

Фотоэлектрические характеристики многоэлементных ИК фотоприемных устройств при регистрации точечных источников излучения

В. Г. Половинкин, В. А. Стучинский, А. В. Вишняков, И. И. Ли

Представлены результаты расчетов фотоэлектрических характеристик многоэлементных ИК ФПУ для точечных источников изображения. Анализ основан на моделировании диффузии фотогенерированных носителей заряда в фотодиодных матрицах на эпитаксиальных слоях кадмий-ртуть-теллур методом Монте-Карло. При расчетах учтены основные фотоэлектрические и конструктивные параметры фоточувствительных элементов и оптической системы. Полученные результаты позволяют сформулировать требования к конструктивным и фотоэлектрическим параметрам фоточувствительных элементов ФПУ, обеспечивающих достижение оптимальной величин чувствительности и пространственного разрешения в условиях однородной освещенности матрицы и ее засветки оптическим пятном от точечного источника излучения.

Ключевые слова: ИК ФПУ, фотодиод, кадмий-ртуть-теллур, локальная квантовая эффективность, точечный источник, пороговая чувствительность, пространственное разрешение.

Ссылка: Половинкин В. Г., Стучинский В. А., Вишняков А. В., Ли И. И. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 5. С. 422.

Reference: V. G. Polovinkin, V. A. Stuchinsky, A. V. Vishnykov, and I. I. Lee, Usp. Prikl. Fiz. **6** (5), 422 (2018).

Введение

Наряду с формированием тепловизионного изображения протяженных объектов, в ИК-области спектра актуальной является задача обнаружения точечных источников излучения [1, 2]. Необходимость анализа фотоэлектрических характеристик фоточувствительных элементов многоэлементных ИК ФПУ подтверждается экспериментальными исследованиями, в которых показано существенное отличие фотоэлектрических характеристик фоточувствительных элементов в условиях однородной и локальной засветок [3].

В работе представлены расчетные зависимости уровней сигналов и пороговой чувствительности многоэлементных ИК ФПУ в условиях однородной засветки и для точечных источников излучения с учетом основных фотоэлектрических параметров материала фоточувствительной пленки (длина диффузии носителей заряда, длина оптического поглощения) и конструктивных параметров ФПУ (размер фоточувствительного элемента, заглубление и диаметр p - n -переходов, толщина фоточувствительного слоя (ФС)) а также характеристик оптической системы оптоэлектронного устройства (диаметра пятна от точечного источника).

Показано, что при анализе сигналов от точечных источников необходимо учитывать пространственное распределение квантовой эффективности фоточувствительных элементов ФПУ (ФЧЭ) по площади матрицы. Пространственное распределение квантовой эффективности по площади ФЧЭ получено посредством моделирования методом Монте-Карло процесса диффузии фотогенерированных носителей в ФС [4–7].

Оптические характеристики точечных источников изображения

Предполагаем, что пятно рассеяния от точечного источника в фокальной плоскости ИК ФПУ

Половинкин Владимир Григорьевич^{1,2}, с.н.с., к.ф.-м.н., доцент.

Стучинский Виктор Андреевич¹, н.с., к.ф.-м.н.

Вишняков Алексей Витальевич¹, н.с. к.ф.-м.н.

Ли Ирлам Игнатьевич¹, в.н.с., д.т.н.

¹ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова. Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13. Тел.: 8(383) 330-77-81, 8(913) 715-72-19.

E-mail: irlamlee@isp.nsc.ru

² Новосибирский государственный технический университет. Россия, 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

Статья поступила в редакцию 26 июля 2018 г.

© Половинкин В. Г., Стучинский В. А., Вишняков А. В., Ли И. И., 2018

есть результат дифракции Фраунгофера на круглом отверстии. В этом случае распределение интенсивности излучения в пятне описывается известной формулой Эйри [8]:

$$I(r) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{J_1(r)}{r} \right)^2. \quad (1)$$

Здесь $J_1(r)$ – функция Бесселя первого рода, r – нормированный радиус пятна. Распределение (1) имеет главный максимум в центре ($r = 0$) и с увеличением r осциллирует с уменьшением амплитуды подобно функции $(\sin(x)/x)^2$. В качестве характеристики размеров пятна разумно принять диаметр первого темного кольца $d_1 = 2r_1 = 7,664$ ($J_1(r_1) = 0$), внутри которого сконцентрировано ~84 % полной энергии пятна. При заданном диаметре пятна D коэффициент нормировки: $k_D = d_1/D$ [8].

Доля энергии, попадающей на квадрат размером $a \times a$ при положении центра элемента в точке (x, y) относительно центра пятна, рассчитывается численным интегрированием выражения:

$$Ia(x, y, a) = \int_{k_07(x-a/2)}^{k_07(x+a/2)} du \int_{k_07(y-a/2)}^{k_07(y+a/2)} dv I(\sqrt{u^2 + v^2}). \quad (3)$$

Положение светового пятна относительно ФЧЭ для регулярного прямоугольного массива $N \times M$ идентичных элементов поясняется на рис. 1.

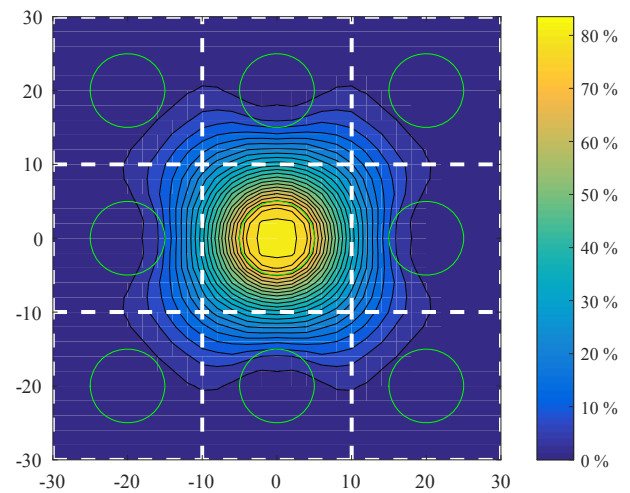


Рис. 1. Пример пространственного распределения квантовой эффективности фоточувствительного элемента.

Доля энергии в оптическом пятне, попадающая на ФЧЭ, определяется соотношением диаметра оптического пятна, геометрическими размерами фоточувствительного элемента, а также положением центра пятна относительно центра фоточувствительного элемента.

В таблицах 1, 2 приведены величины долей энергий в процентах от полной энергии в пятне при различных положениях центра точечного источника диаметром 20 и 30 мкм соответственно. Минимальный уровень зарегистрированных сигналов будет в точке при котором оптический сигнал делится между четырьмя соседними фоточувствительными элементами.

Таблица 1

Доля энергии (% от полной энергии в пятне) при различных положениях центра точечного источника диаметром 20 мкм

| Шаг, мкм | В центре пикселя | Между двумя пикселями | Между четырьмя пикселями | В центре соседнего пикселя | В центре диагонального пикселя |
|----------|------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 16 | 83,17(1,0) | 43,13(0,518) | 22,74 (0,273) | 1,89 (0,022) | 0,79 (0,0095) |
| 20 | 84,45 (1,0) | 43,89 (0,520) | 23,08 (0,273) | 2,07 (0,024) | 0,58 (0,0069) |
| 25 | 87,51 (1,0) | 45,15 (0,516) | 23,52 (0,269) | 1,64 (0,019) | 0,49 (0,0056) |
| 30 | 90,38 (1,0) | 46,15 (0,511) | 23,76 (0,263) | 1,17 (0,013) | 0,39 (0,0043) |

В скобках приведены значения доли энергии, нормированные на энергию в пятне при положении центра точечного источника в центре пикселя.

Таблица 2

Доля энергии (% от полной энергии в пятне) при различных положениях центра точечного источника диаметром 30 мкм

| Шаг, мкм | В центре пикселя | Между двумя пикселями (точка 1 на рис. 1) | Между четырьмя пикселями (точка 2 на рис. 1) | В центре соседнего пикселя | В центре диагонального пикселя |
|----------|------------------|---|--|----------------------------|--------------------------------|
| 16 | 69,58 (1,0) | 38,31 (0,550) | 21,26 (0,305) | 4,36 (0,0626) | 0,98 (0,014) |
| 20 | 79,62 (1,0) | 41,51 (0,521) | 22,17 (0,278) | 2,25 (0,0283) | 0,92 (0,0115) |
| 25 | 83,50 (1,0) | 43,31 (0,518) | 22,80 (0,273) | 1,91 (0,0228) | 0,74 (0,0088) |
| 30 | 84,45 (1,0) | 43,89 (0,520) | 23,08 (0,273) | 2,07 (0,0245) | 0,58 (0,0068) |

В скобках приведены значения доли энергии, в скобках нормированные на долю энергии в пятне при положении центра точечного источника в центре пикселя.

Оценки квантовой эффективности ФЧЭ в условиях однородной и локальной засветок оптическим пятном точечного источника излучения

Для прогнозирования пороговой чувствительности ИК ФПУ для точечных источников, дополнительно к оптическим характеристикам пятна от точечных источников, необходимо учитывать пространственное распределение квантовой эффективности ФЧЭ. Расчеты квантовой эффективности были проведены в рамках диффузионной модели методом Монте-Карло, описанной нами в работе [7]. На первом этапе проводится расчет пространственного распределения квантовой эффективности ФЧЭ, величина которой определяется как отношение числа носителей заряда, собранных рассматриваемым фотодиодом после их генерации в ФС с координатами (x, y) к полному числу всех частиц, рожденных в этой точке. В приведенных ниже расчетных зависимостях учитываются основные фотоэлектрические (диффузионная длина носителей заряда, длина оптического поглощения) и конструктивные параметры (размер фоточувствительного элемента, глубина и диаметр p - n -перехода, толщина фоточувствительного слоя) ФПУ.

На рис. 1 приведен пример пространственного распределения квантовой эффективности центрального ФЧЭ фрагмента форматом 3×3 элемента при однородном освещении матрицы на основе эпитаксиальных слоев КРТ p -типа со стороны подложки для планарного варианта фотодиодов. Расчет проведен для фоточувствительной ячейки с размером 20×20 мкм², диаметр n -области диода $D_{p-n} = 10$ мкм с заглублением в ФС на 2 мкм, длина диффузии НЗ $L_D = 20$ мкм, толщина ФС – 6 мкм и длина оптического поглощения $L_{оп} = 2$ мкм (без учета отражения на границах слоев). Принятые в этих расчетах конструктивные и фотоэлектрические параметры типичны для ИК ФПУ на ГЭС КРТ МЛЭ [9–13].

Отметим, что область сбора фотоносителей не совпадает с геометрическими размерами фоточувствительного элемента. Часть носителей собирается с соседних фоточувствительных элементов, а часть НЗ, фотогенерированных в пределах цен-

трального элемента, интегрируется соседними элементами.

Уровни фотосигналов при произвольной освещенности фоточувствительных элементов, в том числе оптическим пятном от точечного источника, определяются сверткой с пространственным распределением квантовой эффективности по площади ФЧЭ. При облучении пятном от точечного источника удобно пользоваться термином «уровень сигналов», это доля фотонов, дающих вклад в фототок центрального ФЧЭ, нормированная на количество фотонов в пятне. На рис. 2 показано распределение квантовой эффективности при облучении фотоприемной матрицы оптическим пятном от точечного источника диаметром 20 мкм.

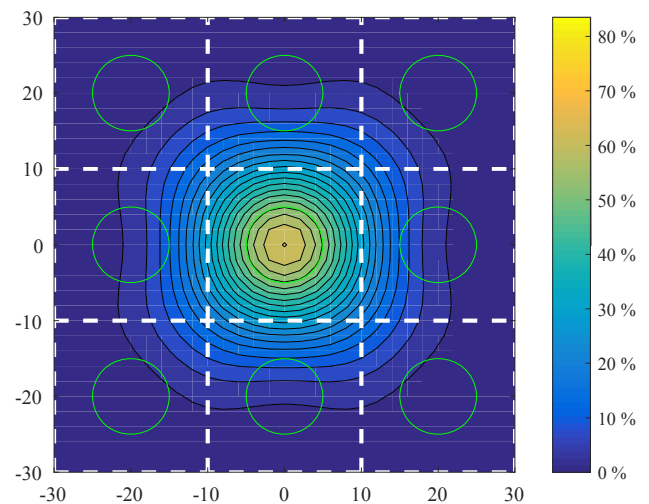


Рис. 2. Пример пространственного распределения уровня фотосигнала центрального элемента при освещении фотодиодной оптическим пятном диаметром 20 мкм.

На рис. 3 приведены зависимости интегральной квантовой эффективности и уровни фотосигналов от толщины ФС при однородной и локальной засветки (здесь центр пятна от точечного источника диаметром 20 мкм совпадает с центром фоточувствительного элемента).

На рис. 4 приведены зависимости, аналогичные зависимостям, приведенным на рис. 4 зависимостям, но для диаметра n -области диода – 16 мкм.

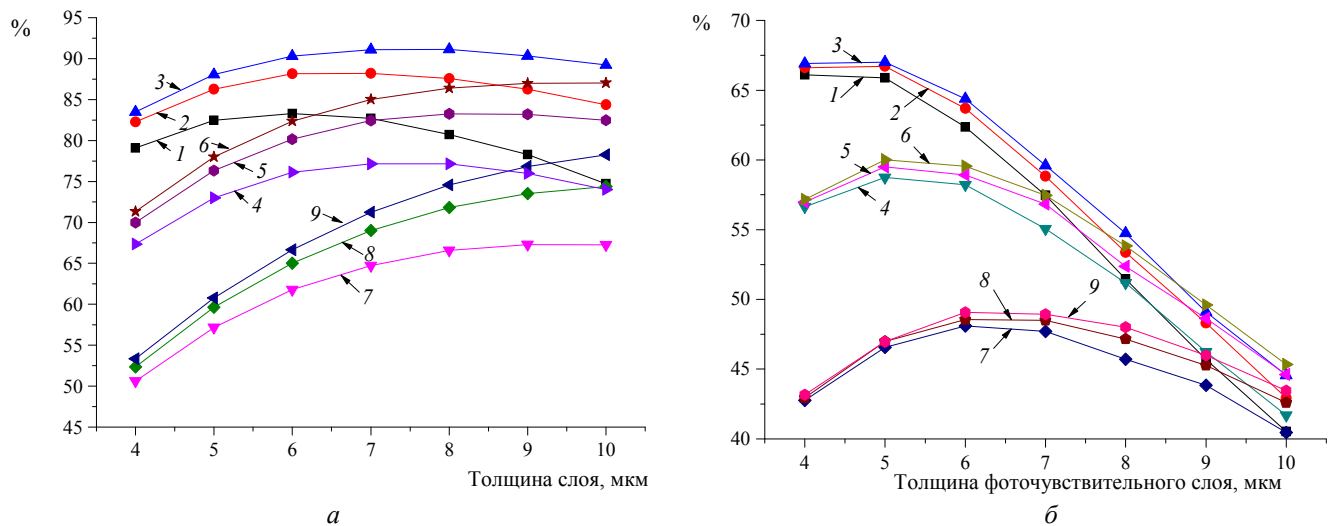


Рис. 3. Интегральная квантовая эффективность при однородной засветке фотоприемной матрицы (а) и уровни фотосигналов при её засветке оптическим пятном от точечного источника (б) как функция толщины ФС. Длина диффузии электронов в ФС L_D : 15 мкм (кривые 1, 4 и 7), 20 мкм (кривые 2, 5 и 8), и 25 мкм (кривые 3, 6 и 9). Длина оптического поглощения $L_{оп}$: 2 мкм (кривые 1, 2 и 3), 3 мкм (кривые 4, 5 и 6), и 5 мкм (кривые 7, 8 и 9). Диаметр n -области диода $D_{p-n} = 10$ мкм с заглублением в ФС на 2 мкм.

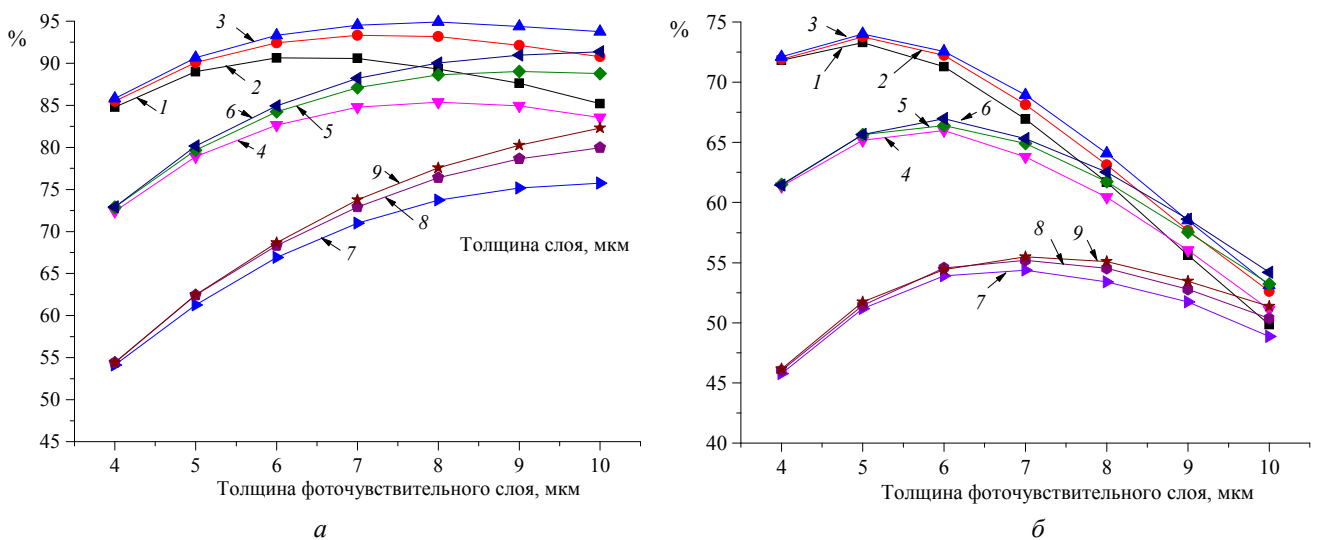


Рис. 4. Интегральная квантовая эффективность при однородной засветке фотоприемной матрицы (а) и уровни сигналов при её засветке оптическим пятном от точечного источника (б) как функция толщины ФС. Длина диффузии электронов в ФС L_D : 15 мкм (кривые 1, 4 и 7), 20 мкм (кривые 2, 5 и 8), и 25 мкм (кривые 3, 6 и 9). Длина оптического поглощения $L_{оп}$: 2 мкм (кривые 1, 2 и 3), 3 мкм (кривые 4, 5 и 6), и 5 мкм (кривые 7, 8 и 9).

Отметим основные отличия в зависимостях квантовой эффективности от толщины ФС для случаев однородной засветки и засветки точечным источником:

- максимальные значения квантовой эффективности в условиях однородной засветки и для точечного источника достигаются при разных толщинах ФС;
- разница в величинах квантовых эффективностей для центрального ФЧЭ фрагмента в случаях однородной и локальной засветок обусловлено

тем обстоятельством, что в условиях однородной засветки матрицы убыль фототока рассматриваемого ФЧЭ, возникающая из-за диффузии указанных НЗ в соседние фотоэлементы в точности компенсируется притоком фотогенерированных НЗ из соседних ФЧЭ; в случае же локальной засветки одного ФЧЭ матрицы такой компенсации не происходит.

Расстояние между n -областями p - n -переходов должны быть существенно меньше длины диффузии электронов (для подложки p проводимости)

[7]. При выполнении этого условия уменьшается рекомбинация НЗ, сфотогенерированных вне n -области p - n -переходов и что позволяет:

- снизить зависимость квантовой эффективности от диффузионной длины неосновных носителей зарядов и, следовательно, повысить однородность вольт-ваттных характеристик фоточувствительных элементов многоэлементных ИК ФПУ;
- увеличить квантовую эффективность и, соответственно, чувствительность в условиях как однородной, так и для локальной засветок.

На рис. 5 приведены зависимости уровней фотосигналов в зависимости от положения точечного источника диаметром 20 мкм относительно центра ФЧЭ, при движении центра пятна диаметром 20 мкм параллельно оси X и при его движении под углом 45° . При смещении центра пятна на 10 мкм параллельно оси X центр пятна находится в точке 1 на рис. 1, а при смещении на 20 мкм центр пятна находится в центре соседнего элемента (кривая 1 на рис. 5). При смещении центра пятна на 10 мкм по горизонтали под углом 45° центр пятна находится в точке 2 на рис. 1 (кривая 2 на рис. 6). При произвольном положении центра пятна от точечного источника относительно центров фоточувствительных элементов координаты центра пятна можно однозначно определить из соотношений фотосигналов соседних фоточувствительных элементов. Расчеты проведены для $D_{p-n} = 10$ мкм, $L_d = 20$ мкм, $L_{оп}$: 2 мкм, для двух толщин фоточувствительного слоя 4 мкм и 10 мкм. Численные значения уровней фотосигнала центрального фоточувствительного элемента от пятен, центрированных на точках 1 и 2, приведены в табл. 1. Таким образом, зависимости на рис. 5 характеризуют зависимости сигналов от положения центра точечного источника в фокальной плоскости ИК ФПУ.

Отметим, разницу в зависимостях количества фотонов попадающих от оптического пятна на центральный элемент (кривые 1, 2) и количество сфотогенерированных носителей интегрируемые центральным элементом (кривые 3–6). Когда центр пятна находится в пределах центрального элемента уровни фотосигналов интегрируемые центральным элементом от точечного источника существенно ниже количества фотонов пятне (определяется интегральной квантовой эффективностью, рис. 5), при удалении центра пятна от центра центрального фоточувствительного элемента уровни сигналов в центральном элементе превышают количество фотонов в пятне. Это обусловлено тем, что в этом случае центр пятна находится в соседних элементах и часть носителей сфотогенерированных в этих ячейках диффундирует в центральный фоточувствительный элемент.

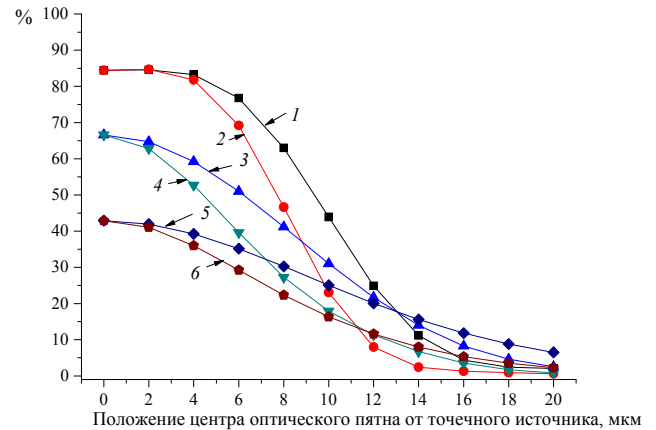


Рис. 5. Уровень фотосигналов центрального фоточувствительного элемента от точечного источника излучения, в зависимости от положения центра пятна относительно центра фоточувствительного элемента; — кривые 1, 2 — доля фотонов, попадающих на центральный фоточувствительный элемент; кривые 3, 4 — уровень фотосигналов центрального фоточувствительного элемента при толщине ФС 4 мкм; кривые 5, 6 — доля сфотогенерированных носителей, интегрируемых центральным фоточувствительным элементом при толщине ФС 10 мкм. Для кривых 1, 3 и 5 движение пятна параллельно оси X ($y = 0$), для кривых 2, 4 и 6 движение оптического пятна осуществляется под углом 45° ($y = x$).

На рис. 6 приведены зависимости уровней сигналов (нормированные на количество фотонов в пятне), интегрируемые центральным элементом при проецировании пятна от точечного источника диаметрами 20 мкм и 30 мкм в центр фоточувствительной ячейки с размерами 20×20 мкм, от толщины ФС. При расчетах принято $L_d = 20$ мкм, $D_{p-n} = 10$ мкм и $L_{оп}$ 2, 3 и 5 мкм.

Отметим влияние длины оптического поглощения на квантовую эффективность в обоих случаях, при однородной и при локальной засветке фоточувствительного элемента. Для ИК ФПУ с использованием узкополосных фильтров необходимо выбирать стехиометрический состав фоточувствительного слоя таким образом, чтобы длинноволновая граница фоточувствительного слоя на 0,3–0,4 мкм превышала длинноволновую границу фильтра, что обеспечит длину оптического поглощения ~ 2 –3 мкм. Дополнительным преимуществом ИК ФПУ с узкополосным фильтром является подавление влияния неоднородности стехиометрического состава фоточувствительного слоя КРТ на разброс чувствительности ФЧЭ.

В табл. 3 приведены значения уровней сигналов в центральной фоточувствительной ячейке в зависимости от фотоэлектрических и конструктивных параметров ИК ФПУ, для двух величин диаметра пятна от точечного источника в фокальной плоскости, 20 и 30 мкм и от положения центра пятна относительно центра фоточувствительной ячейки. Диффузионная длина принята равной $L_d = 20$ мкм.

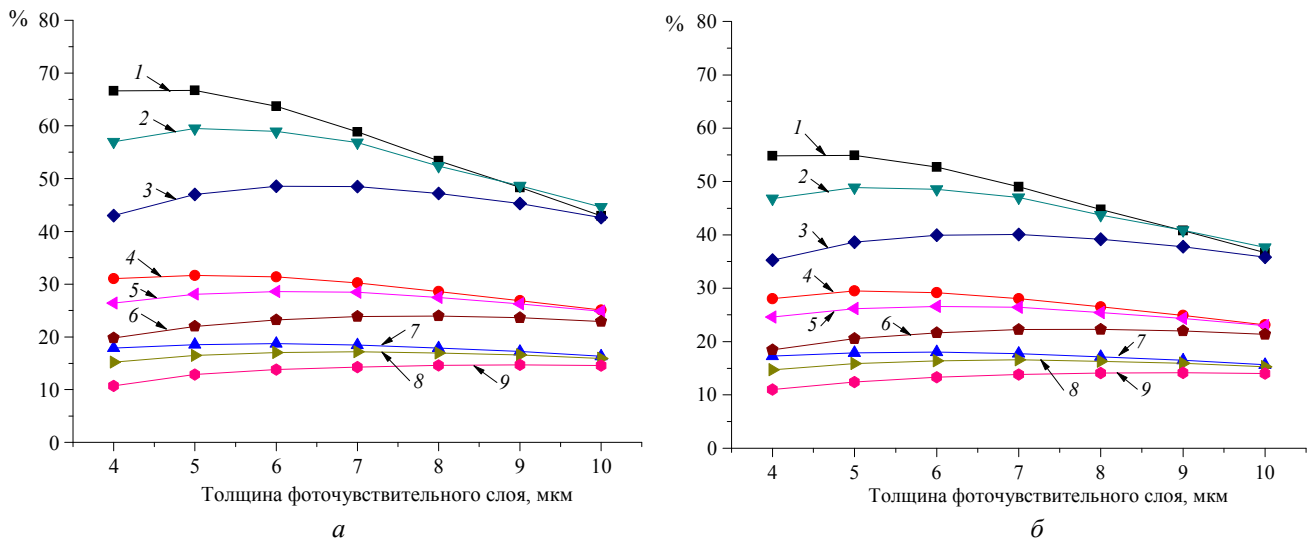


Рис. 6. Зависимости уровней сигналов центрального фоточувствительного элемента при освещении фотоприемной матрицы пятнами от точечного диаметром 20 (а) и 30 мкм (б) в зависимости от толщины ФС. 1, 2 и 3 – центр пятна в центре фоточувствительного элемента; 4, 5 и 6 – центр пятна расположен в точке $x = a/2, y = 0$; 7, 8 и 9 – центр пятна расположен в точке $x = a/2, y = a/2$. Для кривых 1, 4 и 7 – $L_{op} = 2$ мкм, для кривых 2, 5 и 8 – $L_{op} = 3$ мкм, для кривых 3, 6 и 9 – $L_{op} = 5$ мкм.

Таблица 3

Уровни сигналов от точечного источника, интегрируемые в центральной фоточувствительной ячейке

| Параметры ФЧЭ Диаметр пятна | | В центре пикселя | Между двумя пикселями | Между четырьмя пикселями | В центре соседнего пикселя | В центре диагонального пикселя |
|---|---------------------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| $D_p = 20$ мкм | Доля энергии (% от полной энергии) | 84,45 | 43,89 | 23,08 | 2,07 | 0,58 |
| Толщина ФС = 5 мкм $D_{p-n} = 10$ мкм | $L_{оп} = 2$ мкм | 66,71 | 31,66 | 18,56 | 3,24 | 1,02 |
| | $L_{оп} = 5$ мкм | 46,99 | 22,02 | 12,85 | 2,07 | 0,67 |
| Толщина ФС = 8 мкм $D_{p-n} = 10$ мкм | $L_{оп} = 2$ мкм | 53,38 | 28,61 | 17,86 | 5,52 | 1,83 |
| | $L_{оп} = 5$ мкм | 47,17 | 23,95 | 14,62 | 4,03 | 1,34 |
| Толщина ФС = 5 мкм $D_{p-n} = 16$ мкм | $L_{оп} = 2$ мкм | 73,78 | 37,63 | 20,49 | 2,41 | 0,69 |
| | $L_{оп} = 5$ мкм | 51,45 | 26,19 | 14,1 | 1,57 | 0,45 |
| Толщина ФС = 8 мкм $D_{p-n} = 16$ мкм | $L_{оп}$ мкм | 63,13 | 35,05 | 20,64 | 5,06 | 1,26 |
| | $L_{оп} = 5$ мкм | 54,52 | 29,39 | 16,92 | 3,54 | 0,92 |
| $D_p = 30$ мкм | Доля энергии (% от полной энергии) | 79,61 | 41,51 | 22,17 | 2,25 | 0,92 |
| Толщина ФС = 5 мкм $D_{p-n} = 10$ мкм | $L_{оп} = 2$ мкм | 54,89 | 29,49 | 17,89 | 4,81 | 1,52 |
| | $L_{оп} = 5$ мкм | 38,63 | 20,53 | 12,4 | 3,19 | 1,02 |
| Толщина ФС = 8 мкм $D_{p-n} = 10$ мкм | $L_{оп} = 2$ мкм | 44,74 | 26,48 | 17,14 | 6,47 | 2,2 |
| | $L_{оп} = 5$ мкм | 39,16 | 22,26 | 14,09 | 4,92 | 1,68 |
| Толщина ФС = 5 мкм $D_{p-n} = 16$ мкм | $L_{оп} = 2$ мкм | 64,8 | 34,52 | 19,73 | 3,68 | 1,07 |
| | $L_{оп} = 5$ мкм | 45,48 | 24,03 | 13,61 | 2,38 | 0,71 |
| Толщина ФС = 8 мкм $D_{p-n} = 16$ мкм | $L_{оп}$ мкм | 54,74 | 32,03 | 19,73 | 6,08 | 1,66 |
| | $L_{оп} = 5$ мкм | 47,55 | 26,91 | 16,23 | 4,42 | 1,25 |

Чувствительность и, соответственно, вероятность обнаружения точечных источников определяется уровнем минимального сигнала, когда центр пятна находится между четырьмя пикселями (третий столбец в таблице 3). В четвертом столбце таблицы 3 центр оптического пятна проецируется в центр соседнего элемента и соответствующее значение фотосигнала характеризует коэффициент фотоэлектрической связи ФПУ. Отметим, что при увеличении диаметра n - p -перехода коэффициент фотоэлектрической связи уменьшается. Данные, приведенные в таблице 3, позволяют определить оптимальные для многоэлементных ИК ФПУ требования к основным конструктивным параметрам фоточувствительной ячейки (диаметр n - p -перехода) и параметрам оптической системы (диаметр оптического пятна от точечного источника), обеспечивающим максимальную вероятность обнаружения точечных источников излучения.

Зависимости квантовой эффективности при задании спектрального диапазона и фоновой обстановки позволяют рассчитать пороговую чувствительность ИК ФПУ. На рис. 7 приведены расчетные зависимости пороговой чувствительности ИК ФПУ в режиме ограничения фоном (ОФ) от толщины фоточувствительного слоя в спектральном диапазоне 3–5 мкм при уровне фонового излучения 2×10^{-12} Вт/см² и времени накопления 10 мс, диаметр p - n -перехода = 10 мкм, $L_d = 20$ мкм.

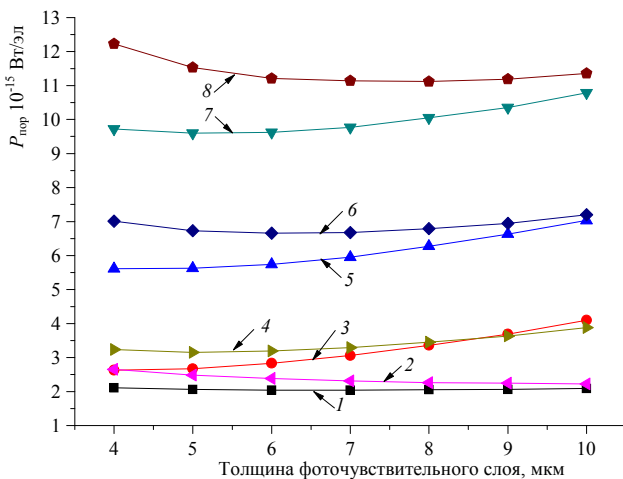


Рис. 7. Зависимости пороговой чувствительности многоэлементных ИК ФПУ для условий однородной засветки в режиме ОФ и засветки оптическим пятном от точечного источника излучения диаметром 20 мкм. 1, 2 – пороговая чувствительность при однородной засветке; 3, 4 – центр пятна в центре фоточувствительного элемента; 5, 6 – центр пятна расположен в точке с координатами $x = a/2$, $y = 0$; 7, 8 – центр пятна расположен в точке с координатами $x = a/2$, $y = a/2$. 1, 3, 5 и 7 – $L_{op} = 2$ мкм, 2, 4, 6 и 8 $L_{op} = 5$ мкм.

Приведенные в работе зависимости уровней сигналов и пороговой чувствительности ФЧЭ в

условиях однородной засветки и засветки пятном от точечного источника, от положения центра пятна относительно центра фоточувствительной ячейки, характеризуют пространственное разрешение, многоэлементных ИК ФПУ:

– пороговая чувствительность при однородной засветке определяет чувствительность ФЧЭ к объекту, геометрические размеры изображения которого в фокальной плоскости многократно превышает геометрические размеры фоточувствительного элемента;

– пороговая чувствительность ФЧЭ в условиях локальной засветки или точечным источником характеризует чувствительность для объектов, размер которых в фокальной плоскости ИК ФПУ сравним или меньше геометрического размера фоточувствительного элемента.

Выводы

Представлены результаты численного моделирования пороговой чувствительности ИК ФПУ в условиях однородной засветки фотоприемной матрицы и её засветки оптическим пятном от точечного источника излучения. Полученные результаты основаны на расчетах пространственного распределения квантовой эффективности по площади ФЧЭ, учитывающих диффузию фотогенерированных носителей заряда и величины основных фотоэлектрических и конструктивных параметров ФПУ. К первым относятся длина поглощения излучения в ФС и диффузионная длина НЗ в ФС, ко вторым, – толщина ФС, диаметр и величина заглупления p - n -переходов диодов в ФС. Характеристикой оптической системы является диаметр пятна от точечного источника излучения. Представленная модель позволяет сформулировать требования к фотоэлектрическим и конструктивным параметрам фоточувствительных элементов, обеспечивающие достижение предельных значений чувствительности и пространственного разрешения ИК ФПУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борзов С. М., Дrajнников Б. Н., Козик В. И., Потапуркин О. И., Синельщиков В. В. // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2016. Т. 14. № 4. С. 14.
2. Иванов В. А., Киричук В. С. // Автoметрия. 2013. Т. 49. № 1. С. 3.
3. Васильев В. Н., Дмитриев И. Ю., Дrajнников Б. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А., Соляков В. Н., Пономаренко В. П. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 5. С. 486.
4. Lavine J. P., et al. // IEEE Transaction on Electron Devices. 1985. Vol. ED-32. No. 10. P. 2087.
5. Vishnyakov A. V., Stuchinsky V. A., Brunev D. V., Zverev A. V., Dvoretzky S. A. // Applied Physics Letters. 2014. Vol. 104. P. 092112.

6. Vishnyakov A. V., Stuchinsky V. A., Brunev D. V., Zverev A. V., Dvoretzky S. A. // J. Appl. Phys. 2015. Vol. 118. P. 124508.
7. Половинкин В. Г., Стучинский В. А., Вишняков А. В., Ли И. И. // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2017. № 4 (37). С. 79.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: «Наука», 1973. – 720 с.
9. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. – Новосибирск: Наука, 2003.
10. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная электроника. Фотодиоды. – М.: Физматкнига, 2011.
11. Фотоприёмные устройства на основе эпитаксиальной системы кадмий-ртуть-теллур. Отв. редактор А.Л. Асеев; Российская академия наук, Сиб. Отделение, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова. – Новосибирск, Издательство СО РАН, 2012. – 258 с.
12. Predein A. V., Sidorov Yu. G., Sabinina I. V., Vasil'ev V. V., Sidorov G. Yu., Marchishin I. V. // Optoelectronics, Instrumentation and Date Processing. 2013. Vol. 49. Is. 5. P. 485.
13. Vasi'ev V. V., Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Marchishin I. V., Mikhailov N. N., Predein A. V., Remesnik V. G., Sabinina I. V., Sidorov Yu. G., Susliakov A. O. // Opto-electronics Review. 2010. Vol. 18. No. 3. P. 236.

PACS: 42.79.Sz, 85.30.

Photoelectric characteristics of multi-elements IR FPA in registering point radiation sources

V. G. Polovinkin^{1,2}, V. A. Stuchinsky¹, A. V. Vishnyakov¹, and I. I. Lee¹

¹Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS
13 Acad. Lavrentiev av., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: irlamlee@isp.nsc.ru

²Novosibirsk State Technical University
20 Karl Marx av., Novosibirsk, 630073, Russia

Received July 26, 2018

Results of calculations of photoelectric characteristics of infrared focal-plane-array (IR FPA) detectors for point sources of radiation are reported. The analysis is based on the Monte Carlo simulation of the diffusion process of photogenerated charge carriers in cadmium-mercury-tellurium based FPAs. The main photoelectric and design parameters of the photodetector and optical system were taken into account. The obtained results make it possible to formulate some requirements for design and photoelectric parameters of photosensitive elements ensuring an optimum sensitivity and spatial resolution of photodetectors under conditions of their uniform illumination and illumination with an optical spot from a point source of radiation.

Keywords: IR FPA, photodiode, mercury-cadmium-tellurium, local quantum efficiency, point source, sensitivity, spatial resolution.

REFERENCES

1. S. M. Borzov, B. N. Brazhnikov, V. I. Kozik, O. I. Potaturkin, and V. V. Sinelshikov, Vestnik NSU Ser.: Information Technologies. **14** (4), 14 (2016).
2. V. A. Ivanov and V. S. Kirichuk, Optoelectronic, Instrumentation and date processing **49** (1), 3 (2013).
3. V. N. Vasil'ev, I. Yu. Dmitriev, B. N. Drazhnikov, P. A. Kuznetsov, K. V. Kozlov, V. N. Solyakov, and V. P. Ponomarenko, Usp. Prikl. Fiz. **3** (5), 486 (2015).
4. J. P. Lavine, et al., IEEE Transaction on Electron Devices **ED-32** (10), 2087 (1985).
5. A. V. Vishnyakov, V. A. Stuchinsky, D. V. Brunev, A. V. Zverev, and S. A. Dvoretzky, Applied Physics Letters **104**, 092112 (2014).
6. A. V. Vishnyakov, V. A. Stuchinsky, D. V. Brunev, A. V. Zverev, and S. A. Dvoretzky, J. Appl. Phys. **118**, 124508 (2015).
7. V. G. Polovinkin, V. A. Stuchinsky, A. V. Vishnyakov, and I. I. Lee, Doklady Akademii Nauk Ysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii, No. 1 (38), 79 (2017).
8. M. Born and E. Wolf, Principles of optics. Pergamon Press, 1965.
9. A. Rogalski, Infrared Detectors. Gordon and Breach Science Publishers, Canada, 2000.
10. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, Tverdotel'naya electronica. Photodiody. (Fizmatkniга, Moscow, 2011) [in Russian].
11. Photodetectors Based on the Cadmium-Mercury-Tellurid Epitaxial System, Edited by A. L. Aseev (SBRAS Publishing House, Novosibirsk, 2012) [in Russian].
12. A. V. Predein, Yu. G. Sidorov, I. V. Sabinina, V. V. Vasil'ev, G. Yu. Sidorov, and I. V. Marchishin, Optoelectronics, Instrumentation and Date Processing, **49** (5), 485 (2013).
13. V. V. Vasi'ev, V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, I. V. Marchishin, N. N. Mikhailov, A. V. Predein, V. G. Remesnik, I. V. Sabinina, Yu. G. Sidorov, and A. O. Susliakov, Opto-electronics Review **18** (3), 236 (2010).