

- [4] Чумакова С.П., Тихомирова Н.А., Гинзберг А.В., Лисецкая Е.К., Комарь В.К. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 22. С. 1379-1384.
- [5] Алиев Ф.М. // Кристаллография. 1988. Т. 33. В. 4. С. 969-975.

Институт кристаллографии
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
8 июня 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 18
Об.3

26 сентября 1989 г.

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ СВЕТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ
 $GaInAsSb$ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА
1.8-2.4 МКМ ($T=300$ К)

А. Андаспаева, А.Н. Баранов,
А.А. Гусейнов, А.Н. Именков,
Н.М. Колчанова, Е.А. Сидоренкова,
Ю.П. Яковлев

1. Спектральный диапазон длин волн 1.8-2.4 мкм перспективен для волоконно-оптических линий связи третьего поколения, а также для целей влагометрии и газового анализа. Среди соединений $A^{3V}B^{5}$ наибольший интерес для создания источников света в этом диапазоне представляют твердые растворы $GaInAsSb$, изопериодные к подложке $GaSb$. Эти твердые растворы были успешно использованы как для создания лазеров [1-3], так и pin [4] и лавинных [5] фотодиодов, работающих при комнатной температуре.

В работе [6] нами было доложено о создании высокоэффективных светодиодов на основе $GaInAsSb/GaAlSbAs$, излучающих на длине волны $\lambda=2.2$ мкм с внешним квантовым выходом $\eta=4\%$ и быстродействием $\sim 10^{-8}$ с ($T=300$).

В данной работе впервые рассматриваются электролюминесцентные свойства высокоэффективных светодиодов в широком спектральном диапазоне 1.8-2.4 мкм (300 К).

2. Исследованные в настоящей работе светодиоды имели полупроводниковую структуру (рис. 1, а, б), состоящую из изопериодного узкозонного слоя $p-GaInAsSb$, расположенного между подложкой $p-GaSb$ [100], легированного теллуром до концентрации носителей заряда $(5-9) \cdot 10^{17}$ см⁻³ и широкозонным эмиттером $p-GaAlSbAs$ ($E_g=1.27$ эВ), легированным германием до концентрации акцепторов $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³.

Состав твердого раствора $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ в узкозонном активном слое структуры варьировался в интервале значений $(0.05 \leq x \leq 0.24; 0.04 \leq y \leq 0.22)$, а его толщина - в интервале 0.4-6 мкм. При этом величина рассогласования параметра решетки

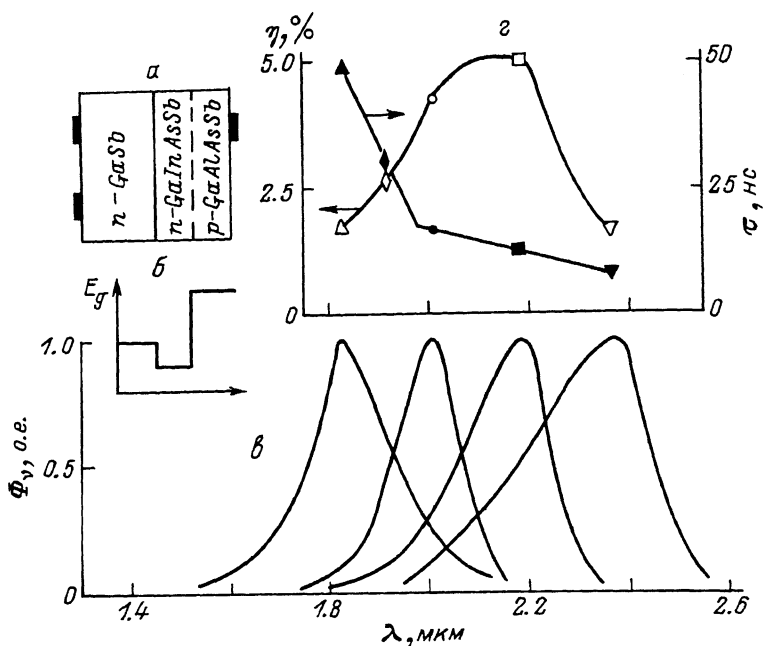


Рис. 1. Структура светодиода и его основные параметры. а - структура светодиода, б - зависимость ширины запрещенной зоны E_g от координаты в структуре, в - спектры 4-х светодиодов, г - зависимость внешнего квантового выхода излучения η и постоянной времени спада излучения τ от длины волны λ .

подложки и слоя $\delta a/a$ не превышала значения $(1-3) \cdot 10^{-3}$. Активный слой структуры легировался теллуrom, и концентрация носителей заряда в слое варьировалась в широком интервале значений от $1 \cdot 10^{16}$ до $2 \cdot 10^{18}$ см^{-3} . Из таких структур изготавливались меза-светодиоды (диаметров 300 мкм) с сеточным омическим контактом к $n\text{-GaSb}(Au + 3\text{Te})$, и точечным (диаметром 40 мкм) омическим контактом к $p\text{-GaAlAsSb}(Au + 5\% Cu)$.

Исследовались спектры излучения, характеристики ток-напряжение ($I-U$), интенсивность излучения - ток ($\Phi-I$), а также внешний квантовый выход излучения и быстродействие светодиодов в зависимости от длины волны излучения, толщины и концентрации носителей заряда в активной области. Приемником служил фотодиод, изготовленный на основе $GaInAsSb$ [4].

3. Рассмотрим электролюминесцентные свойства светодиодов с различным составом твердого раствора $GaInAsSb$ в активной области.

Спектры излучения светодиодов при комнатной температуре (рис. 1, в) содержат одну полосу, длина волны излучения которого в максимуме практически линейно зависит от состава твердого

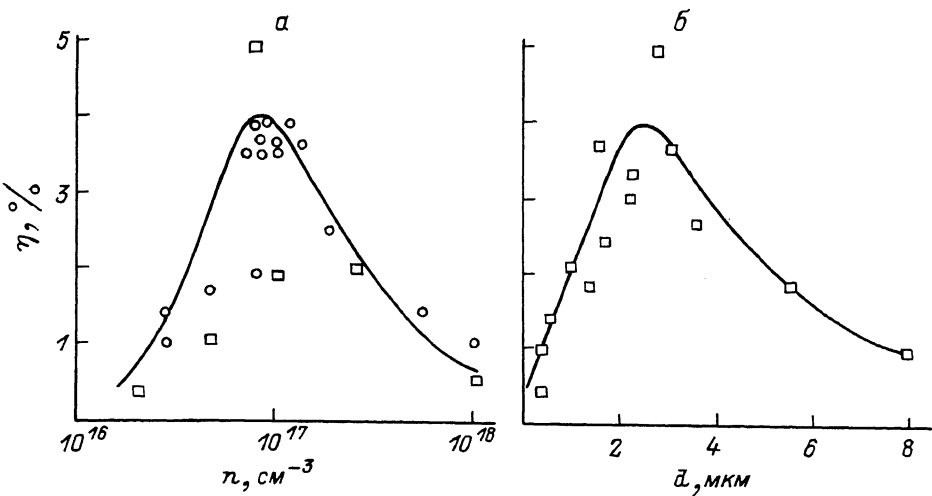


Рис. 2. Зависимость внешнего квантового выхода излучения от концентрации электронов n в активном слое (а) и толщины слоя d (б). $T=295$ К. а - $\lambda = 2$ мкм, б) - $\lambda = 2.2$ мкм.

раствора в активной области. Характерно, что длина волны излучения в максимуме практически не зависит от уровня легирования активной области, но зависит от толщины активной области. В светодиодах с длиной волны в максимуме спектра излучения $\lambda > 2,0$ мкм энергия максимума полосы излучения сдвигается в длинноволновую область на 20–30 мэВ при изменении толщины области от 5 до 0.4 мкм.

Внешний квантовый выход излучения светодиодов измерялся с помощью калиброванного фотодиода и зависел как от состава твердого раствора, так и от толщины активного слоя и концентрации носителей заряда в нем. Результаты исследования параметров светодиодов сведены в таблицу.

Характерно, что зависимость внешнего квантового выхода излучения η от концентрации носителей заряда в активной области n для всех длин волн имела колоколообразную форму с максимумом вблизи $n = 1 \cdot 10^{17}$ см⁻³ (рис. 2, а). Этот результат в последующем был использован для создания высокоэффективных структур во всем интервале длин волн.

Несколько неожиданной оказалась зависимость внешнего квантового выхода от толщины активного слоя d : она также имела вид кривой с максимумом. Максимальная эффективность наблюдалась при $d = 2-3$ мкм, которая особенно резко уменьшалась (почти на порядок) при уменьшении толщины до 0.7–0.4 мкм (рис. 2, б). Для изучения эффективности излучения и быстродействия диодов от длины волны были изготовлены структуры с различным составом твердого раствора в активной области, но с одинаковым уровнем легирования $\sim 10^{17}$ см⁻³, и одинаковой толщиной (2–3 мкм).

№ струк-туры	Длина волны λ , мкм	Энергия максимума излучения $h\nu_m$, эВ	Полуширина полосы излучения $\Delta h\nu$, эВ	Квантовый выход, η %	Время жизни τ , нс	Концентрация в активной области n , см ⁻³
302	1.818	0,6819	0,077	1.7	50	$0.7 \cdot 10^{17}$
362 (1)	2.009	0,6172	0,047	4.3	20	$1.7 \cdot 10^{17}$
56	2.182	0,5682	0,060	5.0	13	$0.9 \cdot 10^{17}$
167	2.371	0,5230	0,064	1.7	8	$0.6 \cdot 10^{17}$

Внешний квантовый выход светодиодов имел максимальное значение ($\eta = 4$ %) в интервале длин волн 2.0–2.2 мкм и затем плавно уменьшался до $\eta = 1$ % как для более коротковолнового ($\lambda = 1.8$), так и более длинноволнового излучения ($\lambda = 2.4$ мкм) (рис. 1, в). Измерения проводились в интервале токов $I = 30$ –300 мА, в котором η максимален и зависимость интенсивности излучения Φ от тока линейна.

Переходные электролюминесцентные характеристики при прямоугольном импульсе прямого тока ($I = 200$ мА) зависят от состава твердого раствора в активной области (см. таблицу). Время жизни неосновных носителей заряда, определенное по постоянной времени спада излучения при выключении тока, а также по величине экстрагируемого заряда при переключении прямого тока на обратный, было максимально для $\lambda = 1.8$ мкм и составляло ~ 50 нс, и плавно уменьшалось на порядок (до (3–5) нс) для $\lambda = 2.4$ мкм (рис. 1, г).

4. Проанализируем кратко основные полученные результаты.

Достижение высокой эффективности излучения в широком спектральном диапазоне обусловлено рядом причин, и прежде всего выбором в качестве активного слоя p - $GaInAsSb$, в котором можно было ожидать существенное уменьшение доли безызлучательной рекомбинации за счет более низкой скорости ударной рекомбинации, чем в p -области $GaInAsSb$, а также за счет выбора оптимального уровня легирования и толщины активной области.

Наблюдаемое резкое возрастание внешнего квантового выхода (от 1 до 4 %) при изменении длины волны от 1.76 до 2.0 мкм, вероятно, связано с увеличением эффективной излучательной рекомбинации с возрастанием энергетического зазора между Γ и L долинами в твердом растворе с увеличением содержания In , и как следствие, с увеличением концентрации носителей в прямой Γ -долине. А вот дальнейшее уменьшение эффективности излучательной рекомбинации с увеличением длины волны в интервале 2.2–2.4 мкм трудно объяснимо, и вероятно, имеет комплексный характер. К одной из причин уменьшения эффективности излучения можно отнести, например, увеличение степени разупорядочности твердого раствора при приближении его к области несмешиваемости.

Другой причиной может быть влияние интерфейсной рекомбинации носителей на границе п-п-гетероперехода. С увеличением длины волны излучения возрастают величины разрывов в зоне проводимости и валентной зоне ΔE_c и ΔE_v , и как следствие – глубина потенциальных ям на п-п-гетерогранице. В этом случае при наличии на ней несовершенств возможно уменьшение эффективности излучательной рекомбинации, что подтверждается экспериментальными данными по уменьшению внешнего квантового выхода излучения и увеличений разброса его значений при уменьшении толщины активной области и приближении р-п перехода к п-п-гетерогранице.

В заключение выражаем благодарность А.А. Рогачеву за поддержку работы, а М.Ф. Алотало, Е.А. Гребеншиковой и С.С. Архиповой за изготовление приборов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Бочкарев Э.А., Долгинов Л.М., Дракин А.Н., Дружинина Л.В., Елисейев П.Г., Свердлов Б.Н., Скрипкин В.А. // Квантовая электроника. 1986. Т. 13. В. 10. С. 2119-2120.
- [2] Datt V.V., Temkin H., Kolb E.D., Sunder W.A. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 45, N 2. P. 111-113.
- [3] Баранов А.Н., Джуртанов Б.Е., Именков А.Н., Рогачев А.А., Шерняков Ю.М., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 11. С. 664-667.
- [4] Андреев И.А., Афраилов М.А., Баранов А.Н., Данильченко В.Г., Мирсагатов М.А., Михайлова М.П., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 21. С. 1311-1315.
- [5] Андреев И.А., Афраилов М.А., Баранов А.Н., Мирсагатов М.А., Михайлова М.П., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 11. С. 986-991.
- [6] Андаспаева А., Баранов А.Н., Гусейнова А., Именков А.Н., Литвак Л.М., Филаретова Г.М., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 9. С. 845-849.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
18 июля 1989 г.