

# Светодиоды флип-чип на основе InGaAsSb/GaSb, излучающие на длине волны 1.94 мкм

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

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

(Получена 16 июня 2005 г. Принята к печати 28 июня 2005 г.)

Представлены спектральные, вольт- и ватт-амперные характеристики светодиодов с активным слоем из InGaAsSb (длина волны излучения 1.94 мкм при 300 К) в температурном диапазоне 77–543 К, изготовленных методом жидкофазной эпитаксии на подложке GaSb и имеющих конструкцию типа флип-чип. Спектральные и мощностные характеристики обсуждаются в связи с особенностями конструкции, поглощением излучения в подложке и джоулевым разогревом.

PACS: 85.60.Jb

## 1. Введение

Светодиоды, излучающие в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне (1–2 мкм), находят применение в оптических анализаторах пищевых продуктов и в медицинской практике, поскольку органические вещества имеют характерные полосы поглощения в этом диапазоне спектра. После пионерских работ Л.М. Долгинова с сотр. по созданию с помощью метода жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) светодиодов (СД) на основе InGaAsP [1] и InGaAsSb [2] исследования были продолжены другими группами с использованием методов ЖФЭ [3–5], газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений [6] и молекулярно-пучковой эпитаксии [7,8].

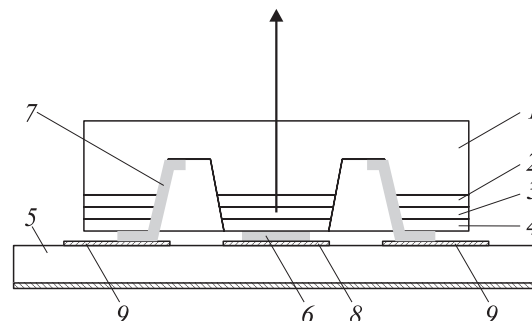
Большинство исследователей [5–8] описывают светодиоды, в которых один из контактов имеет малые по сравнению с мезой размеры (так называемый „точечный“ контакт) и расположен на внешней световыводящей поверхности СД. Такая конструкция приводит к локализации протекания тока и соответственно области рекомбинации под контактом, экранирующим излучение. Экранирующее (затеняющее) действие контакта устраняется в конструкции с сеточным контактом [4] или в конструкции типа флип-чип. Последняя конструкция обеспечивает также хороший отвод тепла от  $p$ - $n$ -перехода и дает возможность стыковки с оптическими элементами (линзами и волокнами). Однако, насколько нам известно, применительно к СД ближнего ИК диапазона такая конструкция рассматривалась лишь однажды (СД на длину волны 1.94 мкм [9]). Кроме этого нам не встречались публикации, посвященные работе подобных светодиодов при повышенных температурах, имеющих место в некоторых применениях [10].

В данной работе проведено исследование СД на основе InGaAsSb в диапазоне температур 77–543 К, излучающих на длине волны 1.94 мкм при 300 К и изготовленных в виде устройств флип-чип.

## 2. Описание образцов и методик

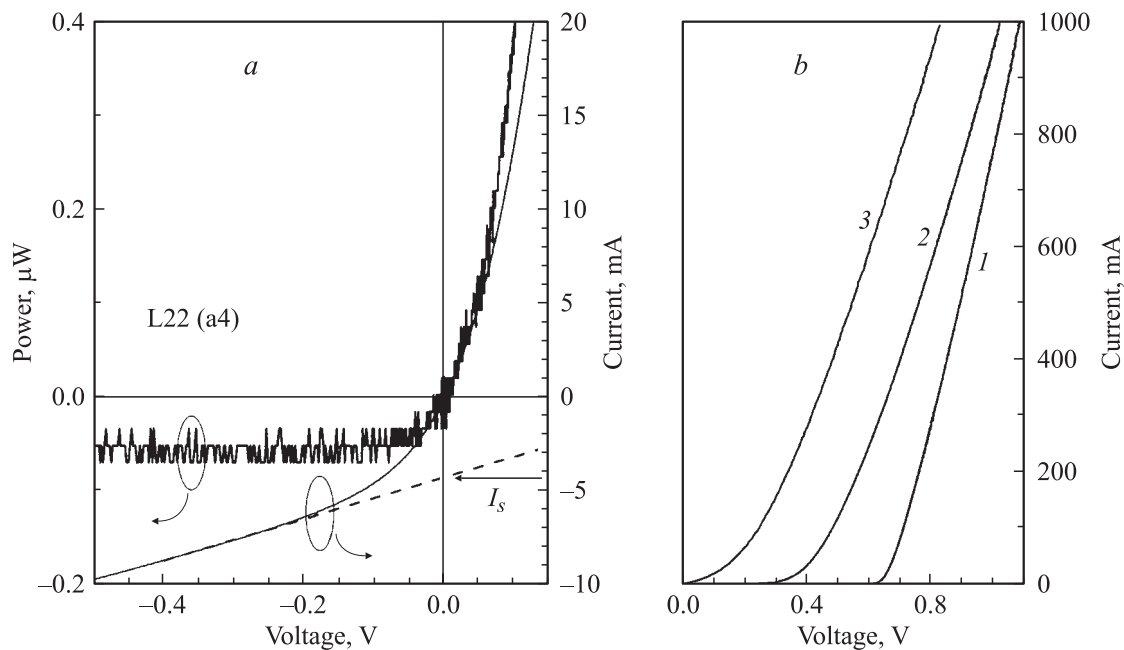
Гетероструктуры InGaAsSb/GaSb получали методом ЖФЭ при 470°C на подложках  $n$ -GaSb(Te) (100) (концентрация электронов  $n = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной 500 мкм, используя составы жидкой фазы, определенные в [2]. Структуры состояли из трех эпитаксиальных слоев: специально не легированного слоя  $n$ -In<sub>0.09</sub>Ga<sub>0.91</sub>As<sub>0.08</sub>Sb<sub>0.92</sub> толщиной 2–3 мкм, слоя  $p$ -In<sub>0.09</sub>Ga<sub>0.91</sub>As<sub>0.08</sub>Sb<sub>0.92</sub> толщиной 0.5–1 мкм и сильно легированного германием контактного слоя  $p^+$ -GaSb (концентрация дырок  $p = (0.5–1) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной 3–5 мкм.

Для получения диодов флип-чип с диаметром мезы 430 мкм и анодным контактом диаметром 390 мкм (см. рис. 1) структуры обрабатывались с использованием „мокрой“ фотолитографии. Перед разделением на отдельные чипы и монтажом на кремниевый носитель структуры утоньшались до 150 мкм. Световыводящая поверхность была свободна от контактов и поэтому могла стыковаться с иммерсионными линзами [11] халькогенидным оптическим клеем, как описано в [12].



**Рис. 1.** Схема диода флип-чип, смонтированного на кремниевом носителе: 1 — подложка  $n$ -GaSb, 2 — слой  $n$ -InGaAsSb, 3 — слой  $p$ -InGaAsSb, 4 — слой  $p^+$ -GaSb, 5 — носитель из Si, 6 — анодный контакт, 7 — U-образный катодный контакт, 8, 9 — контактные площадки с нанесенным покрытием из Sn + Pb.

<sup>†</sup> E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru  
Fax: +7(812) 2477446



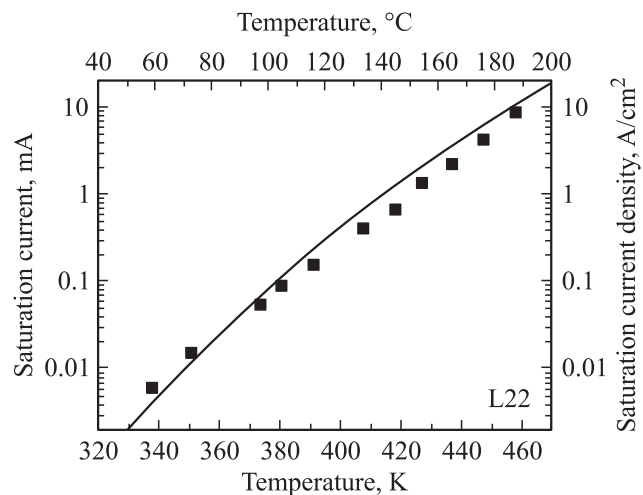
**Рис. 2.** Вольт-ваттная и вольт-амперная характеристики СД вблизи нуля смещения при 175°С (а) и прямые ветви вольт-амперных характеристик (b) при температурах 77 К (1), 24°С (2) и 195°С (3).

На диоды подавались прямоугольные токовые импульсы длительностью 5 мкс с частотой 2 кГц; при этом фотосигнал регистрировался охлаждаемыми фотоприемниками из CdHgTe или InSb с применением синхронного детектирования. В данном исследовании не предпринимались попытки стабилизировать температуру диодов при подаче на них смещения.

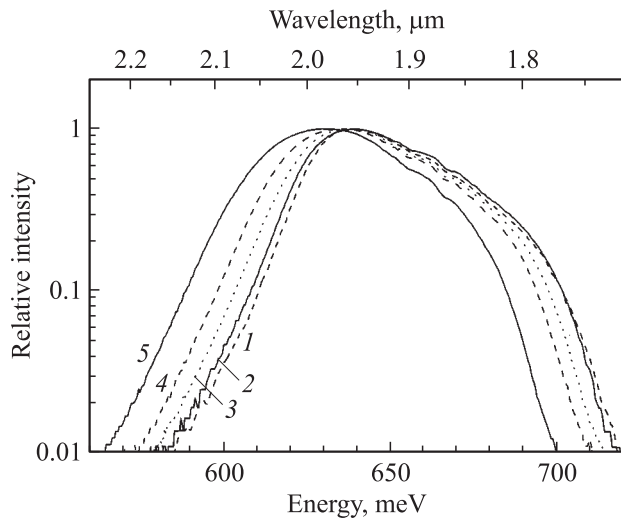
### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Вольт-амперные характеристики при обратном смещении показывали некоторую утечку, поэтому в качестве тока насыщения ( $I_s$ ) мы принимали значение, отсекаемое линией, являющейся продолжением линии утечек, на оси тока при  $U = 0$  В, как показано на рис. 2. Определенный таким образом ток насыщения при разных температурах ( $T$ ) приведен на рис. 3 вместе с функцией  $f(T) \propto T^3 \exp(-E_g/kT)$  ( $E_g$  — ширина запрещенной зоны,  $k$  — постоянная квадрата Больцмана), отражающей температурное изменение собственной концентрации. Приложение обратного смещения приводило к падению излучательной способности диода по отношению к равновесной величине, т.е. к появлению отрицательной люминесценции (ОЛ), как показано на рис. 2, а, где приведены вольт-амперная и вольт-ваттная характеристики при температуре 175°С. Мощность ОЛ при насыщении ( $NLP_{\text{exp}} \approx 0.05$  мкВт) мало отличается от расчетной величины мощности черного тела, полученной с учетом отражения на поверхности и реального спектра СД ( $NLP_{\text{calc}} \approx 0.06$  мкВт). Высокая

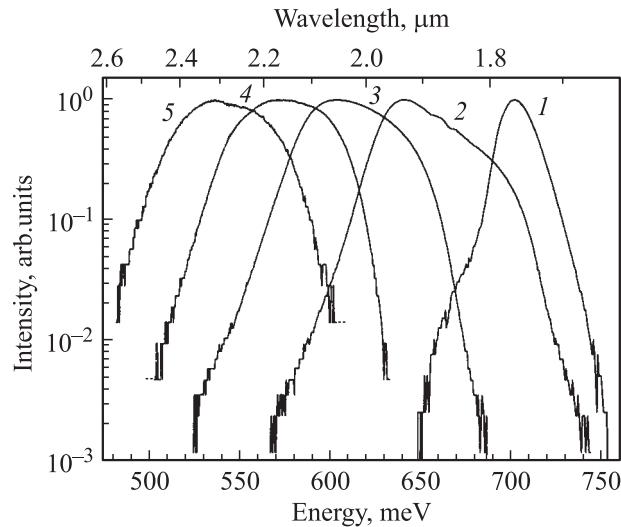
эффективность ОЛ ( $NLP_{\text{exp}}/NLP_{\text{calc}} \approx 0.8$ ) является подтверждением высокого качества контактов, исключаящего искажения, вызванные джоулевым теплом. Этот вывод подтверждается также экспоненциальным ростом прямого тока при малых токах и низким последовательным сопротивлением, составляющим всего 0.4 Ом, как видно из линейного участка прямой ветви при больших токах (рис. 2, b). Полученное значение последовательного сопротивления по крайней мере в 5 раз меньше, чем в аналогичных диодах, представленных в [9]. Однако нам не удалось полностью избежать проявлений джоулевого разогрева, поскольку мы наблюдали красное смещение максимума излучения при увеличении тока



**Рис. 3.** Ток насыщения в зависимости от температуры. Сплошная линия — функция  $f(T) \propto T^3 \cdot \exp(-E_g/kT)$ .



**Рис. 4.** Спектры излучения СД при комнатной температуре и токе накачки 0.5 (1), 1 (2), 2 (3), 3 (4), 5 А (5). Длительность импульса 5 нс, частота 2 кГц.



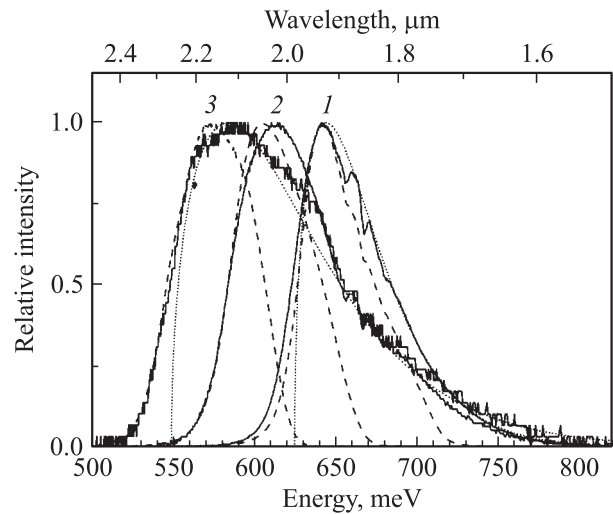
**Рис. 5.** Спектры излучения СД при температурах: 77 (1), 293 (2), 413 (3), 503 (4) и 543 К (5). Ток 1 А, длительность импульса 5 нс, частота 2 кГц.

накачки (1), показанное на рис. 4. Принимая во внимание температурное изменение ширины запрещенной зоны ближайшего аналога — антимонида галлия, выражаемое как  $E_g(T)[\text{мэВ}] = E_g(0) - 0.38T^2/(T + 94)$ , и сдвиг по оси энергии длинноволнового плеча спектра излучения, можно заключить, что активная область при сильной накачке ( $I = 5 \text{ А}$ ) имеет температуру, превышающую комнатную на  $\sim 56 \text{ К}$ .

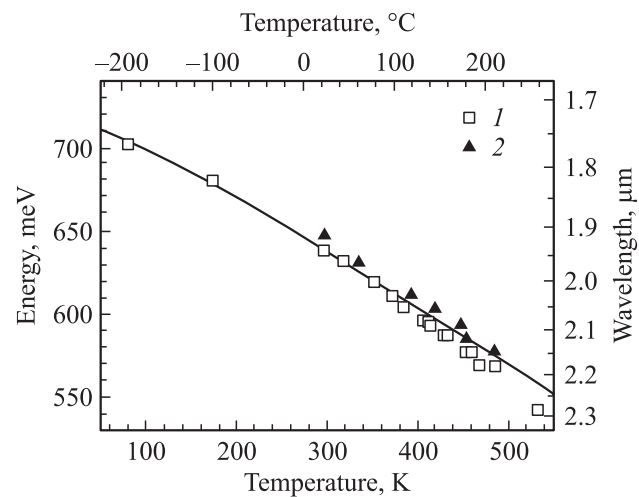
На рис. 5 показаны спектры излучения, полученные в температурном диапазоне 77–543 К. Заметим, что при 543 К припой, удерживающий чип на носителе, находится в расплавленном состоянии, и поэтому полученные данные характеризуют свойства гетероструктуры, а не

светодиода — прибора, готового к применению на практике. Как видно из рис. 5, спектр при 77 К содержит две полосы, относимые к рекомбинации „зона–зона“ и „зона–акцепторный уровень“ по аналогии с данными, полученными для СД из *n*-GaSb [5]. Нельзя также исключать из рассмотрения и возможность рекомбинации с обеих сторон от *p*–*n*-перехода соответственно в *p*- и *n*-областях. Двухпиковая структура полосы излучения при повышении температуры трансформируется в полосу с преобладающим коротковолновым пиком.

Ранее было показано [13], что в диодах с пассивными слоями, имеющими *n*-тип проводимости, наблюдается уменьшение доли выводимого наружу излучения



**Рис. 6.** Спектры излучения СД типа флип-чип (штриховая линия) и СД с точечным верхним контактом (сплошная линия) при 24 (1), 120 (2) и 210°C (3). Ток 1 А, длительность импульса 5 нс, частота 2 кГц. Пунктирная линия — расчет.



**Рис. 7.** Зависимость энергии (длины волны) максимума спектра излучения от температуры для СД типа флип-чип (1) и СД с точечным верхним контактом (2). Сплошная кривая — функция  $E_g(T) + 0.8kT$ .

при повышении температуры. Для выяснения степени влияния этого фактора нами был проведен анализ спектров излучения двух типов СД: 1) флип-чип и 2) поверхностно-излучающих с точечным верхним контактом и выводом излучения через контактный слой  $p^+$ -GaSb. Спектры излучения при температурах 24, 120 и 210°C приведены на рис. 6, причем энергии пиков при различных температурах показаны, как данные 1 и 2 на рис. 7. Как видно из рис. 6, при комнатной температуре имеется незначительное влияние подложки на спектры, в то время как при 210°C в диодах флип-чип наблюдается более резкое коротковолновое крыло спектра. Спектры СД с выводом излучения через  $p^+$ -GaSb могут быть описаны в рамках простой теории, предложенной в [14]. На рис. 6 пунктирными линиями представлены результаты расчета для температур 24 и 210°C. Отметим также хорошее согласие экспериментальных положений пиков и расчетных энергий  $h\nu_{\max} = E_g(T) - \text{const} + 0.8kT$  (где  $E_g(T)$  взята для GaSb), которое следует ожидать для максимума спектра излучения в соответствии с формализмом, предложенным в [14] (см. сплошную кривую на рис. 7). Влияние поглощения в подложке можно проследить также из сравнения температурных зависимостей ширины на половине высоты полосы излучения (FWHM), приведенных на рис. 8 для двух вариантов СД. FWHM для конструкции флип-чип „насыщается“ при повышенных температурах, что обусловлено поглощением коротковолновых квантов в  $n$ -GaSb, в то время как в СД с выводом излучения через тонкий слой  $p^+$ -GaSb ширина пропорциональна температуре во всем интервале от 77 до 543 К и приближается к значению  $2.4kT$  согласно представлениям [14].

Ватт-амперные характеристики СД, показанные на рис. 9, имеют участок со сверхлинейным возрастанием мощности (т.е. с увеличением квантового выхода) при увеличении тока до значений  $\sim (0.3-0.5)$  А, за которым следует линейный участок, переходящий в сублинейную зависимость при больших токах. Нелинейность ватт-амперной характеристики при малых токах наблюдалась во многих диодах, имеющих состав, близкий к GaSb [4,5,9], что обычно приписывалось насыщению безызлучательных центров рекомбинации. Дифференциальная квантовая эффективность  $\eta_D = dP/h\nu dI$  при комнатной температуре „насыщается“ при токах, превышающих 1 А, и достигает 0.8%. Если принять во внимание внутренние отражения на границе полупроводник/воздух (показатель преломления GaSb  $n = 3.85$ ) и учесть, что лишь  $1/n(n+1)^2 = 1.1\%$  всех фотонов покидает плоскую полубесконечную пластину, внутренняя эффективность будет соответствовать 70%, что превышает лучшие опубликованные данные для аналогичных СД [5]. В этой связи мы склонны полагать, что в наших диодах излучение выводится наружу более эффективно, чем это предсказывается простой „плоской“ моделью. Основанием для этого служит наличие в нашей конструкции широкого зеркального анода, который в зависимости от

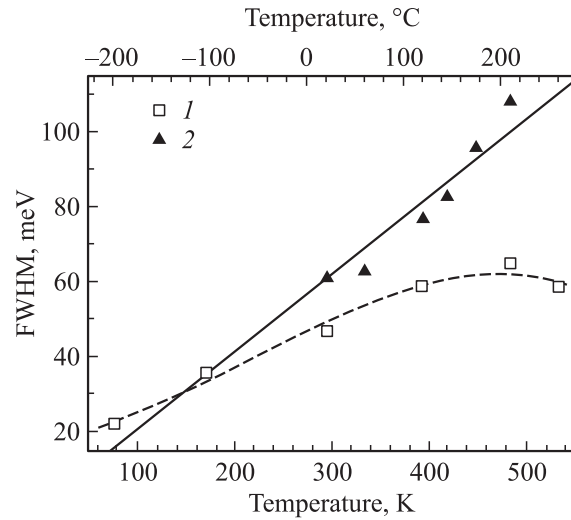


Рис. 8. Ширина спектра излучения СД типа флип-чип (1) и СД с точечным верхним контактом (2). Сплошная линия — зависимость  $f(T) = 2.4kT$ .

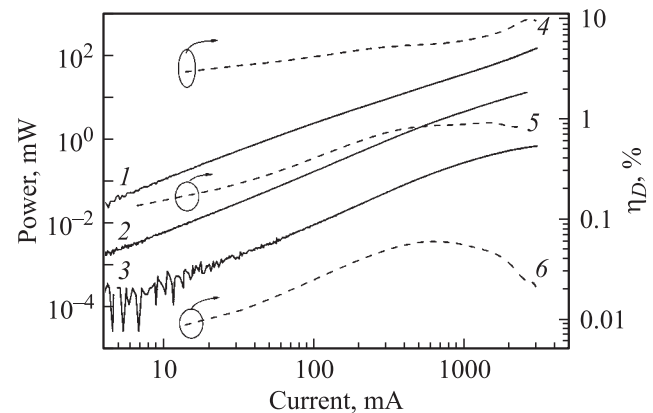


Рис. 9. Выходная мощность (1–3) и дифференциальная квантовая эффективность (4–6) СД флип-чип в зависимости от тока накачки при 77 (1, 4), 297 (2, 5) и 453 К (3, 6).

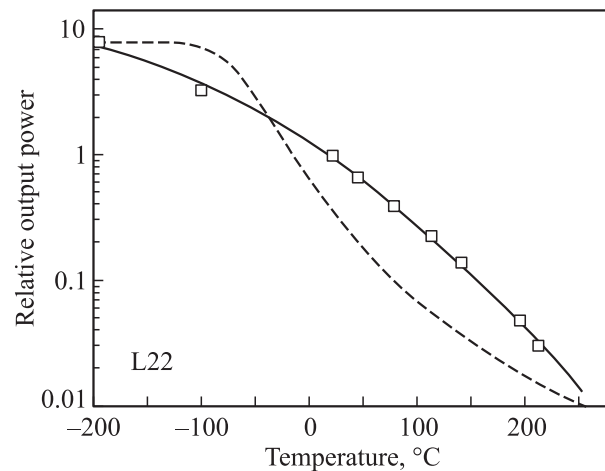
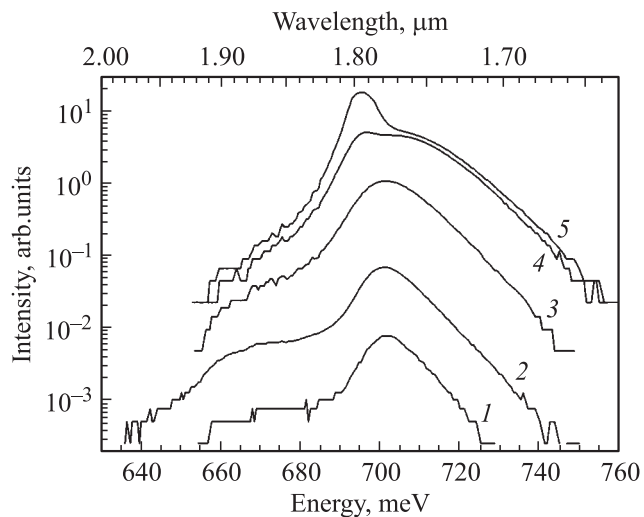


Рис. 10. Зависимость выходной мощности СД флип-чип при токе 1 А от температуры. Штриховая линия — зависимость из работы [6].



**Рис. 11.** Спектр излучения СД флип-чип при 77 К и токах накачки 0.01 (1), 0.05 (2), 0.5 (3), 2 (4) и 3 А (5).

расстояния до области рекомбинации увеличивает выход излучения в подобных конструкциях от 2 до 4 раз [15]. При самых благоприятных обстоятельствах (множитель 4) внутренняя эффективность достигнет 17%, что примерно в  $\sim 2$  раза меньше заявленных в [5] значений. Однако даже это „уменьшенное“ значение входит в противоречие с температурной зависимостью выходной мощности при фиксированном токе накачки, показанной на рис. 10, и с данными других работ (см. рис. 16 в [5] и рис. 4 в [6]). Как видно из рис. 10, фактор температурного гашения мощности для интервала 77–293 К составляет  $\sim 8$ , и поэтому может показаться, что внутренняя эффективность при неизменности коэффициента выхода излучения превысит 100% при 77 К. По-видимому, в исследуемых СД имеет место более эффективный вывод излучения, чем для плоских диодов, что может быть связано с отражением от стенок мезы, увеличивающим выход излучения, например, для мезы в форме конуса Винстона [16]. В нашем случае форма мезы далека от конуса Винстона, и поэтому мы не ожидаем существенного вклада отражений от стенок в увеличение мощности. К другим факторам, которые могут изменить условия вывода излучения, следует отнести суперлюминесценцию, влияние которой должно быть особенно заметно при низких температурах. Действительно, как видно из рис. 11, интенсивность люминесценции при 77 К значительно возрастает при увеличении тока на длине волны 1.78 мкм, что сопровождается увеличением квантовой эффективности (рис. 9) и уменьшением ширины полосы излучения. Одновременно с этим излучение в близлежащих спектральных областях „насыщается“, что свидетельствует о близости к режиму усиления. Ранее аналогичные свойства проявляли СД на основе InAsSbP/InAs с той же, что и в исследованных, конструкцией контактов и мезы [17].

## 4. Заключение

В светодиодах типа флип-чип на основе InGaAsSb на подложке GaSb с диаметром мезы 430 мкм, излучающих вблизи 1.94 мкм и имеющих последовательное сопротивление 0.4 Ом, была достигнута внешняя дифференциальная квантовая эффективность 0.8% при комнатной температуре. Высокое значение квантовой эффективности связано с особенностями конструкции флип-чип светодиодов, а именно с отражением излучения от анодного контакта и от стенок мезы. Работоспособность светодиодов, в том числе при обратном смещении (в режиме отрицательной люминесценции), сохранялась вплоть до 175°C. При понижении температуры от 300 до 77 К положение пика излучения смещалось в коротковолновую область аналогично температурному изменению ширины запрещенной зоны GaSb. При этом наблюдалось 8-кратное возрастание квантовой эффективности и появление стимулированной люминесценции в перпендикулярном к  $p-n$ -переходу направлении.

Работа поддержана компанией Schlumberger Oilfield Services и программой SBIR/STTR при административной поддержке со стороны US Civil Research and Development Foundation for the IS of the FSU (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 в рамках проектов PD 04-1.2-259 и № МК-1597.2003.02.

## Список литературы

- [1] Л.М. Долгинов, А.Е. Дракин, П.Г. Елисеев, Т.В. Бердникова, М.Г. Мильвидский, В.П. Орлов, Ю.А. Пантелеев, Б.Н. Свердлов, Е.Г. Шевченко. Квантовая электроника, **5**, 2499 (1978).
- [2] L.M. Dolginov, P.G. Eliseev, A.N. Lapshin, M.G. Milvidskii. Cryst. Technol., **13**, 631 (1978).
- [3] V. Rakovics, J. Balazs, S. Puspoki, C. Frigeri. Mater. Sci. Eng., **B80**, 18 (2001).
- [4] А.Н. Именков, Е.А. Гребенщикова, Б.Е. Журтанов, Т.Н. Данилова, М.А. Сиповская, Н.В. Власенко, Ю.П. Яковлев. ФТП, **38**, 1399 (2004).
- [5] Н.Д. Стоянов, Б.Е. Журтанов, А.П. Астахова, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **37**, 996 (2003).
- [6] A. Krier, S.A. Bissit, N.J. Mason, R.J. Nicholas, S. Salesse, P.J. Walker. Semicond. Sci. Technol., **9**, 87 (1994).
- [7] A. Krier, D. Chub, S.E. Krier, M. Hopkinson, G. Hill. IEE Proc. Optoelectron., **145**, 292 (1998).
- [8] M. Peter, R. Kiefer, F. Fuchs, N. Herres, K. Winkler, K.-H. Bachem, J. Wagner. Appl. Phys. Lett., **74**, 1951 (1999).
- [9] Т.Н. Данилова, Б.Е. Журтанов, А.Л. Закгейм, Н.Д. Ильинская, А.Н. Именков, О.Н. Сарасев, М.А. Сиповская, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **33**, 239 (1999).

- [10] B. Andrews. *Тезисы конференции MIOMD-VI* (St. Petersburg, 2004) с. 90.
- [11] R.C. Johnes. *Appl. Optics*, **1**, 607 (1962).
- [12] M.A. Remennyi, N.V. Zotova, S.A. Karandashev, B.A. Matveev, N.M. Stus', G.N. Talalakin. *Sens. Actuators B: Chemical*, **91**, 256 (2003).
- [13] B.A. Matveev, N.V. Zotova, S.A. Karandashev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', G.N. Talalakin. *Proc. SPIE*, **4650**, 173 (2002).
- [14] A. Mooradian, H.Y. Fan. *Phys. Rev.*, **148** (2), 873 (1966).
- [15] H. Benisty, H. De Neve, C. Weibuch. *IEEE J. Quant. Electron.*, **34**, 1612 (1998).
- [16] T. Ashley, N.T. Gordon, T.J. Phillips. *J. Mod. Optics*, **46**, 1677 (1999).
- [17] B. Matveev, N. Zotova, N. Il'inskaya, S. Karandashev, M. Remennyi, N. Stus'. *Phys. Status Solidi C*, **2** (2), 927 (2005).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## **Flip-chip InGaAsSb/GaSb LEDs emitting at 1.94 $\mu\text{m}$**

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

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** We present spectral, current-voltage and light-current characteristics of InGaAsSb light emitting diodes (LEDs) (1.94  $\mu\text{m}$ , 300 K) in the 77–543 K temperature range grown onto *n*-GaSb substrate by the liquid phase epitaxy and processed as flip-chip devices. Spectral shape, peak position and output power are discussed with respect to LED construction, substrate absorption and the Joule heating effects.