

06;07

## Светодиоды с конусной световыводящей поверхностью, излучающие на длине волны $3.6 \mu\text{m}$

© Е.А. Гребенщикова, А.С. Головин, А.Н. Именков,  
С.С. Кижаев, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: eagr@iropt7.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 1 октября 2009 г.

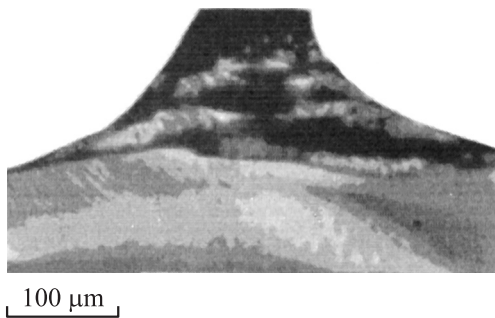
Создана серия светодиодов (СД) ( $\lambda_{\text{max}} = 3.6 \mu\text{m}$ ) с конусными мезами высотой от 10 до  $130 \mu\text{m}$ . Конусы имели вогнутую боковую поверхность. Исследована зависимость эффективности излучения таких СД от высоты мезы при разных токах инжекции ( $T = 298 \text{ K}$ ). Характер наблюдаемой зависимости согласуется с теоретическими расчетами. Показано, что мощность выходящего излучения СД с мезой наибольшей высоты из данной серии ( $130 \mu\text{m}$ ) при токе 220 мА составляет  $53 \mu\text{W}$ , что в 1.5 раза превосходит значение мощности для СД с мезой высотой  $10 \mu\text{m}$ .

Полупроводниковые светодиоды (СД) являются в настоящее время одними из основных элементов оптоэлектроники. Однако для различных диапазонов спектра успехи в разработке СД и их изготовлении, а также эффективность СД неравноценны. Следует отметить, что эффективность светодиодов, излучающих в средней ИК-области спектра ( $3\text{--}5 \mu\text{m}$ ), 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 СД, созданных на основе узкозонных соединений  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ , наряду с высокой долей безызлучательной Оже-рекомбинации и некоторых других, существенным фактором 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 ( $16^\circ$  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 глубокой 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)  $\mu\text{m}$ , 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 ( $V$ ) —  $(S/V)$ . Изменение формы кристалла с кубической на форму пирамиды со сглаженными ступенями увеличивает коэффициент вывода фотонов в 1.5 раза [6]. Данная работа является продолжением наших работ по созданию спонтанных источников излучения для средней ИК-области спектра и посвящена увеличению мощности излучения светодиодов ( $\lambda_{\text{max}} \sim 3.6 \mu\text{m}$ ) за счет увеличения отношения площади световыводящей поверхности кристалла к его объему.

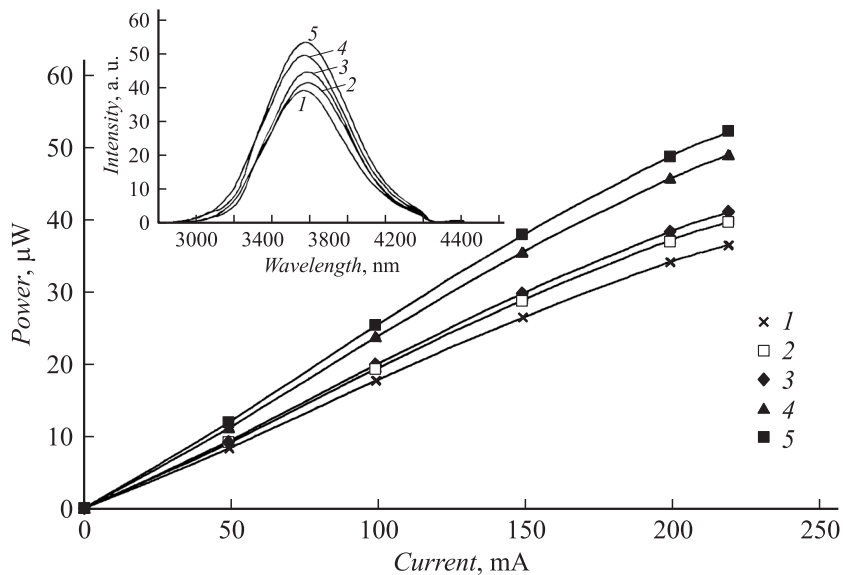
Для создания СД была выращена трехслойная структура методом МОГФЭ на подложке  $n$ -InAs (100), легированной серой до концентрации электронов  $n = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (InAs<sub>0.63</sub>Sb<sub>0.12</sub>P<sub>0.25</sub>/InAs<sub>0.97</sub>Sb<sub>0.03</sub>/InAs<sub>0.16</sub>Sb<sub>0.28</sub>P<sub>0.56</sub>) толщинами соответственно 1.1, 0.5 и 1.3  $\mu\text{m}$ . Элементный состав эпитаксиальных слоев определялся при помощи рентгеновского микроанализатора CAMEBAX. Ширина запрещенной зоны активного слоя гетероструктуры InAsSb ( $E_g \approx 0.31 \text{ eV}$ ) существенно меньше, чем подложки InAs ( $E_g \approx 0.36 \text{ eV}$ ). Поэтому генерированный свет поглощается практически только на свободных носителях заряда, без поглощения на межзонных переходах в подложке InAs.



**Рис. 1.** Фотография поперечного скола конусной мезы высотой  $100\ \mu\text{m}$ , вытравленной на структуре KJV-224 (оптический микроскоп).

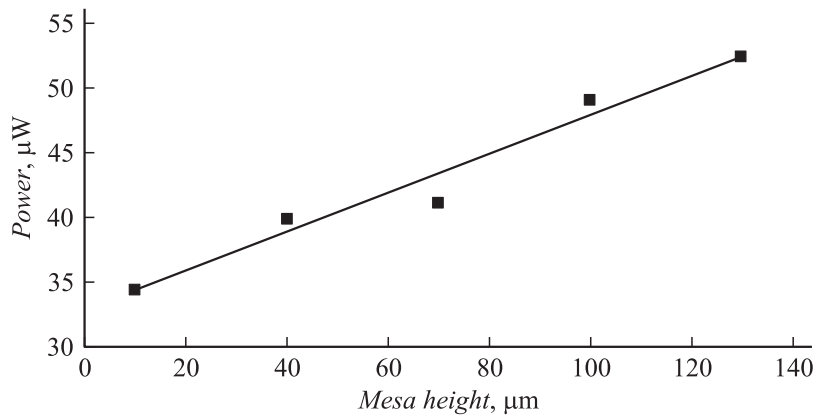
Предметом исследования были меза-диоды, полученные с помощью контактной фотолитографии и жидкостного химического травления со стороны подложки. Из структуры толщиной  $h = 190\ \mu\text{m}$  была изготовлена серия чипов с конусными мезами диаметром в вершине  $100\ \mu\text{m}$  и высотой  $R = 10, 40, 70, 100$  и  $130\ \mu\text{m}$ . В центре мезы располагался точечный контакт радиусом  $\rho = 20\ \mu\text{m}$  (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  $b = 500\ \mu\text{m}$ . Они припаивались индием на стандартный плоский корпус эпитаксиальной стороной вниз для увеличения теплоотвода от активной области гетероструктуры. Фотография мезы высотой  $100\ \mu\text{m}$ , полученная с помощью оптического микроскопа, представлена на рис. 1. Из рисунка видно, что меза имеет форму усеченного конуса с вогнутыми стенками.

Спектры излучения светодиодов с мезами разной высоты (врезка на рис. 2), измеренные в квазинепрерывном режиме питания при токе  $I = 220\ \text{mA}$  и  $T = 298\ \text{K}$ , содержат одну полосу. Длина волны излучения в максимуме ( $\lambda_{\text{max}} = 3.6\ \mu\text{m}$ ) соответствует составу твердого раствора в активной области. Ширина спектральной полосы на половине высоты  $\Delta\lambda$  составляет приблизительно  $0.5\ \mu\text{m}$ . Зависимости мощности излучения этих СД от тока (рис. 2) коррелируют с высотой мез. На рис. 3 представлены зависимости мощности выходящего излучения СД при фиксированном токе  $200\ \text{mA}$  от высоты меза. Из рисунка видно, что



**Рис. 2.** Зависимость мощности излучения от тока в квазинепрерывном режиме ( $T = 298$  K) и (на врезке) спектры излучения ( $I = 220$  mA) светодиодов KJV-224 с мезами разной высоты,  $\mu\text{m}$ : 1 — 10, 2 — 40, 3 — 70, 4 — 100, 5 — 130.

мощность выходящего излучения светодиодов увеличивается линейно по мере увеличения высоты мезы. Отношение мощности излучения светодиодов с мезой высотой 130 и  $10 \mu\text{m}$  в среднем составляет 1.53, которое обозначим буквой  $p$ . Присутствие искривленной поверхности (в данной случае — вогнутых стенок) создает преимущество для вывода излучения из кристалла по сравнению с выводом излучения из кристалла прямоугольной формы [6] за счет „перемешивания“ направлений движения фотонов и увеличения доли фотонов, выходящих за пределы кристалла. Увеличение отношения площади искривленной световыводящей поверхности к объему кристалла увеличивает дополнительно долю фотонов, покидающих кристалл. Для расчетов приняли форму мез за усеченный конус с криволинейной образующей и фиксированным радиусом в вершине  $r = 50 \mu\text{m}$ . Образующая конуса выписывается



**Рис. 3.** Зависимость мощности излучения от высоты мезы светодиодов KJV-224 при токе 220 мА ( $T = 298$  К).

четвертью окружности с радиусом  $R$ , равным высоте мезы, и с центром на плоскости, в которой лежит вершина. Это объясняется тем, что две составляющие скорости травления (нормальная и тангенциальная) имели близкие величины. Для площади, образующей поверхности мезы  $S$  и объема мезы  $V$ , были получены формулы

$$S = \pi^2 R(R + \tau) - 2\pi R^2, \quad (1)$$

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

Затем были вычислены площадь всей световыводящей поверхности  $S_\Sigma$  и объем кристалла  $V_\Sigma$  и вычислен коэффициент выхода излучения из кристалла  $\lambda_e$ , имеющий такую же размерность, как коэффициент поглощения ( $\text{cm}^{-1}$ ) [7];

$$\alpha_e = \frac{S_\Sigma}{V_\Sigma n(n + 1)^2}, \quad (3)$$

где  $n$  — коэффициент преломления подложки.

В нашем случае выполняются условия, что толщина активной области и диффузионная длина дырок в  $n$ -InAs существенно меньше

Экспериментальные и рассчитанные параметры светодиодов с конусной световыводящей поверхностью

Высота конуса, $\mu\text{m}$	$W$ , $\mu\text{W}$	$\eta_e$ , %	$h\nu$ , eV	$\Delta\lambda$ , $\mu\text{m}$	$\lambda$ , $\mu\text{m}$	$S_\Sigma/V_\Sigma$ , $\text{cm}^{-1}$	$\alpha_e$ , $\text{cm}^{-1}$	$\eta_{\text{calc}}$ , %
10	34	0.052	0.347	0.51	3.57	136	1.79	0.050
40	39	0.057	0.346	0.52	3.58	149	1.96	0.054
70	42	0.061	0.346	0.53	3.58	167	2.27	0.060
100	48	0.069	0.347	0.54	3.57	194	2.55	0.066
130	53	0.077	0.346	0.55	3.58	238	3.14	0.077

толщины подложки. Поэтому внешний квантовый выход излучения  $\eta_e$  связан с  $\alpha_e$  и коэффициентом поглощения кристалла  $\alpha_d$  простой формулой

$$\eta_e = \frac{\alpha_e \eta}{\alpha_e + \alpha_d}, \quad (4)$$

где  $\eta$  — внутренний квантовый выход излучения в активной области. Коэффициент  $\alpha_e$  увеличивается от 1.787 до 3.135  $\text{cm}^{-1}$ , т.е. в  $t = 1.75$  раза, с ростом высоты мезы  $R$  от 10 до 130  $\mu\text{m}$ , что позволяет определить коэффициент потерь излучения в кристалле  $\alpha_d$  по формуле

$$\alpha_d = \alpha_{e \text{ max}} \frac{p - 1}{t - p}, \quad (5)$$

где  $\alpha_{e \text{ max}}$  — коэффициент выхода излучения при максимальной высоте мезы в данном эксперименте ( $p$  — см. выше). Подставив в (5) экспериментальные данные, получим  $\alpha_d = 9 \text{ cm}^{-1}$ , что близко к ожидаемому объемному коэффициенту поглощения и на порядок меньше, чем при поглощающих омических контактах. Поэтому можно считать, что омические контакты являются непоглощающими.

В таблице сведены экспериментальные и рассчитанные параметры светодиодов с конусной световыводящей поверхностью. Из таблицы видно, что с увеличением высоты конуса мощность излучения  $W$  и внешний квантовый выход  $\eta_e$  увеличиваются. Отношение площади световыводящей поверхности к объему конусного светодиода  $S_\Sigma/V_\Sigma$  достигает 238  $\text{cm}^{-1}$ , что в 1.5 раза больше, чем при пирамидальной

форме [6]. Расчетный внешний квантовый выход излучения  $\eta_{\text{calc}}$  равен экспериментальному  $\eta_e$  при внутреннем квантовом выходе излучения  $\eta = 0.3\%$ .

Таким образом, в рамках настоящей работы с использованием методов фотолитографии и жидкостного химического травления создана серия светодиодов с конусными мезами разной высоты. Продемонстрирован характер зависимости эффективности излучения таких СД от высоты мезы (рис. 3). Мощность выходящего излучения СД с мезой наибольшей высоты из данной серии ( $130 \mu\text{m}$ ) при токе  $220 \text{ mA}$  составляет  $53 \mu\text{W}$ , что в 1.5 раза превосходит значение мощности для СД с мезой высотой  $10 \mu\text{m}$ . Измерен эффективный коэффициент поглощения излучения в кристалле  $\alpha_d = 9 \text{ cm}^{-1}$  и показано, что омические контакты являются непоглощающими.

Работа была поддержана грантом президиуса РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“, грантом 08-02-90039-BeI\_a и 07-02-92170-NTsNI\_a. и Государственным контрактом 02.740.11.0445 „Полупроводниковые лазеры ИК-диапазона на основе наногетероструктур“.

## Список литературы

- [1] Krier A., Gao H.H., Sherstnev V.V., Yakovlev Y. // Electron. Lett. 1999. V. 35. P. 1665.
- [2] Попов А.А., Степанов М.В., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 21.
- [3] Krier A., Sherstnev V.V. // J. Phys. D. Appl. Phys. 2000. V. 33. P. 101–106.
- [4] Алфёров Ж.И., Агафонов В.Г., Гарбузов Д.З., Давидюк Н.Ю., Ларионов В.Р., Халфин В.Б. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 8. С. 1497–1506.
- [5] Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М. // ФТП. 2006. Т. 40. В. 6. С. 717–723.
- [6] Гребенщикова Е.А., Именков А.Н., Журтанов Б.Е., Данилова Т.Н., Сиповская М.А., Власенко Н.В., Яковлев Ю.П. // ФТП. 2004. Т. 38. В. 6. С. 745–751.
- [7] Стоянов Н.Д., Журтанов Б.Е., Астахова А.П., Именков А.Н., Яковлев Ю.П. // ФТП. 2003. Т. 37. В. 8. С. 996.