

УДК 535.016

ДЕТЕКТОР ИЗЛУЧЕНИЯ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА, СОВМЕЩЕННОГО С БАРЬЕРНО-ДИОДНОЙ InAsSb/AlSb ГЕТЕРОСТРУКТУРОЙ

В. С. Кривобок, М. А. Шевченко

На основе численного моделирования в рамках метода конечных элементов разработан дизайн гибридного фотоприемного устройства среднего ИК диапазона, в котором падающее электромагнитное излучение конвертируется в локализованные поверхностные плазмоны, выступающие в роли посредника для передачи возбуждения в полупроводниковую часть детектора. Ближнее поле поверхностных плазмонов позволяет использовать тонкие поглощающие слои InAsSb, обеспечивая подавление диффузионной компоненты темнового тока, связанных с ним шумов, и повышать квантовую эффективность. Разработанный дизайн, учитывающий особенности реального технологического процесса, адаптирован для создания ИК детекторов, допускающих матричное исполнение и обладающих высокой обнаружительной способностью при температурах, доступных для каскадных элементов Пельтье.

Ключевые слова: фотонный кристалл, плазмонный резонанс, гетероструктура, ИК детектор.

Введение. В современной литературе активно обсуждаются детекторы ИК излучения, в которых падающее излучение сначала преобразуется в поверхностную электромагнитную волну, которая затем поглощается полупроводниковой гетероструктурой, см. напр., [1, 2]. Данный подход подразумевает разработку гибридных систем на основе фотонно-кристаллического резонатора (ФКР), совмещенного с полупроводниковым фоточувствительным элементом. Сочетание поглотителя на основе барьерно-диодной

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: mishev87@mail.ru.

структуры (xVn в англоязычной литературе) с резонаторным вводом излучения обеспечивает не только радикальное повышение чувствительности и/или рабочей температуры фотоприемных устройств (ФПУ), но и реализацию систем с селективной чувствительностью к поляризации детектируемого излучения.

Увеличение чувствительности гибридных ФПУ достигается за счет двух основных факторов. Использование xVn архитектуры ФПУ позволяет радикально подавить генерационно-рекомбинационные процессы и связанный с ними темновой ток [3]. В результате основной вклад в шумы дает диффузионная компонента темнового тока, которая прямо пропорциональна толщине фоточувствительной области. В обычном исполнении уменьшение толщины фоточувствительной области нецелесообразно, так как приводит к уменьшению поглощения и падению квантовой эффективности (КЭ). В то же время, использование ФКР позволяет достичь приемлемого поглощения в сравнительно тонких поглощающих слоях. Это обеспечивает резкое подавление диффузионного тока и уменьшение связанных с ним шумов при сохранении КЭ на надлежащем уровне.

Предложенные в литературе дизайны гибридных ФПУ достаточно сложны для реализации [1, 2], требуют электронной литографии высокого разрешения и обычно исключают (или сильно осложняют) переход к матричному исполнению. Основной целью данной работы является разработка гибридного ФПУ для спектрального диапазона 3–4.5 мкм с упрощенным дизайном, который, с одной стороны, не требует электронной литографии высокого разрешения, а с другой стороны, допускает переход к матричному исполнению массива фоточувствительных элементов.

Общий дизайн и потенциальный технологический маршрут. Для реализации полупроводниковой части гибридного ФПУ нами была выбрана nVn архитектура, реализуемая в системе $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{AlSb}$. Эта система, соответствующая семейству полупроводников из группы “6.1A”, позволяет получать фоточувствительные гетероструктуры (ГС) с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии [3, 4]. Для роста $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{AlSb}$ ГС удобно использовать прозрачную в диапазоне 3–5 мкм GaSb подложку, а состав поглощающего слоя $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x = 0.1$) согласовывать с ней по постоянной решетки. В этом случае длинноволновая граница чувствительности ФПУ будет расположена в районе $\lambda_e = 4.5$ мкм [5]. Подходящим материалом для реализации барьерного слоя является AlSb. ГС $\text{InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}/\text{AlSb}/\text{InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$ формирует потенциальный барьер в зоне проводимости высотой приблизительно 1 эВ, в то же время скачок потенциала в валентной зоне остается сравнительно небольшим. Таким образом, при n-легировании слоев

$\text{InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$ реализуется барьерно-диодная структура nVn типа. Облучение такой ГС излучением с длиной волны $\lambda < \lambda_e$ приводит к появлению неосновных носителей (дырок), которые и формируют фотоотклик ввиду отсутствия барьера в валентной зоне. Описанная архитектура позволяет радикально подавить генерационно-рекомбинационные шумы, связанные с механизмом Шокли–Рида–Холла [3]. В результате шумы ФПУ в основном определяются диффузионной компонентой темнового тока.

Подавление диффузионной компоненты темнового тока в описанной выше nVn структуре достигается уменьшением ее толщины. Но уменьшение толщины поглощающего слоя до значений, заметно меньших α^{-1} , где $\alpha \sim 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ – коэффициент поглощения InAsSb вблизи края поглощения, приведет, очевидно, к резкому уменьшению КЭ. Тем не менее, толщину поглощающей пленки все же можно уменьшить, если реализовать поглощение через ближнее поле поверхностного плазмон-поляритона, распространяющегося вдоль металлической пленки на поверхности ГС [6, 7]. В свою очередь, для эффективной конверсии внешнего электромагнитного поля в поверхностные волны металлическое покрытие должно быть микроструктурированным, чтобы снять известные ограничения. При этом характерный размер микроструктур определяется длиной волны поверхностного плазмон-поляритона в необходимом спектральном диапазоне.

Сказанное выше определяет общую схему гибридного ФПУ. Рис. 1(а) иллюстрирует примерный дизайн микроструктурированной поверхности, формирующий ФКР. Данный ФКР позволяет конвертировать плоскую волну, распространяющуюся со стороны подложки, в поверхностный плазмон-поляритон. Для создания ФКР целесообразно использовать германий, наносимый на поверхность ГС с помощью магнетронного или электронно-лучевого напыления в комбинации с металлической пленкой Ti/Au (см. далее). Выбор германия определяется тем, что (1) данный материал в диапазоне 3–4.5 мкм является прозрачным и имеет показатель преломления, близкий к GaSb и $\text{InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$; (2) допускает получение сравнительно качественных кристаллических пленок методом резистивного или магнетронного напыления; (3) для формирования германиевых микроструктур, формирующих основу ФКР, может быть использован травитель, слабо воздействующий на $\text{InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$.

Рис. 1(б) иллюстрирует срез полупроводниковой nVn ГС $\text{InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}/\text{AlSb}/\text{InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$ с фрагментом ФКР на ее поверхности. Характерные длины волн поверхностных поляритонов на границе Ge/Au в обсуждаемом спектральном диапазоне, оцененные с использованием известных формул [8], порядка 1–2 мкм. Данная величина

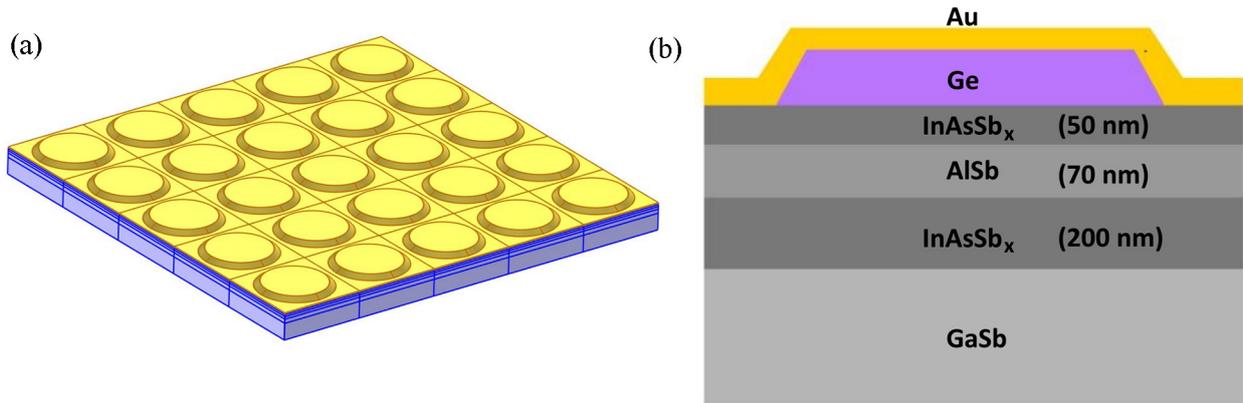


Рис. 1: (а) эскиз внешнего вида ФПУ с ФКР, нанесённым на поверхность ГС. Регистрируемое излучение распространяется со стороны подложки; (б) схематичное изображение среза ФПУ в виде ГС из полупроводниковых слоев с ФКР из германия и пленки золота.

является грубой оценкой периода ФКР, т. е. расстояния между осями конусов. В свою очередь, затухание ближнего поля в германии для поляритона, распространяющегося вдоль границы Ge/Au, составляет несколько сотен нанометров. Это позволяет оценить толщину поглощающего слоя в полупроводниковой ГС. Отметим, что важной технической деталью общего дизайна, представленного на рис. 1(б), является возможность использования пленки Ti/Au, в том числе, для формирования омического контакта к полупроводниковой ГС. Нижний контакт аналогично стандартным полупроводниковым ФПУ реализуется с помощью формирования заглубленного слоя n -InAs_{0.9}Sb_{0.1} [3]. Для оптимизации описанного выше дизайна ФПУ необходимо численное моделирование, результаты которого приведены в следующем разделе.

Результаты моделирования и обсуждение. Моделирование ГС с нанесенным на ее поверхность двумерным ФКР осуществлялось методом конечных элементов (МКЭ). Частотная зависимость комплексного показателя преломления различных материалов бралась из известных баз данных [9]. Комплексный показатель преломления твердого раствора InAs_{0.9}Sb_{0.1}, по составу близкого к InAs, был получен путем сдвига характерных для InAs частотных зависимостей на разницу запрещенной зоны InAs и InAs_{0.9}Sb_{0.1}. Было выполнено трехмерное моделирование с периодическими граничными условиями, примененными для границ элементарной ячейки. Общий дизайн структуры соответствовал представленному на рис. 1. В процессе моделирования менялись параметры ФКР – размеры штырьков в форме усеченных конусов из германия и слоя золота на

его поверхности. Выбор формы штырьков в виде конуса определяется особенностями технологического процесса – при формировании периодической структуры неизбежно происходит растравливание “в бок”, что приводит к границе, ориентированной под углом $30\text{--}50^\circ$ к нормали. Толщина поглощающего слоя $\text{InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$ оставалась фиксированной и составляла 50 нм. Остальные параметры ГС не оказывают заметного влияния на ближнепольную передачу возбуждения, поэтому их оптимизация происходит из соображений наиболее эффективного подавления генерационно-рекомбинационной компоненты темнового тока.

В процессе моделирования рассчитывались пространственное распределение напряженности электромагнитного поля и поглощенная в слое $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, а также в слое золота, мощность излучения.

Т. к. длина диффузии носителей ~ 5 мкм в диапазоне температур 78–150 К [10, 11] превышает толщину поглотителя в нашей структуре на два порядка, предполагается, что в итоге собираются все фотогенерированные носители. Поэтому внутреннюю КЭ устройства мы рассчитываем, как отношение поглощенной в полупроводниковом слое мощности к падающей на структуру снизу вверх.

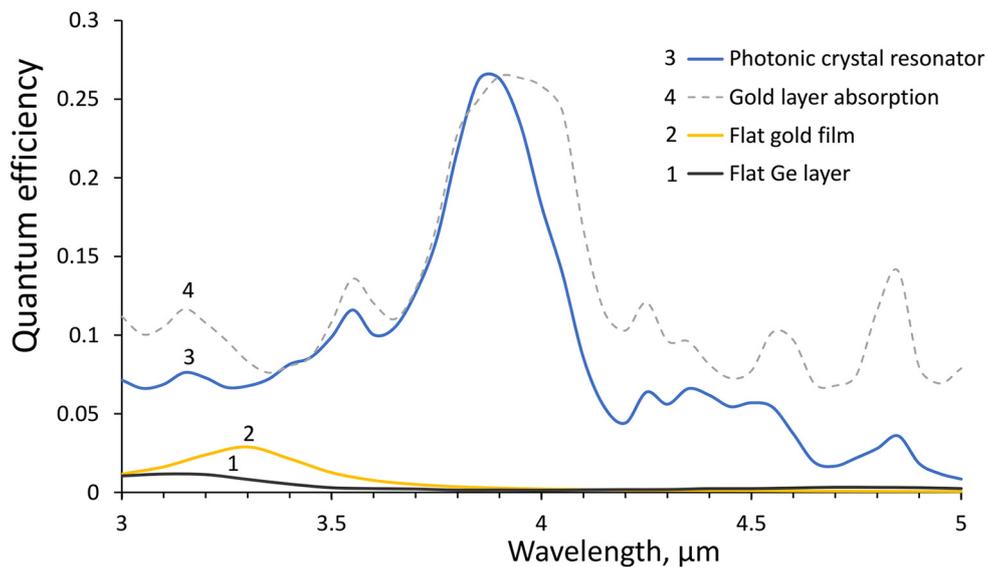


Рис. 2: КЭ для датчика с однородным плоским слоем золота, германия и с ФКР на поверхности ГС. Пунктиром отмечено поглощение золотого слоя ФКР. Параметры ФКР: радиус нижней грани усеченного конуса 1.8 мкм, угол при основании конуса 50 градусов, высота слоя Ge – 200 нм, период – 3.8 мкм, толщина слоя золота – 20 нм.

На рис. 2 показаны результаты моделирования КЭ. Расчет КЭ приведен для ФПУ только с однородной плоской пленкой золота толщиной 20 мкм (кривая 2), ФПУ только с однородной пленкой Ge толщиной 200 мкм (кривая 1), ФПУ с микроструктурированным Ge покрытием и золотой пленкой толщиной 20 нм, расположенной сверху (кривая 3). В последнем случае были выбраны параметры ФКР, близкие к оптимальным: радиус нижней грани усеченного конуса 1.8 мкм, угол при основании конуса 50 градусов, высота слоя Ge – 200 нм, период ФКР – 3.8 мкм, толщина слоя золота – 20 нм. Как видно из рис. 2, использование однородных покрытий ожидаемо не приводит к заметному увеличению КЭ, в то время как использование микроструктурированного покрытия позволяет резко увеличить КЭ. В частности, для длины волны 3.9 мкм КЭ увеличилась на два порядка. При этом зависимость КЭ от длины волны носит сложный осциллирующий характер. Данная зависимость коррелирует со спектром поглощения золотой плёнки ФКР (пунктирная кривая 4), что подтверждает связь осцилляций КЭ с плазмонными модами ФКР.

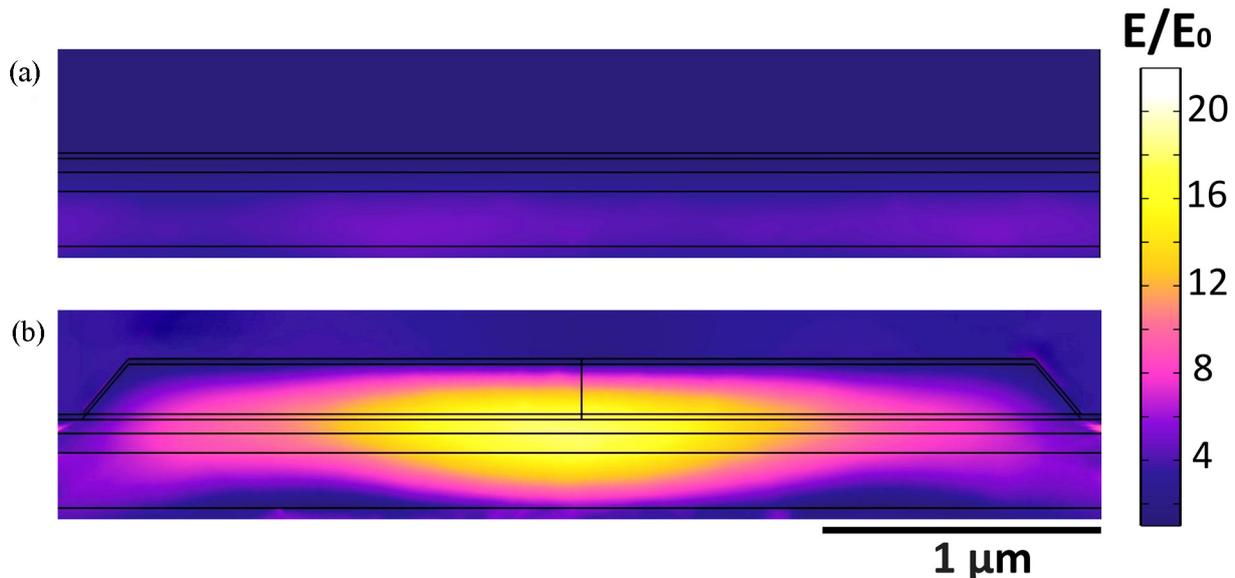


Рис. 3: Распределение напряженности поля для излучения на длине волны 3.9 мкм внутри структуры для плоского слоя золота на поверхности (а) и ФКР (b). Параметры ФКР соответствуют таковым для синей кривой на рис. 2.

На рис. 3 показано распределение усиления напряженности поля для излучения на длине волны 3.9 мкм внутри структуры для плоского слоя золота на поверхности ГС (а) и плазмонной решетки (b), параметры которой соответствуют синей кривой на рис. 2.

При наличии ФКР наблюдается локальное возрастание напряженности, свидетельствующее о наличии ближнего поля поверхностного плазмона. Размещение тонкого поглощающего слоя $\text{InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$ в этой области позволяет добиться передачи возбуждения от плазмона в ФПУ, увеличивая таким образом КЭ.

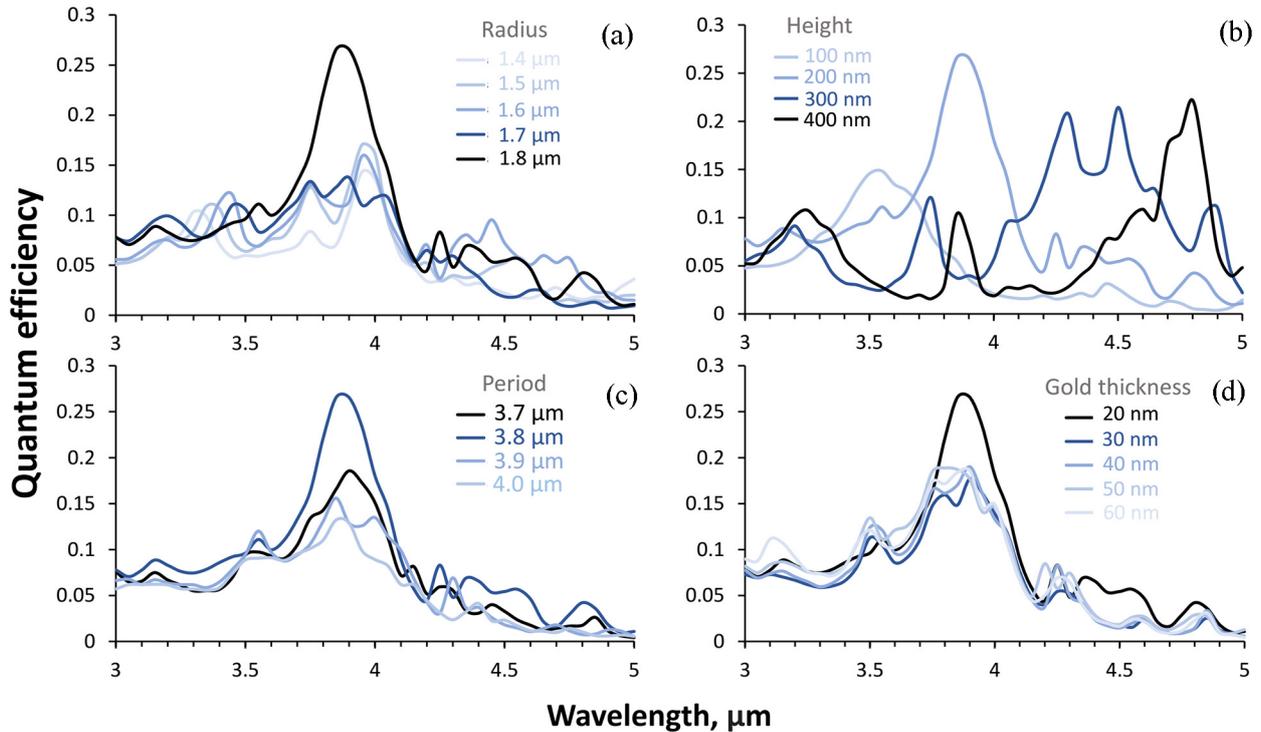


Рис. 4: КЭ ФПУ для различного радиуса цилиндра, формирующего ФКР (a), его высоты (b), периода ФКР (c) и толщины слоя золота (d). Прочие параметры ФКР в каждом случае соответствуют таковым для синей кривой на рис. 2.

На рис. 4 показано влияние на КЭ таких параметров ФКР, как толщина слоя золота, радиус штырька, его высота и период решетки. Видно, что зависимости КЭ от длины волны чувствительны к изменениям каждого из параметров. Данный эффект является следствием перестройки модовой структуры ФКР при изменении его геометрии. Тем не менее, КЭ осциллирует на фоне существенной постоянной составляющей, свидетельствующей о том, что резкое увеличение КЭ происходит для каждой длины волны в диапазоне 3–4.5 мкм. Таким образом, представленные на рис. 4 расчетные данные, позволяют утверждать, что выбранный дизайн ФПУ с ФКР пригоден для создания тонкопленочных детекторов ИК излучения, работающих в сравнительно широком диапазоне 3–4.5 мкм. Отметим, что из данных, представленных на рис. 4, следует, что

спектральная зависимость КЭ от длины волны существенно перестраивается при изменении толщины слоя Ge. Тем не менее, именно этот параметр может контролироваться с высокой точностью (порядка 1%) при использовании стандартных установок резистивного, магнетронного или электронно-лучевого напыления. Флуктуации остальных параметров ФКР (по отношению к величинам, соответствующих синей кривой на рис. 2) не оказывают столь существенного влияния на спектральную зависимость КЭ. Это, в том числе, касается угла при основании усеченного конуса, который определяется режимом травления Ge пленки. Иначе говоря, для достижения высокой КЭ для каждой длины волны в диапазоне 3–4.5 мкм нет необходимости в высокой точности контроля таких параметров ФКР как латеральные размеры усеченного конуса, его возможная эллиптичность, период ФКР и др. Это означает, что используемый для передачи возбуждения ФКР может быть реализован без использования электронной литографии высокого разрешения.

В заключение приведем грубые оценки рабочей температуры для описанного выше гибридного ФПУ. ИК детекторы на основе nVn ГС $\text{InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}/\text{AlSb}/\text{InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$ демонстрируют удельную обнаружительную способность на уровне 10^{-10} при температуре ~ 150 К [5]. Уменьшение толщины поглощающего слоя приблизительно на 2 порядка, вполне реализуемое за счет описанного выше гибридного дизайна ФПУ, приведет к пропорциональному уменьшению темнового тока (имеется в виду диффузионная компонента J_{dif} , генерационно-рекомбинационная подавляется барьерно-диодной архитектурой ФПУ). В свою очередь, диффузионный ток $J_{\text{dif}} \sim L \cdot \exp(-Eg/kT)$, где Eg – ширина запрещенной зоны, T – температура ФПУ, L – ширина поглощающего слоя, k – постоянная Больцмана [12]. Таким образом, уменьшение L в n раз позволяет сохранить J_{dif} на прежнем уровне при увеличении температуры до $T^* = T \cdot [1 - kT \ln(n)/Eg]^{-1}$. Для $T = 150$ К, $Eg = 0.275$ eV, $n = 100$ характерное значение температуры T^* достигает 192 К. Охлаждение ФПУ до данной температуры может быть реализовано без использования микрокриогенных машин с помощью каскадных элементов Пельтье.

К еще одному достоинству выбранного технологического маршрута относится возможность исполнения ФПУ в виде матрицы или линейки. Это обеспечивается тем, что пленка Ti/Au, касающаяся полупроводниковой ГС, играет роль контакта к выбранной области. Размером и количеством таких контактных областей несложно управлять, используя литографию в сочетании с травлением покрытия Ti/Au. Монтаж подготовленных таким образом контактных областей к интегральной схеме считывания обес-

печивает масштабируемую технологию изготовления многоканальных ФПУ, совмещенных с ФКР.

Таким образом, с помощью МКЭ проведено численное моделирование гибридного ФПУ, представляющего собой описанный ФКР, совмещенный с поглощающей свет барьерно-диодной ГС. Дизайн ФПУ, подразумевающий передачу возбуждения через ближнее поле поверхностных поляритонов, подобран так, чтобы сохранить возможность изготовления массива фоточувствительных элементов матричного типа.

Показано, что использование ФКР позволяет при толщине поглощающего полупроводникового слоя 50 нм получить квантовую эффективность на уровне 0.25–0.27. В свою очередь, сочетание барьерно-диодной архитектуры поглощающего слоя с его малой толщиной создаёт предпосылки для радикального снижения объемных токов утечки ФПУ, определяемых генерационно-рекомбинационной и диффузионной компонентами. Последнее играет решающее значение для создания матричных ФПУ с длинноволновой границей чувствительности ~ 4.5 мкм, работающих при температурах, доступных для каскадных элементов Пельтье.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-79-30086).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] J. Jeon, Y. Seo, V. M. More, et al., *Materials Today Nano* **18**, 100221 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2022.100221>.
- [2] P. Petluru, A. J. Muhowski, A. Kamboj, et al., *Applied Physics Letters* **122**(2), 021101 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0131628>.
- [3] A. Rogalski, P. Martyniuk, M. Kopytko, *Applied Physics Reviews* **4**(3), 031304 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4999077>.
- [4] В. С. Кривобок, Д. А. Пашкеев, А. В. Клековкин и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **50**(9), 51 (2023). <https://doi.org/10.3103/S1068335623090051>.
- [5] Philip Klipstein, Olga Klin, Steve Grossman, et al., *Proc. SPIE* **8012**, *Infrared Technology and Applications XXXVII*, 80122R (2011). <https://doi.org/10.1117/12.883238>.
- [6] А. В. Мекшун, С. С. Моритака, А. Д. Кондорский, В. С. Лебедев, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **47**(9), 34 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068335620090031>.
- [7] S. I. Kudryashov, P. A. Danilov, A. P. Porfirev, et al., *Applied Surface Science* **484**, 948 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.048>.

- [8] R. A. M. Lameirinhas, J. P. N. Torres, A. Baptista, M. J. M. Martins, *IEEE Photonics Journal* **14**(4), 1 (2022). DOI: 10.1109/JPHOT.2022.3181967.
- [9] <http://www.matprop.ru>.
- [10] C. A. Affouda, S. Tomasulo, J. A. Nolde, et al., *Applied Physics Letters* **110**(18), 181107 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4982651>.
- [11] R. J. Egan, V. W. L. Chin, T. L. Tansley, *Solid state communications* **93**(7), 553 (1995). [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(94\)00838-4](https://doi.org/10.1016/0038-1098(94)00838-4).
- [12] S. Maimon, G. W. Wicks, *Applied Physics Letters* **89**(15), 151109 (2006). <https://doi.org/10.1063/1.2360235>.

Поступила в редакцию 22 августа 2024 г.

После доработки 26 октября 2024 г.

Принята к публикации 30 октября 2024 г.