

06:07

## **Увеличение мощности излучения светодиодов ( $\lambda = 1.7\text{--}2.4\ \mu\text{m}$ ) за счет изменения направления световых потоков в гетероструктуре GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb**

© А.В. Золотухин, В.В. Шерстнев, К.А. Савельева,  
Е.А. Гребенщикова, О.Ю. Серебренникова, Н.Д. Ильинская,  
С.И. Слобожанюк, Э.В. Иванов, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: vic2sherstnev@gmail.com

Поступило в Редакцию 3 августа 2012 г.

На примере светодиодной гетероструктуры  $n\text{-GaSb-}n\text{-GaInAsSb-}p\text{-GaAlAsSb}$  было показано, что при создании на тыльной стороне светодиодного чипа криволинейной отражающей поверхности в виде полусферических ямок травления наблюдается увеличение мощности излучения светодиодов в 1.9–2 раза во всем исследованном интервале длин волн 1.7–2.4  $\mu\text{m}$  по сравнению с конструкцией светодиодного чипа, содержащего сплошной поглощающий омический контакт. Такое повышение эффективности светодиода происходит за счет изменения направления световых потоков в кристалле при отражении их от полусферических ямок травления кристалла.

Полупроводниковые светодиоды в средней ИК-области спектра (1.7–2.4  $\mu\text{m}$ ) перспективны для экологического мониторинга окружающей среды и медицинской диагностики человека [1]. Основным материалом для создания светодиодов в спектральном диапазоне 1.7–2.4  $\mu\text{m}$  являются наногетероструктуры в системе GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb [2].

В литературе [3–6] обсуждаются различные способы текстурирования поверхности полупроводника (создание системы углублений с криволинейными поверхностями) для изменения угла отражения внутри кристалла в надежде, что излучение после нескольких отражений от криволинейной поверхности упадет на поверхность кристалла под углом, меньшим угла полного внутреннего отражения, и частично выйдет

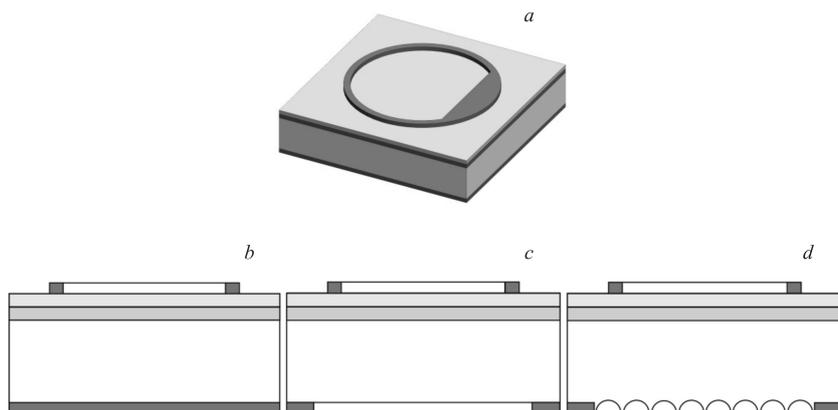
из кристалла. Таким способом удается увеличить долю выходящего излучения в светодиодах видимой и ближней ИК-области спектра до 30%. Для увеличения внешнего квантового выхода светодиодов в средней ИК-области спектра ( $2\text{--}5\ \mu\text{m}$ ) также используются различные способы текстурирования поверхности полупроводникового кристалла, хотя многопроходность света в узкозонных материалах не так эффективна, как в широкозонных, поскольку поглощение излучения на свободных носителях пропорционально длине волны во второй степени.

В работе [7] нами исследовались светодиоды на основе GaSb для спектрального диапазона  $1.8\text{--}2.4\ \mu\text{m}$  с кристаллом 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 увеличивает коэффициент вывода излучения в 1.5 раза. В работе [8] сообщалось о создании светодиодов с кристаллом в виде конуса с вогнутой боковой поверхностью, что позволяло также увеличить вывод излучения в 1.5 раза.

Данная работа является продолжением наших работ по созданию спонтанных источников в средней ИК-области спектра и направлена на повышение оптической мощности светодиодов за счет многократного переотражения фотонов от криволинейных поверхностей, созданных в кристалле, и изменения направления световых потоков в гетероструктуре GaInAsSb/GaAlAsSb.

На подложке  $n$ -GaSb ориентации (100), легированной теллуром до концентрации носителей  $1.2 \cdot 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$  методом жидкофазной эпитаксии последовательно были выращены активный слой  $n$ -GaInAsSb толщиной  $4\ \mu\text{m}$ , легированный теллуром до концентрации  $n \sim 1.4 \cdot 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ , и широкозонный эмиттерный слой  $p$ -GaAlAsSb толщиной  $3\ \mu\text{m}$ , легированный германием до концентрации  $p \sim (2\text{--}3) \cdot 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ .

Из одной гетероструктуры (серия AV-54) методом оптической литографии и жидкостного химического травления были созданы три варианта светодиодных чипов, схемы которых приведены на рис. 1. Со стороны выращенных эпитаксиальных слоев ( $p$ -GaAlAsSb) во всех трех случаях они имели форму квадрата со стороной  $950 \times 950\ \mu\text{m}$  (рис. 1, *a*). В центре этого квадрата был сформирован кольцевой трехслойный контакт состава Cr/Au:Ge/Au с внешним диаметром  $770\ \mu\text{m}$ , внутренним диаметром  $740\ \mu\text{m}$ .



**Рис. 1.** Схематическое изображение светодиодных чипов трех типов: *a* — вид с лицевой стороны светодиодного чипа с кольцевым омическим контактом. *b*, *c*, *d* — схемы поперечного сечения трех типов светодиодов, различающихся по форме омического контакта к подложке и по рельефу тыльных сторон чипа: *b* — сплошной омический контакт (первый тип); *c* — омический контакт расположен за пределами кольца диаметром  $880\ \mu\text{m}$  (второй тип); *d* — омический контакт расположен за пределами кольца, подложка внутри кольца заполнена вытравленными полусферами диаметром  $120\ \mu\text{m}$  и глубиной  $60\ \mu\text{m}$  (третий тип светодиодного чипа).

Три варианта светодиодных чипов отличались по рельефу поверхности тыльной стороны подложки и по площади ее металлизации. На рис. 1, *b*, *c*, *d* приведены схемы поперечного сечения светодиодных чипов.

Таким образом, часть излучения из активной области направлялась наружу через близлежащую поверхность чипа со стороны эпитаксиальных слоев, а другая часть — к тыльной стороне чипа через прозрачную для излучения подложку толщиной  $200\ \mu\text{m}$ . Рассмотрим ход лучей в каждом из трех вариантов конструкции чипов.

В первом варианте (рис. 1, *b*) плоская тыльная сторона подложки полностью закрыта омическим контактом, образующим после сплавления эвтектический сплав с полупроводником. Световой поток из активной области свободно проходит сквозь прозрачную для излучения подложку и достигает тыльной стороны чипа, где преимущественно по-

глощается на границе раздела подложка—омический контакт в области эвтектики.

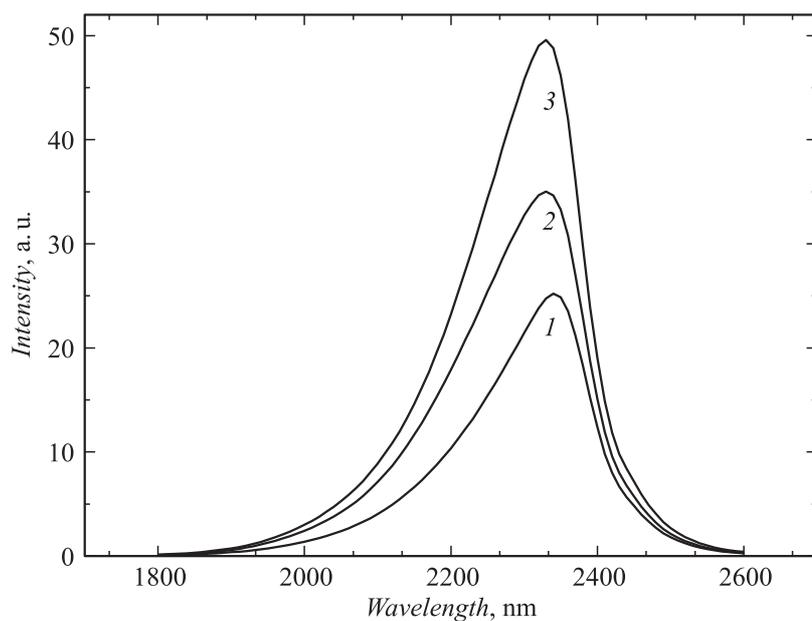
Во втором варианте плоская тыльная сторона подложки лишь частично закрыта омическим контактом (рис. 1, *c*), образующим после сплавления эвтектический сплав с полупроводником. Благодаря этому часть светового потока, прошедшая через подложку до ее тыльной стороны, отражается от неметаллизированной поверхности, что существенно увеличивает долю отразившегося излучения по сравнению с предыдущим случаем. Однако световые потоки не могут изменить угол падения и отражения от границ кристалла.

Светодиодный чип третьего типа представлен на рис. 1, *d*. Он отличается от двух предыдущих тем, что часть тыльной стороны подложки (диаметром  $880\ \mu\text{m}$ ), свободная от металлизации, была равномерно заполнена углублениями, выполненными в форме полусферы с радиусом  $60\ \mu\text{m}$  и расстоянием между ними  $10\ \mu\text{m}$ , образующими криволинейную поверхность. В этом случае часть излучения, генерируемого в кристалле, падает на поверхность подложки и многократно отражается от криволинейной поверхности, образованной ямками травления. В результате световые потоки изменяют свои направления в кристалле (за счет отражения от криволинейной поверхности) и в основном выводятся через лицевую поверхность чипа.

Светодиодные чипы монтировались подложечной стороной на корпус ТО-18. Все светодиоды имели классическую вольт-амперную характеристику, и изменение формы *n*-контакта не повлияло на них.

Спектральные характеристики исследовались с помощью автоматизированной установки на основе монохроматора ДК-480 (CVI Laser Corp.) с дифракционной решеткой  $300\ \text{g/mm}$ . Для регистрации оптического излучения на выходе монохроматора использовался фотovoltaический приемник InSb (Judson Technologies) с чувствительной площадью диаметром  $4\ \text{mm}$ , работавший при температуре жидкого азота. После предварительного усиления электрический сигнал с фотоприемника детектировался при помощи цифрового селективного усилителя SR-810 (Stanford Research Systems). Результирующий оцифрованный сигнал передавался в компьютер, который осуществлял управление процессом измерений.

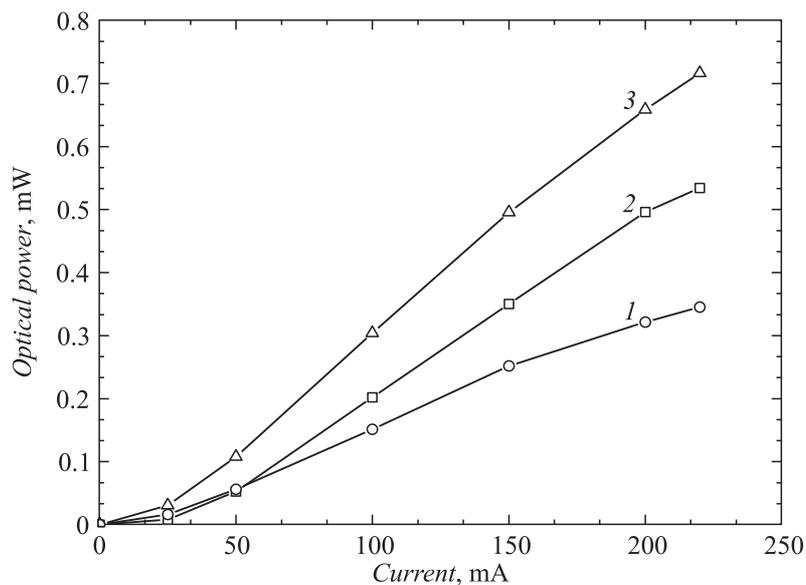
Электролюминесценция возбуждалась прямоугольными импульсами тока с коэффициентом заполнения 50% и частотой повторения 512 Hz. Амплитуда импульсов варьировалась от 20 до 220 mA. При этом



**Рис. 2.** Спектры электролюминесценции светодиодов трех типов, измеренные при комнатной температуре при токе 150 мА: 1 — первый тип; 2 — второй тип; 3 — третий тип светодиодного чипа.

отрицательный потенциал был приложен к подложке  $n$ -GaSb, а положительный — к накрывающему слою.

Проводились исследования спектров излучения и мощности излучения в зависимости от величины тока, протекающего через светодиодный чип. На рис. 2 представлены спектры излучения 3 типов светодиодных чипов, измеренных при одном и том же токе 150 мА. Характерно, что все измеренные спектры излучения подобны и отличаются друг от друга только интенсивностью излучения. Максимальное излучение наблюдалось для светодиодного чипа, содержащего ямки травления, а минимальное излучение — для чипа, содержащего сплошной омический контакт на тыльной стороне чипа. На рис. 3 представлены зависимости выходной оптической мощности в относительных единицах от тока для 3 типов светодиодных чипов. Наиболее крутая зависимость мощности



**Рис. 3.** Зависимость выходной мощности светодиодов трех типов, измеренные при комнатной температуре в интервале токов от 0 до 220 мА. Измерения проведены в квазипрерывном режиме при частоте повторения импульсов 512 Гц. 1 — первый тип; 2 — второй тип; 3 — третий тип светодиодного чипа.

излучения от тока наблюдалась для светодиодного чипа, содержащего ямки травления (тип 3), а наиболее пологая — для чипа, содержащего сплошной омический контакт (тип 1). Из рисунка видно, что при токе 200 мА наблюдается увеличение мощности излучения в 1.7 раза для типа 2 и в 2 раза для типа 3 по сравнению с чипом типа 1. Такое сильное увеличение мощности излучения для светодиодных чипов, содержащих сферические ямки травления на их тыльной стороне, по сравнению с чипами, которые не содержат криволинейных поверхностей, может быть связано с изменением направления световых потоков внутри светодиодного чипа за счет многократного переотражения фотонов от криволинейных поверхностей полусферических ямок травления.

Таким образом, нами предложен новый способ увеличения мощности излучения светодиодов для среднего ИК-диапазона. Проведены срав-

нительные исследования светодиодов с разными конструкциями чипов. Показано, что в случае использования криволинейной, многократно отражающей поверхности на тыльной стороне светодиодного чипа в виде полусферических углублений радиусом  $60 \mu\text{m}$ , наблюдается увеличение интенсивности внешнего излучения в 1.9 раза для всего исследуемого интервала длин волн ( $1.7\text{--}2.4 \mu\text{m}$ ). Из полученных результатов следует, что применение криволинейных светоотражающих поверхностей при создании светодиодных чипов является наиболее эффективным способом увеличения интенсивности излучения светодиодов для среднего ИК-диапазона.

Работа частично поддержана программой президента РАН № 24 „Фундаментальные основы технологий наноструктур и наноматериалов“, грантами РФФИ 10-02-93110-НЦНИЛ\_а, 10-20-00548-а, а также государственным контрактом № 11705.004.11.001.

## Список литературы

- [1] *Kriev A., Gao H.H., Sherstnev V.V., Yakovlev Y.P.* // *Electron. Lett.* 1999. V. 35. N 19. P. 1665–1667.
- [2] *Царенков Б.В., Водовозова Н.Д., Дохман С.А., Именков А.Н., Коган Л.М., Титова Л.А., Яковлев Ю.П.* // А.с. № 414950. Бюл. 12.10.1973.
- [3] *Schnitzer I., Yablonoitch E., Caneau C., Gmitter T.J., Scherer A.* // *Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 63. N 16. P. 2174–2176.
- [4] *Windisch R., Heremans P., Kiessel P., Doller G.H., Dutta B., Dorhs G.* // *Appl. Phys. Lett.* 1999. V. 74. N 16. P. 2256–2258.
- [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] *Андаспаева А.А., Баранов А.Н., Гусейнов А.А., Именков А.Н., Колчанова Н.М., Яковлев Ю.П.* // ФТП. 2003. Т. 24. В. 10. С. 1708–1721.
- [7] *Гребеницкова Е.А., Именков А.Н., Журтанов Б.Е., Данилова Т.Н., Черняев А.В., Власенко Н.В., Яковлев Ю.П.* // ФТП. 2003. Т. 37. В. 12. С. 1465–1472.
- [8] *Гребеницкова Е.А., Головин А.С., Именков А.Н., Кижжаев С.С., Яковлев Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 3. С. 104–110.