

Исследование эффективности вывода излучения из меза-светодиодов на основе узкозонной активной области InAsSb

© Е.А. Гребенщикова[¶], А.Н. Именков, С.С. Кижаяев, А.С. Головин, Ю.П. Яковлев

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

(Получена 25 июля 2011 г. Принята к печати 1 августа 2011 г.)

Создана серия светодиодов (длина волны максимума излучения $\lambda_{\max} = 3.6$ мкм при комнатной температуре) с мезами в форме конуса высотой от 10 до 130 мкм. Конусы имели вогнутую боковую поверхность. Исследована зависимость эффективности излучения таких светодиодов от высоты мезы при разных токах инжекции при температурах 77 и 298 К. Характер наблюдаемой зависимости согласуется с теоретическими расчетами. Показано, что эффективный коэффициент поглощения, обусловленный выводом излучения из кристалла, может достигать 3 см^{-1} для светодиодов с мезой наибольшей высоты из данной серии (130 мкм). Коэффициент вывода излучения из кристалла приблизился к 30% при температуре 298 К и к 94% при 77 К.

1. Введение

Полупроводниковые светодиоды (СД) являются в настоящее время одними из основных элементов оптоэлектроники. Однако успехи в разработке и изготовлении СД для различных диапазонов спектра неравноценны. Следует отметить, что эффективность светодиодов, излучающих в средней инфракрасной (ИК) области спектра (3–5 мкм) невысока. Однако потребность в таких светодиодах непрерывно возрастает из-за необходимости измерения содержания оксидов углерода в атмосфере [1] и контроля химического состава сред, содержащих газообразные углеводороды и вредные промышленные газы [2,3].

Среди факторов, негативно сказывающихся на эффективности светодиодов, созданных на основе узкозонных соединений $A^{III}B^V$, наряду с высокой долей безызлучательной оже-рекомбинации и некоторых других существенным является трудность вывода излучения из кристалла с большим показателем преломления.

Один из путей повышения эффективности светодиода связан с увеличением доли света, выводимого из светодиодного кристалла. Только малая часть генерируемого в активном слое структуры излучения падает на его наружную поверхность под углом, меньшим угла полного внутреннего отражения на границе раздела полупроводник–воздух (16° в случае InAs). Значительная доля рекомбинационного излучения отражается от граней кристалла и поглощается, не выходя за пределы кристалла. Эти эффекты полного внутреннего отражения и самопоглощения излучения, приводящие к снижению внешнего квантового выхода в плоских светодиодах, рассмотрены в [4]. В литературе приводятся различные способы увеличения коэффициента вывода излучения из полупроводникового кристалла. Например, предлагалось текстурировать световыводящую поверхность полупроводникового кристалла, создавать светодиодные структуры с удаленной подложкой, а также с высокой мезой,

имеющей ограниченную выпуклую поверхность или увеличенную в ширину световыводящую поверхность [5]. В [6] нами исследовались светодиоды на основе GaSb для спектрального диапазона 1.8–2.4 мкм с мезами как в форме куба, так и в форме ступенчатой пирамиды. Теоретически и экспериментально было показано, что внешний квантовый выход фотонов пропорционален отношению площади световыводящей поверхности кристалла (S) к его объему (V). Изменение формы кристалла с кубической на форму пирамиды со сглаженными ступенями увеличивает коэффициент вывода фотонов в 1.5 раза [6]. В работе [7] нами сообщалось, что световыводящая поверхность в виде конуса с вогнутой образующей повышает коэффициент вывода излучения из кристалла еще в 1.5 раза при комнатной температуре за счет переориентации световых потоков в кристалле. Данная работа является продолжением наших работ по созданию спонтанных источников излучения для средней ИК области спектра и посвящена увеличению мощности излучения светодиодов (с максимумом излучения на длине волны $\lambda_{\max} \approx 3.6$ мкм) за счет увеличения отношения площади световыводящей поверхности кристалла к его объему.

2. Объекты исследования и методика измерения

Объектами исследования служили светодиодные структуры, ранее исследованные нами при температуре 298 К [7]. Трехслойная структура была выращена методом газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) на подложке n -InAs (100), легированной серой до концентрации электронов $n = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, (n - p -InAs_{0.63}Sb_{0.12}P_{0.25}/ p -InAs_{0.97}Sb_{0.03}/ p -InAs_{0.16}Sb_{0.28}P_{0.56}) с толщинами слоев соответственно 1.1, 0.5 и 1.3 мкм. Элементный состав эпитаксиальных слоев определялся при помощи рентгеновского микроанализатора CAMEBAX. Ширина запре-

[¶] E-mail: earg@iropt7.ioffe.ru

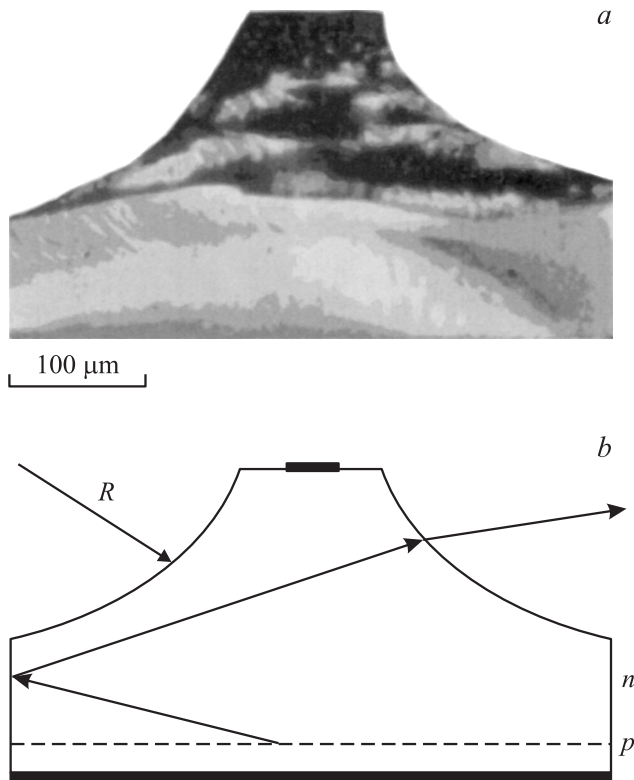


Рис. 1. Фотография поперечного скола конусной мезы высотой 100 мкм, вытравленной на структуре серии KJV-224 со стороны подложки (а), и вариант хода лучей ($h\nu$) в конусном меза-светодиоде (b). R — радиус кривизны поверхности мезы.

щенной зоны активного слоя гетероструктуры InAsSb ($E_g \approx 0.31$ эВ) существенно меньше, чем подложки InAs ($E_g \approx 0.36$ эВ). Поэтому генерированный свет слабо поглощается на межзонных переходах в подложке InAs.

Из структуры толщиной $h = 190$ мкм была изготовлена методом жидкостного химического травления со стороны подложки серия чипов с конусными мезами диаметром в вершине 100 мкм и высотой 10, 40, 70, 100 и 130 мкм. В центре мезы располагался точечный контакт радиусом $\rho = 20$ мкм (Cr/Au–Te/Au), со стороны эпитаксиального слоя был напылен сплошной контакт состава Cr/Au–Zn/Au. В основании чипы имели форму квадрата со стороной $b = 500$ мкм. Они припаялись индием эпитаксиальной стороной на стандартный плоский корпус ТО-18 для увеличения теплоотвода от активной области гетероструктуры. Фотография мезы высотой 100 мкм, полученная с помощью оптического микроскопа, представлена на рис. 1, а. Из рисунка видно, что меза имеет форму усеченного конуса с вогнутыми стенками. Один вариант хода излучения в кристалле показан на рис. 1, b. Возможны и другие варианты, связанные с переориентацией световых потоков при отражении от внутренних поверхностей кристалла.

Измерялись спектры и мощность излучения при температурах 77 и 298 К. Измерения проводились в квази-непрерывном режиме на частоте 500 Гц.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Спектры излучения светодиода с наиболее высокой мезой (130 мкм) представлены в полулогарифмическом масштабе на рис. 2 при температурах 77 и 298 К. В спектрах при каждой температуре имеется только одна полоса. Провал на длине волны 4.27 мкм обусловлен поглощением CO_2 , содержащимся в атмосфере.

Длина волны максимума полосы составляет $\lambda_{\text{max}} = 3.6$ мкм при 298 К (энергия фотона $h\nu_{\text{max}} = 0.344$ эВ) и $\lambda_{\text{max}} = 3.2$ мкм при 77 К ($h\nu_{\text{max}} = 0.388$ эВ), как должно быть при межзонной рекомбинации в активной области. Ширина спектральной полосы на половине высоты в свою очередь составляет приблизительно 0.5 и 0.3 мкм соответственно. Зависимости мощности излучения этих СД от тока (рис. 3 и 4) почти линейные. Их наклон тем больше, чем больше высота мезы. Мощность излучения светодиодов с наибольшей высотой мезы (130 мкм) при токе 220 мА составила 1.06 мВт при 77 К и 0.053 мВт при 298 К. Внешний квантовый выход излучения η_e соответственно составил 1.24 и 0.07%. Из рис. 5 видно, что мощность выходящего излучения СД слабо уменьшается с уменьшением глубины мезы при температуре 77 К и значительно сильнее при 298 К.

Отношение мощности излучения светодиодов с мезой высотой 130 и 10 мкм в среднем составляет 1.53 при 298 К и 1.08 при 77 К. Присутствие искривленной поверхности (в данном случае вогнутых стенок) создает преимущество для выхода излучения из кристалла по сравнению с кристаллом прямоугольной формы [6] за

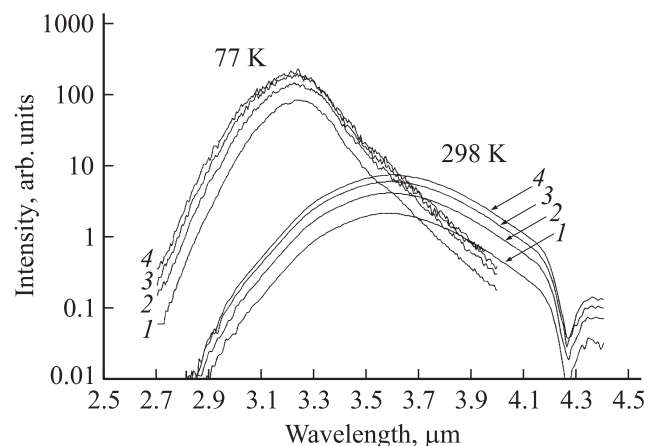


Рис. 2. Спектры излучения светодиода с высотой мезы 130 мкм при температурах 77 и 298 К и различных токах, мА: 1 — 50, 2 — 100, 3 — 150, 4 — 200. Интенсивность излучения увеличивается с ростом тока.

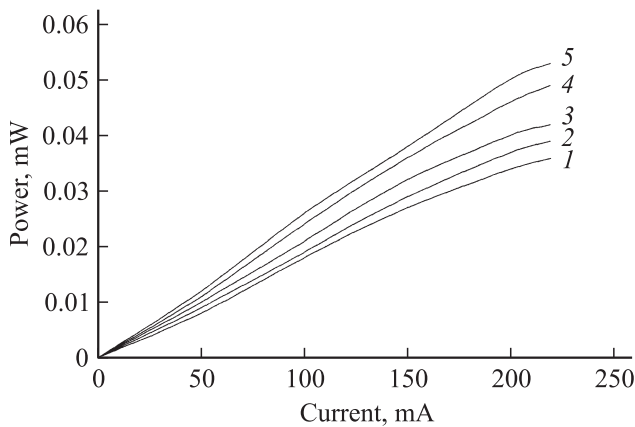


Рис. 3. Зависимости интенсивности излучения от тока при 298 К светодиодов серии KJV-224 с мезами разной высоты, мкм: 1 — 10, 2 — 40, 3 — 70, 4 — 100, 5 — 130.

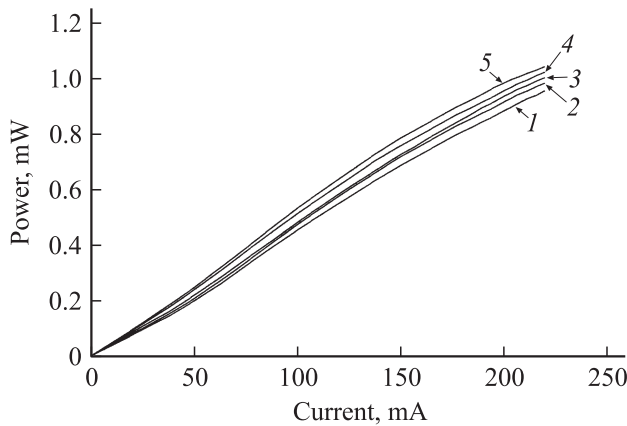


Рис. 4. Зависимости интенсивности излучения от тока при 77 К светодиодов серии KJV-224 с мезами разной высоты, мкм: 1 — 10, 2 — 40, 3 — 70, 4 — 100, 5 — 130.

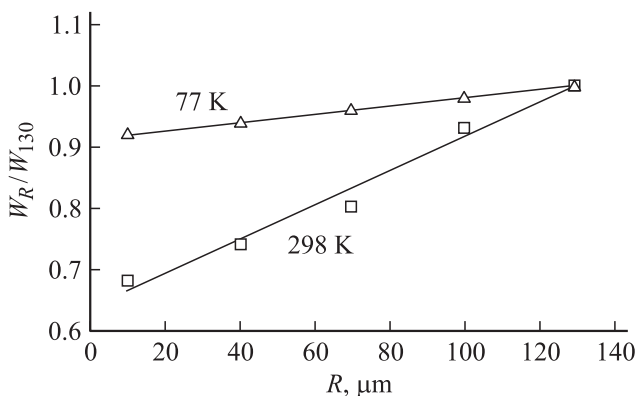


Рис. 5. Зависимость приведенной мощности излучения W_R/W_{130} (отношения мощности излучения W_R светодиодов серии KJV-224 с мезой высотой R к мощности излучения светодиодов этой серии с мезой максимальной высотой 130 мкм W_{130}) от высоты мезы R при температурах 77 и 298 К.

счет переориентирования направления распространения фотонов. Увеличение отношения площади искривленной световыводящей поверхности к объему кристалла увеличивает дополнительно долю фотонов, покидающих кристалл. Для расчетов приняли форму мезы за усеченный конус с криволинейной образующей и фиксированным радиусом в вершине $r = 50$ мкм. Образующая конуса выписывается четвертью окружности с радиусом R , равным глубине травления и с центром на плоскости, в которой лежит вершина. Это объясняется тем, что две составляющие скорости травления (нормальная и тангенциальная) имеют близкие величины. За пределами мезы кристалл считался вытравленным на глубину R . Для площади поверхности мезы S и объема мезы V были получены формулы

$$S = \pi^2 R(R + r) - 2\pi R^2, \tag{1}$$

$$V = \pi R \left(r^2 + \frac{4 - \pi}{2} rR + \frac{10 - 3\pi}{6} R^2 \right). \tag{2}$$

Остальная световыводящая площадь S_0 и объем V_0 вычислялись по формулам

$$S_0 = 4b(h - R) + b^2 - \pi(R + r) + \pi(r^2 - \rho^2), \tag{3}$$

$$V_0 = b^2(h - R). \tag{4}$$

Затем были вычислены площадь всей световыводящей поверхности S_Σ , объем кристалла V_Σ и эффективный коэффициент поглощения α_e , соответствующий выходу излучения из кристалла [8],

$$\alpha_e = \frac{S_\Sigma}{V_\Sigma n(n + 1)^2}, \tag{5}$$

где $n = 3.5$ — показатель преломления подложки.

Коэффициент α_e увеличивается от 1.91 до 3.15 см⁻¹ с ростом высоты мезы от 10 до 130 мкм (рис. 6).

Для количественной характеристики световыводящих свойств конструкции светодиода введем понятие коэффициента вывода излучения

$$\gamma_e = \frac{\alpha_e}{\alpha_e + \alpha_d}, \tag{6}$$

где α_d — коэффициент внутренних нефотоактивных потерь излучения, имеющий величину, равную обратной длине поглощения излучения в кристалле. В нашей работе [6] для внешнего квантового выхода излучения η_e была выведена формула

$$\eta_e = \frac{\eta - \eta_s}{1 - \eta_s} \gamma_e, \tag{7}$$

где η — внутренний квантовый выход излучения, η_s — внутренний квантовый выход коротковолновых фотонов, которые способны поглощаться в подложке InAs на межзонных переходах. Долю таких фотонов в первичном излучении обозначим как $k_s = \eta_s/\eta$. Преобразовав (7),

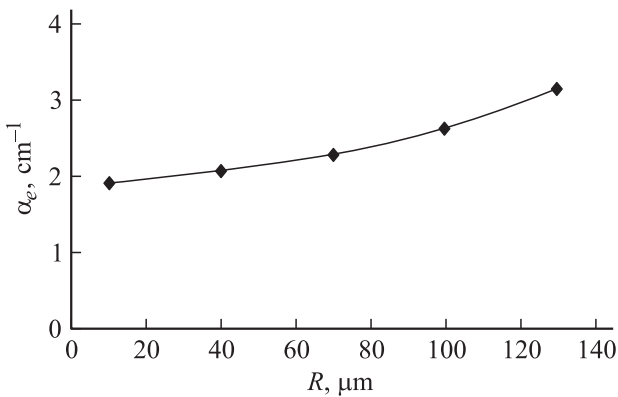


Рис. 6. Зависимость эффективного коэффициента поглощения α_e , соответствующего выходу излучения из светоодиодного кристалла серии KJV-224, от высоты мезы R .

получим формулу для определения внутреннего квантового выхода излучения:

$$\eta = \frac{\eta_e}{\gamma_e - \gamma_e k_s + k_s \eta_e}. \quad (8)$$

Коэффициент α_e (рис. 6) увеличивается не слишком сильно (в 1.65 раза) с ростом глубины травления R от 10 до 130 мкм, что позволяет определить коэффициент потерь излучения в кристалле α_d по формуле

$$\alpha_d = \bar{\alpha}_e \left(\frac{\Delta \ln \alpha_e}{\Delta \ln \eta_e} - 1 \right)^{-1}, \quad (9)$$

где $\bar{\alpha}_e$ — средний коэффициент выхода излучения при средней глубине травления в данном эксперименте (70 мкм). Подставив в (9) экспериментальные данные, получим $\alpha_d = 9 \text{ см}^{-1}$ при 298 К и 0.22 см^{-1} при 77 К, что близко к ожидаемому объемному коэффициенту поглощения и значительно меньше, чем было бы при поглощающих омических контактах. Поэтому можно считать, что омические контакты являются слабопоглощающими. Это подтверждается слабой зависимостью мощности излучения от высоты мезы при 77 К (рис. 5).

Коэффициент вывода излучения γ_e , вычисленный по формуле (6) с использованием полученного значения α_d , находится в пределах 20–30% при 298 К и 90–94% при 77 К. При комнатной температуре γ_e снижен из-за большой величины внутренних потерь излучения, связанных с температурным уширением спектральной полосы. При 77 К конусная меза с вогнутыми стенками достаточно хорошо выводит излучение из кристалла. Проведенные исследования показывают, что даже неглубокая меза сильно увеличивает коэффициент вывода излучения. Это необходимо учитывать при вычислении внутреннего квантового выхода излучения по величине внешнего квантового выхода.

Доля фотоактивного излучения k_s вычислялась из сравнения экспериментального и теоретического спектров с учетом того, что край межзонного поглощения подложки лежит при энергии фотона 0.4 и 0.49 эВ

при 298 и 77 К соответственно. Эта доля оказалась равной $k_s = 0.06$ при 298 К и пренебрежимо малой при 77 К.

Внутренний квантовый выход излучения η , рассчитанный по формуле (8) и экспериментальным значениям k_s , η_e , γ_e , составляет в среднем 0.3% при температуре 298 К и 1.3% при 77 К. Эти значения на порядок меньше, чем теоретические для InAs, вычисленные в работе [9]. Однако внешний квантовый выход излучения, полученный в нашей настоящей работе, в 2.5 раза больше, чем в работе [9], хотя материал активной области является более узкозонным по сравнению с InAs.

4. Заключение

Таким образом, с использованием методов фотолитографии и жидкостного химического травления в рамках настоящей работы создана серия светоодиодов с вогнутыми конусными мезами разной высоты. Показан характер зависимости эффективности излучения таких СД от глубины травления. Мощность выходящего излучения СД с мезой наибольшей высоты из данной серии (130 мкм) при токе 220 мА составляет 53 мкВт при температуре 298 К и 1.06 мВт при 77 К.

Измерен эффективный коэффициент поглощения излучения в кристалле, составляющий 9 и 0.22 см^{-1} при 298 и 77 К соответственно; показано, что омические контакты являются практически непоглощающими.

Работа частично поддержана программой президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“, грантами РФФИ № 10-02-93110-НЦНИЛ_а, 10-02-00548-а, а также государственным контрактом № 02.740.11.0445.

Список литературы

- [1] A. Kriev, H.H. Gao, V.V. Sherstnev, Y. Yakovlev. *Electron. Lett.*, **35**, 1665 (1999).
- [2] А.А. Попов, М.В. Степанов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. *Письма ЖТФ*, **23** (21), 24 (197).
- [3] A. Kriev, V.V. Sherstnev. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33**, 101 (2000).
- [4] Ж.И. Алфёров, В.Г. Агафонов, Д.З. Гарбузов, Н.Ю. Давидок, В.Р. Ларионов, В.Б. Халфин. *ФТП*, **10** (8), 1497 (1976).
- [5] Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь. *ФТП*, **40** (6), 717 (2006).
- [6] Е.А. Гребенщикова, А.Н. Именков, Б.Е. Журтанов, Т.Н. Данилова, М.А. Сиповская, Н.В. Власенко, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **38** (6), 745 (2004).
- [7] Е.А. Гребенщикова, А.С. Головин, А.Н. Именков, С.С. Кижаяев, Ю.П. Яковлев. *Письма ЖТФ*, **36** (3), 104 (2010).
- [8] Н.Д. Стоянов, Б.Е. Журтанов, А.П. Астахова, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **37** (8), 996 (2003).
- [9] 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).

Редактор Л.В. Шаронова

Study of efficiency of light emitting from mesa-LEDs based on narrow-gap InAsSb active region

*E.A. Grebenshchikova, A.N. Imenkov, S.S. Kizhaev,
A.S. Golovin. Yu.P. Yakovlev*

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

Abstract A series of light-emitting diodes (LEDs) operating at the wavelength $\lambda_{\max} = 3.6 \mu\text{m}$ are created using cone-shaped mesas with heights of 10–130 μm and concave side surfaces. The dependence of emission efficiency at temperatures 77 and 298 K on the mesa height at various injection currents has been studied. The character of the dependence observed agrees with the results of theoretical calculations. It is shown that effective absorption factor resulting from light emitting from the crystal in the case of LEDs with the maximum mesa height (130 μm) amounts to 3 cm^{-1} . The coefficient of light emitting from the crystal nears to 30% at temperature 298 K and to 94% at 77 K.