

# Светодиоды флип-чип на 4.2 мкм с глубокой мезой травления

© Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев<sup>†</sup>,  
М.А. Ременный, Н.М. Стусь

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

(Получена 3 октября 2005 г. Принята к печати 17 октября 2005 г.)

Проанализированы спектральные, вольт- и ватт-амперные характеристики при прямом и обратном смещении, распределение ближнего поля излучения светодиодов флип-чип на основе гетероструктур с активным слоем из InAsSb (длина волны 4.2 мкм, 300 К), имеющих глубину мезы 40–50 мкм и диаметр 240 мкм. Обсуждаются фактор увеличения выхода излучения, связанный с особенностями геометрии структуры, и выбор оптимального режима работы светодиода в зависимости от рабочей температуры.

PACS: 85.60.Jb

## 1. Введение

Светодиоды, излучающие в диапазоне длин волн 3–5 мкм, могут быть использованы в системах контроля химического состава газовой среды, оптической связи или в тепловидении в качестве калибровочных источников. Широкое применение таких светодиодов (СД) сдерживается невысокой эффективностью преобразования электрической энергии в световую, что связано в том числе с низким коэффициентом вывода излучения из полупроводникового кристалла, имеющего показатель преломления ( $n$ ), по крайней мере в 3 раза больший по сравнению с воздухом.

Для снижения потерь, связанных с полным внутренним отражением, было предложено использовать структуры с микрорезонаторами [1] или с текстурированной поверхностью [2–4]. Другим способом увеличения эффективности СД является создание структур с глубокой мезой, имеющей сужение [5] или расширение конуса [4,6] в направлении вывода излучения. Второй способ имеет лучшую перспективу по сравнению с первым, поскольку обеспечивает возможность нанесения на стенки мезы отражающего покрытия, выполняющего функцию рефлектора. Увеличение выходной мощности без такого покрытия может составить  $n^2$  в СД с мезой в виде конуса Винстона [6]. СД и приборы отрицательной люминесценции (ОЛ) с конусообразной мезой на диапазон длин волн 6 мкм (активная область — InSb) интенсивно изучались в [6,7], однако нам неизвестны сообщения о создании подобных СД в наиболее интересной для практики спектральной области 3–5 мкм.

В настоящем сообщении мы обсуждаем спектральные, ватт- и вольт-амперные характеристики, а также распределение ближнего поля для светодиодов на основе InAsSb (длина волны максимума излучения  $\lambda_{\max} = 4.2$  мкм) с глубокой мезой (30–40 мкм) и световыводящей поверхностью, имеющей микрорельеф.

## 2. Детали эксперимента

Выращивание гетероструктур, в которых активным слоем служит слой из InAsSb толщиной 5–10 мкм, производилось на сильно легированных подложках  $n^+$ -InAs(Sn) (111) (концентрация электронов  $n = 10^{18}$  см $^{-3}$ ) методом жидкофазной эпитаксии. Распределение состава, измеренное на установке CAMEBAX вдоль направления роста, и распределение ширины запрещенной зоны  $E_g$ , полученное интерполяцией, представлены на рис. 1: установлено наличие контактного (или ограничивающего) слоя  $p$ -InAsSbP ( $E_g = 375$  мэВ) толщиной  $\sim 5$  мкм и активного слоя  $n$ -InAsSb ( $E_g = 300$  мэВ) толщиной  $\sim 8$  мкм. Начало координат на рис. 1 совпадает с металлургической границей  $n^+$ -InAs/ $n$ -InAsSb, определенной при измерениях на сколе, травленном в селективном травителе.

Плотность ямок травления на поверхности структуры не превышала  $10^4$ – $10^5$  см $^{-2}$ , при этом поверхность была гладкой. Методами стандартной многостадийной „мокрой“ фотолитографии на поверхности структур создавался макрорельеф, схематически показанный на рис. 2, а. Контакты (круглый анодный А диаметром  $D = 210$  мкм и U-образный катодный С) наносились термическим распылением в вакууме с последующим

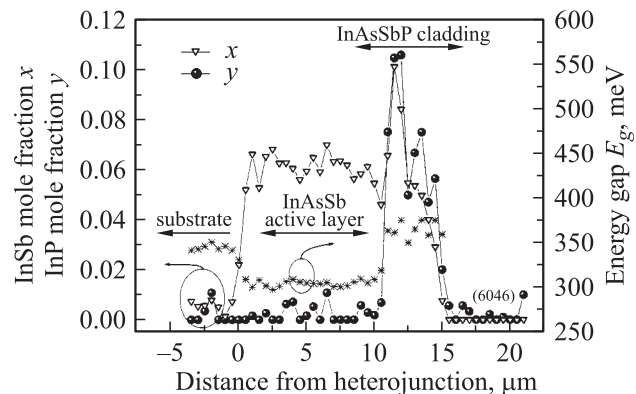
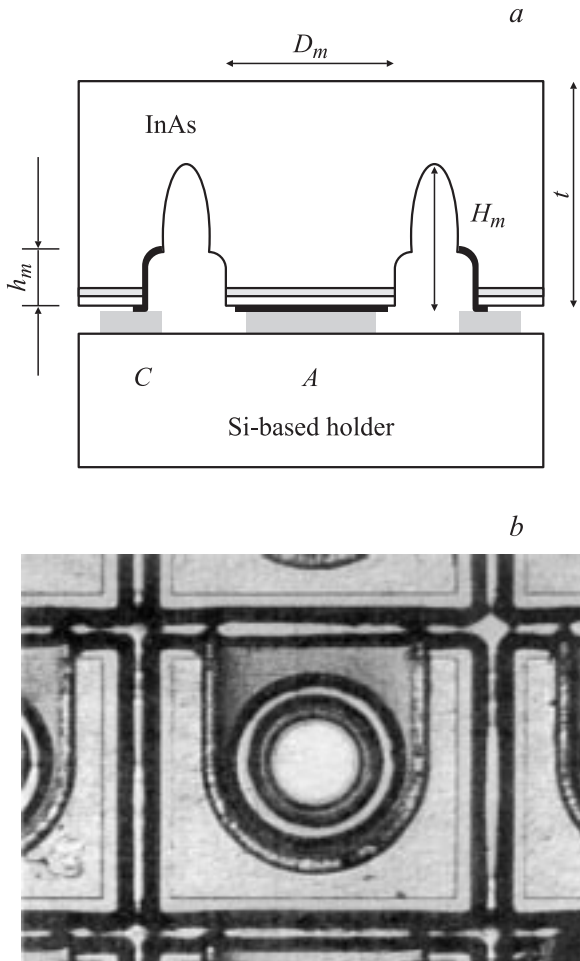


Рис. 1. Распределение состава (левая шкала) и расчетных значений ширины запрещенной зоны (правая шкала) в направлении роста гетероструктуры  $p$ -InAsSbP/ $n$ -InAsSb/ $n^+$ -InAs.

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

„усилением“ за счет гальванического осаждения золота на различных этапах процесса. Перед разделением на чипы образцы с диаметром мезы  $D_m = 240$  мкм и глубиной  $H_m = 40–50$  мкм утоньшались до толщины 100–150 мкм. В качестве контрольных образцов с мелкой мезой использовались образцы, в которых глубина мезы равнялась глубине залегания катода ( $H_m = h_m = 10$  мкм). Чипы диодов (см. рис. 2, *b*) монтировались (припаивались) на кремниевые носители по методу флип-чип и далее устанавливались на медный держатель с размерами  $20 \times 8 \times 3$  мм, укрепленный на массивном корпусе.

Распределение ближнего поля излучения исследовалось с помощью подвижного зонда на основе волокна из  $As_2S_3$  диаметром 500 мкм, изготовленного в Институте высокочистых материалов РАН (Нижний Новгород), длиной 5 см и с входным отверстием диаметром 15–25 мкм, соединенного с фотодиодом



**Рис. 2.** Схема (разрез) флип-чип СД на основе InAsSb с глубокой мезой, смонтированного на кремниевом носителе, (*a*) и фотография эпитаксиальной пластины с неразделенными чипами (*b*).  $D_m$  — полный диаметр мезы,  $h_m$  — расстояние от поверхности  $p$ -InAsSbP до углубленных областей катода,  $H_m$  — полная глубина мезы,  $t$  — толщина структуры InAsSbP/InAsSb/InAs, *A* — круглый анод, *C* — U-образный катод.

InAsSbP/InGaAsSb (длина волны максимума чувствительности  $\lambda_{\max} = 3.7$  мкм, обнаружительная способность  $D_{\lambda_{\max}}^* = 5 \cdot 10^9$  см  $\cdot$  Гц<sup>1/2</sup>  $\cdot$  Вт<sup>-1</sup>, 295 К). Входное отверстие волокна устанавливалось на расстоянии 3–6 мкм от излучающей поверхности, при этом местоположение волокна задавалось микроконтроллером аналогично методике, описанной ранее в [8,9].

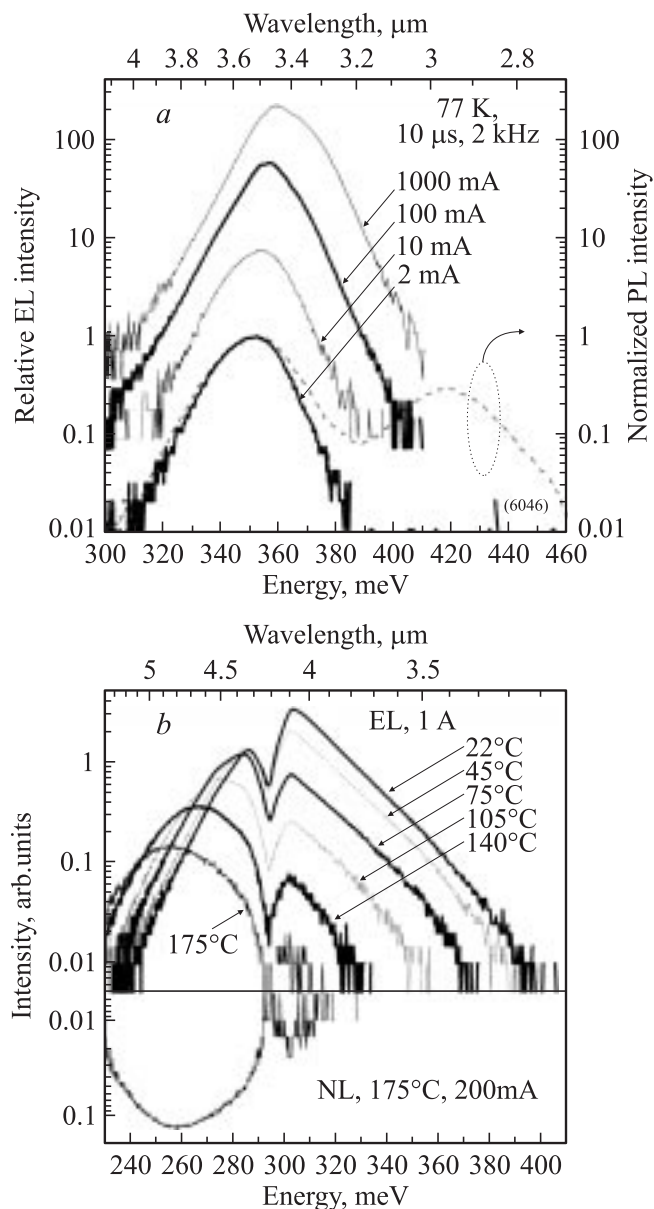
Мощность излучения рассчитывалась исходя из спектрального и пространственного распределения выходящего излучения и чувствительности используемых для регистрации приемников (CdHgTe, 77 К).

### 3. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 3, *a* представлены спектры электролюминесценции (ЭЛ) для токов 2, 10, 100 и 1000 мА в импульсном режиме 10 мкс, 2 кГц и фотолюминесценции (ФЛ) при измерении „на отражение“ при температуре  $T = 77$  К. Пик ЭЛ смещается в сторону высоких энергий при увеличении тока в соответствии с заполнением зоны проводимости электронами (динамический эффект Мосса–Бурштейна), наблюдавшимся ранее в СД на основе  $n$ -InSb [10] и  $n$ -InAs [11]. Однако в отличие от данных работы [11] нами не было получено стимулированной рекомбинации в перпендикулярном к плоскости  $p$ - $n$ -перехода направлении, очевидно, в силу невысокого квантового выхода излучения в  $n$ -InAsSb. Положения пиков ФЛ и ЭЛ удовлетворительно согласуются с данными интерполяционного расчета для  $E_g$  активной области и „широкозонного окна“ InAsSbP (см. рис. 1) в предположении близких значений коэффициентов температурного изменения ширины запрещенной зоны InAs и InAsSbP и одинаковых механизмов излучательной рекомбинации в них.

На рис. 3, *b* представлены не исправленные на поглощение атмосферной двуокисью углерода спектры, полученные при прямом смещении (ЭЛ),  $T = 22–175^\circ\text{C}$ , и обратном смещении („отрицательная люминесценция“ — ОЛ),  $T = 175^\circ\text{C}$ . Как видно из рис. 3, *b*, спектры ЭЛ и ОЛ практически идентичны, а смещение пика ЭЛ при изменении температуры (с учетом необходимой коррекции для энергии пика  $h\nu_{\max} = E_g + kT/2$ ) близко к ожидаемому смещению для ближайшего аналога — диода из арсенида индия, для которого  $E_g$  [мэВ] =  $410 - 0.28T^2/(T + 83)$ , где  $T$  — температура в К, а  $k$  — постоянная Больцмана.

Факт наличия в диоде заметной ОЛ свидетельствует о высоком качестве  $p$ - $n$ -перехода и о выпрямляющих свойствах потенциального барьера. Действительно, как видно из рис. 4, где представлены вольт-амперные характеристики при температурах  $(-200)–(+180)^\circ\text{C}$ , диоды из InAsSb имели хорошо выраженное насыщение тока в обратной ветви вплоть до  $180^\circ\text{C}$ , а в прямой ветви имели последовательное сопротивление ( $R_s$ ), не превышающее 0.34 Ом ( $T = 300$  К), что меньше опубликованных ранее значений для СД с активным слоем из InAsSb



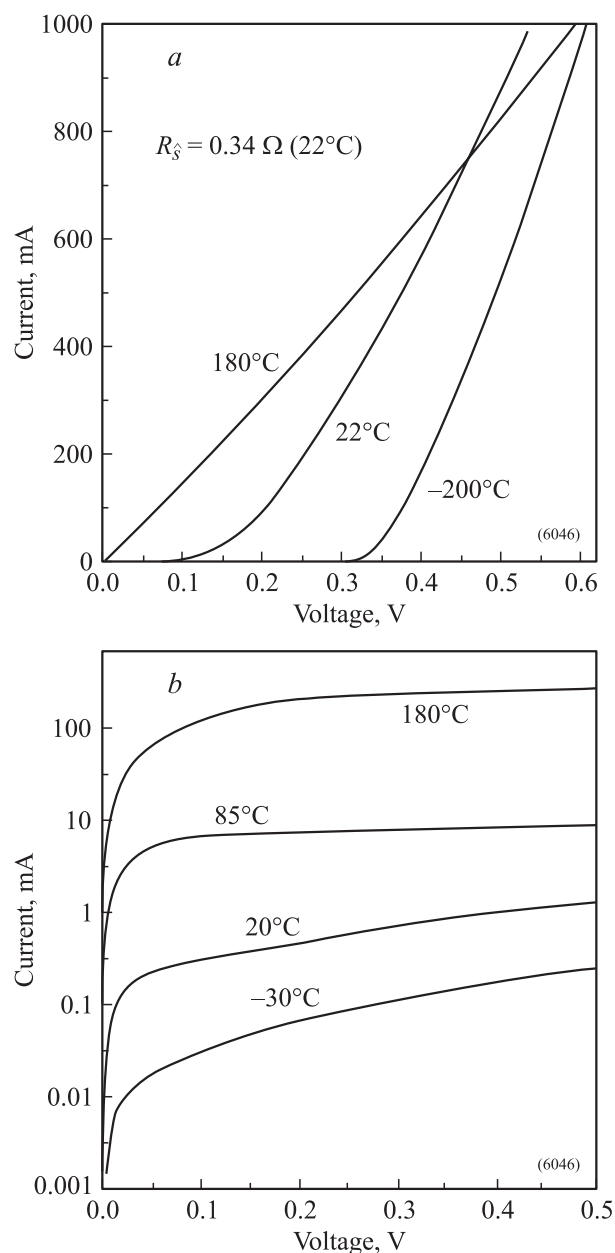
**Рис. 3.** Спектры излучения СД на основе InAsSb: *a* — фотолюминесценция (PL) и электролюминесценция (EL),  $T = 77$  К; *b* — электролюминесценция (EL) при  $T = 22$ – $175^\circ\text{C}$  и отрицательная люминесценция (NL) при  $T = 175^\circ\text{C}$ . Токи накачки и температуры указаны.

(фактор идеальности 6.5 [12] и  $R_s = 0.41$  Ом [13]). При низкой температуре отсечка на оси напряжений совпадает с ожидаемой величиной барьера. Как видно из рис. 4, обратный ток насыщения для комнатной температуры ( $I_{\text{sat}} = 0.4$  А/см<sup>2</sup>) оказался в 5 раз меньше, чем в аналогичных диодах с  $D = 300$  мкм,  $\lambda_{\text{max}} = 4.3$  мкм ( $I_{\text{sat}} = 2$  А/см<sup>2</sup> [13]), что мы связываем с электрическим ограничением носителей и соответственно с уменьшением объема активной области.

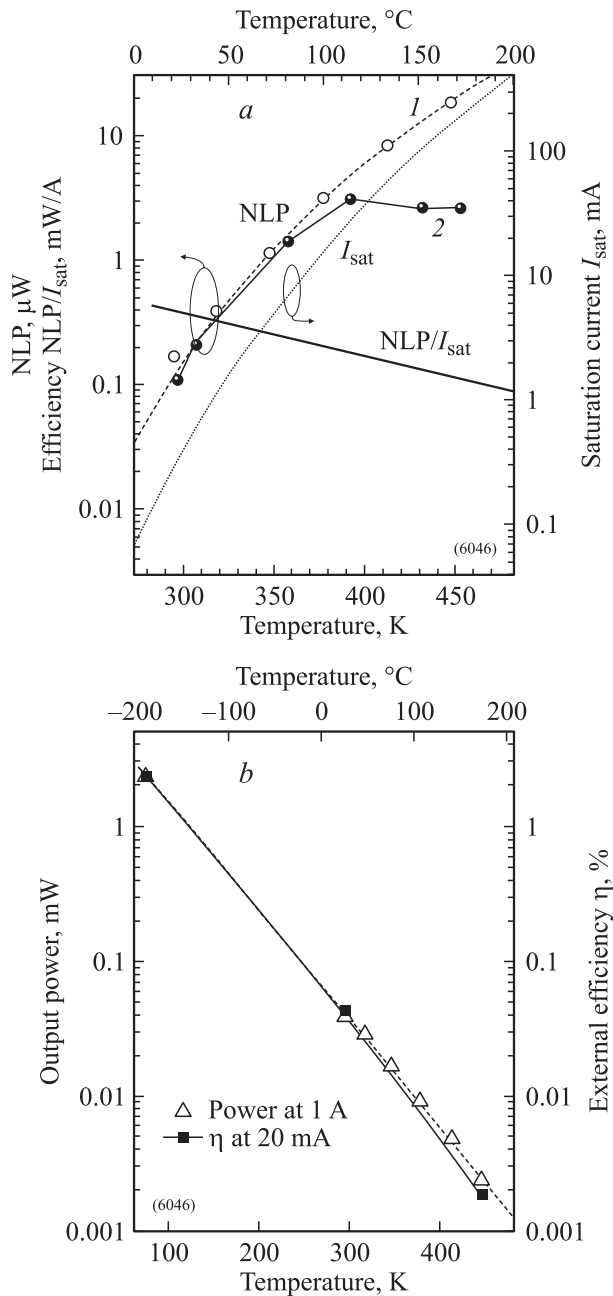
Температурная зависимость тока насыщения  $I_{\text{sat}}$  хорошо описывалась формулой Шокли (пунктирная кривая на рис. 5, *a*), при этом рост тока насыщения сопро-

вождался ростом абсолютного значения мощности ОЛ (NLP) вплоть до  $100^\circ\text{C}$ . При температурах выше  $100^\circ\text{C}$  рост мощности ОЛ останавливается.

Расчетные значения мощности ОЛ при температурах ниже  $100^\circ\text{C}$  для излучающей площадки диаметром 240 мкм (диаметр мезы) оказались меньше соответствующих экспериментальных значений, что можно объяснить большей площадью излучающей поверхности в реальном приборе, чем площадь мезы. Действительно, из распределения ближнего поля ЭЛ, представленного на рис. 6, видно, что выход излучения из кристалла происходит помимо центральной области с его краев,  $Z \approx (\pm 400)$  мкм. При этом имеет место расширение излучающей области, очевидно, из-за отражений от стенок



**Рис. 4.** Вольт-амперные характеристики СД на основе InAsSb для прямого (*a*) и обратного (*b*) смещения.



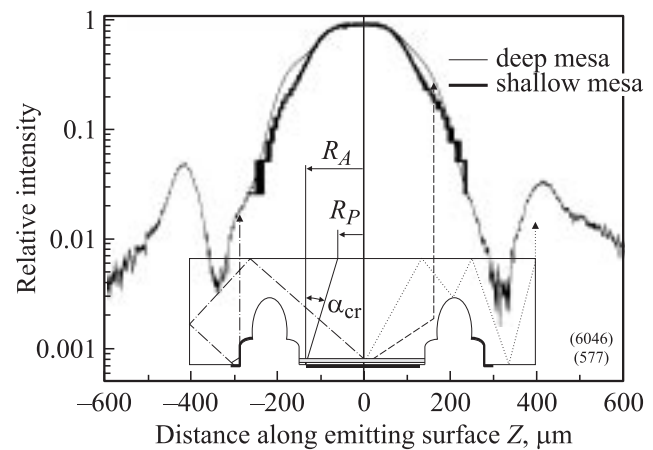
**Рис. 5.** Температурные зависимости для СД из InAsSb при импульсном питании: *a* — мощность отрицательной люминесценции NLP (*1* — расчет для  $D = 440 \mu m$ , *2* — эксперимент для  $D = 240 \mu m$ ), ток насыщения  $I_{sat}$ , коэффициент преобразования  $NLP/I_{sat}$  (расчет); *b* — выходная мощность и внешний квантовый выход  $\eta$  (эксперимент).

мезы, как показано стрелками на рис. 6. Можно также отметить небольшие „плечи“ (ореол) в распределении ближнего поля, связанные с отражениями от внутренней стороны катода лучей, первоначально испытывавших полное внутреннее отражение. Увеличение выхода излучения на основании данных по распределению ближнего поля и интегральной мощности для СД с глубокой мезой ( $h_m = 40\text{--}50 \mu m$ ) относительно СД с мелкой мезой

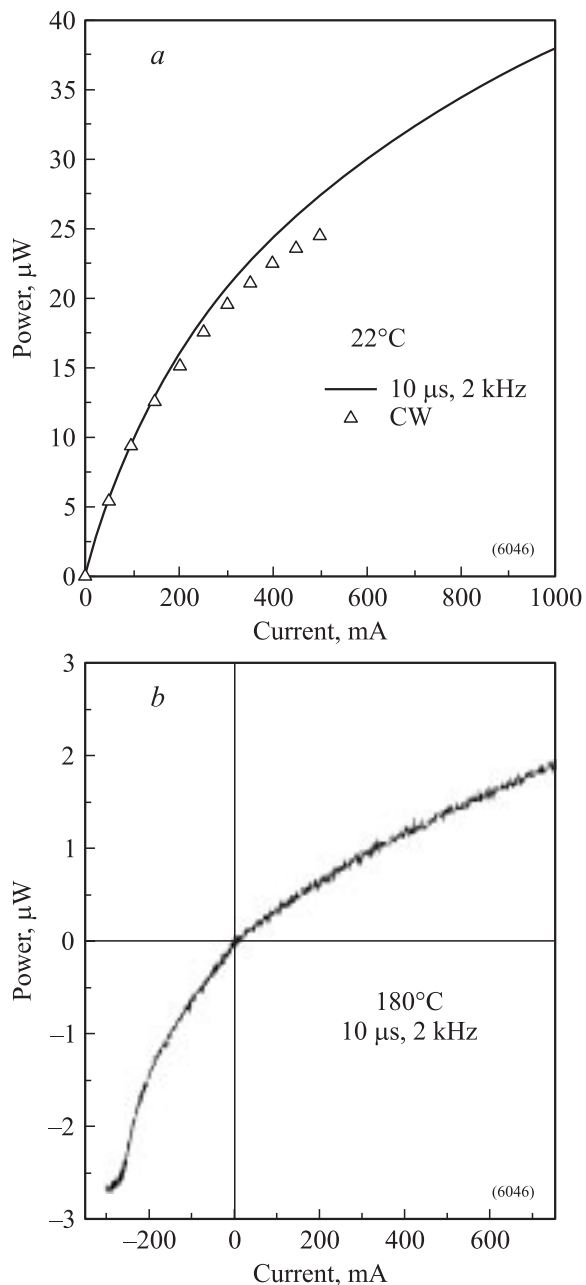
( $h_m = 10 \mu m$ ), составляет +30% (1.3 раза), что меньше необходимой величины для согласования экспериментальных и расчетных значений мощности ОЛ.

Одной из причин указанного выше расхождения может быть различие картины ближнего поля ЭЛ и ОЛ, проверка которого лежит за пределами экспериментальных возможностей данной работы. Вместе с тем мы можем отметить, что ранее такое различие наблюдалось в диодах на основе InAsSb при температуре  $55^\circ C$  и объяснялось сгущением линий тока в области контакта при приложении прямого смещения [14]. В нашем случае сгущение линий тока, по-видимому, также имеет место, поскольку зависимость мощности ЭЛ от координаты имеет „плато“ в центральной части с характерным диаметром  $\sim 100 \mu m$ . Если предположить, что свечение в диоде инициировано равномерно светящимся диском — активированной областью диаметром  $D_A$ , то диаметр „плато“  $D_P = D_A - 2t \cdot \text{tg}[\arcsin(1/n)]$ , где  $t$  — толщина структуры, а  $n$  — показатель преломления. Для  $n = 3.52$  размер активированной области ( $D_A \approx 190 \mu m$ ) оказывается близким к размеру анодного контакта ( $210 \mu m$ ), что является следствием как высокой отражательной способности, так и сгущением линий тока вблизи анода. Для ОЛ же следует ожидать большей площади свечения в силу увеличения сопротивления  $p$ - $n$ -перехода в обратном направлении и соответствующего пространственного перераспределения тока.

Температурные зависимости тока насыщения и мощности ОЛ сохраняют характерные черты для узкозонных диодов  $A^{III}B^V$ , а именно рост тока насыщения ( $I_{sat}$ ) с температурой происходит быстрее, чем рост мощности ОЛ (NLP) (рис. 5 из [15]), или коэффициент преоб-



**Рис. 6.** Распределение излучения вблизи поверхности (картина ближнего поля) при сканировании по линии, проходящей через центр анода ( $Z = 0$ ) параллельно одной из сторон чипа, в двух СД на основе InAsSb, с глубокой (тонкая линия) и мелкой (толстая линия) мезами, и наложенная на распределение схема образца.  $R_A$  — радиус активированной области (область рекомбинации),  $R_P$  — радиус „плато“ в распределении ближнего поля,  $\alpha_{cr}$  — критический угол для полного внутреннего отражения.

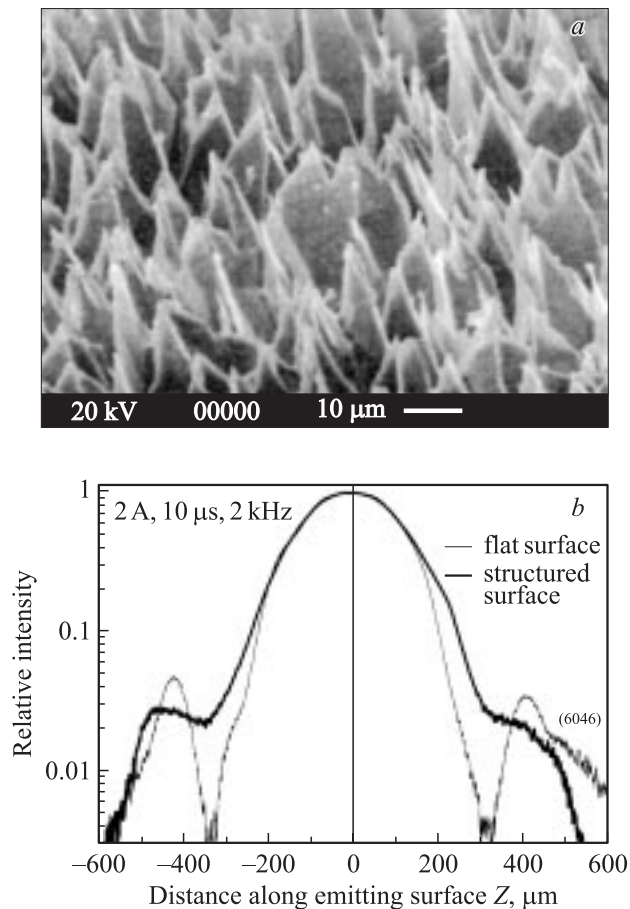


**Рис. 7.** Ватт-амперные характеристики СД на основе InAsSb при температурах 22 (а) и 180°С (b). Сплошная линия (а, b) — импульсный режим 10 μs, 2 кГц, точки (а) — непрерывной режим (CW).

зования (КП), определенный как отношение  $NLP/I_{\text{sat}}$ , уменьшается при нагревании от 20 до 175°С с 0.4 до 0.1 мВт/А. Имеется весьма ограниченный набор параметров, входящих в величину NLP (а именно спектр излучения и коэффициент отражения на границе раздела полупроводник/воздух, принимаемый равным 0.3 при вычислении мощности излучения „абсолютно черного тела“). Поэтому можно было бы надеяться, что величина  $NLP/I_{\text{sat}}$  будет адекватно отражать температурные изменения эффективности СД в области малых токов, как

это имело место для СД на основе арсенида индия [15]. Как видно из рис. 5, в нашем эксперименте в том же температурном диапазоне (20–175°С) падение КП (падение внешней квантовой эффективности  $\eta$  при 20 мА) превышает 3 раза. Одной из возможных причин столь значительных расхождений является безызлучательная оже-рекомбинация, которая подавляется при экстракции носителей (при обратном смещении) и, напротив, возрастает при инжекции носителей в активную область (при прямом смещении). Подавление оже-процессов может быть столь значительным, что обратная ветвь ВАХ испытывает разрыв с появлением участка отрицательного динамического сопротивления [7]. В наших образцах мы не обнаружили участка отрицательного динамического сопротивления на ВАХ (см. рис. 4), однако наличие сверхлинейного участка ватт-амперной характеристики при обратном смещении (см. рис. 7, b) свидетельствует в пользу подавления оже-процессов. Другой возможной причиной быстрого падения КП при повышенных температурах является уменьшение прозрачности подложки  $n^+$ -InAs, ранее наблюдавшееся в СД на основе InAs [16] и связанное с поглощением на свободных носителях. Отметим, что величины обратных токов при повышенных температурах столь значительны (200 мА), что позволяют рассматривать режим ОЛ в качестве рабочего, тем более, что КП в прямом направлении существенно меньше, чем в обратном. Указанное превосходство ОЛ над ЭЛ по КП является общим свойством длинноволновых СД ( $\lambda_{\text{max}} > 4.2$  мкм), которое необходимо учитывать при выборе режима питания оптоэлектронного узла. Так, например, в оптическом анализаторе в диапазоне температур 0–35°С предлагается попеременно использовать режимы обратного и прямого смещения диода [17], а за суммарный сигнал принимать сумму модулей амплитуд ЭЛ и ОЛ для целей стабилизации выходного сигнала.

Сублинейный вид ватт-амперной характеристики при прямом смещении (см. рис. 7) является характерным для СД с длиной волны излучения  $\lambda_{\text{max}} > 3$  мкм и наблюдался ранее в диодах с рекомбинацией на гетерогранице InAs/InAsSb [18], в СД на основе InAsSb [19], PbSe [2], а также в СД на основе квантовых ям InAs/InGaSb/InAs [20]. При этом в ряде случаев имелась заметная зависимость выходной мощности от длительности и (или) частоты подаваемого на диод тока, свидетельствующая о неоптимальном решении проблемы теплоотвода. В наших экспериментах мы попытались оценить разогрев структуры диода исходя из известной температурной зависимости спектра излучения и из сравнения вольт-амперных характеристик диодов, измеренных при различных режимах питания. Оба метода определения разогрева  $p$ - $n$ -перехода показали, что при самых жестких условиях накачки разогрев активной области СД не превышает 8 К вплоть до токов 500 мА. Иллюстрацией этого служат ватт-амперные характеристики СД (рис. 7), измеренные в импульсном (5 мкс, 2 кГц)



**Рис. 8.** Фотография поверхности СД с глубокой мезой, обработанного в селективном травителе, (а) и распределение излучения вблизи поверхности (ближнее поле) СД с плоской и рельефной травленной поверхностями (b).

и непрерывном режимах. Из одинаковости хода зависимости мощности от тока для двух режимов можно заключить, что уменьшение КП при увеличении тока носит более фундаментальный, нежели тепловой разогрев, характер, связанный, например, с уже упоминавшейся оже-рекомбинацией. Отметим, что непрерывный режим получен нами при токе 500 мА, что существенно выше считавшегося предельно возможным значением 150 мА для данного класса диодов [21].

Для дальнейшего увеличения эффективности работы СД нами было использовано химическое травление световыводящей поверхности, приводящее к появлению на ней рельефа, показанного на рис. 8, а. Наличие остroконечных пирамид травления обеспечивает эффективное увеличение угла полного внутреннего отражения для лучей, вышедших из активной области. Действительно, как видно из распределения излучения в ближнем поле для образцов с плоской и текстурированной поверхностями, показанного на рис. 8, b, наличие пирамид травления приводит к расширению области свечения над анодом, что эквивалентно увеличению  $\alpha_{cr}$  (см. рис. 6). Одновременно с этим имеет место уменьшение относительного

вклада боковых максимумов при  $Z = (\pm 400)$  мкм, связанных с выходом излучения на края образца, что также можно интерпретировать как уменьшение доли лучей, рассеянных внутрь полупроводника при начальном падении лучей на поверхность. При этом в большинстве образцов было достигнуто (20–30)%-е увеличение мощности излучения, в том числе и в непрерывном режиме (30 мкВт). Полученный коэффициент увеличения выхода излучения ( $K$ ) оказался существенно меньше, чем для СД из PbSe ( $K = 6$  [2]), что, вероятно, связано с меньшим показателем преломления по сравнению с PbSe ( $n = 5$ ).

Сублинейный характер ватт-амперной характеристики делает труднодостижимой задачу получения источников большой яркости в длинноволновом диапазоне спектра, в частности вблизи 4.2 мкм. Тем не менее внешний квантовый выход наших СД с плоской световыводящей поверхностью при комнатной температуре ( $\eta = 5 \cdot 10^{-4}$ ) оказался несколько выше, чем в слоях PbSe с текстурированной (оптимизированной для вывода света) поверхностью при сопоставимых уровнях накачки ( $\eta = 3.5 \cdot 10^{-4}$  [2]). Из анализа данных работы [22] можно также заключить, что яркость СД на основе сверхрешеток InAs/InAsSb (108 мкВт при 1.5 А в режиме 6 мкс, 20 кГц,  $D = 600$  мкм) составляет не более 50% от значения, представленного в данной работе.

Таким образом, показано, что в светодиодах флип-чип на основе гетероструктур  $p$ -InAsSbP/ $n$ -InAsSb/ $n^+$ -InAs с диаметром активной области 240 мкм, излучающих на длине волны 4.2 мкм (300 К), углубление мезы до 40–50 мкм приводит к увеличению эффективного размера светящейся области поверхности и увеличению в 1.3 раза выхода излучения из полупроводника. Химическое травление и создание рельефа на световыводящей поверхности приводит к дополнительному расширению эффективной области свечения и увеличению выхода излучения на 20–30%. При этом максимальная внешняя квантовая эффективность электролюминесценции в лучших диодах составила  $5 \cdot 10^{-4}$  при комнатной температуре; при температуре 175°C ее значение уменьшается в 20 раз и становится меньше, чем для режима отрицательной люминесценции. Максимальная мощность излучения в непрерывном режиме составила 30 мкВт (500 мА, 300 К), при этом перегрев активной области не превышал 8 К.

Работа поддержана программой SBIR и Фондом содействия развитию МП НТС РФ (№ 3828р/5982 и 06-2-Н4.2-0201) и выполнена при административной поддержке со стороны Фонда гражданских исследований США для стран СНГ (CRDF).

Двое из авторов (Н. Зотова и М. Ременный) выражают благодарность Совету по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ Российской Федерации за поддержку проекта № МК-1804.2005.02, а также Конкурсному центру фундаментального естествознания за поддержку проекта № PD06-2.0-225.

## Список литературы

- [1] A.M. Green, D.G. Gevaux, C. Roberts, C.C. Phillips. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostruct.*, **20**, 531 (2004).
- [2] F. Weik, J.W. Tomm, R. Glatthaar, U. Vetter, D. Szewczy, J. Nurnus, A. Lambrecht, L. Mechold, B. Spellenberg, M. Bassler, M. Behringer, J. Luft. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 041106 (2005); J.W. Tomm, F. Weik, R. Glatthaar, U. Vetter, J. Nurnus, A. Lambrecht, B. Spellenberg, M. Bassler, M. Behringer, J. Luft. *Proc. SPIE*, **5722**, 319 (2005).
- [3] T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma, E.L. Hu, S.P. DenBaars, S. Nakamura. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 855 (2004).
- [4] V. Zabelin, D.A. Zakheim, S.A. Gurevich. *IEEE J. Quant. Electron.*, **40**, 1675 (2004).
- [5] Е.А. Гребенщикова, А.Н. Именков, Б.Е. Журтанов, Т.Н. Данилова, М.А. Сиповская, Н.В. Власенко, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **38**, 745 (2005). [E.A. Grebenshchikova, A.N. Imenkov, B.E. Zhurtanov, T.N. Danilova, M.A. Sipovskaya, N.V. Vlasenko, Yu.P. Yakovlev. *Semiconductors*, **38**, 717 (2004)].
- [6] T. Ashley, D.T. Dutton, C.T. Elliott, N.T. Gordon, T.J. Phillips. *Proc. SPIE*, **3289**, 43 (1998).
- [7] G.R. Nash, N.T. Gordon, D.J. Hall, M.K. Ashby, J.C. Little, G. Masterton, J.E. Hails, J. Giess, L. Haworth, M.T. Emeny, T. Ashley. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostruct.*, **20**, 540 (2004).
- [8] V.K. Malyutenko, O.Yu. Malyutenko, A. Dazzi, N. Gross, J.-M. Ortega. *J. Appl. Phys.*, **93**, 9398 (2003).
- [9] M.A. Remennyi, B.A. Matveev, N.V. Zotova, S.A. Karandashev, N.M. Stus', G.N. Talalakin. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostruct.*, **20**, 548 (2004).
- [10] T. Ashley, C.T. Elliott, N.T. Gordon, R.S. Hall, A.D. Johnson, G.J. Pryce. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 2433 (1994).
- [11] B. Matveev, N. Zotova, N. Il'inskaya, S. Karandashev, M. Remennyi, N. Stus'. *Phys. Status Solidi C*, **2**, 927 (2005).
- [12] H.H. Gao, A. Krier, V. Sherstnev, Y. Yakovlev. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32**, 1768 (1999).
- [13] M.A. Remennyi, N.V. Zotova, S.A. Karandashev, B.A. Matveev, N.M. Stus', G.N. Talalakin. *Sensors & Actuators B: Chemical*, **91**, 256 (2003).
- [14] V.K. Malyutenko, O.Yu. Malyutenko, A.D. Podoltsev, I.N. Kucheryavaya, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus'. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 4228 (2001).
- [15] B.A. Matveev, N.V. Zotova, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', G.N. Talalakin. *J. Mod. Optics*, **49**, 743 (2002).
- [16] Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, В.В. Шустов. *ФТП*, **38**, 1270 (2004).
- [17] T. Ashley, J.G. Crowder, V.P. Mannheim, S.D. Smith. PCT patent application WO 00/02263. Published 13 January 2000.
- [18] A. Krier, V.V. Sherstnev. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33**, 101 (2000).
- [19] H.H. Gao, A. Krier, V. Sherstnev, Y. Yakovlev. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32**, 1768 (1999).
- [20] N.C. Das, G. Simonis, J. Bradshaw, A. Goldberg, N. Gupta. *Proc. SPIE*, **5408**, 136 (2004).
- [21] V.K. Malyutenko. <http://optics.org/articles/news/9/4/10> (11 April 2003).
- [22] M. Pullin, X. Li, J. Heber, D. Gevaux, C. Phillips. *Proc. SPIE*, **3938**, 144 (2000).

Редактор Л.В. Шаронова

## Flip-chip LEDs with deep mesa emitting at 4.2 μm

N.V. Zotova, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus'

Ioffe Physico-Technical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** We present spectral, current–voltage and light–current characteristics as well as near field light distribution in episcide-down (flip-chip) InAsSb light emitting diodes (LEDs) (4.2 μm, 300 K) having 40–50 μm deep and 240 μm wide mesa. We discuss the impact of the height of the mesa side walls on the light extraction efficiency and selection of the operation mode with respect to the operating temperature.