

КМОП-фотоприемный элемент с высокой эффективностью сбора фотогенерированных носителей заряда

А.А. Пугачёв¹, А.Л. Стемповский²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное предприятие «Пульсар», pugachev@pulsarnpp.ru

²Учреждение Российской академии наук Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

Аннотация — Предлагается структура КМОП-фотоприемного элемента, обеспечивающая высокую эффективность сбора фотогенерированных носителей заряда. Специальные эпитаксиальные слои позволяют создать внутренние электрические поля, направляющие электроны к области фотодиода элемента. С помощью приборно-технологического моделирования произведена оценка конструктивно-технологических параметров элемента.

Ключевые слова — КМОП фотоприемник, структура элемента, двумерное моделирование, фактор заполнения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Основным фактором, определяющим фоточувствительность фотоприемного элемента (ФПЭ), является эффективность сбора носителей заряда, генерированных входным оптическим излучением в объеме полупроводника, в те области фотоприемного элемента, где данные носители сохраняются требуемое время и затем выводятся для преобразования в выходной электрический сигнал. Традиционно, этот показатель оценивается с помощью параметра, называемого «фактор заполнения» – Fill Factor (FF). За FF принято отношение площади фоточувствительного элемента (ФЧЭ) - фотодиода или фотозатвора - к общей площади фотоприемного элемента (пиксела). При уменьшении проектных норм удается создавать ФПЭ с высокими FF за счет уменьшения площадей управляющих транзисторов. Очевидно, что «подключение» к ФЧЭ областей фотоприемного элемента, лежащих вне области топологии ФЧЭ, может значительно повысить фактор заполнения и, соответственно, фоточувствительность. Более информативным является выражение фактора заполнения как отношения объемов: суммы объемов ФЧЭ и прилегающих к нему областей (может быть названа как «активная» область фотоприемного элемента), из которых ВСЕ фотогенерированные носители с вероятностью 100% попадают в фотодиод к общему объему фотоприемного элемента.

В предлагаемом фотоприемном элементе увеличение объема «активной» области достигается путем создания внутренних тянущих электрических полей в специальных обедненных диффузионных областях тела фотодиода, что имеет аналогию с принципом действия приборов с зарядовой связью.

II. СТРУКТУРА ФОТОПРИЕМНОГО ЭЛЕМЕНТА С ДИФфуЗИОННЫМ МЕХАНИЗМОМ СБОРА

«Классическим» решением проблемы повышения FF путем увеличения объема «активной» части ФПЭ можно считать структуру, разработанную компанией Fill Factory [1]. В данной структуре основным физическим механизмом, улучшающим сбор носителей заряда, является диффузия. На рис. 1. приведена копия Fig. 1 из данной работы. Фотодиод обозначен как области n^{++} и n , стрелка указывает возможное направление движения фотогенерированных электронов.

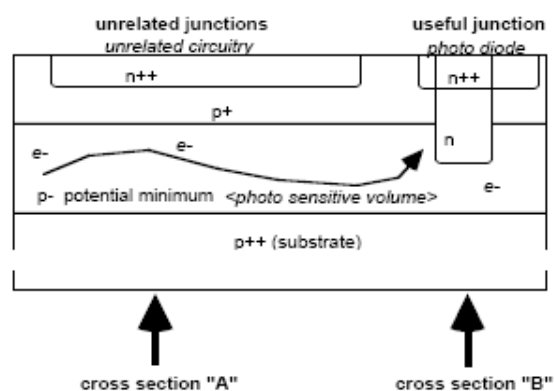


fig. 1: schematic cross section of pixel structure

Рис. 1. Фотоприемный элемент с повышенной эффективностью сбора фотогенерированных носителей заряда компании Fill Factory [1]. Стрелка указывает предполагаемое направление диффузии фотогенерированных электронов

В предлагаемом в [1] элементе увеличение эффективности сбора фотогенерированных носителей заряда из объема полупроводника достигается путем ограничения их диффузионного растекания вглубь подложки и направлению диффузионного потока к области фотодиода. Для этого фотоприемный элемент формируется в виде многослойной полупроводниковой структуры, имеющей внутренние потенциальные барьеры между сильнолегированными слоями p^{++} подложки и p^{+} -слоя за счет наличия промежуточного p^{-} -слоя (рис. 1). Данные поля создают в p^{-} -области «желоб» для диффузионных потоков носителей, направляя их в сторону области фотодиода n . При этом сбор части фотогенерированных носителей идет со всей площади фотоприемного элемента, в том числе и под его управляющими транзисторами n^{++} . Очевидно, что эффективность сбора повышается только для носителей, порожденных излучением с глубинами поглощения, близкими к глубине залегания «желоба». В качестве одного из достоинств такой структуры авторы называют улучшение функции передачи модуляции (ФПМ), так диффундирующие носители не растекаются более чем на один - два соседних элемента из-за наличия глубокой n -области. «перехватывающей» носители (рис. 1).

III. СТРУКТУРА ФОТОПРИЕМНОГО ЭЛЕМЕНТА С ПОЛЕВЫМ МЕХАНИЗМОМ СБОРА

В предлагаемом КМОП-фотоприемном элементе (рис. 2) повышение эффективности сбора фотогенерированных носителей заряда обеспечивается за счет внутренних направленных электрических полей [2].

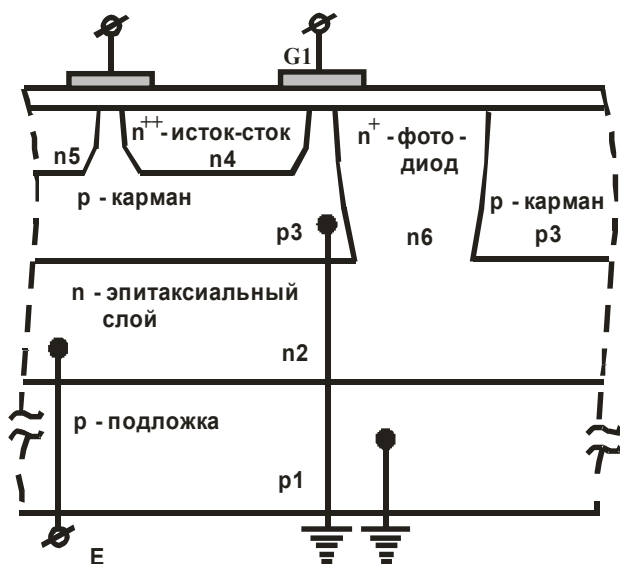


Рис. 2. Структура фотоприемного элемента с объемными электрическими полями

Следует отметить, что направленные объемные электрические поля лежат в основе принципа действия приборов с зарядовой связью (ПЗС). Данные поля обеспечивают в ПЗС, в том числе, сбор электронов, генерируемых коротковолновым видимым излучением у поверхности прибора [3]. В предлагаемом КМОП-фотоприемном элементе электрические поля не выходят на поверхность и повышают чувствительность элемента в средне- и длинноволновых областях спектра видимого принимаемого излучения.

Основу структуры фотоприемного элемента составляют два слоя с разным типом проводимости. На нижнем слое – подложке p -типа $p1$ - выращивается эпитаксиальный слой n -типа $n2$. Данный эпитаксиальный n -слой будет выполнять роль заглубленной части тела фотодиода. В этом слое по всей поверхности формируется p -карман $p3$, в котором располагаются n^{++} -области истоков-стоков управляющих транзисторов пиксела $n4, n5$. В свободной от n^{++} -областей истоков-стоков поверхности p -кармана формируется высоколегированная n^{+} - область $n6$ так, чтобы она сомкнулась с n -эпитаксиальным слоем $n2$. На рис. 2 представлено поперечное сечение КМОП-фотоприемного элемента, проходящее через фотодиод и сток транзистора считывания $G1$. Области p -подложки и p -кармана заземлены. Эпитаксиальный n -слой $n2$ на периферии имеет контакт, подключенный к положительному потенциалу питания E .

Электрические поля в заглубленной области фотодиода $n2$ образуются в том случае, если данный эпитаксиальный слой полностью обеднен. При этом, электрическое поле будет иметь направление, которое способствует сбору фотогенерированных электронов в поверхностную область фотодиода $n6$, при условии, что полностью обедненный слой $n2$ имеет максимальный потенциал обеднения меньший, чем потенциал более высоколегированной области фотодиода $n6$. Таким образом, эпитаксиальный слой $n2$ должен находиться в режиме полного обеднения на всех стадиях работы пиксела.

Согласно приведенному выше описанию структуры элемента, распределение электрического потенциала, обеспечивающее его правильное функционирование, должно отвечать следующим основным условиям.

- i. Эпитаксиальный слой $n2$ полностью обеднен.
- ii. Максимальный потенциал фотодиода $n6$ больше максимального потенциала обедненного эпитаксиального слоя $n2$.
- iii. При любом режиме работа транзистора $G1$ отсутствует объемный ток утечки между областями истоков-стоков $n4, n5 \dots$ транзисторов схемы пиксела через область p -кармана $p3$.

В принципе, условие (i) может быть и более «мягким»: для возникновения объемных областей сбора достаточно смыкание областей пространственного

заряда слоя n_2 и фотодиода с выполнением условия ii. Однако, полное обеднение слоя n_2 гораздо предпочтительнее, так как тянущие поля обеспечивают гарантированное разделение электронов, фотогенерированных в слое n_2 , между соседними элементами.

IV. ОЦЕНКА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТА

Для оценки возможных конструктивно-технологических параметров фотоприемного элемента с полевым механизмом сбора применено двумерное приборно-технологическое моделирование.

Подбор данных параметров для достижения выполнения ограничений (i)-(iii) можно проводить, например, согласно следующему методу.

Считаются заданными:

- концентрация примеси эпитаксиального слоя;
- параметры ионного легирования (доза и энергия) и глубины залегания областей истоков-стоков транзисторов элемента;
- параметры ионного легирования области фотодиода.

Подбираются:

- ширина окна для ионной имплантации фотодиода по условию смыкания области фотодиода и n -эпитаксиального слоя;
- параметры легирования области p -кармана по условию сохранения объемного потенциального барьера между областями истоков-стоков и эпитаксиальным слоем;
- горизонтальный размер фотоприемного элемента по условию полного обеднения эпитаксиального слоя;

При условиях ограничения на фоточувствительность, сначала рассчитывается требуемая площадь фотодиода, а затем производится расчет линейных размеров элемента в целом.

Тем не менее, для обеспечения предполагаемого механизма сбора фотогенерированных носителей должны выполняться, в первую очередь, условия (ii) и (iii).

Условие (iii) является основным условием работоспособности фотоприемного элемента, так как невыполнение условий (i) и (ii) приведет только к снижению его фоточувствительности, но не полной неработоспособности. «Предельным случаем» для условия (iii) является топология элемента, в которой два фотодиода разделены p -карманом минимальной (согласно правилам проектирования) ширины W_{p3} , в котором находится область истока-стока шириной W_{n4} . Ширина области n_4 должна быть максимально допустимой с точки зрения условия формирования транзистора $G1$, образованного областями фотодиода

n_{6-1} и n_{++} -областью n_4 и условия изоляции области n_4 от фотодиода n_{6-2} , рис. 3.

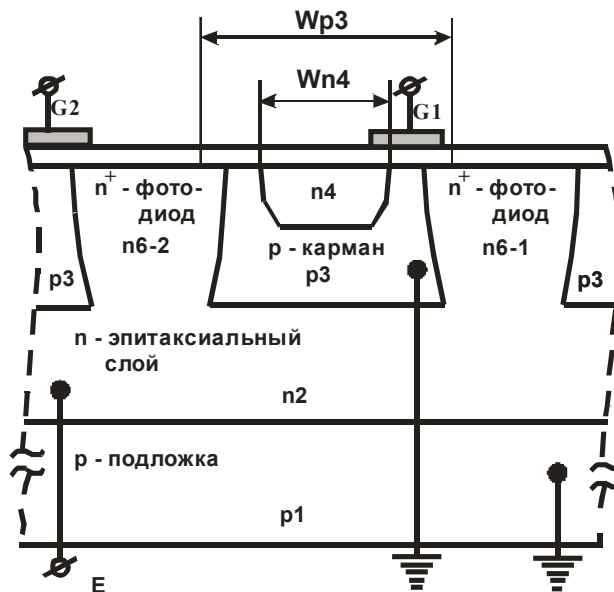


Рис. 3. Структура фотоприемного элемента для определения параметров p -кармана

Ширина области p -кармана W_{p3} определяется как расстояние между краями окон для ионной имплантации фотодиодов.

Результаты приборно-технологического моделирования подтверждают возможность создания фотоприемного элемента предлагаемой конструкции.

При ширине области p -кармана 8 мкм, результирующий размер фотоприемного элемента составит порядка 12×12 мкм. Для указанных размеров элемента рассчитаны значения конструктивно-технологических параметров, при которых происходит полное обеднение n -эпитаксиального слоя:

Ширина p -кармана W_{p3}	- 8,0	мкм
Ширина n_{++} -области n_4	- 4,0	мкм
Глубина залегания n -эпитаксиального слоя (p - n переход n_2 - p_1)	- 3,0	мкм
Концентрация доноров в эпитаксиальном слое	- $8,0 \cdot 10^{13}$	см^{-3}
Глубина залегания p -кармана p_3	- 0,78	мкм
Средняя концентрация акцепторов в p -кармане p_3	- $9,0 \cdot 10^{16}$	см^{-3}
Средняя концентрация доноров в n -фотодиоде n_6	- $4,9 \cdot 10^{17}$	см^{-3}
Глубина залегания n_{++} -области истоков-стоков n_4	- 0,14	мкм
Средняя концентрация доноров в n_{++} -области n_4	- $1,0 \cdot 10^{19}$	см^{-3}

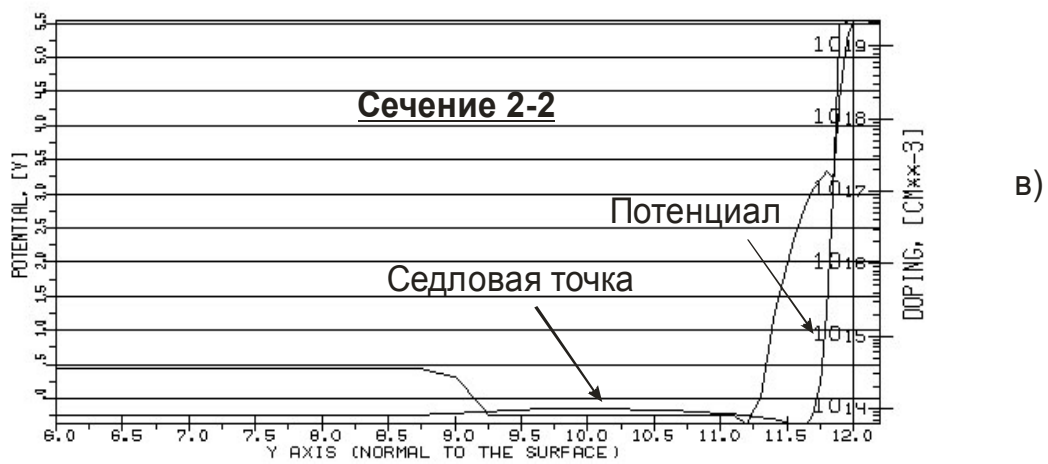
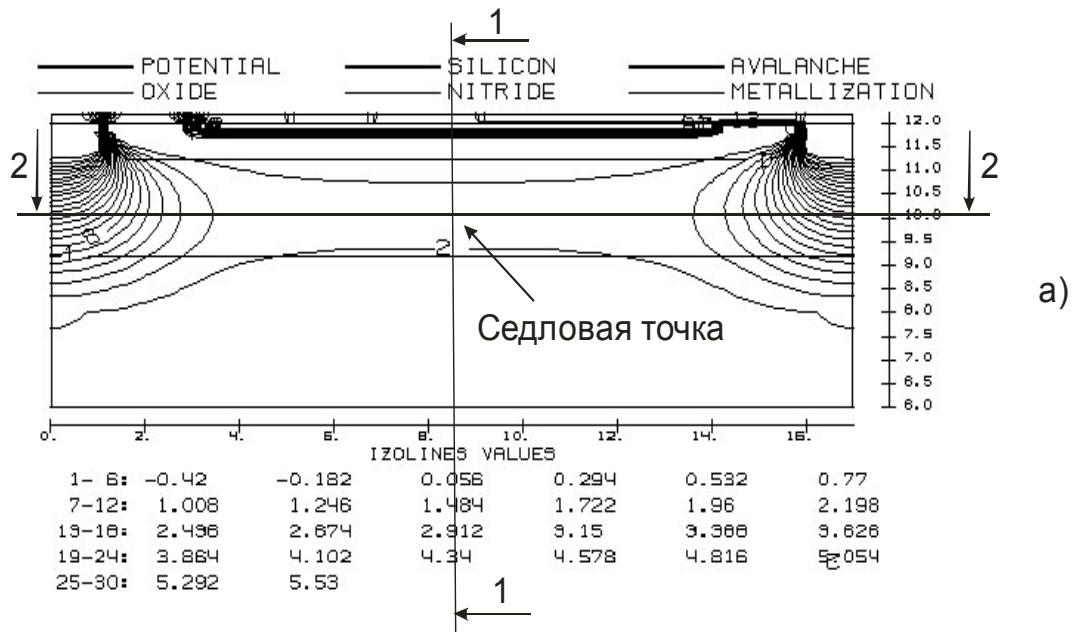


Рис. 4. Распределения потенциала в фотоприемном элементе с объемными тянущими полями. $Wp3 = 15 \text{ мкм}$

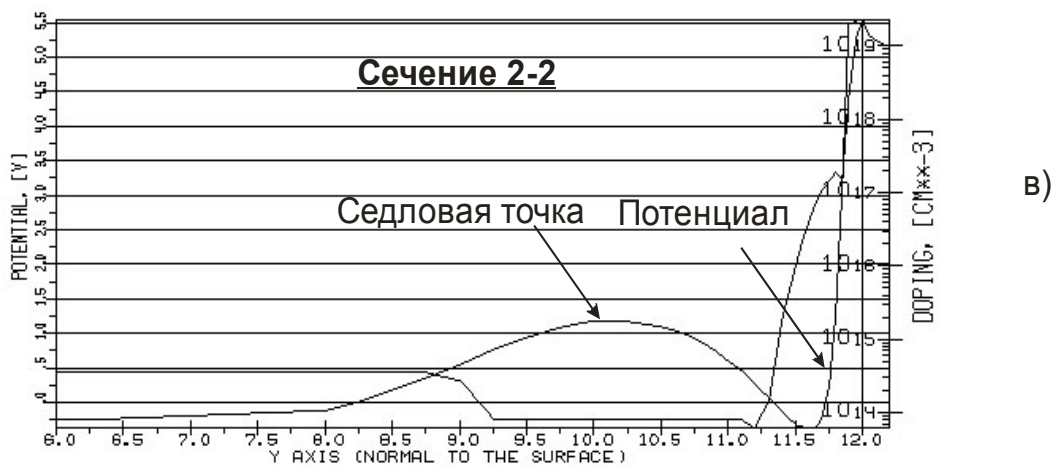
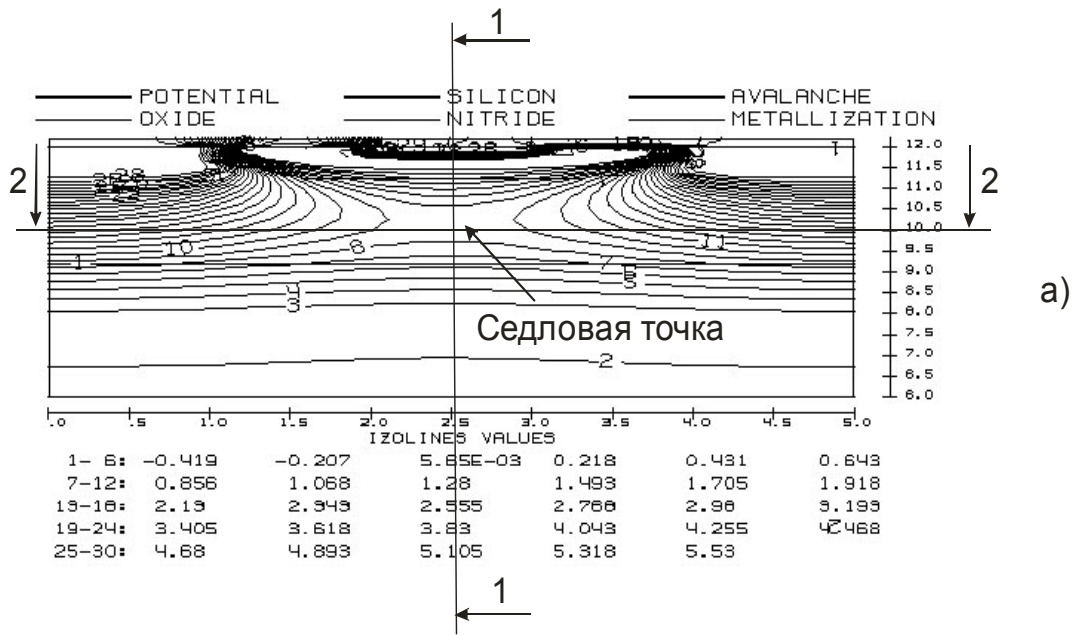


Рис. 4. Распределения потенциала в фотоприемном элементе с объемными тянущими полями. $Wp3 = 3 \text{ мкм}$

Напряжение питания E выбрано равным 5,0 В.

В качестве критерия выполнения условия отсутствия тока утечки из фотодиода в области истоков-стоков (iii), выступает величина потенциального барьера $\Delta\phi_{\text{п}}$, отделяющего полностью обедненный эпитаксиальный слой, от областей истоков-стоков транзисторов. Данный потенциальный барьер аналогичен потенциальному барьеру в ПЗС структуре с вертикальным антиблумингом [4]. Согласно теории данных структур, его величина не менее $10\phi_T$ считается достаточной для изоляции потенциальной ямы фотодиода от областей истоков-стоков.

Произведен расчет зависимости величины данного потенциального барьера от горизонтального размера области р-кармана $Wp3$. Получена следующая зависимость:

$Wp3$, мкм	$\Delta\phi_{\text{п}}$, В
15,0	0,21
8,0	0,26
3,0	1,55

Результаты моделирования иллюстрируются распределениями потенциалов рис. 4 и рис.5. На рис. 4 изображено распределение электрического потенциала в структуре с величиной $Wp3 = 15$ мкм при напряжении на затворе ($G1$) $V_g = 5$ В: а) – двумерное распределение, б) – распределение потенциала параллельно поверхности по линии 1-1; в) – распределение потенциала вглубь структуры по линии 2-2. Видно, что при данной величине $Wp3$ эпитаксиальный слой не является полностью обедненным.

На рис. 5. приведены распределения потенциала в элементе с $Wp3=3$ мкм. Видно, что в распределении потенциала в эпитаксиальном слое имеется характерная седловая точка, которая находится на одинаковом расстоянии от областей фотодиодов. Получено, что положение седловой точки практически не зависит от режима работы транзисторов схемы (в моделируемой структуре транзистор образован правой областью фотодиода и областью истока-стока). Распределение потенциала по линии 2-2 показывает, что в седловой точке минимальный потенциальный барьер в направлении к n^{++} -области n_4 составляет порядка 1,55В, что обеспечивает хорошую изоляцию заглубленной части фотодиода. Видно также, что в данной структуре величины объемных тянущих полей в эпитаксиальном слое уменьшились по сравнению со структурами с $Wp3=15$ мкм и $Wp3=8$ мкм, но при этом возросла величина потенциального барьера в области седловой точки в направлении области истока-стока, а сами поля занимают весь объем фотодиода.

Увеличение тянущих полей при уменьшении размеров фотоприемного элемента является положительным фактором, снижающим так называемые «диффузионные перекрестные помехи» между элементами. При этом разделение носителей соседних

элементов с уменьшением их размеров улучшается, что прямо противоположно ситуации при разделении носителей, перемещающихся путем диффундирования в отсутствие полевого механизма.

Очевидно, что наиболее высокие показатели эффективности сбора фотогенерированных носителей заряда будут иметь элементы, в которых тянущие электрические поля достигают поверхности раздела окисел-кремний. В принципе, данный результат может быть достигнут путем применения для предлагаемых структур техники так называемой «обратной засветки», когда полупроводниковый кристалл имеет толщину порядка 10-20 мкм, а прием излучения осуществляется со стороны, свободной от системы поверхностных покрытий и электродов.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные технические характеристики фоточувствительных интегральных схем определяются характеристиками их фотоприемных элементов. Совершенствование фотоприемных элементов лежит в основе прогресса данного класса микросхем. Основные усилия в области КМОП-фотоприемных СБИС направлены на увеличение объема фоточувствительной области фотоприемного элемента, и предлагаемая конструкция имеет ряд принципиальных достоинств, обусловленных применением внутренних направленных электрических полей для сбора фотогенерированных носителей заряда. В данной конструкции, по сравнению с существующими аналогами, повышена фоточувствительность в диапазоне длин волн от зеленого света до красного и сокращены перекрестные диффузионные помехи.

Предложенная конструкция может служить основой для создания КМОП-фотоприемных элементов с высокой фоточувствительностью.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Derickx B., Meynants G., Scheffer D. Near 100% fill factor CMOS active pixel // Proc. 1997 IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices & Advantage Image Sensors. - 1997. - Brugge, Belgium.
- [2] Пугачёв А.А., Стемковский А.Л. КМОП-фотоприемный элемент с высоким фактором заполнения Патент 2377692 Российская Федерация. Оpubл. 27.12.2009, бюл. № 36.
- [3] Janesick J., Klaasen K.P., Elliot T. Charge-Coupled-Device Charge-Collection Efficiency and the Photon-Transfer Technique // Optical Engineering. - 1987. - Vol. 26. - №10. P. 972-980.
- [4] Van de Steed S., et.al. A frame transfer CCD color image sensor with vertical antiblooming // IEEE transactions on Electron Devices. - 1985. - V. ED-32. - №8. - P. 1430-1438.