

Светодиоды на основе InAs с резонатором, сформированным анодным контактом и границей раздела полупроводник/воздух

© Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев[†], М.А. Ременный, Н.М. Стусь, В.В. Шустов

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

(Получена 2 марта 2004 г. Принята к печати 4 марта 2004 г.)

Приведены спектральные характеристики светодиодов на основе двойных гетероструктур InAsSbP/InAs с активным слоем из InAs и резонатором, образованным широким анодным контактом и поверхностью структуры, излучающих вблизи 3.3 мкм при комнатной температуре. Приведены данные о диаграмме направленности и модовой структуре светодиодов с толщинами 7.5–45 мкм и зависимости положения мод от тока накачки.

1. Введение

Последние годы отмечены существенным прогрессом в создании инфракрасных (ИК) светодиодов, работающих при комнатной температуре и пригодных для применения в оптических анализаторах метана, использующих измерение поглощения вблизи фундаментальной полосы ν_3 (3.3 мкм). Нарботка таких светодиодов превышает 30 000 часов [1], что вполне достаточно для большинства практических приложений.

Изопериодные с непрозрачной подложкой InAs структуры InAsSbP/InAs, полученные методом LPE или MOCVD, являются наиболее часто упоминаемыми для указанных выше целей, и в литературе можно встретить описание излучающих при 3.3 мкм светодиодов (СД) с точечным верхним контактом, не содержащих просветляющих покрытий [2,3]. Выходная мощность таких диодов, согласно [2,3], достигала 5 мВт при токах накачки 1.4 и 1.2 А соответственно, что указывает на высокий внутренний квантовый выход, достигающий при анализе данных [2] значений, существенно больших 50%. В силу большого коэффициента преломления ($n = 3.52$) и малого угла полного внутреннего отражения, а также неизбежного сгущения линий тока в непосредственной близости от точечного контакта описанные выше конструкции СД не являются оптимальными. В этой связи можно ожидать, что оптимизация геометрии контактов и просветление поверхности в ближайшее время приведут к существенному увеличению опубликованных значений мощности.

В работе [4] сообщается о создании СД на основе двойных гетероструктур InAsSbP/InAs, полученных на прозрачной, сильно легированной подложке n^+ -InAs с широким отражающим анодным контактом, в которых полное внутреннее отражение уменьшено за счет стыковки СД с иммерсионными линзами в форме гиперполусферы [5]. Несмотря на высокую выходную мощность излучения (10 мВт, 5 А), такие светодиоды из-за вывода излучения через n^+ -InAs обладают сильной зависимостью мощности от температуры, являющейся

следствием снятия вырождения электронов в зоне проводимости n^+ -InAs при повышенных температурах [6]. Другим недостатком является температурный сдвиг полосы излучения, который, однако, подавляется с помощью узкополосных фильтров [7,8] при некоторой потере мощности в максимуме спектрально отфильтрованного излучения.

С другой стороны, создание резонатора толщиной порядка длины волны излучения с гранями, расположенными параллельно p - n -переходу и интегрированными с ним, снимает вышеуказанные недостатки, поскольку увеличивает выход излучения нормально к поверхности и одновременно стабилизирует его длину волны по отношению к температурным вариациям. Соответствующие СД с микрорезонаторами интенсивно изучались в ближнем ИК диапазоне спектра [см., например, 9,10]; в то же время исследования подобных СД в средней ИК области немногочисленны. Авторы [11] сообщают о получении с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии микрорезонаторных СД структур из CdHgTe/HgTe с последовательным сопротивлением 80 Ом. Столь высокое сопротивление в сокоупности с плохой теплопроводностью материалов IV–VI имели следствием невысокую эффективность таких приборов. Оптически возбуждаемые СД на основе халькогенидов свинца, выращенные на подложках из BaF₂ или Si, описаны в работах [12,13]. Гораздо меньше внимания уделено СД с микрорезонаторами на основе материалов III–V, хотя последние обладают высокой теплопроводностью и металлургической стабильностью. В работе [14] сообщается о двукратном увеличении выходной мощности на длине волны 4.2 мкм благодаря наличию брэгговских зеркал из GaAs/AlAs, окаймляющих активную область на основе сверхрешетки второго типа.

В настоящей работе сообщается о проявлении резонансных свойств в спектрах электролюминесценции вблизи 3.3 мкм в двойных гетероструктурах InAsSbP/InAs, выращенных методом LPE на подложках арсенида индия, в которых резонатор Фабри–Перо сформирован зеркальным анодным контактом и поверхностью полупроводниковой структуры.

[†] E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru
Fax: (812) 247 7446

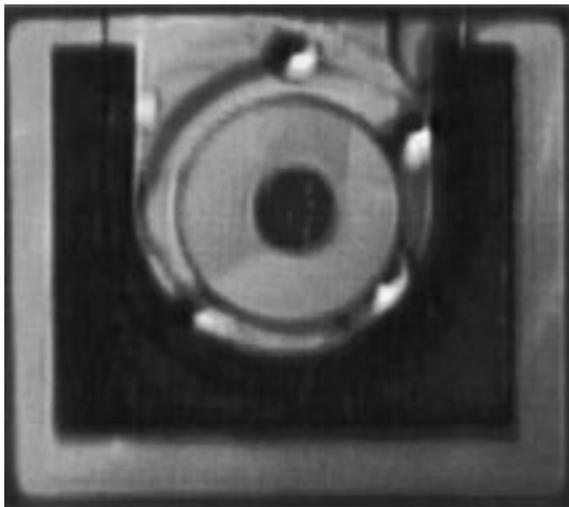


Рис. 1. Вид контактной поверхности чипа светодиода с диаметром мезы и анодного контакта 300 и 100 мкм соответственно. Вытравленное „окно“ не видно, поскольку оно расположено на противоположной стороне чипа.

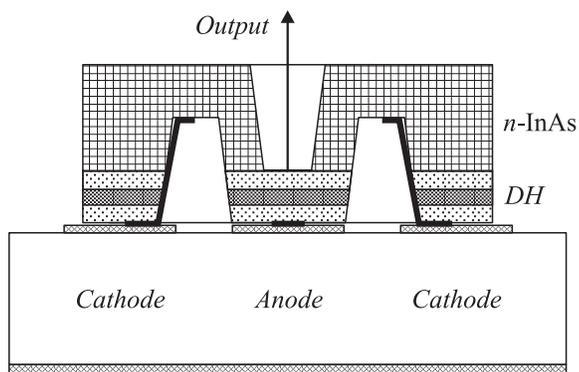


Рис. 2. Схема СД, смонтированного по технологии „flip-chip“ и имеющего „окно“ в подложке: подложка n -InAs; ДГС InAs/InAsSbP; кремниевый носитель с контактными областями из Pb + Sn.

2. Образцы и методика измерений

Исследовались образцы, полученные из двойных гетероструктур (ДГС) InAsSbP/InAs, выращенных на: 1) сильно легированных подложках n^+ -InAs(Sn)(111) ($n > 10^{18} \text{ см}^{-3}$) (тип 1), 2) широкозонных буферных слоях InAsSbP и InGaAsSb толщиной 2–40 мкм, предварительно выращенных на поверхности нелегированных подложек n -InAs(111) ($n \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) (тип 2). Используемые ДГС были аналогичны описанным нами ранее применительно к свето- [4] и светодиодам [6], имеющим максимум спектральных характеристик при 3.3 мкм: толщины нелегированных областей из арсенида индия (активная область) составляли 1–2 мкм, толщины широкозонных слоев n - и p -InAs $_{1-x-y}$ Sb $_x$ P $_y$

($x \approx 0.09$, $y \approx 0.18$, $p = 2-5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) были в пределах 2–3 мкм.

Для получения конструкций с круглыми мезами диаметром 300 мкм использовалась двухсторонняя „мокрая“ фотолитография. Круглые анодные ($D = 100$ или 240 мкм) и U-образные катодные контакты (рис. 1) наносились напылением с последующим „упрочнением“ при электрохимическом осаждении золота. Контакты специально не вжигались. На части образцов со стороны подложки вытравливалось „окно“ диаметром 100–140 мкм, расположенное над центральной частью анодного контакта, как показано на рис. 2. При этом травление осуществлялось в три этапа: однородное утоншение всей подложки, травление через маску с круглыми отверстиями и однородное утоншение всей подложки, включая полученные на втором этапе углубления.

Образцы разрезались или раскалывались на чипы размерами $0.95 \times 0.85 \text{ мм}$, после чего припаивались на кремниевые держатели $1.1 \times 1.6 \times 0.4 \text{ мм}$ с соответствующей геометрией контактных областей. Собранные чипы паялись на корпус ТО-18.

Измерения проводили при комнатной температуре и при температуре жидкого азота (77 К). Для этого использовали импульсное питание длительностью 5 мкс и частотой 500 Гц; в качестве приемников использовали охлаждаемые (77 К) фотодиоды из InSb и CdHgTe.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 3 показаны типичные спектры электролюминесценции диодов второго типа с толщиной в области „окна“ порядка 45 мкм, широким анодным контактом ($D = 240 \text{ мкм}$) при температурах 77 и 300 К; при этом температурный сдвиг контура, огибающего все пики, соответствует изменению ширины запрещенной зоны InAs: $dE_g/dT = 2.8 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$. Как видно

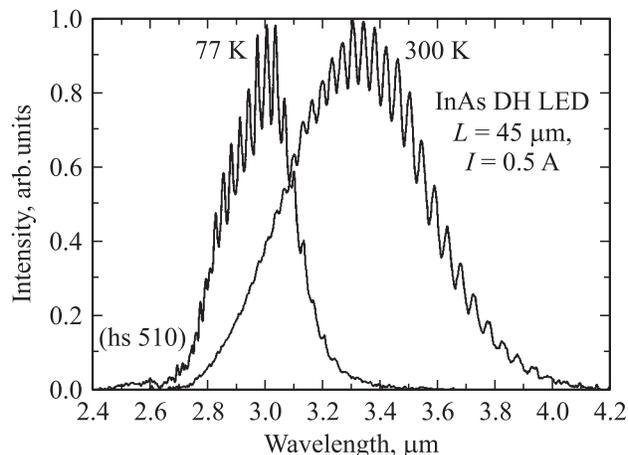


Рис. 3. Спектры электролюминесценции СД толщиной 45 мкм при 77 и 300 К.

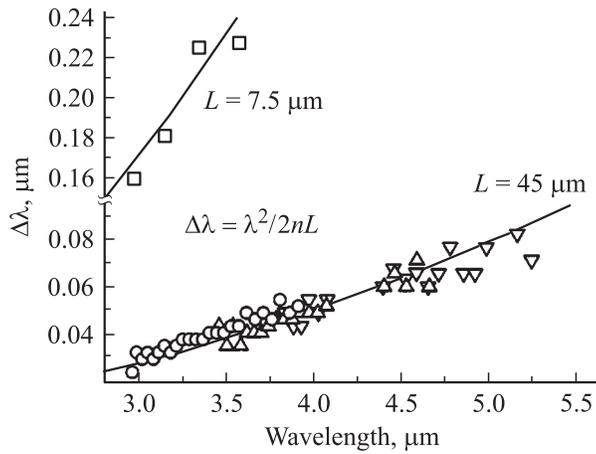


Рис. 4. Расстояние между пиками люминесценции в СД толщиной 45 мкм (круглые точки из данных на рис. 3 и треугольные точки для положительно/отрицательной люминесценции СД из InGaAsSb из [15]) и СД толщиной 7.5 мкм (квадратные точки из данных на рис. 6).

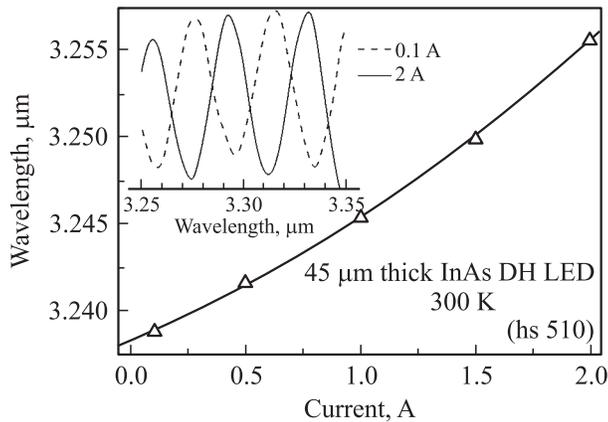


Рис. 5. Зависимость спектрального положения выбранного максимума излучения (моды) от тока накачки. На вставке — спектр излучения при токе 0.1 и 2 А в диапазоне от 3.30 до 3.36 мкм.

из рис. 3, имеет место модуляция излучения, вызванная наличием резонатора Фабри–Перо, длина которого совпадает с толщиной структуры в предположении о том, что средний показатель преломления в структуре составляет $n = 3.5$. Иллюстрацией этого служат данные на рис. 4, показывающие, что межмодовое расстояние с СД $\lambda = 3.3$ мкм с толщинами 7.5 мкм (верхняя кривая, квадратные точки) и 45 мкм (нижняя кривая, круглые точки) и в СД $\lambda = 3.9$ мкм толщиной 45 мкм (нижняя кривая, треугольные точки [15]) удовлетворительно описывается соотношением $\Delta\lambda = \lambda^2/2nL$, $n = 3.5$.

Отметим, что межмодовое расстояние в длинноволновой области ($\lambda > 4.5$ мкм, рис. 4) было получено нами при измерении отрицательной люминесценции в диодах на основе InGaAsSb при температуре 180°C; монотонность изменения межмодового расстояния во

всем интервале длин волн свидетельствует, таким образом, о слабом изменении показателя преломления при изменении температуры. Вместе с тем спектральное положение отдельных мод смешалось в длинноволновую область спектра при увеличении тока со скоростью ~ 10 нм/А, как показано на рис. 5. Мы готовы допустить, что в диодах имеет место джоулев разогрев, однако из-за близости активной области к теплоотводу и низкого последовательного сопротивления, а также небольшого коэффициента линейного расширения InAs мы не ожидаем существенного вклада температурного „расширения“ резонатора в наблюдаемый эффект. Изучению процесса токовой перестройки мод будет посвящена наша последующая работа в связи с тем, что токовая модуляция излучения может быть весьма полезной при проведении тонких спектральных измерений.

На рис. 6 представлен спектр излучения самого тонкого в данном исследовании СД, в котором центральная часть мезы не содержала подложки (тип I), а диаметр анодного контакта составлял 100 мкм. Суммарная толщина складывалась, таким образом, из толщины широкозонных слоев InAsSbP и активного слоя InAs и составляла по оценке 7.5 мкм. Из рис. 6 видно, что контраст растет при увеличении тока в диапазоне 50–500 мА, что аналогично возгоранию суперлюминесценции в резонансных максимумах при большом уровне инжекции. Мы, однако, не можем настаивать на объяснении увеличения контраста возникновением суперлюминесценции, поскольку в наших экспериментах отсутствовал ее важный признак — сверхлинейная ватт-амперная характеристика. Выходная мощность в наших СД росла с увеличением тока, однако зависимость от тока была сублинейной, что характерно для большинства СД в этом спектральном диапазоне (см., например, [2,3]). Другим наблюдением, не позволяющим нам ограничиваться рассмотрением суперлюминесценции, является тот факт, что в структурах с широким контактом (240 мкм) увеличения контраста при увеличении тока не наблюдалось. Наиболее вероятным объяснением являет-

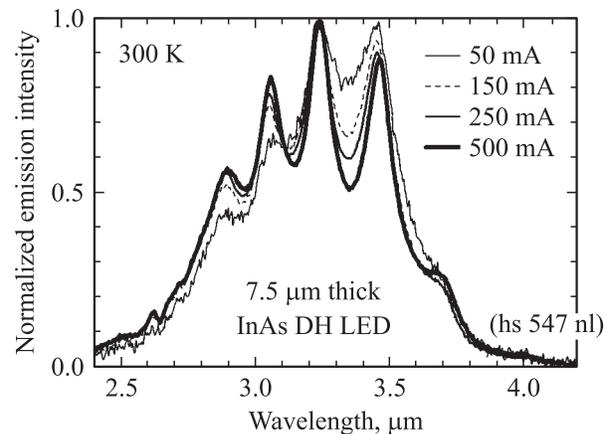


Рис. 6. Нормированные спектры электролюминесценции СД толщиной 7.5 мкм при токах накачки 50, 150, 250 и 500 мА.

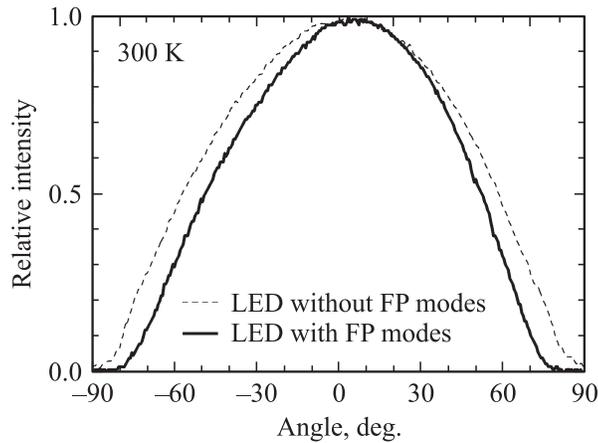


Рис. 7. Картина дальнего поля электролюминесценции СД с выраженными (жирная кривая) и невыраженными (тонкая кривая) спектральными резонансами.

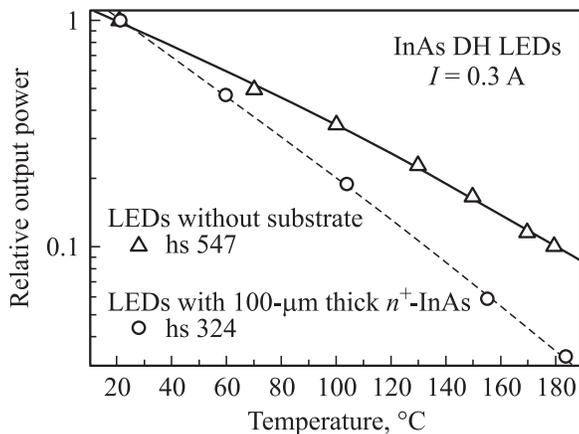


Рис. 8. Зависимость выходной мощности СД 3.3 мкм на основе ДГС InAsSbP с сильно легированной подложкой (круглые точки) и без подложки (т.е. с „окном“) (треугольные точки) от температуры.

ся перераспределение (сгущение) линий тока в образцах с диаметром контакта 100 мкм, известное как „current crowding“ и наблюдаемое в абсолютном большинстве светодиодов с малыми размерами контактов [16,17]. Действительно, вполне естественно допустить, что в нашем случае излучение суммируется от двух областей: 1) расположенной непосредственно над анодным контактом и подверженной заметному влиянию интерференции из-за большого коэффициента отражения золота, и 2) области, охватывающей кольцом вышеуказанную. Для второй зоны характерен низкий коэффициент отражения от поверхности p -InAsSbP, не имеющей золотого покрытия (отметим, что диаметр „окна“ был несколько больше диаметра контакта). При малых токах обе зоны дают вклад в выходящее из полупроводника излучение, хотя вклад первой зоны превалирует из-за отражения от контакта. При увеличении тока его линии

сгущаются над контактом, что приводит к уменьшению относительного вклада областей вне последнего. Соответственно с ростом тока в спектре усиливаются резонансные пики и растет контраст, поскольку излучение надконтактной области мезы промодулировано резонатором.

Создание прозрачного резонатора приводит к уменьшению оптических потерь, связанных с полным внутренним отражением; в опыте это сопровождается сужением диаграммы направленности излучения СД, имеющего явно выраженные резонансные пики в спектре излучения, как показано на рис. 7, и увеличением добротности Q при увеличении длины резонатора. Значения Q для образцов с толщинами 7.5, 13 и 45 мкм, оцененные по полуширине мод, соответственно составляли 24, 32 и 80. Попутно заметим, что реальные (ненормированные) интенсивности резонансных пиков, показанных на рис. 6, по крайней мере на 25% больше, чем соответствующие интенсивности для аналогичных образцов, не имеющих резонансных пиков. Последнее свидетельствует о том, что в образцах с высокой добротностью происходит реальное перераспределение мощности излучения, характерное для СД с микрорезонаторами (т.е. RC LEDs).

Ранее [6] нами отмечалось, что с повышением температуры снимается вырождение электронов в зоне проводимости сильно легированного арсенида индия, т.е. происходит подавление эффекта Мосса–Бурштейна с соответствующим возрастанием поглощения вблизи спектральной полосы 3.3 мкм. В связи с этим можно было ожидать, что свободные от подложки СД будут характеризоваться улучшенными характеристиками при повышенных температурах. Действительно, как видно из рис. 8, спад температурной зависимости выходной мощности в СД без подложки (тип 1) более пологий, чем для СД, в котором излучение проходит через n^+ -InAs толщиной 100 мкм.

В заключение отметим, что, несмотря на малую толщину структур в области „окна“, лишь незначительное число СД имело механические повреждения, препятствующие их использованию. На наш взгляд, высокая надежность конструкции связана с малыми термическими напряжениями, характерными для системы InAsSbP/InAs.

Работа поддержана Министерством науки и технологий РФ в рамках программы „Оптика и лазерная физика“, газонфтяной корпорацией Schlumberger Oilfield Services при административной поддержке со стороны Фонда гражданских исследований США для стран СНГ (CRDF) и программой SBIR/STTR. 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-1597.2003.02.

4. Заключение

Таким образом, в светодиодах (СД) толщиной 7.5–45 мкм на основе ДГС InAsSbP/InAs и излучающих вблизи 3.3 мкм наблюдались резонансные пики и сужение диаграммы направленности картины дальнего поля, сформированные интерференцией лучей, направленных перпендикулярно $p-n$ -переходу, внутри резонатора Фабри–Перо, образованного золотым анодом и границей раздела полупроводник/воздух. СД имели добротность в пределах 24–80 и токовую перестройку спектрального положения пиков модовой структуры излучения со скоростью ~ 10 нм/А.

Список литературы

- [1] B.A. Matveev, G.A. Gavrilo, V.V. Evstropov, N.V. Zotova, S.A. Karandashov, G.Yu. Sotnikova, N.M. Stus', G.N. Talalakin, J. Malinen. *Sensors Actuators B*, **38–39**, 339 (1997).
- [2] S.S. Kizhaev, N.V. Zotova, S.S. Molchanov, Yu.P. Yakovlev. *IEE Proc. Optoelectron.*, **140** (1), 36 (2002).
- [3] D.A. Wright, V.V. Sherstnev, A. Krier, A.M. Monakhov, G. Hill. *IEE Proc. Optoelectron.*, **150** (4), 314 (2003).
- [4] 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** (5/6), 743 (2002).
- [5] R.C. Johnes. *Appl. Optics*, **1**, 607 (1962).
- [6] B.A. Matveev, N.V. Zotova, S.A. Karandashev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', G.N. Talalakin. *Proc. SPIE*, **4650**, 173 (2002).
- [7] S.D. Smith, J.G. Crowder, H.R. Hardaway. *Proc. SPIE*, **4651**, 157 (2002).
- [8] M. Aidaraliev, N.V. Zotova, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', G.N. Talalakin. *Semicond. Sci. Technol.*, **18**, 269 (2003).
- [9] T.J. Rogers, D.G. Deppe, B.G. Streetman. *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 1858 (1990).
- [10] E.F. Schubert, Y.-H. Wang, A.Y. Cho, L.-W. Tu, G.J. Zydzik. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 921 (1992).
- [11] E. Hadji, J. Bleuse, N. Magnea, J.L. Pautrat. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 2591 (1995).
- [12] K. Kellermann, D. Zimin, K. Alchalabi, N.A. Pikhtin, H. Zogg. *IEE Proc. Optoelectron.*, **150** (4), 337 (2003).
- [13] W. Heiss, M. Bolberi, T. Schwarz, G. Spinholz, J. Furst, H. Pascher. *IEE Proc. Optoelectron.*, **150** (4), 332 (2003).
- [14] D. Gevaux, A. Green, C. Palmer, P. Stavrinou, C. Roberts, C. Philips. *IEE Proc. Optoelectron.*, **150** (4), 360 (2003).
- [15] M.A. Remennyi, B.A. Matveev, N.V. Zotova, S.A. Karandashev, N.M. Stus', G.N. Talalakin. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **20** (3–4), 548 (2004).
- [16] 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** (25), 4228 (2001).
- [17] Ж.И. Алфёров, А.Т. Гореленок, И.Г. Груздов, А.Г. Джигаров, Н.Д. Ильинская, И.С. Тарасов, А.С. Усиков. *Письма ЖТФ*, **8** (5), 257 (1982).

Редактор Л.В. Беляков

InAs light-emitting diodes with cavity formed by anode contact and semiconductor/air interface

N.V. Zotova, N.D. Ilinskaya, S.A. Karandashev, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', V.V. Shustov

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

Abstract The paper describes room temperature spectral characteristics, far-field pattern and mode structure of the 3.3 μm InAs light emitting diodes fabricated from InAsSbP/InAs double heterostructures with 7.5–45 μm long cavities formed by the anode contact and semiconductor/air interface.