

- [4] Альтшулер Е.Л., Трунов Н.Н. - Измерительная техника, 1986, № 9, с. 4-6.
- [5] Rendell R.W., Girvin S.H. - Phys. Rev., VB29, N 10, p. 61119-61122.
- [6] MacDonald A.H., Rice T.T., Brinkman W.F. - Phys. Rev., VS 28, N 6, p. 3648-3650.

Поступило в Редакцию
26 ноября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 9.

12 мая 1988 г.

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ СВЕТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ
 $GaInAsSb$ ($\lambda = 2.2$ мкм, $\eta = 4\%$, $T = 300$ К)

А. Андаспаева, А.Н. Баранов,
А. Гусейнов, А.Н. Именков,
Л.М. Литвак, Г.М. Филаретова,
Ю.П. Яковлев

1. Спектральный диапазон длин волн 2-2.5 мкм перспективен для волоконно-оптических линий связи третьего поколения, а также для целей влагометрии и газового анализа. Среди соединений A^3B^5 наибольший интерес для создания высокоэффективных светодиодов в указанном спектральном диапазоне представляют многокомпонентные твердые растворы $GaInAsSb$, изопериодные к подложке $GaSb$. Эти твердые растворы были успешно использованы как для создания лазеров [1-3], так и фотоприемников [4], работающих при комнатной температуре.

Первая работа по светодиодам на основе $GaInAsSb$ была выполнена авторами [5]. В качестве активной излучающей области использовался p - $GaInAsSb$, а в качестве широкозонного эмиттера - n - $GaSb$. В таких светодиодах был достигнут максимальный квантовый выход $\eta = 1-1.5\%$ и получено быстроедействие $\sim 10^{-7}$ с.

В данной работе рассматриваются электролюминесцентные свойства светодиодов в указанном спектральном диапазоне с существенно большими квантовым выходом и быстроедействием.

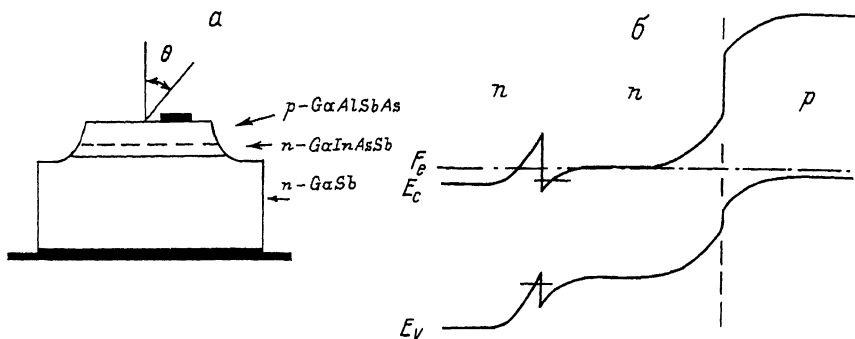


Рис. 1. Светодиодная структура на основе $GaInAsSb$.

а - схема мезодиода, б - энергетическая диаграмма структуры.

2. Светодиоды представляли собой структуру (рис. 1,а), состоящую из активного слоя $n-GaInAsSb$ ($E_g \approx 0.58$ эВ) толщиной 2–3 мкм, выращенного на подложке $n-GaSb$ (Ш)В, легированной теллуром до концентрации носителей $(7-9) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, и широкозонного эмиттера $p-GaAlAsSb$ ($E_g = 1.2$ эВ), легированного германием до концентрации $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Исследовались структуры с различным уровнем легирования активной области теллуром в интервале концентраций $(5-7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Из такой структуры были изготовлены мезасветодиоды (диаметром 300 мкм) со сплошным напыленным омическим контактом к $n-GaSb$ ($Au + 5\% Te$) и точечным (диаметром 50 мкм) напыленным омическим контактом ($Au + 5\% Ge$) к $p-GaAlAsSb$.

Исследовались спектры излучения и его угловое распределение, характеристики ток-напряжение ($I-U$), интенсивность излучения - ток ($\Phi - I$), а также быстродействие светодиодов.

Приемником излучения служил фотодиод, изготовленный нами на основе $GaInAsSb$ [4].

3. Электролюминесцентные и электрические свойства $p-p-GaAlAsSb/GaInAsSb$ светодиодов при комнатной температуре следующие.

Спектр излучения содержит только одну полосу полушириной $\delta = 0.06-0.07$ эВ (рис. 2,а), энергия максимума которой практически не зависит от уровня легирования активной области.

Внешний квантовый выход излучения измерялся с помощью калиброванного фотодиода как для случая вывода излучения через одну грань η_1 , так и для случая вывода излучения через все поверхности светодиода η_e . Квантовый выход излучения через одну грань находился в интервале значений 1.3–3.5%, а общий квантовый выход излучения - в пределах 3–4.5% при токе 30 мА и практически не зависел от уровня легирования активной области. Результаты исследования параметров светодиодов сведены в таблицу.

Интенсивность излучения Φ при малых токах $I < I_T = 4-8$ мА увеличивалась сверхлинейно с ростом тока $\Phi \sim I^n$, где $n = 4-5$, а I_T - пороговый ток резкого возрастания квантового выхода

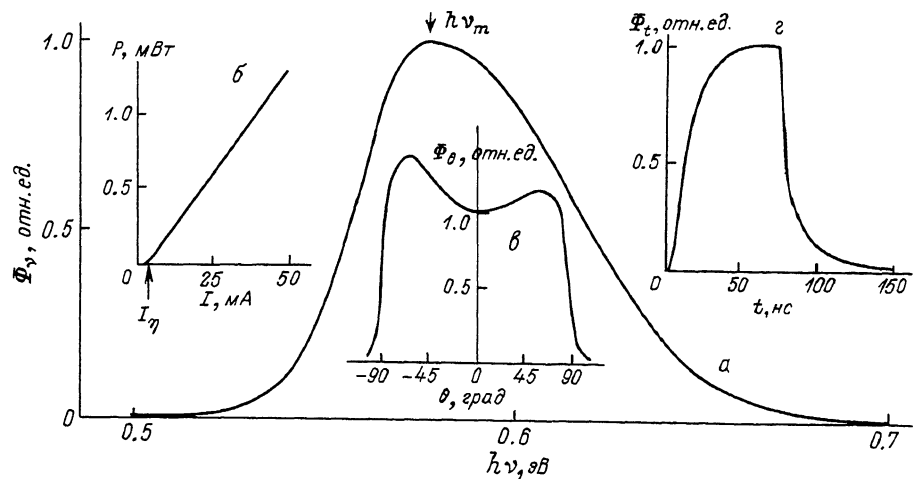


Рис. 2. Электролюминесцентные характеристики светодиодов при комнатной температуре. а - спектр излучения, б - зависимость мощности излучения P от тока I , в - диаграмма направленности излучения, г - зависимость интенсивности излучения Φ от времени t при питании структуры прямоугольными импульсами тока $I = 50$ мА, длительностью 70 нс.

излучения (рис. 2,б). При больших токах $I > I_\eta$ в интервале токов 10-100 мА $\eta = 1.1-1.3$.

В угловом распределении излучения нет ярко выраженной направленности (рис. 2,в). Тем не менее следует отметить, что интенсивность излучения в направлении перпендикулярном к плоскости р-п-перехода, на 20-30% меньше, чем под углом 70-80 градусов к этому направлению.

Падение напряжения на светодиоде при малых токах $I < I_\eta$

выражается зависимостью $U = \beta kT \ln \frac{I + I_0}{I_0}$, где $\beta = 1.2-1.3$, $I_0 = 0.2-0.6$ мкА. При больших токах $I > I_\eta$ после появления излучения β уменьшается до 1, а $I-U$ характеристика выражается зависимостью

$$U = \frac{kT}{q} \ln \frac{I + I_1}{I_1} + \frac{kT}{q} \ln \frac{I + I_2}{I_2} + IR_s,$$

где $I_1 = 0.01-0.1$ мкА, $I_2 = 0.2-0.9$ мА, $R_s = 1-2$ Ом. Если первое слагаемое ответственно за падение напряжения на р-п-переходе, а третье - на последовательном сопротивлении диода, то второе слагаемое, вероятно, ответственно за падение напряжения на п-п-переходе структуры (рис. 1,б).

Светодиод №	n , см ⁻³	$h\nu_m$, эВ	δ , эВ	η_i , %	η_e , %	τ_φ , нс	τ_I , нс
АГ-59-5	$7 \cdot 10^{16}$	0.565	0.06	1.6	4.0	11	10
АГ-58-1	$6 \cdot 10^{16}$	0.580	0.069	1.4	3.0	12	10
АГ-57-4	$5 \cdot 10^{16}$	0.579	0.067	1.3	3.2	11	10
АГ-56-2	$5 \cdot 10^{16}$	0.579	0.068	3.5	4.5	10	9

Переходные электролюминесцентные характеристики при прямоугольном импульсе прямого тока ($I = 200$ мА) имеют следующие параметры (рис. 2, г) (см. таблицу). Импульс света нарастает и спадает экспоненциально, и постоянная времени нарастания и спада τ_φ практически одинакова и составляет 10–15 нс. Время жизни неосновных носителей заряда, определенное из величины экстрагируемого заряда при переключении прямого тока на обратный, находится в пределах $\tau_I = 9$ –11 нс.

4. Достижение более высокого внешнего квантового выхода излучения ($\eta_e > 1.5\%$) по сравнению с работой [5] связано не только с высоким внутренним квантовым выходом излучательной рекомбинации, но и выходом значительной части излучения за счет многократного отражения света в мезоструктуре.

Достижение же высокого внутреннего квантового выхода излучательной рекомбинации может быть связано с уменьшением доли безызлучательной рекомбинации и проявлением эффективной излучательной рекомбинации инжектированных носителей на п-п-гетерогранице.

Поскольку в качестве активной области использовался n - $GaInAsSb$, то можно ожидать существенное уменьшение доли безызлучательной рекомбинации за счет более низкой скорости ударной рекомбинации, чем в p -области $GaInAsSb$. В результате это может привести к общему уменьшению скорости рекомбинации в тонком активном слое ($d \leq 3$ мкм) и проявлению рекомбинации через потенциальные ямы на п-п-гетеропереходе.

Ряд фактов указывает на то, что в исследуемых диодах может иметь место рекомбинация через квантовые состояния на п-п-границе. Большая полуширина спектра излучения ($\delta \sim 70$ мэВ) может быть связана с тем, что степень вырождения в квантовой яме для электронов на п-п-гетерогранице больше, чем в толще активной области. А независимость времени жизни неосновных носителей заряда от степени легирования активной области также может свидетельствовать в пользу рекомбинации через квантовые состояния на п-п-границе. Кроме того, практически скачкообразное увеличение внешнего квантового выхода излучения с ростом тока и увеличение

крутизны $I - U$ - характеристики при токе 4-8 мА также может быть связано с излучательной рекомбинацией через квантовые состояния на п-п-гетерогранице.

В заключение выражаем благодарность А.А. Рогачеву за стимулирующие дискуссии и поддержку работы, С.С. Архиповой - за сборку приборов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Бочкарев Э.А., Долгинов Л.М., Дракин А.Е., Дружинина Л.В., Елисеев 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., Давильченко В.Г., Мирсагатов М.А., Михайлова М.П., Яковлев Ю.П. - Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, в. 21, с. 1311-1315.
- [5] Долгинов Л.М., Дружинина Л.В., Мильвидский М.Г., Мухитдинов М., Михайев Э.С., Рожков В.М., Шевченко Е.Г. - Измерительная техника, 1981, в. 6, с. 65-67.

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

Поступило в Редакцию
19 января 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 9

12 мая 1988 г.

ОТКЛОНЕНИЕ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1.5 МэВ ИЗОГНУТЫМИ ТРУБКАМИ

А.Ю. Басай, С.А. Воробьев,
В.В. Каплин, Е.И. Розум,
А.М. Слупский

Выполненные в последние годы работы по каналированию заряженных частиц в изогнутых монокристаллах [1, 2] стимулировали исследования отклонения потоков излучений изогнутыми поверхностями и волноводами [3-5]. В работах [6, 7] было показано, что