

# Свойства светодиодов на основе GaSb, полученных путем химической огранки подложечной части светодиодных кристаллов

© Е.А. Гребенщикова, А.Н. Именков, Б.Е. Журтанов, Т.Н. Данилова,  
А.В. Черняев, Н.В. Власенко, Ю.П. Яковлев<sup>†</sup>

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

(Получена 2 апреля 2003 г. Принята к печати 3 апреля 2003 г.)

Сообщаются результаты исследования светодиодов, работающих в средней инфракрасной области спектра ( $\lambda = 1.7\text{--}1.9\text{ мкм}$ ). Подложечная часть светодиодных кристалликов на основе GaSb после химической огранки приобрела конусно-пирамидальную форму, и число граней кристаллика увеличилось с 6 до 10. Исследование спектров излучения и диаграмм направленности показало, что химическая огранка кристаллика увеличивает внешний квантовый выход излучения и делает диаграмму направленности почти полусферической.

## 1. Введение

Большой коэффициент преломления электролюминесцентных полупроводников затрудняет выход излучения из объема светодиодного кристалла наружу. Это объясняется тем, что только малая часть генерируемого в полупроводнике излучения падает на его наружную поверхность под углом, меньшим угла полного внутреннего отражения. Только это излучение частично (с учетом коэффициента пропускания) проходит через поверхность. Остальное отражается внутрь. Даже через шарообразную поверхность проходит частично только излучение, генерированное вблизи центра шара. Например, в случае генерирования излучения по всей наибольшей секущей плоскости может выйти наружу только 11% излучения после первого падения на сферическую поверхность. В кристалле, имеющем форму параллелепипеда, 8% излучения может пересечь 6 граней.

В литературе [1–3] обсуждаются различные способы текстурирования поверхности полупроводника (создания системы углублений) для изменения угла отражения внутрь кристалла в надежде, что излучение после нескольких прохождений внутри полупроводника упадет на поверхность под углом, меньшим угла полного внутреннего отражения, и частично выйдет наружу. Таким способом удастся увеличить долю выходящего излучения в светодиодах видимой и ближней инфракрасной областей спектра до  $\sim 30\%$ . В средней инфракрасной области многопроходность не дает желаемых результатов, так как поглощение излучения на свободных носителях заряда становится заметным, поскольку оно пропорционально второй степени длины волны. Уменьшение размеров кристалла для сокращения пути распространения излучения в нем приводит к ухудшению теплоотвода и как результат к уменьшению мощности светодиода. Межзонное поглощение также заметнее в узкозонных полупроводниках, чем в широкозонных, из-за меньшей энергии ионизации примесей в первых.

Перспектива десятикратного увеличения эффективности светодиодов среднего инфракрасного диапазона за счет улучшения выхода излучения из кристалла оправдывает новые изыскания в этом направлении.

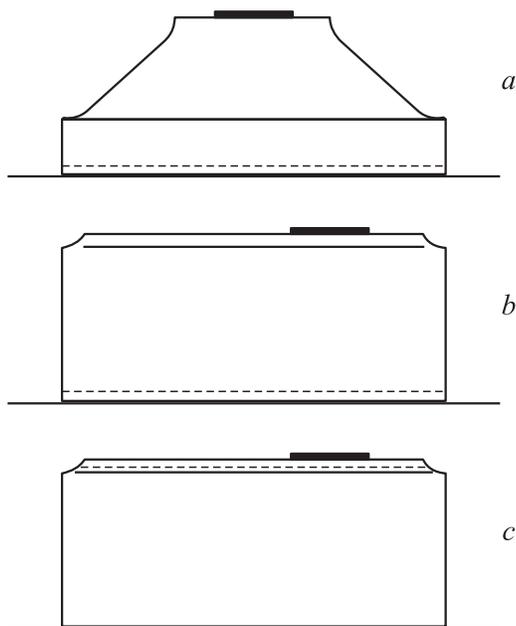
В данной работе изучалась возможность химического травления светодиодного кристалла для придания ему формы, обеспечивающей выход излучения наружу. Работа продолжает наши исследования по созданию светодиодов в средней инфракрасной области спектра (1.6–2.4 мкм) [4–7] и посвящена повышению излучательной эффективности светодиодного кристалла за счет придания ему специальной формы.

## 2. Методика создания и исследования электролюминесцентных структур

Исследуемые светодиодные структуры изготавливались методом жидкофазной эпитаксии на подложках *n*-GaSb толщиной 400 мкм, ориентированных по кристаллографической плоскости (100) [4,5]. Подложки были легированы Te до концентрации электронов  $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Вначале выращивался активный нелегированный слой GaSb с добавкой в раствор-расплав редкоземельного элемента гадолиния для увеличения совершенства слоя. Выращенный слой имел дырочную проводимость, свойственную нелегированным слоям GaSb. Толщина слоя составляла 1.5 мкм. Далее выращивался ограничительный более широкозонный слой *p*-GaAl<sub>0.34</sub>SbAs, легированный Ge до концентрации дырок  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Он имел толщину 3.5 мкм. На него наращивался контактный слой *p*-GaSb толщиной 0.5 мкм, сильно легированный Ge до концентрации дырок  $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . После этого толщина пластины доводилась до 220 мкм шлифовкой и полировкой.

Химическая огранка производилась при помощи контактной фотолитографии следующим образом. На первом этапе фотолитографии был сформирован рисунок в виде квадратов со стороной  $L = 480 \text{ мкм}$  и шагом  $S = 500 \text{ мкм}$  на подложечной стороне для выделения

<sup>†</sup> E-mail: Yakovlev@iropto.ioffe.ru



**Рис. 1.** Схема конструкции трех типов светодиодных кристалликов: *a* — с конусно-пирамидальной подложечной частью; *b* — в виде параллелепипеда с припаянной к кристаллодержателю эпитаксиальной частью; *c* — в виде параллелепипеда с припаянной к кристаллодержателю подложечной частью.

границ отдельных кристалликов. Путем электрохимического травления в травителе на основе  $\text{CrO}_3$  пограничные каналы были вытравлены на глубину 70 мкм, при этом их ширина составила 160 мкм. На втором этапе фотолитографии в центре открытых квадратов был сформирован рисунок в виде круга диаметром 300 мкм. Протравив его аналогично квадрату, получили фигуру высотой 140 мкм в форме пирамиды в основании и усеченного конуса у вершины с верхней площадкой диаметром 200 мкм (рис. 1, *a*). На третьем этапе в центре верхней площадки фотолитографически расположили окно под омический контакт диаметром 100 мкм.

Контактные слои были сформированы путем последовательного напыления  $\text{Cr}$ , сплава  $\text{Au} + \text{Te}$  и  $\text{Au}$  на установке ВУП-4. Затем контактные слои были вождены при температуре 250°C в течение 1 мин. Контакты к *p*-области сформированы последовательным напылением  $\text{Cr}$ , сплава  $\text{Au} + \text{Ge}$  и  $\text{Au}$  на всю поверхность контактного слоя *p*-GaSb и последующим вжиганием их в упомянутом режиме. Далее пластины разделялись на отдельные кристаллики методом скалывания. Каждый кристаллик монтировался эпитаксиальной стороной на светодиодный кристаллодержатель ТО-18 с плоским столиком.

Для сравнения со светодиодами, изготовленными методом глубокого травления, были изготовлены приборы со стандартными геометрическими параметрами (рис. 1, *b, c*). В этом случае на первой стадии на *n*-стороне одной пластины (рис. 1, *b*) и *p*-стороне другой

пластины (рис. 1, *c*) были сформированы упомянутые квадраты и протравлены каналы на глубину 15 мкм для получения разделительной сетки. После повторной фотолитографии на этой стороне были сформированы круглые контакты диаметром 100 мкм. На противоположной стороне пластины омический контакт формировался по всей площади. После разделения пластины на отдельные кристаллики последние монтировались на кристаллодержатель стороной со сплошным контактом.

Спектральные характеристики светодиодов измерялись в интервале длин волн 1.4–2.4 мкм на установке, в которой использовался монохроматор фирмы „CVI Laser Corporation“ (Калифорния, США). Фотоприемником служил фотодиод  $\text{InSb}$ , поставляемый вместе с предварительным усилителем сигнала фирмой „EG G JUDSON“. Чувствительность данного фотодиода в максимуме (при  $\lambda = 5$  мкм) составляет 3.5 А/Вт, красная граница — 5.3 мкм. Сигнал регистрировался при помощи селективного вольтметра „Stanford Research Systems“ (США). Средняя мощность излучения светодиодов определялась пропорционально интегралу от спектральной кривой, вычисленному в ее пределах. При этом учитывались доля излучения, попадающего на фотоприемник, коэффициент отражения дифракционной решетки, чувствительность фотоприемника на данной длине волны и коэффициент усиления предусилителя, а также изменение амплитуды сигнала на выходе селективного вольтметра (амплитуда выходного сигнала отличалась от амплитуды входного сигнала коэффициентом при первой гармонике в фурье-разложении прямоугольного сигнала на сумму синусоидальных).

Кроме того, проводились контрольные измерения средней мощности излучения светодиодов при помощи милливаттметра „NOVA“ (фирмы „Ophir“, Израиль).

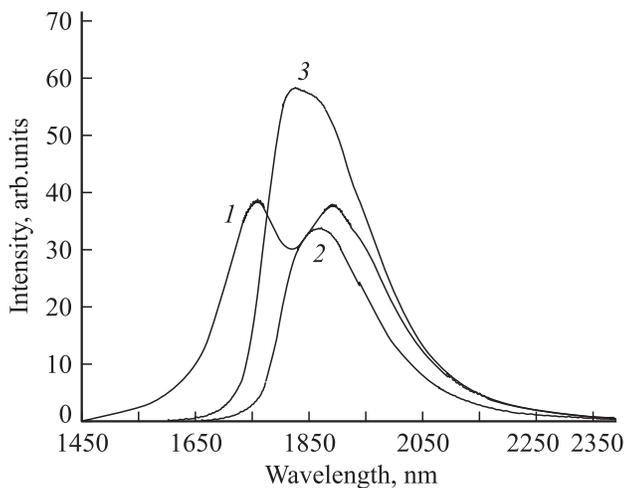
Диаграммы направленности излучения светодиодов измерялись на оригинальной установке, в которой светодиод вращался вокруг оси, лежащей в плоскости *p*-*n*-перехода. Было выбрано два направления оси: параллельно ограничивающим плоскость *p*-*n*-перехода сторонам квадрата и по диагонали квадрата. Для этого светодиод поворачивался на 45°. Получались диаграммы направленности в двух плоскостях. Одна из них была параллельна боковым граням кристаллика, вторая составляла с ними угол 45°. Светодиод запитывался прямоугольными импульсами тока со скважностью 2 и частотой повторения около 1 кГц. Излучение детектировалось неохлаждаемым фотосопротивлением из  $\text{PbSe}$  с шириной фоточувствительной площадки 1 мм и длиной 4 мм, расположенным на расстоянии 5 см от светодиода.

Полученный электрический сигнал усиливался селективным вольтметром В6-9, синхронно детектировался и записывался на электронном самописце, а также подавался на компьютер для обработки. Измерения велись при комнатной температуре 297 К.

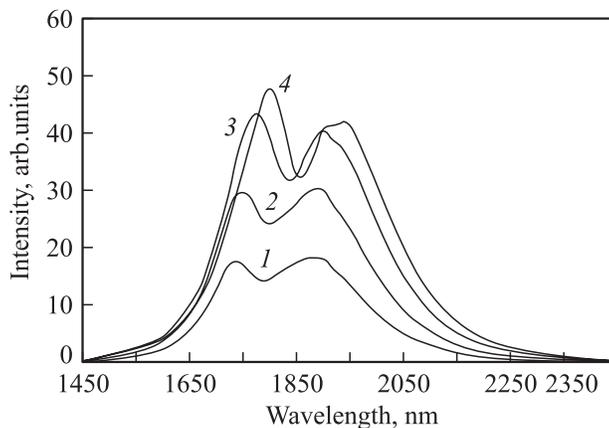
### 3. Спектры излучения

Спектры излучения светодиодов с разной формой кристалла оказываются разными (рис. 2). Сначала рассмотрим спектры излучения при малых токах 50–150 мА. При форме кристалла в виде параллелепипеда, припаянного подложечной частью к кристаллодержателю, излучается спектральный дублет с максимумами на длинах волн 1.76 мкм (энергия фотона 0.705 эВ) и 1.9 мкм (0.65 эВ) с полуширинами полос 0.06 и 0.07 эВ соответственно (рис. 2, кривая 1).

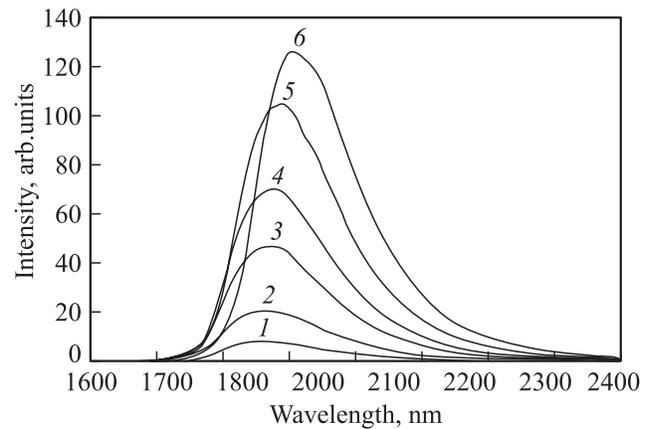
Такой же кристалл, припаянный эпитаксиальным слоем к кристаллодержателю, излучает фактически одну полосу с почти такими же параметрами, как длинноволновая полоса упомянутого дублета. Она имеет длину



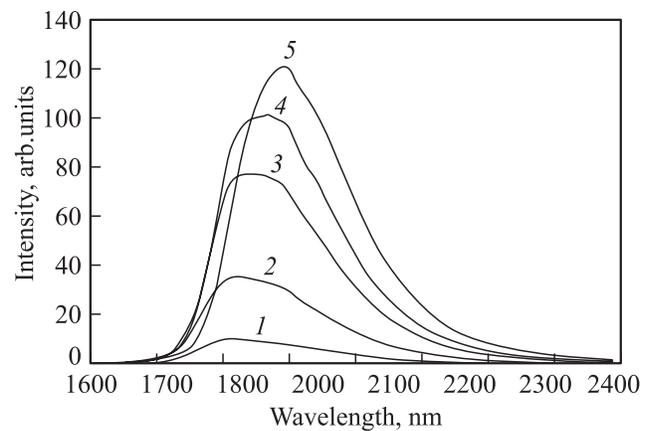
**Рис. 2.** Спектры излучения при токе 150 мА для светодиодов трех конструкций: в виде параллелепипеда стандартной конструкции, припаянного к держателю подложечной частью (1) и припаянного к держателю эпитаксиальной частью (2), и с конусно-пирамидальной глубоко травленной подложечной частью (3).



**Рис. 3.** Спектры излучения светодиода в виде параллелепипеда, припаянного подложечной частью к держателю при разных токах, мА: 1 — 50, 2 — 100, 3 — 200, 4 — 300.



**Рис. 4.** Спектры излучения светодиода в виде параллелепипеда, припаянного эпитаксиальной частью к держателю при различных токах, мА: 1 — 50, 2 — 100, 3 — 200, 4 — 300, 5 — 500, 6 — 800.



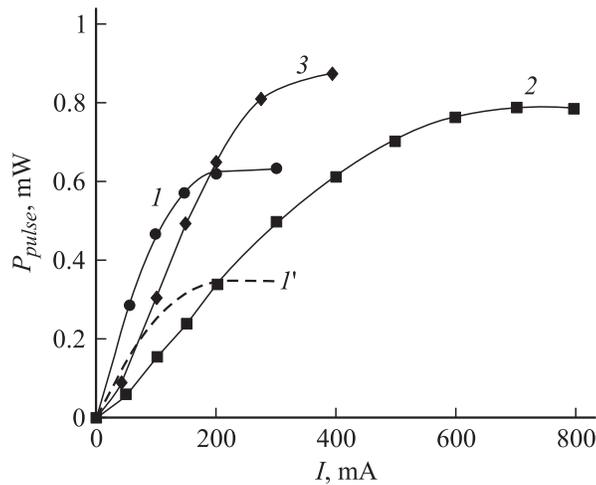
**Рис. 5.** Спектры излучения светодиода с конусно-пирамидальной глубоко травленной подложечной частью при различных токах, мА: 1 — 40, 2 — 100, 3 — 200, 4 — 275, 5 — 395.

волны в максимуме 1.87 мкм (0.66 эВ) и полуширину 0.06 эВ (рис. 2, кривая 2).

Глубоко травленный кристалл пирамидальной формы излучает одну широкую полосу с почти плоской вершиной на длине волны 1.83 мкм (0.68 эВ) полушириной 0.08 эВ (рис. 2, кривая 3).

В светодиодах с припаянной к кристаллодержателю подложечной частью (рис. 3) наблюдается сдвиг коротковолновой полосы в направлении длинных волн во всем интервале токов от 50 до 300 мА. Длинноволновая полоса дублета начинает смещаться только при больших токах — более чем 200 мА. В светодиодах с припаянным к кристаллодержателю контактным эпитаксиальным слоем (рис. 4 и 5) форма спектров излучения не зависит от тока в интервале его значений от 50 до 250 мА. При дальнейшем увеличении тока спектры смещаются в длинноволновую сторону.

Зависимость интенсивности излучения от тока сублинейная при токах более 100 мА (рис. 6). В светодиодах, в которых светодиодный кристалл монтировался кон-



**Рис. 6.** Зависимости импульсной мощности излучения от тока при частоте следования импульсов 512 Гц и скважности 2 для трех упомянутых на рис. 2 конструкций (1–3) и для длинноволновой полосы светодиода первой из упомянутых конструкций (1').

тактным эпитаксиальным слоем к кристаллодержателю, наблюдается сверхлинейная зависимость интенсивности излучения от тока при токах ниже 50 мА (рис. 6, кривые 2 и 3). В случае, когда кристалл припаивается эпитаксиальной частью к кристаллодержателю, сверхлинейный участок характеристики не заметен (рис. 6, кривая 1). Такие светодиоды обладают большей излучательной эффективностью при токах ниже 200 мА, чем светодиоды, смонтированные эпитаксиальной частью к кристаллодержателю. Однако при токах 200–250 мА интенсивность излучения первых перестает увеличиваться с током, и они начинают проигрывать светодиодам с глубоким травлением подложечной части и расположением излучающей области вблизи кристаллодержателя. По интенсивности длинноволновой полосы они проигрывают и при малых токах.

**Таблица 1.**

№	$P$ , мВт	$\lambda$ , мкм	$h\nu$ , эВ	$\eta_{\text{ext}}$ , %
1	0.62	1.85	0.67	0.31
2	0.49	1.87	0.663	0.24
3	0.83	1.86	0.667	0.42

Численная величина внешнего квантового выхода излучения светодиодов  $\eta_{\text{ext}}$ , для которых зависимость мощности излучения от тока изображена на рис. 6, представлена в табл. 1 при токе 300 мА. Здесь же представлены средние значения длины волны излучения  $\lambda$  и энергии фотонов  $h\nu$ , использованные при вычислении внешнего квантового выхода излучения. Из таблицы видно, что светодиод с глубоко травленной подложечной частью (3) имеет наибольший внешний квантовый выход излучения по сравнению со светодиодами в виде параллелепипедов.

Таким образом, глубокое травление подложечной части пластины с приданием светодиодному кристаллику пирамидально-конусной формы и монтаж его эпитаксиальной стороной к кристаллодержателю обеспечивает лучший вывод излучения длинноволновой полосы, особенно при больших токах, чем стандартная конструкция.

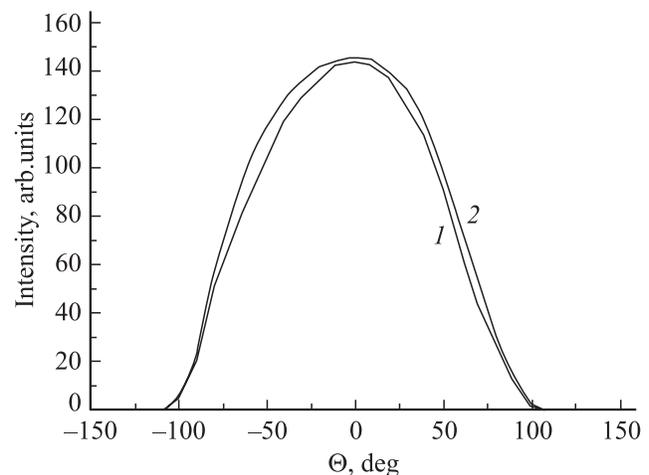
#### 4. Диаграмма направленности

Для каждой формы светодиодного кристалла характерно свое распределение излучения в дальней зоне (рис. 7–9).

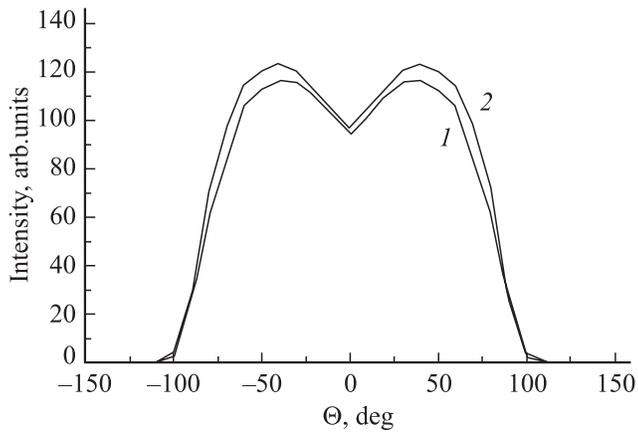
В случае (рис. 7), когда кристалл имеет форму параллелепипеда и припаян подложечной частью к кристаллодержателю, интенсивность излучения максимальна в направлении, перпендикулярном эпитаксиальному слою, и плавно падает при увеличении угла отклонения от этого направления. В плоскости, параллельной боковым граням, интенсивность излучения при средних углах упомянутого отклонения оказывается меньше, чем в плоскости, содержащей диагональ эпитаксиального слоя. Разность интенсивностей максимальна при углах  $+70^\circ$  и  $-70^\circ$ .

В случае (рис. 8), когда такой же кристалл припаян к кристаллодержателю контактными эпитаксиальными слоями, интенсивность излучения имеет максимумы при углах отклонения  $+40^\circ$  и  $-40^\circ$ . Между ними расположен резкий минимум. В плоскости, параллельной боковым граням, интенсивность излучения так же меньше, чем в плоскости, содержащей диагональ эпитаксиального слоя, при средних углах отклонения.

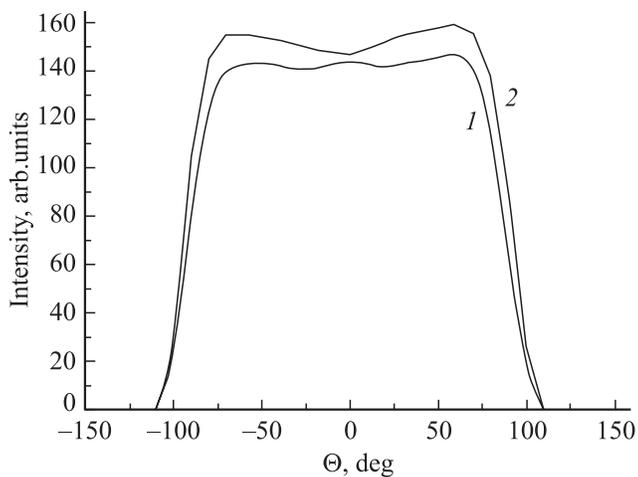
Для кристаллов с глубоко травленной подложечной частью, припаянных контактными эпитаксиальными слоями



**Рис. 7.** Диаграммы направленности светодиода в виде параллелепипеда, припаянного подложечной частью к держателю при токе 50 мА в двух плоскостях, перпендикулярных плоскости  $p$ – $n$ -перехода, одна из которых параллельна боковым граням светодиодного кристаллика (1), вторая содержит диагональ плоскости  $p$ – $n$ -перехода (2).



**Рис. 8.** Диаграммы направленности светодиода в виде параллелепипеда, припаянного эпитаксиальной частью к держателю, измеренные в таких же условиях, как на рис. 7.



**Рис. 9.** Диаграммы направленности светодиода с конусно-пирамидальной глубоко травленной подложечной частью, измеренные в таких же условиях, как на рис. 7.

к кристаллодержателю, характерна слабая зависимость интенсивности излучения от угла (рис. 9). Эта слабая зависимость состоит в том, что с увеличением угла от 0 до 70–80° интенсивность излучения сначала увеличивается на 10–15%, а затем резко падает до 0 при угле 110°, т.е. в интервале углов от –80 до +80° наблюдается практически плато. Можно сказать, что излучение оказывается ненаправленным.

В плоскости сканирования, параллельной боковым граням, интенсивность излучения при средних углах отклонения меньше на 10–15%, чем в плоскости, содержащей диагональ эпитаксиального слоя.

## 5. Обсуждение эксперимента

В наименьшей степени спектры излучения искажаются в кристалликах, смонтированных подложечной частью к кристаллодержателю, т.е. эпитаксиальной из-

лучающей частью наружу. Это объясняется тем, что в них имеется короткий оптический путь для вывода излучения через широкозонный эпитаксиальный слой. Обращает на себя внимание то, что разности между шириной запрещенной зоны и энергиями максимумов соответственно коротковолновой и длинноволновой полос равны энергии ионизации однозарядного акцептора (0,02 эВ) и ее приблизительно учетверенной величине. Это позволяет предположить участие двухзарядных акцепторов в генерации излучения. Двухзарядные акцепторы образуются при размещении Ga в узлах Sb кристаллической решетки, что характерно для GaSb, отличающегося значительной нестехиометрией. Нет необходимости предполагать наличие других акцепторов, так как они специально не вводились, и эпитаксиальный слой очищался гадолинием.

Наличие фактически только длинноволновой полосы в случае припаявания светодиода к кристаллодержателю стороной с эпитаксиальными слоями говорит о сильном поглощении коротковолновой полосы в объеме кристаллика, т.е. в GaSb. Причем это поглощение в основном межзонное (на „хвостах“ разрешенных зон), так как длинноволновая полоса поглощается значительно слабее. В этом случае короткий оптический путь имеет только излучение, генерируемое вблизи боковых граней кристаллика, и доля его невелика.

В спектрах излучения глубоко травленных кристалликов заметно присутствие коротковолновой полосы. Если представить суммарный спектр состоящим из двух полос, то коротковолновая полоса оказывается только в 2 раза слабее длинноволновой. Это показывает, что глубокое травление укорачивает оптический путь излучения.

Зависимости излучения от тока показывают преимущество светодиода, в котором светодиодный кристаллик монтируется подложечной частью к кристаллодержателю (этим достигается близкое расположение области генерации к наружной поверхности), при малых токах — до 200 мА. Если же сравнение делать по длинноволновой слабо поглощаемой полосе, то это преимущество отсутствует. При больших рабочих токах (около 800 мА) бесспорно предпочтительнее расположение области генерации вблизи теплоотводящей поверхности кристаллодержателя. В светодиодах с близким расположением генерирующего слоя к наружной поверхности с омическим контактом на ней обнаруживается еще одно нежелательное явление: сосредоточение излучения под контактом, приводящее к сильному уменьшению дифференциальной эффективности с током и большой плотности тока под контактом. По последней причине исчезает сверхлинейный участок характеристики ток–излучение при малых токах. Доля безызлучательной оже-рекомбинации также увеличивается из-за повышения концентрации неравновесных носителей заряда. Излучательная эффективность снижается.

Формула, связывающая рекомбинационный ток  $I_c$ , сосредоточенный под круглым контактом, имеющим

существенно меньшую площадь, чем излучающий слой, и ток  $I$  вне его, имеет вид

$$I = 2I_{\sigma}(1 + \sqrt{1 + I_c/I_{\sigma}}), \quad (1)$$

где  $I_{\sigma} = 2\pi\sigma b\beta kT/q$ ,  $\sigma$  — средняя проводимость  $p$ -области,  $b$  — ее толщина,  $kT$  — квант тепловой энергии,  $q$  — заряд электрона,  $\beta$  — показатель моно- ( $\beta = 1$ ) или бимолекулярности ( $\beta = 0.5$ ) рекомбинационного процесса. При  $\beta = 1$ ,  $kT/q = 0.0256$  В,  $b = 5$  мкм,  $\sigma = 200 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$  получаем  $I_{\sigma} = 16$  мА. Согласно формуле (1), при таких транспортных параметрах эпитаксиального слоя сосредоточение тока под контактом начинается при токе 100 мА, когда вне контакта оказывается 80% тока. При токе 250 мА только половина тока оказывается не под контактом. Это соответствует эксперименту. При малых токах  $I < 4I_{\sigma} = 64$  мА, когда растекание полное, формула (1) неприменима, и отношение тока под контактом и вне его равно отношению площади контакта к непокрытой им площади контактного слоя GaSb. В нашем случае это 3%.

Таким образом, явление сосредоточения излучения под омическим контактом делает нежелательным омический контакт малой площади к тонкой  $p$ -области.

Теперь рассмотрим отвод тепла.

Тепловое сопротивление кристаллика в форме параллелепипеда выражается формулой

$$R_T = \frac{H}{S\chi}, \quad (2)$$

где  $H$  — высота параллелепипеда,  $S$  — его площадь,  $\chi$  — теплопроводность. При  $H = 220$  мкм,  $S = 0.0025 \text{ см}^2$  и  $\chi = 0.336 \text{ Вт/см} \cdot \text{К}$  получаем  $R_T = 26 \text{ К/Вт}$ . Такое тепловое сопротивление получается при равномерном выделении тепла в излучающем слое и монтировании кристаллика подложечной частью к кристаллодержателю. Сосредоточение рекомбинации под контактом увеличивает тепловое сопротивление в несколько раз.

Тепло выделяется в излучающем слое в основном за счет безызлучательной рекомбинации, и поэтому при ее преобладании тепловое сопротивление следует вычислять по формуле (2). При высоком внутреннем квантовом выходе излучения тепло выделяется в основном при поглощении излучения в объеме полупроводника. При равномерном поглощении излучения тепловое сопротивление будет в 2 раза меньше, чем дает формула (2), независимо от расположения излучающего слоя. Это дает простор для выбора формы светодиодного кристаллика.

Тепловое сопротивление используемого кристаллодержателя (ТО-18, позолоченного, толщина слоя Au  $\sim 0.2$  мкм) сосредоточено в основном в никелевом столике толщиной  $\delta = 0.02$  см и диаметром  $D = 0.4$  см и может быть выражено приближительной формулой:

$$R_H = \frac{1}{2\pi\chi\delta} \ln \frac{\pi D}{L}, \quad (3)$$

где  $L$  — периметр кристаллика,  $\chi$  — теплопроводность никеля. При  $L = 0.2$  см и  $\chi = 0.59 \text{ Вт/см} \cdot \text{К}$  получаем

$R_H = 25 \text{ К/Вт}$ , т.е. приблизительно такую же величину, какую дает формула (2) для полупроводникового кристаллика. Тепловое сопротивление тонкого золотого покрытия кристаллодержателя (0.2 мкм) можно не учитывать. Приведенная оценка показывает значительную роль теплового сопротивления кристаллодержателя в сдвиге длинноволновой полосы с ростом тока в светодиодных кристалликах и пирамидально-конусной, и стандартной формы при больших токах ( $> 200$  мА). Длинноволновый сдвиг коротковолновой полосы, происходящий и при малых токах, объясняется сосредоточением излучения под контактом, сопровождающимся соответствующим увеличением оптического пути излучения.

Перейдем к анализу диаграмм направленности излучения.

В случае стандартной конструкции светодиода в форме параллелепипеда, припаянного подложечной частью к кристаллодержателю, форма диаграммы направленности излучения оказывается близка к косинусной из-за преимущественного выхода излучения через поверхность эпитаксиальной части ( $\sim 75\%$ ). Преимущественный выход излучения через боковые грани ( $\sim 67\%$ ) виден в диаграммах направленности при припайвании параллелепипеда к кристаллодержателю эпитаксиальной частью. Интенсивность излучения в центре диаграммы определяется только выходом его через лицевую грань, параллельную столику кристаллодержателя. При углах, отличных от нуля, к излучению через эту грань добавляется излучение через боковые грани. При сканировании в плоскостях, параллельных боковым граням, в суммировании участвует одна боковая грань, а при сканировании по диагонали — две грани. Поэтому в диагональном направлении интенсивность излучения больше. Анализ формы диаграмм направленности показывает, что распределение излучения через каждую грань является косинусным.

В случае глубокого травления, придающего кристаллику форму пирамиды со сглаженными гранями, расположенной на пьедестале в виде параллелепипеда, направленность излучения почти отсутствует, как при шарообразной форме кристаллика. Это можно объяснить увеличением количества светопропускающих граней с 5 до 9 и тем, что 4 из них наклонены под углом около  $45^\circ$  к излучающей области. Наклонные грани достаточно выпуклые, что способствует увеличению вывода излучения через них и уменьшению направленности, а также и многопроходности.

Кроме того, глубокое травление укорачивает оптический путь излучения и тем самым способствует уменьшению поглощения, что проявляется в наличии коротковолновой полосы в выходящем излучении.

Таким образом, химическая огранка светодиодного кристаллика приблизила диаграмму направленности излучения к соответствующей шарообразной форме кристаллика, что увеличивает выход излучения наружу.

Теперь оценим внутренний квантовый выход излучения  $\eta_{\text{int}}$  при электронных переходах между зоной проводимости и уровнями природных двухзарядных акцепторов в GaSb. Сначала по полученной из эксперимента

Таблица 2.

№	$dP/dI$ , мВт/А	$h\nu$ , эВ	$\eta_{\text{ext}}$ , %	$\eta_F$ , %	$\eta_{\text{int}}$ , %	$\eta_{\text{exit}}$ , %
1	5.2	0.67	0.78	0.6	58	1.34
2	1.85	0.663	0.28		58	0.48
3	3.92	0.667	0.59		58	1.02

производной от мощности излучения по току  $dP/dI$  и средней энергии фотона  $h\nu$  определим дифференциальный внешний квантовый выход в светодиодах различных конструкций  $\eta_{\text{ext}}$  (табл. 2). Ток выбран достаточно малым (50 мА), чтобы сосредоточение его под контактом в светодиоде было несущественным (3%) и достаточно большим, чтобы неинтересующие нас глубокие уровни были насыщены. Воспользуемся тем, что из светодиодов с лицевым расположением эпитаксиальной части излучение выходит в основном через тонкие непоглощающие эпитаксиальные слои. Вычислим внешний квантовый выход излучения только через лицевую грань  $\eta_F$ , используя отношение интенсивностей излучения в направлениях, перпендикулярных боковой и лицевой граням  $f$ , и зеркальность отражения от кристаллодержателя:

$$\eta_F = \frac{\eta_{\text{ext}}}{1 + 2f}. \quad (4)$$

При полученном из эксперимента  $f = 0.15$  вычисляем  $\eta_F = 0.47\%$  (табл. 2). По величине  $\eta_F$  и теоретической доле излучения, выходящего через одну грань  $\eta_{\text{th}}$ , которая для GaSb равна 1.07%, с учетом того, что часть тока  $\gamma$  сосредоточена под контактом, определим  $\eta_{\text{int}}$ :

$$\eta_{\text{int}} = \frac{\eta_F}{(1 - \gamma)\eta_{\text{th}}}. \quad (5)$$

Полученное  $\eta_{\text{int}} = 58\%$  является вполне достаточным для использования электролюминесценции с участием двухзарядных акцепторов в светодиодах. Теперь можно каждую конструкцию характеризовать коэффициентом выхода излучения наружу  $\eta_{\text{exit}} = \eta_{\text{ext}}/\eta_{\text{int}}$ . При малом токе (50 мА) наибольший коэффициент выхода излучения 1.34% имеет светодиод с кристалликом в форме параллелепипеда, припаянным подложечной частью к кристаллодержателю (табл. 2). Светодиод с кристалликом такой же формы, припаянным к кристаллодержателю противоположной стороной, уступает ему в 3 раза из-за увеличения оптического пути излучения к лицевой стороне. Светодиод с глубоко травленной подложечной частью уступает высокоэффективному светодиоду всего в 1.3 раза. Однако при больших токах ( $I > 200$  мА) он имеет самый высокий внешний квантовый выход излучения за счет лучшего теплоотвода, отсутствия сосредоточения тока под контактом и дополнительного выхода излучения через 4 новые наклонные грани.

## 6. Заключение

Многоэтапная фотолитография с электрохимическим травлением позволяет существенно изменять форму светодиодного кристаллика, влияя на спектр излучения, его направленность и коэффициент выхода из кристалла. Оно позволило создавать совершенную стандартную форму кристаллика в виде параллелепипеда и монтировать кристаллик к кристаллодержателю либо подложкой, либо эпитаксиальной частью. В первом случае обеспечивается неискаженный выход излучения через лицевую грань при токах до 200 мА, при которых несущественно сосредоточение тока под омическим контактом на лицевой стороне. При припайвании кристаллика эпитаксиальной частью к кристаллодержателю область рабочих токов расширяется до 800 мА благодаря улучшению теплоотвода, но коротковолновая часть излучения сильно ослабляется из-за увеличения расстояния от области генерации излучения до лицевой стороны кристаллика.

Глубокое травление подложечной части позволяет придать ей форму усеченной конусо-пирамидальной фигуры, размещенной на тонком пьедестале, содержащем эпитаксиальную часть. Монтирование такого кристаллика к кристаллодержателю эпитаксиальной частью обеспечивает большие рабочие токи и уменьшение поглощения коротковолновой части излучения. Эта конструкция имеет преимущество перед другими при токах  $> 200$  мА.

Авторы выражают благодарность за сборку светодиодов Е.В. Кузнецовой и С.С. Евдокимовой.

## Список литературы

- [1] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, Д.З. Гарбузов, Н.Ю. Давидюк, В.Р. Ларионов, Л.Т. Чучуа. Письма ЖТФ, **21** (23), 1066 (1976).
- [2] I. Schnitzer, E. Yablonovitch, C. Caneau, T.J. Gmitter, A. Scherer. Appl. Phys. Lett., **63** (16), 2174 (1993).
- [3] R. Windisch, P. Heremans, P. Kiessel, G.H. Doller, B. Dutta, G. Dorhs. Appl. Phys. Lett., **74** (16), 2256 (1999).
- [4] А.А. Андаспаева, А.Н. Баранов, А.А. Гусейнов, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, Е.А. Сидоренкова, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **15** (18), 71 (1989).
- [5] А.А. Андаспаева, А.Н. Баранов, А.А. Гусейнов, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, Ю.П. Яковлев. ФТП, **24** (10), 1708 (1990).
- [6] Т.Н. Данилова, Б.Е. Журтанов, А.П. Закгейм, Н.Д. Ильинская, А.Н. Именков, О.Н. Сараев, М.А. Сиповская, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **33** (2), 239 (1999).
- [7] Б. Журтанов, Э.В. Иванов, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, А.Е. Розов, Н. Стоянов, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **27** (5), 1 (2001).

Редактор Л.В. Беляков

## Properties of GaSb-based light-emitting diodes with chemically shaped substrate

*E.A. Grebenshchikova, A.N. Imenkov, B.E. Zhurtanov,  
T.N. Danilova, A.V. Tchernyaev, N.V. Vlasenko,  
Yu.P. Yakovlev*

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

**Abstract** Results of the investigation of light-emitting diodes for the mid-infrared spectral range ( $\lambda = 1.7-1.9 \mu\text{m}$ ) are reported. The substrate of GaSb-based light-emitting slices was chemically shaped up to conical pyramid. Slice faces increased in number from 6 to 10. Radiation spectra and far-field pattern studies showed that the slice that was chemically shaped elevated the external quantum yield and made the far-field pattern almost hemispherical.