

## 256-channel photodetector arrays on the lead chalcogenides base

G. A. Arakelov, V. D. Bochkov, B. N. Drajnikov, J. A. Kazarova, P. A. Kuznetsov  
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*It have been designed, manufactured and tested 256-channel photodetector arrays (PA) intended for use in optical equipment for various application operating in the spectrum range 1—3 and 3—5  $\mu\text{m}$ . The main applications-portable thermovision devices, spectrometers, security devices, instruments industrial automatics etc. PA designed in two modifications depending on applied photosensitive material PbSe (PA1) or PbS (PA2).*

PACS: 85.60.-q

УДК 621.383

## ИК-изображения флип-чип-диодов на основе InAsSbP в спектральной области 3 мкм

A. Л. Закгейм, Н. В. Зотова, Н. Д. Ильинская, С. А. Карандашев, Б. А. Матвеев,  
М. А. Ременный, Н. М. Стусь, А. А. Усикова, А. Е. Черняков  
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

*Проведен анализ инфракрасных "собственных" и в отраженных лучах ( $\lambda = 2,9$  мкм) изображений флип-чип-светодиодов на основе  $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAsSbP}/n^+\text{-InAs}$ , включая изображения, получаемые при прямом и обратном смещениях  $p$ - $n$ -перехода. Дана оценка коэффициентов отражения от омических контактов и сделаны предположения о соотношении величин контактного и объемного сопротивлений.*

PACS: 85.60.-q

### Введение

Светодиоды, излучающие в средней инфракрасной (ИК) области спектра (3—5 мкм), используются в оптических датчиках химического состава среды [1] и в качестве тестовых объектов в оптической пирометрии. Применительно к последнему в работе [2] с помощью ИК-камеры с рабочим диапазоном 3—5 мкм анализировались изображения и "эффективные температуры" фотонных излучателей на основе гетероструктур III—V. При этом согласно [2] наибольший интерес для практики представляли светодиоды флип-чип-конструкции, описанные в работах [3, 4] и обеспечивающие большие яркость и эффективность по сравнению с традиционными светодиодами, имеющими точечный контакт. Вместе с тем в [2] приведены неоптимальные для получения высокой мощности светодиоды, а именно, светодиоды, в которых контакт покрывает не более 25 % площади рабочей области приборов, следствием чего является невысокая эффективность из-за сгущения линий тока вблизи контакта [4—6]. ИК- (или "тепловые") изображения светодиодов приведены с недостаточно высоким разрешением, поэтому ряд

деталей этих изображений, важных для практики и характерных для флип-чип-конструкций с отражающими контактами, опущены. Кроме того, конструкции диодных структур представлены в работе [2] упрощенно, что может являться источником ошибок в интерпретации получаемых результатов. В ряде работ [7—9] приведены ИК-изображения светодиодов с высоким разрешением, однако в них отсутствуют исходные (при нулевом токе) изображения со стороны излучающей поверхности, содержащие дополнительную информацию, позволяющую судить, например, об отражающих свойствах контактов.

В данной работе приводятся и анализируются инфракрасные "собственные" и в отраженных лучах ( $\lambda = 2,9$  мкм) изображения высокого разрешения флип-чип-светодиодов на основе  $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAsSbP}/n^+\text{-InAs}$ , излучающих с длиной волны в максимуме спектрального распределения 2,9 мкм (300 К).

### Образцы и методика эксперимента

Исследовались образцы, аналогичные описанным ранее в работе [10] и изготовленные из согла-

сованных по периоду решетки с подложкой гетероструктур  $p\text{-InAsSbP}_{0,24}$  ( $\text{Zn}$ ,  $p = 2\text{--}5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ )/ $n\text{-InAsSbP}_{0,24}$  с толщинами слоев 3 и 5 мкм, соответственно, выращенных на сильнолегированной (прозрачной) подложке  $n^+\text{-InAs(Sn)}$  (100) ( $n^+ = (3\text{--}6) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Образцы изготавливали методами стандартной фотолитографии и "мокрого" химического травления. Они представляли собой мезадиоды с круглой активной областью 1, 3 и расположением обоих омических контактов (т. е. круглого анода 4 диаметром 150 мкм и катодов 7—10) на эпитаксиальной стороне структуры (рис. 1).

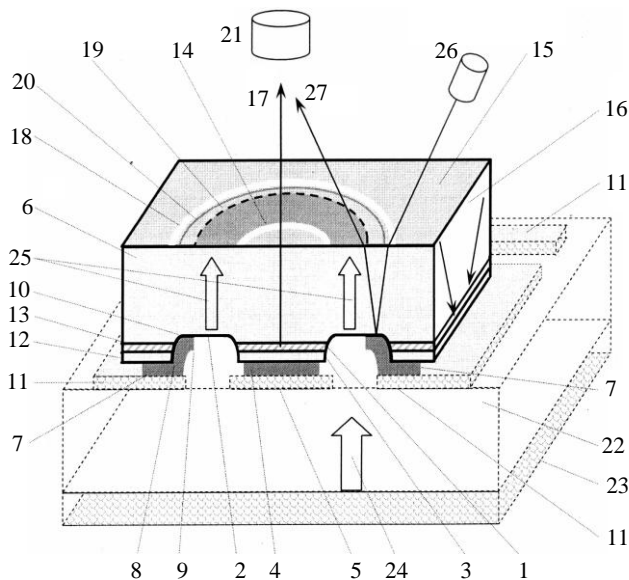


Рис. 1. Схема диодного чипа:

1 — узкозонная активная область, ограниченная конусообразной мезой; 2 — углубление в чипе (химически вытравленная часть); 3 — электрически активный слой  $p$ -типа проводимости в виде круглого диска; 4 — круглый омический контакт (анод); 5 — контактная площадка на монтажной плате для мезы (анод); 6 — широкозонная подложка или эпитаксиальный слой  $n$ -типа проводимости (плоскость  $1\bar{1}0$ ); 7 — внешний край плоской области катода, находящейся на поверхности слоя  $p$ -типа проводимости; 8 — "вогнутый" перегиб катода; 9 — внутренний край "плоской" части катода, находящейся на поверхности широкозонной подложки или эпитаксиального слоя  $n$ -типа проводимости 6; 10 — "выпуклый" перегиб катода; 11 — контактная площадка на монтажной плате (катод); 12 — электрически неактивная часть широкозонного слоя  $p$ -типа проводимости; 13 — электрически неактивная часть узкозонного слоя; 14 — проекция круглого контакта (анода) на световыводящую поверхность 15 (плоскость  $11\bar{1}$ ); 16 — боковая грань чипа; 17 — направление наблюдения/выхода излучения; 18 — проекция "вогнутого" перегиба катода на поверхность 15 (белая линия); 19 — проекция края катода (пунктирная линия); 20 — проекция начала "выпуклого" перегиба катода (сплошная линия); 21 — объектив ИК-микроскопа; 22 — монтажная плата; 23 — слой низкотемпературного припоя на нижней поверхности монтажной платы; 24 — направление входящего со стороны монтажной площадки излучения; 25 — направление выходящего из чипа излучения; 26 — светодиод, осуществляющий подсветку чипа; 27 — ход лучей от подсвечивающего светодиода

Изготовленные вакуумным распылением анодный ( $\text{Cr—Au(Zn)—Ni—Au}$ ) и катодный ( $\text{Au(Ge)—Ni—Au}$ ) контакты с суммарной толщиной  $\sim 0,25$  мкм впоследствии утолщались при электролитическом осаждении золота до 1,5—2 мкм. Контакты специально не вжигались.

В работе изучались как несмонтированные чипы, лежащие на прозрачных полированных сапфировых пластинах, так и образцы, собранные по методу флип-чип, а именно припаянные на монтажную плату из полуизолирующего кремния 22 с контактными областями 5, 11. В первом случае мы пренебрегали излучением, исходящим от сапфира.

Данные авторов показывают, что при использованных травителях стенка мезы имеет начальный "вертикальный" участок, т. е. поверхность стенки вблизи поверхности мезы 3 цилиндрическая. Цилиндрическая поверхность заменяется плавной криволинейной поверхностью, выходящей в "горизонтальную" часть 2\*.

Регистрация излучения и получение двумерного распределения интенсивности "эффективной температуры" осуществлялись с помощью ИК-микроскопа, изготовленного в Институте физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск, Россия) на основе гибридной микросхемы охлаждаемого (77 К) матричного фотоприемного устройства  $\text{InAs}$   $128 \times 128$  с шагом элементов 50 мкм [11]. Размеры поля зрения микроскопа составляли  $400 \times 400$  мкм. Измерения проводили как в равновесных условиях, так и при использовании внешней подсветки с помощью изготовленного в ООО "Июффе ЛЕД" "иммерсионного" светодиода с длиной волны в максимуме спектра излучения 2,9 мкм, питаемого постоянным током 20 мА [12]. На рис. 2 приведены реконструированный для толщины 90 мкм спектр пропускания подложки  $n^+\text{-InAs}$  (300 К), спектральные характеристики фотоприемного устройства (77 К), спектры электролюминесценции исследованных чипов и подсвечивающего светодиода (все при 300 К); расположение микроскопа 21 и подсвечивающего светодиода 26 относительно чипа показаны на рис. 1. В некоторых экспериментах регистрировались ИК-изображения с эпитаксиальной стороны чипа в направлении стрелки 24. На рис. 3 приведена вольт-амперная характеристика (ВАХ) подсвечивающего светодиода/исследуемого чипа.

\* В этой связи схема чипа с "вертикальным" участком стенки мезы, приводимая здесь и в работах [8, 12], ближе к действительности, чем схема с конусообразной стенкой мезы с фиксированным углом наклона стенок, представлена в работе [2] и в некоторых прежних работах авторов статьи.

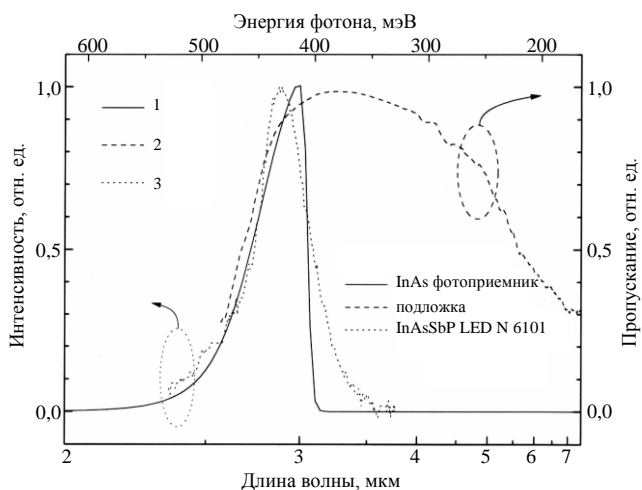


Рис. 2. Спектр чувствительности фотоприемной системы микроскопа (1), спектр пропускания подложки  $n^+$ -InAs толщиной  $\sim 90$  мкм (2) и спектр излучения подсвечивающего и исследуемого чипа светодиода из InAsSbP (3)

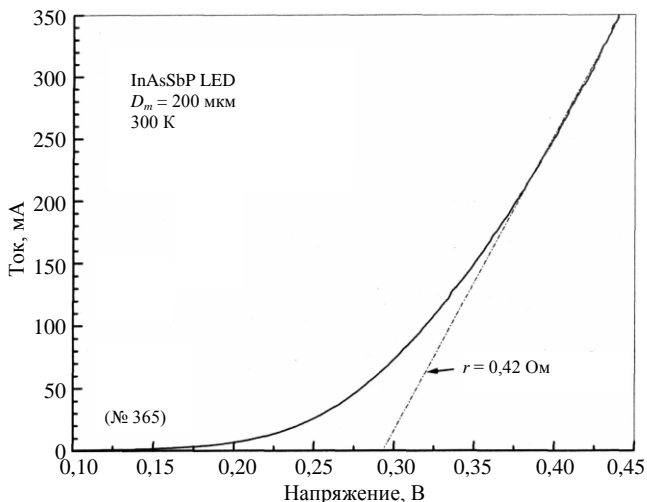


Рис. 3. ВAX исследуемого чипа/подсвечивающего светодиода из InAsSbP

Результаты и их обсуждение

Фотография чипа, полученная в оптическом микроскопе (а), а также двумерное распределение излучательной способности (или "эффективной температуры"), полученное со стороны контактной поверхности свободного (б, в) и смонтированного на монтажную плату (г, д) чипа при  $T = 300$  К приведены на рис. 4. В последнем случае (г, д) обращенной к объективу микроскопа стороной является поверхность подложки 15 (см. рис. 1). На рис. 4, б, полученном без использования внешней подсветки, можно различить топологию, сходную с геометрией чипа, а именно, круглую темную (т. е. с пониженной излучательной способностью) область (А4), близкую по размеру к диаметру анода 4, и две концентрические

линии, включая "внутреннюю" темную линию (А19) и светлую линию (А20).

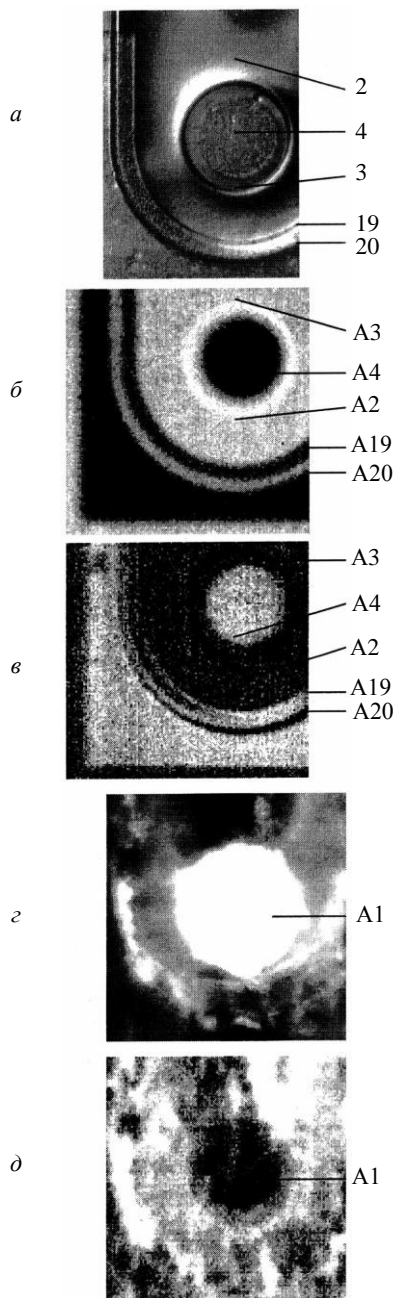


Рис. 4. Фотография поверхности (а) и ИК-изображения чипа (б, в), полученные со стороны контактов, и ИК-изображения чипа, смещенного в прямом (г,  $I = 1,1$  mA) и обратном (д,  $I = -1,1$  mA) направлениях со стороны подложки.

Цифровые обозначения см. в тексте и на рис. 1

Форма линий повторяет край U-образного катода, и их возникновение, несомненно, связано с особенностями топологии последнего. Действительно, перегиб 8 (см. рис. 1, поз. 18) аналогично склону мезы (А3) выглядит светлее прилегающих к нему плоских областей чипа с "пониженной излучательной способностью". Внутренняя темная линия (А19) граничит со светлой широкой обла-

стью (A2) и поэтому ее можно приписать внутреннему краю катода 9 (см. рис. 1).

Согласно принципу Кирхгофа излучательная способность объекта прямо пропорциональна его поглощательной способности. Последняя в свою очередь органически связана с коэффициентом отражения, т. е. уменьшается при его увеличении. Учитывая вышесказанное, из данных на рис. 4, б можно заключить, что коэффициент отражения для обоих контактов в образце имеет более высокое значение, чем для поверхности полупроводника — в нашем случае для области 2. Этот вывод подтверждается данными о неравновесном двумерном распределении интенсивности отраженного излучения светодиода с длиной волны 2,9 мкм, показанным на рис. 4, в.

Видно, что распределение "эффективной температуры" на рис. 4, в является "инвертированным" по отношению к распределению на рис. 4, б, а именно, темные области на рис. 4, б выглядят светлыми на рис. 4, в, и наоборот. При оценке "зеркальности" контактов были измерены интенсивности отраженного излучения, полученные для близкорасположенных областей, покрытых и не покрытых металлом, соответственно (например, используя следующие сочетания областей изображений (A3)/(A4), (A19—A20)/A2 и т. д.).

Полагая коэффициент отражения от полупроводника равным 0,3, мы получили значение коэффициента отражения от "гальванического" золота контактов, равное  $R = 0,6$ . То же значение  $R$  для "гальванического" золота было получено и из количественного анализа данных на рис. 4, б.

При подаче на диод прямого смещения (см. рис. 4, з) ИК-изображение чипа не имеет существенных деталей вне области мезы, поскольку даже при небольших токах ( $I \sim 1$  мА) интенсивность рекомбинационного излучения значительно превышает равновесное. На рис. 4, з можно различить слабо светящиеся области вне мезы в виде дуги, образованные, очевидно, при отражении рассеянного внутри кристалла излучения от склона катода 10 (см. рис. 1). При малых токах распределение интенсивности вдоль излучающей поверхности имеет характерное "плато", причем размер области "плато" близок к диаметру мезы; при больших токах излучение концентрируется в центральной области анода, что связано с локализацией протекания тока, обусловленное изменением сопротивления  $p$ - $n$ -перехода и наблюдавшееся ранее во многих аналогичных образцах [4]. Такое перераспределение тока обусловлено тем, что при малых смещениях  $p$ - $n$ -перехода сопротивление  $p$ - $n$ -перехода  $r_{p-n}$  велико ( $r_{p-n} \gg r_{cont}$ , например из данных на рис. 3  $r_{p-n, 1 \text{ мА}} = 330$  Ом), и область протекания тока "копирует" форму высокоомной об-

ласти пространственного заряда, ограниченной мезой. При увеличении смещения (при больших токах) сопротивление  $p$ - $n$ -перехода  $r_{p-n}$  становится меньше контактного сопротивления анод/полупроводник  $r_{cont}$ , и область протекания тока локализуется под контактом. Легко понять, что при низкой проводимости подложки ( $r_{bulk}$ )<sup>-1</sup> и выполнении условия  $r_{cont} \ll r_{bulk}$  при больших смещениях плотность тока в удаленных от катода областях, например в центре мезы, наименьшая, и центр мезы должен иметь меньшую яркость излучения. В нашем случае нет понижения яркости в центре мезы, что является следствием того, что  $r_{cont} \gg r_{bulk}$ . Из этого также следует, что полученное в эксперименте последовательное сопротивление 0,42 Ом (см. рис. 3) обусловлено контактным сопротивлением анода.

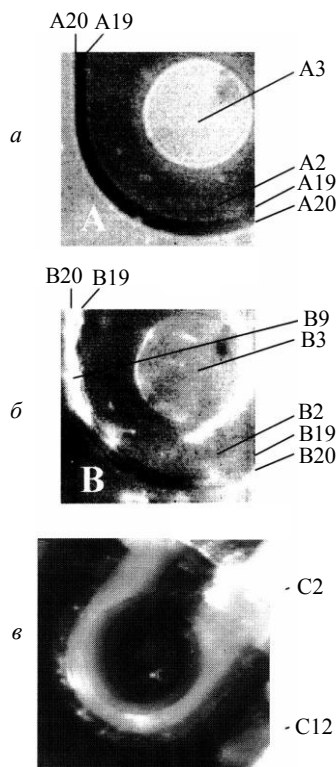
При обратном смещении ( $U < 0$ ) диод переходит в режим отрицательной люминесценции (ОЛ) [13], т. е. понижения "эффективной температуры" в активной области  $p$ - $n$ -перехода ( $\Delta T < 0$ , рис. 4, д). Вследствие большого значения  $E_g$  мощность ОЛ и, соответственно, контраст изображений при  $U < 0$  в данных образцах были невысоки, и поэтому распределение ОЛ не анализировалось.

На рис. 5, а приведена ИК-фотография несмонтированного чипа со стороны подложки  $n^+$ -InAs в равновесных условиях, на которой хорошо различима проекция  $U$ -образной части катода, не покрытой эпитаксиальными слоями InAsSbP (область между линиями (A19) и (A20), область 9—10 — на рис. 1). В соответствии с принципом Кирхгофа пониженная излучательная способность (обозначенная в нашем случае темным фоном) указывает на высокий коэффициент отражения от границы полупроводник/металл в области внутренней плоской кромки катода.

Пониженная излучательная способность области 2 (см. рис. 1), расположенной между основанием мезы и внутренним краем катода и выраженная темным фоном в области (A2) на рис. 5, а объясняется отсутствием в ней эпитаксиальных слоев InAsSbP<sub>0,24</sub>, излучающих/поглощающих вблизи максимума чувствительности фотоприемного устройства.

При использовании внешней засветки к деталям инфракрасного изображения, описанным выше, добавляется излучение, отраженное от эпитаксиальной стороны структуры, показанное стрелкой 27 на рис. 1 и проявляющееся прежде всего в виде узкой яркой полоски (B9) на рис. 5, б. Местоположение этой ярко светящейся области (между линиями (B19), (B20)) позволяет предположить, что имеет место отражение излучения светодиода от металлического катода в области между его внутренним краем 9 и точкой перегиба

8, т. е. от плоской части катода, находящейся на подложке  $n^+$ -InAs. Из-за наличия крутого склона мезы (в том числе в области между точками 8 и 9) и его "выпуклости" по отношению к падающему пучку следует принять, что вероятность попадания отраженных от склона лучей в объектив микроскопа крайне мала при использованной геометрии засветки. Отметим, что в выбранной геометрии эксперимента нами не наблюдалось заметного увеличения яркости других "горизонтальных" областей контактов, например, областей 4 и 7 (область, обозначенная белыми буквами (A) и (B) на рис. 5), имеющих подходящую/выгодную для отражения лучей угловую ориентацию. Основной причиной этого является высокий коэффициент поглощения в эпитаксиальных слоях InAsSbP<sub>0,24</sub>, находящихся на пути лучей от подсвечивающего светодиода ( $\lambda = 2,9$  мкм). Схематично вышеуказанное поглощение показано на боковой грани 16 стрелками/лучами, заканчивающимися в узкозонных слоях InAsSbP<sub>0,24</sub>, т. е. не достигающими эпитаксиальной, в том числе с контактами, поверхности образца.



**Рис. 5. ИК-изображения диодного чипа  $p$ -InAsSbP<sub>0,24</sub>/ $n$ -InAsSbP<sub>0,24</sub> со стороны подложки  $n^+$ -InAs при нулевом смещении ( $U = 0$ ,  $t \sim 30$  °C):** несмонтированный чип в равновесии (A) и при внешней подсветке (B); C — чип, смонтированный на кремниевую подложку (подсветки нет, поле зрения 580×580 мкм). Темный фон — низкая "эффективная" температура (излучательная способность), белый цвет — высокая эффективная температура (излучательная способность). Цифры имеют те же обозначения, что и на рис. 1

Отметим, что контраст ИК-изображения при использовании подсветки (см. рис. 5, б) несколько уменьшается, что, очевидно, связано с отражением части подсвечивающего излучения от "плоской"/световыводящей поверхности диода 15 (т. е. от границы воздух/ $n^+$ -InAs, для которой  $R \approx 0,3$ ). По этой же причине имеется некоторая неоднородность изображений вдоль поверхности подложки, имевшей ямки, образовавшиеся в ходе ее химического травления при утонении чипа. Коэффициент отражения от границы  $n^+$ -InAs/катод, полученный из сравнения интенсивностей лучей, отраженных от близкорасположенных областей чипа, составлял  $R = 0,6$ . На рис. 5, б видно, что область, сопряженная с анодом (B3), выглядит светлее области (B2) и поэтому коэффициент отражения от анода  $R > 0,3$ , однако мы не предпринимали попыток уточнить значение коэффициента отражения из-за отсутствия точных данных о поглощении подсвечивающего излучения слоем  $p$ -InAsSbP.

Структура изображения чипа изменяется при его монтаже на кремниевую коммутационную плату (см. рис. 5, в); при этом прежде "темная" область вне мезы (C2) становится "светлой" из-за потока излучения 24, идущего от нижней (металлизированной) поверхности 23 кремниевой пластины 22 (см. рис. 1). Отметим также, что область (C12) имеет меньшую яркость по сравнению с областью (C2) из-за наличия в ней дополнительно поглощающих слоев InAsSbP<sub>0,24</sub>.

В заключение отметим, что закономерности формирования ИК-изображений, описанные выше, наблюдались нами также и в образцах на основе диодных гетероструктур GaSb/InGaAsSb, полученных на подложках GaSb, прозрачных в области 3 мкм и имевших сходную с рассмотренной здесь топологию чипа; результаты этих исследований будут опубликованы в отдельной работе.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что с использованием разработанной нами методики нанесения омических контактов на узкозонные слои  $p$ -InAsSbP и  $n^+$ -InAs последние обладают отражательными свойствами в области 3 мкм как на границе с  $n^+$ -InAs ( $R \sim 0,6$ ), так и на границе с воздухом ( $R \sim 0,6$ ). Эти исследования согласуются с выводами о высокой отражательной способности анодного контакта, полученные ранее по косвенным данным — из наблюдений резонансов Фабри-Перо и стимулированной "вертикальной" электролюминесценции при 3,3 мкм [7, 14, 15] в структурах с контактами, аналогичными приведенным в данной работе. Рассмотренные в работе подходы и методика оценки отражательных свойств контак-

тов будет полезна при разработке светодиодов, фотодиодов и лазеров среднего ИК-диапазона (3—5 мкм), а сами светодиоды будут востребованы в качестве калибровочных излучателей с высокой скоростью модуляции, имитирующих как нагретые, так и охлажденные объекты.

Работа частично поддержана грантом седьмой рамочной программы ЕС (FP7, № 224625).

Авторы выражают благодарность  
В. Г. Половинкину за помощь в работе  
и обсуждение результатов.

#### Литература

1. Кузнецов А. А., Балашов О. Б., Васильев Е. В., Логинов С. А., Луговской А. И., Черняк Е. Я.// Приборы и системы. Управление контроль, диагностика. 2003. № 6. С. 55.
2. Malyutenko V. K., Malyutenko O. Yu., Zinovchuk A. V.// Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. 201114; <http://spie.org/x8485.xml?highlight=x2412#fig1>.
3. Malyutenko V., Malyutenko O., Zinovchuk A., Zotova N., Karandashev S., Matveev B., Remennyi M., Stus N.// Book of abstracts of the 6<sup>th</sup> International Conference “Mid-Infrared Optoelectronics Materials and Devices (MIOMD-VI)” (June 28—July 02. 2004. St.-Petersburg).
4. Зотова Н. В., Ильинская Н. Д., Карандашев С. А., Матвеев Б. А., Ременный М. А., Стусь Н. М.// ФТП. 2008. Т. 42. № 6. С. 641.
5. Malyutenko V. K., Malyutenko O. Yu., Podoltsev A. D., Kucheryavaya I. N., Matveev B. A., Remennyi M. A., Stus' N. M.// Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. № 25. P. 4228.
6. Monakhov A., Krier A., Sherstnev V. V.// Semicond. Phys. Technol. 2004. V. 19. P. 480.
7. Matveev B., Zotova N., Il'inskaya N., Karandashev S., Remennyi M., Stus' N.// Phys. Stat. Sol. (c). 2005. V. 2. № 2. P. 927.
8. Matveev B., Zotova N., Il'inskaya N., Karandashev S., Remennyi M., Stus' N., Kovchavtsev A., Kuryshv G., Polovinkin V., Tarakanova N.// Progress in Semiconductor Materials V — Novel Materials and Electronic and Optoelectronic Applications, MRS Proceedings Volume 891, Editors: L. J. Olafsen, R. M. Biefeld, M. C. Wanke, A. W. Saxler, 2005.
9. Nastovjak A., Polovinkin V.// IEEE 2006 International Workshop and Tutorial on Electron Device and Materials. Proceedings, Erlagol, Altai — July 1—5. 2006. P. 91.
10. Matveev B. A., Aydaraliev M., Zotova N. V., Karandashov S. A., Il'inskaya N. D., Remennyi M. A., Stus' N. M., Talalakin G. N.// IEE Proc.-Optoelectronics. 2003. V. 150. № 4. P. 356.
11. Базовкин В. М., Гузев А. А., Ковчавцев А. П., Курьшев Г. Л., Ларшин А. С., Половинкин В. Г.// Прикладная Физика. 2005. № 2. С. 97.
12. [www.ioffeled.com](http://www.ioffeled.com)
13. Иванов-Омский В. И., Матвеев Б. А.// ФТП. 2007. Т. 41. № 3. С. 257.
14. Зотова Н. В., Ильинская Н. Д., Карандашев С. А., Матвеев Б. А., Ременный М. А., Стусь Н. М., Шустов В. В.// Там же. 2004. Т. 38. № 10. С. 1270.
15. Aidaraliev M., Zotova N. V., Il'inskaya N. D., Karandashev S. A., Matveev B. A., Remennyi M. A., Stus' N. M., Talalakin G. N.// Semicond. Sci. Technol. 2003. V. 18. P. 269.

Статья поступила в редакцию 5 апреля 2008 г.

## IR-images of InAsSbP flip-chip LEDs in the 3 μm spectral range

A. L. Zakhgeim, 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 Physico-Technical Institute, St.-Petersburg, Russia

*We present and analyze IR images of p-InAsSbP/n—InAsSbP/n<sup>+</sup>—InAs flip-chip LEDs obtained with and without external lightening ( $\lambda = 2.9 \mu\text{m}$ ) including those measured at a reverse and forward bias onto a p-n-junction. Evaluation of the ohmic contact reflectivity and relation between contact and bulk resistance has also been made.*

PACS: 85.60.-q

\* \* \*