

УДК 621.3.049.771.14

Г.А. Иванова, А.А. Пугачёв, Д.В. Пузырьков, А.Н. Щелоков

**ФИЗИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФОТОПРИЕМНЫХ СБИС**

*Разрешающая способность является ключевой характеристикой фотоприемной СБИС и определяется путем построения функции передачи модуляции (ФПМ). Работа посвящена разработке метода моделирования ФПМ матричных фотоприемных СБИС, основанного на физико-топологическом моделировании распределений фотогенерированных носителей заряда. Данная модель позволяет установить прямые связи между разрешающей способностью фотоприемной СБИС и ее реальными конструктивно-технологическими параметрами такими, как энергии и дозы легирования диффузионных слоев и параметры термоопераций. Также появляется возможность изучить зависимость разрешения от режимов управления и внешних условий. Модель существенно расширяет возможности разработчиков фотоприемников и устраняет все основные недостатки аналитического подхода моделирования ФПМ. С помощью разработанного метода моделирования исследованы зависимости геометрической и диффузионной составляющих ФПМ от параметров подложки, спектрального состава излучения и температуры. Результаты исследования применены при проектировании матричных фотоприемных приборов с зарядовой связью (ПЗС) и КМОП-фотодиодных СБИС.*

*Функция передачи модуляции; фотоприемная матрица; проектирование ПЗС.*

G.A. Ivanova, A.A. Pugachev, D.V. Puzyrkov, A.N. Schelokov

**PHYSICAL-TOPOLOGICAL MODELLING OF IMAGE SENSORS RESOLUTION**

*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 modeling based on physical-topological simulation of photogenerated carriers distribution in pixels. This model established the direct dependence between resolution and topological and technological parameters such as doses and energies of implantation and parameters of thermodiffusion stages with time-dependence from other conditions. The model gives new aids for photosensor design and overcomes restrictions of analytical resolution models. The numerous investigations of real CCD and CMOS APS pixels output signal modulation for different shapes of test input signals for geometrical MTF and technological-device modeling for diffusion MTF component are provided. The simulation results confirm the universal character of the MTF calculation method. The method was applied for practical design of numerous CCD image sensors.*

*Modulation transfer function; matrix image sensor; image sampling; CCD design.*

**Введение.** Математическое моделирование в микроэлектронике с применением ЭВМ началось еще в 60-е гг. прошлого века. Ускоренное развитие оно получило в начале 80-х гг. с достижением ЭВМ мощностей, достаточных для решения систем линейных алгебраических уравнений большой размерности. Наряду с аналитическими, стали появляться так называемые физико-топологические модели элементов электронных компонентов [1], основанные на различных вариантах решения фундаментальной системы уравнений полупроводника (ФСУ). Исходной информацией в физико-топологических моделях являются электрофизические параметры полупроводникового материала, его объемная структура и топология, а также статические или изменяющиеся во времени управляющие напряжения или токи. На начальном этапе развития физико-топологического моделирования из-за

«слабости» ЭВМ для решения ФСУ приходилось вводить много физических и геометрических ограничений. Ограничения позволяли упростить систему до двух или даже одного уравнения и решить задачу на ЭВМ за приемлемое для практических целей время. Такие модели имели узкое применение: только для одного варианта структуры прибора или только одного электрического режима работы [1]. При этом первостепенной задачей при построении упрощенных моделей становилось обеспечение их физической адекватности.

В настоящее время коммерческие САПР приборно-технологического моделирования (например, Sentaurus TCAD (Synopsys) [2]), установленные на мощных рабочих станциях, позволяют решать полную систему уравнений полупроводника с числом узлов пространственного разбиения вплоть до миллиона. Однако проблемы обеспечения физической адекватности моделей полупроводниковых приборов и достижения времен моделирования, приемлемых для практического проектирования, выстраиваемых даже в таких развитых САПР, не снимаются.

Фотоприемные СБИС относятся к тем изделиям микроэлектроники, при проектировании которых физико-топологическое моделирование является обязательным [3, 4].

Во-первых, проектирование фотоприемных СБИС – это, в первую очередь, технологическое проектирование отдельного фотоприемного элемента, при котором разрабатывается технологический маршрут его изготовления. Маршрут должен воспроизвести требуемую объемную структуру профиля примеси, которая, в свою очередь, обеспечивает требуемые фотоэлектрические характеристики фотоприемника. Технологическое моделирование является необходимым средством проектирования фотоприемного элемента.

Во-вторых, даже в фотоприемных матрицах с элементами, имеющими размеры более  $10 \times 10$  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. При этом требуется очень тщательно выбирать положения границ области моделирования, чтобы избежать больших искажений распределения потенциала и носителей заряда на границах области моделирования [4].

В-третьих, разрешающая способность не является чисто электрической характеристикой фотоприемной СБИС и для ее расчета необходимо моделировать процессы прохождения и поглощения света в полупроводнике и диэлектриках.

На рис. 1 показан фрагмент тестового сигнала, называемого ступенчатой полосатой мирой, который применяется для измерения разрешающей способности. Стрелкой показано ее направление (на рис. 1 направление параллельно оси X). Направление миры при измерениях может меняться в плоскости фотоприемника с целью поиска предельных значений разрешения. Также в качестве тестового сигнала применяется одиночная ступень, иначе называемая «черно-белый перепад». Для экспериментальных исследований применяются достаточно легко изготавливаемые миры типа «одиночная ступень» и «полосатая мира». Косинусоидальный и точечный сигналы редко используются на практике вследствие их сложного физического воспроизведения.

Разрешающая способность фотоприемной СБИС определяется с помощью Функции Передачи Модуляции – ФПМ.

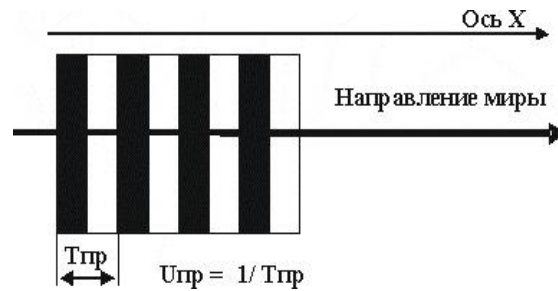


Рис. 1. Полосатая структура для определения разрешающей способности фотоприемной СБИС и ее направление, где  $M$  – модуляция выходного сигнала,  $T_{гр}$  и  $U_{гр}$  – пространственные период и частота соответственно

Согласно определению, Функция Передачи Модуляции – это частотная зависимость отношения максимальной модуляции выходного сигнала матрицы фотоприемных элементов на заданной частоте к модуляции при входном сигнале с нулевой пространственной частотой [5]:

$$\Phi_{ПМ}(u) = M(u) / M(0). \quad (1)$$

Модуляция на каждой пространственной частоте равна (1):

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

При этом разрешающая способность определяется как пространственная частота для заданного значения ФПМ. Для фотоприемных матриц, применяющихся в оптико-электронных системах видимого диапазона, это значение равно 0,2–0,3.

Традиционно для теоретического исследования разрешающей способности применяются аналитические модели ФПМ. В аналитических моделях ФПМ структура фотоприемного элемента представляется со значительными упрощениями. Несмотря на эти упрощения, для матриц с элементами, имеющими непрямоугольную топологию и многослойную структуру примеси аналитические выражения для ФПМ становятся очень громоздкими [6–7]. Основные подходы, применяемые при построении аналитических моделей ФПМ, подробно освещены в [8]. Следует отметить, что традиция исследования ФПМ с помощью аналитических моделей настолько укоренилась, что они продолжают разрабатываться даже во втором десятилетии нашего века, например [9]. Полученные в данной работе выражения потеряли наглядность зависимости ФПМ от параметров структуры и фактически непригодны для целей практического проектирования.

Очевидно, что избежать недостатков аналитических моделей, связанных с упрощениями объемной структуры и физической картины электрофизических процессов, позволит модель ФПМ, построенная на основе моделирования реальных процессов генерации, переноса и накопления фотогенерированных носителей заряда в фотоприемных элементах с применением профилей примеси, смоделированных с высокой точностью средствами технологического моделирования. Такой подход, в частности, предлагался в [10], но оказался сложным для практических приложений.

**Построение физико-топологической модели ФПМ.** Таким образом, для того, чтобы связать физико-топологические параметры фотоприемной матрицы с ФПМ, необходимо:

- ◆ во-первых, максимальную  $A_{\max}$  и минимальную  $A_{\min}$  амплитуды сигналов пикселей определять путем численного интегрирования объемных распределений фотогенерированных носителей заряда по fotocувствительным областям фотоприемных пикселей матрицы;
- ◆ во-вторых, данные распределения должны быть получены путем решения фундаментальной системы уравнений полупроводника в двух- или трехмерном приближении при непринципиальных ограничениях на структуру прибора;
- ◆ в-третьих, структура прибора для расчета распределений фотогенерированных носителей должна быть получена с помощью двух- или трехмерного моделирования технологических процессов.

Такие модели, в которых модуляция вычисляется путем интегрирования величин фотогенерированных зарядов, называются также «моделями прямого вычисления ФПМ» – MTF Direct calculation model. Очевидно, что по сравнению с аналитическими моделями, модели прямого вычисления могут потребовать значительных вычислительных затрат. Это с лихвой компенсируется тем фактом, что в моделях прямого вычисления ФПМ ограничения на топологию и структуру пикселей с точки зрения практического проектирования отсутствуют или очень незначительные.

Как известно, ФПМ является произведением геометрической и диффузионной составляющих [6]:

$$\Phi PM(u) = \Phi PM_{\text{геом}}(u) * \Phi PM_{\text{дифф}}(u), \quad (3)$$

где  $u$  – пространственная частота, ФПМ – полная ФПМ, ФПМ<sub>геом</sub> – геометрическая составляющая, ФПМ<sub>дифф</sub> – диффузионная составляющая. Геометрическая составляющая ФПМ характеризует так называемую «геометрическую выборку» изображения и зависит только от топологии фотоприемного элемента, а диффузионная составляющая характеризует диффузионное растекание носителей в объеме матрицы, ведущее к нежелательному обмену носителями между пикселями, и зависит от объемной структуры ее фотоприемных элементов, электрического режима работы других факторов, влияющих на объемные распределения фотогенерированных носителей заряда.

Так как диффузионная составляющая зависит от перемещения фотогенерированных носителей заряда из освещенных областей в теневые, то перепад сигнала фотоприемных элементов, находящихся на границе теневых и освещенных участков уменьшается. Именно для учета влияния на ФПМ данных объемных эффектов необходимо объемное физико-топологическое моделирование.

Диффузионную ФПМ можно рассчитать, зная общую ФПМ и её геометрическую составляющую:

$$\Phi PM_{\text{дифф}} = \Phi PM / \Phi PM_{\text{геом}}. \quad (4)$$

Геометрическая ФПМ рассчитывается с помощью двумерного интегрирования мощности входного сигнала по площади пиксела с построением круговой диаграммы ФПМ. Круговая диаграмма строится путем полного поворота вектора направления сигнала в плоскости матрицы с некоторым дискретным шагом по углу поворота. ФПМ геометрическая моделируется независимо от полной и диффузионной ФПМ. Полная ФПМ рассчитывается с помощью физико-топологического моделирования фрагмента матрицы в плоскости сечения, которое проходит вдоль столбца или вдоль строки матрицы.

Таким образом, модель разрешающей способности на основе физико-топологического моделирования ФПМ будет включать следующие этапы:

- ◆ моделирование ФПМ<sub>геом</sub> без применения приборно-технологического моделирования;

- ◆ моделирование полной ФПМ с применением приборно-технологического моделирования;
- ◆ расчет ФПМ<sub>дифф</sub> по формуле (4).

**Метод физико-топологического моделирования ФПМ.** Метод основан на вычислении отклика двумерного фрагмента фотоприемной матрицы на входной оптический сигнал, заданный в виде полосатой миры или в виде одиночной черно-белой ступени (т.н. «черно-белый перепад») с направлением их вдоль строки или вдоль столбца матрицы.

Отклик матричного фотоприемника  $e(l)$  (где  $l$  – координата, нормальная к границе ступени) на такой сигнал называется «краевой функцией рассеяния» (КФР, ESF – Edge Spread Function) и несет полную информацию о частотном спектре выходного сигнала [6]. 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 модуль преобразования Фурье:

$$\text{ФПМ}(u) = |F[h(l)]|, \quad (5)$$

где  $u$  – пространственная частота в направлении нормали  $l$ .

Отклик на входной сигнал определяется из распределений фотогенерированных носителей заряда, которые получают путем численного решения уравнений Фундаментальной Системы Уравнений (ФСУ) полупроводника в двумерном приближении.

Исходными данными для решения двумерной ФСУ являются: двумерные профили легирующих примесей, также рассчитанные с помощью двумерного технологического моделирования; геометрическая модель структуры поверхностных покрытий (диэлектрики, металлические и поликремниевые шины и т.д.); диаграммы управляющих воздействий на электродах. Двумерные профили примеси моделируются с использованием реальных параметров технологического процесса: доз и энергий легирования, параметров термоопераций, параметров материала и т.д. Таким образом, модель позволяет прямо связать ФПМ с параметрами техпроцесса, топологией и структурой прибора и режимом управления.

Предлагается следующий метод расчета диффузионной составляющей ФПМ через полную ФПМ.

Шаг 1. Задание входного сигнала: мощность  $P_{\text{max}}$ , положение ступени  $X_0$ .

Шаг 2. Задание фрагмента сечения матрицы.

Шаг 3. Расчет объемного распределения фотогенерированных носителей заряда  $n(x, y, t)$ .

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

Шаг 5. Построение краевой функции для координат  $X_0 \pm n \cdot L_3$ , где  $n$  – число пикселей вправо и влево от пиксела, в котором располагается ступень,  $L_3$  – 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 (порядка 5 – 8).

Шаг 8. Построение КФР по полученным значениям накопленных зарядов.

Шаг 9. Дифференцирование КФР.

Шаг 10. Построение полной ФПМ согласно (1).

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

**Реализация метода моделирования ФПМ.** Разработанные методы и алгоритмы моделирования ФПМ реализованы в виде:

1. Программного модуля расчета геометрической ФПМ, обработки результатов физико-топологического моделирования ФПМ и вывода результатов моделирования. Модуль реализован в программной среде MATLAB [11].
2. Набора алгоритмов моделирования (текстовые описания):
  - ◆ ФПМ геометрическая [11, 12],
  - ◆ ФПМ полная с выделением диффузионной составляющей [12],
  - ◆ расчет величины модуляции на половине частоты Найквиста,
  - ◆ ФПМ с учетом внешних факторов.
3. Набора файлов исходных данных к пакету приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD (Synopsys) и программы типа «SPICE», применяемой для схемотехнического моделирования (текстовые файлы).

**Пример применения метода.** Разработанный метод был применен в процессе проектирования фотоприемных СБИС на приборах с зарядовой связью (ПЗС) с утонченной подложкой для засветки со стороны подложки, свободной от малопрозрачных электродов (ПЗС «с обратной засветкой»). При засветке с «обратной» стороны подложки возрастает фоточувствительность, однако разрешающая способность может упасть из-за диффузии в нейтральной области со стороны засветки в случае, если ее толщина будет слишком велика. Поэтому задача выбора толщины подложки и уровня ее легирования является крайне актуальной для ПЗС данного класса.

На рис. 2 приведены двумерные распределения концентраций электронов в строчном сечении ПЗС-матрицы для длины волны входного излучения 450 нм, которая является наихудшей при обратной засветке. Сравниваются распределения при обратной (2а) и фронтальной (2б) засветках. Длина элемента вдоль строки – 12 мкм. Видно, что краевое распределение электронов при прямой засветке имеет более резкую ступень, что говорит о более высокой ФПМ. На рисунке 3а приведены КФР для исследуемых ПЗС, полученные с помощью TCAD-моделирования. Из графиков КФР отчетливо видно преимущество прямой засветки по сравнению с обратной при заданных ограничениях на конструкцию матрицы: на рис. 3б дана ФПМ для ПЗС с обратной засветкой, на рис. 3,б – ФПМ для ПЗС с прямой засветкой.

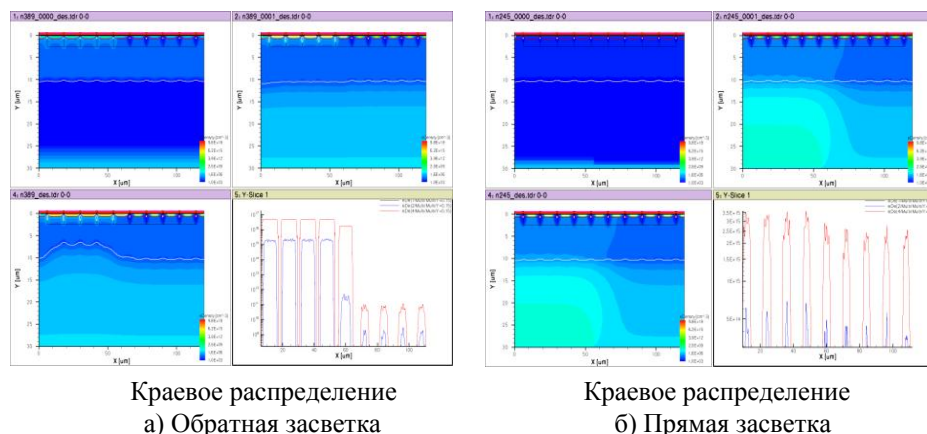


Рис. 2. Объемные и краевые распределения фотогенерированных носителей заряда для варианта обратной и прямой засветки. Длина волны 450 нм

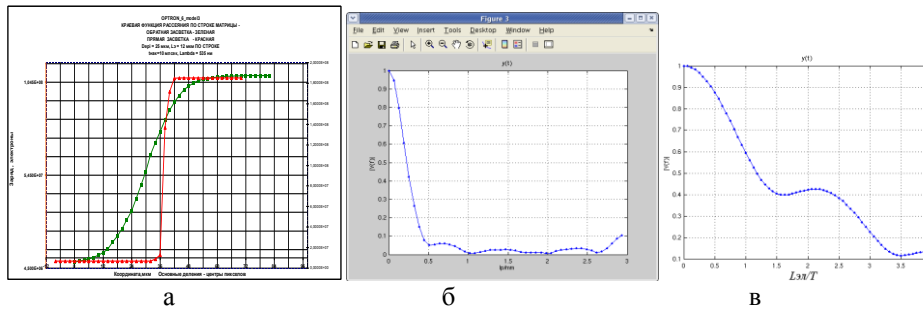


Рис. 3. а – краевые функции рассеяния: ПЗС с прямой засветкой – красный цвет и ПЗС с обратной засветкой – зеленый цвет; б – ФПМ для длины волны 450 нм

Проведен цикл расчетов, по результатам которых выбраны параметры подложки ПЗС с обратной засветкой, а также улучшены конструкции фотоприемных элементов ряда проектируемых фотоприемных ПЗС СБИС.

**Заключение.** Разработан метод моделирования разрешающей способности фотоприемных СБИС, основанный на физико-топологическом моделировании функции передачи модуляции. Данный метод позволяет установить прямые связи между разрешающей способностью фотоприемной СБИС и ее реальными конструктивно-технологическими параметрами, режимами управления и внешними условиями.

Полученные результаты анализа ФПМ различных фотоприемных матриц демонстрируют возможность ее расчета с помощью двумерного приборно-технологического моделирования без упрощения объемной структуры фотоприемных элементов, свойственных аналитическим моделям ФПМ. Метод применен в процессе реального проектирования фотоприемных СБИС.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Носов Ю.Р., Петросянци К.О., Шилин В.А. Математические модели элементов интегральной электроники. – М.: Сов. радио, 1976. – 304 с.
2. Process and Device Simulation Tools to Accelerate Innovation [Electronic resource] // Synopsys [Official website]. URL: <http://www.synopsys.com/TOOLS/TCAD/> (accessed: 06.02.2015).
3. Пугачев А.А., Тубаев А.А. Двумерные модели структур фотоприемных ячеек с устройством антиблуминга // Материалы научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2010. – С. 141-142.
4. Андреев П.П., Кушнин А.А., Маклакова О.В., Пугачев А.А., Пузырьков Д.В. Разработка элементов и вычислительных блоков фоточувствительных СБИС с внутрикристалльной обработкой изображений для систем ДЗЗ и астроориентации // Материалы IV научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2007.
5. Holst G. Electro-optical Imaging System Performance. – 2<sup>nd</sup> ed. – Washington: A Publication of SPIE, 2000. – 438 p.
6. Yadid-Pecht O. The Geometrical Modulation Transfer Function (MTF) for different pixel active area shapes // Optical Engineering. – 2000. – Vol. 39, № 4. – P. 859-865.
7. 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. – Vol. 41, № 10. – P. 1753-1760.
8. Носов Ю.Р., Шилин В.А. Основы физики приборов с зарядовой связью. – М.: Наука, 1986. – 320 с.

9. Djite I., Estribeau M., Magnan P., Rolland G., Petit S., Saint O. Theoretical Models of modulation Transfer Function, Quantum Efficiency and Crosstalk for CCD and CMOS Image Sensors // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2012. – Vol. 59, № 3. – P. 729-739.
10. Пугачёв А.А., Осочкин С.С. Физико-топологическое моделирование функции передачи модуляции фоточувствительных СБИС // Сборник научных трудов «Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем» / Под ред. А.Л. Стемповского. – М.: ИППМ РАН. – 2006. – С. 426-432.
11. 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.
12. Иванова Г.А., Пугачёв А.А. Метод моделирования функции передачи модуляции матричных фотоприемных СБИС // Сборник научных трудов «Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем» / Под ред. А.Л. Стемповского. – М.: ИППМ РАН, 2014. Ч. I. – С. 65-70.

## REFERENCES

1. Nosov Yu.R., Petrosyants K.O., Shilin V.A. Matematicheskie modeli elementov integral'noy elektroniki [Mathematical models of elements of integrated electronics]. Moscow: Sov. radio, 1976, 304 p.
2. Process and Device Simulation Tools to Accelerate Innovation [Electronic resource] // Synopsys [Official website]. Available at: <http://www.synopsys.com/TOOLS/TCAD/> (accessed 06 February 2015).
3. Pugachev A.A., Tubaev A.A. Dvumernye modeli struktur fotopriemnykh yacheek s ustroystvom antibluminga [Two-dimensional model structures of the photodetector cells with the device antiblooming], *Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotel'naya elektronika. Slozhnye funktsional'nye bloki REA»* [Materials of the scientific-technical conference "Solid-state electronics. Functional blocks of electronic equipment"]. Moscow: MNTORES im. A.S. Popova, 2010, pp. 141-142.
4. Andreev P.P., Kushnir A.A., Maklakova O.V., Pugachev A.A., Puzyr'kov D.V. Razrabotka elementov i vychislitel'nykh blokov fotochuvstvitel'nykh SBIS s vnutrikristal'noy obrabotkoy izobrazheniy dlya sistem DZZ i astroorientatsii [Development of computational elements and blocks of the photosensitive GSI comes with image processing for remote sensing systems and astroorientation] *Materialy IV nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sistemy nablyudeniya, monitoringa i distantsionnogo zondirovaniya Zemli»* [Proceedings of the IV scientific and technical conference "System of surveillance, monitoring and remote sensing of the Earth"], Moscow: MNTORES im. A.S. Popova, 2007.
5. Holst G. Electro-optical Imaging System Performance. 2<sup>nd</sup> ed. Washington: A Publication of SPIE, 2000, 438 p.
6. Yadid-Pecht O. The Geometrical Modulation Transfer Function (MTF) for different pixel active area shapes, *Optical Engineering*, 2000, Vol. 39, No. 4, pp. 859-865.
7. 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, Vol. 41, No. 10, pp. 1753-1760.
8. Nosov Yu.R., Shilin V.A. Osnovy fiziki priborov s zaryadovoy svyaz'yu [Basic physics of charge-coupled devices]. Moscow: Nauka, 1986, 320 p.
9. Djite I., Estribeau M., Magnan P., Rolland G., Petit S., Saint O. Theoretical Models of modulation Transfer Function, Quantum Efficiency and Crosstalk for CCD and CMOS Image Sensors, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, Vol. 59, No. 3, pp. 729-739.
10. Pugachev A.A., Osочкин S.S. Fiziko-topologicheskoe modelirovanie funktsii peredachi modulyatsii fotochuvstvitel'nykh SBIS [Physical-topological simulation of the transfer functions of the modulation of the photosensitive VLSI], *Sbornik nauchnykh trudov «Problemy razrabotki perspektivnykh mikroelektronnykh sistem»* [Collection of scientific works "problems of development of perspective micro-and nanoelectronic systems"], Under ed. A.L. Stempkovskogo. Moscow: IPPM RAN, 2006, pp. 426-432.



11. *Ivanova G.A., Pugachev A.A.* Algoritm vychisleniya funktsii peredachi modulyatsii matrichnykh fotopriemnikov i ego realizatsiya v srede MATLAB [The algorithm for computing the transfer function of the modulation matrix photodetectors and its implementation in MATLAB], *Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotel'naya elektronika, slozhnye funktsional'nye bloki REA»* [Materials of the scientific-technical conference "Solid-state electronics, functional blocks of electronic equipment"]. Moscow: MNTORES im. A.S. Popova, 2013, pp. 147-150.
12. *Ivanova G.A., Pugachev A.A.* Metod modelirovaniya funktsii peredachi modulyatsii matrichnykh fotopriemnykh SBIS [Method of modeling the transfer functions of the modulation matrix photodetector VLSI *Sbornik nauchnykh trudov «Problemy razrabotki perspektivnykh mikroelektronnykh sistem»* [Collection of scientific works "problems of development of perspective micro-and nanoelectronic systems"], Under ed. A.L. Stempkovskogo. Moscow: IPPM RAN, 2014. Part I, pp. 65-70.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.А. Скиданов.

**Иванова Галина Александровна** – Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН; e-mail: pirutina\_g@ippm.ru; 124365, Москва, Зеленоград, ул. Советская, 3; тел.: +74997299890; м.н.с.

**Щелоков Альберт Николаевич** – e-mail: schan@ippm.ru; тел.: +74997299890; зам. директора; к.ф.-м.н.

**Пугачев Андрей Алексеевич** – Открытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Пульсар»; e-mail: pugachev@pulsarnpp.ru; 105187, г. Москва, Окружной проезд, 27; тел.: +74953653111; в.н.с., к.т.н.

**Пузырьков Дмитрий Валериевич** – Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН; e-mail: dpuzyrkov@gmail.com; 125047, Москва, Миусская пл., 4; тел.: +79057285780; аспирант.

**Ivanova Galina Aleksandrovna** – Institute for design problems in microelectronics of Russian Academy of Science; e-mail: pirutina\_g@ippm.ru; 3, Sovetskaya street, Zelenograd, Moscow, 124365, Russia; phone: +74997299890; researcher.

**Schelokov Albert Nikolaevich** – e-mail: schan@ippm.ru; phone: +74997299890; deputy director; cand. of ph.-m. sc.

**Pugachev Andrey Alekseevich** – «PULSAR» Scientific and Production Enterprise Join Stock Company; e-mail: pugachev@pulsarnpp.ru; 27, Okrujnoy travel, Moscow, 105187, Rusia; phone: +74953653111; senior researcher, cand. of eng. sc.

**Puzyrkov Dmitry Valerievich** – Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences; e-mail: dpuzyrkov@gmail.com; 4, Miusskaya sq., Moscow, 125047, Russia; phone: +79057285780; postgraduate student.

УДК 621.372

**С.Г. Крутччинский**, Е.А. Жебрун

### ОСОБЕННОСТЬ СХЕМОТЕХНИКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ СУПЕРЕМКОСТЕЙ\*

*Для повышения основных качественных показателей оптимальных по критерию минимума пассивной чувствительности лестничных фильтров как сложно-функциональных блоков смешанных микроэлектронных систем рассматривается задача особенности схемотехнического проектирования прецизионных суперемкостей (D-элементов). В основе*

\* Статья подготовлена по проекту № 8.374.2014/К Госзадания Минобрнауки РФ на 2014–2016 гг.