

Фотоэлектрические характеристики многоэлементных ИК фотоприемных устройств с сотовой топологией фоточувствительной матрицы 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 с «сотовой» топологией фоточувствительных элементов при регистрации точечных источников излучения. При расчетах учтены основные фотоэлектрические и конструктивные параметры фотоприемников и оптической системы. Показано, что предлагаемая топология фоточувствительной матрицы позволяет увеличить пороговую чувствительность и, следовательно, вероятность обнаружения точечных источников.

Ключевые слова: ИК ФПУ, фотодиод, «сотовая» топология фоточувствительных элементов, 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. № 6. С. 507.

References: V. G. Polovinkin, V. A. Stuchinsky, A. V. Vishnyakov, and I. I. Lee, Usp. Prikl. Fiz. **6** (6), 507 (2018).

Введение

Недостатком инфракрасных фоточувствительных устройств (ИК ФПУ) с регулярным прямоугольным массивом фоточувствительных элементов при регистрации точечных источников излучения является сильная зависимость количества фотонов, попадающих на фоточувствительные элементы, от положения центра пятна. Минимальный уровень фотосигналов в матрице имеет место при положении пятна, при котором оптический сигнал делится между четырьмя соседними элементами.

В данной работе анализируются фотоэлектрические характеристики многоэлементных ИК ФПУ с так называемой «сотовой» топологией фоточувствительных элементов при регистрации точечных

источников излучения. Анализ основан на расчете методом Монте–Карло [1, 2] диффузии фотогенерированных носителей заряда в фотодиодных матрицах на эпитаксиальных слоях кадмий-ртуть-теллур (КРТ). При расчетах учтены основные фотоэлектрические и конструктивные параметры фотоприемников и оптической системы.

Сотовая топология фоточувствительных элементов

Снизить зависимости уровней сигналов от положения оптического пятна от точечного источника позволяет «сотовая» топология фоточувствительной матрицы, представленная на рис. 1, в которой каждая вторая строка фоточувствительных элементов (ФЧЭ) смещена относительно соседних строк на половину шага.

В табл. 1 и 2 показаны уровни сигналов (в процентах от количества фотонов в пятне) при различных положениях центра пятна от точечного источника диаметром 20 и 30 мкм для варианта «сотовой» топологии фоточувствительной матрицы. В этом случае минимальный уровень сигналов будет наблюдаться в точке ⊗ на рис. 1. Координаты этой точки зависят от соотношения размеров фоточувствительной ячейки и диаметра оптического пятна, а также от фотоэлектрических и конструктивных параметров матрицы фоточувствительных элементов, которые приведены в табл. 1, 2 (пятый столбец).

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

Из сравнения уровней минимальных сигналов из табл. 1 и 2 с аналогичными уровнями приведенных в табл. 1 и 2 из работы [2] следует, что

уровни минимальных сигналов для «отовой» топологии фотоприемной матрицы примерно на 30 % выше.

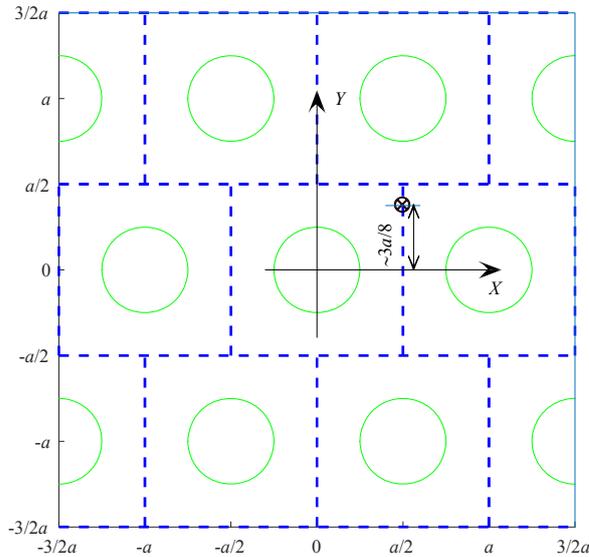


Рис. 1. Сотовая топология фотоприемной матрицы. В этой точке ⊗ уровень сигналов от точечного источника одинаков для трех соседних фоточувствительных элементов Окружности – границы n–p-переходов.

Таблица 1

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

Шаг, мкм	В центре пикселя	Между двумя пикселями	В центре ячеек соседних строк, смещенных на a/2	Минимальная доля (точка ⊗)	y/a
16	83,17(1,0)	43,13(0,518)	1,51	29,57 (0,355)	0,41
20	84,45 (1,0)	43,89 (0,520)	1,44	30,09 (0,356)	0,43
25	87,51 (1,0)	45,15 (0,516)	1,16	30,76 (0,351)	0,44
30	90,38 (1,0)	46,15 (0,511)	0,86	31,25 (0,346)	0,45

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

Таблица 2

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

Шаг, мкм	В центре пикселя	Между двумя пикселями	В центре ячеек соседних строк, смещенных на a/2	Минимальная доля (точка ⊗)	y/a
16	69,58 (1,0)	38,31 (0,550)	2,81	27,32 (0,393)	0,38
20	79,62 (1,0)	41,51 (0,521)	1,81	28,73 (0,361)	0,40
25	83,50 (1,0)	43,31 (0,518)	1,47	29,68 (0,355)	0,42
30	84,45 (1,0)	43,89 (0,520)	1,44	30,09 (0,356)	0,43

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

На рис. 2 приведен пример локального пространственного распределения квантовой эффективности ИК-фотодиода при однородном освещении со стороны подложки планарного варианта фотодиодов на основе эпитаксиальных слоев КРТ p-типа для фрагмента форматом 3×3 элемента [1, 2]. Расчеты локальной квантовой эффективности по площади фоточувствительного элемента проводились в рамках диффузионной модели методом

Монте–Карло с учетом основных фотоэлектрических данных (длина диффузии носителей заряда $L_D = 20$ мкм, длина оптического поглощения $L_{оп} = 2$ мкм) и конструктивных параметров (размер фоточувствительного элемента 20×20 мкм, глубина и диаметр n–p-перехода 2 мкм и 10 мкм соответственно, толщина фоточувствительного слоя (ФС) $t = 6$ мкм [3, 4].

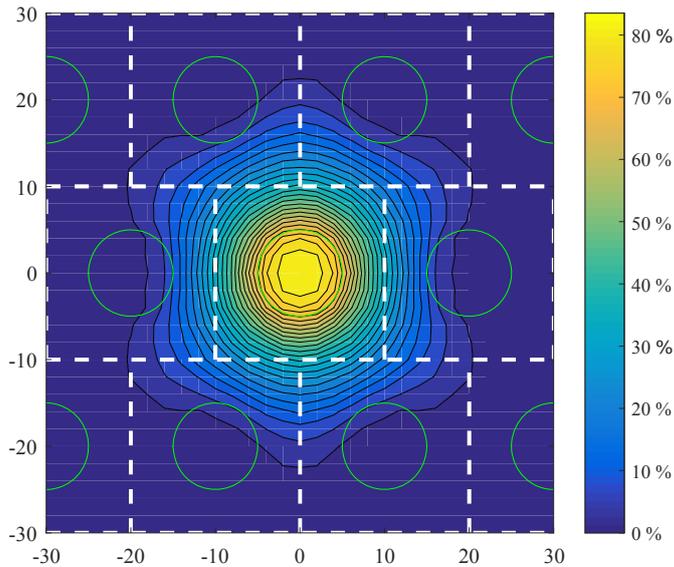


Рис. 2. Пример пространственного распределения локальной квантовой эффективности фоточувствительного элемента при однородной засветке фотоприемной матрицы.

Фотоэлектрические характеристики многоэлементных ИК ФПУ с «сотовой» топологией фоточувствительных элементов

Распределение локальной квантовой эффективности позволяет рассчитать интегральную квантовую эффективность фоточувствительных элементов как свертку локальной квантовой эффективности с произвольным пространственным распределением освещенности фоточувствительного элемента. Для фоточувствительного элемента

при облучении пятном от точечного источника удобнее пользоваться термином «уровень сигналов», который представляет собой долю фотонов, дающих вклад в фототок центрального ФЧЭ, при нормировке на количество фотонов в пятне. На рис. 3 показано распределение уровней фото-сигналов центрального фоточувствительного элемента в зависимости от положения центра пятна для случая, когда центр оптического пятна от точечного источника диаметром 20 мкм совпадает с центром фоточувствительного элемента.

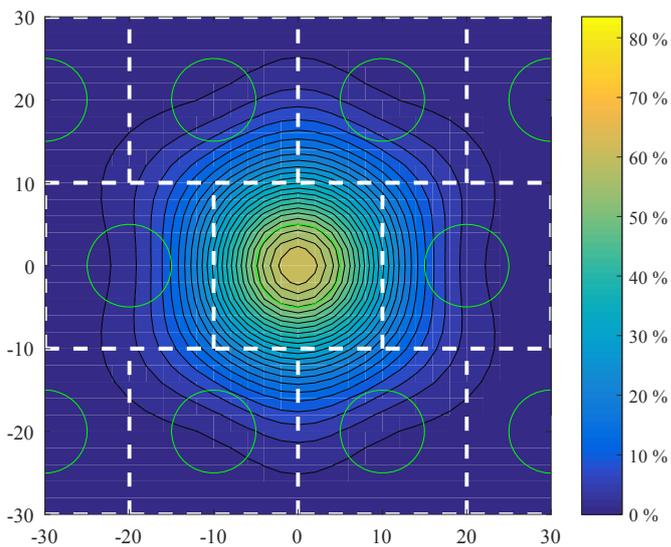


Рис. 3. Пример пространственного распределения интегральной квантовой эффективности фоточувствительного элемента при освещении оптическим пятном от точечного источника.

Интегральная квантовая эффективность и доля носителей от оптического пятна в точке \otimes (рис. 1) существенно превышают таковые для матрицы с регулярной топологией фоточувствительных элементов [2]).

На рис. 4 приведены зависимости уровней в зависимости от положения точечного источника

диаметром 20 мкм относительно центра ФЧЭ при движении центра пятна параллельно оси X , $y = 0$ (рис. 1) и вдоль оси Y , $x = a/2$, $L_D = 20$ мкм, диаметр $p-n$ -перехода $D_{p-n} = 10$ мкм. Отметим разницу между долей фотонов, попадающих на центральный фоточувствительный элемент (кривые 1, 2), и долей носителей интегрируемых центральным

элементом (кривые 3–6). Когда центр пятна не выходит за пределы центрального фоточувствительного элемента, уровни сигналов от точечного источника, интегрируемые центральным элементом, оказываются существенно меньшими, нежели количество фотонов в пятне, попавших на этот элемент. Для случаев, когда центр пятна находится в соседних элементах, уровни сигналов в центральном элементе превышают количество фотонов, попадающих на центральный элемент. Минимальный уровень сигналов наблюдается при пересечении кривых 6 и 7 (точка \otimes) на рис. 1. В этом случае уровни сигналов одинаковы для трех соседних элементов. При произвольном положении центра пятна его координата однозначно определяется из соотношения уровней сигналов соседних элементов.

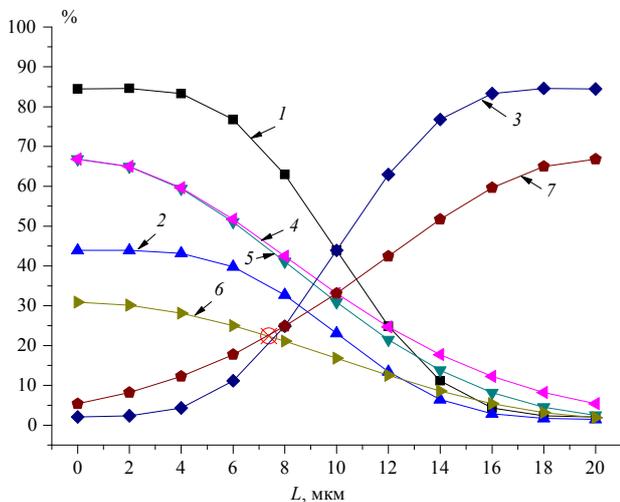


Рис. 4. Уровни фотосигналов центрального фоточувствительного элемента от точечного источника в зависимости от относительного положения центра пятна L . Кривые 1 и 2 – доля фотонов падающих на центральный фоточувствительный элемент; кривая 3 – доля фотонов падающих на смещенный на $a/2$ элемент верхней строки, кривые 4, 5 и 6 – уровень фотосигнала центрального фоточувствительного элемента; кривая 7 – уровень фотосигнала элемента верхней строки, смещенного на $a/2$. Для кривых 1 и 5 – движение пятна осуществляется параллельно оси X ($y = 0$). Для кривых 2, 3, 6 и 7 движение пятна параллельно оси Y ($x = a/2$), для кривой 4 движение осуществляется пятна параллельно оси Y ($x = 0$).

На рис. 5 приведены зависимости уровней сигналов в зависимости от толщины ФС (т. е. слоя абсорбера) для двух величин диаметров оптического пятна, а именно, 20 мкм (рис. 5, а) и 30 мкм (рис. 5, б).

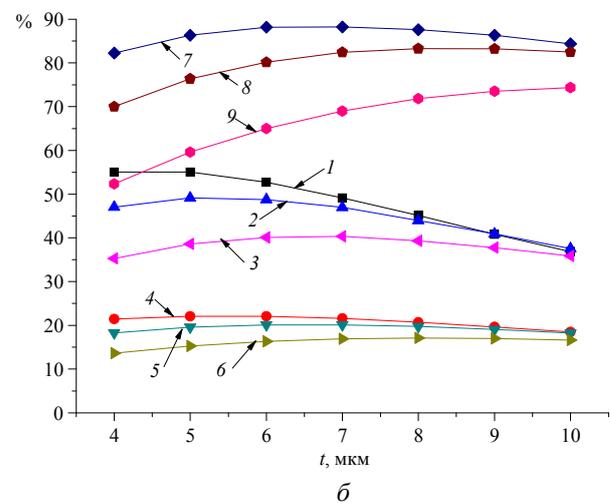
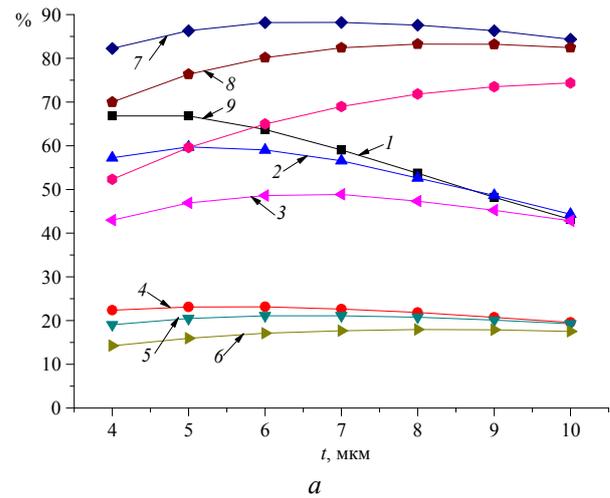


Рис. 5. Зависимости от толщины фоточувствительного слоя t уровней сигналов при освещении матрицы с сотовой конфигурацией элементов оптическим пятном диаметром 20 мкм (а) и оптическим пятном диаметром 30 мкм (б) для разных случаев, а именно, центр пятна совпадает с центром фоточувствительного элемента (кривые 1–6) и в условиях однородного фона (кривые 7–9). Диффузионная длина $L_D = 20$ мкм, $L_{on} = 2$ мкм (кривые 1, 4 и 7), 3 (кривые 2, 5, 8), 5 мкм (кривые 3, 6 и 9). Диаметр p -перехода – 10 мкм.

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

Таблица 3

Уровни сигналов центрального ФЧЭ при засветке пятном от точечного источника, нормированные на количество фотонов в пятне

Параметры фоточувствительной ячейки, диаметр пятна		В центре пикселя	Минимальный уровень (в точке ⊗)	В центре соседнего пикселя (по горизонтали)	В центре диагонального пикселя
$D_p = 20$ мкм	Доля энергии (% от полной энергии)	84,45	~ 34,85	2,07	1,44
Толщина ФС = 5 мкм $D_{p-n} = 10$ мкм	$L_{он} = 2$ мкм	66,85	23,14 (7,402)	3,23	2,4
	$L_{он} = 5$ мкм	46,94	15,97(7,394)	2,09	1,55
Толщина ФС = 8 мкм $D_{p-n} = 10$ мкм	$L_{он} = 2$ мкм	53,7	21,85(7,393)	5,55	4,13
	$L_{он} = 5$ мкм	47,33	17,97(7,383)	3,99	3,01
Толщина ФС = 5 мкм $D_{p-n} = 16$ мкм	$L_{он} = 2$ мкм	73,99	26,57(7,315)	2,36	1,71
	$L_{он} = 5$ мкм	51,7	18,4(7,299)	1,55	1,11
Толщина ФС = 8 мкм $D_{p-n} = 16$ мкм	$L_{он} = 2$ мкм	63,54	25,94(7,315)	4,89	3,52
	$L_{он} = 5$ мкм	54,98	21,47(7,328)	3,53	2,48
$D_p = 30$ мкм	В пятне	79,61	~30,4	2,25	1,81
Толщина ФС = 5 мкм $D_{p-n} = 10$ мкм	$L_{он} = 2$ мкм	55,03	22,09(7,393)	4,77	3,57
	$L_{он} = 5$ мкм	38,6	17,13(7,398)	3,18	2,38
Толщина ФС = 8 мкм $D_{p-n} = 10$ мкм	$L_{он} = 2$ мкм	45,11	20,71(7,404)	6,44	4,86
	$L_{он} = 5$ мкм	39,36	17,13(7,398)	4,88	3,71
Толщина ФС = 5 мкм $D_{p-n} = 16$ мкм	$L_{он} = 2$ мкм	65,25	25,18(7,297)	3,57	2,57
	$L_{он} = 5$ мкм	45,82	17,46(7,285)	2,34	1,68
Толщина ФС = 8 мкм $D_{p-n} = 16$ мкм	$L_{он} = 2$ мкм	55,2	24,41(7,32)	5,94	4,31
	$L_{он} = 5$ мкм	48,05	20,28(7,321)	4,38	3,14

Вероятность обнаружения малоразмерных, точечных источников определяется минимальным уровнем фотосигналов. Как показано выше, для ИК ФПУ с «сотовой» топологией ФЧЭ это будет в точке ⊗ на рис. 1. Сравнение значений уровней сигналов и пороговой чувствительности для «сотовой» топологии с расчетными зависимостями из работ [1, 2] для традиционной топологии ФЧЭ показывает, что минимальный уровень сигналов при прочих равных условиях для «сотовой» топологии фотоприемной матрицы существенно (на 20–30 %) выше.

На рис. 6 и 7 приведены расчетные зависимости пороговой чувствительности ИК ФПУ от толщины ФС в спектральном диапазоне 3–5 мкм при уровне фонового излучения 2×10^{-12} Вт/см² и времени накопления 10 мс для двух диаметров пятна от точечного источника, 20 и 30 мкм, $D_{p-n} = 10$ мкм, $L_d = 20$ мкм. Приведенные на рис. 6 и 7 зависимости иллюстрируют влияние фотоэлектрических параметров фоточувствительных элементов (длины оптического поглощения), оптической системы (диаметр оптического пятна) на величину пороговой чувствительности многоэлементных ИК ФПУ

с сотовой топологией фоточувствительных элементов.

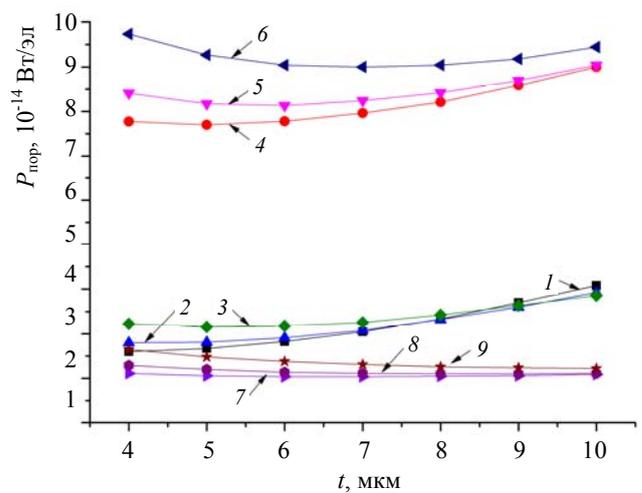


Рис. 6. Зависимости от толщины фоточувствительного слоя t значений пороговой чувствительности ФПУ при регистрации от точечных источников (1–6) и в условиях однородного фона (7–9). Диффузионная длина – 20 мкм, диаметр однородной засветки пятна – 20 мкм, $L_{он} = 2$ (кривые 1, 4 и 7), $L_{он} = 3$ (кривые 2, 5, 8), $L_{он} = 5$ мкм (кривые 3, 6 и 9).

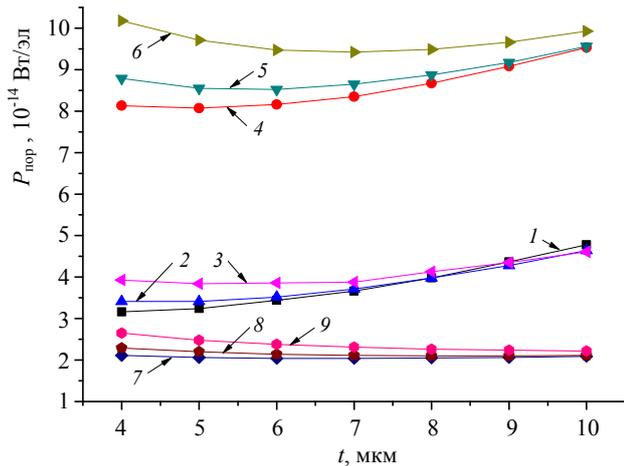


Рис. 7. Зависимости от толщины фоточувствительного слоя t значений пороговой чувствительности ФПУ от точечных источников (1–6) и в условиях однородного фона (7–9). Диффузионная длина – 20 мкм, диаметр однородной засветки пятна – 30 мкм, L_{on} – 2 (кривые 1, 4 и 7), L_{on} – 3 (кривые 2, 5, 8), L_{on} – 5 мкм (кривые 3, 6 и 9).

Заключение

В статье представлены результаты численного моделирования пространственного распределения квантовой эффективности по площади ФЧЭ и пороговой чувствительности ИК ФПУ в условиях однородной засветки и засветки оптическим пятном от точечного источника для «сотовой» топо-

логии фоточувствительных элементов. Полученные результаты основаны на расчетах локального распределения квантовой эффективности, учитывающих диффузию фотогенерированных носителей заряда и величины основных фотоэлектрических и конструктивных параметров ФПУ и его оптической системы. Показано, что минимальный уровень сигналов для точечных источников излучения в ИК ФПУ с сотовой топологией фоточувствительных элементов существенно, а именно, на 20–30 % превышает уровень сигналов в ФПУ с традиционной регулярной топологией. Это, соответственно, обеспечивает улучшение пороговой чувствительности и вероятности обнаружения точечных источников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Половинкин В. Г., Стучинский В. А., Вишняков А. В., Ли И. И. // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2017. № 4(37). С. 79.
2. Половинкин В. Г., Стучинский В. А., Вишняков А. В., Ли И. И. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 5. С. 422.
3. Фотоприёмные устройства на основе эпитаксиальной системы кадмий-ртуть-теллур / отв. редактор А. Л. Асеев. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2012.
4. 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., Suslyakov A. O. // Opto-electronics Review. 2010. Vol. 18. No. 3. P. 236.

PACS: 42.79.Sz, 85.30.

Photoelectric characteristics of IR FPA detectors with honeycomb topology of photosensitive elements under illumination with 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: iramllee@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 multi-element IR FPA detectors with a "honeycomb" topology of photosensitive elements under illumination with point radiation sources are reported. The analysis is based on the Monte Carlo simulation of the diffusion process of photo-generated charge carriers in cadmium-mercury-tellurium based FPAs. In the calculations, the main photoelectric and design parameters of the photodetector and its optical system were taken into ac-

count. It is shown that the proposed topology of photosensitive elements makes it possible to improve the threshold sensitivity and, consequently, the probability of detection of point radiation sources.

Keywords: IR FPA, photodiode, “cellular” topology of photosensitive cells, mercury-cadmium-tellurium, local quantum efficiency, points source, sensitivity, spatial resolution.

REFERENCES

1. V. G. Polovinkin, V. A. Stuchinsky, A. V. Vishnyakov, and I. I. Lee, *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii*, No. 4 (37), 79 (2017).
2. V. G. Polovinkin, V. A. Stuchinsky, A. V. Vishnyakov, and I. I. Lee, *Usp. Prikl. Fiz.* **6** (5), 422 (2018).
3. *Photodetectors Based on the Cadmium-Mercury-Tellurid Epitaxial System*. Edited by A. L. Aseev (SB RAS Publising House, Novosibirsk, 2012) [in Russian].
4. 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).