

УДК 621.315.5

Матричные планарные и мезоструктуры на основе гетероэпитаксиальных слоев InGaAs

К.О. Болтарь, И.В. Чинарева, А.А. Лопухин, Н.И. Яковлева

Исследованы характеристики матричных фотоприемных устройств формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм на основе InGaAs, чувствительных в спектральном диапазоне 0,9–1,7 мкм. Матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) изготавливались по планарной и мезотехнологии. Измерены распределения темного тока и спектральные характеристики фоточувствительности МФЧЭ при комнатной температуре и температуре охлаждения минус 20 °С. Получены тепловизионные изображения в режиме реального времени.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Ключевые слова: InGaAs, коротковолновый инфракрасный спектральный диапазон, гетероэпитаксиальные структуры, ГЭС, p–i–n-фотодиод, матрица фоточувствительных элементов, фотоприемное устройство, ФПУ.

Введение

Одним из наиболее актуальных направлений совершенствования оптико-электронной аппаратуры является использование инфракрасных матричных фотоприемных устройств (ФПУ) на основе p–i–n-фотодиодов, изготовленных в структурах InGaAs [1,2]. Характерными преимуществами данных матриц являются малые темновые токи и шумы, а также возможности использования не только криогенных систем охлаждения, но и более дешевых систем термоэлектрического охлаждения [3–5]. Сферы применения фотоприемных устройств на основе матриц фоточувствительных элементов из InGaAs включают промышленные тепловизоры, приборы ночного видения, системы для космического мониторинга, а также другие применения, связанные с воздействием механических и климатических факторов [6–8].

Спектральные характеристики фотоприемных устройств на основе $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ показывают, что на сегодняшний день это лучший материал для приборов ночного видения по сравнению с элек-

тронно-оптическими преобразователями на основе фотокатодов третьего поколения.

За рубежом разработку и исследования ФПУ на основе p–i–n-фотодиодов из InGaAs ведут ведущие оптико-электронные фирмы США (Goodrich Corporation, Teledyne Judson Technologies и др.), Франции (Thales) [9–11]. В ближайшие годы можно ожидать стабильное увеличение выпуска крупноформатных фотоприемных устройств на основе InGaAs для коротковолновой области ИК-спектра с высокими фотоэлектрическими параметрами, в том числе с лавинным усилением сигнала [12, 13].

Целью данной работы являлось исследование характеристик отечественных матричных фотоприемных устройств формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм на основе InGaAs, чувствительных в спектральном диапазоне 0,9–1,7 мкм.

Фотоприемное устройство

ФПУ содержит матрицу фоточувствительных элементов формата 320×256 элементов на основе InGaAs, гибридизированную с КМОП кремниевой электронной схемой считывания фотосигнала методом «flip-chip» технологии. БИС считывания имеет входные ячейки, построенные по схеме трансимпедансного усилителя с накопительным конденсатором в цепи обратной связи. Активная область каждого элемента матрицы имеет размеры 20×20 мкм, шаг между элементами составляет 30 мкм. ФПУ детектирует излучение в традиционном для материала $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ спектральном диапазоне 0,9–1,7 мкм.

Одним из возможных конструктивных решений построения ФПУ является планарная архитектура

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК¹, профессор².

Чинарева Инна Викторовна, ведущий инженер-технолог¹.

Лопухин Алексей Алексеевич, начальник участка НТК¹.

Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ¹.

¹ОАО «НПО «Орион»».

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2

Тел.: (499) 374–81–30. E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2013 г.

© Болтарь К.О., Чинарева И.В., Лопухин А.А., Яковлева Н.И., 2013

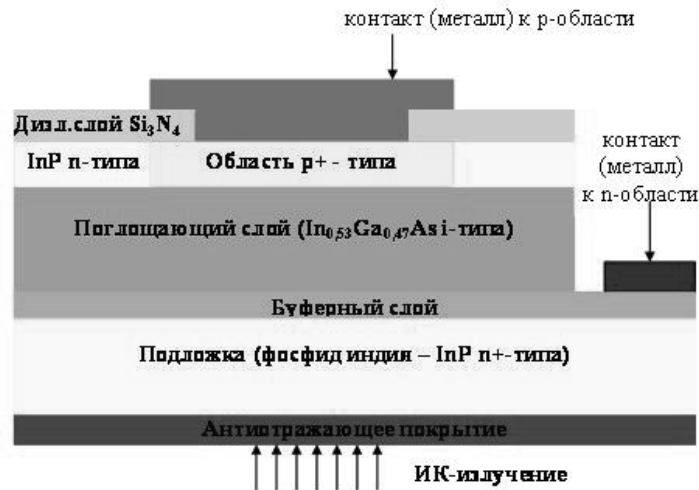


Рис. 1. Планарная $p-i-n$ -структура на основе гетероэпитаксиальных слоев $InGaAs$

матрицы чувствительных элементов [14], состоящая из $p-i-n$ -переходов, сформированных в гетероэпитаксиальных ИК-структурах тройных соединений $InGaAs/InP$ [15] и показанная на рис. 1.

Матрица ФЧЭ формата 320×256 из $p-i-n$ -фотодиодов изготавливается на основе трехслойной гетероэпитаксиальной структуры, активными слоями которой являются: буферный слой n -типа проводимости, фоточувствительный слой $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ i -типа проводимости и широкозонный слой InP , в котором методом диффузии цинка Zn или кадмия Cd формируются области p -типа проводимости. Размеры контактных площадок каждого элемента (16×16 мкм) близки к размеру фоточувствительной области. Сверху структура чувствительных элементов защищается диэлектрическим покрытием из нитрида кремния Si_3N_4 , полученным низкотемпературным плазмохимическим осаждением. В качестве антиотражающего покрытия также используется слой нитрида кремния Si_3N_4 .

Другим возможным конструктивным решением построения ФПУ является мезаархитектура матрицы чувствительных элементов, представленная на рис. 2. Для создания матриц $p-i-n$ -

фотодиодов по мезатехнологии с требуемыми параметрами использовались гетероэпитаксиальные структуры, имеющие следующую конфигурацию:

- высоколегированная оптически прозрачная подложка InP с антиотражающим покрытием нитрида кремния Si_3N_4 и концентрацией доноров в подложке InP $(5-10) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$;

- высоколегированный буферный слой InP n -типа проводимости, используемый также для изготовления контактов к n -области;

- активный поглощающий слой $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ собственного типа проводимости с низким уровнем фоновой концентрации $n = (0,5-2,0) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и высоким значением подвижности носителей заряда [16] (в пределах $7800-9000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для электронов) [17] при температуре $T = 300 \text{ К}$, оптимальная толщина которого составляла $2,5-3$ мкм для достижения максимального значения токовой чувствительности;

- широкозонный фотодиодный слой InP , толщина которого составляла $2-3$ мкм с концентрацией акцепторов $p = (1-3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Технология МФЧЭ разрабатывалась с использованием промышленного оборудования,

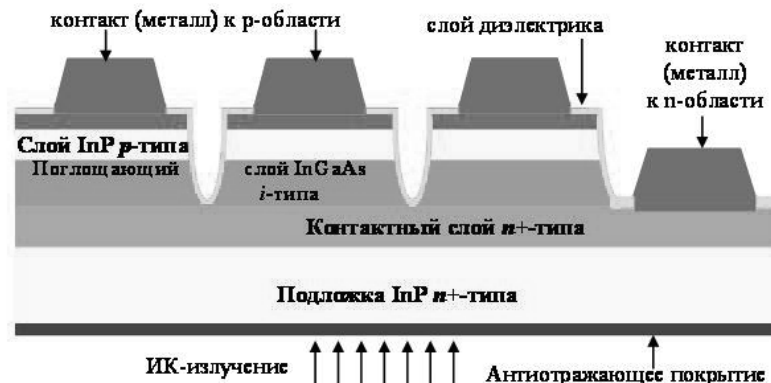


Рис. 2. Мезаструктура на основе гетероэпитаксиальных слоев $InGaAs$

имеющегося в НПО «Орион». Гетероструктура разделялась на мезаэлементы методом ионного травления, после чего защищалась диэлектриком. Глубина травления мезаструктуры задается временем и скоростью травления ионами аргона до буферного слоя $n^+-\text{InP}$ через маску фоторезиста, что позволяет останавливать процесс травления на требуемой глубине, разделяя элементы матрицы. Финишное химическое травление поверхности позволяет удалить нарушенный слой, образовавшийся при ионном травлении. Методами фотолитографии и травления в диэлектрике вскрываются окна до контактных слоев n - и p -типа проводимости с целью формирования омических контактов к слоям n - и p -типа. Процессы напыления слоев различных металлов использовались для формирования омических контактов к фотодиодам МФЧЭ. Использование мезатехнологии при изготовлении фотодиодных матриц решает проблему взаимосвязи между соседними фоточувствительными элементами. Фотогенерированные носители заряда, возникающие в слое $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ i -типа проводимости мезаструктуры не имеют возможности диффундировать к соседним элементам, а разделяются полем перехода и вносят вклад в фотоотклик в пределах заданной области поглощения излучения.

Для охлаждения МФЧЭ и БИС использовался двухкаскадный термоэлектрический охладитель, основанный на эффекте Пельтье.

Исследование параметров фотоприемных модулей

Качество матричных фотоприемных устройств на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs исследовалось по измерениям: спектральной характеристики фоточувствительности, распределения темновых токов, средних по матрице

обнаружительной способности D^* и вольтовой чувствительности S_u в максимуме спектральной характеристики фоточувствительности.

Диапазон спектральной чувствительности ФПУ формата 320×256 элементов, изготовленного по мезатехнологии, определялся по полуспаду спектральной характеристики, которая представлена на рис. 3. Исследуемый образец имел коротковолновую границу спектральной чувствительности (по уровню 0,5) $\lambda = 0,92$ мкм; длинноволновую границу спектральной чувствительности (по уровню 0,5) $\lambda = 1,69$ мкм и максимум спектральной чувствительности на длине волны $\lambda = 1,56$ мкм. Квантовая эффективность фотодиодов превышала 70%.

Контроль темновых токов $p-i-n$ -фотодиодов показал достаточно высокое качество изготовленной по планарной технологии матрицы фоточувствительных элементов. Гистограмма темновых токов представлена на рис. 4. Среднее значение темнового тока составило 0,375 нА, что находится на уровне лучших зарубежных аналогов.

Среднее значение удельной обнаружительной способности ФПУ с блоком предварительной обработки и усиления сигнала при времени накопления $\tau = 20$ мс и температуре $T = 300$ К составило $D^*_{cp} = 2,9 \cdot 10^{12}$ см \cdot Вт $^{-1}$ \cdot Гц $^{1/2}$, а при охлаждении термоэлектрическим охладителем до температуры 25 °С и времени накопления $\tau = 166$ мс, соответственно, $D^*_{cp} = 1,24 \cdot 10^{13}$ см \cdot Вт $^{-1}$ \cdot Гц $^{1/2}$. Максимальное значение обнаружительной способности при температуре $T = 300$ К достигалось при времени накопления $\tau = 55$ мс и составляло $D^* = 5 \cdot 10^{12}$ см \cdot Вт $^{-1}$ \cdot Гц $^{1/2}$, при этом значение вольтовой чувствительности составило $S_u = 4,5 \cdot 10^{11}$ В/Вт. На рис. 5 представлены зависимости обнаружительной способности, вольтовой чувствительности и пороговой мощности от времени накопления при температуре $T = 24$ °С.

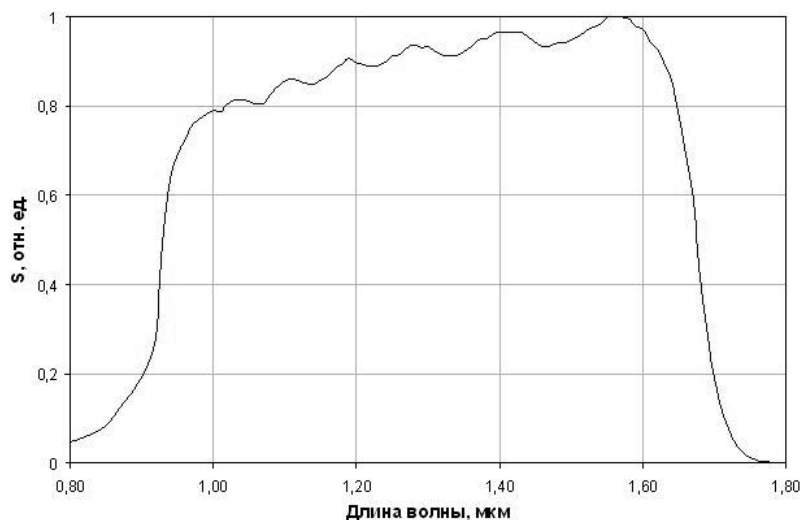


Рис. 3. Спектральная характеристика фоточувствительности

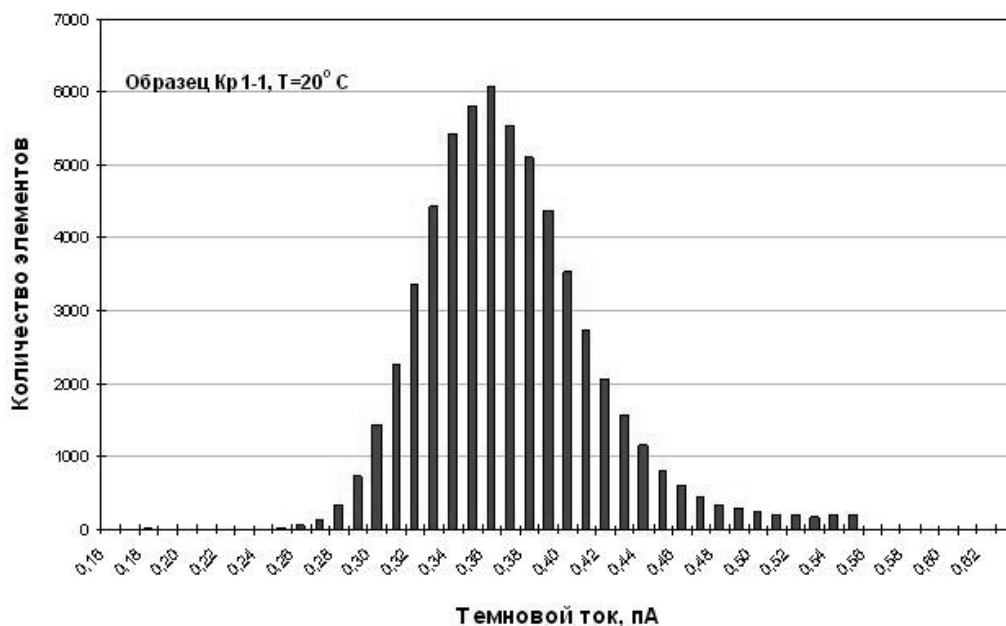


Рис. 4. Гистограмма распределения темнового тока по матрице фотодиодов

Для получения ИК-изображений проведены исследования ФПУ с блоком сопряжения и блоком электронной обработки в реальном режиме времени. На рис. 6 представлено типичное ИК-изображение.

Анализ полученных экспериментальных результатов показывает приемлемое качество изображений, формируемых ФПУ на основе InGaAs, изготовленных по планарной технологии. Присущая данной технологии взаимосвязь между элементами вследствие диффузии носителей заряда приводит к уширению изображения в области де-

фектных элементов в зависимости от напряжения смещения на 1–5 элементов.

В варианте конструкции МФЧЭ с мезоструктурой взаимосвязь между ФЧЭ принципиально устраняема, однако в настоящее время величина темнового тока в МФЧЭ с мезоструктурами на порядок больше, чем в планарных МФЧЭ. Основной причиной увеличения темнового тока можно считать качество пассивации поверхности мезоструктур в области выхода границ раздела $p-i-n$ фотодиодов, вследствие неудачного выбора режимов выращивания структур методом МОСГЭ

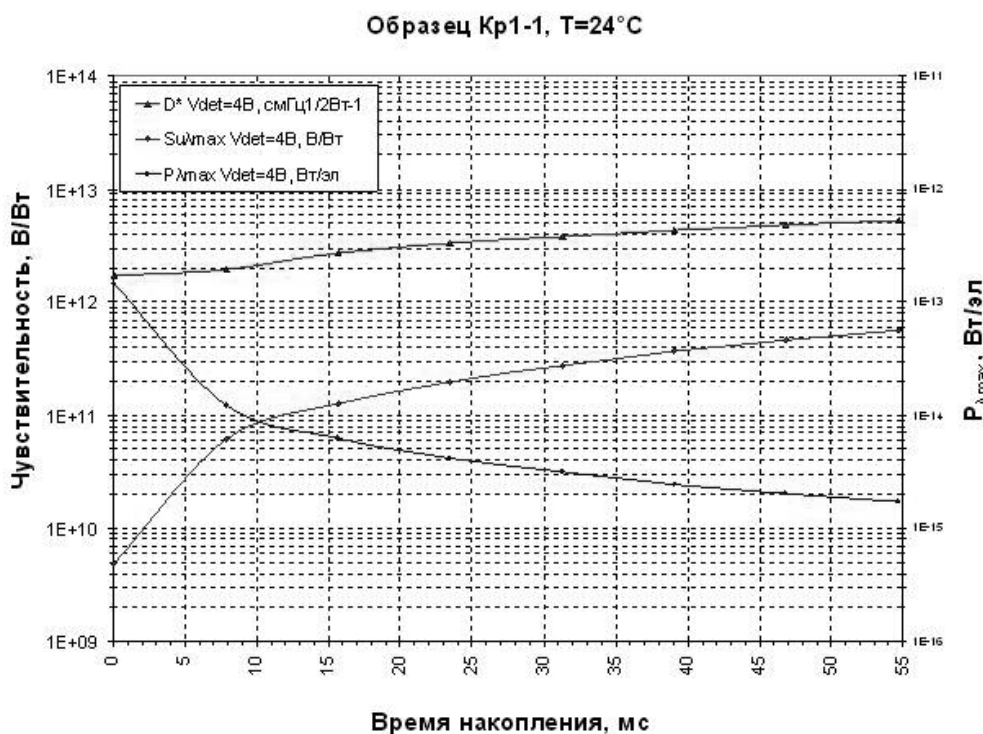


Рис. 5. Зависимости обнаружительной способности, вольтовой чувствительности и пороговой мощности от времени накопления



Рис. 6. ИК-изображение

и образования дефектов кристаллической структуры, а также флуктуации поверхностного заряда на границе раздела полупроводник-диэлектрик при образовании микропор в диэлектрическом покрытии Si_3N_4 при неравномерном характере травления мезаобластей. Устранение указанных недостатков позволит изготавливать ФПУ на основе InGaAs по мезатехнологии с заданным уровнем параметров.

Заключение

Архитектура матриц $p-i-n$ -фотодиодов на основе тройных соединений арсенидов InGaAs/InP позволяет реализовывать фотоприемные устройства с параметрами, близкими к лучшим мировым. Для крупноформатных матриц с размером пикселя порядка 15–30 мкм необходимы как высококачественные полупроводниковые структуры, так и усовершенствования в технологии изготовления. Для уменьшения темнового тока применяется метод снижения обратного смещения к нулевым значениям, оптимизация толщины поглощающего слоя InGaAs, уменьшение рабочей температуры с помощью одно- или двухстадийного термоэлектрического охлаждения, что позволило получить основные параметры ФПУ, а именно, обнаружительную способность и вольтовую чувствительность на уровне лучших мировых аналогов.

Литература

1. Forrest S.R., Leheny R.F., Nahory R.E., and Pollack M.A. // Applied Physics Letters. 1980. V. 37. P. 322
2. Stillman G.E., Cook L.W., Tabatabaie N. et al. // IEEE Transactions Electron Devices. 1983. V. ED-30. P. 364
3. Olsen G.H., Joshi A.M., Mason S.M., et al. // Proc. SPIE. 1989. V. 1157. P. 276
4. Olsen G., Joshi A., Lange M., et al. // Proc. SPIE. 1990. V. 1341. P. 432–37
5. Joshi A.M., Ban V.S., Mason S., et al. // Proc. SPIE. 1992. V. 1735. P. 287
6. Marlon D. Enriquez, Michael A. et al. // Proc. SPIE. 2008. V. 6940. P. 69400O
7. Chin A.K., Chen F.S., and Ermanis F. // J. Appl. Phys. 1984. V. 55. P. 1596
8. Saul R.H. and Chen F.S. // IEEE Electron Device Lett. 1983. V. ELD-4. P. 467
9. Littleton R., Dang K., Maloney P., et al. Spectral Irradiance of the Night Sky for Passive Low Light Level Imaging Applications / Proceedings of MSS. 2005. Passive Sensors., Charleston SC, 2005.
10. Tara J. Martin, Marshall J. Cohen, J. C. Dries, and Michael J. Lange // Proc. SPIE. 2004. V. 5406. P. 38
11. Martin T., Brubaker R., Dixon P. et al. // Proc. SPIE. 2005. V. 5783. P. 12
12. Pearsall T.P. and Papuchon M. // Applied Physics Letters. 1978. V. 33. P. 640
13. Forrest S.R., Smith R.G., and Kim O.K. // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1980. V. QE-18, P. 2040
14. Boisvert J., Isshiki T, Sudharsanan R. et al. // Proc. SPIE. 2008. V. 6940. P. 69400L.
15. Чинарева И.В., Огнева О.В., Забенькин О.Н., Мищенко Т.Н. Способ изготовления быстродействующего многоэлементного фотоприемника на основе эпитаксиальных структур InGaAs/InP, патент № 2318272 C1, дата опубликования 27.02.2008 г.
16. Gyuro I. MOVPE for InP-based Optoelectronic Device Application / Compound Semiconductor Industry Directory, Elsevier Science Ltd., 1996.
17. Stringfellow G.B. Organometallic Vapor-Phase Epitaxy: Theory and Practice (2nd Edition). Academic Press, New York, 1999.

2D planar and mesastructures on the basis of InGaAs heteroepitaxial layers

K.O. Boltar^{1,2}, I.V. Chinareva¹, A.A. Lopuhin¹, and N.I. Iakovleva¹

¹ORION R&P Asspciation
46/2, Enthusiasts highway, 111123, Moscow, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

SWIR 320x256 FPAs based on p-i-n photodiodes in InGaAs heterostructures have been developed and investigated. The 1.7 μm InGaAs 2D arrays with 30 μm pitches were made by planar and mesa-technology from the lattice matched $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ epi-wafers grown by MOCVD, sensitive to the wavelength range of 0.9–1.7 μm . Low-dark current material systems were ideal for high sensitivity and low noise applications. Dark-current distributions were measured both at room and -20°C operation temperatures. IR- images were taken to demonstrate the operability of developed FPA.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Keywords: InGaAs, IR range, heteroepitaxial layers, p–i–n photodiode, FPA.

Bibliography — 17 references

Received November 7, 2013