

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.3>

УДК: 621.383.7.004.942

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ПЗС ВЗН, РАЗРАБОТАННЫЙ НА КРЕМНИЕВОЙ ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ

А.М. Маклаков^{1,2}, Е.В. Каевицер^{3,4}, Д.А. Федоров¹

¹АО «Научно-производственное предприятие «Пульсар»
105187, г. Москва, Окружной проезд, дом 27

² Российский технологический университет «МИРЭА»
119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78

³ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН
141190, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1

⁴Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
119049, Москва, Ленинский пр-т, 4

Статья поступила в редакцию 19 апреля 2024 г.

Аннотация. С помощью приборно-технологического моделирования получены функции передачи модуляции для двух структур ПЗС, работающих в режиме временной задержки и накопления.

Ключевые слова: разрешающая способность, ПЗС ВЗН, TCAD-моделирование.

Автор для переписки: Каевицер Екатерина Владиленовна katrin125@mail.ru

Введение

Важнейшими показателями качества матричных фотоприемников являются его разрешающая способность (R) динамический диапазон (DR) и чувствительность (S). При этом повышение разрешающей способности – это одно из ключевых направлений развития техники фотоприемных систем. Данная работа является продолжением работ по

моделированию разрешающей способности матричных фоточувствительных ИС, проведенных за последние 10 лет, результаты которых описаны в [1-4]. Продолжение исследований обусловлено проектированием новых образцов фоточувствительных ПЗС, работающих в режиме временной задержки и накопления, которые имеют особенности функционирования по сравнению с матричными и линейными ПЗС.

Общепринятой мерой разрешающей способности фоточувствительных ИС является функция передачи модуляции (ФПМ), связывающая пространственную частоту входного оптического сигнала с величиной модуляции выходного сигнала на данной частоте. Как всякая передаточная функция, ФПМ может быть выражена произведением составляющих передаточных функций для выделения влияния на нее различных факторов. Для твердотельного фотоприемника основными составляющими ФПМ являются так называемые «диффузионная составляющая ФПМ» и «геометрическая составляющая ФПМ», произведение которых определяет общую ФПМ. Вследствие уменьшения размеров и усложнения объемной структуры фотоприемных элементов, актуальной задачей является разработка модели, в которой указанные составляющие ФПМ связываются с параметрами технологического процесса изготовления СБИС и ее топологией непосредственно через исходные данные, взятые из технологической спецификации и реального топологического чертежа.

Для ПЗС, работающих в режиме временной задержки и накопления – ПЗС ВЗН – характерны существенно более длительные времена накопления изображения, чем для ПЗС стандартных фото- и видеосистем. Поэтому важным фактором, определяющим разрешающую способность и динамический диапазон ПЗС ВЗН, является т.н. взаимовлияние каналов переноса, которое определяется частью информационного заряда, попавшего из освещенного элемента в неосвещенный. по объему полупроводника. Соответственно, существенное значение приобретает именно величина диффузионной составляющей ФПМ, определяемой процессами объемного перераспределения фотогенерированных зарядов. При этом установление связи взаимовлияния

каналов переноса с ФПМ и, соответственно, с разрешающей способностью ПЗС ВЗН является актуальной задачей проектирования.

В работе [5], например, исследована связь ФПМ и межпиксельных помех, обусловленных обменом фотогенерированных носителей. Однако, в данной работе применяется аналитический подход, существенно ограничивающий применение модели к пикселям со сложной структурой.

В [6] предложена приборно-технологическая модель для определения взаимовлияния каналов переноса ПЗС ВЗН и в [7] исследовано влияние различных параметров на его величину. Следующим шагом стала разработка TCAD-модели ФПМ для ПЗС ВЗН для приборно-технологического моделирования ее диффузионной составляющей.

1. Метод приборно-технологического моделирования диффузионной составляющей ФПМ

Традиционно модель диффузионной составляющей ФПМ является аналитическим решением двумерного диффузионного уравнения распределения носителей заряда в электрически нейтральной подложке матрицы фотоприемных элементов. При этом, по крайней мере, имеют место следующие принципиальные ограничения [2]:

- постоянство глубины обедненного слоя р-п-перехода по всей площади матрицы, что неверно при накоплении пикселями зарядовых пакетов различной величины;
- представление объемной структуры и топологии фотоприемного элемента с помощью «геометрической аналитической модели», для построения которой принимаются многочисленные упрощения структуры пиксела;
- стационарные условия.

Преодолеть указанные недостатки может численное двумерное моделирование процесса перераспределения фотогенерированных носителей заряда в процессе его накопления [2,3].

Расчет ФПМ ПЗС ВЗН традиционно основан на построении краевой функции рассеяния с применением метода многократных выборок.

В качестве входного выбирается ступенчатый сигнал, или т.н. «черно-белый переход». Отклик матричного фотоприемника $e(l)$ на такой сигнал называется «краевой функцией рассеяния» (КФР, ESF - Edge Spread Function) и несет полную информацию о частотном спектре выходного сигнала матричного фотоприемника при любом направлении пространственного входного сигнала [6].

Так как полная ФПМ является произведением геометрической и диффузионной составляющих:

$$MTF(u) = MTF_{геом} \times MTF_{дифф}, \quad (1)$$

то, соответственно:

$$MTF_{дифф} = MTF / MTF_{геом}. \quad (2)$$

При этом, при построении TCAD-модели для вертикального сечения структуры прибора по строке, геометрическая составляющая ФПМ, соответственно, представляет собой геометрическую составляющую вдоль строки фотоприемника.

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

Шаг 1. Задание входного сигнала: входную мощность P_{max} , начальный 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.

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

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

Шаг 5. Построение краевой функции для координат $X_0 \pm n \times L_0$, где n – число пикселей вправо и влево от пиксела, в котором располагается ступень, L_0 – 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 величин накопленных зарядов.

Шаг 9. Дифференцирование КФР.

Шаг 10. Построение полной ФПМ согласно (1).

Шаг 11. Построение диффузионной составляющей ФПМ согласно (3).

Одной из проблем является выбор числа элементов в моделируемом фрагменте сечения фотоприемной матрицы. Критерием является отсутствие влияние искажений распределений потенциала и подвижных носителей заряда на боковых сторонах области моделирования на эти распределения в области размытия ступени. В [2] эмпирически установлено, что для устранения этого влияния при сохранении приемлемых временных затрат порядка 40 минут на одно положение ступени достаточным числом элементов матрицы является число, при котором на «плоские» участки на краях размытия ступени приходится порядка 4-х и более элементов. Для устранения влияния краевых эффектов также возможно введение в модель структуры на краях дополнительных «корректирующих» затвором, сглаживающих искажения распределения электрического поля. Однако, при моделировании ПЗС ВЗН с длительными временами накопления моделирование фрагмента с данным числом элементов требует значительного времени. В [5] в модель строки ПЗС ВЗН входит 3 рабочих элемента, при этом принимаются меры для компенсации искажений потенциала на краях области моделирования. Подобный подход применен и для модели ФПМ.

2. Применение TCAD-модели для оценки разрешающей способности ПЗС ВЗН

На рисунке 1 приведено сечение структуры профиля примеси вдоль строки матрицы ПЗС ВЗН, принятое в модели ФПМ. Рассматриваются две структуры: традиционная (а) с n-каналами переноса в р-подложке, и новая, трехслойная, с n-каналами переноса в эпитаксиальном р-кармане на n-подложке (б). Перемещение края черно-белого перепада происходит в центральном элементе. Длина элемента вдоль строки – 7 мкм.

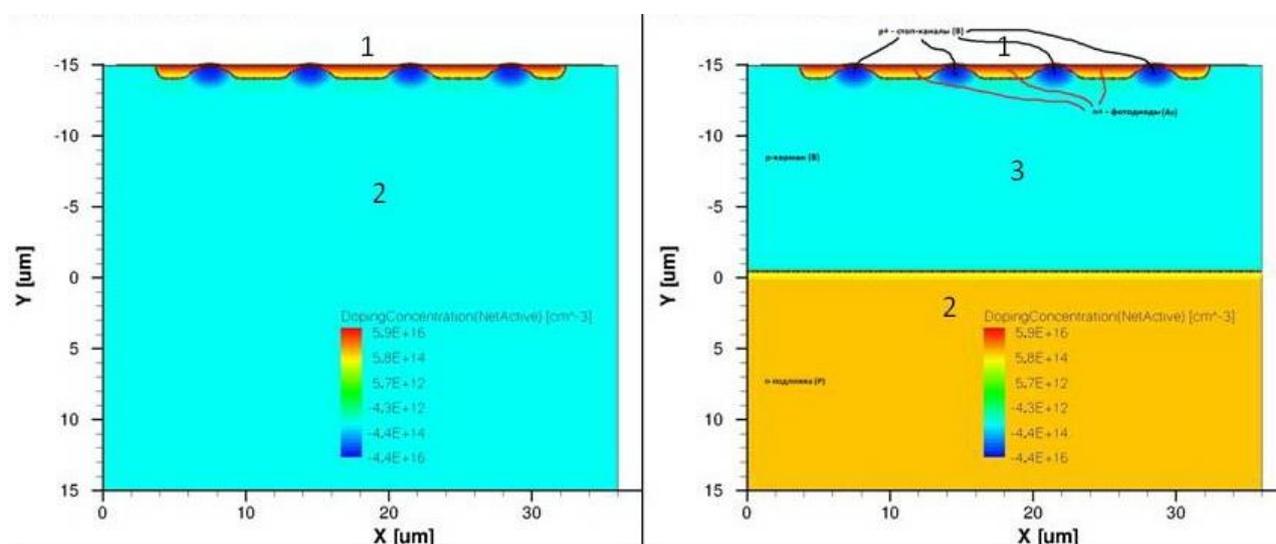


Рис. 1. Структура профиля примеси ПЗС ВЗН вдоль строки матрицы в модели ФПМ. а) – традиционная структура, б) – структура на основе эпитаксиального слоя. 1 – каналы переноса, 2 – подложки, 3 – эпитаксиальный слой.

На рисунке 2 приведены распределения фотогенерированных носителей и плотностей токов электронов на стадии накопления информационного заряда ПЗС ВЗН, построенном по схеме «n-канал переноса – в р-подложке» и для структуры ПЗС ВЗН «n-канал переноса в эпитаксиальном р-кармане на n-подложке».

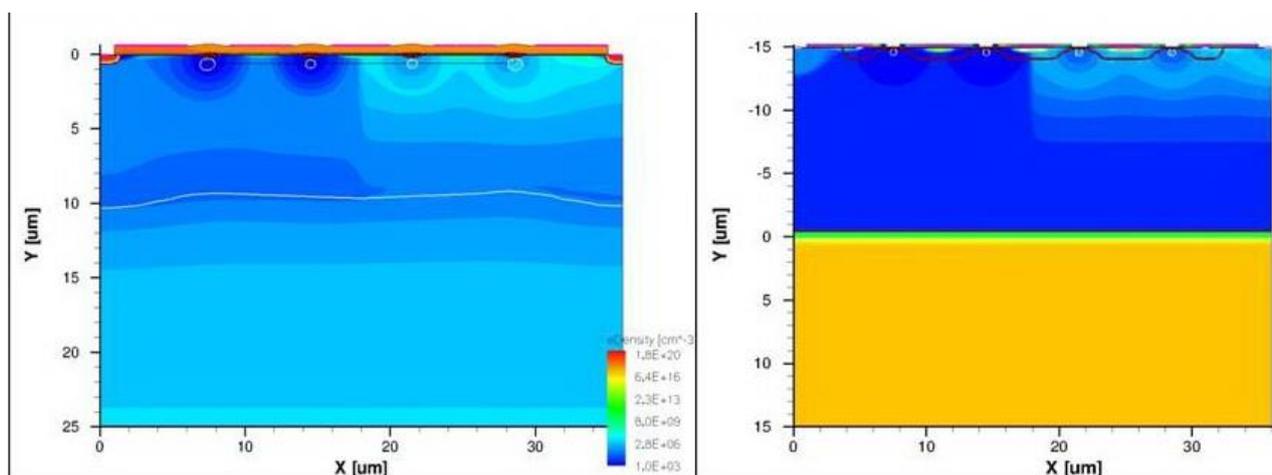


Рис. 2. Распределение фотогенерированных электронов в структурах ПЗС ВЗН: а) – традиционная структура, б) – структура на основе эпитаксиального слоя.

Распределения даны для входного сигнала мощностью 100 люкс, перепад «свет-тень» проходит по центру центрального элемента. Хорошо видно, что в традиционной структуре фотогенерированные электроны распространяются по подложке в соседние элементы. Именно этот процесс вызывает «размытие края» изображения ступени и снижает величину перепадов сигналов соседних элементов.

На рисунке 3 приведены ФПМ для традиционной и новой структур, нормированные на величину модуляции новой структуры.

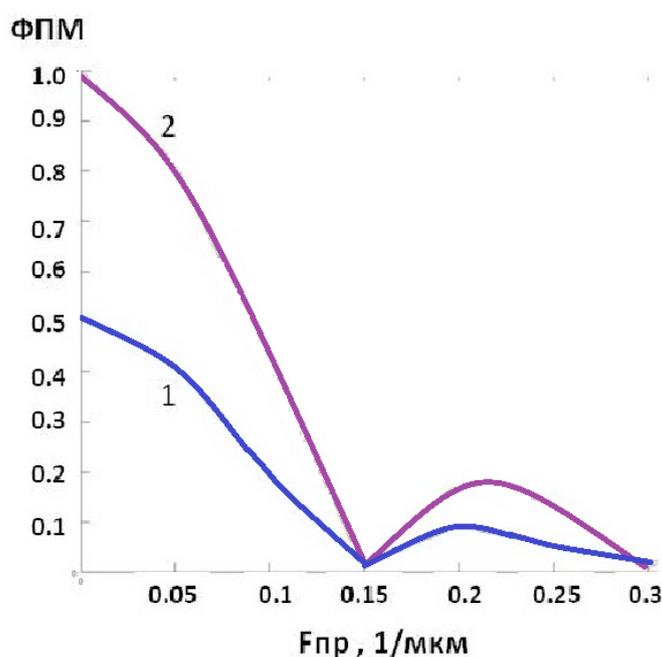


Рис. 3. Сравнение ФПМ для структур ПЗС ВЗН: 1 – традиционная структура, 2 – структура на основе эпитаксиального слоя.

Видно, что новая структура имеет существенно лучшую частотную зависимость модуляции, что позволит, при обязательном наличии ограничения на минимальную величину модуляции, получить более высокую разрешающую способность.

Заключение

С помощью приборно-технологического TCAD-моделирования получены оценки функции передачи модуляции для ПЗС, работающих в режиме временной задержки и накопления. Показано, что трехслойная структура ПЗС ВЗН с эпитаксиальным слоем имеет лучшие показатели разрешающей способности. Предложенная модель позволит оптимизировать объемные структуры ПЗС ВЗН – то есть определять параметры технологического процесса и топологию элемента ПЗС – по критерию максимизации разрешения.

Литература

1. Ivanova G.A., Pugachev A.A. Metod modelirovaniya funktsii peredachi modulyatsii matrichnykh fotopriemnykh SBIS // Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoehlektronnykh sistem — 2014. Sbornik trudov / Pod obshch. red. akademika RAN A. L. Stempkovskogo. M.: IPPM RAN, 2014. Chast' I. S. 65–70.
2. Ivanova G.A., Pugachev A.A., Puzyr'kov D.V., Shchelokov A.N. Fiziko-topologicheskoe modelirovanie razreshayushchei sposobnosti fotopriemnykh SBIS// Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. № 2. 2015 g. — S.246–254.
3. Pugachev A.A., Ivanova G.A., Puzyr'kov D.V., Shchelokov A.N., Gulyakovich G.N., Severtsev V.N. Avtomatizirovannoe proektirovanie fotochuvstvitel'nykh SBIS po kriteriyu razreshayushchei sposobnosti // Trudy II Rossiisko-Belorussoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Ehlementnaya baza otechestvennoi radioehlektroniki: importozameshchenie i primeneniE» im. O.V. Loseva. 2015. — S. 144–148.

4. Kononov A.A., Pospelova M.A., Pugachev A.A., Sokolov S.V. *Primenenie priborno-tehnologicheskogo modelirovaniya pri proektirovanii fotochuvstvitel'nykh PZS i KMOPfotodiodnykh SBIS // Mezhdunarodnaya konferentsiya «Mikroelektronika 2015». Integral'nye skhemy i mikroelektronnye moduli: proektirovanie, proizvodstvo i primeneniye. g. Alushta, 2015 g. Sbornik tezisev. Moskva: TEKHNOSEFERA, 2015. — S. 236–238.*
5. Klaus J. Engel*a, Lothar Spies a, Gereon Vogtmeier a, Randy Luhta *Impact of CT detector pixel-to-pixel crosstalk on image quality// Proc. of SPIE Vol. 6142 61422F-1 / Downloaded From: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/> on 06/16/2016 Terms of Use: <http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx>*
6. A.M. Maklakov. *Otsenka vzaimovliyaniya kanalov perenosa fotochuvstvitel'nykh PZS s vremennoi zaderzhkoi i nakopleniem s pomoshch'yu priborno-tehnologicheskogo modelirovaniya // Ehlektronnaya tekhnika, Seriya 2 poluprovodnikovye pribory, Vypusk 4 (265), s.s. 20-30, - M.:FGUP «NPP «Pul'saR», 2021*
7. Maklakov A.M. *Povysheniye razresheniya fotochuvstvitel'nykh mikroskhem na priborakh s zaryadovoi svyaz'yu// Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. Opticheskie tekhnologii, materialy i sistemy (Optotekh - 2023) [Ehlektronnyi resurs]: Sbornik dokladov konferentsii «Opticheskie tekhnologii, materialy i sistemY» Instituta perspektivnykh tekhnologii i industrial'nogo programmirovaniya RTU MIREHA / Pod redaktsiei Yurasova A.N. — M.: RTU MIREHA, 2023.– s.446-452*
8. Holst G.C. *Electro-optical system performance. SPIE Optical Engineering Press, 2000*

Для цитирования:

Маклаков А.М., Каевицер Е.В., Федоров Д.А. Фоточувствительный ПЗС ВЗН, разработанный на кремниевой эпитаксиальной структуре. // Журнал Радиоэлектроники. – 2024. – №.7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.3>