ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СБИС С АНАЛИЗОМ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

DESIGNING PHOTSENSITIVE VLSI WITH RESOLUTION ANALYSIS

УДК 621.397.01

КОНОНОВ АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ

Инженер 3 категории

kononov@pulsarnpp.ru

ПУГАЧЁВ АНДРЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

К. т. н., начальник лаборатории

pugachev@pulsarnpp.ru

СОКОЛОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ

Ведущий инженер-технолог

svsokolov@pulsarnpp.ru

KONONOV ALEXEY A.

Engineer of 3 category

kononov@pulsarnpp.ru

PUGACHEV ANDREY A.

Ph.D, Chief of laboratory

pugachev@pulsarnpp.ru

SOKOLOV SERGHEY V.

Senior technology engineer

svsokolov@pulsarnpp.ru

АО «Научно-производственное предприятие «Пульсар»

105187, г. Москва, Окружной проезд, 27

www.pulsarnpp.ru

“PULSAR” Scientific and Production Enterprise JSC

27 Okrzhnoi Lane, Moscow, 105187, Russia

www.pulsarnpp.ru

Разработаны алгоритмы проектирования фоточувствительных СБИС с обеспечением требований к их разрешающей способности. Алгоритмы построены на базе методов приборно-технологического моделирования с применением комплекса Sentaurus TCAD (Synopsys). Алгоритмы применены при проектировании ФЧ СБИС на предприятии электронной отрасли.

Ключевые слова: фоточувствительная СБИС; разрешающая способность; алгоритм проектирования; TCAD; приборно-технологическое моделирование.

The paper presents algorithms for photosensitive VLSI design with resolution analysis. The algorithms are based on the new methods of technological-device modeling of photosensitive VLSI's resolution with Sentaurus TCAD (Synopsys). The algorithms have been applied in numerous CCD and CMOS image sensors practical design.

Keywords: photosensitive VLSI; resolution; algorithm of design; TCAD technological-device modeling.

Основной этап проектирования фоточувствительных (ФЧ) СБИС — это разработка объемной структуры фоточувствительных ячеек (ФЯ) матричного массива микросхемы, формирующего двумерный по пространству (или одномерный) сигнал изображения. Спроектированная ячейка должна одновременно обеспечивать два требования: а) правильно обрабатывать режимы накопления информационного заряда и его переноса через такие же ячейки к выходному устройству матрицы для последующего преобразования в выходной сигнал в виде напряжения; б) иметь требуемый уровень значений электрических и фотоэлектрических характеристик. Для выполнения указанных выше требований производится варьирование объемной структуры фоточувствительных ячеек. Это производится направленным и, что главное, неавтоматизированным перебором различных параметров техпроцесса: доз и энергий легирования, температур и времен окисления и т. д.

В настоящее время проектирование ФЯ ведется по пути максимизации динамического диапазона и чувствительности. При этом оценка разрешающей способности (РС) спроектированной ФЧ СБИС осуществляется уже по окончании проектирования, и специальных конструктивных и технологических изменений для дальнейшего ее повышения 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 ее топологии с разрешающей способностью [1].

Очевидно, что важным шагом вперед будет создание методов проектирования, позволяющих в процессе разработки ФЧ СБИС максимизировать ее разрешающую способность.

В [2] разработаны методы расчета разрешающей способности, прямо связывающие РС с реальными параметрами топологии и технологии изготовления ФЧ СБИС. Данные методы были применены при проектировании в промышленности. Однако для большей формализации процесса автоматизированного проектирования, которая как повысит его эффективность, так и избавит разработчика от методической работы, требуется создание алгоритмов проектирования конкретных типов структур ФЯ ФЧ СБИС с анализом и коррекцией их РС в процессе подбора конструктивно-технологических параметров и с учетом главных «критических» особенностей их функционирования. Такие алгоритмы могут быть применены, как получены конструктивно-технологические параметры ФЯ по критерию максимизации динамического диапазона.

Таким образом, целью работы является разработка алгоритмов проектирования ФЧ СБИС известных типовых конструкций, позволяющих подбирать конструкторско-технологические параметры фотоячеек по критерию максимизации разрешающей способности ФЧ СБИС.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФЧ СБИС

Напомним, что процесс проектирования ФСБИС существенно отличается от процесса проектирования цифровых и аналоговых микросхем. Проектирование ФСБИС — это, прежде всего, технологическое проектирование фотоприемной ячейки микросхемы. Его конечной целью является разработка технологического маршрута изготовления ФСБИС (который может включать до 20 операций фотолитографии), обеспечивающего требуемые параметры фотоприемной ячейки.

Главные особенности проектирования ФЧ СБИС [3]:

- проектирование идет в последовательности «фотоприемная ячейка — матрица ячеек — периферийная схема», причем наиболее трудозатратным и ответственным является этап технологического проектирования фотоприемной ячейки;
- обязательными этапами автоматизированного проектирования являются технологическое и приборно-технологическое моделирование;
- отсутствует этап схематехнического моделирования при проектировании фотоприемной ячейки и матричного массива фотоприемных ячеек;
- отсутствуют «стандартные» библиотеки фотоприемных ячеек ФЧ СБИС и, соответственно, нет средства автоматизированного проектирования ФЧ СБИС с помощью библиотек;
- в ходе проектирования анализируются и сравниваются десятки вариантов конструкторско-технологических решений одной фотоприемной ячейки.

Одной из сложных задач приборно-технологического моделирования ФЧ СБИС является физическая постановка задачи. Даже в фотоприемных матрицах с элементами, имеющими размеры более 10×10 мкм, объемные распределения потенциала и заряда трехмерны. Протяженности областей пространственного заряда (ОПЗ) в них весьма велики и могут достигать величины 50 мкм и более по каждой из координат, причем в любом направлении будут иметь место изменения электрического поля, потенциала и распределения заряда. Так как работа фотоприемника основана на взаимодействии ОПЗ соседних элементов, то становится ясно, что для их моделирования необходим двух- или трехмерный подход. Поэтому одной из ответственных и, соответственно, трудоемких задач, решаемых в ходе организации моделирования, является выбор положения границ области моделирования (ОМ) внутри массива фотоприемных ячеек с целью исключения больших искажений распределения потенциала и носителей заряда на них [3].

ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТОДА И АЛГОРИТМА. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ АЛГОРИТМОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФЧ СБИС

В Большой советской энциклопедии [4] приводятся следующие определения понятий «Метод» и «Алгоритм»:

МЕТОД: «Метод (*от греч. $\mu\acute{\epsilon}\theta\omicron\delta\omicron\varsigma$ — путь исследования или познания, теория, учение*) — совокупность приемов или операций практического или теоретического освоения действительности, подчиненных решению конкретной задачи».

АЛГОРИТМ: «...под А. понимается всякое точное предписание, которое задает вычислительный процесс (называемый в этом случае алгоритмическим), начинающийся с произвольного исходного данного ... и направленный на получение полностью определяемого этим исходным данным результата...».

Таким образом, под «алгоритмом проектирования» будет пониматься последовательность шагов модернизации топологии

и технологического маршрута изготовления фотоприемной ячейки, которое приведет к такому ее конструкторско-технологическому решению, которое будет: а) выполнять все функции по приему входного излучения и обработке полученных зарядовых пакетов; б) удовлетворять требованиям (ограничениям) на величины динамического диапазона и разрешающей способности.

Следует отметить, что алгоритмы проектирования ФЯ начали разрабатываться на предприятии АО «НПП «Пульсар» еще в 80-е годы прошлого века. Они активно применялись начиная с 90-х годов [5].

В [6] разработаны методы анализа разрешающей способности фоточувствительных СБИС с помощью приборно-технологического моделирования. Они включают в себя известные методы расчета функции передачи модуляции (ФПМ) через краевую функцию рассеяния, метод оценки РС на половине частоты Найквиста, метод расчета геометрической составляющей ФПМ и т.д.

Алгоритмы проектирования ФЯ с учетом РС, в свою очередь, включают разработанные методы расчета РС.

Данные алгоритмы могут быть применены, после того как получены конструктивно-технологические параметры ФЯ по критерию максимизации динамического диапазона.

АЛГОРИТМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЮ РС

В разработанных алгоритмах проектирования фоточувствительных СБИС применяются следующие методы расчета и оценки разрешающей способности [1–3]:

- метод расчета функции передачи модуляции (ФПМ) через краевую функцию рассеяния (КФР);
- метод построения КФР на основе двумерных распределений накопленных фотогенерированных зарядов в строке или столбце фоточувствительных ячеек матричной ФЧ СБИС;
- метод построения геометрической составляющей ФПМ в плоскости топологии матричной или линейной ФЧ СБИС;
- метод расчета диффузионной составляющей ФПМ в строке или столбце матричной ФЧ СБИС;
- метод расчета ФПМ с учетом накопленной дозы облучения гамма-квантов;
- метод расчета деградации ФПМ вследствие воздействия одионной заряженной частицы (ОЗЧ).

На основе практического опыта разработки и производства ФЧ СБИС были разработаны следующие алгоритмы проектирования по критерию максимизации разрешающей способности:

1. Алгоритм проектирования ФЧ СБИС с межстрочным переносом и устройством вертикального антиблуминга в каждой ФЯ. Цели:

- оптимизация ширины области разрешающего затвора;
- оптимизация ширины стока антиблуминга;
- оптимизация дозы легирования стоп-канала;
- оптимизация напряжения подложки в режиме накопления.

2. Алгоритм проектирования кадровой матричной ФЧ СБИС. Цели:

- определение оптимальных величин дозы легирования подложки;
- определение оптимальных величин управляющих напряжений.

3. Алгоритм проектирования кадровой матричной ФЧ СБИС с обратной засветкой.

Цели:

- определение максимальной величины дозы легирования подложки;
 - определение максимальных управляющих напряжений;
 - определение максимальной спектральной чувствительности;
 - определение максимальной рабочей температуры.
4. Алгоритм оптимизации топологии линейных ПЗС и КМОП-фотодиодных ФЧ СБИС.

Цель: повышение РС сканирующих систем без перепроектирования объемной структуры ФЯ ФЧ СБИС.

Все алгоритмы базируются на знании характера связи разрешающей способности с топологией и объемной структурой фото-чувствительных ячеек микросхемы.

Пример: алгоритм проектирования матричной ФЧ СБИС с кадровым переносом зарядовых пакетов

Наибольшее применение нашел алгоритм проектирования на основе оценки РС при входном сигнале, имеющем пространственную частоту, равную половине частоты Найквиста [7].

Алгоритм применен при проектировании ПЗС ФЧ СБИС с «обратной засветкой». Такие СБИС имеют утоненную до десятка—сотни микрометров подложку, которая облучается со стороны, не имеющей топологических элементов, т. е. с «обратной» от электродов и изолирующих покрытий стороны пластины. При этом ключевой проблемой является обеспечение как можно более глубокого, вплоть до полного, обеднения рабочего объема подложки. Если область фотогенерации будет находиться в квазинейтральной области подложки, то диффузионное растекание фотогенерированных носителей в ней приведет к «размыванию» границ объектов на изображении, то есть низкой разрешающей способности фотоприемника. При значительной толщине квазинейтральной области растекание носителей может быть настолько протяженным, что приведет к фактическому исчезновению важных деталей на изображении, т. е. неработоспособности фотоприемника.

Поэтому ключевой задачей проектирования таких ФЧ СБИС является определение величины РС для каждого конкретного варианта конструкции матричного массива СБИС при заданных условиях работы.

Одним из надежных практических методов оценки РС является измерение величины модуляции выходного сигнала ФЧ СБИС $M_{\text{вых}}$ при проецировании в направлениях на строки или на столбцы т. н. «полосатой миры». Мира — это объект с чередующимися «абсолютно» черными и белыми полосами. Если ширина каждой из полос равна 2 длинам фотоячейки в направлении, перпендикулярном полосам, то пространственная частота данной миры равна половине т. н. частоты Найквиста для ФЯ данного размера. При этом, при любом сдвиге миры вдоль строки (столбца) ФЯ будут существовать как полностью засвеченные, так и полностью затемненные ФЯ. Это позволяет гарантированно получить максимальное и минимальное значение выходного сигнала и рассчитать его модуляцию на данной частоте.

Алгоритм состоит из следующих этапов:

Этап 1. Выбор набора параметров ФЧ СБИС $P_1—P_n$ для построения семейства зависимостей $M_{\text{вых}}(P_1) — M_{\text{вых}}(P_n)$ и задание интервала их изменения.

Этап 2. Разработка эквивалентной структуры массива фото-чувствительных ячеек.

Шаг 1. Определение размеров дополнительных корректирующих затворов на краях структуры.

Шаг 2. Определение управляющих напряжений корректирующих затворов.

Шаг 3. Определение минимального числа ФЯ в эквивалентной структуре массива ячеек.

Этап 3. Задание начальных значений параметров $P_1—P_n$.

Этап 4. Определение $M_{\text{вых}}$ для заданных величин параметров $P_1—P_n$ с помощью приборно-технологического моделирования во всех интервалах их изменения.

Этап 5. Выбор конкретных значений параметров $P_1—P_n$, обеспечивающих требования к величине модуляции.

Таким образом, алгоритм, не будучи достаточно сложным, избавляет разработчика ФЧ СБИС от необходимости самостоятельного поиска правильной «тактики» автоматизированного проектирования.

На рис. 1 дана расчетная зависимость величины модуляции от толщины подложки. Данная зависимость позволяет определить диапазон допустимых толщин.

С помощью разработанных алгоритмов впервые получены прямые зависимости разрешающей способности ПЗС с обратной засветкой от температуры и установлен диапазон рабочих температур для достижения требуемых величин модуляции.

На рис. 2 даны распределения фотогенерированных электронов при полосатом входном сигнале (частота — половина Найквиста) для температур 253 (а) (-20°C) и 300 (б) ($+27^\circ\text{C}$) градусов Кельвина.

На рисунке светлые полосы — это повышенные концентрации электронов, фотогенерированных от проецирования полосатой миры. «Расщепление» верхней части каждой полосы на четыре — это потоки носителей в направлении областей потенциальных ям. При температуре $+27$ градусов Цельсия отчетливо видно слияние отдельных полос, что говорит о сильном диффузионном растекании фотогенерированных носителей. Это растекание и ведет к деградации модуляции сигнала и, как следствие, потере разрешающей способности. Причем такое горизонтальное растекание носителей является значительным даже в области пространственного заряда по причине большой длины пробега.

На основе полученных двумерных распределений фотогенерированных электронов рассчитаны зависимости модуляции для приборов с разными толщинами подложки как функции от температуры, рис. 3, на котором дано сравнение зависимости величины модуляции от температуры для подложек толщиной D1 и D2 мкм, $D1 = 0,75 \cdot D2$.

Рис. 1. Зависимость величины модуляции от температуры

а

б

Рис. 2. Распределения фотогенерированных электронов для температур -20 и $+27$ град. Цельсия

Рис. 3. Зависимость модуляции от температуры и длины волны (Λ) входного излучения: зеленый — толщина подложки $D1$, красные графики — толщина подложки $D2$. $D1 = 0,75 \cdot D2$

Применение разработанного алгоритма позволило также определить дозы легирования подложек и оптимальные значения управляющих напряжений. Такие задачи не могли быть решены ранее с помощью методов проектирования по критерию максимизации динамического диапазона.

НОВИЗНА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- алгоритмы проектирования фотоячеек фоточувствительных СБИС с учетом требований к разрешающей способности;
- результаты применения алгоритмов при проектировании ПЗС с «обратной» засветкой.

Все разработанные алгоритмы проектирования различных фоточувствительных приборов с зарядовой связью и КМОП-фотодиодных СБИС являются неотъемлемой частью процесса проектирования фоточувствительных СБИС на предприятии «АО НПП «Пульсар».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана библиотека алгоритмов проектирования ФЧ СБИС, реализующих методы приборно-технологического моделирования их разрешающей способности. Библиотека в настоящее время содержит алгоритмы проектирования основных типов конструкций фоточувствительных ПЗС- и КМОП-фотодиодных СБИС.

Данные алгоритмы позволяют повышать разрешающую способность проектируемых фотоприемников различными способами: изменением объемной структуры фоточувствительных ячеек, оптимизацией управляющих напряжений либо температурного режима работы и т. д.

Ведутся разработки алгоритмов проектирования ФЧ СБИС с малоразмерными — менее 5×5 мкм² — фоточувствительными ячейками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова Г.А., Пугачёв А.А. Метод моделирования функции передачи модуляции матричных фотоприемных СБИС // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем — 2014. Сборник трудов / Под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2014. Часть I. С. 65–70.
2. Пугачёв А.А., Иванова Г.А., Пузырьков Д.В., Щелоков А.Н., Гулякович Г.Н., Северцев В.Н. Автоматизированное проектирование фоточувствительных СБИС по критерию разрешающей способности // Труды II Российско-Белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» им. О.В. Лосева. 2015. — С. 144–148.
3. Кононов А.А., Пospelova 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.
4. Большая советская энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия, 1969–1978 г.
5. Пугачёв А.А., Скрылев А.С. Шилин В.А. Проблемы моделирования ПЗС // Электронная промышленность, 1993 г. № 6–7. — С. 77–80.
6. Иванова Г.А., Пугачёв А.А., Пузырьков Д.В., Щелоков А.Н. Физико-топологическое моделирование разрешающей способности фотоприемных СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. № 2. 2015 г. — С. 246–254.
7. Holst G. *Electro-optical Imaging System Performance*. — 2nd ed. — Washington.: A Publication of SPIE. — 2000. — 438 p.