

Метод моделирования функции передачи модуляции матричных фотоприемных СБИС

Г.А. Иванова, А.А. Пугачёв

Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук,
pugachev@pulsarnpp.ru

Аннотация — Наиболее информативной числовой мерой разрешающей способности матричных фотоприемных СБИС является Функция Передачи Модуляции – ФПМ. Предлагается метод моделирования ФПМ с прямым вычислением величины модуляции для геометрической и диффузионной составляющих ФПМ. Данный метод позволяет избежать значительных упрощений и ограничений при построении геометрической модели пиксела и анализировать ФПМ матриц с пикселями, имеющими произвольную топологию и объемную структуру легирующих примесей.

Ключевые слова — функция передачи модуляции, ПЗС, КМОП-ФД, приборно-технологическая модель.

I. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее информативной числовой мерой разрешающей способности матричных фотоприемных СБИС является Функция Передачи Модуляции – ФПМ [1]. ФПМ показывает зависимость от пространственной частоты отношения максимальной модуляции выходного сигнала (выходного напряжения фотоприемного пиксела матрицы) к модуляции при входном сигнале с нулевой пространственной частотой:

$$\Phi_{PM}(u) = M(u)/M(0) \quad , \quad (1)$$

где M – модуляция выходного сигнала, u – пространственная частота.

Одной из главных целей проектирования фотоприемной микросхемы является максимизация разрешающей способности, что достигается оптимизацией топологии и объемной структуры фотоприемного пиксела. Очевидно, что это требует знания зависимости ФПМ от реальных конструктивно-технологических параметров фотоприемной СБИС с учетом особенностей восприятия различных входных сигналов.

Важной особенностью восприятия изображения фотоприемной матрицей является различие ее разрешающей способности для различных направлений относительно сторон матрицы. В [2] показано, что для матрицы с шахматным расположением пикселей предельная разрешающая способность по диагонали матрицы и вдоль строки

может различаться до полутора раз. Очевидно, что такая пространственная анизотропия отклика матрицы может привести к потере важных деталей изображения при «неудачном» положении матрицы относительно проецируемого изображения. Таким образом, знание зависимости ФПМ от направления входного сигнала также позволяет добиваться повышения разрешающей способности фотоприемника. Традиционно для исследования ФПМ применяются аналитические модели [3-6]. Для их построения пиксел представляется в виде так называемой «геометрической модели», которая описывает его топологию и объемную структуру профиля легирующих примесей. Геометрическая модель необходима для задания граничных условий математической модели в виде, который позволит решить задачу аналитически. Ясно, что структура пиксела в аналитической модели имеет упрощения, и часто значительные, по сравнению со структурой реального пиксела. Входной сигнал также представляется в виде, позволяющем производить его интегрирование в объеме геометрической модели аналитически и затем применять преобразование Фурье для вывода выражения ФПМ. Данный подход подробно освещен в [3]. Соответственно, каждая аналитическая модель имеет узкое применение, так как ориентирована либо только на один тип геометрической модели пиксела, или один тип формы входного сигнала [1-6]. При этом в случае пикселей со сложной топологией и объемной структурой примеси выражения для ФПМ становятся очень громоздкими, теряют наглядность и становятся сложными для применения в рамках практического проектирования [4-6].

Более информативными и физически точными являются так называемые модели с прямым вычислением модуляции, которые также называются моделями прямого вычисления ФПМ. В таких моделях на каждой пространственной частоте модуляция вычисляется согласно ее определению [1]:

$$M = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} \quad . \quad (2)$$

Как известно, ФПМ является произведением геометрической и диффузионной составляющих:

$$\Phi_{\text{ПМ}}(u) = \Phi_{\text{ПМ}_{\text{геом}}}(u) * \Phi_{\text{ПМ}_{\text{дифф}}}(u), \quad (3)$$

где u – пространственная частота, $\Phi_{\text{ПМ}}(u)$ – полная ФПМ, $\Phi_{\text{ПМ}_{\text{геом}}}$ – геометрическая составляющая, $\Phi_{\text{ПМ}_{\text{дифф}}}$ – диффузионная составляющая. Максимальная A_{max} и минимальная A_{min} амплитуды сигналов пикселей в модели прямого вычисления ФПМ определяются путем двумерного численного интегрирования мощности входного сигнала с заданной длиной волны (или полихроматического) по fotocувствительным областям fotocувствительных пикселей фрагмента матрицы. Очевидно, что по сравнению с аналитическими, модели прямого вычисления могут потребовать более значительных вычислительных затрат. Это компенсируется тем фактом, что, в идеале, в моделях прямого вычисления ФПМ ограничения на топологию и структуру пикселей отсутствуют или очень незначительные. Для модели геометрической составляющей ФПМ реальная двумерная топология пикселей может быть представлена, например, в виде объединения различных геометрических фигур, задаваемых координатами, или двумерными функциями, а распределение мощности входного сигнала по матрице также может быть задано в виде двумерной функции, при этом нет необходимости обеспечить аналитическое интегрирование этих функций по области сложной формы. Также, в идеальном случае, для модели диффузионной составляющей ФПМ может применяться объемная структура fotocувствительного пикселя, с высокой точностью воспроизведенная средствами численного моделирования технологического процесса его изготовления. Сам процесс диффузии fotocувствительных носителей заряда может моделироваться с помощью решения фундаментальной системы уравнений полупроводника (ФСУ), в том числе и в нестационарном приближении. Таким образом, модели ФПМ с прямым вычислением модуляции на основе приборно-технологического моделирования позволят связать реальные топологические и, главное, реальные технологические параметры fotocувствительника с одним из его главных показателей качества – разрешающей способностью.

До настоящего времени модели ФПМ, использующие для расчета модуляции двумерное приборно-технологическое моделирование, не разрабатывались из-за высоких аппаратно-временных затрат. Основным направлением разработки моделей ФПМ так и остается подход, ведущий к разработке аналитических моделей аналогично [4-6]. Создание модели ФПМ на базе приборно-технологического моделирования будет принципиальным шагом вперед. В данной работе для приборно-технологического моделирования применен пакет SENTAURUS TCAD (Synopsys).

II. МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ФПМ

В работе [7] был предложен метод моделирования ФПМ с учетом объемной диффузии fotocувствительных носителей заряда. Этот метод не

был реализован в виде, пригодном для практического проектирования. Кроме того, он требовал определения положения границ обедненных слоев, что фактически повторяет основной недостаток аналитических моделей. Предлагаемый же метод имеет только одно геометрическое ограничение: в модели диффузионной и полной ФПМ мощность входного сигнала изменяется с заданной пространственной частотой только вдоль столбцов или строк матрицы fotocувствительных пикселей. Однако именно такие направления входных сигналов применяются при измерениях ФПМ и разрешающей способности fotocувствительных матриц.

A. Назначение

Разработанный метод моделирования позволяет получить полную ФПМ, геометрическую и диффузионную составляющие ФПМ матричных fotocувствительных ПЗС и КМОП-фотодиодных СБИС. При этом их пиксели могут иметь произвольную топологию и структуру профиля примеси, которые, в свою очередь, получаются с помощью технологического моделирования. Метод позволяет рассчитать зависимость ФПМ от:

- параметров технологического процесса изготовления fotocувствительной СБИС: доз и энергий легирования, режимов термоопераций и т.д.;
- геометрических параметров топологии и объемной структуры fotocувствительных пикселей: толщин и комбинаций полупрозрачных диэлектриков, глубин залегания p-n-переходов, взаимного расположения внутренних диффузионных областей и т.д.;
- мощности и спектрального состава входного излучения: возможен расчет ФПМ как для монохроматического, так и для полихроматического источников излучения.

B. Входной оптический сигнал

В качестве двумерного входного сигнала с заданной частотой используются чередующиеся светлые и темные полосы равной ширины (полосатый мир) со ступенчатой или косинусоидальной функцией изменения яркости света, а также сигнал типа «одиночная ступень» или «черно-белый перепад». Под направлением входного сигнала для полосатых мир понимают направление, в котором пространственная частота сигнала максимальна, рис. 1.

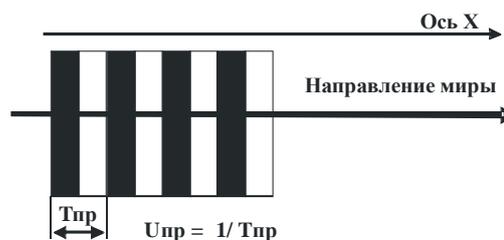


Рис. 1. Полосатая ступенчатая мира и определение ее направления. $T_{\text{пр}}$ - пространственный период мира, $U_{\text{пр}}$ - пространственная частота

Удобно выразить это направление в градусах относительно положительного направления оси X, рис. 1.

C. Задание топологии и структуры фотоприемного пиксела

Топология фотоприемного пиксела условно делится на фоточувствительную и нефоточувствительную подобласти, причем для подобласти каждого типа может быть задан коэффициент поглощения, отличный от 1. Области задаются с помощью объединения таких простых геометрических фигур, как прямоугольники и треугольники и сектора круга. Для прямоугольников и треугольников задаются координаты углов, для круга – радиус и координата центра.

D. Принцип построения модели ФПМ

Зная общую ФПМ и её геометрическую составляющую, можно получить диффузионную ФПМ:

$$\Phi_{\text{ПМ}}_{\text{дифф}} = \Phi_{\text{ПМ}} / \Phi_{\text{ПМ}}_{\text{геом}} \cdot \quad (4)$$

Полная ФПМ рассчитывается с помощью приборно-технологического моделирования в плоскости сечения матрицы, которое проходит вдоль столбца или вдоль строки матрицы. Геометрическая ФПМ рассчитывается с помощью двумерного интегрирования мощности входного сигнала по площади пиксела с построением круговой диаграммы ФПМ для полного поворота вектора направления сигнала в плоскости матрицы. Геометрическая ФПМ моделируется независимо от полной и диффузионной ФПМ.

Таким образом, метод моделирования ФПМ будет включать следующие этапы: моделирование ФПМ_{геом} без применения приборно-технологического моделирования, моделирование полной ФПМ с применением приборно-технологического моделирования и расчет ФПМ_{дифф} по формуле (4).

E. Ограничения и допущения метода

Топология пиксела: произвольная, составляемая из треугольников, прямоугольников и секторов круга.

Объемная структура пиксела: произвольная, двумерная, получаемая средствами технологического моделирования.

Формы входного сигнала: произвольная - для модели геометрической ФПМ; одиночная ступень для модели полной и диффузионной ФПМ.

Направление входного сигнала: произвольное - для модели геометрической ФПМ; вдоль строки или вдоль столбца матрицы для ступень для модели полной и диффузионной ФПМ.

Временные параметры режима выборки входного сигнала: произвольное время выборки; произвольное изменение мощности входного сигнала во времени.

F. Шаги метода

Шаг 1. Разработка модели структуры пиксела и фрагмента матрицы, включающей: модель топологии пиксела для геометрической ФПМ; модель сечения пиксела и фрагментов матрицы в направлении вдоль строки (столбца) для технологического моделирования.

Шаг 2. Кодирование топологии пиксела.

Шаг 3. Технологическое моделирование структуры пиксела и фрагментов матрицы.

Шаг 4. Моделирование круговой диаграммы геометрической ФПМ с использованием модели топологии.

Шаг 5. Моделирование полной ФПМ с использованием модели структуры в сечениях.

Шаг 6. Расчет диффузионной ФПМ по формуле (4).

III. МОДЕЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ФПМ

Для полосатых мир алгоритм состоит из следующих шагов [8].

Шаг 1. Задание параметров входного сигнала: входная мощность P_{max}, начальный период T_{пр}, изменение периода δT, исходный угол направления α, изменение угла δα, исходный сдвиг пространственной фазы d, величина изменения сдвига фазы δd.

Шаг 2. Задание топологии пиксела и матрицы: кодирование конфигурации фоточувствительной и нефоточувствительной областей пиксела, задание размерности матрицы-модели по вертикали и горизонтали MxN.

Шаг 3. Интегрирование входного сигнала по всем пикселям матрицы-модели.

Шаг 4. Вычисление величины максимальной модуляции по значениям интеграла.

Шаг 5. Изменение начального сдвига фаз на заданную величину δd.

Шаг 6. Интегрирование входного сигнала по всем пикселям матрицы-модели для нового значения фазы.

Шаг 7. Повторение шагов 4 – 6 заданное число раз (порядка 5 – 8 дополнительных выборок).

Шаг 8. Задание нового угла направления α₁=α+ δα.

Шаг 9. Повторение шагов 3 – 8 до достижения суммарного угла поворота, равного 360 градусов.

Шаг 10. Фиксация значения модуляции M(f)=M(1/T).

Шаг 11. Задание нового значения периода входного сигнала T_{1пр}=T_{пр}+δT.

Шаг 12. Повторение шагов 3 – 11 для заданного набора пространственных частот входного сигнала.

Шаг 13. Построение ФПМ по значениям M(f).

Для сигнала типа «одиночная ступень» алгоритм включает шаги построения краевой функции рассеяния и расчета ФПМ по известному методу с применением преобразования Фурье [5].

Модель реализована в среде программирования MATLAB. В качестве исходных данных задаются топология пиксела, закодированная в текстовом файле, тип входного сигнала (ступень, косинус или черно-белые полосы) и вид искомой ФПМ: для конкретного

сдвига пространственной фазы либо максимальная ФПМ, получаемая методом дополнительных выборок.

IV. МОДЕЛЬ ДИФFUЗИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ФПМ

Модель основана на построении краевой функции рассеяния с помощью метода многократных выборок.

Для построения ФПМ в качестве входного выбирается ступенчатый сигнал, или так называемый «черно-белый переход». Отклик матричного фотоприемника $e(l)$ (где l - координата, нормальная к границе ступени) на такой сигнал называется «краевой функцией рассеяния» (КФР, ESF - Edge Spread Function). Он несет полную информацию о частотном спектре выходного сигнала [1]. Пространственная производная КФР $e'(l)$ будет представлять собой Функцию Рассеяния Точки (ФРТ) $h(l)$. Функция передачи модуляции ФПМ(u) пространственного сигнала в направлении нормали к ступени тестового входного сигнала получается как результат преобразования Фурье:

$$\Phi PM(u) = |F[h(l)]|, \quad (5)$$

где u - пространственная частота в направлении нормали l , h -функция рассеяния точки.

Таким образом, метод построения диффузионной составляющей ФПМ состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Задание входного сигнала: входная мощность P_{max} , начальное положение ступени X_0 , сдвиг исходного положения d , равный целой доли длины элемента.

Шаг 2. Задание фрагмента сечения матрицы в направлении вдоль столбца либо вдоль строки (технологическое моделирование).

Шаг 3. Расчет объемного распределения фотогенерированных носителей заряда $n(x,y,t)$ при заданном режиме выборки изображения (приборное электрофизическое моделирование).

Шаг 4. Расчет величин накопленных зарядовых пакетов в каждом фотоприемном элементе.

Шаг 5. Построение краевой функции для координат $X_0 \pm n \cdot L_s$, где n - число пикселей вправо и влево от пиксела, в котором располагается ступень, L_s - длина элемента в направлении разложения.

Шаг 6. Изменение начального положения ступени на заданную величину d и замена X_0 на $X_1 = X_0 + d$.

Шаг 7. Повторение шагов 3 - 5 заданное число раз, соответствующее числу дополнительных выборок, см. ниже.

Шаг 8. Построение КФР по полученным значениям величин накопленных зарядов.

Шаг 9. Дифференцирование КФР.

Шаг 10. Построение полной ФПМ согласно (5).

Шаг 11. Построение диффузионной составляющей ФПМ согласно (4).

Эмпирическим путем установлено, что для построения КФР с числом дополнительных выборок от 8 до 12 требуется фрагмент матрицы с числом элементов не менее 10. При большем числе

дополнительных выборок точность построения КФР практически не увеличивается, что совпадает с данными [9].

Одной из проблем является выбор числа элементов в моделируемом фрагменте сечения фотоприемной матрицы. Критерием является отсутствие влияния искажений распределений потенциала и подвижных носителей заряда на боковых сторонах области моделирования, где КФР постоянна, на область «размытия» ступени, где КФР переходит от минимума к максимуму распределения электрического поля.

V. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФПМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ФОТОПРИЕМНЫХ СБИС

Применение предложенных методов моделирования ФПМ позволило решить ряд задач реального проектирования фотоприемников, которые не могли быть решены традиционными аналитическими средствами.

A. Снижение величины смаза изображения в сканирующей оптико-электронной системе

Известно, что при работе фотоприемной СБИС в режиме сканирования неподвижного объекта наблюдается так называемый «смаз» изображения, обусловленный тем, что за время экспозиции изображение успевает переместиться по матрице и фрагмент изображения воспринимается не одним, а двумя и более пикселями в зависимости от скорости бега изображения. Известно, что величина смаза тем меньше, чем меньше размер фоточувствительной области пиксела в направлении сканирования. При проектировании линейной фотоприемной СБИС на КМОП-фотодиодных элементах с фотодиодами L-образной формы (рис. 2) наименьший смаз будет в направлении с максимальной ФПМ. Для данного фотоприемника построена круговая диаграмма геометрической ФПМ, по которой легко определяется направление R , в котором ФПМ максимальна, рис. 3. Так как фотоприемная линейка всегда ориентируется перпендикулярно направлению сканирования для достижения максимально возможной полосы захвата, то достаточно сориентировать L-образный фотодиод в пикселе так, чтобы направление сканирования совпадало с направлением максимальной ФПМ, рис. 2.

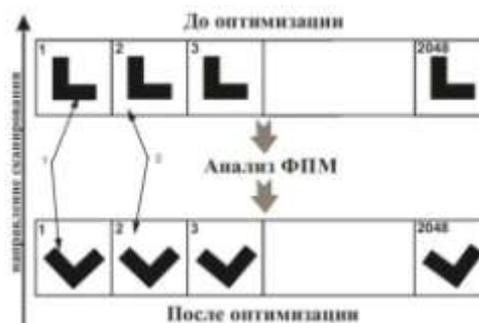


Рис. 2. Топология линейного КМОП-фотоприемника с L-образными фотодиодами до и после оптимизации, обеспечивающей минимальный смаз

При этом принципиальных изменений конструкции и топологии пиксела не требуется, что существенно облегчает задачу проектирования.

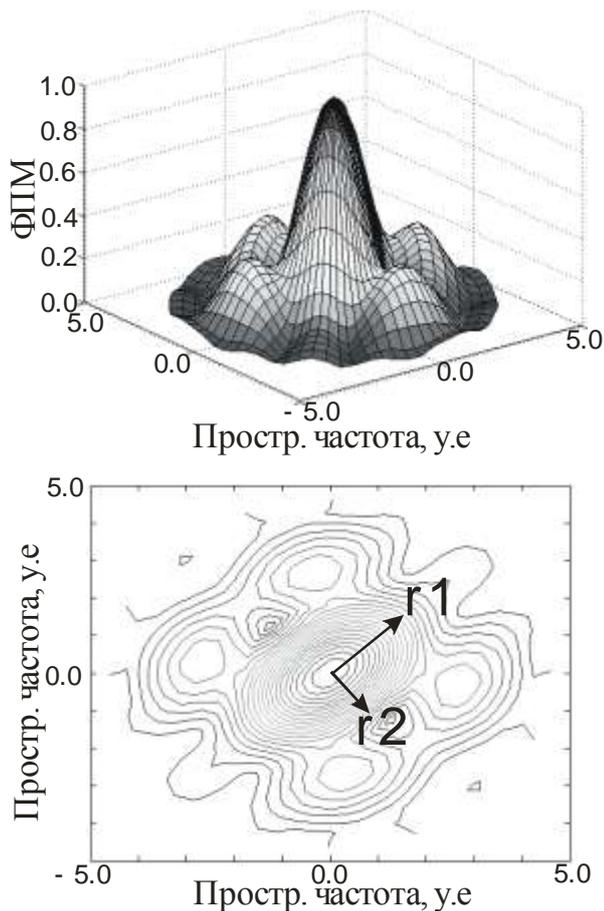


Рис. 3. Круговая диаграмма геометрической ФПМ. R r1 и r2 – направления максимальной и минимальной ФПМ для КМОП-фоторриемника с L-образными фотодиодами

В. Оптимизация параметров подложки фотоприемной ПЗС СБИС с обратной засветкой

Фотоприемные матрицы с обратной засветкой имеют в фотоприемной части подложку, утоненную до величины от одного до нескольких десятков микрон. Излучение направляется на поверхность подложки, обратную той, которая содержит электроды. Этот прием позволяет существенно улучшить равномерность спектральной характеристики фотоприемника и повысить его чувствительность. «Платой» за эти улучшения являются значительные усложнения технологии изготовления кристалла из-за операций утонения подложки и его последующей сборки в корпус.

На рис. 4 изображена модель структуры ПЗС с обратной засветкой. В таких ПЗС при накоплении фотогенерированных зарядов возможна ситуация, когда даже утоненная подложка оказывается обедненной не на всю толщину. В этой ситуации решающее влияние на модуляцию оказывает

диффузия электронов в нейтральной части подложки, примыкающей к нижней (на рис. 4) поверхности, на которую падает излучение. В модель структуры включено 9 элементов ПЗС в направлении вдоль строки и два корректирующих затвора. Путем подбора напряжений на этих затворах устраняются краевые эффекты на боковых сторонах области моделирования, которые приводят к тому, что направления моделируемых диффузионных потоков фотогенерированных электронов отличаются от реальных.

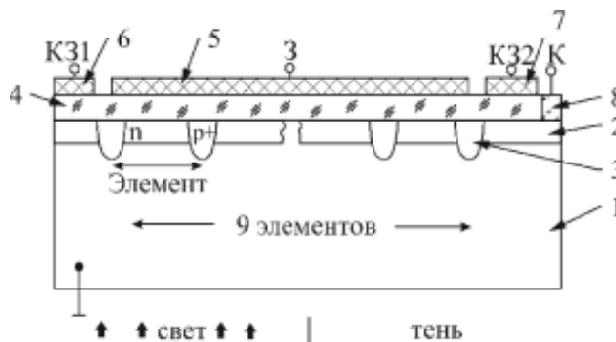


Рис. 4. Модель структуры ПЗС с обратной засветкой (показаны только два элемента модели из 9). 1 – р-подложка, 2- n- канал; 3 – р+- стоп-канал; 4 – подзатворный диэлектрик; 5 – затвор; 6,7 – корректирующие затворы, 8 – контакт к каналу

Целью моделирования является выбор толщины и удельного сопротивления подложки при условии максимизации ФПМ. После подбора параметров модели структуры проведена серия численных экспериментов, которая дала полную информацию для выбора сопротивления материала и толщины подложки прибора. На рис. 5 для одного из положений ступени входного сигнала представлены двумерные картины распределения фотогенерированных электронов в моменты времени 0 (а), 1 (б), и 10 (в) (окончание времени накопления) для входного потока излучения с длиной волны 650 нм при неоптимальных напряжении затвора и сопротивлении подложки (толщина 30 микрон и сопротивление 100 Ом*см). Длина элемента вдоль строки – 12 мкм. На рис. 5(г) даны попиксельные значения концентрации электронов вдоль строки, которые служат основой для построения краевой функции рассеяния.

На рис. 5(а) (время $t=0$) хорошо видно расположение края световой ступени. Для построения краевой функции рассеяния край ступени перемещался по отрезку координат X центрального элемента 8 раз.

На рис. 6 приведена рассчитанная полная ФПМ для длины волны 650 нм (красный свет) и времени накопления 10 миллисекунд. Данный график показывает, что для этой длины волны фотоприемник будет обладать крайне низким разрешением в случае неполного обеднения подложки.

Всего было построено 18 зависимостей ФПМ: (3 сопротивления подложки)*(3 толщины подложки)*(2

управляющих напряжений). Удалось установить, что для заданных условий фотосъемки время накопления 1,0 миллисекунды является значительно более предпочтительным по сравнению с 10 миллисекундами с точки зрения получения более контрастного изображения. По результатам численных экспериментов проведена оптимизация конструкции и управляющих напряжений ПЗС.

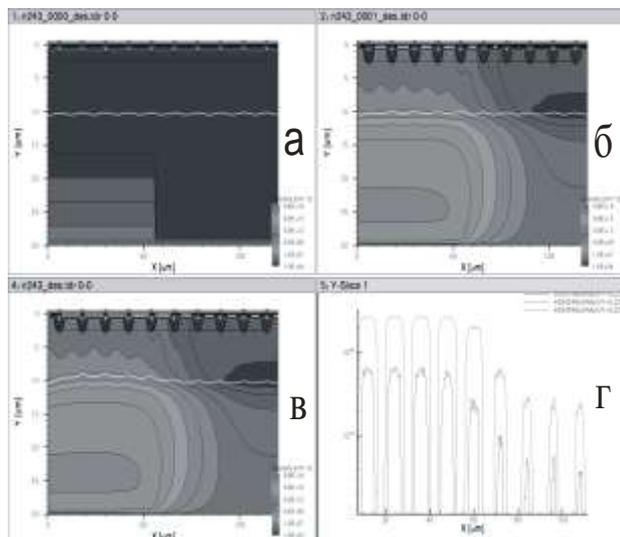


Рис. 5. Распределения электронов в ПЗС с обратной засветкой, применяемые для построения КФР

Представленные результаты впервые на практике демонстрируют возможность построения ФПМ с помощью двумерного приборно-технологического моделирования и практического применения расчетных ФПМ в цикле проектирования. Предложенный метод также дает возможность построения зависимости ФПМ от длины волны излучения без упрощения объемной структуры фотоприемного элемента, при этом профили легирующей примеси строятся с помощью двумерного технологического моделирования.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод моделирования функции передачи модуляции матричных фотоприемников, позволяющий учитывать реальную топологию и объемную структуру фотоприемных элементов без упрощений, присущих аналитическим моделям. Метод сочетает в себе численное двумерное приборно-технологическое моделирование распределений фотогенерированных зарядов в объеме структуры фрагмента СБИС и методы построения краевых функций рассеяния с применением процедуры многократных выборок. Получена возможность построения зависимостей ФПМ от реальной топологии фотоприемных элементов, от параметров техпроцесса изготовления фотоприемной СБИС, длины волны и мощности входного излучения, режимов управления фотоприемной матрицей. Метод применен при проектировании новых ПЗС и КМОП-фотодиодных СБИС на предприятии электронной промышленности

и позволил оптимизировать ряд их конструктивно-технологических параметров.

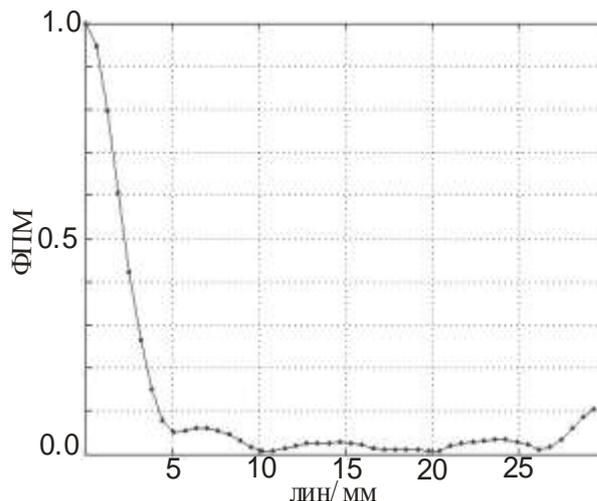


Рис. 6. Расчетная полная ФПМ ПЗС с обратной засветкой для длины волны 650 нм

Таким образом, разработанный метод впервые позволил связать ФПМ с реальными параметрами технологического процесса и показал свою эффективность в процессе проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Holst G. Electro-optical Imaging System Performance. 2nd ed. Washington.: A Publication of SPIE. 2000. 438 p.
- [2] Hadar O., Dogariu A. and Boreman G. Angular dependence of sampling MTF // Applied Optics. 1997. V. 36. P. 7210-7216.
- [3] Носов Ю.Р., Шилин В.А. Основы физики приборов с зарядовой связью. М.: Наука, 1986. 320 с.
- [4] Yadid-Pecht O. The Geometrical Modulation Transfer Function (MTF) for different pixel active area shapes // Optical Engineering. 2000. V. 39. № 4. P. 859-865.
- [5] Djite I., Estriebeau 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 Transactions on Electron Devices. 2012. V. 59. № 3. P. 729-739.
- [6] Stevens E., Lavine J. An Analytical, Aperture, and Two-Layer Carrier Diffusion MTF and Quantum Efficiency Model for Solid-State Image Sensors // IEEE Transactions on Electron Devices. 1994. V. 41. № 10. P. 1753-1760.
- [7] Пугачёв А.А., Осочкин С.С. Физико-топологическое моделирование функции передачи модуляции фоточувствительных СБИС // II Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем - 2006» / Сб. научных трудов / под ред. А.Л. Стемповского. М.: ИППМ РАН, 2006. С. 426-432.
- [8] Иванова Г.А., Пугачёв А.А. Алгоритм вычисления функции передачи модуляции матричных фотоприемников и его реализация в среде MATLAB // Материалы научно-технической конференции «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА». М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2013. С. 147-150.
- [9] Hadar O., Boreman D. Analysis of Oversampling Requirements in Infrared Scene Projectors // SPIE. 1997. V. 3122. P. 286-294.