

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.382.049.77

Фотоэлектрические процессы в пятидиодной вертикально интегрированной спектрально-селективной фотоячейке

В.И.Хайновский, Е.А.Игнатъева, В.В.Уздовский

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Исследованы распределения электрического потенциала в толще пятидиодной вертикально интегрированной фотоприемной структуры. Получены спектральные характеристики фоточувствительностей в пяти областях различного типа проводимости. Для указанных областей найдены времена фоторелаксации.

Разработка спектрально-зональных матричных фотоприемников высокой степени интеграции на основе вертикально совмещенных диодных структур является в настоящее время актуальной задачей. Данный класс интегральных фотоприемных устройств видимого диапазона необходим для усовершенствования систем приема изображения и улучшения параметров по распознаванию цели. В работах [1, 2] представлены результаты детального анализа конструктивных параметров, управляющих электрических напряжений и фотоэлектрических характеристик фоточувствительной трехдиодной ячейки спектрально-зонального матричного фотоприемника.

Спектрально-зональный матричный фотоприемник фирмы Foveon, основанный на трех вертикально интегрированных $p-n$ -переходах, обладает сравнительно малыми по площади фоточувствительными элементами разложения оптического изображения и достаточно высокой степенью их интеграции на одном кристалле с учетом разложения изображения на три оптических диапазона длин волн (синий, зеленый, красный) [3]. По своим конструктивным параметрам и фотоэлектрическим характеристикам он не уступает и даже превосходит известные спектрально-зональные фотоэлектрические преобразователи изображений на основе приборов с зарядовой связью [4–9].

Расчет распределения электрического потенциала в толще структуры и времени терморелаксации пятидиодной фотоячейки. С целью увеличения селективности разложения белого света на спектральные диапазоны длин волн возможно применение конструкции фотоячейки, включающей в себя пять вертикально соединенных фотодиодов. При этом имеется пять $p-n$ -переходов с расположением их металлургических границ от поверхности на расстояниях: 0,2; 0,7; 1,2; 1,7; 2,5 мкм. Вертикальная структура содержит три n -области, две p -области и p -подложку. К каждой области (и подложке) имеется отдельный металлический контакт, с помощью которого можно выводить соответствующий фотосигнал. Толщины полупроводниковых областей выбраны из соображений выделения пяти отдельных спектральных диапазонов длин волн

оптического излучения. На рис.1 изображена рассматриваемая структура фотоячейки в вертикальном разрезе. Она может быть изготовлена по стандартной КМОП-технологии, включающей в себя ионные имплантации соответствующих легирующих примесей атомов (ионов) фосфора, бора с последующими их «отжигами» для создания последовательно вложенных одна в другую *n*- и *p*-областей. Для создания *p-n*-переходов концентрации соответствующих легирующих примесей увеличиваются

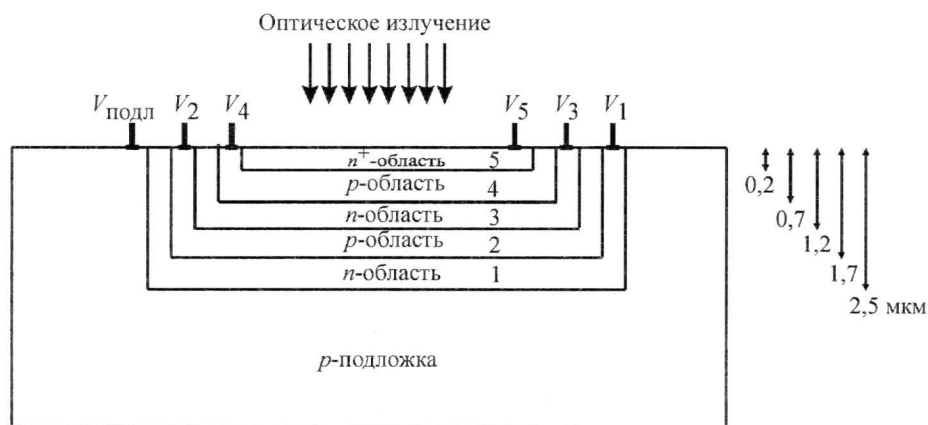


Рис.1. Схематический разрез фоточувствительной ячейки, содержащей пять вертикально интегрированных *p-n*-переходов (V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 – управляющие напряжения)

в 10 раз (для перекомпенсации предыдущей примеси) и равны соответственно: в глубокой *n*-области 1 – $N_d^{(1)} = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, в *p*-области 2 над ней – $N_a^{(2)} = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, в средней *n*-области 3 – $N_d^{(2)} = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, в *p*-области 4 над ней – $N_a^{(4)} = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и приповерхностной *n*-области 5 – $N_d^{(3)} = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Концентрация легирующей примеси в *p*-подложке – $N_a^{(1)} = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. С увеличением концентрации примесей в *n*- и *p*-областях существенно уменьшаются соответствующие ОПЗ *p-n*-переходов и, следовательно, возрастают внутренние электрические поля. Для устранения превышения электрического поля ОПЗ критического значения ($3 \cdot 10^5 \text{ В/см}$) в двух приповерхностных *p-n*-переходах выбраны меньшие концентрации легирующих примесей. Для этого предпоследнюю (к поверхности) *p*-область можно создать травлением предыдущей *n*-области на глубину 0,7 мкм с последующим заполнением вытравленной толщины кремнием *p*-типа методом эпитаксиального наращивания. Приповерхностная *n*-область глубиной 0,2 мкм выполняется традиционным образом ионной имплантацией.

Электронные схемы считывания фотосигналов из каждой *n*- и *p*-области фотоячейки выполняются в прилегающих к ее фоточувствительной части *p*⁺-областях шириной 2 мкм (рис.2). На рисунке дан вид сверху (в плане) на фотоячейку, изображенную в масштабе с топологическими размерами, соответствующими субмикронным размерам фотоячейки с тремя *p-n*-переходами. Каждая схема считывания фотосигнала содержит МОП-транзистор установки соответствующего напряжения обеднения на *n*- или *p*-область, затем усилительный МОП-транзистор и МОП-транзистор, предназначенный для считывания фотосигнала на шину разряда. Схемотехническая организация управления фотоячейкой содержит пять «шин строк» для считывания фотосигналов пяти спектральных диапазонов длин волн и одну «шину разряда».

Распределение электрического потенциала в пятидиодной фотоячейке можно получить аналитическим решением уравнения Пуассона для каждой области пространственного заряда. На рис.3 представлено одномерное распределение электрического потенциала в полупроводниковой толще структуры фотоячейки в соответствии с толщинами слоев согласно рис.1 и выбранными концентрациями легирующих примесей в них. При этом на n - и p -области поданы обедняющие их напряжения: на n -области – $V_1 = V_3 = V_5 = +1,5$ В, а на p -области – $V_2 = V_4 = -1,0$ В. Данные рис.3 получены в результате численного эксперимента на ЭВМ с помощью программы САПР ISE TCAD.

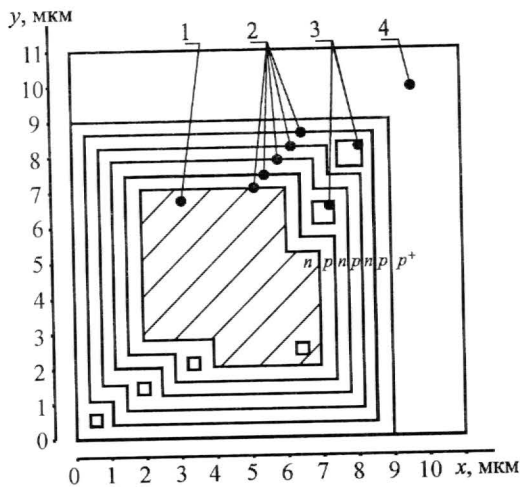


Рис.2. Планарная топология основных конструктивных элементов фотоячейки с пятью фотодиодами: 1 – фоточувствительная поверхность фотоячейки; 2 – металлургические границы p - n -переходов; 3 – контактные окна; 4 – p^+ -область для МДП-транзисторов схем считывания фотосигналов

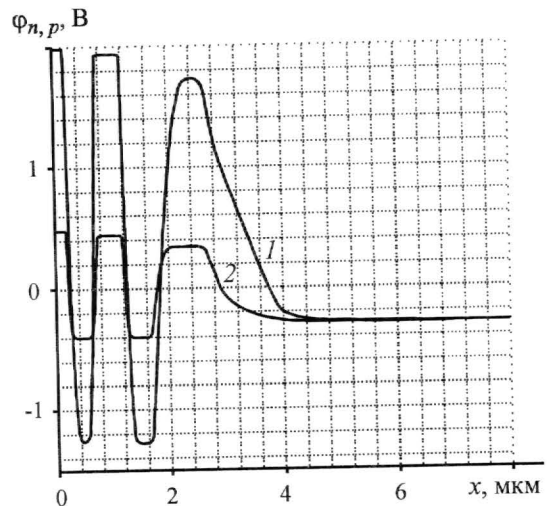


Рис.3. Распределение электрического потенциала в пятидиодной вертикальной фотоячейке: 1 – начальное стационарное обедненное состояние n - и p -областей (управляющие напряжения равны: $V_1 = V_3 = V_5 = +1,5$ В; $V_2 = V_4 = -1,0$ В); 2 – равновесное состояние (соответствующие управляющие напряжения равны: $V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = V_5 = 0$)

По изменению толщин электронейтральных областей и соответствующих концентраций легирующих примесей в них были рассчитаны максимальные величины фотоносителей, собираемых в каждой «потенциальной яме», а именно:

- в глубокой n -области 1 – $\Delta Q_{n1 \text{ фот}} = 2,62 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$;
- в p -области 2 – $\Delta Q_{p1 \text{ фот}} = 8,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$;
- в средней n -области 3 – $\Delta Q_{n2 \text{ фот}} = 18,4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$;
- в средней p -области 4 – $\Delta Q_{p2 \text{ фот}} = 13,85 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$;
- в приповерхностной n -области 5 – $\Delta Q_{n3 \text{ фот}} = 9,64 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Расчет времен терморелаксации n - и p -областей выполнялся по формуле

$$T_{\text{терм}}^{n,p} = \frac{e \cdot \Delta Q_{n,p \text{ фот}}}{J_{n,p \text{ терм}}} \quad (1)$$

Значения плотностей термотоксов в рассматриваемых n - и p -областях структуры получены с помощью расчета на ЭВМ и соответственно равны 2,3; 6,4; 4,6; 10,0; 3,3 мкА/см². Поэтому согласно выражению (1) времена терморелаксации n - и

p -областей равны: $T_{\text{терм}}^{n1} = 0,018$ с; $T_{\text{терм}}^{p1} = 0,021$ с; $T_{\text{терм}}^{n2} = 0,063$ с; $T_{\text{терм}}^{p2} = 0,022$ с и $T_{\text{терм}}^{n3} = 0,047$ с. В качестве общего времени терморелаксации всей структуры выберем наименьшее из указанных времен (0,018 с). Тогда время цикла (одного периода) управления фотоячейкой $T_{\text{цикл}} = 0,001 \cdot T_{\text{терм}} = 18$ мкс, а соответствующая частота цикла управления фотоячейкой $f_{\text{цикл}} = \frac{1}{T_{\text{цикл}}} = \frac{1}{18 \text{ мкс}} = 56$ кГц. Полученные величины срав-

нимы с аналогичными для вертикальной трехдиодной фотоячейки [1].

Расчет фотоэлектрических характеристик вертикальной фотоячейки с пятью диодами. При регистрации оптического излучения все пять фотодиодов фотоячейки (под влиянием внешних обедняющих напряжений) работают в фотодиодном режиме. Поэтому для записи уравнений фоторелаксации n - и p -областей структуры воспользуемся схематическим распределением ОПЗ и толщин электронейтральных областей в них согласно рис.4. Тогда получим следующие уравнения фоторелаксации:

- в глубокой n -области 1:

$$\frac{dQ_n^{(1)}}{dt} = B \cdot \exp\left(-\int_{x_p^{(1)}}^L \alpha(x) dx\right) \left[1 - \exp\left(-\int_{-w}^{x_p^{(1)}} \alpha(x) dx\right)\right]; \quad (2)$$

- в глубокой p -области 1:

$$\frac{dQ_p^{(1)}}{dt} = B \cdot \exp\left(-\int_{x_n^{(2)}}^L \alpha(x) dx\right) \left[1 - \exp\left(-\int_{\tilde{x}_n^{(1)}}^{x_n^{(2)}} \alpha(x) dx\right)\right]; \quad (3)$$

- в средней n -области 2:

$$\frac{dQ_n^{(2)}}{dt} = B \cdot \exp\left(-\int_{x_p^{(2)}}^L \alpha(x) dx\right) \left[1 - \exp\left(-\int_{\tilde{x}_p^{(1)}}^{x_p^{(2)}} \alpha(x) dx\right)\right]; \quad (4)$$

- в средней p -области 2:

$$\frac{dQ_p^{(2)}}{dt} = B \cdot \exp\left(-\int_{x_n^{(3)}}^L \alpha(x) dx\right) \left[1 - \exp\left(-\int_{\tilde{x}_n^{(2)}}^{x_n^{(3)}} \alpha(x) dx\right)\right]; \quad (5)$$

- в приповерхностной n -области 3:

$$\frac{dQ_n^{(3)}}{dt} = B \cdot \left[1 - \exp\left(-\int_{\tilde{x}_p^{(2)}}^L \alpha(x) dx\right)\right], \quad (6)$$

где $B = \frac{P}{E}$; P – освещенность поверхности фотоячейки; $E = \frac{hc}{\lambda}$ – энергия кванта света.

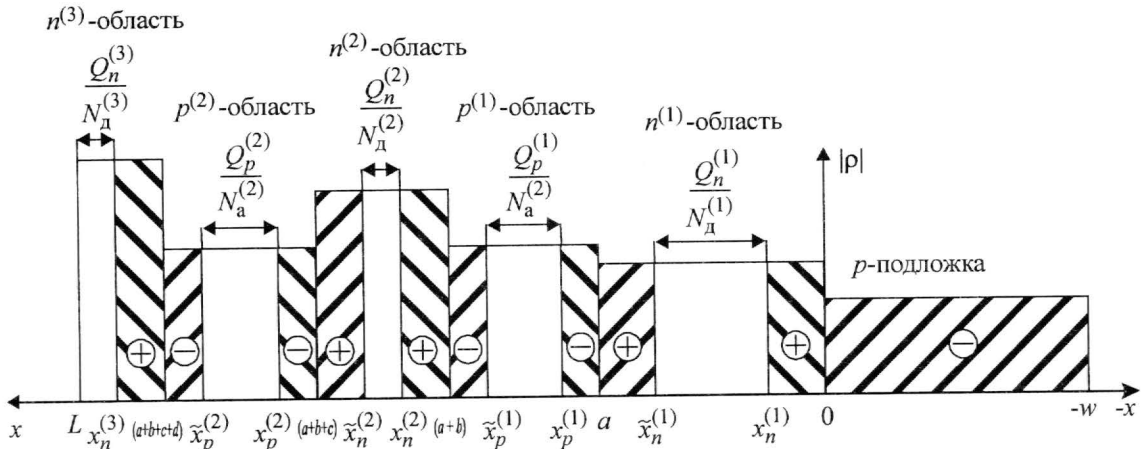


Рис.4. Схематическое распределение объемных зарядов ионизованных легирующих примесей на границах p-n-переходов в стационарном состоянии

В уравнениях (2)–(6) (согласно рис.4) учитываются толщины n - и p -областей, концентрации легирующих примесей в них, а также, что $L = a + b + c + d + l$; $x_n^{(1)} = \alpha \cdot w$;

$$\tilde{x}_n^{(1)} = x_n^{(1)} + \frac{Q_n^{(1)}}{N_d^{(1)}}; \quad x_p^{(1)} = a + \beta \cdot (a - \tilde{x}_n^{(1)}); \quad \tilde{x}_p^{(1)} = x_p^{(1)} + \frac{Q_p^{(1)}}{N_a^{(1)}}; \quad x_n^{(2)} = (a + b) + \gamma \cdot [(a + b) - \tilde{x}_p^{(1)}];$$

$$\tilde{x}_n^{(2)} = x_n^{(2)} + \frac{Q_n^{(2)}}{N_d^{(2)}}; \quad x_p^{(2)} = (a + b + c) + \theta \cdot [(a + b + c) - \tilde{x}_n^{(2)}]; \quad \tilde{x}_p^{(2)} = x_p^{(2)} + \frac{Q_p^{(2)}}{N_a^{(2)}}; \quad x_n^{(3)} =$$

$$= (a + b + c + d) + \eta \cdot [(a + b + c + d) - \tilde{x}_p^{(2)}]; \quad \tilde{x}_n^{(3)} = a + b + c + d + l = L \quad \text{— общая толщина}$$

структуры; $\tilde{x}_n^{(3)} = x_n^{(3)} + \frac{Q_n^{(3)}}{N_d^{(3)}}$. Причем $\alpha = \frac{N_{\text{подл}}^{(1)}}{N_d^{(1)}}$; $\beta = \frac{N_d^{(1)}}{N_a^{(1)}}$; $\gamma = \frac{N_a^{(1)}}{N_d^{(2)}}$; $\theta = \frac{N_d^{(2)}}{N_a^{(2)}}$; $\eta = \frac{N_a^{(2)}}{N_d^{(3)}}$.

Численное решение системы уравнений (2)–(6) дает зависимости во времени поверхностных концентраций фотоносителей в n - и p -областях, которые имеют линейный характер до полного заполнения «потенциальных ям» этих областей. Также численно рассчитаны значения фототоков, считываемых из рассматриваемых n - и p -областей в рабочем режиме в случае освещения фоточувствительной поверхности фотоячейки ($4,5 \times 4,5$ мкм) световым потоком, создающим освещенность $P = 3$ Вт/см² в течение времени освещения $\tau_{\text{фот}} = 30$ нс в диапазоне длины волн 0,4–1,0 мкм. На основании этих данных построены спектральные характеристики фоточувствительности каждой n -области структуры рассматриваемой фотоячейки, которые представлены на рис.5,а. Эти зависимости показывают, что максимумы спектральных фоточувствительностей n -областей соответствуют следующим длинам волн: для приповерхностной n -области 5 – $\lambda_{\text{max}} = 0,4$ мкм, для средней n -области 3 – $\lambda_{\text{max}} = 0,52 - 0,55$ мкм, для глубокой n -области 1 – $\lambda_{\text{max}} = 0,68 - 0,72$ мкм. Сравнение со спектральными характеристиками фоточувствительностей n - и p -областей трехдиодной фотоячейки [1, 2] показывает, что предложенная фотоячейка с пятью вертикально интегрированными фотодиодами проявляет большую селективность в разделении оптического диапазона длин волн на три спектральные области: синюю, зеленую и красную. Кроме того, наличие еще двух дополнительных фотосигналов, считываемых из двух p -областей дает еще два дополни-

тельных спектральных диапазонов с максимумами, соответствующими длинам волн: $\lambda_{\max} = 0,46$ мкм и $\lambda_{\max} = 0,6$ мкм (рис.5,б). Указанные особенности пятидиодной фотоячейки расширяют ее применение в качестве спектрально-зонального фотоприемника для систем технического зрения.

Расчет максимально допустимых времен фоторелаксации (накопления фотозарядов) выполнен с помощью выражения:

$$\tau_{\text{фот max}} = \frac{e \cdot \Delta Q_{n,p \text{ фот}} \cdot S_{\text{яч. фот}}}{I_{n,p \text{ фот}}},$$

где $S_{\text{яч. фот}}$ – площадь фотоячейки.

Используя данные по фототокам, полученным в результате численного расчета на ЭВМ, построены зависимости максимальных времен фоторелаксации для каждой n - и p -области пятидиодной фотоячейки, которые представлены на рис.6. Наименьшие значения указанных максимальных времен фоторелаксации наблюдаются в диапазонах длин волн наибольших фоточувствительностей n - и p -областей и составляют 44; 222; 446; 167; 132 нс соответственно для областей $n1$, $p1$, $n2$, $p2$, $n3$. Вне диапазонов максимальных фоточувствительностей времена фоторелаксаций существенно возрастают.

Таким образом, проведенный анализ конструктивных параметров, амплитуд управляющих напряжений, фотоэлектрических характеристик вертикально интегрированной пятидиодной фотоячейки показал возможность создания на ее основе спектрально-зонального фотоэлектрического преобразователя изображений с высокой селективностью выделения пяти оптических диапазонов длин волн. Это делает перспективным его применение в системах технического зрения.

Предложенная вертикально интегрированная фотоячейка с пятью диодами (p - n -переходами) позволила улучшить разделение спектральных характеристик фоточувствительностей по длинам волн и расширить функциональные возможности фотоэлектрических преобразователей изображений. Установлено, что для электрической схемы считывания фотосигналов из каждой n - или p -области необходимо три МОП- n -канальных субмикронных транзистора. При мини-

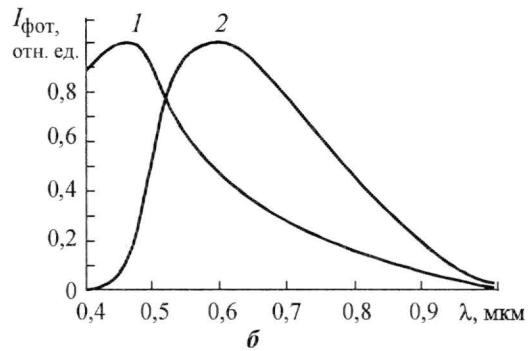
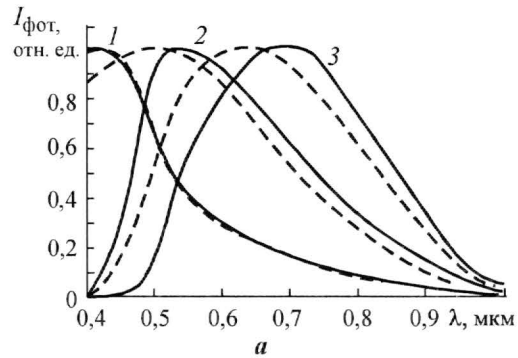


Рис.5. Спектральные характеристики фоточувствительностей пятидиодной фотоячейки: 1 – приповерхностная n -область; 2 – средняя n -область; 3 – глубокая n -область (сплошные линии). Пунктиром указаны спектральные характеристики фоточувствительностей n - и p -областей трехдиодной фотоячейки (а); 1 – средняя p -область; 2 – глубокая p -область (б)

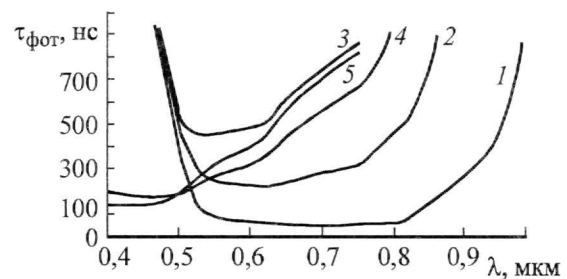


Рис.6. Зависимости максимальных времен фоторелаксации обедненных областей p - n -переходов пятидиодной фотоячейки от длины волны поглощаемого оптического излучения: 1 – глубокая $n1$; 2 – глубокая $p1$; 3 – средняя $n2$; 4 – средняя $p2$; 5 – приповерхностная $n3$ ($P = 3$ Вт/см²)

мальном топологическом размере 0,35 мкм полная площадь фотоячейки равна 11×11 мкм, а коэффициент ее заполнения фоточувствительной частью площадью 5×5 мкм соответствует 21%.

Литература

1. *Игнатъева Е.А., Уздовский В.В., Хайновский В.И.* Расчет конструктивных параметров и электрического потенциала трехдиодной вертикально интегрированной спектрально-селективной фотоячейки // Изв. вузов. Электроника. – 2008. – № 1. – С. 35–42.
2. *Игнатъева Е.А., Уздовский В.В., Хайновский В.И.* Анализ процессов фоторелаксации и фотоэлектрических характеристик трехдиодной вертикально интегрированной спектрально-селективной фотоячейки // Изв. вузов. Электроника. – 2008. – № 3. – С. 38–44.
3. US Pat. № 5,969,875, Int.Cl. G01J 3/50, U.S.Cl. 250/226, Color Separation in an Active Pixel Cell Imaging Array Using a Triple-Well-Structure /*Merrill R.B.* – 12 Oct. – 1999.
4. *Barsan R.* Characteristics of the Overlaid Charge-Coupled Device // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1979. – Vol. ED-26, № 2. – P. 123–131.
5. *Khainovskii V.I., Uzдовskii V.V.* Theoretical and experimental study of photoelectric characteristics of the two-channel bulk charge-coupled device // Optical Engineering. – 1994. – Vol.33, № 7, July. – P. 2352–2356.
6. *Khainovskii V.I., Uzдовskii V.V.* Photoelectrical characteristics of the spectrozonal two-channel bulk charge coupled device // Proc. 40th Int. Symp. Opt. Eng. Inst. (San Diego, California, USA, 13-14 July, 1995) Vol. 2551. – 1995. – P. 189–196.
7. *Khainovskii V.I., Uzдовskii V.V.* Numerical simulation of photoelectrical characteristics of the spectrozonal three-channel bulk charge coupled device // Optical Engineering. – 1997. – Vol.36, June. – P. 1678–1684.
8. *Хайновский В.И., Уздовский В.В., Гордо Н.М.* Многофункциональные спектрозональные фоточувствительные объемные приборы с зарядовой связью // Изв. вузов. Электроника. – 1999. – № 3. – С. 45–51.
9. *Хайновский В.И., Уздовский В.В., Гордо Н.М., Федоров Р.А.* Моделирование процессов фоторелаксации в многоканальных объемных фоточувствительных приборах с зарядовой связью // Изв. вузов. Электроника. – 2000. – № 1. – С. 28–35.

Статья поступила
13 сентября 2007 г.

Хайновский Владимир Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Ставропольского государственного университета. *Область научных интересов:* физика полупроводников, структуры металл–диэлектрик–полупроводник, приборы с зарядовой связью.

Игнатъева Елена Александровна – аспирант кафедры общей физики МИЭТ. *Область научных интересов:* физика полупроводников, моделирование фотоэлектрических процессов в фотоприемных структурах.

Уздовский Валерий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики МИЭТ. *Область научных интересов:* физика полупроводников, фотоэлектрические процессы в объемных каналах фотоприемников.