

УДК 938.915; 938.971

Фотоответ дефектных фотоэлементов в матричных КРТ-фотоприёмниках с anti-debiasing подслоем

В. В. Васильев, А. В. Вишняков, С. А. Дворецкий, А. В. Предеин, И. В. Сабинина,
Ю. Г. Сидоров, В. А. Стучинский

Изучено влияние anti-debiasing подслоя на электрические характеристики и фотоответ дефектных и недефектных фотоэлементов в длинноволновых фотоприёмных устройствах (ФПУ) на основе материала кадмий-ртуть-теллур. Показано, что наиболее ярким следствием наличия в структуре фотоэлементов матрицы паразитного диода с $p-n$ -переходом на границе фоточувствительной плёнки с anti-debiasing подслоем является возникновение отрицательного фотоответа дефектных фотоэлементов ФПУ.

PACS: 73.50.Pz; 73.61.Le; 85.60.Bt; 85.60.Gz

Ключевые слова: матричные ИК-фотоприемники, материал кадмий-ртуть-теллур, КРТ, вольт-амперные характеристики, профиль фотосигнала, фотодиод, anti-debiasing подслои.

Введение

Важным элементом длинноволновых фотодиодных матриц большого формата на основе материала кадмий-ртуть-теллур (КРТ) является дополнительный сильнолегированный подслои, выращиваемый между подложкой и основным фоточувствительным слоем, который служит для подавления debiasing-эффекта, а также может использоваться как встроенный коротковолновой отрезающий фильтр ИК-излучения [1—5].

Debiasing-эффект возникает в фотоприёмниках со значительным уровнем фотодиодных токов вследствие заметного падения напряжения, возникающего при протекании тока вдоль фоточувствительной плёнки (ФП) на обрамляющий контакт матрицы; вследствие этого центральные фотодиоды

матрицы оказываются недосмещенными в обратном направлении по сравнению с периферийными диодами. Функция anti-debiasing слоя заключается в шунтировании латерального сопротивления фоточувствительной плёнки фотоприёмного устройства (ФПУ); тем самым обеспечивается альтернативный низкоомный путь протекания фототока каждого из фотодиодов матрицы на периферийный контакт.

Поскольку в предложенной ранее конструкции фотоприёмных устройств архитектуры n -на- p сильнопроводящий anti-debiasing подслои имеет n -тип проводимости [1—5] (легированные индием n^+ -слои материала КРТ могут быть легко получены в процессе выращивания КРТ-плёнок методом молекулярно-лучевой эпитаксии [6—8]), то, помимо $p-n$ -переходов рабочих фотодиодов (ФД), в структуре фотоэлектрической ячейки ФПУ присутствует также включенный навстречу ФД паразитный диод (ПД) с $p-n$ -переходом «фоточувствительная плёнка/сильнопроводящий подслои». Соответственно, фототоки, генерированные ФД и ПД в рассматриваемых ФПУ, имеют противоположные знаки. При нормальной поляриности рабочего смещения ячейки паразитный диод оказывается включенным в прямом направлении, и для того, чтобы исключить инжекцию электронов из n^+ -подслоя в ФП, предложенный в [1—5] зонный дизайн ячейки включает барьер для электронов на границе n^+ -слоя с фоточувствительной плёнкой. Одновременно этот барьер препятствует стеканию фотогенерированных в ФП фотоэлектронов в anti-debiasing слой.

Васильев Владимир Васильевич, зав. лабораторией.
Вишняков Алексей Витальевич, научный сотрудник.
Дворецкий Сергей Алексеевич, зав. лабораторией.
Предеин Александр Владиленович, ведущий инженер.
Сабинина Ирина Викторовна, старший научный сотрудник.
Сидоров Юрий Георгиевич, главный научный сотрудник, профессор.
Стучинский Виктор Андреевич, научный сотрудник.
Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН.
Россия, 630090, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 13.
Тел. 8 (383) 333-22-76. E-mail: stuchin@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 1 августа 2016 г.

© Васильев В. В., Вишняков А. В., Дворецкий С. А., Предеин А. В., Сабинина И. В., Сидоров Ю. Г., Стучинский В. А., 2016

В настоящей работе мы показываем, что присутствие ПД в электрической цепи фотоэлектрических ячеек рассматриваемых ФПУ наиболее заметно проявляется в вольт-амперных характеристиках (ВАХ) дефектных элементов фотодиодной матрицы (т.е. элементов матрицы с повышенным уровнем обратных токов рабочих диодов). Наиболее яркое проявление состоит в отрицательном знаке фототока указанных элементов на обратной ветви ВАХ ячеек при значительном обратном смещении рабочих диодов, а также в отрицательном знаке фототока на начальном участке прямой ветви этих характеристик. Измерения, которые мы описываем ниже, могут быть полезны, например, при оценке поперечной проводимости границы «ФП/сильнопроводящий подслей», а также сопротивления растекания рабочих фотодиодов в фотоприёмных матрицах с anti-debiasing слоем.

Эксперимент

Измерения ВАХ фотоэлементов фотодиодных матриц зондовым методом выполнялись при температуре 77 К в темноте и при освещении матриц фоновым комнатным излучением с использованием двух контактов к измеряемому элементу матрицы, один из которых осуществлялся при помощи индиевого столба, а второй являлся низкоомным контактом с площадью порядка 1 мм², приготовленным на периферии матрицы втиранием индия в КРТ-пленку. Предварительно на специально подготовленном образце с двумя такими контактами была установлена омичность и низкое электрическое сопротивление такого рода контактов, в которых индий контактировал как с фоточувствительным слоем материала КРТ *p*-типа проводимости, так и с *n*⁺ anti-debiasing слоем.

При освещении свет падал на фотодиодную сторону структуры, генерируя электронно-дырочные пары на незакрытой индиевыми столбиками части структуры. Латеральный размер индиевого столба был немного меньшим размера литографического окна. Заметим еще, что часть излучения, проходящего через структуру, отражалась от металлической основы, на которой при измерениях располагался образец. Вследствие этого данные, полученные в описываемых измерениях, не имели количественного характера; однако вопросы фотометрии и оценки величины сбора фотогенерированных носителей фотодиодами матрицы не являлись принципиально важными для проводимого в настоящей работе анализа. Следует отметить, что вольт-амперные характеристики фотоэлектрических элементов, измеренные на свету и в темноте, измерялись в идентичных (по другим параметрам) условиях.

Латеральные размеры ПД в фотоэлектрических ячейках ФПУ оценивались в экспериментах по сканированию фотоэлементов матрицы линейным пятном засветки; эти эксперименты были подобны экспериментам, описанным в работах [9, 10]. Единственным отличием от измерений, описанных в [9, 10], являлось то обстоятельство, что источником излучения в настоящей работе являлось абсолютно черное тело с температурой 300 °С.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 для примера показаны ВАХ двух элементов фотодиодной матрицы, а именно, дефектного (пиксел #99) и недефектного (пиксел #97), измеренные зондовым методом в темноте и при освещении матрицы фоновым излучением с температурой 300 К. Видно, что ВАХ недефектного фоточувствительного элемента при освещении проявляет обычную тенденцию к сдвигу вниз (за счет фототока рабочего диода) и, кроме того, влево. В случае дефектного элемента измеряемый на обратной ветви фототок имеет знак, противоположный знаку фототока недефектных ячеек. Если пренебречь фотоэлектрическими явлениями на втором (периферийном) контакте, то можно предполагать, что указанные особенности ВАХ на рис. 1 связаны с присутствием в электрической цепи ячеек паразитных диодов.

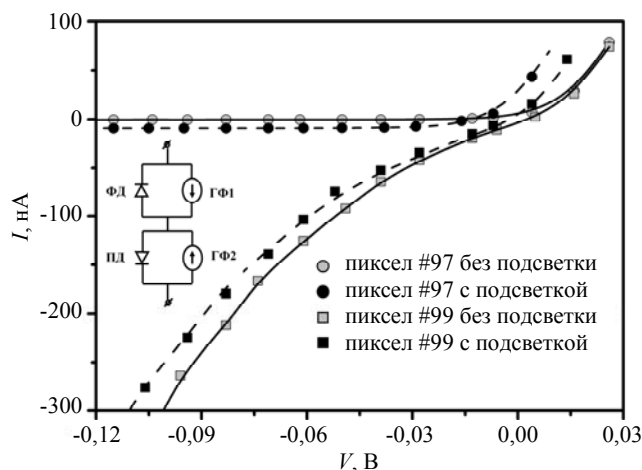


Рис. 1. ВАХ дефектного (#99) и недефектного (#97) фотоэлементов, измеренные в темноте и при фоновой подсветке 300 К. Сплошными линиями показан расчет с $V_{oc} = 12$ мВ (#97) и 9 мВ (#99). На вставке показана эквивалентная электрическая схема фоточувствительного элемента фотодиодной матрицы; обозначения элементов схемы указаны в тексте статьи.

С целью проверки этого предположения было проведено моделирование ВАХ, изображенных на рис. 1, с учетом показанной на вставке к рисунку

ку предполагаемой эквивалентной схемы фотоэлектрической ячейки ФПУ. Эта схема содержит диоды ФД и ПД с соответствующими генераторами фототока (ГФ), ГФ1 и ГФ2. В расчетах темновых и световых ВАХ ПД принималось стандартное выражение с некоторыми величинами коэффициента неидеальности, тока насыщения диода, и фототока. Ввиду того, что проводимость смещенного в прямом направлении ПД обычно сильно превышает проводимость ФД, падение внешнего напряжения на ПД невелико, и актуальным оказывается небольшой участок ВАХ ПД вблизи нулевого тока; в пределах этого участка ПД может моделироваться омическим сопротивлением. ВАХ ФД подбирались такой, чтобы темновая ВАХ всей структуры соответствовала экспериментальной. Затем моделировались световые ВАХ ячеек путем подбора величин фототоков генераторов ГФ1 и ГФ2. Моделирование показало, что ток насыщения и фототок ПД типично составляют несколько сотен наноампер и, таким образом, оба тока существенно превышают обратные токи рабочих ФД; при этом ПД можно рассматривать как источник напряжения V_{oc} с низким внутренним сопротивлением. Поэтому в первом приближении можно полагать, что при освещении фотоэлементов имеет место сдвиг ВАХ фотоэлектрических ячеек ФПУ на величину, которая определяется фотоэдс, генерируемой паразитным диодом ПД (см. рис. 1). В таких предположениях было получено хорошее совпадение между измеренными (символы на рис. 1) и рассчитанными (сплошные кривые) ВАХ освещенных фотоэлектрических ячеек с дефектным и недефектным ФД. Таким образом, расчеты подтверждают, что дефектные фотоэлементы с низким обратным сопротивлением рабочих фотодиодов имеют отрицательный результирующий фототок. Критерием появления отрицательного фототока является малость величины дифференциального сопротивления ФД на обратной ветви его ВАХ по сравнению с величиной $V_{oc}/I_{ph} \approx 1,5$ МОм, где I_{ph} — результирующий фототок ячейки. Действительно, кривая $I = f(V)$ проходит ниже кривой $I = f(V - V_{oc}) + I_{ph}$ при условии $\partial f / \partial V > I_{ph} / V_{oc}$.

То обстоятельство, что величина генерируемого фотодиодом фототока определяется его, фотодиода, эффективной площадью, предоставляет дополнительный инструмент для проверки приведенной выше интерпретации результатов электрических измерений ВАХ дефектных и недефектных фотоэлементов матрицы. Разумно думать, что эффективный латеральный размер ПД должен существенно превышать размер рабочих фотодиодов рассматриваемых матриц (примерно 14×14 мкм при размере фотолитографического окна 10×10 мкм)

вследствие латерального растекания тока при движении электронов поперек ФП. Способом определения размера ПД является проведение экспериментов по сканированию дефектного пикселя матрицы линейным пятном засветки. Можно ожидать, что компоненты фотосигнала, соответствующие вкладам от ФД и ПД, будут проявлять различную координатную зависимость.

Нами было проведено сканирование линейным пятном засветки с поперечным размером ≈ 200 мкм (сфокусированное изображение выходной апертуры абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой 300 °С) области в окрестности дефектного и недефектного пикселей длинноволнового ($\lambda_{co} = 9,57$ мкм) матричного ФПУ формата 320×256 типа n -на- p с вакансионно-легированной фоточувствительной пленкой материала КРТ p -типа проводимости. На рис. 2 показаны профили фотосигнала $S(x)$ с одного из рабочих ($190,155$) и с одного из дефектных ($190,153$) пикселей. Увеличение положительного фотосигнала в центре профиля связано с прохождением пятна засветки по пикселю, которое приводило к увеличению (положительного) фототока этого пикселя. Отрицательный фотосигнал дефектного пикселя на периферии профилей $S(x)$ связан с наличием ПД; при этом видно, что характерная длина периферийного спада отрицательного фотосигнала составляет ~ 700 мкм. Этот размер определяется длиной латеральной релаксации локально приложенной (поперек ПД) разности потенциалов с расстоянием вдоль p - n -перехода «ФП-anti-debiasing слой». Можно показать, что длина этого спада дается выражением $l_{decay} \approx \sqrt{d / (\sigma \times \rho)}$, где $\sigma \equiv j_{\perp} / \phi$ — поперечная «проводимость» границы «ФП-легированный подслой», которая здесь принимается квазиомической (ϕ — электрический потенциал в ФП, или разница потенциалов поперек ПД в предположении, что потенциал сильнопроводящего anti-debiasing подслоя равен нулю, а j_{\perp} — плотность тока через ПД), а ρ и d — удельное сопротивление ФП и ее толщина. Действительно, рассмотрим модельную одномерную задачу о латеральной релаксации указанной разности потенциалов в двухслойной структуре, образованной двумя тонкими слоями, один из которых является сильнопроводящим слоем, а граница между слоями представляет собой область с пониженной квазиомической поперечной «проводимостью» σ . Полагая «проводимость» σ латерально однородной ($\sigma \equiv \text{const}$) и учитывая, что поперечный ток $j_{\perp} = q \times \sigma \times \phi$ представляет собой дивергенцию тока в ФП $I_{film} = q \times \rho^{-1} \times \nabla \phi \times d$, мы получаем уравнение

$$(d / (\rho \times \sigma)) \times \Delta\phi = \phi ,$$

показывающее, что $l_{decay} = \sqrt{d / (\sigma \times \rho)}$. Отсюда можно оценить сопротивление ПД. Полагая $l_{decay} \approx 700$ мкм, $\rho \approx 1,4$ Ом см (для концентрации акцепторов в ФП $N \approx 10^{16}$ см⁻³) и $d \approx 10$ мкм, получаем $\sigma \approx 0,15$ Ом⁻¹ см⁻²; сопротивление ПД постоянному току поэтому равно $(\sigma \times \pi \times l_{decay}^2)^{-1} \approx 440$ Ом. Более точная оценка для сопротивления ПД, полученная с учетом квазикруговой симметрии области растекания, дает величину ≈ 1 кОм.

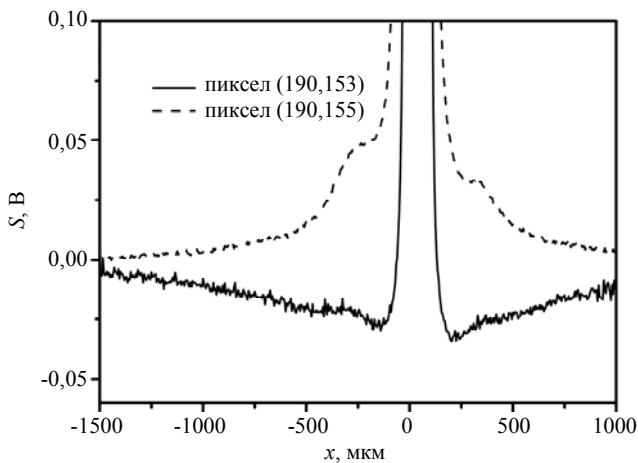


Рис. 2. Профили фотосигнала рабочего (190,155) и дефектного (190,153) пикселей при сканировании области в окрестности этих пикселей сфокусированным линейным пятном засветки с поперечным размером 200 мкм.

На рис. 3 показаны фотосигналы дефектного пикселя при аналогичном, как и на рис. 2, сканировании, но при котором для увеличения поперечного размера пятна засветки изображение выходной диафрагмы АЧТ было в большей или меньшей степени расфокусировано; в каждом реализованном случае размер пятна засветки можно оценить из рис. 3. Видно, что с увеличением поперечного размера пятна величина положительного фотосигнала в центральной части профиля уменьшается, что в основном связано с уменьшением интенсивности света в пятне и, соответственно, с уменьшением фототока (и фотосигнала) рабочих фотодиодов. В то же время часть кривой вне области пятна остается неизменной вследствие того, что эффективный размер ПД (~700 мкм) превышает размер пятна засветки, так что, говоря условно (без рассмотрения процесса диффузии носителей заряда), в этой части профиля ПД еще (частично) засвечивается, а ФД — уже нет.

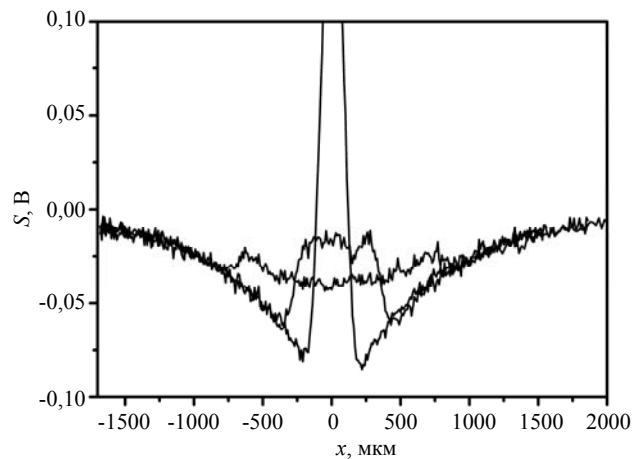


Рис. 3. Профили фотосигнала дефектного пикселя (121,98) при сканировании области в окрестности этого пикселя пятнами засветки с разным поперечным размером; варьирование поперечного размера пятна достигалось реализацией разной степени расфокусировки изображения выходной диафрагмы АЧТ.

Выводы

1. Из-за образования дополнительного *p-n*-перехода в каждой фотоэлектрической ячейке, легированный подслой *n*-типа проводимости в КРТ-фотоприемниках типа *n-на-p* приводит при освещении к появлению на паразитном диоде фотоэдс $V_{oc} \sim 10\text{—}20$ мВ (для окружающего фона ~ 300 К). Эта фотоэдс сдвигает вольт-амперные характеристики фотоэлементов на величину V_{oc} в сторону обратных смещений (по отношению к рабочим фотодиодам). На дефектных фотоэлементах с большой обратной (и прямой) проводимостью рабочих фотодиодов этот сдвиг приводит к отрицательному результирующему фототоку фотоэлектрической ячейки; соответственно, дефектные фотоэлементы ФПУ с высокой темновой проводимостью проявляют отрицательный фотосигнал.

2. Эффективный латеральный размер диода на легированном подслое для использованных ИК ФПУ составляет 500—800 мкм, что намного превышает размер фотоэлементов матрицы (~30 мкм). Поэтому при сканировании ФПУ сфокусированным пятном засветки фотосигнал с дефектных пикселей оказывается отрицательным на больших расстояниях, где доминирует фототок паразитного диода на легированном подслое. В то же время общий фотосигнал ячейки является положительным в области пятна, где доминирует обычный фототок рабочего фотодиода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vasilyev 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., and Suslyakov A. O. // *Opto-Electronic Review*. 2010. Vol. 18. No. 3. P. 236.
2. Васильев В. В., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Марчишин И. В., Михайлов Н. Н., Предеин А. В., Ремесник В. Г., Сабина И. В., Сидоров Ю. Г., Сусяков А. О. Матричные фотоприемники 320×256 со встроенным коротковолновым отрезающим фильтром, в книге: Фотоприемные устройства на основе эпитаксиальной системы кадмий-ртуть-теллур (под редакцией А. Л. Асеева). — Новосибирск, Изд-во Сибирского отделения РАН, 2012. С. 207.
3. Vasiliev V. V., Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Marchishin I. V., Mikhailov N. N., Predein A. V., Sabinina I. V., Sidorov Yu. G., Suslyakov A. O., and Aseev A. L. LWIR photodiodes and focal plane arrays based on novel HgCdTe/CdZnTe/GaAs heterostructures grown by MBE technique, in Book: *Photodiodes — From Fundamentals to Applications*, P. 331; Ilgu Yun (Ed.), — InTech, 2012.
4. Predein A. V., Sidorov Yu. G., Sabinina I. V., Vasiliev V. V., Sidorov G. Yu., and Marchishin I. V. // *Optoelectronics, Instrumentation, and Data Processing*. 2013. Vol. 49. No. 5. P. 485.
5. Предеин А. В., Марчишин И. В., Васильев В. В. // Труды XXIV Международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 24–27 мая 2016 г., Москва, Россия. С. 401.
6. Boukerche M., Reno J., Sou I. K., Hsu C., and Faurie J. P. // *Appl. Phys. Lett.* 1986. Vol. 48. P. 1733.
7. Henini M. and Razeghi M. (Eds.). *Handbook of Infrared Detection Technologies — Elsevier Advanced Technology*, Oxford-New York-Tokyo, 2002.
8. Capper P. and Garland J. W. (Eds.), *Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications*. — Wiley, 2011.
9. Vishnyakov A. V., Stuchinsky V. A., Brunev D. V., Zverev A. V., and Dvoretzky S. A. // *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 104. No. 9. P. 092112.
10. Vishnyakov A. V., Stuchinsky V. A., Brunev D. V., Zverev A. V., and Dvoretzky S. A. // *J. Appl. Phys.* 2015. Vol. 118. P. 124508.

Photoresponse of “leaking” photoelements in MCT-based photovoltaic infrared FPA photodetectors with a high-conductivity anti-debiasing sublayer

V. V. Vasiliev, A. V. Vishnyakov, S. A. Dvoretzky, A. V. Predein, I. V. Sabinina,
Yu. G. Sidorov, and V. A. Stuchinsky

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 August 1, 2016

Impact of anti-debiasing sublayer (ADS) on the photoresponse of focal plane array (FPA) elements in mercury-cadmium-tellurium based photovoltaic infrared FPA detectors is analyzed via consideration of measured current-voltage characteristics of FPA elements with “leaking” and “non-leaking” array photodiodes and spatial photoresponse profiles measured using FPA elements of both types. A most pronounced manifestation of the parasitic diode with the p–n junction at the photosensing film/ADS interface consists in the emergence of negative photoresponses produced by the “leaking” FPA elements.

PACS: 73.50.Pz; 73.61.Le; 85.60.Bt; 85.60.Gz

Keywords: 2D IR FPA detectors, mercury-cadmium-tellurium, current-voltage characteristics, spatial photoresponse profile, photodiode, anti-debiasing sublayer.

REFERENCES

1. V. V. Vasilyev, 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. Suslyakov, *Opto-Electronic Review*. **18**, 236 (2010).
2. V. V. Vasiliev, 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. Suslyakov, *320×256 IR FPA detectors with a built-in shortwave cut-off filter*, in: *Photodetectors Based on the Cadmium-Mercury-Tellurium Epitaxial System*, Ed. by A. L. Aseev (Novosibirsk, SB RAS Publishing House, 2012), pp. 207–214 [in Russian].

3. V. V. Vasiliev, V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, I. V. Marchishin, N. N. Mikhailov, A. V. Predein, I. V. Sabinina, Yu. G. Sidorov, A. O. Suslyakov, and A. L. Aseev, *LWIR photodiodes and focal plane arrays based on novel HgCdTe/CdZnTe/GaAs heterostructures grown by MBE technique*, in Book: *Photodiodes - From Fundamentals to Applications*, Ilgu Yun (Ed.), (InTech, 2012), P. 331–368.
4. A. V. Predein, Yu. G. Sidorov, I. V. Sabinina, V. V. Vasil'ev, G. Yu. Sidorov, and I. V. Marchishin // *Optoelectronics, Instrumentation, and Data Processing*. **49**, 485 (2013).
5. A. V. Predein, I. V. Marchishin, and V. V. Vasiliev, in *Proc. of XXIV International Scientific and Engineering Conference and School on Night Viewers*, (May 24–27, 2016, Moscow, Russia, P. 401–404) [in Russian].
6. M. Boukerche, J. Reno, I. K. Sou, C. Hsu, and J. P. Faurie, *Appl. Phys. Lett.* **48**, 1733 (1986).
7. M. Henini and M. Razeghi (Eds.). *Handbook of Infrared Detection Technologies* (Elsevier Advanced Technology, Oxford-New York-Tokyo, 2002).
8. P. Capper and J. W. Garland (Eds.), *Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications* (Wiley, 2011).
9. A. V. Vishnyakov, V. A. Stuchinsky, D. V. Brunev, A. V. Zverev, and S. A. Dvoretzky, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 092112 (2014).
10. A. V. Vishnyakov, V. A. Stuchinsky, D. V. Brunev, A. V. Zverev, and S. A. Dvoretzky, *J. Appl. Phys.* **118**, 124508 (2015).