

УДК 621.383.4/5

PACS: 07.57.Kp, 85.60.Dw

Фотоприёмное устройство на основе матрицы nVn -фотодиодов, чувствительных в спектральном диапазоне 3–5 мкм

В. Б. Куликов, Д. В. Маслов, А. Р. Сабиров, А. Б. Барабанов, Н. И. Кацавец,
В. П. Чалый, И. В. Шуков

Представлены результаты разработки матричного фотоприёмного устройства (ФПУ) с фотоприёмником на основе nVn -фотодиодов, обладающих чувствительностью в спектральном диапазоне 3–5 мкм. Структуры для изготовления nVn -фотодиодов с активным слоем $InAs_{1-x}Sb_x$ и барьерным слоем $AlAs_{1-y}Sb_y$ выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaSb. Матричный фотоприёмник имел формат 640×512 элементов с шагом 20 мкм. Показано, что разработанное ФПУ может обеспечивать достижение требуемых пороговых характеристик чувствительности при повышенных рабочих температурах. Достигнутое значение эквивалентной шуму разности температур составило около 0,02 К при температуре фотоприёмника не ниже 130 К.

Ключевые слова: ФПУ, nVn -фотодиод, матричный фотоприёмник, мультиплексор, корпус-криостат, микрокриогенная система.

Ссылка: Куликов В. Б., Маслов Д. В., Сабиров А. Р., Барабанов А. Б., Кацавец Н. И., Чалый В. П., Шуков И. В. // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 27.

Reference: V. B. Kulikov, D. V. Maslov, A. R. Sabirov, A. B. Barabanov, N. I. Katsavets, V. P. Chaly, and I. V. Shukov, Applied Physics, No. 3, 27 (2020).

Введение

Многолетние исследования и разработки фотоприёмных устройств (ФПУ), предназна-

ченных для формирования изображений в спектральном диапазоне 3–5 мкм, привели к тому, что сегодня решение большинства задач тепловидения в указанном диапазоне может быть осуществлено наилучшим образом с помощью приборов на основе HgCdTe и InSb [1]. Тем не менее, поиск новых фоточувствительных материалов и разработка связанных с ними технологий, обеспечивающих создание ФПУ с более компактными весогабаритными и менее затратными энергетическими характеристиками, продолжается. Одним из таких направлений является разработка ФПУ на основе XVn -фотодиодных структур. Основной отличительной особенностью конструкции XVn -фотодиода является использование в его активной части барьерных слоев, выполняющих одновременно несколько важных функций. Во-первых, барьерные слои подавляют движение основных носителей тока в активном слое диодов, тогда как для неосновных носителей они значительных препятствий

Куликов Владимир Борисович¹, нач. отдела, д.т.н.

Маслов Дмитрий Вадимович¹, нач. лаборатории, к.ф.-м.н.

Сабиров Алексей Рашидович¹, вед. инженер.

Барабанов Антон Борисович¹, вед. инженер.

Кацавец Николай Иванович², главный конструктор направления, к.ф.-м.н.

Чалый Виктор Петрович², генеральный директор, к.ф.-м.н.

Шуков Иван Викторович², инженер-аналитик.

¹ АО «ЦНИИ «Циклон».

Россия, 107497, Москва, Щелковское ш., 77.

E-mail: v.kulikov@cyclone-jsc.ru

² АО «Светлана-Рост».

Россия, 194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, 27.

Статья поступила в редакцию 22 мая 2020 г.

© Куликов В. Б., Маслов Д. В., Сабиров А. Р., Барабанов А. Б., Кацавец Н. И., Чалый В. П., Шуков И. В., 2020

не создают. Во-вторых, барьерный слой существенным образом снижает вклад туннельных и поверхностных токов утечки, часто являющихся проблемой в диодах на основе узкозонных материалов. В-третьих, введение барьера позволяет избежать образования в активном слое обедненной области, обычно возникающей в $p-n$ -переходах, и тем самым подавить генерационно-рекомбинационную (ГР) составляющую темнового тока, благодаря чему суммарный темновой ток при заданной температуре может быть существенно уменьшен.

В результате фотодиоды со встроенным в активную область барьером, получившие название XVn -диодов, благодаря отмеченным свойствам, могут обеспечивать достижение требуемых пороговых характеристик чувствительности при более высоких рабочих температурах, чем обычные $p-n$ -диоды, вследствие чего могут быть существенно улучшены весогабаритные и энергетические показатели опто-электронных систем на их основе.

Наиболее подходящими для реализации указанной конструкции фотодиодов оказались твердые растворы $InAsSb/AlAsSb$ благодаря более отработанным технологиям их эпитаксиального выращивания. Первое сообщение о практической реализации XVn -диодов на основе указанных твердых растворов, по нашим сведениям, было сделано в работе [2]. P^+Vn -фотодиод был изготовлен на основе структуры $InAsSb/AlSb$, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке из GaAs. Было экспериментально показано существенное увеличение импеданса фотодиода благодаря введению в область $p-n$ -перехода широкозонного барьера. Спустя несколько лет появились сообщения об изготовлении nVn -фотодиодов (с X -областью n -типа проводимости) с использованием молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [3, 4]. Результаты оказались весьма обнадеживающими, что стимулировало дальнейшие исследования, которые привели к созданию коммерческих фотоприёмных модулей на основе nVn -матриц [5].

Необходимо, однако, отметить, что приборная реализация nVn -фотодиодов со структурой, ставшей уже классической [4], как правило, осуществлялась с использованием материала активного слоя с длинноволновой границей фоточувствительности около 4,2 мкм,

тогда как для более эффективного использования окна прозрачности атмосферы 3–5 мкм требуется более длинноволновый детектор. Ранее сообщалось [6] о создании nVn -диода с длинноволновой границей чувствительности свыше 5 мкм. Данный результат был достигнут за счёт увеличения содержания Sb в материале активного слоя $InAs_{1-x}Sb_x$ с $x = 9\%$ до $x = 18\%$ и использования в качестве барьера слоя AlSb. Для того чтобы компенсировать различие в постоянных решетки подложки GaSb и активного слоя, потребовалось введение дополнительных буферных слоев, в том числе толстого $\approx 1,5$ мкм слоя AlSb, что, возможно, стало причиной появления в эпитаксиальных слоях поперечно-штриховой структуры. В настоящей работе использовались структуры, при создании которых был применён другой способ расширить спектр фоточувствительности классической nVn -структуры в длинноволновую область, состоящий в том, чтобы изменить в ней состав лишь узкозонных слоёв, причём так, чтобы данное изменение было несколько меньшим, чем в упомянутой выше работе [6]. При такой конструкции структуры барьер остается изопериодичным по отношению к подложке и совместно с ней создает одинаковые механические напряжения на границах с активным слоем, снижая вероятность образования дефектов. Указанный подход позволил получить структуры с длинноволновой границей, вплотную приближенной к 5 мкм.

В настоящей работе представлены результаты создания ФПУ с матричными фотоприёмниками на основе указанных nVn -структур и исследований их фотоэлектрических характеристик.

Изготовление матричного ФПУ

В состав ФПУ входили следующие основные элементы:

- гибридная фоточувствительная схема (ГФС), включающая матричный фотоприёмник (МФП) на основе nVn -фотодиодов и матричный мультиплексор (МП) сигналов, соединённые посредством индиевых столбиков;
- вакуумируемый корпус-криостат (ВКК) для размещения ГФС и обеспечения её рабочего режима;

– микрокриогенная система (МКС) замкнутого типа, обеспечивающая рабочую температуру ГФС.

Для запуска ФПУ и обеспечения режимов его функционирования использовался комплект электронных блоков управления (ЭБУ).

Структуры для изготовления МФП на основе $n\text{InAs}$ -фотодиодов выращивались в АО «Светлана-Рост» на установке МЛЭ на подложках GaSb n -типа проводимости и состояли из следующих слоев: буферный слой GaSb , служивший одновременно и нижним контактным слоем, толщиной 1 мкм с концентрацией носителей $n \approx 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$; активный поглощающий слой $n\text{-InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ толщиной 1 мкм (без преднамеренного легирования) с концентрацией носителей $n < 10^{16} \text{ см}^{-3}$; барьер $\text{AlAs}_{0,08}\text{Sb}_{0,92}$ толщиной 0,2 мкм (без преднамеренного легирования) с концентрацией носителей $n < 10^{16} \text{ см}^{-3}$; верхний контактный слой $n\text{-InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ толщиной 0,2 мкм с концентрацией носителей $n \approx 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Приближенные расчетные и экспериментальные оценки величины x , определяющей содержание Sb в узкозонных слоях, дали значения в интервале 0,12–0,14.

Из описанной выше структуры изготавливались МФП формата 640×512 элементов с шагом 20 мкм. При формировании фоточувствительных элементов (ФЧЭ) матрицы использовалось плазмохимическое травление. Омические контакты к верхнему и нижнему контактным слоям ФЧЭ формировались из комбинации слоев металлов Ge/Ni/Au суммарной толщиной 300 нм. На поверхности ФЧЭ формировались индиевые столбики для flip-chip-монтажа на МП. Одновременно с МФП на пластине формировались тестовые фотоприёмники размером $0,5 \times 0,5$ мм. С их помощью производились исследования основных фотоэлектрических характеристик ФЧЭ, результаты которых подробно представлены в [7].

МФП описанной конструкции монтировался на МП посредством flip-chip-сборки. В настоящей работе в качестве МП была выбрана микросхема формата 640×512 элементов с шагом 20 мкм, разработанная НТЦ «Белмикросистемы» АО «Интеграл» (Респуб-

лика Беларусь). Конструкция входной ячейки данного МП позволяла вводить электрический сигнал из ФЧЭ методом прямой инъекции, что обуславливало её относительную простоту. При этом накопительная емкость интегрирующей ёмкости составляла не менее 10^7 электронов.

Архитектура МП обеспечивала реализацию основных режимов функционирования ГФС, характерных для современных приборов данного класса, включая оконный режим считывания с регулируемым положением и размером и вычитание из накопленного видеосигнала регулируемой постоянной составляющей.

После интеграции МФП и МП производилось заполнение промежутка между ними эпоксидным клеем и утонение подложки МФП до толщины 30–50 мкм. Следует отметить, что никаких антиотражающих покрытий на поверхность МФП после утонения подложки не наносилось. Изготовленная таким образом ГФС размещалась на посадочном месте в ВКК.

Конструкция использованного в данной работе ВКК достаточно подробно описана в [8]. Здесь лишь отметим, что ВКК состоит из держателя с закреплёнными на нём охлаждаемыми элементами, корпуса с газопоглотителями и медным штенгелем, а также крышки с входным окном. Держатель ВКК одновременно является гильзой вытеснителя газовой криогенной машины. На торце гильзы держателя закреплён керамический наконечник, который является посадочным местом для блоков фоточувствительных элементов и других охлаждаемых элементов конструкции. Размещенная на нём диафрагма имела диафрагменное число 2,5. В качестве охладителя для разработанного ФПУ была выбрана разработанная ООО «НТК «Криогенная техника» (г. Омск) серийная МКС замкнутого типа МСМГ-0,5А-0,5/80, работающая по обратному циклу Стирлинга и настроенная на работу в температурном диапазоне криостатирования 120–180 К.

Сборка ФПУ из описанных выше компонентов завершалась вакуумированием ВКК с размещенной в нем ГФС и стыковкой ВКК с МКС. Далее проводились исследования фото-

электрических характеристик ФПУ с использованием комплекта ЭБУ. На рис. 1 представлено ФПУ в сборе.



Рис. 1. ФПУ в сборе.

Исследование характеристик ФПУ

Исследования основных характеристик ФПУ включали в себя измерение спектра фототклика, а также зависимостей эквивалентной шуму разности температур $\Delta T_{ЭШ}$ и чувствительности S от напряжения смещения $V_{см}$, времени накопления $\tau_{нак}$ при различных значениях рабочей температуры $T_{раб}$. Спектр фоточувствительности ФПУ представлен на рис. 2.

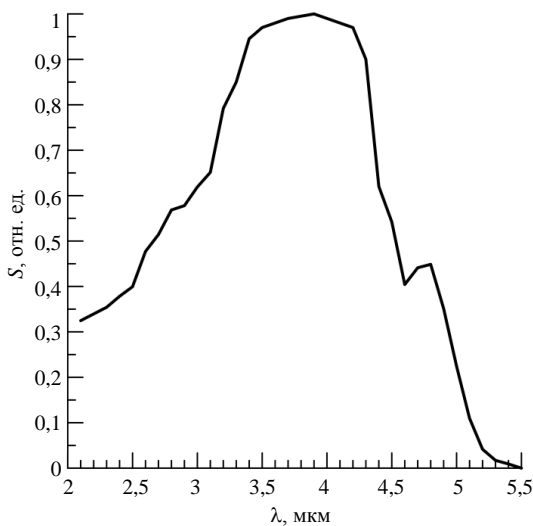


Рис. 2. Спектр фоточувствительности ФПУ. S – чувствительность; λ – длина волны возбуждающего излучения.

На рис. 3, 4 представлены зависимости чувствительности S и эквивалентной шуму разности температур $\Delta T_{ЭШ}$ от напряжения смещения и времени накопления. Из зависи-

мостей, представленных на рис. 4, видно, что при рабочих температурах ГФС в ФПУ в диапазоне 120–140 К чувствительность монотонно увеличивается с ростом напряжения смещения и времени накопления. При этом $\Delta T_{ЭШ}$ меняется незначительно в указанном температурном диапазоне (рис. 3) и находится вблизи своего минимума $\approx 0,02$ К, достигаемого при напряжениях смещения 0,16–0,2 В и временах накопления 10–20 мс.

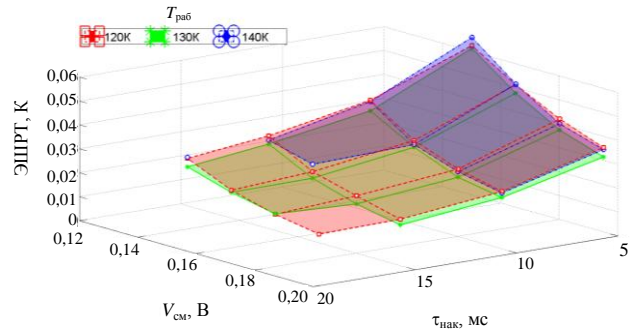


Рис. 3. Зависимость средней по матрице эквивалентной шуму разности температур от напряжения смещения и времени накопления при различных рабочих температурах ФПУ.

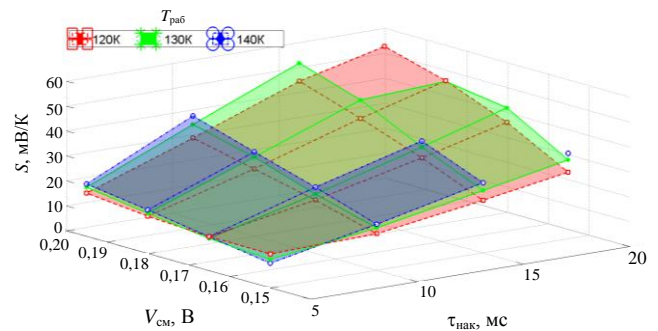


Рис. 4. Зависимость средней по матрице чувствительности от напряжения смещения и времени накопления при различных рабочих температурах ФПУ.

Следует отметить, что использование довольно больших значений времени накопления для достижения малых $\Delta T_{ЭШ}$ связано с относительно невысокой квантовой эффективностью фоточувствительных элементов в ГФС, обусловленной как малой толщиной активного слоя (около 1 мкм), так и отсутствием антиотражающего покрытия.

На рис. 5 представлена гистограмма распределения $\Delta T_{ЭШ}$ по элементам матрицы, характеризующая её однородность по массиву.

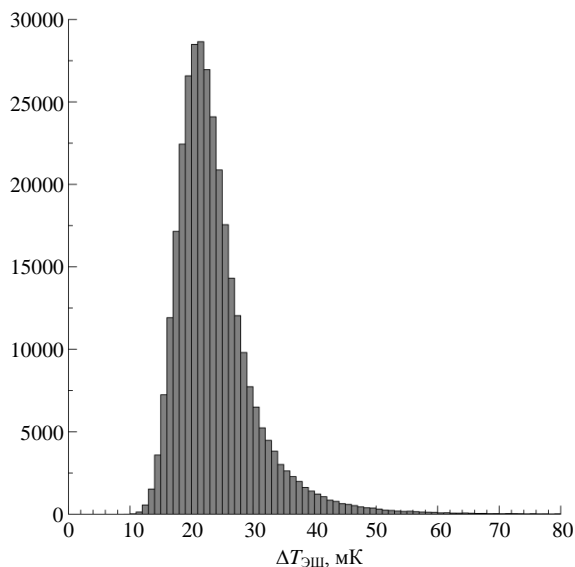


Рис. 5. Гистограмма распределения $\Delta T_{ЭШ}$ по элементам матрицы.

На рис. 6 представлены тепловые изображения, полученные с помощью разработанного ФПУ, при разных температурах ГФС. Изменение температуры ГФС от 120 до 140 К не приводит к существенному ухудшению ка-

чества изображений. Такой результат может быть связан, в том числе и с увеличением чувствительности фотоприёмника с ростом температуры, которое несколько компенсирует рост его собственного шума.

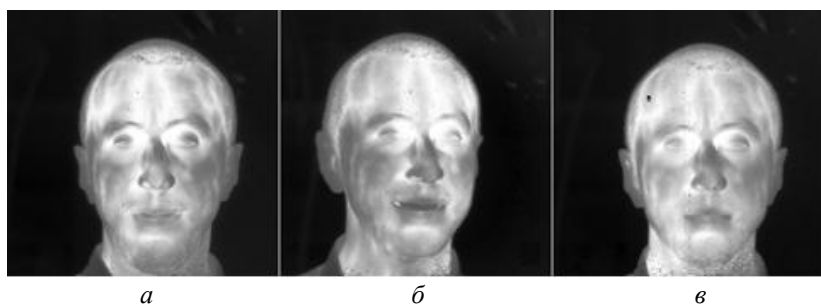


Рис. 6. Тепловые изображения, полученные с помощью разработанного ФПУ при разных температурах ГФС: а – 120 К; б – 130 К; в – 140 К.

Следует отметить, что в указанном температурном диапазоне потребляемая микрокриогенной системой мощность не превышала 7 Вт. Как отмечалось выше, использованная конструкция МФП не является оптимальной и может быть улучшена в части повышения квантовой эффективности за счёт увеличения толщины активного слоя и нанесения антиотражающего покрытия. Указанная модернизация МФП позволит получать более низкие значения $\Delta T_{ЭШ}$ при тех же или более высоких рабочих температурах ГФС.

Заключение

В работе представлены результаты создания ФПУ с матричными фотоприёмниками на основе nVn -структур, которые могут обеспечивать достижение требуемых пороговых характеристик чувствительности при более

высоких рабочих температурах, чем обычные $p-n$ -диоды, вследствие чего могут быть существенно улучшены весогабаритные и энергетические показатели оптоэлектронных систем на их основе. Исследования фотоэлектрических характеристик разработанных ФПУ показали, что они обладают фоточувствительностью практически во всем окне прозрачности атмосферы 3–5 мкм. Достигнутое значение эквивалентной шуму разности температур составило около 0,02 К при температуре фотоприёмника не ниже 130 К. При этом потребляемая микрокриогенной системой мощность не превышала 7 Вт. Рассмотрены возможности улучшения фотоэлектрических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A. // Proc. SPIE. 2017. Vol. 104330L. P. 104330L.

2. Avetisyan G. H., Kulikov V. B., Kotov V. P., Zalevsky I. D., Bulaev P. V., Padalitzza A. A., Gorbylev V. A. // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3200. P. 150.

3. Maimon S., Wicks G. W. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 151109.

4. Klipstein P. C. // Proc. SPIE. 2008. Vol. 6940. P. 69402U.

5. Klipstein P. C., Gross Y., Aronov D., ben Ezra M., Berkowicz E., Cohen Y., Fraenkel R., Glozman A., Grossman S., Klin O., Lukomsky I., Markowitz T., Shkedy L.,

Shtrichman I., Snapi N., Tuito A., Yassen M., Weisset E. // Proc. SPIE. 2013. Vol. 8704. P. 87041S.

6. Baril N., Brown A., Maloney P., Tidrow M., Lubyshev D., Qui Y., Fastenau J. M., Liu A. W. K., Bandara S. // Appl. Phys. Lett. 2016. Vol. 109. P. 122104.

7. Куликов В. Б., Маслов Д. В., Сабиров А. Р., Солодков А. А., Дудин А. Л., Кацавец Н. И., Коган И. В., Шуков И. В., Чалый В. П. // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52. Вып. 13. С. 1636.

8. Гиндин П., Карпов В., Кузнецов Н., Петренко В., Семенов В., Чишко В. // Фотоника. 2013. № 6/42. С. 62.

PACS: 07.57.Kp, 85.60.Dw

Based on *nBn*-photodiode array IDDCA sensitive in 3–5 μm spectral interval

V. B. Kulikov¹, D. V. Maslov¹, A. R. Sabirov¹, A. B. Barabanov¹,
N. I. Katsavets², V. P. Chaly², and I. V. Shukov²

¹ Joint Stock Company “Central Scientific-Research Institute “Cyclone”
77 Schelkovskoe shosse, Moscow, 107497, Russia

² Joint Stock Company “Svetlana-Rost”
27 Engels Ave., St. Petersburg, 194156, Russia

Received May 22, 2020

*Results of IDDCA development based on *nBn*-photodetector sensitive in 3–5 μm interval are presented. Photodetector array had 640×512 pixels format and 20 μm pitch. Wafers for *nBn*-diodes manufacturing were grown by molecular beam epitaxy on GaSb substrate and contained active layer $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ and barrier layer $\text{AlAs}_{1-y}\text{Sb}_y$. It was shown that developed IDDCA can provide achievement of desirable sensitivity at higher operating temperature. Noise equivalent temperature difference near 0.02 K was achieved at 130 K operating temperature of detector.*

Keywords: IDDCA, *nBn*-photodiode, photodetector array, multiplexer, dewar, microcryogenic system.

REFERENCES

1. A. Rogalski, Proc. SPIE **10433**, 104330L (2017).
2. G. H. Avetisyan, V. B. Kulikov, V. P. Kotov, G. H. Avetisyan, I. D. Zalevsky, P. V. Bulaev, A. A. Padalitzza, and V. A. Gorbylev, Proc. SPIE **3200**, 150 (1997).
3. S. Maimon and G. W. Wicks, Appl. Phys. Lett. **89**, 151109 (2006).
4. P. C. Klipstein, Proc. SPIE **6940**, 69402U (2008).
5. P. C. Klipstein, Y. Gross, D. Aronov, M. ben Ezra, E. Berkowicz, Y. Cohen, R. Fraenkel, A. Glozman, S. Grossman, O. Klin, I. Lukomsky, T. Markowitz, L. Shkedy, I. Shtrichman, N. Snapi, A. Tuito, M. Yassen, and E. Weisset, Proc. SPIE **8704**, 87041S (2013).
6. N. Baril, A. Brown, P. Maloney, M. Tidrow, D. Lubyshev, Y. Qui, J.M. Fastenau, A.W.K. Liu, and S. Bandara, Appl. Phys. Lett. **109**, 122104 (2016).
7. V. B. Kulikov, D. V. Maslov, A. R. Sabirov, A. A. Solodkov, A. L. Dudin, N. I. Katsavets, I. V. Kogan, I. V. Shukov, and V. P. Chaly, Semiconductors **52** (13), 1636 (2018).
8. P. Gindin, V. Karpov, N. Kuznetsov, V. Petrenko, V. Semenov, and V. Chishko, Photonics, No. 6/42, 62, (2013).