

Диодные матрицы 8×8 для средней ИК области на основе структур P-InAsSbP/n-InAs

Ременный М.А.¹, Ильинская Н.Д.¹, Карандашев С.А.¹, Карпухина Н.Г.², Лавров А.А.^{1,2},
Матвеев Б.А.¹, Стусь Н.М.^{1,2}, Усикова А.А.¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, РФ, <http://www.ioffe.ru>
² ООО «ИоффеЛЕД», С.-Петербург, РФ, <http://www.ioffeled.com>

Одним из наиболее востребованных средневолновых оптоэлектронных устройств 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. К числу структур, работающих в области спектра 3-4 мкм, относятся изопериодные гетероструктуры с широкозонным слоем твердого раствора P-InAsSbP ($E_g \geq 0.4$ эВ, 300 К), прилегающим к поглощающему слою n-InAs ($E_g = 0.35$ эВ, 300 К) и позволяющим снизить утечки тока по инверсному слою на поверхности p-InAs [1]. В литературе уже описаны примеры создания охлаждаемых эффективных фотодиодов на основе двойных гетероструктур P-InAsSbP/n-InAs/n-InAsSbP/n⁺-InAs, работающих в режиме ограничения фоновым излучением, начиная с температуры 150 К [2], а также диодных матриц формата 3×3 на основе одиночных гетероструктур (ОГС) P-InAsSbP/n-InAs/n⁺-InAs с $D_{3.4 \mu m, 300 K}^* = 1.7 \cdot 10^{10}$ см Гц^{1/2}Вт⁻¹ [3].

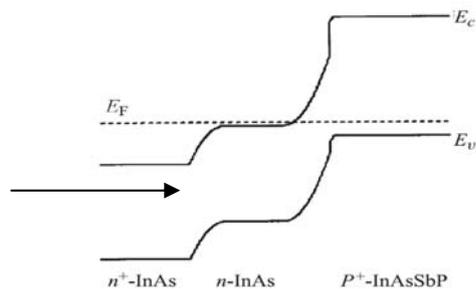


Рис.1 Схема зонной структуры ОГС InAsSbP/InAs. Стрелкой показано направление движения фотонов от внешнего источника.

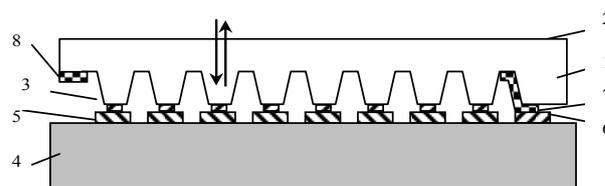
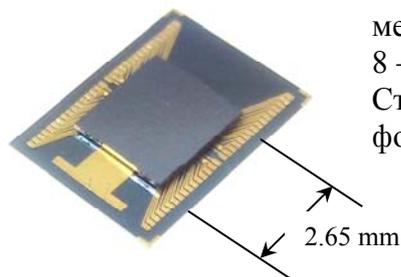
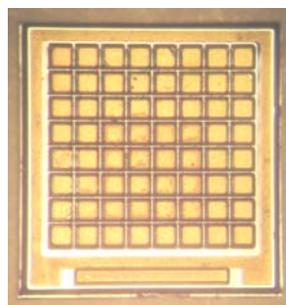


Рис.2 Схема сечения диодной матрицы, где цифрами обозначены: 1 – эпитаксиальная гетероструктура, 2 – свободная поверхность подложки n⁺-InAs, 3 – наклонные стенки мез, ограничивающие p-n переход, 4 – кремниевая плата для считывания сигналов, 5 – контактные площадки для анодов, 6 – контактная площадка для катода, 7 – металлический контакт к подложке n⁺-InAs, 8 – контакт к подложке n⁺-InAs в виде рамки. Стрелками показано направление движения фотонов при приеме и генерации излучения.

Рис.3 Фотография матрицы 8×8 со стороны эпитаксиальных слоев (слева) и фотография смонтированной матрицы (вид со стороны подложки n⁺-InAs).

В данной работе мы приводим результаты исследований электролюминесценции и фотоэлектрических свойств монолитной диодной флип-чип матрицы формата 8×8 на основе ОГС P-InAsSbP/n-InAs/n⁺-InAs.

Образцы матриц изготавливались из гетероструктур P-InAsSbP/n-InAs/n⁺-InAs толщиной 0.2 мм (см. Рис.1) с помощью методов, описанных нами ранее в [3]. Спектр фотолюминесценции с поверхности слоев при 77 К содержал две полосы с максимумами при

470 мэВ (*P-InAsSbP*) и 412 мэВ (*n-InAs*). Матрицы, в каждой из которых 64 квадратные мезы с шагом 250 мкм и стороной 190 мкм ($A_{\text{chip}} = 3.6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$), были смонтированы по методу «флип-чип» на кремниевую контактную плату с общим для всех элементов катодом и анодами, позволяющими осуществлять индивидуальную адресацию элементов (см. Рис.2, Рис.3). Излучающая область имела площадь $\sim 2 \times 2 \text{ мм}^2$, ИК изображения получали при комнатной температуре с помощью охлаждаемого матричного фотоприемника с числом элементов 128×128 , чувствительных в диапазоне длин волн 2.5-3 мкм [4]. Изображение одной из матриц, полученное при активации всех её элементов, т.е. при их параллельном включении, приведено на Рис.4 а, б, где сбоку от изображения показано также распределение интенсивности излучения вдоль сечений, обозначенных там же светлыми линиями. При этом светлому тону соответствует высокая излучательная способность (области с активированной электролюминесценцией (ЭЛ), Рис.4 а), а темному – низкая (области с отрицательной люминесценцией (ОЛ), Рис.4 б). Более детальные данные содержит Рис.5, где приведено распределение излучения при различных прямых и обратных токах.

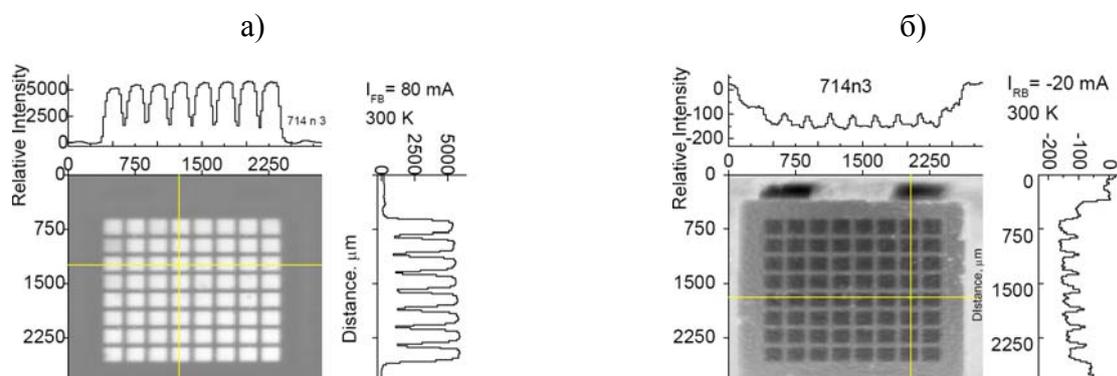


Рис.4 Инфракрасные изображения матрицы с активированными 64-мя элементами, полученные со стороны n^+ -*InAs*. Общий ток через матрицу: а) $I = 80 \text{ мА}$, б) $I = -20 \text{ мА}$. Справа и сверху от изображений (а, б) показано распределение интенсивности излучения вдоль горизонтальных и вертикальных сечений.

Темные области на Рис.4 б визуализируют рабочие области элементов матрицы. Такая панель обратно-смещенных ФД с пониженной излучательной способностью может служить «холодным экраном» для фотоприемников, работающих в режиме ограничения фоновым излучением. Как и для большинства приборов ОЛ [5], ее интенсивность насыщалась при увеличении модуля обратного тока.

Спектр fotocувствительности (см. Рис. 6) был аналогичен, приведенным нами ранее в [3], т.е. обрывался с коротковолновой стороны из-за уменьшения прозрачности подложки n^+ -*InAs*; длинноволновая граница fotocувствительности составляла $\lambda_{0,1} = 3.7 \text{ мкм}$. Наибольшее количество элементов имело значение динамического сопротивления в нуле смещения R_0 , равное 1500 Ом (см. Рис.7). Токовая чувствительность в максимуме спектра ($S_{\lambda_{\text{max}}}$) при работе/засветке всей матрицы целиком и в предположении о равенстве оптической площади и суммарной площади всех мез ($A_{\text{opt}} = A_{\text{mesa}} \times 64$) составила 1.3 А/Вт, усредненная обнаружительная способность в максимуме спектра для одного элемента составила $-7.5 \cdot 10^9 \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$. В предположении о равенстве оптической площади и площади чипа ($A_{\text{opt}} = A_{\text{chip}}$) интегральная токовая чувствительность составляла $\sim 0.6 \text{ А/Вт}$. Приведенное значение $S_{\lambda_{\text{max}}}$ является заниженной оценкой этого параметра, поскольку в реальности $A_{\text{opt}} < A_{\text{chip}}$. Полученное значение обнаружительной способности меньше величин, опубликованных ранее для элементов матрицы 3×3 [3] и для одноэлементных ФД на основе одиночных гетероструктур [6], но больше, чем для коммерчески доступных и разрабатываемых зарубежных аналогов на основе гомо p-n структур из *InAs* [7].

Гистограмма значений емкости элементов при нулевом смещении представлена на Рис.8. Отметим, что величины удельной емкости (C_0/A) меньше большинства значений, приводимых в литературе для одиночных «быстродействующих» ФД на основе *InAsSbP/InAs*, поэтому изготовленную матрицу, по-видимому, можно отнести к разряду «быстродействующих».

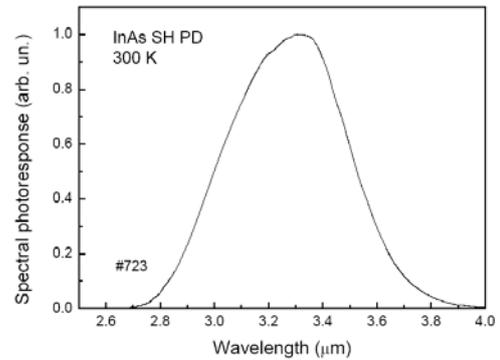
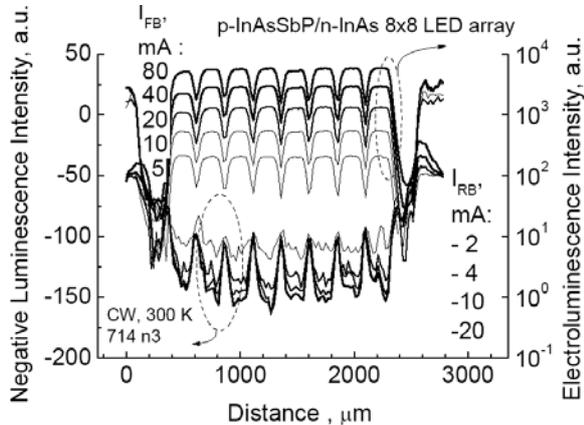


Рис.5 Распределение излучения матрицы с активированными 64-мя элементами.

Рис.6 Спектр фоточувствительности элемента матрицы при 300 К.

Интенсивность ЭЛ ($\lambda_{max}=3.4$ мкм) в области небольших токов (<10 мА/64 элемента) линейно зависела от последних, что свидетельствовало о несущественности вклада центров Шокли-Рида для исследованных структур.

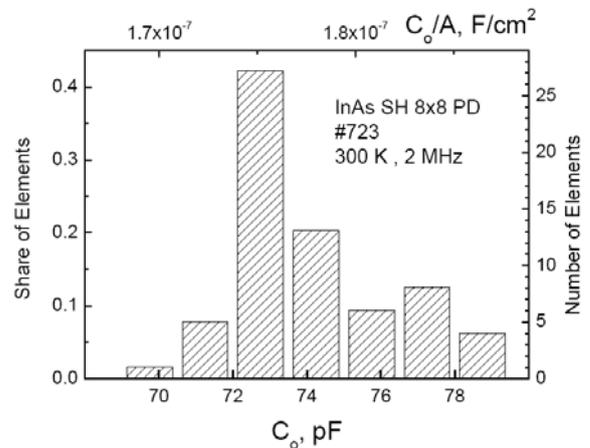
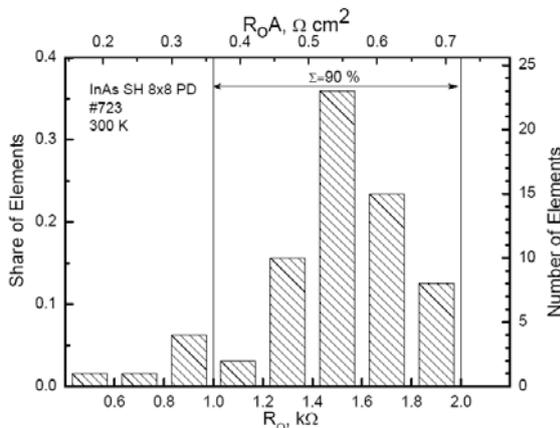


Рис.7 Гистограмма значений динамического сопротивления при нулевом смещении.

Рис.8 Гистограмма значений емкости элементов матрицы при нулевом смещении.

При протекании тока амплитудой 3 мА/элемент создавался сигнал, эквивалентный сигналу при измерении модели черного тела, нагретого до 100°C ($\Delta T_{эфф.р.т.}=80$ К). Указанный «тепловой» контраст близок к приведенному в [3] для СД, излучающего на длине волны 3.4 мкм ($\Delta T_{эфф.р.т.}=95$ К, $I \sim 38$ мА через элемент с сопоставимыми размерами [3]). Плотность излучения черного тела, нагретого до 100°C, в пределах спектра чувствительности фотоприемной матрицы микроскопа, приведенного в [4], составляла 118 мВт/см², что с учетом коэффициента перекрытия спектров ЭЛ и фотоприёмной системы (9.2%) позволяет оценить интегральную плотность излучения в пределах спектра ЭЛ при токе 3 мА, как 1.25 мВт/см². Такая плотность эквивалентна мощности 0.5 мВт, излучаемой плоским элементом размерами 0.2×0.2 мм с коэффициентом преобразования 0.2 мВт/А. Последнее значение сопоставимо с ранее полученными данными для одиночных СД [8], но уступает максимальным значениям для квантово-каскадных излучателей, изученных в [9]. С другой стороны, активизация источников в [9] требует приложения смещения в несколько вольт; в

данной же работе СД работают при существенно более низком напряжении питания, а потому обладают сравнимым с источниками в [9] КПД. Так, например, для тока 3 мА ($U=162$ мВ) КПД СД на основе *InAs* составил 0.10% против 0.12% для максимально «комфортных» условий работы источника диаметром 200 мкм в [9]. В области малых токов КПД источников в [9] существенно снижается.

Отметим также достаточно высокую пространственную однородность распределения интенсивности излучения в полученной нами матрице (см. Рис.4, 5, 7, 8). При этом, очевидно, стоит указать на то, что для точного (численного) анализа однородности необходимо учитывать также и неоднородность чувствительности самой измерительной системы. Так, например, из Рис.4 видно, что рост интенсивности электролюминесцентного излучения элементов при «вертикальном» (относительно положения рисунка) сканировании повторяет характер распределения интенсивности ОЛ и «нулевой» линии т.е. интенсивности в областях вне активных элементов матрицы. Такое изменение может быть связано также и с непараллельностью поверхности матрицы и фокальной плоскости измерительного фотоприемника.

Авторы выражают благодарность Петрову А.С. (ОАО «ЦНИИ Электрон») за полезные обсуждения, а также Закгейму А.Л. и Чернякову А.В. (Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур при ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН), Брункову П.Н. и Поповой Т.Б. (ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях») за помощь в проведении измерений. Работа, выполненная в ООО «ИоффеЛЕД» в части исследования фоточувствительности ФД, поддержана проектом ФЦП "Разработка технологии получения полупроводниковых фоточувствительных материалов для матричных инфракрасных фотоприемников и тепловизоров" (код контракта 14.576.21.0057). Работа в части проведения оптических измерений (А.А. Лавров) поддержана проектом РНФ № 14-12-00255.

Литература

- ¹ А.В. Пенцов, С.В. Слободчиков, Н.М. Стусь и Г.М. Филаретова, авт.свид. № 1840979 по заявке №3207490/31-26 на «Способ получения фотодиодов» с приоритетом от 15.08.1988.
- ² P.N. Brunkov, N.D. P'inskaya, S.A. Karandashev, N.G. Karpukhina, A.A. Lavrov, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', A.A. Usikova, "Low dark current *InAs/InAsSbP* DH photodiodes", *Infrared Phys. Technol.*, 2016 (in press).
- ³ Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Н.Г. Карпухина, А.А. Лавров, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.А. Усикова, «Диодные матрицы формата 3x3 на основе одиночных гетероструктур *p-InAsSbP/n-InAs*», *Прикладная физика*, № 6, стр. 47-51 (2014).
- ⁴ А.П. Ковчавцев, Г.Л. Курышев, В.М. Базовкин, А.А. Гузев, И.И. Ли, Н.А. Валишева и др. Коллективная монография. "Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона", Новосибирск, Наука (2001).
- ⁵ В.И. Иванов-Омский, Б.А. Матвеев, «Отрицательная люминесценция и приборы на ее основе (обзор)», *ФТП*, **41**(3), 257-268 (2007).
- ⁶ B.A. Matveev, N.V. Zotova, S.A. Karandashev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', G.N. Talalakin "Backside illuminated *In(Ga)As/InAsSbP* DH photodiodes for methane sensing at 3.3 μm ", *Proc. SPIE* **4650**, p.173-178 (2002).
- ⁷ X. Zhou, X. Meng, A.B. Krysa, J.R. Willmott, J.S. Ng, "InAs Photodiodes for 3.43 μm Radiation Thermometry", *IEEE SENSORS JOURNAL*, **15** (10), 5555-5560 (2015).
- ⁸ Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, «Источники спонтанного излучения на основе арсенида индия (обзор)», *ФТП*, **42** (6), 641-657, (2008).
- ⁹ J. Abell, C.S. Kim, W.W. Bewley, C.D. Merritt, C.L. Canedy, I. Vurgaftman, J.R. Meyer, and M. Kim, "Mid-infrared interband cascade light emitting devices with milliwatt output powers at room temperature", *Appl. Phy. Lett.* **104**, 261103 (2014); doi: 10.1063/1.4886394.