

# Метод приборно-технологического моделирования свет-сигнальных характеристик элементов КМОП-фотодиодных СБИС

А.А. Кононов<sup>1</sup>, А.А. Пугачёв<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Открытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Пульсар»,  
pugachev@pulsarnpp.ru

<sup>2</sup>Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук

**Аннотация** — предложен метод приборно-технологического моделирования ячеек фоточувствительных КМОП-ФД СБИС, позволяющий в двумерном приближении учесть как реальную топологию, так и объемную структуру профиля легирующих примесей ячейки. Метод реализован в системе Sentaurus TCAD (Synopsys) и применен при проектировании КМОП-ФД СБИС.

**Ключевые слова** — КМОП-ФД ячейка; приборно-технологическое моделирование; Sentaurus TCAD (Synopsys).

## I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из крупнейших направлений в области фотоприемников видимого диапазона являются фоточувствительные СБИС на КМОП-фотодиодных матрицах (КМОП-ФД СБИС) с внутрикристалльной обработкой изображений. В такой СБИС на одном кристалле могут быть реализованы как прием изображения в различных режимах, так и аналоговая, и цифровая внутрикристалльные обработки изображений [1].

С начала 21 века КМОП-ФД СБИС постепенно становятся доминирующей элементной базой большинства систем приема и обработки оптической информации, прежде всего, из-за доступности КМОП-технологии для широкого круга разработчиков и возможности создания заказных схем с заданными функциями. Как и для фоточувствительных СБИС на приборах с зарядовой связью (ФПЗС), ключевым этапом проектирования КМОП-ФД СБИС является проектирование ее фотоприемной ячейки [2]. При этом основным инструментом является приборно-технологическое моделирование с использованием как двумерного, так и трехмерного подходов [3,4]. Оптимальное конструкторско-технологическое решение ячейки находится путем неавтоматизированного перебора параметров технологического процесса и топологии. Критерием оптимальности конструкции ячейки может служить достижение максимального выходного сигнала ячейки, максимального динамического диапазона ячейки и т.д.

На рис. 1 представлен пример топологии, а на рис. 2 - электрическая схема четырехтранзисторной (4Т) КМОП-ФД ячейки [1]. В такой ячейке при приеме входного оптического излучения результат преобразования «фотогенерированный заряд – выходное напряжение» определяется соотношением емкостей таких элементов, как Фотодиод (ФД) и Плавающий Узел (ПУ), который образован затвором транзистора V3, стоком транзистора V1 и истоком транзистора V2, рис. 1. Емкости этих элементов определяются как их площадями в плоскости топологии (то есть, произведением длин сторон по координатам X и Z в плоскости топологии), так и профилем легирующей примеси по всем координатам (координата Y направлена вглубь от поверхности кристалла).

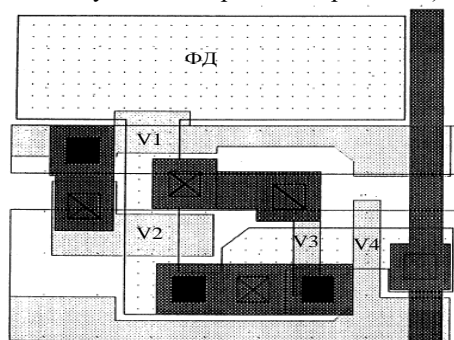


Рис. 1. Топология 4Т ячейки КМОП-ФД [1]

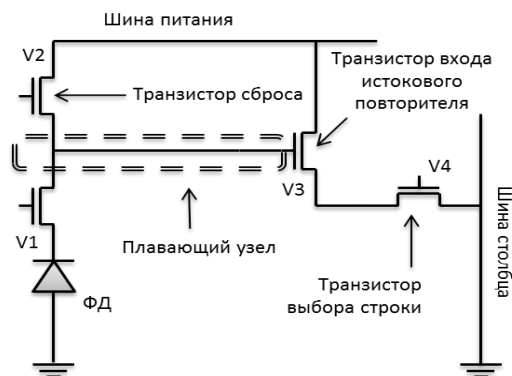


Рис. 2. Электрическая схема 4Т ячейки КМОП-ФД [1]

Именно поэтому при приборно-технологическом моделировании КМОП-ФД ячейки для корректного учета как профиля примеси, так и топологии, необходимо решать ТРЕХМЕРНУЮ задачу. Однако, трехмерное моделирование для применения в рамках практического проектирования именно фотоприемных ячеек не подходит по очевидным соображениям: неавтоматизированная оптимизация ячейки путем перебора десятков вариантов займет много вычислительного времени и, одновременно, много времени потребуется на «ручное» изменение и отладку модели структуры ячейки [4]. Для неавтоматизированной оптимизации перебором более подходит двумерная модель, дающая возможность оперативного внесения изменений в объемную структуру ячейки и обладающая возможностью учета ее реальной топологии.

Цель работы - создание двумерной модели КМОП-ФД фотоприемной ячейки, корректно учитывающей площади элементов КМОП-ФД фотоприемной ячейки в плоскости топологии.

## II. ПОСТРОЕНИЕ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ ЯЧЕЙКИ КМОП-ФД С УЧЕТОМ ПЛОЩАДЕЙ ФОТОДИОДА И УПРАВЛЯЮЩИХ ТРАНЗИСТОРОВ

Разработаны три приема для построения двумерной модели КМОП-ФД ячейки.

Прием 1: область моделирования формировать как составное двумерное сечение ячейки (плоскость сечения перпендикулярна плоскости поверхности кристалла). В него должны входить сечения, проходящие через области ячейки, определяющие преобразование заряд-напряжение и не имеющие объемного полевого и зарядового взаимодействия.

Прием 2: учет реальных площадей и, соответственно емкостей элементов ячейки производить путем изменения размеров элементов ячейки в области моделирования.

Прием 3: учет реальных емкостей элементов ячейки производить путем введения в модель структуры дополнительных емкостных элементов, подключаемых к основным элементам ячейки.

С помощью указанных приемов могут быть построены различные варианты модели одной ячейки, и, в зависимости от сложности структуры ячейки и поставленной задачи моделирования, может быть выбран конкретный вариант.

Для КМОП-ФД ячейки, схема которой приведена на рис. 3, разработаны три варианта модели структуры, которые реализованы в среде приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD (Synopsys) [5]. Особенность конструкции данной ячейки, по сравнению с ячейкой рис. 1, состоит в том, что для двух фоточувствительных элементов являются общими транзистор сброса V3, транзистор истокового повторителя V4 и транзистор выборки столбца V5. Такая ячейка называется «2,5-транзисторная» - 2,5 T. На рис. 4 приведен вариант топологии данной ячейки.

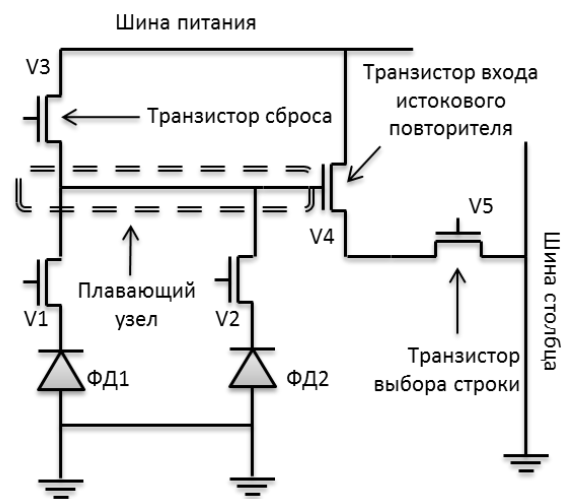


Рис. 3. Схема 2,5T ячейки КМОП-ФД

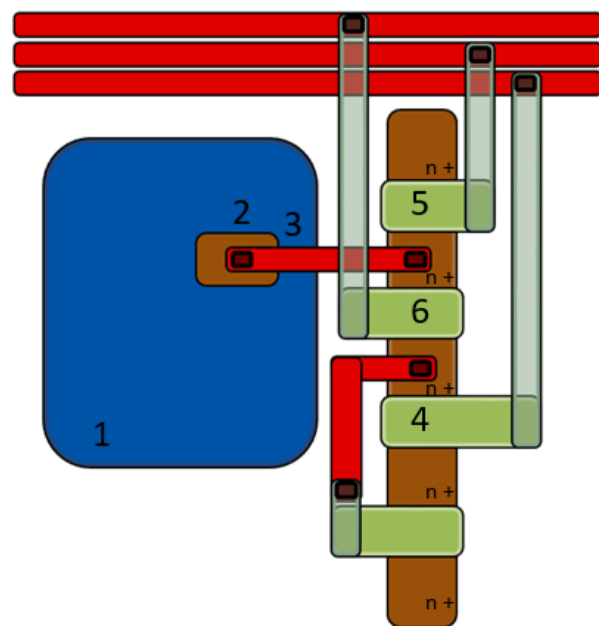


Рис. 4. Топология 2,5 T фотоприемной ячейки КМОП-ФД, где 1 - фотодиод, 2 – контакт фотодиода, 3 – электрод, соединяющий фотодиод истоком передающего транзистора (V1), 4 – затвор восстановления плавающего узла (V3), 5 - затвор восстановления фотодиода , 6 – затвор переноса транзистора V1

Учет размеров по третьей координате Y необходим в данной ячейке для областей ПУ и ФД, так как их ёмкости в первую очередь влияют на накопление зарядового пакета и преобразование его в напряжение.

**Первый вариант модели.** На первом шаге формируется составное сечение согласно приему 1. Оно будет состоять из двух взаимно перпендикулярных сечений: сечения фотодиода и сечения транзисторов восстановления, истока передающего транзистора V1, V4 и плавающего узла, рис. 5. Точка пересечения сечений – это контакт к

области V4, связанной с фотодиодом. Так как фотодиод с активными элементами ячейки связан металлической перемычкой через диффузионную область транзистора V4, то можно развернуть плоскость сечения фотодиода и металлическую перемычку в одну плоскость с активными элементами ячейки, соединив их с ПУ еще одной металлической перемычкой, проходящей в другом слое металлизации, как показано на рис. 6.

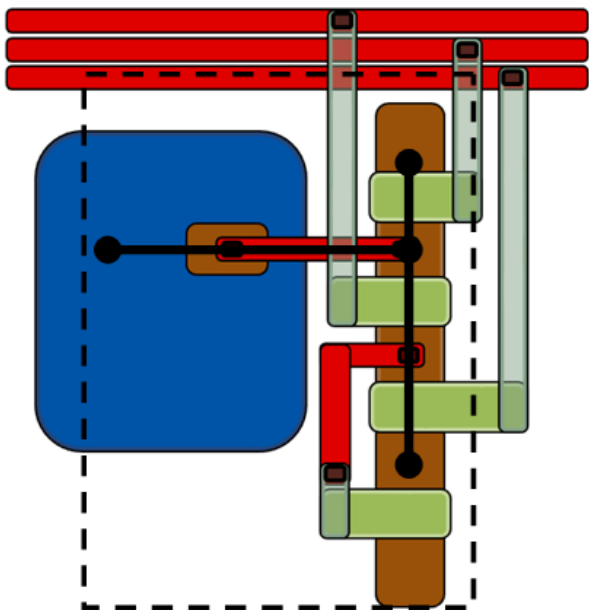


Рис. 5. Сечения на топологии ячейки (черные линии)

Затем применяется прием 2: длина области ФД по горизонтальной оси X, согласно простой пропорции площадей ФД и ПУ, устанавливается равной:

$$L_{x\text{ФД\_new}} = L_{x\text{ФД}} \cdot (L_z\text{ФД} / L_z\text{ПУ}) \quad (\text{мкм})$$

Третий прием для данного варианта модели структуры не применяется. Такая модель является весьма простой, так как не требует подключения к структуре дополнительных емкостных элементов. Однако, для областей с большими размерами по координате Z, (перпендикулярной вертикальной плоскости сечения структуры), происходит значительное увеличение размера новой структуры и, соответственно, количества узлов сетки. При этом становится сложным оперативное изменение ёмкостей ПУ и ФД, так как это требует редактирования всей структуры.

**Второй вариант модели.** В данной модели к областям плавающего узла и фотодиода подсоединяются дополнительные металлические затворы. Эти затворы образуют параллельно соединенные с областями ПУ и ФД МОП-конденсаторы. С помощью данных конденсаторов задаются емкости ПУ и ФД, соответствующие их реальным емкостям в структуре пиксела, которые, как было отмечено, определяются их размерами в плоскости топологии.

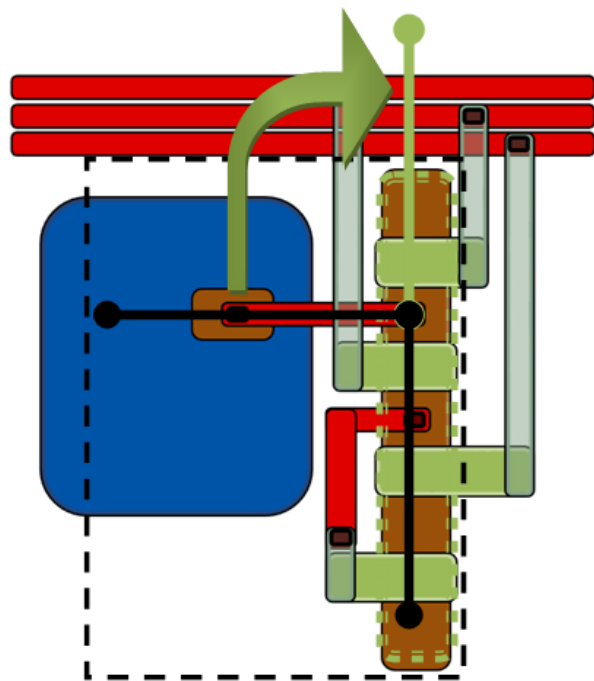


Рис. 6. Формирование составного сечения модели структуры (зеленая стрелка)

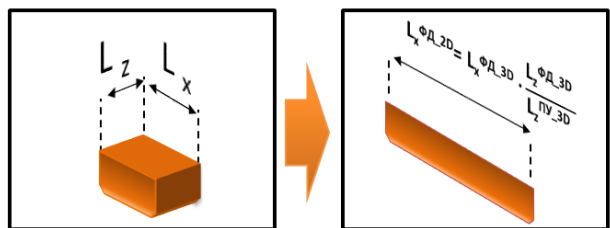
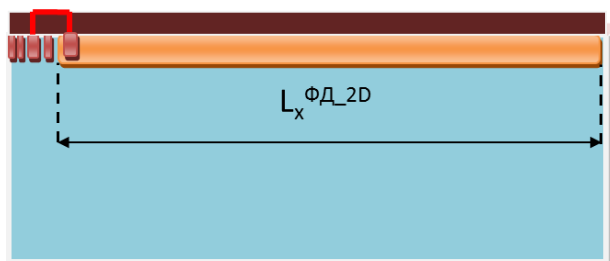


Рис. 7. Вариант модели №1

Такая структура предпочтительнее первой, так как размеры фотодиода по координате X не меняются. Для реализации дополнительной ёмкости для ПУ и ФД дополнительно создаются два МОП конденсатора. Они выполняются в виде высоколегированных областей в подложке за пределами активной области, тонкого (около 5нм) окисла и двух металлических затворов, подсоединенных к областям ПУ и ФД. «Регулировать» ёмкость такой структуры не сложно путем изменения размеров МОП-конденсатора.

Данный вариант структуры представлен на рис. 8.

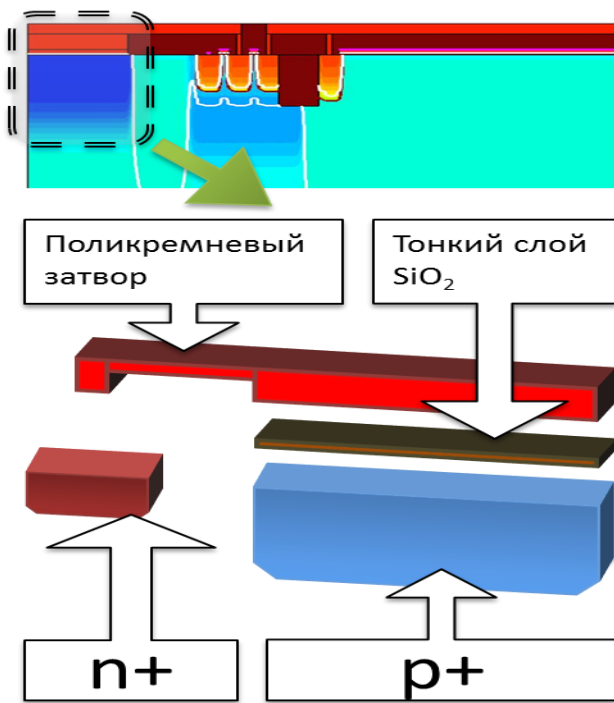


Рис. 8. Второй вариант структуры КМОП-ФД ячейки с фотозатвором

**Третий вариант модели.** К областям ПУ и ФД подключены слои металла, но в отличие от второго варианта, они не выполнены в виде МОП-конденсаторов. Эти слои «подвешены в воздухе», и сверху, через тонкий слой окисла (доли нанометра) к каждому из них подсоединены металлические контакты. К этим контактам, в свою очередь, подключаются конденсаторы как элементы внешней цепи, рис. 9.

### III. СРАВНЕНИЕ ТРЕХ МОДЕЛЕЙ

В модели №1, не имеющей дополнительных емкостей, процесс изменения величины емкости узла предполагает изменение размеров структуры прибора, что требует «ручной» подготовки данных и проведения технологического моделирования. Второй вариант модели с этой точки зрения гораздо экономичнее по трудозатратам, но МОП-конденсаторы, подключенные к узлам ПУ и Т4, могут быть изменены только через редактирование файла структуры. Главным преимуществом второй модели является отсутствие повторного технологического моделирования. Однако, дополнительно введенные p+ области делают модель структуры ячейки также большой по размерам, что увеличивает время электрофизического моделирования.

Третий вариант модели лишен недостатков первого и второго вариантов. Технологическое моделирование и создание модели структуры проводятся один раз и более в процессе моделирования не редактируются. Величины «внешних» емкостей являются

параметрами, задаваемыми в файле исходных данных для электрофизического моделирования.



Рис. 9. Третий вариант структуры ячейки с внешними конденсаторами

Проведено сравнение общих временных затрат при работе с тремя вариантами моделей, таблица 1. Как видно из результатов, третий вариант модели для данной конструкции ячейки имеет значительное преимущество.

Таблица 1

*Временные затраты на расчет электрофизических параметров для трех моделей*

|   | Вариант т 1    | Вариант т 2    | Вариант 3        |
|---|----------------|----------------|------------------|
| Время, требуемое для изменения емкости элемента структуры | Более 30 минут | Около 10 минут | Несколько секунд |
| Время расчета электрофизических параметров (минут)        | Более 60       | Около 40       | Около 20         |
| Размер модели по оси X (мкм)                              | 923            | 110            | 90               |

Таким образом, для практического применения был выбран третий вариант метода построения модели КМОП-ФД ячейки.

#### IV. РАСЧЕТ СВЕТ-СИГНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КМОП-ФД ЯЧЕЕК

Свет-сигнальная характеристика (ССХ) – это зависимость выходного сигнала КМОП-ФД ячейки, выраженного в вольтах, от удельной мощности потока входного излучения, выраженной в Вт/см<sup>2</sup>, либо люксах. С помощью ССХ определяется важный параметр качества ячейки – динамический диапазон (ДД) ее выходного сигнала:

$$ДД = 20 \times \log \left( \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \right), \quad (1)$$

где  $U_{\max}$  – максимальный выходной сигнал ячейки, вольт,  $U_{\min}$  – минимальный выходной сигнал ячейки, вольт. Величины  $U_{\max}$  и  $U_{\min}$  определяются из свет-сигнальной характеристики.

Одной из основных задач проектирования является максимизация ДД ячейки при заданных ограничениях на параметры техпроцесса и топологические размеры.

Вид ССХ зависит как от величины емкости ФД, определяющей фоточувствительность ячейки, так и от соотношения емкостей ПУ и ФД, определяющего коэффициент преобразования «фотогенерированный заряд – выходное напряжение».

Для определения возможностей модели проведено исследование изменения формы ССХ при изменении величин внешних емкостей ПУ и ФД. На рис. 10 показано семейство ССХ для различных величин емкости ФД, а на рис. 11 – аналогичное семейство для различных емкостей ПУ. Видно, что в моделируемой конструкции ячейки ССХ более чувствительна к изменению емкости области ПУ: Емкость ПУ меньше емкости ФД, поэтому относительно небольшое изменение емкости ПУ ведет к ощутимому изменению величины выходного сигнала в области насыщения свет-сигнальной характеристики.

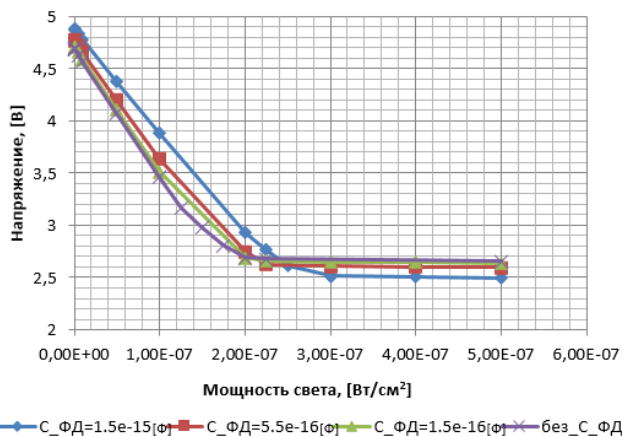


Рис. 10. Семейство ССХ для различных емкостей ФД

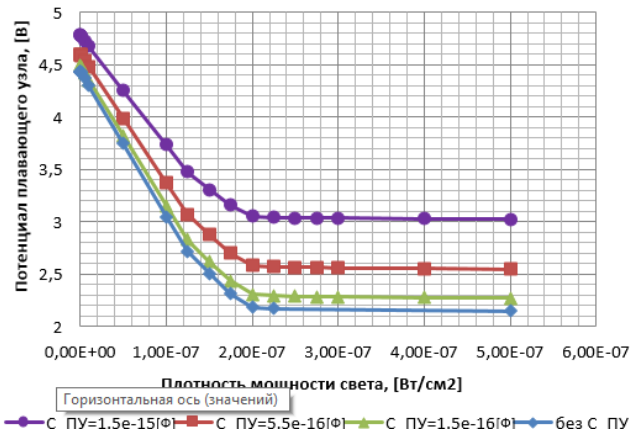


Рис. 11. Семейство ССХ для различных емкостей ПУ

На рис. 12 показана потенциальная диаграмма управляющих импульсов ячейки, а на рис. 13 - 15 – распределения потенциала в ячейке в контрольных точках управляющей диаграммы, по которым были построены ССХ.



Рис. 12. Потенциальная диаграмма управляющих импульсов

Далее было проведено моделирование одного из вариантов ячейки КМОП-ФД СБИС, разработанной в рамках ОКР на предприятии ОАО «НПП «Пульсар». Величины корректирующих емкостей были рассчитаны исходя из реальной топологии ячейки, параметры подзатворных диэлектриков взяты из результатов технологического моделирования ячейки в среде TCAD. На рис. 16 показана ССХ оптимизированной ячейки. Ее динамический диапазон после оптимизации может составить 60 дБ.

Моделирование ССХ дает максимальную величину выходного сигнала (с учетом коэффициента преобразования внутрипиксельного истокового повторителя), равную 1,38 В. По результатам измерений максимальная величина выходного сигнала опытного образца СБИС составила 1.1 В.

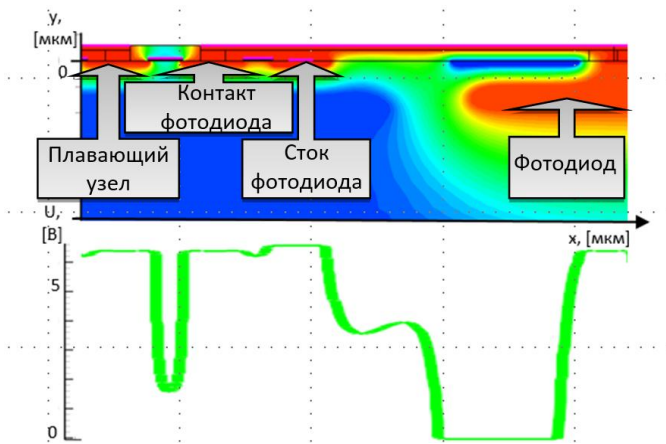


Рис. 13. Распределение потенциала в ячейке во время стадии сброса

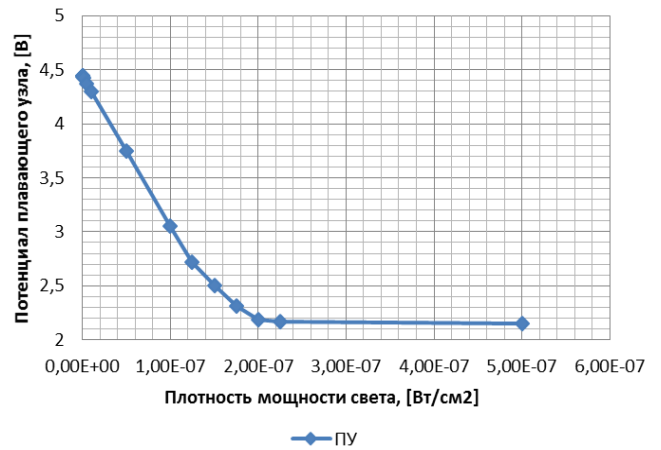


Рис. 16. Распределение потенциала в ячейке в момент времени окончания импульса сброса

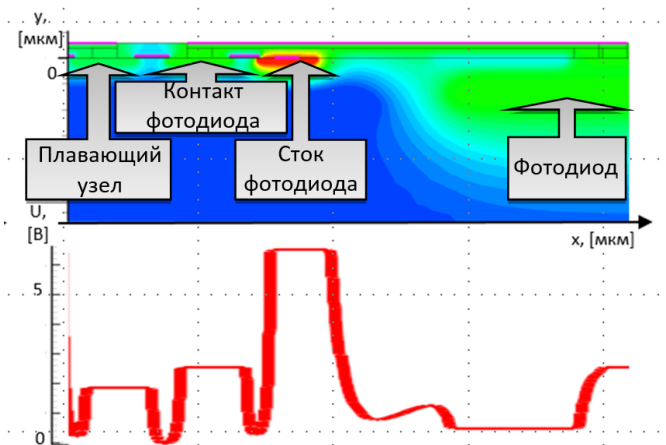


Рис. 14. Распределение потенциала в ячейке в момент времени окончания стадии накопления заряда фотодиодом

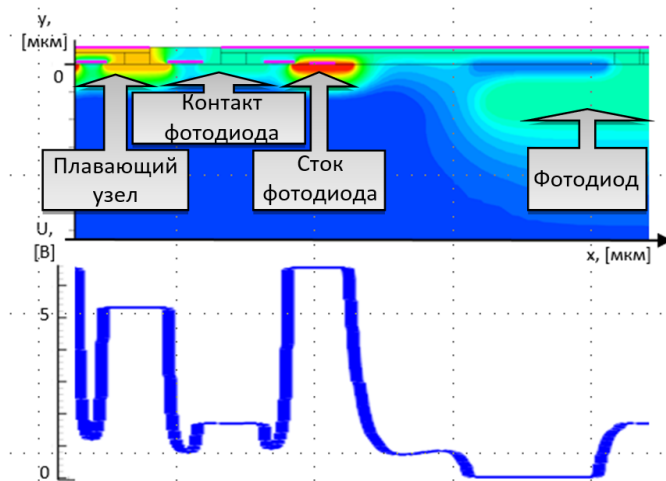


Рис. 15. Распределение потенциала в ячейке в момент времени окончания переноса заряда из ФД в ПУ

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод двумерного приборно-технологического моделирования фотоприемной ячейки КМОП-ФД СБИС в среде Sentaurus TCAD (Synopsys), предназначенный для практического проектирования. Модели КМОП-ФД ячеек, построенные с применением данного метода позволяют в двумерном приближении учесть реальную топологию и объемный профиль примеси ячейки.

В процессе разработки метода были предложены и исследованы три варианта построения модели структуры КМОП-ФД ячейки, отличающиеся способом задания емкостей фотодиода и плавающего узла и определен наилучший по временным затратам вариант.

Отработана методика построения свет-сигнальных характеристик фотоприемной ячейки КМОП-ФД с помощью разработанной модели.

Разработанный метод начал применяться на предприятии ОАО «НПП «Пульсар».

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Стемпковский А.Л., Шилин В.А. КМОП-фотодиодные СБИС-перспективная элементная база однокристалльных систем приема и обработки изображений // М.: Электроника: НТБ. 2003. С. 16-24.
- [2] Пугачев А.А. Математическое моделирование элементов фоточувствительных СБИС // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2005. Сборник трудов / Под общ. ред. академика РАН А.Л.Стемпковского. М.: ИПИМ РАН, 2005. С. 165-172.
- [3] Phanindra K. Device modeling and advanced 2-D TCAD simulation of multifinger photogate APS forenhanced sencitivity // Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of master of applied science. Phanindra Kalyanam, 2011 Simon Fraser University, 2011.
- [4] Simon Li, Fred Y. Fu, Lisa Li, Kentaro U. Practical new approach to 3D TCAD simulation // URL: <http://www.crosslight.com> (дата обращения: 20.05.2015)
- [5] URL: [www.synopsys.com/tools/tcad/](http://www.synopsys.com/tools/tcad/)

# Method for CMOS APS light-voltage characteristics technological-device modeling

A.A. Kononov<sup>1</sup>, A.A. Pugachev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Enterprise Joint Company «PULSAR» Scientific and Production, pugachev@pulsarnpp.ru

<sup>2</sup>Federal State-Funded Institution of Science Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (IPPM RAS)

**Keywords** — CMOS-APS, light-voltage characteristic, technological-device model, TCAD.

## ABSTRACT

In recent years, great effort has been put into the development of CMOS active pixel image sensors (CMOS APS) owing to their many advantages over CCD, such as low cost, low power consumption, system integration and compatibility with the CMOS process.

Because of the topological and impurity distribution surface and volume non-uniformities, the three-dimensional technological-device modeling is needed to optimize CMOS-APS pixel. The active area shape together with the photocarrier diffusion effect determines the overall CMOS APS characteristics [1-3].

In this study, advanced TCAD device simulations were designed to analyze and predict the performance characteristics of CMOS APS.

The method for simulation and optimization involves the use of the computer analysis tool Sentaurus TCAD (Synopsys) [5].

The developed method is based on three techniques.

Technique 1. The two-dimensional region of modeling is the combination of two sections of real three-dimensional structure: the section of photodiode region and the section of floating-node region.

Technique 2. The real dimensions of photodiode and transistors of floating-node region are modeled through correction of pixel transistors and photodiode dimensions in final modeling structure.

Technique 3. The real capacitances of CMOS APS pixel regions are modeled through inserting additional capacitors into final modeling structure.

Testing of various CMOS APS models demonstrates that additional capacitance gives the shortest calculation time and correction convenience for model with additional capacitors.

Simulation of actual CMOS APS pixels demonstrates good usability of the presented method for real-life design process and shows its good agreement with experimental data.

## REFERENCES

- [1] Stempkovskij A.L., Shilin V.A. KMOP-fotodiodnye SBIS-perspektivnaja jelementnaja baza odnokristal'nyh sistem priema i obrabotki izobrazhenij // Moscow, "Elektronika: NTB", 2003, pp. 16-24 (in Russian).
- [2] Pugachev A.A. Matematicheskoe modelirovanie jelementov fotochuvstvitel'nyh SBIS // Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanojelektronnyh sistem 2005. Sbornik trudov Pod obshh. red. akademika RAN A.L.Stempkovskogo. Moscow, IPPM RAN, 2005, pp. 165-172 (in Russian).
- [3] Phanindra K. Device modeling and advanced 2-D TCAD simulation of multifinger photogate APS forenhanced sencitivity // Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of master of applied science. Phanindra Kalyanam, 2011 Simon Fraser University, 2011.
- [4] Simon Li, Fred Y. Fu, Lisa Li, Kentaro U. Practical new approach to 3D TCAD simulation // URL: <http://www.crosslight.com> (accessed: 20.05.2015)
- [5] URL:[www.synopsys.com/tools/tcad/](http://www.synopsys.com/tools/tcad/)