УДК 621.315.592

PACS: 73.50.-h; 85.30.-z; 85.30.De;
85.60.-q; 85.60.Gz

Тонкая структура пространственных профилей фотоответа диода фотоприёмной матрицы при сканировании им узкого линейного пятна засветки

В. А. Стучинский, А. В. Вишняков

Трёхмерное моделирование диффузии фотогенерированных носителей заряда методом Монте-Карло было использовано для вычисления пространственных профилей фотоответа фотодиода фотоприёмной матрицы при сканировании этим диодом узкого линейного пятна засветки в пределе максимально большого и предельно малого фототока, отбираемого диодами матрицы из абсорбера. Моделирование проводилось для традиционной матрицы на основе материала кадмий-ртуть-теллур с архитектурой n-na-p и квадратными диодами. Установлены тонкие детали профилей, обусловленные наличием у матрицы структуры; показана зависимость выявленных особенностей от граничных условий диффузионной задачи на n-областях диодов. Дано объяснение формы профилей, естественным образом вытекающее из вычислительной процедуры задачи.

Ключевые слова: фотоприёмное устройство (ФПУ), фотодиодная матрица, материал кадмий-ртуть-теллур (КРТ), пространственное распределение фотоответа диода, диффузия носителей заряда, метод Монте-Карло.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-3-47-53

Введение

Измерения пространственных профилей фотоответа $S(x)$ выбранного фотодиода фотоприёмной матрицы при сканировании этим диодом узкого пятна засветки в форме полоски традиционно используются для оценки эффективной $l_{d\text{ eff}}$ и объемной l_d длин диффузии фотогенерированных носителей заряда (ФНЗ) в пленке абсорбера фотоприёмных устройств (ФПУ) на основе материала кадмий-ртуть-теллур (КРТ) [1–5]. В первом приближении

такие профили выглядят как центрированные на пятне колоколообразные зависимости. Для упомянутых выше оценок используются полулогарифмические графики профилей $S(x)$, наклон (в первом приближении прямолинейных) склонов которых даёт значения длин диффузии $l_{d\text{ eff}}$ и l_d ; эти длины диффузии, как предполагалось, реализуются соответственно при большом и малом уровне отбираемого диодами из абсорбера фототока [1–5].

Отметим, что в эксперименте варьирование фототока диодов ФПУ осуществляется путем изменения затворного напряжения входных транзисторов ячеек матрицы. При высоком сопротивлении канала транзистора фото-ЭДС диода смещает его переход в прямом направлении, что приводит к уменьшению результирующего связанного с освещением тока через диод. Относительно различия эффективных и объемной длин диффузии, реализующихся в случае обратносмещенных фотодиодов матрицы и её фотодиодов с

Стучинский Виктор Андреевич, н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: stuchin@isp.nsc.ru

Вишняков Алексей Витальевич, н.с., к.ф.-м.н.
Институт физики полупроводников Сибирского
отделения Российской академии наук.
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект академика
Лаврентьева, 13.

Статья поступила в редакцию 11 марта 2021 г.

© Стучинский В. А., Вишняков А. В., 2021

частично снятым (из-за фото-ЭДС) встроенным барьером, укажем здесь на аналогию фотодетекторной системы случая тонких полупроводниковых пленок с поверхностной рекомбинацией [6]. Поскольку при рассматриваемом сканировании, однако, эффективная «поверхностная рекомбинация ФНЗ» не является пространственно однородной и, помимо движения измерительного диода, при сканировании имеет место движение относительно пятна засветки также и других (отбирающих их собственный фототок) диодов матрицы, разумно думать, что в рассматриваемых измерениях может реализовываться некая «тонкая структура» измеряемого профиля фотоответа диода. Наличие этой структуры, вообще говоря, усложняет анализ измеренных профилей $S(x)$ при оценке длин диффузии и может вызывать, например, сомнение исследователя в линейности используемого им усилительного тракта фотосигналов. В этой связи представляет интерес уточнение формы профилей $S(x)$, измеряемых при разных уровнях фототоков диодов.

С целью решения обозначенной задачи нами было предпринято вычисление профилей фотоответа одного из диодов фотодиодной матрицы при сканировании этим диодом узкого линейного пятна засветки в условиях максимально большого и предельно малого уровня фототоков диодов. Для моделирования диффузии носителей заряда из пятна засветки в работе использовался ранее разработанный нами способ моделирования методом Монте-Карло диффузии ФНЗ в фотоприёмных матричных структурах, описанный в [7] и использованный, например, в [8–11]. Соответствующая проведенному моделированию экспериментальная ситуация в основном отвечает ситуации, реализованной в экспериментах [1–5].

Обсуждение физической ситуации

Первый случай (предельно большого фототока диодов матрицы) соответствует ситуации, когда каждый подходящий к n -области фотодиода фотоэлектрон «сваливается» в эту область, а встречный ток электронов практически отсутствует. При этом, когда в ходе сканирования в месте положения пятна засветки оказывается очередной диод матри-

цы, этот диод отбирает из засвеченной области повышенное количество ФНЗ; при этом число ФНЗ, уходящих в диффузионные хвосты распределения ФНЗ в окрестности пятна засветки, уменьшается, и этот процесс, дополнительно к диффузионному спадающему концентрации ФНЗ, модулирует фотоответ сканирующего фотодиода, удаленного от пятна засветки. При этом можно ожидать реализации провалов на пространственных распределениях фотоответа $S(x)$ сканирующего фотодиода при значениях латеральной (нормальной к пятну засветки) координаты $x = p \times n$, $n = 1, 2, 3 \dots$ (здесь p – шаг фотодиодной матрицы, $x = 0$ – положение центральной линии пятна), с соответствующим проявлением этих особенностей в профилях «локальной длины диффузии» $l_{d\text{ eff local}} x =$

$$= \left| \frac{dx}{d[\ln S(x)]} \right|.$$

Второй случай (предельно малого фототока диодов матрицы) соответствует ситуации, когда ток сваливающихся в n -области диодов фотоэлектронов почти полностью уравнивается встречным током электронов, преодолевающих пониженный переходный барьер диода и текущих из n -области диода в пленку абсорбера. Мы будем называть упомянутые компоненты фототока через диод «падающим током фотоэлектронов» и «отраженным током электронов», соответственно. В связи с присутствием на матрице диодной структуры, в рассматриваемой ситуации возникает некоторое новое явление в латеральном распределении концентрации ФНЗ в матрице, обусловленное появлением дополнительного латерального переноса ФНЗ от пятна и связанное с разным распределением по площади диодов плотности «падающего» и «отраженного» токов. Действительно, в то время как фотоэлектроны, переносящие первый ток, распределены согласно решению диффузионной задачи для ФНЗ в фоточувствительной пленке (ФП) ФПУ, «отраженный» ток электронов эмитируется в пленку однородно по площади p – n -перехода; последнее происходит из-за быстрого выравнивания концентрации электронов в n -области диода по сравнению с характерной частотой преодоления электронами барьера p – n -перехода. При

этом, поскольку стекающие в n -область диода ФНЗ сосредоточены преимущественно у ближнего к пятну засветки краю диода, а «центр тяжести» «отражённых» электронов расположен в центре диода, и возникает указанный (дополнительный к диффузионному и происходящий с участием диодов матрицы) эффективный латеральный перенос ФНЗ от пятна засветки. Полная ситуация включает реализацию многочисленных поглощений переносимых фотоэлектронами фототоков всеми диодами системы с последующим эмитированием отраженных токов, их новыми поглощениями и отражениями и т. д. Возникающий результирующий перенос фотоэлектронов в системе должен приводить к модификации пространственного профиля фотоответа сканирующего диода и к завышенным значениям длины диффузии l_d , извлекаемых из данных экспериментов при низких фототоках диодов.

Поэтому другим аспектом проводимых Монте-Карло расчетов была оценка погрешности, вносимой описанным переносом в результат определения объёмной длины диффузии l_d в материале абсорбера из экспериментов по сканированию, а также, заодно, неучетом трехмерности диффузионной задачи распространения ФНЗ в ФП в работах [1–5].

Монте-Карло моделирование пространственных профилей фотоответа диода при разном уровне фототоков диодов матрицы. Полученные результаты

При проведении Монте-Карло моделирования пространственных профилей фотоответа диода нами рассматривалась фотодиодная матрица с толщиной ФП 6 мкм, периодом 30 мкм и размером диодов 14×14 мкм. Расчетная область (см. рис. 1) представляла собой ряд фоточувствительных элементов матрицы (ФЧЭ), протягивающийся перпендикулярно пятну засветки (всего – 9 ФЧЭ). Шаг расчетной сетки составлял 0,25 мкм, длина оптического поглощения в ФП принималась равной 1 мкм. Рассчитывались профили фотосигнала $S(x)$ диода матрицы, которым осуществлялось сканирование линейного пятна засветки шириной 5 мкм. Шаг сканирования составлял

5 мкм. В наших схематичных расчетах величина заглубления фотодиодов в пленку принималась равной нулю, а распределение излучения в пятне засветки предполагалось однородным, с резкими краями, то есть рассматривалась ситуация, не осложненная размытием края пятна из-за дифракции света. В каждом рассчитанном случае область пятна засеивалась двумя миллионами частиц.

Рис. 1. Расчетная область.

Проводилось моделирование методом Монте-Карло процесса диффузии ФНЗ по слою абсорбера из пятна засветки. Вначале были вычислены значения фототоков всех диодов для разных положений пятна засветки в ситуации, когда все фотоэлектроны, сгенерированные в пятне, безвозвратно стекали на n -области обратносмещенных фотодиодов. Затем была решена задача о величине токов фотодиодов, когда электроны эмитировались в ФП из n -области одного выбранного диода матрицы (однородно по его площади). Для этого была решена вспомогательная задача о судьбе частиц, диффузия которых начиналась в узлах расчетной сетки, прилежащих к границе n -области диода. Часть таких частиц возвращалась в n -область диода, сразу или после прохождения некоторого петлевого пути в абсорбере; оставшаяся же часть частиц либо стекала на другие диоды матрицы (вызывая соответствующие «отраженные токи»), либо гибла из-за объемной рекомбинации в абсорбере. Полученные в этом расчете данные использовались для вычисления фотоответов диодов, возникающих в системе в результате многократных «отражений» фототоков (всего было сделано 100 итераций, после которых

результат заведомо «насыщался»). Вычисленные для обоих случаев («поглощающих» и «отражающих с переносом» диодов) профили фототока $S(x)$ приведены на рис. 2, *а* и *б*. На рис. 3, *а* и *б* результаты описанного моделирования, вычисленные для разных значений объемной длины диффузии ФНЗ l_d , представлены в форме распределений «локальной эффективной длины диффузии» $l_{d\text{ eff local}}$, полученных дифференцированием профилей

$$S(x): l_{d\text{ eff local}}(x) = \left| \frac{dx}{d[\ln S(x)]} \right|. \text{ Поскольку}$$

это не вызовет недоразумений, далее в тексте и на рисунках для простоты в нижнем индексе обозначения $l_{d\text{ eff local}}(x)$ мы будем опускать слово «local».

На зависимостях $l_{d\text{ eff}}(x)$ наблюдаются осцилляции с периодом фотодиодной матрицы, отражающие, очевидно, её структуру. Видно, что дифференцирование профилей $S(x)$, полученных для случая «поглощающих» диодов (рис. 2, *а*), выявляет минимумы примерно в тех местах, где в распределениях $l_{d\text{ eff}}(x)$, полученных для случая «отражающих» диодов, наблюдаются максимумы рассчитанных распределений $l_{d\text{ eff}}(x)$ (сравнение дано на рис. 3, *б*). Представляется, что выявленные осцилляции $l_{d\text{ eff}}$ возникают как результат появления в ходе моделируемого сканирования, «поглощающего» либо «отражающего» диода в области пятна засветки. Это появление модулирует число ФНЗ, достигающих «дальних» (вдоль плёнки) фотодиодов матрицы.

Рис. 2. Рассчитанные нормированные пространственные распределения фотосигнала при сканировании линейного пятна засветки шириной 5 мкм выбранным диодом матрицы с «поглощающими» (*а*) и «отражающими» (*б*) фотодиодами. Использованные в расчете величины длины диффузии l_d в объемном материале абсорбера: кривая 1 – 30 мкм, кривая 2 – 20 мкм, кривая 3 – 10 мкм, кривая 4 – 5 мкм.

Сравнивая средние значения длины диффузии на профилях $l_{d\text{ eff}}(x)$, рассчитанных для случая малых фототоков диодов, с использованными в расчетах значениями объемной длины диффузии, получаем, что совокупная погрешность в определении длины l_d , обусловленная трехмерностью диффузионной задачи и вышеописанным эффектом переноса тока вдоль диодов, для ФПУ с актуальными параметрами является не слишком большой. Именно, из данных рис. 3, *а* следует, что для «фактических» (т. е. закладываемых в расчет) значений $l_d = 5, 10, 20$ и 30 мкм эксперименталь-

тор в результате проведения эксперимента получит значения ~6, ~13, ~25 и ~36 мкм, то есть обсуждаемая погрешность для указанных случаев составит ~20–25 %.

В заключение отметим, что выраженность обнаруженной «тонкой структуры» рассчитанных профилей сканирования в значительной степени определяется резкостью границ использованного в расчетах пятна засветки. Несмотря на то, что при учете дифракционного размытия пятна эта тонкая структура должна несколько сглаживаться, можно ожидать, что эффект увеличения сред-

них значений l_d , найденных из профилей $l_{d\text{ eff}}$ $x = \left| \frac{dx}{d[\ln S_x]} \right|$ при пониженном от-

боре ФНЗ из ФП, примерно сохранит свою величину.

Рис. 3. а – Профили «локальной длины диффузии», полученные дифференцированием профиля рис. 2, б для случая «отражающих» диодов матрицы. Используемые в расчете величины длины диффузии l_d в объемном материале абсорбера: кривая 1 – 30 мкм, кривая 2 – 20 мкм, кривая 3 – 10 мкм, кривая 4 – 5 мкм; б – сравнение профилей «локальной длины диффузии», приведенных на рис. 3, а для случаев $l_d = 30$ мкм (кривая 1) и $l_d = 20$ мкм (кривая 2), с профилями, рассчитанными для тех же длин диффузии (соответственно кривые 3 и 4), но для случая обратносмещенных диодов матрицы, когда все фотоэлектроны, достигшие p -областей диодов, «сваливаются» в эти области, а встречная компонента электронного тока равна нулю.

Заключение

1. Монте-Карло расчеты диффузии ФНЗ в фоточувствительной плёнке матричных фотоприёмников на основе материала КРТ выявляют «тонкую структуру» профилей фотоответа диода при сканировании им резких линейных пятен засветки. Причиной появления соответствующих особенностей в распределениях локальной эффективной длины диффузии $l_{d\text{ eff local}}(x)$ является наличие у матрицы дискретной диодной структуры. Появление максимумов на месте минимумов распределений $l_{d\text{ eff local}}(x)$ при переходе от случая с сильным отбором фототока из абсорбера к случаю со слабым отбором является следствием модификация граничных условий диффузионной задачи обратно- или прямосмещенными диодами, находящимися на диодной стороне ФП и реализующих поглощение или «отражение с переносом» ФНЗ в области пятна на соответствующей границе.

2. Характерная погрешность в определении объемной длины диффузии ФНЗ в материале абсорбера, связанная с их дополнительным латеральным «переносом» при

«отражении» от диодов с частично снятым встроенным барьером, для актуальных случаев составляет ~20–25 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vishnyakov A. V., Stuchinsky V. A., Brunev D. V., Zverev A. V., Dvoretzky S. A. // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104. P. 092112. <https://doi.org/10.1063/1.4867349>.
2. Vishnyakov A. V., Stuchinsky V. A., Brunev D. V., Zverev A. V., Dvoretzky S. A. // J. Appl. Phys. 2015. Vol. 118. P. 124508. <https://doi.org/10.1063/1.4931614>.
3. Vishnyakov A. V., Stuchinsky V. A., Brunev D. V., Zverev A. V., Dvoretzky S. A. // Proc. SPIE 9220, Infrared Sensors, Devices, and Applications IV, Ed. by P. D. LeVan, A. K. Sood, P. Wijewarnasuriya, and A. I. D'Souza, 92200W (7 October 2014); doi: 10.1117/12.2061573.
4. Dvoretzky S. A., Vasil'ev V. V., Predein A. V., Vishnyakov A. V., Stuchinsky V. A., Brunev D. V., Zverev A. V. // Determination of the bulk and local diffusion-length values of charge carriers in MCT films and in the absorber layers of MCT-based photovoltaic IR FPA detectors, in: Optoelectronics – Materials and Devices, Ed. by S. L. Pyshkin and J. Ballato, IntechOpen, doi: 10.5772/60717.
5. Вишняков А. В., Стучинский В. А., Брунев Д. В., Зверев А. В., Дворецкий С. А. // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 44.

6. Бонч-Бруевич В. Л., Калашиников С. Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1990.

7. Стучинский В. А., Вишняков А. В. / Труды XXV Международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Том 2. – М.: АО НПО «Орион», 2018. С. 430–433.

8. Стучинский В. А., Вишняков А. В. / Труды XXV Международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Том 2. – М.: АО НПО «Орион», 2018. С. 424–427.

9. Polovinkin V. G., Stuchinsky V. A., Vishnyakov A. V., Lee I. I. // IEEE Trans. Electron Dev. 2018. Vol. 65. № 11. P. 4924. doi: 10.1109/TED.2018.2872129.

10. Стучинский В. А., Вишняков А. В., Сидоров Г. Ю. // Прикладная физика. 2019. № 2. С. 39.

11. Vishnyakov A. V., Vasiliev V. V., Sabinina I. V., Sidorov G. Yu., Stuchinsky V. A. // Optoelectron. Instrument. Proc. 2019. Vol. 55. P. 519.

<https://doi.org/10.3103/S8756699019050169>.

PACS: 73.50.–h; 85.30.–z; 85.30.De; 85.60.–q; 85.60.Gz

Fine structure of spatial diode photoresponse profiles measured while scanning a narrow strip-shaped illumination spot with FPA diode

V. A. Stuchinsky and A. V. Vishnyakov

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
13 Acad. Lavrent'ev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: stuchin@isp.nsc.ru

Received March 11, 2021

The three-dimensional Monte Carlo simulation of charge-carrier diffusion in a mercury-cadmium-tellurium based focal plane array (FPA) was used to calculate the spatial diode photoresponse profiles measured while scanning a narrow strip-shaped illumination spot with a selected FPA diode in the limit of largest and lowest diode photocurrents. The simulation was performed for a standard 2D n-on-p FPA with square photodiodes. Fine features in measured spot-scan profiles due to the presence of FPA structure were identified, and the dependence of these features on the boundary conditions for diffusing charge carriers at the n-type diode regions was demonstrated. An explanation to the shape of the profiles, fully consistent with the computational procedure of the problem, is given.

Keywords: infrared focal-plane-array (IR FPA) detectors, 2D FPA, mercury-cadmium-tellurium (MCT), spatial diode photoresponse profiles, charge-carrier diffusion, Monte Carlo method.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-3-47-53

REFERENCES

1. A. V. Vishnyakov, V. A. Stuchinsky, D. V. Brunev, A. V. Zverev, and S. A. Dvoretzky, Appl. Phys. Lett. **104**, 092112 (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4867349>.
2. A. V. Vishnyakov, V. A. Stuchinsky, D. V. Brunev, A. V. Zverev, and S. A. Dvoretzky, J. Appl. Phys. **118**, 124508 (2015). <https://doi.org/10.1063/1.4931614>
3. A. V. Vishnyakov, V. A. Stuchinsky, D. V. Brunev, A. V. Zverev, and S. A. Dvoretzky, Proc. SPIE 9220, Infrared Sensors, Devices, and Applications IV. Ed. by P. D. LeVan, A. K. Sood, P. Wijewarnasuriya, and A. I. D'Souza, 92200W (7 October 2014); doi: 10.1117/12.2061573.
4. S. A. Dvoretzky, V. V. Vasil'ev, A. V. Predein, A. V. Vishnyakov, V. A. Stuchinsky, D. V. Brunev, and A. V. Zverev, in: *Optoelectronics – Materials and Devices*. Ed. by S. L. Pyshkin and J. Ballato (IntechOpen, 2015). doi: 10.5772/60717.

5. A. V. Vishnyakov, V. A. Stuchinsky, D. V. Brunev, A. V. Zverev, and S. A. Dvoretzky, *Applied Physics*, No. 1, 44 (2015) [in Russian].
6. V. L. Bonch-Bruevitch and S. G. Kalashnikov, *Physics of Semiconductors* (Nauka Press, Moscow, 1990) [in Russian].
7. V. A. Stuchinsky and A. V. Vishnyakov, in *Proceedings of the XXV International Scientific and Engineering Conference on Photoelectronics and Night-Vision Devices* (Orion Research and Production Association, Moscow, 2018), Vol. 2, pp. 430–433 [in Russian].
8. V. A. Stuchinsky and A. V. Vishnyakov, in *Proceedings of the XXV International Scientific and Engineering Conference on Photoelectronics and Night-Vision Devices* (Orion Research and Production Association, Moscow, 2018), Vol. 2, pp. 424–427 [in Russian].
9. V. G. Polovinkin, V. A. Stuchinsky, A. V. Vishnyakov, and I. I. Lee, *IEEE Trans. Electron Dev.* **65** (11), 4924 (2018). doi: 10.1109/TED.2018.2872129.
10. V. A. Stuchinsky, A. V. Vishnyakov, and G. Yu. Sidorov, *Applied Physics*, No. 2, 39 (2019) [in Russian].
11. A. V. Vishnyakov, V. V. Vasiliev, I. V. Sabinina, G. Yu. Sidorov, and V. A. Stuchinsky, *Optoelectron. Instrument. Proc.* **55**, 519 (2019). <https://doi.org/10.3103/S8756699019050169>.