
7. Пугачёв А.А., Кононов А.А. Метод приборно-технологического моделирования функции передачи модуляции рентгеночувствительных СБИС на приборах с зарядовой связью // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – Вып. 3 (250). – С. 53-59.

References

1. Kononov A.A., Pospelova M.A., Pugachev A.A., Sokolov S.V. Technological-device simulation in the design of photosensitive CCD and CMOS-photodiode VLSI. International Conference Microelectronics 2015. Integrated Circuits and Microelectronic Modules: Design, Manufacturing and Applications. 28 Sep – 3 Oct 2015. Alushta, Russia. Collection of papers. M.: TEKHNOSEFERA. 2015. pp.236-238.

2. Ivanova G.A., Pugachev A.A., Puzyrkov D.V., Shchelokov A.N., Physical topological simulation of photosensitive VLSI resolution. SFU News. Technical sciences. 2015. No.2. pp.246-254.
3. Ivanova G.A., Pugachov A.A. Method of simulation of the matrix photosensitive VLSI modulation transfer function. Design issues of advanced micro- and nanoelectronic systems. 2014. Collection of papers, edited by RAS academician A.L. Stempkovsky. M.: IPPM RAS. 2014. Pt.1. pp.65-70.
4. 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. 2-7 Oct 2017, Alushta, Russia. M.: TEKHNOSEFERA. 2017. pp.360-363.
5. G. Holst, "Electro-optical Imaging System Performance," 2nd ed, Washington. A Publication of SPIE, 2000, pp. 438.
6. 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.
7. Pugachev A.A., Kononov A.A. Process simulation method for the modulation transfer function of X-ray sensitive VLSI based on charge-coupled devices. Electronic Engineering. Ser.2. Semiconductor Devices. 2018. No.3(250). pp.53-59.