

УДК 621.383; 621.3.082.52

PACS: 02.70.Uu; 73.50.Pz; 73.61.Le;
85.30.De; 85.60.Gz, 85.60.Bt

Пороговые характеристики многоэлементных фотодиодных ФПУ, определенные с использованием различных методов засветки

В. А. Стучинский, А. В. Вишняков, Г. Ю. Сидоров

Обсуждается вопрос о том, может ли диффузия фотогенерированных носителей заряда из «пиксельного» пятна засветки в прилегающие области фотоприемной матрицы в сочетании с погрешностями покрытия фотоэлемента матрицы пятном быть (при заданных параметрах задачи) причиной наблюдаемого различия значений пороговых характеристик матричных ФПУ, определенных в экспериментах с однородной модулированной засветкой матрицы и в экспериментах с малым пятном засветки. Предложена схема анализа результатов Монте-Карло-расчетов фотосигнала элемента матрицы, нормированного на мощность пучка и засветку фотоэлемента, как функции размера пятна засветки. Посредством такого анализа может быть оценено различие значений порогового (минимального детектируемого) потока излучения в двух указанных случаях и влияние на него погрешности покрытия фотоэлемента пятном. Сообщается, каким образом анализ может быть распространен на случай линейчатых ФПУ с режимом временной задержки и накопления.

Ключевые слова: матричные и линейчатые ИК-фотоприемники, режим временной задержки и накопления, материал кадмий-ртуть-теллур, измерение пороговых характеристик, локальная и однородная засветка, фотоэлемент, фотодиод, пятно засветки, расчет диффузии носителей заряда, метод Монте-Карло.

Ссылка: Стучинский В. А., Вишняков А. В., Сидоров Г. Ю. // Прикладная физика. 2019. № 2. С. 39.
Reference: V. A. Stuchinsky, A. V. Vishnyakov, and G. Yu. Sidorov, Prikl. Fiz., No. 2, 39 (2019).

Введение

В работе [1] сообщалось о различии величин минимального детектируемого (порогового) светового потока $I_{\text{пор}}$, определенных с использованием двух методик измерения, а именно: в экспериментах с модулированной однородной засветкой многоэлементного фото-

приемника и в экспериментах, использующих «пиксельное» пятно засветки с размерами, близкими к размеру его фоточувствительного элемента (ФЧЭ). Утверждалось, что величина порогового потока, определяемая по второму методу, оказывается превосходящей таковую при однородной засветке, причем в случае линейчатых фотоприемных устройств (ЛФПУ) с временной задержкой накопления (ВЗН) указанное различие может достигать трех раз.

Поясним, что в первом методе используется модуляция освещенности, которая может быть организована, например, как включение и выключение однородной засветки ФПУ регулируемой интенсивности. При этом эксперимент по определению порогового потока излучения состоит в определении величины минимального потока, который еще может быть зарегистрирован используемым ФПУ на

Стучинский Виктор Андреевич, н.с., к.ф.-м.н.
Вишняков Алексей Витальевич, н.с., к.ф.-м.н.
Сидоров Георгий Юрьевич, с.н.с., зав. лаб., к.ф.-м.н.
Институт физики полупроводников
Сибирского отделения Российской академии наук.
Россия, 630090, г. Новосибирск,
проспект академика Лаврентьева, 13.
Тел. 8(383) 333-22-76. E-mail: stuchin@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2019 г.

© Стучинский В. А., Вишняков А. В., Сидоров Г. Ю.,
2019

фоне шума. Во втором случае стараются возможно более точно засветить малый участок фотоприемной матрицы (например, один из ее фотоэлементов) с тем, чтобы оказалось возможным определить минимальный детектируемый поток излучения по минимальной энергии в падающем пучке света, при которой малое пятнышко засветки могло бы еще быть замечено на фоне незасвеченной площади матрицы.

Представляется, что естественной причиной, претендующей на роль «фактора X» работы [1] и способной обусловить различие найденных по двум методам пороговых потоков, является диффузия фотогенерированных носителей заряда (ФНЗ) из малого пятна засветки в соседние области матрицы [2–5].

В настоящей работе предпринята попытка количественного анализа рассматриваемого эффекта в предположении, что этот эффект мог бы быть объяснен (по крайней мере, частично) латеральной диффузией ФНЗ из локально освещенного ФЧЭ фотоприемника в соседние фотоэлементы. Расчеты диффузионного процесса ФНЗ в слое абсорбера методом Монте-Карло проведены для актуальных параметров задачи. Предложены координаты, наиболее подходящие для рассмотрения определяющих зависимостей задачи. Можно полагать, что тем самым дана общая схема анализа проблемы, следуя которой будет возможно рассмотреть и другие частные случаи (с другой толщиной фоточувствительной пленки (ФП), с другими значениями длин диффузии ФНЗ и поглощения излучения в слое абсорбера, с другими значениями геометрических параметров матрицы и т. п.). В заключение в общих чертах будет рассмотрен подход к анализу аналогичной задачи для МФПУ с режимом ВЗН (ВЗН-ЛФПУ).

Случай матричных фотоприёмников

Рассмотрим вначале случай матричных ФПУ (МФПУ). Если засветка осуществляется локальным пятном излучения с латеральным размером, сопоставимым с длиной диффузии l_d ФНЗ в материале абсорбера, то часть ФНЗ покидает область пятна, диффундируя в соседние области фотоприёмной матрицы. В результате этого облако ФНЗ «размазывается»

по площади матрицы на область, превышающую размер исходного пятна засветки. Плотность ФНЗ в пятне при этом уменьшается, и вместе с нею уменьшается и величина фототовета диодов в первоначально освещенной области матрицы. Можно ожидать, что в предельном случае малого пятна засветки с размером, сопоставимым с размером ФЧЭ матрицы, эффект будет выражен особенно сильно. Отметим, что в однородно освещенном фотоприемнике уменьшения фотосигнала диода за счет диффузии ФНЗ из соответствующего ФЧЭ не происходит, поскольку потоки ФНЗ между соседними ФЧЭ взаимно компенсируют друг друга (сколько ФНЗ ушло из рассматриваемого ФЧЭ, столько же и придет в него из соседних). Это обстоятельство является следствием идентичности всех ФЧЭ в матрице и условий их освещения. В результате при однородной засветке ФПУ мы получаем ситуацию, как если бы диффузионного обмена ФНЗ между ФЧЭ вообще не существовало. При этом фототоветы фотодиодов матрицы в случае однородной засветки и в случае «выключенной» латеральной диффузии ФНЗ совпадают и имеют максимально возможное значение при данной освещенности матрицы. Именно поэтому интегральную внутреннюю квантовую эффективность фотоэлементов в матрице, составленной из идентичных ФЧЭ, можно подсчитывать, моделируя в расчетах идеальную однородную засветку одиночного ФЧЭ и принимая для ФНЗ на границах фотоэлемента условия отражения [6].

Помимо влияния диффузии ФНЗ за пределы освещенного ФЧЭ, существует и второй фактор, влияющий на величину различия пороговых характеристик МФПУ, определенных по двум методикам. Именно, имеет место очевидное уменьшение сигнала освещенного ФЧЭ, нормированного на мощность света в пучке, из-за частичного нахождения пятна засветки за пределами этого ФЧЭ. Частичное нахождение пятна засветки за пределами освещенного ФЧЭ связано с различием размера/формы пятна и ФЧЭ и/или с погрешностью покрытия ФЧЭ пятном.

Методика расчета

В настоящей работе для проверки реалистичности вышеуказанного объяснения об-

суждаемого эффекта нами были проведены расчеты методом Монте-Карло диффузии ФНЗ из центрированных на ФЧЭ пятен засветки. Ранее обладающий множеством достоинств метод Монте-Карло широко применялся для моделирования диффузии носителей заряда в различных полупроводниковых материалах [7–10]. Осуществленная нами реализация метода подробно описана в [6].

Разработанный нами подход к Монте-Карло моделированию диффузии ФНЗ в фоточувствительной пленке многоэлементных ФПУ фотовольтаического типа в общих чертах состоит в следующем. Расчетная область покрывается кубической сеткой с выбранной величиной шага. Диффузия ФНЗ в рабочей области моделируется как блуждание частиц по узлам сетки с постоянной длиной скачка. В ходе миграции фотогенерированные частицы могут претерпевать следующие события: 1) отражение от варизонных границ ФП (в фотоприёмниках на основе материала кадмий-ртуть-теллур (КРТ)), 2) стекание в n -области фотодиодов (в ФПУ с архитектурой n -на- p), 3) исчезновение вследствие рекомбинации в объеме абсорбера. Последний процесс предполагался пространственно-однородным.

Мы моделировали диффузию ФНЗ, рожденных в пятнах засветки выбранного размера, в фоточувствительной пленке МФПУ на основе материала КРТ с размером ФЧЭ 30×30 мкм и с размером диодов 10×10 мкм. Толщина слоя абсорбера и величина заглупления диода в ФП были выбраны равными 6 и 2 мкм. Для длины оптического поглощения в ФП принималось значение 1 мкм. С учетом данных наших предыдущих работ [11–13], длина диффузии ФНЗ в объемном материале абсорбера принималась равной 20 мкм. Расчетная область представляла собой фрагмент матрицы, содержащий 5×5 фоточувствительных элементов. Размер фрагмента был выбран достаточно большим для того, чтобы граничные условия на удаленных от пятна засветки границах фрагмента не оказывали заметного влияния на распределение мигрирующих частиц вблизи пятна. Шаг расчетной сетки при расчете указанной области составлял 0,25 мкм. Рассматривались центрированные на ФЧЭ круглое и квадратное пятна засветки с однородным распределением интенсивности света в пятне,

а также гауссово пятно засветки с интенсивностью света, распределенной по закону $I \propto \exp(-r^2 / 2\Delta^2)$.

Варьируемым параметром в расчетах был размер пятен засветки Δ_{spot} : изучалась зависимость рассчитываемых величин от этого размера. Каждое пятно засеивалось фиксированным числом частиц (10000 штук), и определялось количество частиц N , стекших на фотодиод центрального ФЧЭ фрагмента. Результатом расчета было число N , отнесенное к числу частиц, рожденных в пределах освещенного ФЧЭ (η_1). Для разделения эффектов от влияния размера пятна и от диффузии ФНЗ за пределы освещенного ФЧЭ мы использовали также и нормировку числа N на полное число частиц, рожденных излучением в пятне засветки (η_2).

Результаты и их обсуждение

Зависимости полученных величин η_1 и η_2 от размера пятна для квадратного, круглого и гауссова пятен показаны на рис. 1 (кривые 1 и 1', 2 и 2', и 3 и 3' соответственно). Для гауссова пятна в качестве его размера вдоль горизонтальной оси отложена величина 2Δ , а для пятен квадратной и круглой формы – длина стороны квадрата и диаметр круга. Кривыми 1–3 показана доля частиц, стекших на диод центрального ФЧЭ, из числа частиц, рожденных в пределах этого ФЧЭ для пятен разной формы (η_1). Кривыми 1'–3' показана доля частиц, стекших на диод центрального ФЧЭ, из числа всех сгенерированных в слое абсорбера частиц (η_2). Совпадение кривых 1–3 и 1'–3' при $\Delta_{spot} \leq \Delta_{ФЧЭ} = 30$ мкм соответствует тому обстоятельству, что при размерах пятна засветки, меньших размера ФЧЭ, число ФНЗ, рожденных внутри пятна, одновременно является и числом частиц, рожденных внутри ФЧЭ. Нарастающее расхождение кривых 1–3 и 1'–3' при размере пятна засветки, большем размера ФЧЭ, является следствием увеличения с размером пятна доли ФНЗ, судьба которых не связана со стоком на фотодиод центрального ФЧЭ. Эти ФНЗ либо стекают в n -области диодов соседних ФЧЭ, либо гибнут в результате рекомбинации в материале абсорбера.

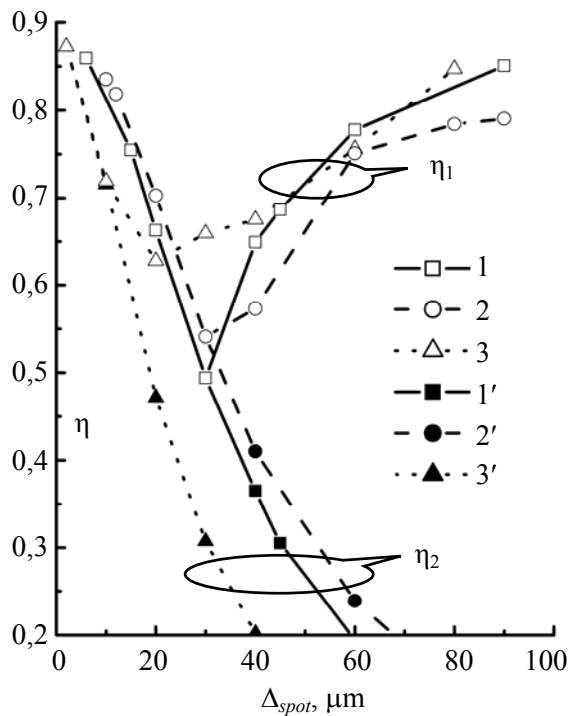


Рис. 1. Доля частиц, стекших на диод центрального ФЧЭ, из числа частиц, рожденных в пределах центрального ФЧЭ (кривые 1–3) и из числа всех сгенерированных в слое абсорбера частиц (кривые 1'–3'). Кривые 1 и 1', 2 и 2', и 3 и 3' соответствуют квадратному, круглому и гауссову пятнам засветки.

Зависимости доли η_1 частиц, стекших на центральный фотодиод из числа частиц, рожденных в центральном ФЧЭ, демонстрируют минимум при размере пятна засветки Δ_{spot} , примерно равном размеру ФЧЭ $\Delta_{ФЧЭ} = 30$ мкм. Последняя ситуация соответствует наиболее благоприятным условиям для уменьшения плотности ФНЗ в освещенном ФЧЭ из-за их диффузии наружу (в этом случае для значительной доли ФНЗ характерные расстояния до фотодиодов соседних ФЧЭ и до фотодиода центрального ФЧЭ сравнимы, встречного потока частиц нет). С увеличением размера пятна (предел большого Δ_{spot}) мы приходим к случаю равномерной засветки матрицы; при этом возрастает поток ФНЗ из соседних ФЧЭ в рассматриваемый. Величина η_1 при этом также возрастает, стремясь с увеличением размера пятна к величине интегральной квантовой эффективности ФЧЭ, составляющей для рассматриваемых параметров диффузионной задачи примерно 82–85 %. Описанные ситуации (с бесконечно большим размером пятна и с размером пятна, примерно равным размеру

ФЧЭ), соответствуют двум указанным выше альтернативным методикам оценки предельной чувствительности МФПУ. При уменьшении размера пятна в области меньше размера ФЧЭ среднее расстояние между местом рождения ФНЗ и фотодиодом центрального ФЧЭ становится меньшим, чем расстояние между местом рождения ФНЗ и фотодиодами соседних ФЧЭ; соответственно, величина η возрастает. Значение η становится особенно большим, когда размер пятна засветки уменьшается до размера фотодиода и далее: тогда для стекания на диоды фотогенерированным ФНЗ «становится ненужным» диффундировать на далекие расстояния в латеральном направлении, поскольку они раньше находят «свой фотодиод», диффундируя всего лишь на расстояние порядка толщины ФП фотоприёмника $d_{ФП}$ (поперек пленки). В случае тонких пленок, когда размер фотодиода Λ_{diode} оказывается сопоставимым с величиной эффективной длины латеральной диффузии ФНЗ под диодом l_d^* [12], практически все ФНЗ сразу стекают на фотодиод, а вероятность для них «вырваться наружу», в область пленки вне диода, становится малой. При исчезающих размерах пятен засветки и соотношении $l_d^* \leq \Lambda_{diode} / 2$ форма пятна засветки уже не играет заметной роли, и кривые 1–3 при нулевом размере пятна сходятся в одной точке. При этом соответствующее значение η в случае $d_{ФП} \ll l_d$ весьма мало отличается от единицы, поскольку это отличие определяется вероятностью для ФНЗ под диодом погибнуть в результате рекомбинации в сравнении с вероятностью достичь фотодиода.

Из рис. 1 по значениям η_1 ($\Delta_{spot} = 30$ мкм) и η_1 ($\Delta_{spot} \rightarrow \infty$) можно оценить вклад диффузии ФНЗ из центрального пикселя в окружающую матрицу в увеличение пороговой облученности (кривые 1–3); этот вклад составляет 30–40 %. Эта величина заметно уступает трехкратному фактору, о котором сообщали в работе [1] авторы, экспериментировавшие с ВЗН-ЛФПУ.

Заметим, однако, что способность экспериментатора различать между η_1 и η_2 при размере пятна $\Delta_{spot} \approx \Delta_{ФЧЭ}$ и, соответственно, его способность получить для расчетного случая вышеприведенную оценку 30–40 %, соответствуют ситуации, когда экспериментатор име-

ет весьма точное представление о том, как реализована его «пиксельная» засветка (т. е. он хорошо понимает, какая доля ФНЗ рождается в рассматриваемом ФЧЭ, а какая – вне его). При отсутствии же таких детальных знаний (когда известна только величина полного светового потока в пятне, – и неизвестно точно, какая доля излучения пучка падает на ФЧЭ и какая – в область вне фоточувствительного элемента) можно ожидать заметной ошибки в оценке определяемой величины порогового потока. Отметим, что, поскольку кривые 1'–3' показывают, как фотосигнал ФЧЭ меняется с изменением размера пятна при сохраняющемся количестве частиц в пятне, то перемещение вдоль каждой из этих кривых соответствует операциям типа фокусировки пятна. В терминах представленного расчета сильная ожидаемая чувствительность оценок величин порогов к реализованному в эксперименте размеру пятна следует из значительного расхождения величин η_1 и η_2 на кривых 1–3 и 1'–3' при $\Delta_{spot} \approx \Delta_{ФЧЭ}$ и последующего сильного нарастания этого расхождения при $\Delta_{spot} > \Delta_{ФЧЭ}$. Особенно бросается в глаза различие значений η_1 и η_2 на кривых 3 и 3' (т. е. для случая гауссова пятна) при его размере 30 мкм.

Таким образом, из быстрого спадания кривой 3' в окрестности точки $\Delta_{spot} \approx \Delta_{ФЧЭ} = 30$ мкм можно заключить, что погрешности в реализации аккуратного покрытия ФЧЭ пятном при применении методики локальной засветки должны сильно сказываться на величине нормированного фотосигнала освещенного ФЧЭ и, соответственно, на найденной величине порогового потока. Из рис. 1 видно, что для гауссова пятна с размером 30 мкм оцененный пороговый поток может оказаться увеличенным примерно в 3 раза по сравнению со случаем равномерной засветки матрицы.

Случай линейчатых фотоприёмников с режимом ВЗН

При анализе вопроса для случая ВЗН-ЛФПУ необходимо дополнительно учитывать движение малого пятна засветки за время интегрирования фотосигнала всеми фотодиодами линейки в ВЗН-процедуре. При этом величина фотосигнала должна быть усреднена по всем реализующимся в таком движении по-

ложениям пятна. Отметим, что при однородной засветке ФПУ значение фотосигнала является нечувствительным к «движению пятна» (несущественно, стоит или движется пятно засветки бесконечно большого размера), что соответствует неизменности предельного значения η_1 на правом краю графика, подобного графику рисунка. При малом же размере пятна засветки здесь, по сравнению со случаем МФПУ, реализуются «нецентрированные» конфигурации пятен с пониженными значениями η . Это обстоятельство может привести к дополнительному увеличению для ЛФПУ величины $I_{пор}$, определенной в экспериментах с «пиксельной» засветкой, по сравнению с увеличением на ~40 % для МФПУ.

Заключение

Проведенные расчеты методом Монте-Карло позволяют сделать следующие выводы.

1) При принятых значениях параметров задачи диффузия ФНЗ за пределы освещенного ФЧЭ может увеличить величину порогового детектируемого потока при освещении МФПУ пятном на 30–40 % по сравнению со случаем равномерной засветки фотоприемника (кривые 1–3 на рис. 1).

2) Нормированная на мощность излучения в пучке или (что то же самое) на полное количество частиц, сгенерированных в слое абсорбера, величина фотосигнала засвеченного ФЧЭ быстро спадает с увеличением размера пятна засветки в диапазоне 10–40 мкм. Это связано с уменьшением доли пучка света в центральном пикселе (кривые 1'–3' на рис. 1). При этом для гауссова пятна с размером 30 мкм найденный пороговый поток оказывается увеличенным примерно в 3 раза по сравнению со случаем равномерной засветки матрицы. Этот результат показывает, что критически важным фактором для методики определения пороговых характеристик МФПУ с применением «пиксельной» засветки является точность покрытия пятном ФЧЭ матрицы. Этот же фактор играет важную роль как определяющий различие величин пороговых потоков и для ВЗН-ЛФПУ.

3) В целом, проведенное рассмотрение дает общий пример анализа, позволяющего для конкретных значений параметров посред-

ством моделирования методом Монте-Карло предсказать величины пороговых характеристик многоэлементных ФПУ, определенных с использованием локальной («пиксельной») засветки фотоприёмника и его однородной засветки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев В. Н., Дмитриев И. Ю., Дрожников Б. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А., Соляков В. Н., Пономаренко В. П. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 5. С. 486.
2. Половинкин В. Г., Стучинский В. А., Вишняков А. В., Ли И. И. // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2017. № 4 (37). С. 91.
3. Половинкин В. Г., Стучинский В. А., Вишняков А. В., Ли И. И. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 5. С. 422.
4. Polovinkin V. G., Stuchinsky V. A., Vishnyakov A. V., Lee I. I. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2018. Vol. 65. No. 11. P. 4924.
5. Половинкин В. Г., Стучинский В. А., Вишняков А. В., Ли И. И. // Автометрия. 2018. Т. 54. № 6. С. 114.

6. 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 г. С. 430–433.

7. Lavine J. P., Chang W. C., Anagnostopoulos C. N., Burkey B. C., Nelson E. T. // IEEE Transactions on Electron Devices. 1985. Vol. ED-32. No. 10. P. 2087.
8. Fastow R. M., Strum A. // Proc. SPIE. 2274, Infrared Detectors: State of the Art II. 1994. P. 136.
9. Juravel Y., Strum A., Fenigstein A., Weiss E., Mainzer N., Sapir N., Lokomski I., Malkinson E., Rosner B., Marcus A., Schenzer H., Fraenke A. // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3061. P. 652.
10. Soehnel G., Tanbakuchi A. // Appl. Optics. 2012. Vol. 51. No. 33. P. 7987.
11. Vishnyakov A. V., Stuchinsky V. A., Brunev D. V., Zverev A. V., Dvoretzky S. A. // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104. P. 092112.
12. Vishnyakov A. V., Stuchinsky V. A., Brunev D. V., Zverev A. V., Dvoretzky S. A. // J. Appl. Phys. 2015. Vol. 118. P. 124508.
13. Вишняков А. В., Стучинский В. А., Брунев Д. В., Зверев А. В., Дворецкий С. А. // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 44.

PACS: 02.70.Uu; 73.50.Pz; 73.61.Le;
85.30.De; 85.60.Gz, 85.60.Bt

Threshold characteristics of multi-element photodiode detectors determined using different illumination conditions

V. A. Stuchinsky, A. V. Vishnyakov, and G. Yu. Sidorov

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 February 19, 2019

Monte Carlo simulations were employed to investigate whether can or cannot the difference between the values of threshold detection characteristics of 2D photovoltaic focal-plane-array (FPA) detectors as determined in experiments with uniform modulated illumination of the detector and in experiments with local (“pixel”) illumination of its FPA elements be a result of outdiffusion of optically excited charge carriers from the illumination spot into the surrounding FPA environment in combination with the inaccuracy of coverage of the FPA element with the illumination spot. An analysis pattern for the normalized photoresponse of locally illuminated FPA element as dependent on the illumination-spot size, intended for evaluating the difference between the values of threshold (minimum detectable) radiation fluxes in the two indicated cases, is proposed. The way how the analysis can be extended to the case of linear array photodetectors operating in the time-delay and integration mode is outlined.

Keywords: 2D and 1D photodetector arrays, time-delay and integration mode, mercury-cadmium-tellurium, measurement of threshold detection characteristics, local and uniform illumination, FPA element, photodiode, illumination spot, Monte Carlo calculations of charge-carrier diffusion.

REFERENCES

1. V. N. Vasil'ev, I. Yu. Dmitriev, B. N. Drazhnikov, K. V. Kozlov, P. A. Kuznetsov, V. N. Solyakov, and V. P. Ponomarenko, *Usp. Prikl. Fiz.* **3** (5), 486 (2015).
2. V. G. Polovinkin, V. A. Stuchinsky, A. V. Vishnyakov, and I. I. Lee, *Doklady Akad. Nauk Vysshei Shkoly Ross. Federatsii.* **4** (37), 91 (2017).
3. V. G. Polovinkin, V. A. Stuchinsky, A. V. Vishnyakov, and I. I. Lee, *Usp. Prikl. Fiz.* **6** (5), 422 (2018).
4. V. G. Polovinkin, V. A. Stuchinsky, A. V. Vishnyakov, and I. I. Lee, *IEEE Transactions on Electron Devices* **65** (11), 4924 (2018).
5. V. G. Polovinkin, V. A. Stuchinsky, A. V. Vishnyakov, and I. I. Lee, *Optoelectronic Instrumentation and Data Processing* **54** (6), 623 (2018).
6. V. A. Stuchinsky and A. V. Vishnyakov, in *Proc. of the XXV International Scientific-Technical Conference on Photoelectronics and Night Viewers* in 2 volumes. Volume 2. – Moscow: R&D Orion Association, 2018, pp. 430–433.
7. J. P. Lavine, W. C. Chang, C. N. Anagnostopoulos, B. C. Burkey, and E. T. Nelson, *IEEE Transactions on Electron Devices*, **ED-32** (10), 2087 (1985).
8. R. M. Fastow and A. Strum, *Proc. SPIE* **2274**, Infrared Detectors: State of the Art II. 136 (1994).
9. Y. Juravel, A. Strum, A. Fenigstein, E. Weiss, N. Mainzer, N. Sapir, I. Lokomski, E. Malkinson, B. Rosner, A. Marcus, H. Schenzer, and A. Fraenke, *Proc. SPIE* **3061**, 652 (1997).
10. G. Soehnel and A. Tanbakuchi, *Appl. Optics* **51** (33), 7987 (2012).
11. A. V. Vishnyakov, V. A. Stuchinsky, D. V. Brunev, A. V. Zverev, and S. A. Dvoretzky, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 092112 (2014).
12. A. V. Vishnyakov, V. A. Stuchinsky, D. V. Brunev, A. V. Zverev, and S. A. Dvoretzky, *J. Appl. Phys.* **118**, 124508 (2015).
13. A. V. Vishnyakov, V. A. Stuchinsky, D. V. Brunev, A. V. Zverev, and S. A. Dvoretzky, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 44 (2015).