

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-02-59-66

УДК 535.215.1; 535.215.6

Частотно-контрастная характеристика и эффективная длина диффузии фотогенерированных носителей заряда в фотоприёмных матрицах на основе материала кадмий-ртуть-теллур с разными значениями геометрических параметров

Виктор Андреевич Стучинский¹✉, Алексей Витальевич Вишняков²,
Владимир Васильевич Васильев³

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск, Россия

¹stuchin@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0003-0977-2405>

²vishn@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-2662-0270>

³vas@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-0066-7898>

Аннотация

Предмет исследования. Пространственное разрешение фотоприёмных матриц и эффективная длина диффузии фотогенерированных носителей заряда в их фоточувствительных слоях. **Цель работы.** Определение зависимости частотно-контрастной характеристики и эффективной длины диффузии фотогенерированных носителей заряда от размера диодов и толщины фоточувствительного слоя фотоприёмных матриц. **Метод.** Для анализа диффузии носителей заряда в слое фоточувствительного материала используется моделирование миграции частиц методом Монте-Карло с постоянным шагом прыжка. **Основные результаты.** Получено, что при постоянном шаге матрицы размером 15 мкм и реалистичных значениях объёмной длины диффузии фотогенерированных носителей заряда в фоточувствительном материале (примерно 20 мкм) разрешение матриц улучшается с одновременным уменьшением эффективной длины диффузии носителей заряда как при увеличении размера диодов, так и при уменьшении толщины слоя фоточувствительного материала под диодами матрицы. **Практическая значимость.** Установленная зависимость пространственного разрешения от геометрических параметров позволит проектировать фотоприёмные матрицы с высоким пространственным разрешением.

Ключевые слова: матричный фотоприёмник, диод, фоточувствительный материал, материал кадмий-ртуть-теллур, носители заряда, длина диффузии, функция рассеяния линии, частотно-контрастная характеристика

Ссылка для цитирования: Стучинский В.А., Вишняков А.В., Васильев В.В. Частотно-контрастная характеристика и эффективная длина диффузии фотогенерированных носителей заряда в фотоприёмных матрицах на основе материала кадмий-ртуть-теллур с разными значениями геометрических параметров // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 59–66. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-59-66>

Коды OCIS: 040.1240, 040.3060, 040.5160, 040.6070, 130.5990, 350.5730.

Modulation transfer function and effective diffusion length of photogenerated charge carriers in mercury-cadmium-telluride focal-plane diode arrays with different values of geometric parameters

VICTOR A. STUCHINSKY¹✉, ALEKSEY V. VISHNYAKOV², VLADIMIR V. VASILIEV³

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia

¹stuchin@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0977-2405>

²vishn@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2662-0270>

³vas@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0066-7898>

Abstract

The subject of study is the spatial resolution of two-dimensional focal plane arrays and the effective diffusion length of photogenerated charge carriers in their photosensitive layer. **The aim of study** is determination of the dependence of the modulation transfer function and the effective diffusion length of photogenerated charge carriers on the size of the diodes and on the thickness of the absorber layer in two-dimensional focal-plane arrays. **Method.** The diffusion of the charge carriers in the absorber layer of focal plane arrays is analyzed by simulating the stochastic migration of the particles by the Monte Carlo method with a fixed step length. **Main results.** It was found that at a fixed pitch of focal plane arrays sized 15 μm and at realistic values of the bulk diffusion length of photogenerated charge carriers of 20 μm , the resolution of the arrays improves both with increasing the diode size and with decreasing the absorber-layer thickness under the diodes. Simultaneously, the effective diffusion length of photogenerated charge carriers in both cases decreases. **Practical significance.** The established dependence of spatial resolution on the geometric parameters will make it possible to design focal-plane-array photodetectors with high spatial resolution.

Keywords: focal-plane-array detector, diode, absorber, mercury-cadmium-tellurium material, charge carriers, diffusion length, line spread function, modulation transfer function

For citation: Stuchinsky V.A., Vishnyakov A.V., Vasiliev V.V. Modulation transfer function and effective diffusion length of photogenerated charge carriers in mercury-cadmium-telluride focal-plane diode arrays with different values of geometric parameters [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 2. P. 59–56. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-59-66>

OCIS codes: 040.1240, 040.3060, 040.5160, 040.6070, 130.5990, 350.5730.

ВВЕДЕНИЕ

Фотоэлектрические характеристики фотоприёмных матриц (ФПМ) зависят от параметров материала фоточувствительного слоя и конструктивных особенностей (геометрии) таких устройств [1–6].

Наиболее полным образом пространственное разрешение ФПМ описывается их частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ) [6–10]. Значение ЧКХ на заданной пространственной частоте характеризует степень уменьшения контраста в зарегистрированном изображении по сравнению с контрастом засветки [11, 12]. Другим важным параметром, определяющим пространственное разрешение матриц, является эффективная длина лате-

ральной диффузии фотогенерированных носителей заряда (ФНЗ) в фоточувствительном слое $l_{d\text{ eff}}$, представляющая собой длину проникновения ФНЗ из засвеченной в незасвеченную область матрицы [13]. Для целей оптимизации конструкции ФПМ при их проектировании выбор оптимальных значений параметров является актуальной задачей [14].

Целью настоящей работы было определение характера зависимости частотно-контрастной характеристики и эффективной диффузионной длины ФНЗ от размера диодов и толщины фоточувствительного слоя фотоприёмных матриц на основе материала кадмий-ртуть-теллур (КРТ). Было проведено численное моделирование диффузии ФНЗ в фотоприёмных матрицах

из линейных пятен засветки, направленное на исследование влияния геометрических параметров ФПМ на длину $l_{d\text{ eff}}$ и пространственное разрешение матриц. Изучалась зависимость длины $l_{d\text{ eff}}$ и ЧКХ (как характеристики пространственного разрешения ФПМ) от размера диодов s и толщины слоя фоточувствительного материала под диодами матрицы d . (Под эффективной длиной диффузии ФПМ $l_{d\text{ eff}}$ мы здесь понимаем длину диффузии носителей заряда с учётом как их рекомбинации в объёме фоточувствительного материала, так и поглощения диодами матрицы [13]. Под объёмной длиной диффузии l_d понимается длина диффузии ФНЗ, определяющаяся исключительно их рекомбинацией в фоточувствительном материале без поглощения диодами матрицы).

МОДЕЛИРОВАНИЕ

В настоящей работе диффузия ФНЗ в фотоприёмных КРТ-матрицах моделировалась с применением метода Монте-Карло миграцией частиц по узлам кубической сетки, покрывающей расчётную область задачи. Шаг сетки составлял 0,25 мкм. Расчётная область представляла собой ряд из двадцати пикселей, протягивающийся перпендикулярно линейному пятну засветки. Расчёты были проведены для матриц на основе материала КРТ с объёмной длиной диффузии ФНЗ $l_d = 20$ мкм, периодом 15 мкм, заглублением диодов в слой КРТ 2 мкм, и длиной поглощения излучения в последнем слое l_{opt} , в модельных расчётах принятой равной 1 мкм. Значение длины l_d было выбрано с учётом ранее полученных экспериментальных данных о длинах диффузии ФНЗ в эпитаксиальных слоях КРТ, предназначенных для изготовления фотоприёмников длинно- и средневолнового ИК диапазонов [13]. Часть расчётной области матрицы из девяти пикселей показана на рис. 1.

Падающие на фотоприёмник в пятне засветки фотоны генерировали фотоносители с экспоненциальным распределением координат точек их рождения поперёк фоточувствительного слоя. Параметром, определяющим скорость спада этого распределения, являлась длина оптического поглощения излучения в фоточувствительном материале матрицы l_{opt} . Матрица освещалась со стороны подложки. При этом в модельных расчётах

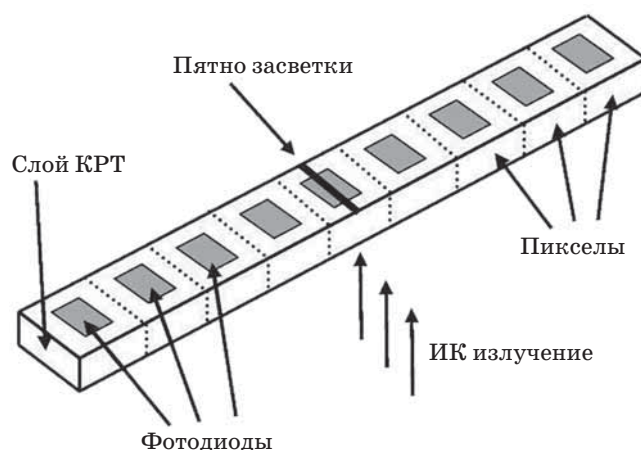


Рис. 1. Часть расчётной области, включающая 9 пикселей освещаемой со стороны подложки фотоприёмной матрицы

Fig. 1. Part of the computational domain including 9 pixels of a back-illuminated focal plane array

отражением излучения от диодной стороны КРТ-плёнки пренебрегалось. Если нормальная к плёнке координата точки рождения генерированной светом частицы попадала за пределы слоя фоточувствительного материала (то есть фотон пролетал этот слой насквозь без поглощения), то программа автоматически переходила к обработке следующего фотона.

Граничные условия задачи были выбраны следующим образом. Вся тыльная сторона слоя фоточувствительного материала и его передняя сторона, не покрытая n -областями диодов, предполагались пассивированными слоями из широкозонного материала КРТ, в связи с чем на этих границах для мигрирующих частиц использовались условия отражения. В силу эквивалентности рассматриваемого ряда пикселей аналогичным смежным рядам пикселей на протяжённых латеральных границах расчётной области для частиц также были выбраны условия отражения. При достаточно большом количестве пикселей в рассматриваемой расчётной области другие латеральные её границы были удалены на достаточно большое расстояние от центра области, так что конкретный вид граничных условий на этих границах не оказывал заметного влияния на результаты расчётов в центральной части расчётной области. Поэтому на этих границах могли использоваться как условия отражения для частиц, так и условия их поглощения. При скачке из текущего узла сетки

в смежные узлы одно из шести направлений прыжка выбиралось согласно показаниям генератора случайных чисел, и вдоль него совершался прыжок частицы. Предполагалось также, что в каждом узле сетки с некоторой пространственно-однородной вероятностью могла происходить рекомбинация частицы. Значение этой вероятности определяло величину объёмной длины диффузии частиц l_d в фоточувствительном слое. Процесс миграции частицы завершался либо по достижении узла сетки, располагающегося в n -области диода, либо после рекомбинации частицы в объёме фоточувствительной плёнки матрицы. В первом случае считалось, что частица дала вклад в ток соответствующего диода. Далее компьютерная программа переходила к обработке блуждания следующей частицы. Полное число посеянных частиц на длину пятна засветки 15 мкм составляло один миллион.

Целью расчётов было вычисление зависимости числа частиц, стекших на выбранный диод матрицы, от расстояния между линейным пятном засветки и центром рассматриваемого диода. Такая зависимость представляла собой функцию рассеяния линии (ФРЛ) матрицы [11, 12] и далее использовалась для расчёта искомых характеристик, ЧКХ матрицы и эффективной длины латеральной диффузии ФНЗ в её фоточувствительном слое $l_{d\text{ eff}}$. При этом ЧКХ матриц определялись как Фурье-образ ФРЛ, а длины диффузии $l_{d\text{ eff}}$ — из наклона «хвостов» ФРЛ в области, где наклон «хвостов» на полулогарифмическом графике ФРЛ был примерно постоянным, что соответствовало перераспределению ФНЗ на всю толщину слоя фоточувствительного материала. В тех случаях, когда на боковых склонах ФРЛ наблюдались осцилляции с периодом, равным периоду матрицы (эти осцилляции были обусловлены прохождением блуждающими частицами поперечных промежутков между диодами), длина $l_{d\text{ eff}}$ определялась после сглаживания указанных осцилляций (см. ниже).

Более подробно использованный в настоящей работе вычислительный алгоритм описан в публикации [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характерные примеры рассчитанных функций рассеяния линии матриц с разными зна-

чениями геометрических параметров приведены на рис. 2. Величины геометрических параметров матриц указаны в подписи к рисунку.

Сравнение кривых 1 и 2, соответствующих матрицам с одним и тем же размером диодов $s = 9 \times 9$ мкм, но разной толщиной слоя фоточувствительного материала под диодами матрицы (соответственно $d = 4$ мкм и $d = 8$ мкм) выявляет тенденцию в эволюции формы ФРЛ с увеличением толщины d , заключающуюся в уменьшении скорости спадания ФРЛ с координатой на боковых склонах этой функции, что соответствует увеличению длины $l_{d\text{ eff}}$ и, как будет видно далее, ухудшению разрешения.

Три ФРЛ, представленные на рис. 2 кривыми 1, 3, и 4, соответствуют матрицам с одним и тем же значением d , но с разными размерами диодов ($s = 9 \times 9$, 5×5 , и 13×13 мкм соответственно). Видно, что увеличение размера диодов s с 5×5 до 13×13 мкм влечёт за собой более резкое спадание «крыльев» ФРЛ с появлением более выраженной «квазиплоской вершинки» в области максимума (рис. 2). Уменьшение

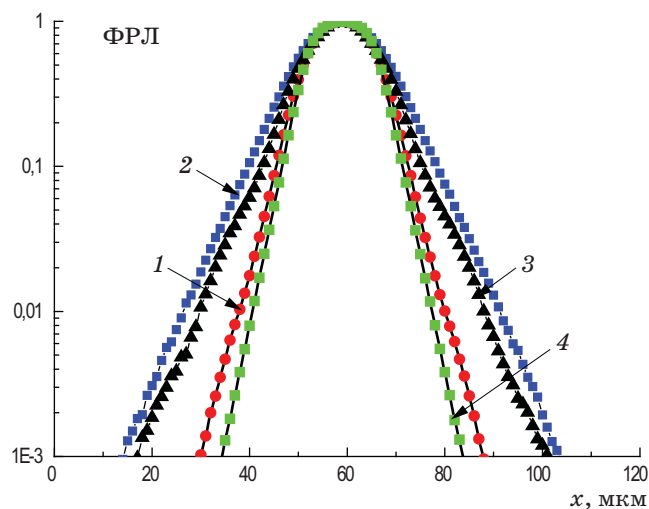


Рис. 2. Примеры рассчитанных нормированных ФРЛ матриц с разными значениями геометрических параметров. Кривая 1 — толщина слоя КРТ под диодами матрицы $d = 4$ мкм, размер диодов $s = 9 \times 9$ мкм; кривая 2 — $d = 8$ мкм, $s = 9 \times 9$ мкм; кривая 3 — $d = 4$ мкм, $s = 5 \times 5$ мкм; кривая 4 — $d = 4$ мкм, $s = 13 \times 13$ мкм

Fig. 2. Examples of normalized calculated LSFs for FPAs with different values of geometric parameters. Curve 1 — MCT-layer thickness under FPA diodes $d = 4$ μm , diode size $s = 9 \times 9$ μm ; curve 2 — $d = 8$ μm , $s = 9 \times 9$ μm ; curve 3 — $d = 4$ μm , $s = 5 \times 5$ μm ; curve 4 — $d = 4$ μm , $s = 13 \times 13$ μm

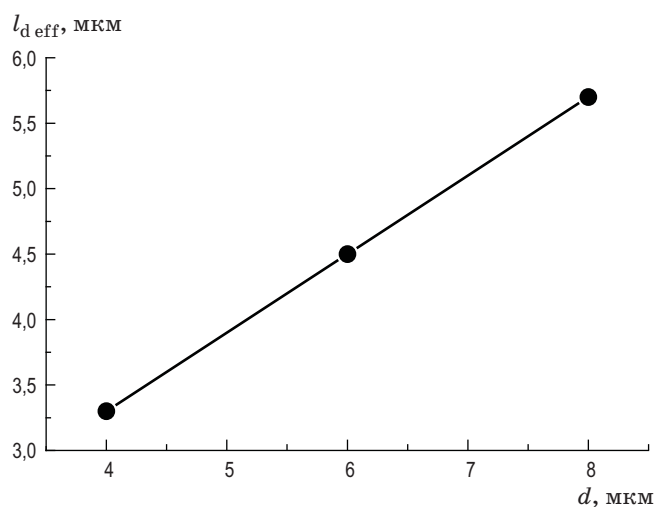


Рис. 3. Зависимость длины $l_{d\text{ eff}}$ от толщины слоя КРТ под диодами d в матрице с размером диодов 9×9 мкм

Fig. 3. Dependence of length $l_{d\text{ eff}}$ on the absorber-layer thickness d under the FPA diodes in FPA with diode size of 9×9 μm

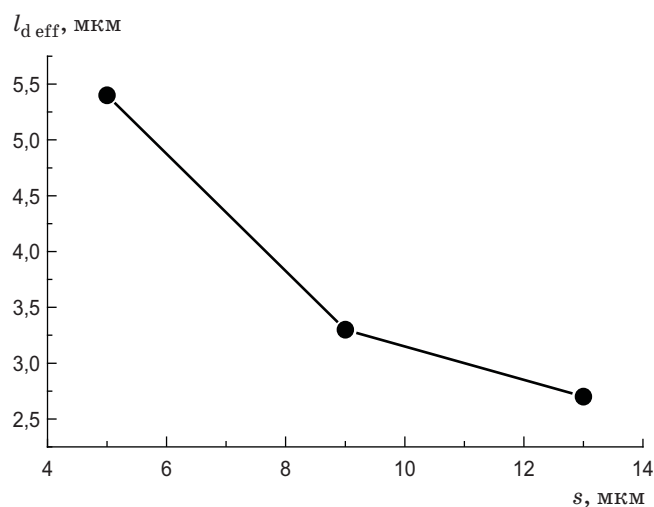


Рис. 4. Зависимость длины $l_{d\text{ eff}}$ от размера диодов s в матрице с толщиной слоя КРТ под диодами $d = 4$ мкм

Fig. 4. Dependence of length $l_{d\text{ eff}}$ on the diode size s in FPA with an absorber-layer thickness of $d = 4$ μm under the FPA diodes

размера диода s с 9×9 до 5×5 мкм при постоянном $d = 4$ мкм приводит к тому, что боковые склоны ФРЛ становятся более пологими, и на них становятся заметны осцилляции с периодом, равным периоду матрицы. Как уже отмечалось выше, эти осцилляции возникают как результат прохождения фотонесителей при их распространении из пятна засветки мимо параллельных пятну засветки промежутков между диодами. При этом определенная с усреднением упомянутых осцилляций длина диффузии $l_{d\text{ eff}}$ оказывается увеличенной по сравнению с таковой в матрицах других геометрий (с $s = 9 \times 9$ и 13×13 мкм при $d = 4$ мкм).

Отмеченные выше особенности поведения длины $l_{d\text{ eff}}$ как функции d и s (рис. 3 и 4) могут быть поняты исходя из следующих рассуждений. Длина $l_{d\text{ eff}}$ по способу её определения представляет собой длину диффузии в масштабе расстояний порядка нескольких пикселей, что соответствует пространственным частотам, значительно меньшим частоты Найквиста. В таком масштабе в рассматриваемых n -на- p матрицах n -области диодов представляют собой стоки для ФНЗ, захват фотонесителей на которые препятствует проникновению ФНЗ к дальним диодам матрицы. С увеличением толщины КРТ-слоя и уменьшением размера диодов увеличивается число

путей для обхода таких стоков, ФРЛ матрицы уширяется, фурье-образ ФРЛ (то есть ЧКХ матрицы) начинает спадать на меньших пространственных частотах, — и пространственное разрешение матрицы падает (см. рис. 5 и 6), на которых приведены полученные преобразованием Фурье функции рассеяния линии частотно-контрастные характеристики матриц с разными значениями параметров d и s).

Что касается поведения разрешения (или ЧКХ) матрицы на более высоких частотах, например, на частоте Найквиста, то это поведение определяется скоростью спадания ФРЛ на расстояниях от центра пятна, соответствующих этой частоте. Рассмотрим для примера изменение обеспечиваемого матрицей разрешения при увеличении латеральных размеров диодов. Для объёмной длины диффузии ФНЗ в КРТ $l_d = 20$ мкм размер оптически активной площадки каждого пикселя задаётся положением краёв p - n -переходов соседних диодов (рис. 7). При увеличении размера s край оптической поверхности становится более крутым, в результате чего в ФРЛ на частоте Найквиста увеличивается содержание гармоник с соответствующими частотами. Форма нормированной ФРЛ при этом демонстрирует тенденцию приближения к прямоугольной функции со значениями, стремящимися

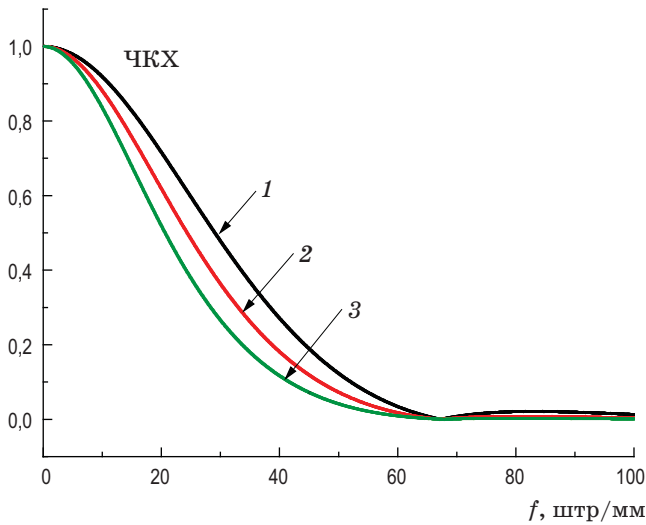


Рис. 5. ЧКХ фотоприёмных матриц с размером диодов $s = 9 \times 9$ мкм и разной толщиной слоя КРТ под диодами $d = 4, 6$ и 8 мкм (кривые 1, 2 и 3 соответственно)

Fig. 5. MTF of FPAs with the diode size $s = 9 \times 9$ μm and various absorber-layer thicknesses under the diodes $d = 4, 6$ and 8 μm (curves 1, 2 and 3, respectively)

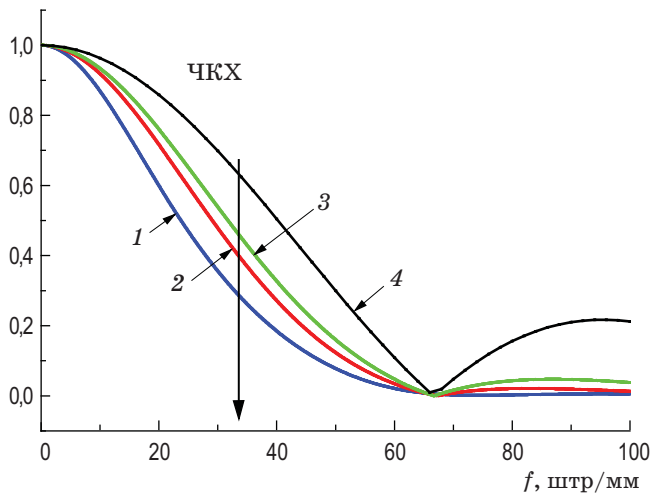


Рис. 6. ЧКХ фотоприёмных матриц с толщиной слоя КРТ под диодами $d = 4$ мкм и разными размерами диодов $s = 5 \times 5, 9 \times 9$ и 13×13 мкм (кривые 1, 2 и 3). Кривая 4 — предельная ЧКХ для прямоугольной функции чувствительности пиксела. Стрелкой показана частота Найквиста изученных матриц $f_N = 33,3$ штр/мм

Fig. 6. MTF of FPAs with the absorber-layer thickness $d = 4$ μm under the diodes and various diode sizes $s = 5 \times 5, 9 \times 9$ and 13×13 μm (curves 1, 2 and 3). Curve 4 — limiting MTF for a box function representing the pixel footprint [16]. The arrow shows the Nyquist frequency of studied FPAs $f_N = 33.3$ lines/mm

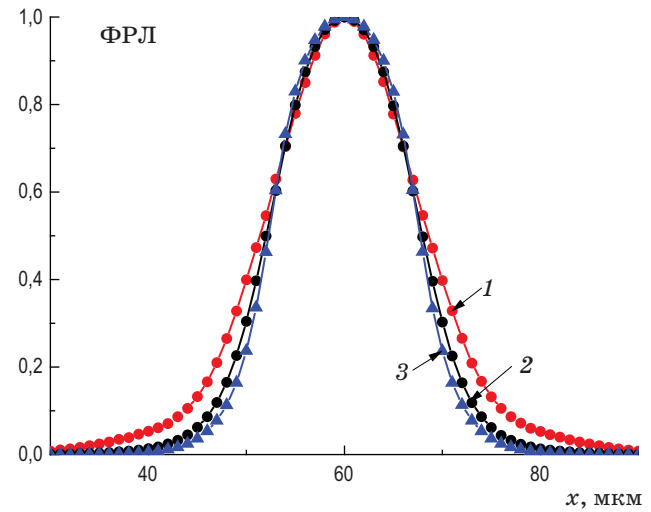


Рис. 7. Эволюция формы ФРЛ фотоприёмных матриц при увеличении размера диодов. Линейный масштаб. Размер диодов $s = 5 \times 5, 9 \times 9$ и 13×13 мкм (кривые 1, 2 и 3). Толщина слоя КРТ под диодами $d = 4$ мкм

Fig. 7. Evolution of the shape of the LSF of FPAs with increasing diode size. Linear scale. Diode sizes $s = 5 \times 5, 9 \times 9$ and 13×13 μm (curves 1, 2 and 3). The thickness of the MCT layers under the diodes is $d = 4$ μm

к единице внутри пиксела и к нулю снаружи. При таком изменении ФРЛ разрешение на частоте Найквиста, как можно видеть из рис. 6, увеличивается, стремясь к ЧКХ = 0,64. Для целей сравнения кривой 4 на рис. 6 показана предельная ЧКХ, вычисленная для матрицы с прямоугольной функцией чувствительности пиксела к излучению [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получено, что при выбранном значении объёмной длины диффузии ФНЗ в материале фоточувствительного слоя матрицы ($l_d = 20$ мкм [13]) разрешение матриц на основе материала кадмий-ртуть-теллур с квадратными диодами при фиксированном шаге матрицы улучшается с уменьшением толщины слоя материала КРТ под диодами матрицы и с увеличением размера фотодиодов, с одновременным уменьшением эффективной длины латеральной диффузии фотогенерированных носителей заряда. Установленные зависимости позволяют проектировать фотоприёмные матрицы с высоким пространственным разрешением.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рогальский А. Инфракрасные детекторы / Перевод с англ. под ред. Войцеховского А.В. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
2. Ллойд Дж.М. Системы тепловидения / Перевод с англ. Васильченко Н.В. М.: Мир, 1978. 414 с.
3. Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook // Rep. Prog. Phys. 2005. V. 68. P. 2267–2336. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/10/R01>
4. Lutz H., Breiter R., Eich D., Figgemeier H., Fries P., Rutzinger S., Wendler J. Small pixel pitch MCT IR-modules // Proc. of SPIE. 2016. V. 9819. P. 98191Y. <https://doi.org/10.1117/12.2223841>
5. Rogalski A. Progress in focal plane array technologies // Progress in Quantum Electronics. 2012. V. 36. P. 342–473. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2012.07.001>
6. Хадсон Р. Инфракрасные системы / Перевод с англ. Герчикова Я.Б., Голубчика Ю.Е., Кина С.Г. М.: Мир, 1972. 535 с.
7. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988. 416 с.
8. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Советское радио, 1978. 400 с.
9. Berthoz J., Rubaldo L., Brunner A., Maillard M., Vojetta G., Jomard N., Courtas S., Péré-Laperne N., Rochette F., Gravrand O., Billon-Lanfrey D. Range infrared detector issues in the SWAPc and pitch reduction context // Proc. of SPIE. Infrared Technology and Applications XLVI. 2020. V. 11407. P. 1140715 (5 May 2020). <https://doi.org/10.1117/12.2561306>
10. Berthoz J., Grille R., Rubaldo L., Gravrand O., Kerlain A., Pere-Laperne N., Martineau L., Chabuel F., Leclercq D. Modeling and characterization of MTF and spectral response at small pitch on mercury cadmium telluride // J. Electron. Materials. 2015. V. 44. № 9. P. 3157–3162. <https://doi.org/10.1007/s11664-015-3857-7>
11. Boreman G.D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems. Second edition. 2021. V. TT121. 156 p. <https://doi.org/10.1117/3.419857>
12. Gunapala S.D., Ting D.Z., Soibel A., Rafol S.B., Khoshakhlagh A., Mumolo J.M., Liu J.K., Keo S.A., Hill C.J. Modulation transfer function of infrared focal plane arrays // Proc. of the IEEE Photonics Conference. Bellevue, USA. 08–12 Sept. 2013. P. 600–601. <https://doi.org/10.1109/IPCon.2013.6656437>
13. Vishnyakov A.V., Stuchinsky V.A., Brunev D.V., Zverev A.V., Dvoretiskii S.A. Analysis of charge-carrier diffusion in the photosensing films of HgCdTe infrared focal plane array detectors // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. № 12. P. 124508–(1–9). <https://doi.org/10.1063/1.4931614>
14. Martineau L., Rubaldo L., Chabuel F., Gravrand O. MTF optimization of MCT detectors // Proc. of SPIE. 2013. V. 8889. P. 88891B. <https://doi.org/10.1117/12.2028883>
15. Стучинский В.А., Вишняков А.В. Простой подход к моделированию методом Монте-Карло диффузии фотогенерированных носителей заряда в многоэлементных фотоприёмниках диодного типа и некоторые применения этого подхода // Тр. XXV Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения в двух томах. Т. 2. Москва. Россия. 24–26 мая 2018. АО «НПО «Орион». Издательство «ОФСЕТ МОСКВА». С. 430–433.

REFERENCES

1. Rogalski A. Infrared detectors. Second edition. Boca Raton: CRC Press, 2010. 898 p.
2. Lloyd J.M. Thermal imaging systems. N.-Y.: Plenum Press, 1975. 456 p.
3. Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook // Rep. Prog. Phys. 2005. V. 68. P. 2267–2336. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/10/R01>
4. Lutz H., Breiter R., Eich D., Figgemeier H., Fries P., Rutzinger S., Wendler J. Small pixel pitch MCT IR-modules // Proc. of SPIE. 2016. V. 9819. 98191Y. <https://doi.org/10.1117/12.2223841>
5. Rogalski A. Progress in focal plane array technologies // Progress in Quantum Electronics. 2012. V. 36. P. 342–473. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2012.07.001>
6. Hudson R.D. Infrared system engineering. N.-Y.: Wiley, 1969. 642 p.
7. Gaussorgues G., La thermographie infrarouge: principes-technologie-applications. Paris: Lavoisier, 1984. 481 p.
8. Kriksunov L.Z. Handbook on infrared equipment [in Russian]. Moscow: Sov. Radio, 1978. 400 p.
9. Berthoz J., Rubaldo L., Brunner A., Maillard M., Vojetta G., Jomard N., Courtas S., Péré-Laperne N., Rochette F., Gravrand O., Billon-Lanfrey D. Range infrared detector issues in the SWAPc and pitch reduction context // Proc. of SPIE. Infrared Technology and Applications XLVI. 2020. V. 11407. 1140715 (5 May 2020). <https://doi.org/10.1117/12.2561306>
10. Berthoz J., Grille R., Rubaldo L., Gravrand O., Kerlain A., Pere-Laperne N., Martineau L., Chabuel F., Leclercq D. Modeling and characterization of MTF and spectral response at small pitch on mercury cadmium telluride // J. Electron. Materials. 2015. V. 44. № 9. P. 3157–3162. <https://doi.org/10.1007/s11664-015-3857-7>
11. Boreman G.D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems. Second edition. 2021. V. TT121. 156 p. <https://doi.org/10.1117/3.419857>
12. Gunapala S.D., Ting D.Z., Soibel A., Rafol S.B., Khoshakhlagh A., Mumolo J.M., Liu J.K., Keo S.A., Hill C.J. Modulation transfer function of infrared focal plane arrays // Proc. of the IEEE Photonics Conference. Bellevue, USA. 08–12 Sept. 2013. P. 600–601. <https://doi.org/10.1109/IPCon.2013.6656437>
13. Vishnyakov A.V., Stuchinsky V.A., Brunev D.V., Zverev A.V., Dvoretiskii S.A. Analysis of charge-carrier diffusion in the photosensing films of HgCdTe infrared focal plane array detectors // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. № 12. P. 124508–(1–9). <https://doi.org/10.1063/1.4931614>
14. Martineau L., Rubaldo L., Chabuel F., Gravrand O. MTF optimization of MCT detectors // Proc. of SPIE. 2013. V. 8889. P. 88891B. <https://doi.org/10.1117/12.2028883>
15. Stuchinsky V.A., Vishnyakov A.V. A simple approach to the Monte Carlo modeling of the diffusion process of optically excited charge carriers in photovoltaic focal-plane-array detectors and some applications of this approach [in Russian] // Proc. of the XXV International Scientific and Engineering Conference on Photoelectronics and Night Viewers. V. 2. Moscow, Russia. May 24–26. 2018. Orion Scientific and Production Association. OFSET Publishing House. P. 430–433.

16. Appleton B., Hubbard T., Glasmann A., Bellotti E. Parametric numerical study of the modulation transfer function in small-pitch InGaAs/InP infrared arrays with refractive microlenses // Optics Express. 2018. V. 26. № 5. P. 5310–5326. [https://doi.org/ 10.1364/OE.26.005310](https://doi.org/10.1364/OE.26.005310)

16. Appleton B., Hubbard T., Glasmann A., Bellotti E. Parametric numerical study of the modulation transfer function in small-pitch InGaAs/InP infrared arrays with refractive microlenses // Optics Express. 2018. V. 26. № 5. P. 5310–5326. [https://doi.org/ 10.1364/OE.26.005310](https://doi.org/10.1364/OE.26.005310)

АВТОРЫ

Виктор Андреевич Стучинский — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт физики полупроводников СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 6602481652; <https://orcid.org/0000-0003-0977-2405>; stuchin@isp.nsc.ru

Алексей Витальевич Вишняков — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт физики полупроводников СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 16450688400; <https://orcid.org/0000-0002-2662-0270>; vishn@isp.nsc.ru

Владимир Васильевич Васильев — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 7005989572; <https://orcid.org/0000-0002-0066-7898>; vas@isp.nsc.ru

AUTHORS

Victor A. Stuchinsky — PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 6602481652; <https://orcid.org/0000-0003-0977-2405>; stuchin@isp.nsc.ru

Aleksey V. Vishnyakov — PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 16450688400; <https://orcid.org/0000-0002-2662-0270>; vishn@isp.nsc.ru

Vladimir V. Vasiliev — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 7005989572; <https://orcid.org/0000-0002-0066-7898>; vas@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 28.09.2023
Одобрена после рецензирования 16.10.2023
Принята к печати 29.12.2023

The article was submitted to the editorial office 28.09.2023
Approved after review 16.10.2023
Accepted for publication 29.12.2023