

# Светоизлучающая диодная линейка ( $\lambda = 3.7$ мкм) на основе InGaAsSb

© А.Л. Закгейм\*, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев<sup>†</sup>,  
М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.А. Усикова, А.Е. Черняков\*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур  
при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 8 июля 2008 г. Принята к печати 18 июля 2008 г.)

Приведены спектральные, вольт-амперные и ватт-амперные характеристики узкозонных диодных структур  $p$ -InAsSbP/ $n$ -InGaAsSb/ $n^+$ -InAs с размерами активных элементов  $130 \times 130$  мкм. Проведен анализ двумерного распределения излучения образцов, выполненных в виде излучающих флип-чип линеек  $1 \times 4$ , включая анализ однородности излучения, и определена предельная эффективная температура, создаваемая излучателем данного типа.

PACS: 73.40.Kp, 78.60.Fi, 85.60.Jb

## 1. Введение

Светодиоды среднего инфракрасного (ИК) диапазона спектра (длины волн  $\lambda = 3-5$  мкм) способны создавать потоки излучения, эквивалентные потокам от тела, нагретого до 1250 К [1], и поэтому могут заменить применяемые накальные источники в миниатюрных и неэнергоёмких приборах. Светодиоды, выполненные в виде линейки, содержащие элементы с индивидуальной адресацией, применяются в спектрометрах, измеряющих пропускание среды на выделенных дифракционной решеткой длинах волн. В качестве примеров таких применений упомянем использование структур InGaAs/InAs для изготовления монолитных [2] и наборных [3] светодиодных линеек, в составе спектрометрических модулей для анализа пропускания в области  $\lambda \approx 3.3$  мкм. Для изготовления монолитных линеек в спектральной полосе, имеющей максимум вблизи  $\lambda = 3.6-3.7$  мкм, использовались  $p$ - $n$ -гомопереходы в InAs [4] и  $W$ -образные квантовые ямы InAs/GaInSb/InAs, полученные на подложке GaSb [5].

Указанные выше излучатели обладали невысокой эффективностью, что вызвано удаленностью  $p$ - $n$ -перехода от теплоотвода, связанным с этим высоким тепловым сопротивлением и „затенением“ части излучения катодом в конструкциях с точечным контактом [2-4]. К существенным недостаткам указанных излучателей относятся также поглощение в  $p$ -InAs из-за большой глубины залегания  $p$ - $n$ -перехода (50 мкм) [4] и большое напряжение отсечки, достигающее 5-6 В в образцах с  $W$ -образными квантовыми ямами [5].

В то же время для спектрального диапазона вблизи 3.6-3.8 мкм перспективным является использование гетероструктур InGaAsSb/InAsSbP, обогащенных InAs, для которых характерна локализация дефектов структуры (дислокаций) на гетерогранице с подложкой, т.е.

на удалении от активной области, что обусловлено пониженной пластичностью твердых растворов InAsSbP и InGaAsSb и перераспределением напряжений в процессе роста слоев [6]. Дополнительное преимущество, возникающее при использовании активной области, выполненной из узкозонного твердого раствора InGaAsSb, согласно мнению, высказанному авторами [7], состоит в нарушении „резонанса“ энергий спин-орбитально отщепленной и запрещенной зон и уменьшении вследствие этого скорости безызлучательных оже-процессов. Эти обстоятельства были учтены при выборе материала для создания активной области мощных диодных лазеров [8] и светодиодов [2] на основе двойных гетероструктур InAsSbP/InGaAsSb/InAsSbP.

Вместе с тем нам известна лишь одна попытка создания источника с набором светоизлучающих элементов на основе InGaAsSb [9], а работ, посвященных одиночным источникам спонтанного излучения, содержащих InGaAsSb, крайне мало.

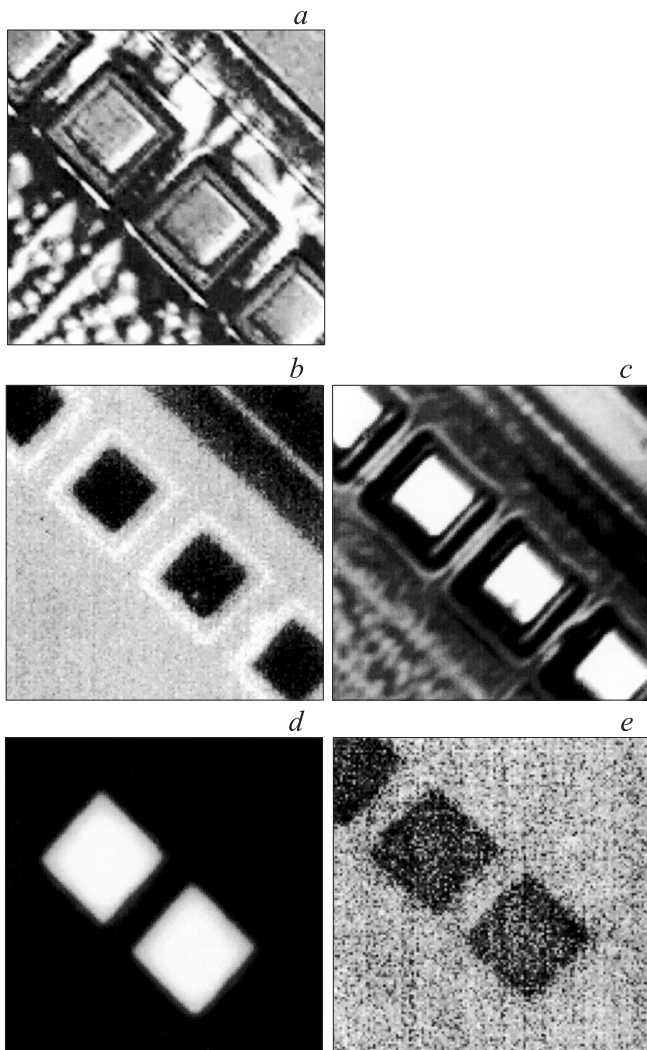
В данной работе мы приводим первые данные о создании линеек флип-чип светодиодов  $1 \times 4$  на основе гетероструктур InGaAsSb/InAsSbP с индивидуальной адресацией, излучающих на длине волны  $\lambda = 3.7$  мкм.

## 2. Образцы и методики исследований

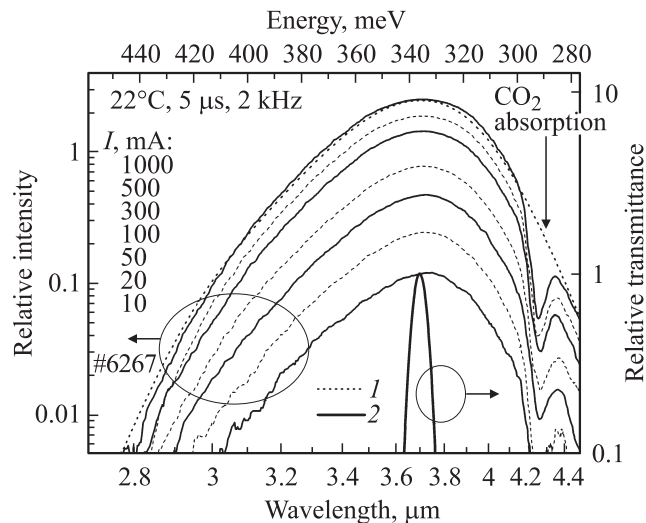
Образцы для исследований изготавливались из гетероструктур, аналогичных описанным в [8] и состоящих из широкозонного контактного слоя  $p$ -InAsSbP (толщина 2 мкм, ширина запрещенной зоны при 300 К  $E_g \approx 420$  мэВ) и активной области  $n$ -InGaAsSb (толщина 5 мкм), полученных методом жидкофазной эпитаксии на прозрачной для излучения с  $\lambda \approx 3.7$  мкм подложке  $n^+$ -InAs (концентрация электронов  $n \sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup>). Для создания диодов использовалась стандартная „мокрая“ фотолитография. Конструкция чипов включала омические контакты (анод и катод), сформированные на эпи-

<sup>†</sup> E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru

таксиальной стороне структуры, была в целом аналогична описанным нами ранее (см., например, [1,10]) и отличалась лишь формой и количеством мез (4 квадратные близко расположенные мезы  $130 \times 130$  мкм вместо одной круглой), соотношением сторон в „подковообразном“ катоде и несколько меньшей глубиной травления мезы ( $H_m < 10$  мкм). Монтажная плата из полуизолирующего кремния с локальными „шинами“ из припоя позволяла осуществлять сборку линеек по методу флип-чип и обеспечивать при этом индивидуальное подключение анодов элементов к источнику (источникам) питания; катод был общим для всех элементов. Анодные (раз-



**Рис. 1.** Изображения линейки диодов в видимом (*a*) и инфракрасном (*b, c, d, e*) излучении. Темный фон соответствует низкой „эффективной температуре“ (излучательной способности), белый цвет соответствует высокой „эффективной температуре“ (излучательной способности). Условия регистрации: *a, b, c* — регистрация со стороны эпитаксиальных слоев, *d, e* — регистрация со стороны подложки  $n^+$ -InAs, *c* — освещение внешним источником с  $\lambda = 2.9$  мкм; *d, e* — параллельное подключение элементов, подача прямого смещения одновременно на два (*d*) и обратного смещения одновременно на три (*e*) элемента линейки.



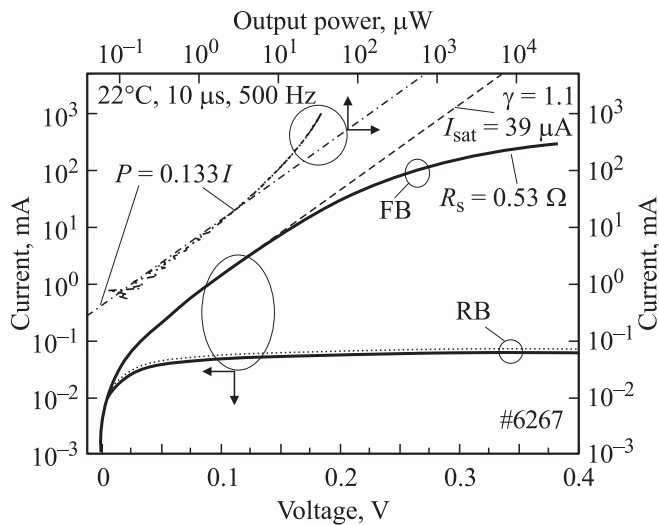
**Рис. 2.** Спектры электролюминесценции одного из элементов светодиодной линейки из InGaAsSb при комнатной температуре в диапазоне токов 10–1000 мА в импульсном режиме. 1 — не искаженный поглощением  $\text{CO}_2$  спектр излучения, 2 — кривая Гаусса ( $\text{FWHM} = 0.05$  мкм), описывающая полосу спектра (или спектр пропускания „идеального“ фильтра), для которой определялась эффективная температура  $T_e$ .

мером  $100 \times 100$  мкм) и катодный контакты, „усиленные“ за счет гальванического осаждения золота с суммарной толщиной 1.5–2 мкм, аналогичные описанным нами ранее [11], специально не вжигались. На рис. 1, *a* приведена фотография в видимом свете эпитаксиальной (контактной) поверхности линейки; там же приведены ИК изображения со стороны эпитаксиальных слоев (рис. 1, *b, c*) и ИК изображения смонтированных чипов (рис. 1, *d, e*), полученные с помощью инфракрасного микроскопа, изготовленного в Институте физики полупроводников СО РАН (Новосибирск, Россия) на основе гибридной микросхемы охлаждаемого (77 К) матричного фотоприемного InAs-устройства  $128 \times 128$  с шагом элементов 50 мкм [12] и максимумом чувствительности при  $\lambda = 2.9$  мкм. Измерения проводились в равновесных условиях (рис. 1, *b*), при подаче смещения на элементы (рис. 1, *d, e*) и при использовании внешней подсветки с помощью светодиода с длиной волны в максимуме спектра излучения 2.9 мкм LED29Sc [13], питаемого постоянным током 20 мА (рис. 1, *c*).

На рис. 2 представлены измеренные при комнатной температуре спектры электролюминесценции одного из элементов линейки при токе в диапазоне от  $I = 10$  до 1000 мА, длительности импульсов 5 мкс и частоте 2 кГц.

### 3. Результаты и их обсуждение

Применение принципа Кирхгофа к распределению равновесной излучательной способности (или „эффективной температуры“), представленной на рис. 1, *b*,



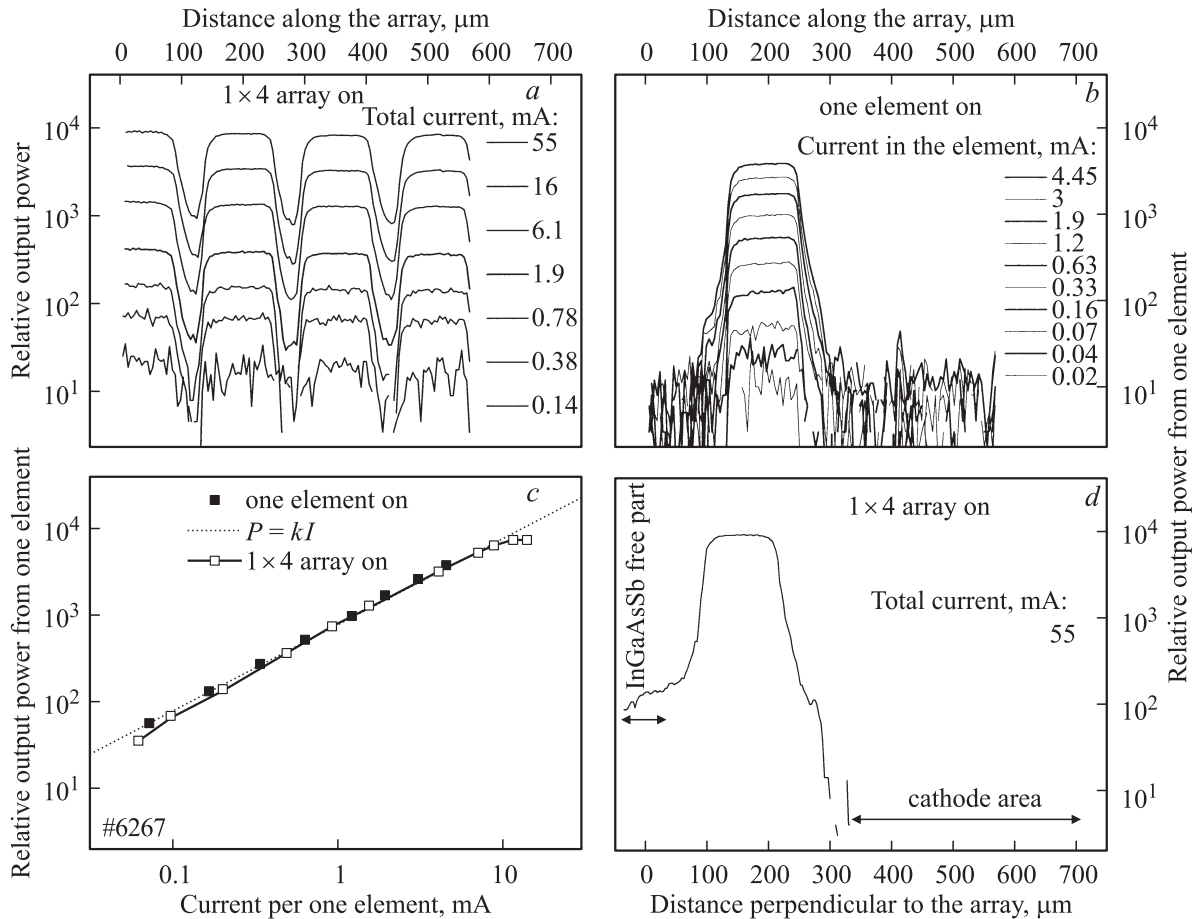
**Рис. 3.** Типичные вольт-амперные (левая и нижняя шкалы) и ватт-амперные (правая и верхняя шкалы) характеристики элементов  $130 \times 130$  мкм линейки  $1 \times 4$ . Штриховая линия — функция  $I = 0.039[\exp(eU/\gamma k_B T) - 1]$ ,  $\gamma = 1.1$ ,  $U$  — напряжение на диоде,  $I$  — ток через диод,  $k_B$  — постоянная Больцмана. Штрихпунктирная линия — функция  $P = kI$ . FB — прямое смещение, RB — обратное. Обратные ветви вольт-амперных характеристик приведены для каждого из 4 элементов линейки.

позволяет сделать вывод о том, что контакты (аноды — черные квадраты, расположенные по диагонали рис. 1, b, и катод — черный треугольник в правом верхнем углу рис. 1, b) характеризовались высоким коэффициентом отражения. Этот вывод подтверждается распределением отраженного излучения на рис. 1, c, на котором прежде темные (с пониженной излучательной способностью) области „инвертируются“ в светлые (с повышенной излучательной способностью). Аналогичные данные были получены нами для диодов  $p$ -InAsSbP/ $n$ -InAsSbP [11]. Высокий коэффициент отражения от широкого анода — положительный фактор, увеличивающий долю выводимого из светодиода излучения. К сожалению, в отличие от [11], где исследовались образцы, полученные на подложках  $n^+$ -InAs ( $n = (3-6) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), в данной работе у нас не было возможности определить коэффициент отражения от границы полупроводник/металл из-за узкой полосы чувствительности ИК микроскопа (длина волны максимума  $\lambda = 2.9$  мкм) и недостаточно высокого уровня легирования  $n^+$ -InAs; в нашем случае вклад в ИК изображение давали в основном высокоэнергетичные кванты, для которых коэффициент поглощения в подложке ( $n \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) и узкозонной активной области InGaAsSb велик. Из анализа ИК изображений коэффициент отражения от „галванического“ золота в наших контактах составлял 60%.

На рис. 3 приведены вольт-амперные,  $I(U)$ , и ватт-амперные,  $P(I)$ , характеристики, полученные при подаче смещения на один из элементов линейки. Фактор идеальности вольт-амперной характеристики  $I(U)$  составлял  $\gamma = 1.1$ , ток насыщения —  $I_{\text{sat}} = 39$  мкА (плотность

тока  $j_{\text{sat}} = 230 \text{ мА/см}^2$ ). Приведенные на рис. 3 характеристики  $I(U)$  выгодно отличаются от образцов, описанных в [9], для которых отсутствовало насыщение тока в обратной ветви,  $\gamma = 1.3$ ,  $j_{\text{sat}} > 286 \text{ мА/см}^2$ . Как видно из рис. 3, начиная с напряжений  $\sim 0.15$  В экспоненциальный характер возрастания прямого тока сменяется линейным участком, наклон которого соответствовал последовательному сопротивлению  $R_s = 0.53$  Ом. Последовательное сопротивление оказалось в 4–5 раз выше, чем в наших предыдущих образцах с аналогичными контактами и контактными слоями  $p$ -InAsSbP, но с площадью анода, большей в 4–5 раз [1]. Из этого можно заключить, что основной вклад в последовательное сопротивление вносит именно контактное сопротивление  $R_c$ , т.е.  $R_s \sim R_c$ . Отметим, что переход от экспоненциального к линейному участку характеристики  $I(U)$  соответствует переходной области от линейной к сублинейной участку ватт-амперной характеристики  $P(I)$ . Одной из причин сублинейности  $P(I)$  является сужение области протекания тока над анодом, наблюдавшееся во всех без исключения узкозонных структурах на основе InAs и InAsSbP [10], приводящее к увеличению плотности тока и росту вероятности безызлучательной оже-рекомбинации в локальных областях структуры; коэффициент преобразования при этом, согласно данным, представленным на рис. 3, уменьшается с  $0.133 \text{ мВт/А}$  на линейном участке  $P(I)$  до  $0.035 \text{ мВт/А}$  при токе 1 А. В области малых токов (прямых и обратных) сопротивление  $p$ - $n$ -перехода значительно превосходит контактное сопротивление и ток распределяется равномерно по мезе. Последнее подтверждается ИК изображениями элементов линейки, показанными на рис. 1, d, e, где области свечения при прямом смещении (d) и области поглощения (области с отрицательной люминесценцией) (e) имеют одинаковые размеры, близкие к размерам мезы. Регистрация ИК изображений при больших токах не проводилась.

Одним из факторов, обуславливающих сублинейность характеристики  $P(I)$ , является джоулев разогрев структуры с сопутствующим снижением квантовой эффективности, имеющим место во всех без исключения узкозонных диодах на  $A^{III}B^V$ . Очевидным следствием такого разогрева является сдвиг спектра излучения в длинноволновую область (см., например, [10,14]). Однако, как видно из рис. 2, в нашем случае положение максимума электролюминесценции, измеренное в импульсном режиме с большой скважностью, не меняется с током, что может свидетельствовать о несущественности влияния теплового разогрева на характеристики диодов. Не исключена также „компенсация“ эффекта сужения зоны за счет заполнения состояний в зоне проводимости (динамический эффект Мосса–Бурштейна, наблюдавшийся нами ранее в близких по составу образцах [15]). В данной работе мы не имели возможности отдельно оценить вклад каждого из указанных выше факторов, однако отсутствие „насыщения“ выходной мощности при увеличении длительности импульсов тока накачки



**Рис. 4.** Интенсивность излучения элементов  $130 \times 130$  мкм линейки  $1 \times 4$  светодиодов при прямом смещении: *a* — распределение излучения в направлении вдоль линейки при одновременном включении всех ее элементов (параллельное соединение); *b* — то же при включении одного элемента; *c* — зависимость интенсивности излучения над центром элемента от тока при подаче смещения на один из элементов и при включении всех элементов; *d* — распределение излучения поперек линейки при включении всех элементов с общим (суммарным) током 55 мА.

позволяет все же сделать предположение о несущественности джоулевого разогрева в наших образцах.

Из рис. 1 видно, что излучение элементов линейки достаточно однородно по поверхности в режимах как положительной (*d*), так и отрицательной (*e*) люминесценции. Более детальная информация о пространственном распределении излучения содержится на рис. 4, где представлено распределение интенсивности непрерывного излучения, полученное из анализа двумерных изображений, аналогичных представленным на рис. 1, по длинному (т.е. вдоль линейки, рис. 4, *a, b*) и короткому (т.е. поперек линейки, рис. 4, *d*) направлениям линейки, проходящим через центр элементов при одновременном включении всех четырех (рис. 4, *a*) и одного элемента (рис. 4, *b, d*). Там же приведена ватт-амперная характеристика, измеренная для одного из элементов при одиночном и коллективном подключении элементов линейки.

Чередование ярких (с высокой плотностью излучения) и темных (с низкой плотностью излучения) областей на рис. 4, *a* можно характеризовать контрастом (*K*), определяемым как отношение интенсивностей над мезами

и в промежутке между ними. Как видно из рис. 4, *a*, контраст изображений составляет  $K \sim 10$  и практически не зависит от тока; очевидно, что его величина определяется наложением картин излучения от близлежащих мез/элементов. Действительно, при включении лишь одного элемента (рис. 4, *b*) контраст изображения возрастает. Отметим, что при сканировании поперек линейки контраст несимметричен для левой и правой частей распределения на рис. 4, *d*. Это связано с особенностями топологии чипа: левая часть распределения на рис. 4, *d* отвечает протяженной области — дну мезы, в которой эпитаксиальные слои, включая „узкозонный“ InGaAsSb, удалены. Это создает благоприятные условия для распространения рассеянного излучения от мезы в „канале“, образованного плоскими сторонами прозрачной пластины  $n^+$ -InAs. Правая часть распределения соответствует области катода, в которой слой InGaAsSb, имеющий высокий коэффициент поглощения на длине волны регистрации (2.9 мкм), не удален. Распространение в этой области излучения, включающее акты отражения от границ чипа, затруднено.



Полученная линейка достаточно однородна по свойствам, что ее выгодно отличает от многих аналогов, например, описанных в [4], для которых разброс мощности излучения элементов достигал  $\pm 30\%$ . В пользу однородности линейки на основе InGaAsSb свидетельствует идентичность вольт-амперных характеристик элементов (рис. 2) и слабая зависимость выходной мощности одного элемента от режима включения линейки (одиночного или коллективного) (рис. 4, с).

Для оценки эффективности полученной линейки воспользуемся понятием о предельно возможном коэффициенте преобразования источника спонтанного излучения, численно равного отношению мощности отрицательной люминесценции к току насыщения ( $NPL/j_{\text{sat}}$ ) [10]. В нашем случае с учетом отражения от границы полупроводник/воздух (коэффициент отражения  $R = 0.3$ ) предельно возможный коэффициент преобразования составил  $NPL/j_{\text{sat}} = 0.23$  мВт/А ( $NLP = 0.054$  мВт/см<sup>2</sup>). Экспериментальное значение коэффициента преобразования  $k$  на линейном/начальном участке  $P(I)$  для прямого тока ( $k = 0.133$  мВт/А) значительно уступает данным, приведенным в [9], однако всего лишь на 40% меньше вышеприведенного предельно возможного значения, определяемого отношением  $NPL/j_{\text{sat}}$ . Сопоставимость экспериментального и расчетного значений коэффициента преобразования согласуется с отсутствием утечек по поверхности и свидетельствует, по нашему мнению, о высоком качестве исследованных  $p-n$ -структур.

Для указанных выше применений удобно пользоваться не интегральной мощностью излучения, а понятием яркости, которую можно оценивать с помощью „эффективной температуры“  $T_a$ , т.е. температуры, при которой абсолютно черное тело создает поток излучения, аналогичный потоку от диода, смещенного в прямом [1,5,10,16] или обратном [17] направлениях в выбранной спектральной полосе. При больших смещениях, как уже упоминалось выше, область протекания тока (область свечения) сужается до размеров, близких к размеру анода. С учетом этого сужения максимально достигнутая эффективная температура вблизи от максимума излучения светодиода при  $\lambda = 3.7$  мкм, определенная для узкого участка спектра, сопоставимого с шириной полосы большинства коммерческих интерференционных фильтров (ширина на половине максимума FWHM = 0.05 мкм, см. кривую 2 на рис. 2) и с разрешением миниатюрных спектрометрических ИК модулей [3], составляла  $T_a = 835$  К ( $I = 1$  А,  $j = 10$  кА/см<sup>2</sup>), что уступает данным, полученным в более коротковолновых диодах с более глубокой мезой ( $H_m = 40$  мкм,  $\lambda = 3.3$  мкм,  $T_a = 1250$  К,  $j = 10.6$  кА/см<sup>2</sup> [1]). Если же считать, что область свечения при больших токах совпадает с размерами мезы, то максимально достигнутое значение  $T_a$  составит 750 К ( $I = 1$  А,  $j = 5.9$  кА/см<sup>2</sup>), что сопоставимо со значениями, полученными в образцах с  $W$ -образными квантовыми ямами ( $\lambda = 3.6$  мкм,  $T_a = 600$  К [5]). Тем не менее даже при такой заниженной оценке  $T_a$  для исследованных в

данной работе диодов имеется заметное преимущество по сравнению с диодами, описанными в [5], которое состоит в существенно меньших рабочих напряжениях (0.4 против 5 В) и меньшей рассеиваемой мощности, что важно при создании высокого инфракрасного контраста с быстрым переключением элементов линейки.

Дальнейшее повышение эффективности светоизлучающей линейки может быть достигнуто посредством „просветления“ световыводящей поверхности, например, при создании антиотражающего хаотичного микрорельефа [1,10] или за счет взаимодействия квантов с двумерным фотонным кристаллом на поверхности  $n^+-\text{InAs}$  [18].

## 4. Заключение

Созданы светодиодные линейки на основе гетероструктур с активным слоем из обогащенного арсенидом индия твердого раствора InGaAsSb, с размерами элементов  $130 \times 130$  мкм, обладающие низкими обратными токами,  $j_{\text{sat}} = 230$  мА/см<sup>2</sup>, низким последовательным сопротивлением,  $R_s = 0.53$  Ом, и способностью имитировать нагретое до 835 К тело в спектральной области 3.7 мкм. Высокая однородность электрических свойств элементов в сочетании с однородностью излучательных характеристик и отсутствием взаимного влияния элементов позволяет использовать созданные линейки для калибровки фотоприемных систем, а также в миниатюрных спектрометрических модулях для анализа пропускания или отражения в средней ИК области спектра.

Работа частично поддержана грантом седьмой рамочной программы ЕС (MINIGAS, #224625).

Авторы благодарят О.Н. Сараева и ООО „Июффе ЛЕД“ за помощь в работе.

## Список литературы

- [1] B. Matveev, N. Zotova, N. Il'inskaya, S. Karandashev, M. Remennyi, N. Stus', A. Kovchavtsev, G. Kuryshv, V. Polovinkin, N. Tarakanova. In: *Progress in Semiconductor Materials V — Novel Materials and Electronic and Optoelectronic Applications*, ed. by L.J. Olafsen, R.M. Biefeld, M.C. Wanke and A.W. Saxler. [MRS Proc., **891** (2006) paper #0891-EE01-04].
- [2] B.A. Matveev, G.A. Gavrilov, V.V. Evstropov, N.V. Zotova, S.A. Karandashov, G.Yu. Sotnikova, N.M. Stus', G.N. Talalakin, J. Malinen. *Sens. Actuators B*, **38–39**, 339 (1997).
- [3] J. Malinen, T. Hannula, N.V. Zotova, S.A. Karandashov, I.I. Markov, B.A. Matveev, N.M. Stus', G.N. Talalakin. *Proc. SPIE*, **2069** (*Optical Methods for Chemical Process Control*), 95 (1993).
- [4] Ю.Ю. Билинец, В.Г. Кондратьева, А.А. Качур, О.М. Штец. *Электрон. техн.*, вып. 1 (204), 91 (1990).
- [5] N.C. Das, G. Simonis, J. Bradshaw, A. Goldberg, N. Gupta. *Proc. SPIE*, **5408**, 136 (2004). <http://spie.org/x8631.xml?highlight=x2412>.

- [6] Т.С. Аргунова, Р.Н. Кютт, Б.А. Матвеев, С.С. Рувимов, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. ФТТ, **36**, 3071 (1994).
- [7] Д.М. Крюкова, В.И. Лескович, А.В. Матвеев. Письма ЖТФ, **5**, 717 (1979).
- [8] M. Aydaraliev, N.V. Zotova, S.A. Karandashov, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', G.N. Talalakin, W.W. Bewley, J.R. Lindle, J.R. Meyer. Appl. Phys. Lett., **81**, 1166 (2002).
- [9] A. Krier, V.V. Sherstnev, H.H. Gao. J. Phys. D: Appl. Phys., **33**, 1656 (2000).
- [10] Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь. ФТП, **42**, 641 (2008).
- [11] А.Л. Закгейм, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.Е. Черняков. Прикл. физика, № 6, 143 (2008).
- [12] В.М. Базовкин, А.А. Гузев, А.П. Ковчавцев, Г.Л. Курышев, А.С. Ларшин, В.Г. Половинкин. Прикл. физика, № 2, 97 (2005).
- [13] www.ioffeled.com
- [14] D.G. Gevaux, A.M. Green, C.C. Philips, I. Vurgaftman, W.W. Bewley, C.L. Felix, J.R. Meyer, H. Lee, R. Martinelli. IEE Proc. Optoelectron., **150** (4), 351 (2003).
- [15] B. Matveev, N. Zotova, N. Il'inskaya, S. Karandashev, M. Remennyi, N. Stus'. Phys. Status Solidi C, **2** (2), 927 (2005).
- [16] V.K. Malyutenko, O.Yu. Malyutenko, A.V. Zinovchuk. Appl. Phys. Lett., **89**, 201 114 (2006).
- [17] В.И. Иванов-Омский, Б.А. Матвеев. ФТП, **41**, 257 (2007).
- [18] Ю.М. Задиранов, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.А. Усикова. Письма ЖТФ, **34** (10), 1 (2008).

Редактор Л.В. Шаронова

## Light emitting diode array ( $\lambda = 3.7 \mu\text{m}$ ) on the base of InGaAsSb

A.L. Zakheim\*, N.V. Zotova, N.D. Il'inskaya,  
S.A. Karandashev, B.A. Matveev, M.A. Remennyi,  
N.M. Stus', A.A. Usikova, A.E. Chernyakov\*

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia  
\* Scientific–Technological Center  
for Microelectronics and Submicron Heterostructures  
at Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** We present and analyze current–voltage, current–power and spectral characteristics of the narrow band  $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InGaAsSb}/n^+\text{-InAs}$  diode structures whose lateral dimensions are  $130 \times 130 \mu\text{m}$ . We study two-dimensional radiation distribution in flip-chip light emitting diode arrays  $1 \times 4$  including determination of uniformity and apparent temperature produced by biased device elements.