

Фотоэлектроника

УДК 621.383.4/5

Диодные матрицы формата 3×3 на основе одиночных гетероструктур $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}$

Н. Д. Ильинская, С. А. Карандашев, Н. Г. Карпухина, А. А. Лавров,
Б. А. Матвеев, М. А. Ременный, Н. М. Стусь, А. А. Усикова

В работе приведены результаты исследований электролюминесценции и фотоэлектрических свойств монокристаллической диодной матрицы 3×3 на основе одиночной гетероструктуры $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}/n^+\text{-InAs}$, чувствительной/излучающей на длинах волн вблизи 3,3 мкм в области рабочих температур $-20\dots+80$ °С. Рассмотрены возможности формирования как положительного, так и отрицательного эквивалента теплового контраста.

PACS: 07.57.Kp, 85.60.Dw

Ключевые слова: матрицы фотодиодов, матрицы светодиодов, арсенид индия.

Введение

Одним из наиболее востребованных оптоэлектронных устройств, работающих в области спектра 3—4 мкм, является матрица с плотноупакованными элементами, позволяющая создавать на двумерной поверхности заданное распределение интенсивности излучения и/или регистрировать распределение падающего на матрицу излучения от удаленного объекта. Для указанных выше целей удобно использовать узкозонные полупроводниковые соединения A^3B^5 , а также гетероструктуры на их основе, обладающие низкой концентрацией дефектов и стабильностью металлургических гетерограниц. В литературе уже описаны примеры использования квантовых ям в системах $\text{InAs}/\text{GaInSb}/\text{InAs}$ [1], $\text{AlGaInAsSb}/\text{GaInAsSb}/\text{AlGaInAsSb}$ [2], а также

«объемных» полупроводников, таких как InGaAs [3], InGaAsSb [4] и InAs [5, 6], для изготовления многоэлементных монокристаллических источников и приемников излучения с высоким фактором заполнения.

InAs является хорошо изученным материалом ИК-оптоэлектроники, однако, до настоящего времени исследовались лишь изотипные [7] или p — n -гомоэлектронные структуры на основе InAs [5, 6], уступающие по многим параметрам p — n -гетероструктурам. При этом совместные исследования электролюминесценции и фотоэлектрических свойств на одном объекте (матрице), содержащем активную область из InAs , не проводились. Это не позволяет в полной мере оценить потенциальные возможности матриц из InAs для технических применений.

В данной работе мы приводим результаты исследований электролюминесценции и фотоэлектрических свойств монокристаллической диодной матрицы формата 3×3 на основе одиночной гетероструктуры $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}/n^+\text{-InAs}$.

Образцы и методы исследований

Изопериодные с InAs эпитаксиальные структуры были аналогичны исследованным нами ранее [8] и содержали сильнолегированную подложку $n^+\text{-InAs}$ ($n^+ \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и два эпитаксиальных слоя, а именно: 1) специально нелегированный слой $n\text{-InAs}$ толщиной 4—6 мкм, 2) широкозонный (контактный) слой твердого раствора $p\text{-InAsSbP}$ ($E_g^{300\text{K}} = 440 \text{ мэВ}$) толщиной 2—3 мкм, легированный Zn в процессе роста. При этом, со-

Ильинская Наталья Дмитриевна, ст. научный сотрудник¹.
Карандашев Сергей Аркадьевич, научный сотрудник¹.
Карпухина Наталья Геннадиевна, инженер-исследователь².
Лавров Альберт Анатольевич, инженер¹.
Матвеев Борис Анатольевич, главный научный сотрудник¹.
Ременный Максим Анатольевич, ст. научный сотрудник¹.
Стусь Николай Матвеевич, научный сотрудник¹.
Усикова Анна Александровна, научный сотрудник¹.
¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН.
Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.
Тел. (812) 292-79-55. E-mail: bmat@iiopt3.ioffe.ru
²ООО «ИоффеЛЕД».
Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

Статья поступила в редакцию 25 августа 2014 г.

© Ильинская Н. Д., Карандашев С. А., Карпухина Н. Г.,
Лавров А. А., Матвеев Б. А., Ременный М. А.,
Стусь Н. М., Усикова А. А., 2014

гласно исследованиям, проведенным ранее на аналогичных структурах [8], имело место примерное совпадение пространственного положения гетерограницы и p — n -перехода. Разрывы зон на гетерогранице составили $\Delta E_c = 120$ мэВ и $\Delta E_v = -30$ мэВ (300 К).

Матрицы 3×3 содержали по 9 квадратных элементов (мез) с размерами 310×310 мкм (рис. 1), полученных с помощью стандартной фотолитографии и «мокрого» химического травления. При этом общая глубина канавок, разделяющих мезы, составляла 50 мкм (по принятой терминологии образцы имели «глубокие» мезы). Отражающие квадратные контакты к слою p -InAsSbP с размерами 280×280 мкм формировались в центре мез методом термического испарения металлов в вакууме и дополнительно «усиливались» при последующем электрохимическом осаждении золота общей толщиной 2—3 мкм. Матрицы монтировались слоем p -InAsSbP на кремниевую плату с контактными площадками, позволяющую осуществлять индивидуальную адресацию элементов (анодов) и эффективный отвод тепла. Тепловое сопротивление « p — n -переход—контактная плата» для аналогичных конструкций составляло ~ 50 К/Вт [4]. Общий для всех элементов катод (контакт к прозрачной подложке n^+ -InAs) был сформирован из группы точечных контактов, расположенных сбоку от группы из 9 мез так, чтобы не затенять входящее—выходящее из элементов матрицы излучение.

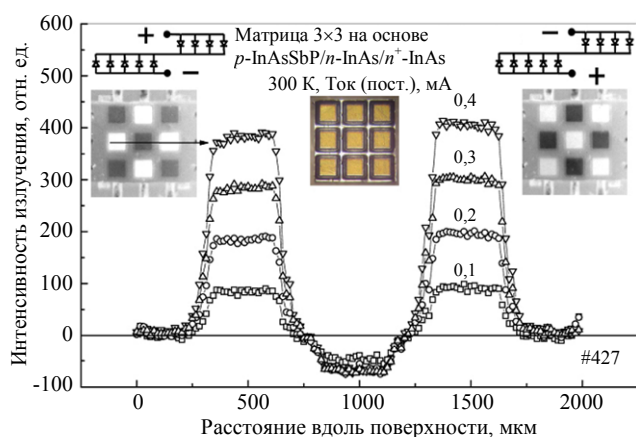


Рис. 1. Распределение интенсивности ОЛ и ЭЛ матрицы вдоль её центрального сечения при одновременном подключении всех элементов к источнику питания по схеме, представленной в левом верхнем углу рисунка. На вставках приведены фотография матрицы со стороны слоя p -InAsSbP (в центре), а также ИК-изображения при общем токе через матрицу 100 мкА при двух вариантах включения, показанных в верхней части рисунка

Фоточувствительность диодных элементов измерялась с помощью модели черного тела с температурой 573 К, для измерений спектров фо-

точувствительности использовались Глобар и призмный монохроматор. Распределение интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) ($U_{bias} > 0$) и отрицательной люминесценции (ОЛ) ($U_{bias} < 0$) вдоль поверхности n^+ -InAs (т. е. в ближнем поле) измерялось с помощью ИК-микроскопа, оборудованного охлаждаемой до 77 К фоточувствительной матрицей 128×128 из арсенида индия с максимумом спектра фоточувствительности на длине волны 2,9 мкм [7].

Результаты измерений и их обсуждение

Спектры ЭЛ элементов матрицы имели стандартный вид, характерный для данного типа приборов с максимумом на длине волны 3,4 мкм (300 К) [9], при этом перекрытие спектров излучения и чувствительности фотоприёмной системы микроскопа составляло 2,7 %.

На рис. 1 показано распределение интенсивности люминесцентного излучения при одновременном подключении всех элементов матрицы к источнику питания. В данном эксперименте диодные элементы были объединены в две группы, состоящие из 4-х и 5-и элементов соответственно, как показано на вставках к рис. 1. На правой вставке к рис. 1 показано ИК-изображение поверхности матрицы, полученное при постоянном токе ≈ -25 мкА в каждом из 4-х недиагональных элементов, работающих в режиме ОЛ, т. е. в режиме пониженной по сравнению с равновесным фоном излучательной способности (темные квадраты), и токе ≈ 20 мкА в каждом из диагональных и центральном элементах, работающих в режиме ЭЛ (светлые квадраты, повышенная по сравнению с фоном яркость излучения). В другом эксперименте (см. левую вставку) четыре диагональных и центральный элементы матрицы работали в режиме ОЛ ($I_{pixel} \approx -20$ мкА), а четыре оставшихся — в режиме ЭЛ ($I_{pixel} \approx 25$ мкА). Амплитуда общего тока в обоих случаях формирования ИК изображения типа «шахматной доски»* составляла 100 мкА.

Из данных на рис. 1 следует, что при токах, близких к 100 мкА, интенсивности ОЛ и ЭЛ практически совпадают, а при больших токах имеет место слабая зависимость интенсивности ОЛ от тока. Это хорошо известная особенность приборов ОЛ, вызванная почти полной экстракцией носителей из активной области [10]. Можно отметить

* Термин «шахматная доска» был использован Малютенко В. К. в работе [Infrared Phys. Technol. **44**, 11 (2003)] применительно к магнитоконцентрационным матричным источникам 16×16 на основе объемного антимонида индия. В нашем случае мы пока имеем дело, скорее всего, с «доской» для «крестиков-ноликов».

также однородность матрицы, поскольку отличие в интенсивности ЭЛ её крайних элементов (пикселей) не превышало 10 %.

Более детальные данные о распределении интенсивности ЭЛ в пределах одного подключенного к питанию пикселя в широком диапазоне прямых токов приведено на рис. 2. Распределение интенсивности имело симметрично расположенные боковые всплески, обусловленные отражением излучения от боковых наклонных стенок мезы и формирующие около 10 % от общей мощности излучения пикселя. Очевидно, что для фотодиодного режима работы указанные стенки выполняли функцию внутренних оптических концентраторов и увеличивали чувствительность благодаря возрастанию доли излучения, попадающего на $p-n$ -переход, о чем будет сообщено ниже. Зависимость интенсивности излучения одиночного элемента от тока представлена на рис. 3. При этом, согласно градуировке ИК-микроскопа, плотность электролюминесцентного излучения при токе 0,4 мА соответствовала потоку излучения от эталона, нагретого до 46 °С*. На этом же рисунке приведена вольт-амперная характеристика.

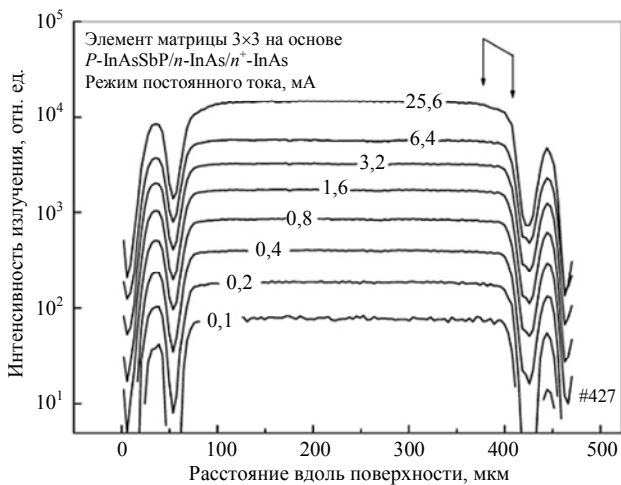


Рис. 2. Распределение интенсивности ЭЛ вдоль центрального сечения одного из пикселей матрицы при постоянном токе через элемент 0,1, 0,2, 0,4, 0,8, 1,6, 3,2, 6,4 и 25,6 мА

Как следует из данных на рис. 2, в области малых токов (0,1—6 мА) излучающая область занимала всю площадь мезы, и имела место высокая пространственная однородность излучения в области над $p-n$ -переходом. При токах > 25 мА область излучения несколько сужалась из-за падения интенсивности (уменьшения плотности тока) в удаленных от края контакта областях по краю мезы (на рис. 2 эта область обозначена двойной

стрелкой). Подробный анализ сужения области излучения из-за уменьшения сопротивления $p-n$ -перехода и пространственного перераспределения плотности тока в одноэлементных диодах можно найти, например, в работе [11]. Одновременно с уменьшением эффективной площади излучения происходило уменьшение коэффициента преобразования и появление сублинейности на ватт-амперной характеристике. Характерно, что область начала сублинейности ватт-амперной характеристики совпадала с переходом от экспоненциального участка изменения тока к более плавному (линейному) изменению, также обусловленному влиянием последовательного сопротивления.

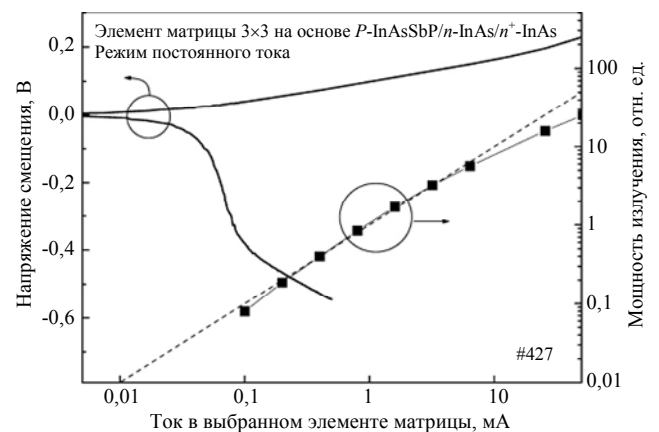


Рис. 3. Зависимость интенсивности ЭЛ от значения постоянного тока через элемент матрицы, полученная из данных на рис. 2 и вольт-амперная характеристика

На рис. 4 представлена спектральная зависимость токовой фоточувствительности S_I для нескольких температур. Коротковолновый край чувствительности—обнаружительной способности по сравнению с длинноволновым был более чувствителен к изменению температуры, что связано, скорее всего, со снятием вырождения электронов в сильно легированном арсениде индия n -типа и, соответственно, с уменьшением оптического пропускания подложки при повышении её температуры [12]. По-видимому, эти же причины обуславливают уменьшение в максимуме S_I при повышенных температурах.

Произведение динамического сопротивления в нуле смещения R_o на площадь $p-n$ -перехода A_{p-n} составляло $\approx 1,3 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ при 293 К. Его температурная зависимость линейризовалась в координатах $\text{Ln}(R_o) - 1/T$, при этом энергия активации составляла $E_a = 0,5 \text{ эВ}$, что несколько выше полученных ранее значений для аналогичных структур [8].

На рис. 4 мы намеренно указали в качестве единиц измерения относительные единицы, поскольку при использовании пучка, засвечивающего всю площадь матрицы, значение фоточувстви-

* Для калибровки использовалась пластина просветленного арсенида индия, температура которой контролировалась термпарой.

тельности одиночного элемента (2,3 А/Вт) превышало опубликованные значения. Более того, при определении квантовой эффективности в этих условиях её расчетное значение (120 %) превышало физически оправданный уровень. Завышение значений фоточувствительности происходит от того, что оптическая площадь, принимающая излучение, больше A_{p-n} . Аналогичный вывод был получен нами ранее при исследовании чипов одиночных фотодиодов (ФД) на основе InAs и InAsSb с глубокой мезой травления.

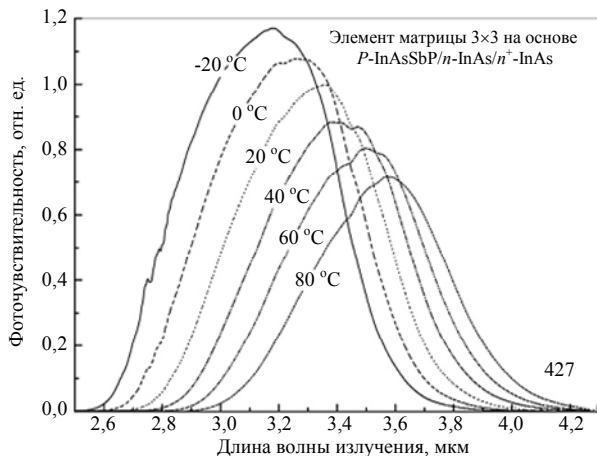


Рис. 4. Спектры фоточувствительности диодной матрицы на основе InAs в диапазоне температур $-20\dots+80^\circ\text{C}$

В предположении о квантовой 100%-ной квантовой эффективности, т. е. при волевом уменьшении измеренной токовой чувствительность в 1,2 раза, значение $D_{\lambda, \max}^*$ в максимуме спектральной кривой при 20°C , определяемое как $D^* = S_I (R_o A_{p-n} / 4kT)^{0,5}$, достигало величины $1,7 \cdot 10^{10}$ см \cdot Гц $^{0,5} \cdot$ Вт $^{-1}$; что близко к лучшим значениям, опубликованным для одиночных ФД на основе аналогичных гетероструктур p-InAsSbP/n-InAs [8, 12, 13].

Обнаружительная способность сильно деградировала с ростом температуры, что связывалось, прежде всего, с ростом темнового тока и с уменьшением динамического сопротивления R_o . С другой стороны, указанное свойство можно переформулировать по-другому и утверждать, что с понижением температуры резко возрастает детектирующая способность элементов матрицы. При этом мы ожидаем, что при криогенных температурах значения $D_{\lambda, \max}^*$ будут не ниже опубликованных в [8] значений для аналогичных одиночных ФД.

Заключение

В работе продемонстрированы основные свойства диодной матрицы 3×3 на основе одиночной гетероструктуры p-InAsSbP/n-InAs/n $^+$ -InAs, позволяющей создавать или регистрировать двумерное распределение излучения на поверхности площадью $\sim 1,4$ мм 2 . При этом показана возможность создания эквивалента как положительного, так и отрицательного теплового контраста и регистрации потоков излучения с высокой обнаружительной способностью при комнатной температуре в спектральной области вблизи 3,3 мкм.

Авторы выражают благодарность Загкейму А. Л. и Чернякову А. В. (Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур при Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН) за помощь в проведении экспериментов.

Лавров А. А. выражает благодарность РФФИ за поддержку работы в рамках проекта № 14-02-00624.

Литература

1. Das N. C., Simonis G., Bradshaw J., et al. // Proc. SPIE. 2004. V. 5408. P. 136.
2. Jung S., Suchalkin S., Westerfeld D., et al. // Semicond. Sci. Technol. 2011. V. 26. P. 085022.
3. Matveev B. A., Gavrilov G. A., Evstropov V. V., et al. // Sensors and Actuators B. 1997. V. 38—39. P. 339.
4. Matveev B. A., Zadiranov Yu. M., Zakgeim A. L., et al. // Proc. SPIE. 2009. V. 7223. P. 72231B-1.
5. Билинец Ю. Ю., Кондратьева В. Г., Качур А. А. и др. // Электронная Техника, 1990. № 1(204). С. 91.
6. Sandall I. C., Zhang S., Tan C. H. // OPTICS EXPRESS. 2010. V. 21. No. 22. P. 257830.
7. Базовкин В. М., Гузев А. А., Ковчавцев А. П. и др. // Прикладная Физика. 2005. № 2. С. 97.
8. Brunkov P. N., Il'inskaya N. D., Karandashev S. A., et al. // ФТП. 2014. Т. 48. No. 10. С. 1394.
9. Зотова Н. В., Ильинская Н. Д., Карандашев С. А. и др. // ФТП. 2008. Т. 42. № 6. С. 641.
10. Иванов-Омский В. И., Матвеев Б. А. // ФТП. 2007. Т. 41. № 3. С. 257.
11. Карандашев С. А., Матвеев Б. А., Ратушный В. И. и др. // ЖТФ. 2014. Т. 84. № 11. С. 52.
12. Matveev B. A., Zotova N. V., Karandashev S. A., et al. // Proc. SPIE. 2002. V. 4650. P. 173.
13. Remennyi M. A., Matveev B. A., Zotova N. V., et al. // Proc. SPIE. 2007. V. 6585. P. 658504.

The 3×3 matrix based on *p*-InAsSbP/*n*-InAs single heterostructure diodes

*N. D. Il'inskaya*¹, *S. A. Karandashev*¹, *N. G. Karpukhina*², *A. A. Lavrov*¹, *B. A. Matveev*¹,
*M. A. Remennyi*¹, *N. M. Stus*¹, and *A. A. Usikova*¹

¹ Ioffe Institute

26 Polytechnicheskaya str., St.-Petersburg, 194021, Russia

E-mail: bmat@iropt3.ioffe.ru

² IoffeLED, Ltd.

26 Polytechnicheskaya str., St.-Petersburg, 194021, Russia

Received August 25, 2014

We present electroluminescence and photoelectrical properties of 3×3 matrix fabricated from InAsSbP/n-InAs/n⁺-InAs single heterostructure that is sensitive/emitting in the wavelength range around 3.3 μm at operating temperatures of -20...+80 °C. Formation of positive and negative radiation contrast are also considered.

PACS: 07.57.Kp, 85.60.Dw

Keywords: photodiode arrays, LED arrays, indium arsenide.

References

1. N. C. Das, G. Simonis, J. Bradshaw, et al., Proc. SPIE **5408**, 136 (2004).
2. S. Jung, S. Suchalkin, D., Westerfeld, et al., Semicond. Sci. Technol. **26**, 085022 (2011).
3. B. A. Matveev, G. A. Gavrillov, V. V. Evstropov, et al., Sensors and Actuators B. **38-39**, 339 (1997).
4. B. A. Matveev, Yu. M. Zadiranov, A. L. Zakgeim, et al., Proc. SPIE **7223**, 72231B-1 (2009).
5. Yu. Yu. Bilinets, V. G. Kondrat'eva, A. A. Kachur, et al., Elektron. Tekhn., No. 1(204), 91 (1990).
6. I. C. Sandall, S. Zhang, C. H. Tan, OPTICS EXPRESS **21**, 257830 (2010).
7. V. M. Bazovkin, A. A. Guzev, A. P. Kovchavtsev, et al., Prikladnaya Fizika, No. 2, 97 (2005).
8. P. N. Brunkov, N. D. Il'inskaya, S. A. Karandashev, et al., Semiconductors **48**, 1394 (2014).
9. N. V. Zotova, N. D. Il'inskaya, S. A. Karandashev, et al., Semiconductors **42**, 641 (2008).
10. V. I. Ivanov-Omsky and B. A. Matveev, Semiconductors **41**, 257 (2007).
11. S. A. Karandashev, B. A. Matveev, V. I. Ratushnyi, et al., Tech. Phys. **84**, 52 (2014).
12. B. A. Matveev, N. V. Zotova, S. A. Karandashev, et al., Proc. SPIE **4650**, 173 (2002).
13. M. A. Remennyi, B. A. Matveev, N. V. Zotova, et al., Proc. SPIE **6585**, 658504 (2007).