

Оптический журнал

Физика полупроводников и элементы оптоэлектроники
Semiconductor physics and optoelectronics elements

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-02-67-75

УДК 535.215.1; 535.215.6

Влияние охранных сеточных диодов с плавающим потенциалом *n*-области на пространственное разрешение *n*-на-*p* линейных HgCdTe-фотоприёмников

Владимир Васильевич Васильев¹, Алексей Витальевич Вишняков²,
Ирина Викторовна Сабинина³, Георгий Юрьевич Сидоров⁴,
Виктор Андреевич Стучинский^{5✉}

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

¹vas@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-0066-7898>

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

³sabinina@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0007-0677-433X>

⁴george@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-3449-6548>

⁵stuchin@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0003-0977-2405>

Аннотация

Предмет исследования. Пространственное разрешение *n*-на-*p* линейных фотоприёмников на основе материала кадмий-ртуть-теллур, модифицированных путём введения в их структуру охранных сеточных диодов с плавающим потенциалом *n*-области. **Цель работы.** Установление характера влияния охранного сеточного диода с плавающим потенциалом *n*-области на функцию рассеяния линии и частотно-контрастную характеристику *n*-на-*p* линейных фотоприёмников. Исследование возможности использования дефектов структуры фотоприёмников для реализации непрерывного действия охранного диода как стока фотогенерированных носителей заряда. **Метод.** Для моделирования диффузии фотогенерированных носителей заряда в слое материала кадмий-ртуть-теллур исследуемых фотоприёмников используется метод Монте-Карло, а в экспериментальном изучении разрешения фотоприёмников — техника сканирования пятна засветки с последующим вычислением частотно-контрастной характеристики фотоприёмной структуры. **Основные результаты.** Показано, что присутствие охранного диода с плавающим потенциалом *n*-области в структуре *n*-на-*p* фотоприёмника приводит к уширению основания и уменьшению ширины верхней части пика функции рассеяния линии линейной фотоприёмной структуры с соответствующей модификацией её частотно-контрастной характеристики. При этом значимого улучшения разрешения фотоприёмной структуры не происходит. **Практическая значимость.** Результаты работы указывают на необходимость заземления охранных диодов в исследованных фотоприёмниках и могут быть использованы при разработке способов в оптимизации/увеличении разрешения.

Ключевые слова: охранный диод, линейный фотоприёмник, материал кадмий-ртуть-теллур, носители заряда, инжекция, функция рассеяния линии, частотно-контрастная характеристика

Ссылка для цитирования: Васильев В.В., Вишняков А.В., Сабинина И.В., Сидоров Г.Ю., Стучинский В.А. Влияние охранных сеточных диодов с плавающим потенциалом *n*-области на пространственное разрешение *n*-на-*p* линейных HgCdTe-фотоприёмников // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 67–75. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-67-75>

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

The influence of grid guard diodes with a floating *n*-region potential on the spatial resolution of *n-on-p* linear HgCdTe photodetectors

**VLADIMIR V. VASILIEV¹, ALEKSEY V. VISHNYAKOV², IRINA V. SABININA³,
GEORGIY Yu. SIDOROV⁴, VICTOR A. STUCHINSKY⁵✉**

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

¹vas@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-0066-7898>

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

³sabinina@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0007-0677-433X>

⁴george@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-3449-6548>

⁵stuchin@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0003-0977-2405>

Abstract

Subject of study. Spatial resolution of *n-on-p* linear focal-plane-array detectors based on mercury-cadmium-tellurium material and modified via introducing a grid guard diode with a floating *n*-region potential into their structure. The **aims of study** are: to establish the influence of the grid guard diode with the floating *n*-region potential on the line spread function and modulation transfer function of the linear *n-on-p* photodetectors; to study the possibility of using structural defects in the photodetectors under the study for implementing a continuous action of the guard diode as a sink for photogenerated charge carriers. **Method.** The diffusion of photogenerated charge carriers in the absorber layer of focal-plane-array detectors was modeled using the Monte Carlo method, and the experimental study of the spatial resolution of such photodetectors was performed using spot-scan measurements followed by the calculation of the modulation transfer function of photodetector structures. **Main results.** It is shown that the presence of the grid diode with the floating *n*-region potential in the structure of *n-on-p* photodetector leads to broadening of the base and to decrease of the width of the upper part of the line-spread-function peak of linear focal plane arrays with the corresponding modification of their modulation transfer function; however, on the whole no significant improvement in the resolution of the modified photodetector structure was achieved. **Practical significance.** The results of the present study indicate the need to ground the guard diodes in the studied photodetectors. These results can also be used in the development of methods for optimizing/enhancing the spatial resolution of focal-plane-array detectors.

Keywords: guard diode, linear photodetector, mercury-cadmium-tellurium material, charge carriers, injection, line spread function, modulation transfer function

For citation: Vasiliev V.V., Vishnyakov A.V., Sabinina I.V., Sidorov G.Yu., Stuchinsky V.A. The influence of grid guard diodes with a floating *n*-region potential on the spatial resolution of *n-on-p* linear HgCdTe photodetectors [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 2. P. 67–75. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-67-75>

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

ВВЕДЕНИЕ

Оптические перекрёстные помехи являются критическим параметром инфракрасных массивов фокальной плоскости (МФП), который определяет характеристики оптико-электронных систем, используемых для обнаружения небольших объектов с низким отношением сигнал/шум [1, 2]. Необходимость достижения компромисса между оптическими перекрёстными помехами и размером шага пик-

села является основным препятствием для разработки МФП-структур следующего поколения с более высоким разрешением и меньшим размером пикселя [3].

Для получения высоких значений частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) [4, 5] диодных фотоприёмников с ультрамалыми размерами пикселов и относительно низкими темновыми токами диодов требуется почти полное очерчивание рабочих диодов в МФП.

Это может быть достигнуто одним из двух способов, а именно:

1. Физически, путём изготовления мезаструктур с применением травления.

2. Электрически, за счёт использования встроенных электрических полей [6].

В случае диффузионно-ограниченного темнового тока с высокой диффузионной длиной неосновных носителей заряда требуется мезатравление. Такое травление реализуется достаточно просто, если не считать требования травления почти на всю толщину фоточувствительного слоя КРТ (около 3 мкм) с последующей пассивацией его поверхности. При этом процесс должен быть реализован в рамках геометрии сверхмалого шага. Электрическая изоляция пикселов с шагом 5 мкм с отличной ЧКХ была продемонстрирована в программе DARPA Lambda Scale Program [7] с использованием цилиндрической геометрии высокой плотности вертикально интегрированных фотодиодов.

Для линейных фотоприёмных устройств (ЛФПУ) целесообразно использование охранных стоковых диодов, поскольку характерный шаг в расположении диодов составляет 40–50 мкм. Так, для уменьшения оптических перекрестных помех в линейных МФП формата 480×6 элементов фирма AIM разработала простой и экономичный подход, заключающийся в использовании процесса имплантации бора не только для создания рабочих *p-n*-переходов, но и для формирования *n⁺*-областей в пространстве между соседними пикселями. Эти *n⁺*-области собирают фотогенерированные носители заряда (ФНЗ), тем самым уменьшая перекрёстные помехи [8]. В работе [9] представлены результаты разработки линейных ФПУ формата 480×8 элементов для длинноволновой области ИК спектра. Для уменьшения фоточувствительной площади пикселя рабочий фотодиод в таких ФПУ окружён крестообразным стоковым диодом. Размеры измеряемого активного элемента при этом составляют 26×26 мкм.

Стоковые диоды также используются и в матричных ФПУ для уменьшения фоточувствительной площади отдельных пикселов, и, соответственно, для снижения темновых токов рабочих диодов, что позволяет повысить рабочую температуру фотоприёмника и/или сдвинуть край фоточувствительности ФПУ в длинноволновую область спектра [10, 11].

Естественно предположить, что одним из способов улучшения пространственного разрешения КРТ-фотоприёмников могло бы явиться применение диодной сетки, ограничивающей площадь фоточувствительной поверхности каждого отдельного пикселя фотоприёмника. Протяжённый сеточный диод является стоком для ФНЗ, обеспечивающим частичную изоляцию соседних пикселов устройства. Такая изоляция должна приводить к улучшению пространственного разрешения фотоприёмника за счёт, однако, определённого ухудшения полезного фотосигнала.

При использовании сеточной диодной изоляции было бы желательно обеспечить стекание зарядов через заземляющую цепь. Действительно, в отсутствии такого заземления в результате зарядки ёмкости охранного диода возникающим при освещении фототоком *p-n*-переход диода будет смещаться в прямом направлении. Этот процесс приведёт (в диодной фотоприёмной структуре с архитектурой типа *n*-на-*p*) к встречной инжеекции электронов из *n*-области диода в слой КРТ *p*-типа, в результате чего после зарядки упомянутой ёмкости изолирующий диод перестанет поглощать фотоносители.

Однако при создании металлических «шин», заземляющих диодную сетку между пикселями, возникает опасность появления замыканий между такими «шинами» и индиевыми пиксельными столбиками рабочих диодов фотоприёмной структуры, что связано с малостью расстояний между упомянутыми объектами. Такие замыкания приведут к «перепутыванию» сигнальных цепей фотоприёмника с цепями диодной изоляции. Поэтому в качестве привлекательного способа создания структуры с изолирующими диодами можно рассматривать проведение имплантации для создания сеточного диода без последующего вскрытия диэлектрика и нанесения заземляющих шин. Не исключено, что отток фотоносителей с сеточного диода мог бы происходить при этом через структурные дефекты, с большой вероятностью реализующиеся на изолирующем диоде большой площади. Известно, что попадание *V*-дефектов на *p-n*-переход приводит к пробою *p-n*-перехода [12]. Типичная плотность *V*-дефектов в эпитаксиальных слоях КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии

на подложках из кремния составляет приблизительно 500 см^{-2} [13]. При суммарной площади диодной сетки $6 \times 10^{-3} \text{ см}^2$ количество попаданий V -дефектов на площадь, занятую диодом, составит около 3 шт. Исходя из этих соображений, можно ожидать, что n -области сеточных диодов будут электрически замыкаться на фоточувствительный слой посредством проводимости по V -дефектам.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального изучения и численного моделирования фотоэлектрических свойств и, в особенности, пространственного разрешения линейных фотоприёмных n -на- p КРТ-структур с диодной изоляцией пикселов и плавающим потенциалом n -области изолирующего сеточного диода.

Целью работы было установление характера влияния охранного сеточного диода с плавающим потенциалом n -области на функцию рассеяния линии и частотно-контрастную характеристику n -на- p линейных фотоприёмников, а также исследование возможности использования дефектов структуры фотоприёмников для реализации непрерывного действия охранного диода как стока фотогенерированных носителей заряда.

Результаты экспериментального исследования в работе сопоставлялись с результатами численного моделирования. Численное моделирование диффузии photoносителей по фоточувствительному слою с их рекомбинацией в этом слое и стеканием на рабочие диоды и сеточный диод проводилось методом Монте-Карло. Использованный подход к моделированию процесса диффузии ФЗН методом Монте-Карло кратко описан в работе [14].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проведения исследований, направленных на изучение влияния плавающих сеточных диодов на разрешение КРТ-ФПУ, нами было изготовлено тестовое ЛФПУ средневолнового ИК диапазона с архитектурой типа n -на- p на основе вакансационно-легированного КРТ p -типа (концентрация акцепторов $7,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$), а также с находящейся под плавающим потенциалом изолирующей диодной сеткой (без заземляющих шин). В каждом пиксельном канале фотоприёмник имел четыре рабочих диода, работающих в режиме временной задержки нако-

пления (ВЗН). Шаг пикселя ЛФПУ составлял $43 \times 56 \text{ мкм}$ (конструкция фотоприёмника без охранной сетки описана в публикации [15]). Толщина слоя КРТ была равна 6 мкм.

В изготовленном фотоприёмнике ячейки охранной сетки обрамляли каждый рабочий фотодиод устройства, как показано на рис. 1. В планарной плоскости ширина сетки сеточного диода составляла 2 либо 16 мкм. С целью уменьшения разброса измеряемых величин из-за вариации состава образцов разные ширины сеточного диода были реализованы на соседних частях одной и той же тестовой фотоприёмной структуры. Размер рабочих диодов фотоприёмника был равен 10 мкм. Изготовление изолирующих диодов фотоприёмных структур было совмещено с изготовлением их рабочих диодов. Для этого использовалась имплантация ионов бора с энергией 50 кэВ до дозы $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Измерялись профили сканирования (индивидуально каждым из четырёх диодов, составляющих регистр ВЗН) пятна

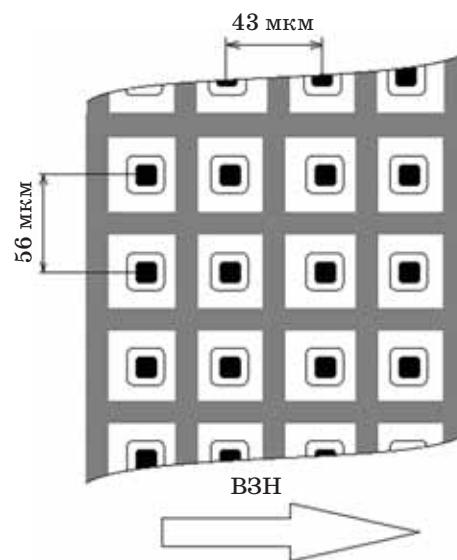


Рис. 1. Структура части тестового ЛФПУ. Чёрным цветом показаны p - n -переходы рабочих фотодиодов, квадраты большего размера — индивидуальные столбики, серым цветом показан сеточный диод. Стрелкой показано направление ВЗН

Fig. 1. Structure of part of the test linear FPA. The p - n junctions of the working FPA photodiodes are shown in black, the larger squares are In bumps, and the grid diode is shown in gray. The arrow shows the TDI direction

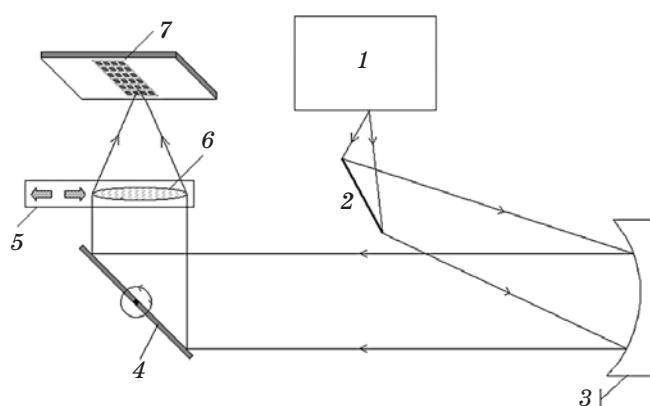


Рис. 2. Схема измерений. 1 — монохроматор, 2 — поворотное зеркало, 3 — коллиматор, 4 — сканатор, 5 — координатный столик, 6 — объектив, 7 — охлаждаемое тестируемое линейное ФПУ

Fig. 2. Experimental facility. 1 — monochromator, 2 — turning mirror, 3 — collimator, 4 — scanner, 5 — XYZ-stage, 6 — lens, 7 — cooled linear FPA

засветки, представляющего собой сфокусированное на поверхности линейного ФПУ изображение выходной щели монохроматора. Направление сканирования пятном засветки совпадает с направлением ВЗН. Первичным источником излучения являлось чёрное тело, разогретое до температуры 400 °C, а вторичным — выходная щель монохроматора. Коэффициент переноса изображения оптической схемой установки был равен 7,62. Длина волны излучения, вырезаемого монохроматором из спектра чёрного тела, составляла 4 мкм, а ширина сфокусированного изображения выходной щели монохроматора — приблизительно 8 мкм без учёта дифракции на объективе. Рабочая температура фотоприёмника была равна 110 К, а длина диффузии ФНЗ в слое КРТ, определённая из профилей сканирования фотосигнала в области ЛФПУ вдали от рабочих пикселов, — 43 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 приведено зарегистрированное ЛФПУ изображение пятна засветки. Видно, что вокруг изображения щели (имеющего форму яркой узкой полоски) возникает вертикальная подсвеченная, менее яркая, более широкая полоса, возникающая из-за влияния сеточного диода. Таким образом, основной экспериментальный результат настоящей ра-

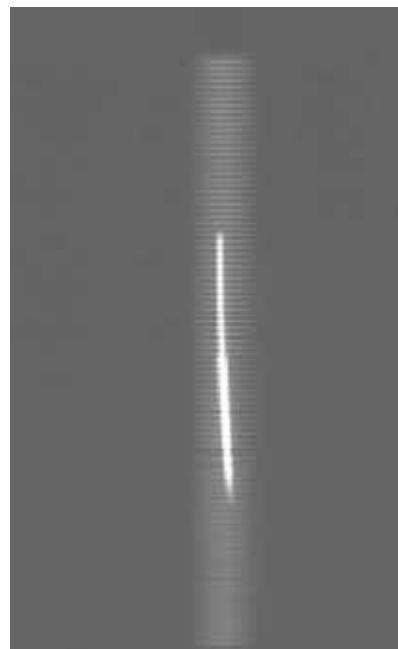


Рис. 3. Яркое вертикальное пятно — сфокусированное изображение выходной щели монохроматора. Ширина сеточного диода равна 16 мкм в верхней части рисунка и 2 мкм — в нижней; видно, что пятно является более узким для сетки шириной 16 мкм (в верхней части изображения). Менее яркая широкая вертикальная полоса — результат влияния подсветки сеточного диода

Fig. 3. The bright vertical spot is the focused image of the monochromator exit slit. The width of the grid diode is 16 μm in the upper part of the figure and 2 μm in the lower part; the spot is narrower for the 16 μm grid (at the top of the image). The less bright wide vertical strip is the result of the grid-diode illumination

боты состоит в обнаружении особенности профилей сканирования в виде уширения основания пика функции рассеяния линии (ФРЛ) [4, 5] при наличии в фотоприёмной структуре незаземлённого сеточного диода с плавающим потенциалом *n*-области.

Разумно полагать, что причиной появления этой особенности является встречная фототоку инжеекция электронов из *n*-области сеточного диода, в результате которой осуществляется эффективный транспорт ФНЗ вдоль сеточного диода в фотоприёмной структуре. Действительно, при засветке сеточный диод смещается в прямом направлении, инжектируя в слой КРТ электроны, которые частично рекомбинируют в этом слое, а также частично

поглощаются рабочими диодами. При этом потенциал на n -области сеточного диода устанавливается таким, чтобы его величина обеспечивала баланс прямого и обратного тока через диод. Инжектированные из n -области охранного сеточного диода электроны поглощаются рабочими диодами, в результате чего и возникает уширение профилей сканирования пятна засветки.

Из рис. 3 видно, что фотосигнал сеточного диода однороден по всей сетке. Это обстоятельство указывает на то, что слоевое сопротивление n^+ -области изолирующего диода имеет величину, достаточно малую для поддержания постоянного по сетке уровня прямого смещения при засветке.

На рис. 4 показаны расчётные профили ФРЛ для каждого из четырёх рабочих ВЗН-фотодиодов, а также фототок на сеточный диод. Расчётные кривые получены для случая сканирования фотоприёмной структуры бесконечно длинным узким пятном засветки. Реально засветка пятном покрывает только часть ЛФПУ, поэтому ток инжецииции прямосмешённого сеточного диода в каждой ячейке сетки меньше его входного фототока на фактор N (L/l), где N — количество диодов в регистре ВЗН, равное 4, L — вертикальный размер сетки и l — вертикальный размер пятна засветки. Наклон кривых на больших рассто-

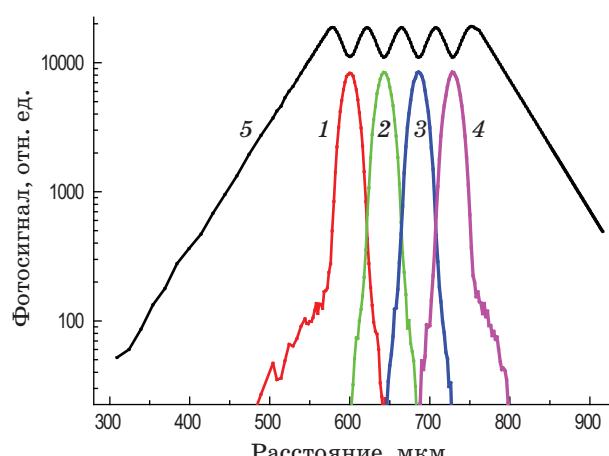


Рис. 4. Расчёт ФРЛ. $L_d = 43$ мкм. Показаны фотосигналы четырёх ВЗН-фотодиодов (кривые 1–4) и фотосигнал на сеточном диоде (кривая 5)

Fig. 4. Calculation of LSF. The diffusion length L_d is 43 μm . The figure demonstrates the photosignals of four TDI diodes (curves 1–4) and the grid-diode photosignal (curve 5)

яниях вправо и влево от крайних рабочих диодов определяется объёмной длиной диффузии в материале КРТ. Четыре локальных минимума сигнала сеточного диода в центральной части обусловлены конкурирующим захватом photoносителей на рабочие диоды.

На рис. 5 приведены результаты, иллюстрирующие влияние изолирующего диода с плавающим потенциалом n -области на разрешение фотоприёмника. Кривая 1 показывает профиль скана ФРЛ диодной фотоприёмной структуры без сеточного диода, а кривая 2 — профиль для аналогичной структуры с сеточным диодом шириной 2 мкм. Видно, что при наличии сеточного диода разрешение улучшается в области максимума профиля, но ухудшается в области уширения. Расчётная кривая фотосигнала получена суммированием четырёх сигналов пикселов, составляющих регистр ВЗН, и фотосигнала сеточного диода как описано выше. Для сравнения на рис. 5 показаны рассчитанные функции рассеяния линии фотоприёмника для следующих ситуаций: кривая 3 — сеточный диод поглощает

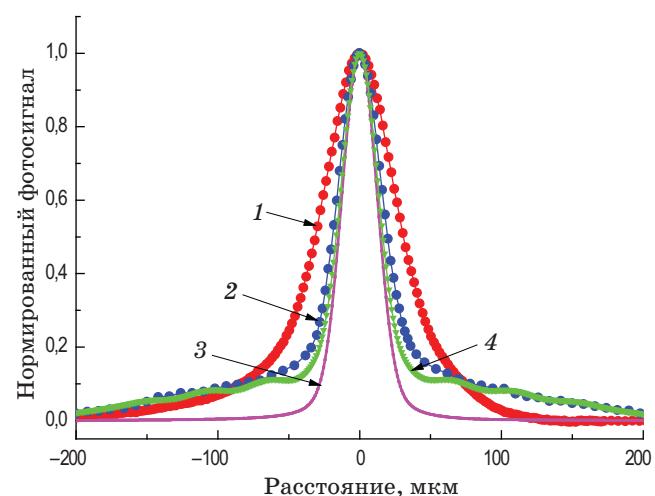


Рис. 5. Кривые сканирования ФРЛ. Кривая 1 — данные эксперимента без сеточного диода; кривая 2 — данные эксперимента с сеточным диодом 2 мкм; кривая 3 — расчёт с сеточным диодом без переиспускания тока; кривая 4 — с переиспусканением

Fig. 5. Scanned line spread functions. Curve 1 — experimental data without the grid diode; curve 2 — experimental data with 2- μm grid; curve 3 — calculated data with the grid diode without current re-emission; curve 4 — the same with current re-emission

фотоносители без инжекции носителей заряда; кривая 4 — сеточный диод поглощает фотоносили с последующей инжецией и захватом инжектированных носителей заряда рабочими диодами. Расчётная кривая 4 фотосигнала получена суммированием четырёх сигналов пикселов, составляющих регистр ВЗН, и фотосигнала сеточного диода как описано выше. По-видимому, сужение ФРЛ в верхней части профиля фотосигнала рабочего диода связано с отбором фотоносителей охранным диодом.

Измеренная высота уширенной части у основания пика ФРЛ составляет около 0,1 от максимума. Если предполагать, что весь фототок, втекающий в сеточный диод, после его

ре-эмиссии в слой КРТ р-типа поглощается в рабочих диодах, то высота уширенной части ФРЛ у её основания должна составлять приблизительно $2/(4 \times 2) = 0,25$, что даёт величину значительно выше наблюдаемой. Вероятно, часть тока сеточного диода протекает по дефектам, как это обсуждалось во введении. Для согласия с экспериментом следует считать, что доля тока, протекающего из сеточного диода в слой КРТ р-типа по дефектам, составляет примерно 60% от полного втекающего в сеточный диод фототока. Таким образом, сравнение расчёта с экспериментом приводит к выводу, что реализуется промежуточный случай сеточного диода, частично шунтированного дефектами фоточувствительного слоя.

В целом разрешение ЛФПУ с использованием плавающей сетки не улучшается, что проиллюстрировано показанными на рис. 6 вычисленными и измеренными ЧКХ рассмотренных структур. Видно, что, хотя и существует интервал пространственных частот, в котором наличие сеточного охранного диода улучшает разрешение по сравнению с немодифицированной фотоприёмной структурой, этот интервал находится в области частот с малыми значениями ЧКХ, что связано со значительным вкладом «подложки» ФРЛ в значение фурье-образа этой функции, то есть ЧКХ, на нулевой частоте.

Также на рис. 6 показана расчётная ЧКХ линейного ФПУ с сеточным диодом без переиспускания им втекающего фототока. Разрешение в этом случае достигает 13,5 штр/мм (на уровне 1/2 максимума ЧКХ) по сравнению с 5 штр/мм для исходных структур без сеточного диода.

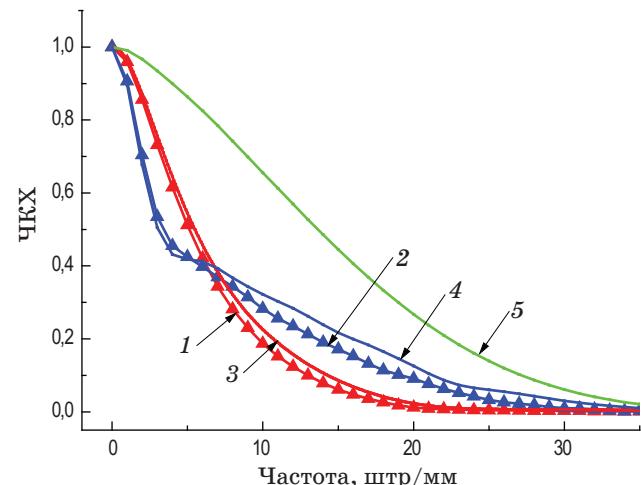


Рис. 6. ЧКХ изученных фотоприёмных структур. Кривая 1 — данные измерения на ЛФПУ без сетчатого диода; кривая 2 — данные измерения на ЛФПУ с диодной сеткой с поперечным размером дорожки 2 мкм; кривая 3 — расчёты значения для ЛФПУ без сетчатого диода, длина диффузии ФНЗ — 43 мкм; кривая 4 — расчёты значения для диодной сетки с шириной сетчатого диода 2 мкм и переиспусканем тока; кривая 5 — расчёты для структуры с сеточным диодом без переиспусканя тока

Fig. 6. Modulation transfer functions of the studied FPA structures. Curve 1 — measurement data on the linear FPA without the grid diode; curve 2 — measurement data on FPA with 2- μm wide grid diode; curve 3 — calculation data for the linear FPA without the grid diode, the diffusion length of photogenerated charge carriers is 43 μm ; curve 4 — calculation data for 2- μm wide grid diode with current re-emission; curve 5 — calculation data for 2- μm wide grid diode without current re-emission

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние охранных сеточных диодов с плавающим потенциалом *n*-области на пространственное разрешение *n*-на-*p* линейных фотоприёмников на основе материала кадмий-ртуть-теллур. Показано, что присутствие такого стокового диода в структуре фотоприёмника приводит к уширению основания и уменьшению ширины верхней части пика функции рассеяния линии фотоприёмной структуры. При этом значимого улучшения разрешения фотоприёмника не происходит.

Поскольку дефекты структуры в реальных фотоприёмниках указанного типа не могут обеспечить непрерывное действие *n*-областей охранных диодов в качестве достаточно эф-

ективных стоков для фотогенерированных носителей заряда, сделан вывод о необходимости принудительного заземления охранных диодов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рогальский А. Инфракрасные детекторы / Пер. с англ. под ред. Войцеховского А.В. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с. ISBN 5-02-032029-3.
2. Госсопр Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988. 416 с.
3. Akın O., Demir H.V. High-efficiency low-crosstalk dielectric metasurfaces of mid-wave infrared focal plane arrays // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 110. P. 143106. <https://doi.org/10.1063/1.4979664>
4. 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>
5. 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>
6. Kinch M.A. The future of infrared; III-Vs or HgCdTe? // J. Electron. Mater. 2015. V. 44. P. 2969–2976. <https://doi.org/10.1007/s11664-015-3717-5>
7. Armstrong J.M., Skokan M.R., Kinch M.A., Luttmer J.D. HDVIP five-micron pitch HgCdTe focal plane arrays // Proc. SPIE. 2014. V. 9070. P. 907033-1. <https://doi.org/10.1117/12.2053286>
8. Ziegler J., Bruder M., Finck M., Kruger R., Menger P., Simon Th., Wollrab R. Advanced sensor technologies for high performance infrared detectors // Infrared Physics & Technology. 2002. V. 43. P. 239–243. [https://doi.org/10.1016/S1350-4495\(02\)00146-9](https://doi.org/10.1016/S1350-4495(02)00146-9)
9. Kobayashi M., Wada H., Okamura T., Kudo J., Tanikawa K., Hikida S., Miyamoto Y., Miyazaki S., Yoshida Y. 480×8 hybrid HgCdTe infrared focal plane arrays for high-definition television format // Opt. Eng. 2002. V. 41. № 8. P. 1876–1885. <https://doi.org/10.1117/1.1486460>
10. Gassmann K.U., Eich D., Fick W., Figgemeier H., Hanina S., Thöt R. Low dark current MCT-based focal plane detector arrays for the LWIR and VLWIR developed at AIM // Proc. SPIE 9639, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIX. 96390P (14 October 2015). <https://doi.org/10.1117/12.2194776>
11. Tennant W.E., Gulbransen D.J., Roll A., Carmody M., Edwall D., Julius A., Dreiske P., Chen A., Mclevige W., Freeman S., Lee D., Cooper D.E., Piquette E. Small-pitch HgCdTe photodetectors // J. Electron. Mater. 2014. V. 43. № 8. P. 3041–3046. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3192-4>
12. Arias J.M., Zandian M., Bajaj J., Pasko J.G., Bubulac L.O., Shin S.H., De Wames R.E. Molecular beam epitaxy HgCdTe growth-induced void defects and their effect on infrared photodiodes // J. Electron. Mater. 1995. V. 24. № 5. P. 521–524. <https://doi.org/10.1007/BF02657957>
13. Варавин В.С., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Ремесник В.Г., Сабинина И.В., Сидоров Ю.Г., Швец В.А., Якушев М.В., Латышев А.В. Современное состояние и перспективы молекулярно-лучевой эпи-
- REFERENCES
1. Rogalski A. Infrared detectors. Second edition. Boca Raton: CRC Press, 2010. 898 p.
2. Gaussorgues G. La thermographie infrarouge: principes-technologie-applications. Paris: Lavoisier, 1984. 481 p.
3. Akın O., Demir H.V. High-efficiency low-crosstalk dielectric metasurfaces of mid-wave infrared focal plane arrays // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 110. P. 143106. <https://doi.org/10.1063/1.4979664>
4. 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>
5. 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>
6. Kinch M.A. The future of infrared; III-Vs or HgCdTe? // J. Electron. Mater. 2015. V. 44. P. 2969–2976. <https://doi.org/10.1007/s11664-015-3717-5>
7. Armstrong J.M., Skokan M.R., Kinch M.A., Luttmer J.D. HDVIP five-micron pitch HgCdTe focal plane arrays // Proc. SPIE. 2014. V. 9070. P. 907033-1. <https://doi.org/10.1117/12.2053286>
8. Ziegler J., Bruder M., Finck M., Kruger R., Menger P., Simon Th., Wollrab R. Advanced sensor technologies for high performance infrared detectors // Infrared Physics & Technology. 2002. V. 43. P. 239–243. [https://doi.org/10.1016/S1350-4495\(02\)00146-9](https://doi.org/10.1016/S1350-4495(02)00146-9)
9. Kobayashi M., Wada H., Okamura T., Kudo J., Tanikawa K., Hikida S., Miyamoto Y., Miyazaki S., Yoshida Y. 480×8 hybrid HgCdTe infrared focal plane arrays for high-definition television format // Opt. Eng. 2002. V. 41. № 8. P. 1876–1885. <https://doi.org/10.1117/1.1486460>
10. Gassmann K.U., Eich D., Fick W., Figgemeier H., Hanina S., Thöt R. Low dark current MCT-based focal plane detector arrays for the LWIR and VLWIR developed at AIM // Proc. SPIE 9639, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIX. 96390P (14 October 2015). <https://doi.org/10.1117/12.2194776>
11. Tennant W.E., Gulbransen D.J., Roll A., Carmody M., Edwall D., Julius A., Dreiske P., Chen A., Mclevige W., Freeman S., Lee D., Cooper D.E., Piquette E. Small-pitch HgCdTe photodetectors // J. Electron. Mater. 2014. V. 43. № 8. P. 3041–3046. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3192-4>
12. Arias J.M., Zandian M., Bajaj J., Pasko J.G., Bubulac L.O., Shin S.H., De Wames R.E. Molecular beam epitaxy HgCdTe growth-induced void defects and their effect on infrared photodiodes // J. Electron. Mater. 1995. V. 24. № 5. P. 521–524. <https://doi.org/10.1007/BF02657957>
13. Varavin V.S., Dvoretskii S.A., Mikhailov N.N., Remesnik V.G., Sabinina I.V., Sidorov Yu.G., Shvets V.A., Yakushev M.V., Latyshev A.V. Molecular beam epitaxy of CdHgTe: Current state and horizons // Optoelectron.

- таксии CdHgTe // Автометрия. 2020. Т. 56. № 5. С. 12–26. <http://dx.doi.org/10.15372/AUT20200502>
14. 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. М.: НПО «Орион», Издательство «ОФСЕТ МОСКВА», 2018. С. 430–433.
15. Vasiliev V.V., Predein A.V., Varavin V.S., Mikhailov N.N., Dvoretskii S.A., J.V. Gumenjuk-Sichevska, Golennkov O.G., Reva V.P., Sabinina I.V., Sidorov Yu.G., Susliakov A.O., Sizov F.F., Aseev A.L. Linear HgCdTe IR FPA 288×4 with bidirectional scanning // Opto-Electronics Review. 2010. V. 18. № 3. P. 332–337. <https://doi.org/10.2478/s11772-010-1021-z>
- Instrum. Data Process. 2020. V. 56. Iss. 5. P. 456–469. <https://doi.org/10.3103/S8756699020050143>
14. 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. M.: Orion Scientific and Production Association. OFSET Publishing House, 2018. P. 430–433.
15. Vasiliev V.V., Predein A.V., Varavin V.S., Mikhailov N.N., Dvoretskii S.A., J.V. Gumenjuk-Sichevska, Golennkov O.G., Reva V.P., Sabinina I.V., Sidorov Yu.G., Susliakov A.O., Sizov F.F., Aseev A.L. Linear HgCdTe IR FPA 288×4 with bidirectional scanning // Opto-Electronics Review. 2010. V. 18. № 3. P. 332–337. <https://doi.org/10.2478/s11772-010-1021-z>

АВТОРЫ

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

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

Ирина Викторовна Сабинина — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 6602436703; <https://orcid.org/0009-0007-0677-433X>; sabinina@isp.nsc.ru

Георгий Юрьевич Сидоров — канд. физ.-мат. наук, зам. директора института, зав. лабораторией, Институт физики полупроводников СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 17435706500; <https://orcid.org/0000-0002-3449-6548>; george@isp.nsc.ru

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

Статья поступила в редакцию 28.09.2023

Одобрена после рецензирования 16.10.2023

Принята к печати 29.12.2023

AUTHORS

Vladimir V. Vasiliev — PhD, 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

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

Irina V. Sabinina — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 6602436703; <https://orcid.org/0009-0007-0677-433X>; sabinina@isp.nsc.ru

Georgiy Yu. Sidorov — PhD in Physics and Mathematics, Deputy Director, Head of Laboratory, Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 17435706500; <https://orcid.org/0000-0002-3449-6548>; george@isp.nsc.ru

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

The article was submitted to the editorial office 28.09.2023

Approved after review 16.10.2023

Accepted for publication 29.12.2023