

Спектры люминесценции голубых и зеленых светодиодов на основе многослойных гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с квантовыми ямами

© К.Г. Золина, В.Е. Кудряшов, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119899 Москва, Россия

(Получена 27 сентября 1996 г. Принята к печати 18 марта 1997 г.)

Исследованы спектры люминесценции голубых и зеленых светодиодов на основе гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{GaN}$ с тонким ($2 \div 3$ нм) активным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в интервале температур $100 \div 300$ К и в интервале токов $J = 0.01 \div 20$ мА. Спектры голубых светодиодов имеют максимумы в интервале $\hbar\omega_{\text{max}} = 2.55 \div 2.75$ эВ, зеленых — $\hbar\omega_{\text{max}} = 2.38 \div 2.50$ эВ в зависимости от содержания In в активном слое. Спектральная интенсивность основной полосы экспоненциально падает в длинноволновой области с энергией в показателе $E_0 = 45 \div 70$ мэВ; это описывается моделью, учитывающей хвосты плотности состояний в двумерной активной области и степени их заполнения вблизи краев зон. При малых токах в спектрах голубых диодов наблюдается туннельная излучательная рекомбинация с максимумом в спектре, сдвигающимся с напряжением. Обсуждается модель энергетической диаграммы гетероструктур.

1. Введение

В последние три года были достигнуты большие успехи в создании излучающих гетероструктур из GaN и твердых растворов на его основе. Работы по проблеме были представлены на 1-м Международном семинаре по GaN и аналогичным материалам на сессии Общества материаловедения (дек. 1995 г., [1]) и 1-м Европейском семинаре по GaN [2]. Рекордные результаты по разработке светодиодов (СД) для коротковолновой (фиолетовой, голубой, зеленой) части видимого спектра были достигнуты методом эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС) группой фирмы Ничия [3,4]. В работе [4] было показано, что на основе многослойных гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с тонким ($2 \div 3$ нм) активным слоем из InGaN возможно создание светодиодов в указанной спектральной области с внешним квантовым выходом до $4 \div 9\%$ (см. также обзор [5]).

Спектры электролюминесценции (ЭЛ) этих светодиодов были исследованы в зависимости от тока J и температуры T в [4,6]. В настоящей работе продолжено исследование спектров ЭЛ этих светодиодов в широком диапазоне изменений J и проведен подробный анализ особенностей спектров. Эти особенности представляют интерес для понимания механизмов излучательной рекомбинации и факторов, влияющих на квантовый выход излучения в гетероструктурах InGaN/AlGaIn/GaN. В структурах с тонким активным слоем существенны квантово-размерные и туннельные эффекты, флуктуации потенциалов в квантовых ямах и легирование прилегающих широкозонных областей.

2. Методика эксперимента

Были исследованы 10 светодиодов из структур, выращенных методом МОС гидридной эпитаксии, описанные в [4] (рис. 1). На сапфировой подложке и буферном слое GaN (≈ 300 Å) выращен слой $n\text{-GaN:Si}$ ($t = 5$ мкм).

На нем выращен активный тонкий ($d \approx 20 \div 30$ Å) слой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Длина волны в максимуме спектра изменится от голубой до зеленой области, если состав x активного слоя изменяется в пределах $0.2-0.43$; она зависит и от толщины слоя. Затем следует широкозонный слой $p\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N:Mg}$ (≈ 1000 Å) — барьер для электронов, необходимый для инжекции дырок и согласования решетки активного слоя с верхним контактным слоем $p\text{-GaN:Mg}$ (≈ 0.5 мкм). При выращивании $p\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N:Mg}$ предотвращает испарение активного слоя во время роста сравнительно толстого верхнего слоя. На $p\text{-GaN:Mg}$ нанесен металлический контакт Ni-Au. Металлический контакт Ti-Al к слою $n\text{-GaN}$ создан после травли части структуры. Площадь кристалла с $p\text{-}n$ -гетеропереходом $S = 350 \times 350$ мкм². Для сравнения были исследованы также спектры двух голубых и двух зеленых СД предыдущих разработок фирмы Ничия [3], в которых имеется еще два эпи-

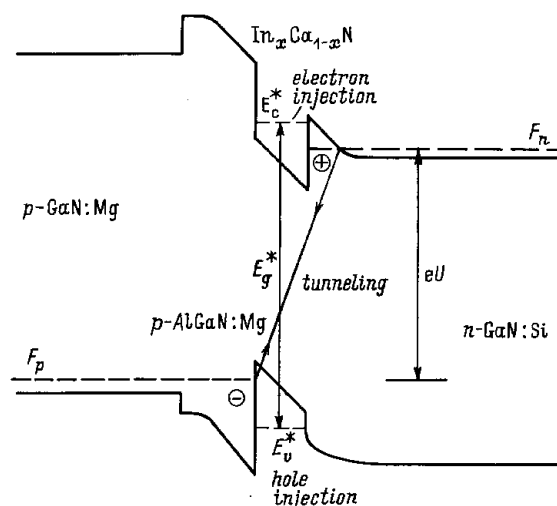


Рис. 1. Энергетическая диаграмма гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{GaN}$, описанных в работе [4].

Таблица 1. Параметры диодов I и II группы

Группа	N диода	$\hbar\omega_{\max}$, эВ	E_0 , мэВ	m	ΔF_n , эВ	E_g^* , эВ	$\Delta(\hbar\omega)_{1/2}$, эВ	$\eta_e, \%^*$
I	G3	2.435	68.2	1.105	-0.125	2.584	0.152	4.1
	G2	2.445	69.9	1.108	-0.166	2.646	0.152	
	G4	2.446	66.8	1.123	-0.123	2.559	0.151	
II	B3	2.709	54.5	1.005	-0.141	2.853	0.133	0.86
	B2	2.732	44.3	1.059	-0.089	2.824	0.131	
	B5	2.752	49.1	1.104	-0.091	2.851	0.134	

Примечание. * Измерения внешнего квантового выхода η_e описаны в [13].

таксиальных слоя между n -GaN:Si и активным слоем: n -Al_{0.1}Ga_{0.9}N:Si (100 нм) и n -In_{0.05}Ga_{0.95}N:Si (50 нм).

Излучение наблюдалось в стандартной светодиодной конструкции через пластмассовый фокусирующий купол над кристаллом со структурой.

Спектры излучения исследовались на комплексе КСВУ-12, сигнал с которого через цифроаналоговые преобразователи и интерфейс подавался на компьютер IBM PC-486. Было разработано программное обеспечение для управления спектральным комплексом на языке QBASIK. Математическая обработка проводилась программой ORIGIN и EASYPLOT.

3. Экспериментальные результаты

3.1. *Общий вид спектров.* На рис. 2 представлены спектры электролюминесценции нескольких диодов (табл. 1) при комнатной температуре и постоянном токе $J = 10$ мА. Максимумы в спектрах голубых и сине-фиолетовых диодов (II группа) лежат в интервале $\hbar\omega_{\max} = 2.55 \div 2.75$ эВ в зависимости от содержания In в активном слое ($x = 0.20 \div 0.25$). Для зеленых диодов (I группа) $\hbar\omega_{\max} = 2.38 \div 2.45$ эВ ($x = 0.40 \div 0.44$). Диоды третьей группы были изготовлены технологией с дополнительными гетерослоями [3], они соответствуют сине-зеленой и зеленовато-синей областям $\hbar\omega_{\max} = 2.48 \div 2.60$ эВ. Таким образом, светодиоды, созданные из гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN, перекрывают весь коротковолновый диапазон видимой области в соответствии с [1–4]. Для краткости диоды второй группы мы будем называть голубыми.

3.2. *Зависимость спектров от тока и формы спектральной полосы.* На рис. 3 показаны спектры излучения при $J = 20 \div 0.2$ мА и комнатной T . Спад спектров описывается экспонентами: $I \sim \exp(\hbar\omega/E_1)$ в коротковолновой и $T \sim \exp(-\hbar\omega/E_0)$ в длинноволновой области. Показатель экспоненты E_1 — порядка $1.0 \div 1.3kT$; $E_0 \gg kT$ и не зависит от T . Максимум в спектрах голубых диодов практически не зависел от тока в этом интервале. Максимум в спектрах зеленых диодов сдвигался с повышением тока в коротковолновую сторону на ≈ 60 мэВ.

Для голубых диодов интенсивность резко падала при $J < 0.7 \div 0.2$ мА, что заметно на рис. 3, а по изменению расстояния между кривыми в логарифмическом масштабе. При малых токах длинноволновая часть спектров голубых диодов отклоняется от экспоненты. Для зеленых светодиодов резкого падения $I(J)$ не наблюдалось, и спектры с разрешением до ≈ 0.5 мэВ можно было исследовать до $J = 10$ мкА (рис. 3, б). Ширина спектров практически не зависела от тока и изменялась для разных диодов в пределах $\Delta(\hbar\omega)_{1/2} = 130 \div 150$ мэВ (см. табл. 1). Это позволяло исследовать зависимость интенсивности излучения Φ от J при постоянной T по измерениям $I_{\max}(J)$.

3.3. *Структура спектров, обусловленная интерференцией.* Большая интенсивность излучения позволила исследовать спектры с разрешением до 0.2 мэВ, с точностью до 0.1% и обнаружить структуру, показанную на рис. 4. Периодическая структура четко разрешалась, когда из экспериментального спектра выделялось гладкое приближение полосы (точечная линия). Она объясняется интерференцией излучения, отражаемого от границ прозрачного слоя n -GaN (толщиной $t \pm \delta t = 5 \pm 0.5$ мкм) [6,7]. Значения $n[1 + (\lambda/n)(dn/d\lambda)]$ (n — показатель преломления, $dn/d\lambda$ — дисперсия), вычисленные по формуле

$$n[1 + (\lambda/n)(dn/d\lambda)] = (\lambda/2)(1 + \lambda/\Delta\lambda)/t \quad (1)$$

($\Delta\lambda$ — период), при $t = 5.0$ мкм имеют величину от 2.48 до 3.03. Поскольку $\delta t \approx 0.5$ мкм, это согласуется с показателем преломления GaN ($n = 2.5$).

3.4. *Туннельная излучательная рекомбинация.* В спектрах люминесценции голубых светодиодов в области малых токов ($J = 0.02$ – 0.2 мА) была обнаружена спектральная полоса, положение максимума которой в интервале $\hbar\omega_{\max} = 2.16 \div 2.39$ эВ изменяется пропорционально напряжению на p - n -переходе, $\hbar\omega_{\max} \cong eU$ (рис. 5). В этой области квантовый выход основной спектральной полосы падает на 4 порядка. Обнаруженная полоса соответствует туннельному излучению, которое ранее было исследовано и теоретически описано для других прямозонных соединений типа A^{III}B^V [8]. В зеленых СД этой полосы не наблюдалось, что коррелирует с их большим последовательным сопротивлением и отсутствием туннельной компоненты тока.

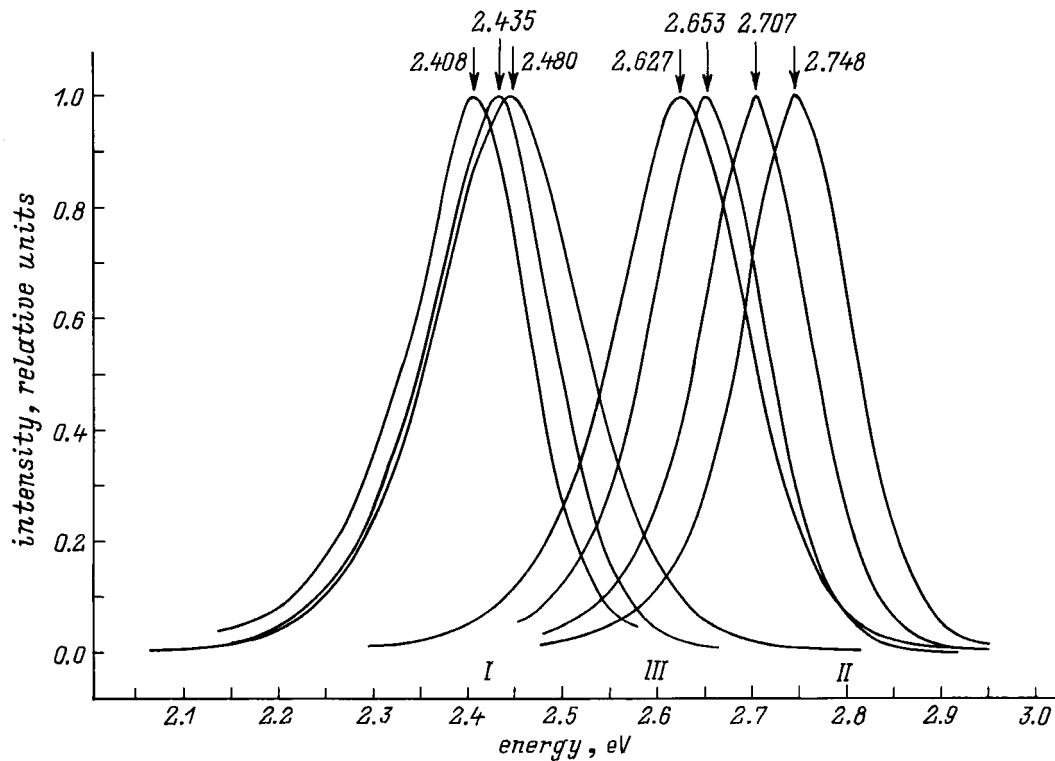


Рис. 2. Спектры электролюминесценции светодиодов из гетероструктур $In_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N/GaN$ с квантовыми ямами при комнатной T и $J = 10$ мА; I — первая группа, II — вторая группа, III — третья группа (см. табл. 1).

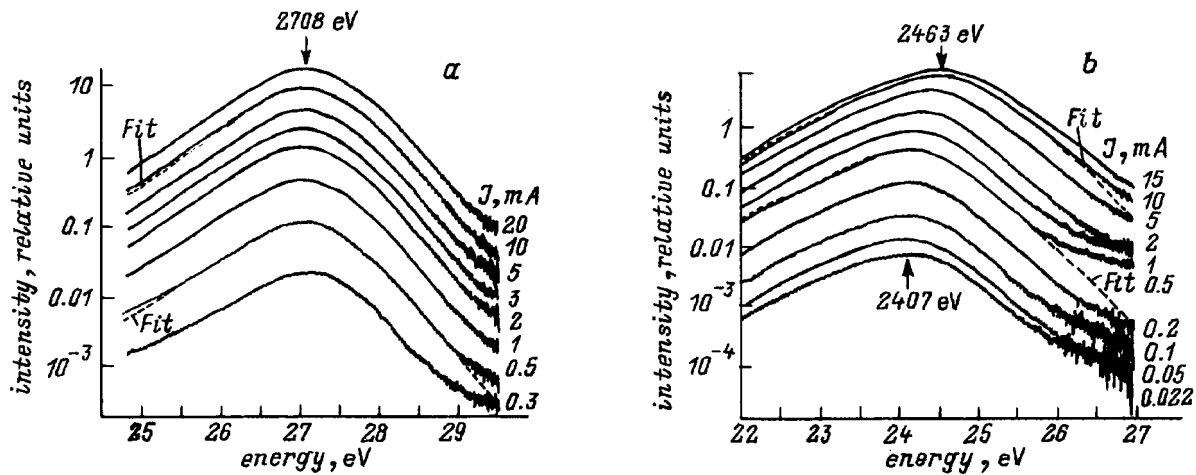


Рис. 3. Спектры излучения светодиодов в зависимости от тока (цифры в столбце — J , мА) при комнатной температуре; a — голубой диод N3 из I группы; b — зеленый диод N2 из II группы. Стрелками отмечено положение максимумов. Точечные кривые — аппроксимация формулами (5)–(8).

3.5. Зависимость спектров от температуры. При понижении температуры длинноволновый спад спектра в основной полосе практически не изменялся, а коротковолновый становился заметно резче, параметр E_1 уменьшался и становился зависящим от тока. Измерения температуры T термопарой, приклеенной к пластмассовому колпачку диода, показали, что нагрев диода током более 1 мА заметно изменяет T . Поэтому на рис. 6

показано изменение спектров одного из голубых диодов с T при $J = 1$ мА, при котором нагрев мал. Интегральная интенсивность излучения Φ слабо зависела от T , изменяясь при этом токе не более чем в 2 раза.

3.6. Зависимость интенсивности от тока и напряжения. Интегральная интенсивность Φ линейно зависела от тока J при $J = 1 \div 10$ мА (рис. 7), сублинейно росла при увеличении J , $J > 10$ мА, и сверхлинейно

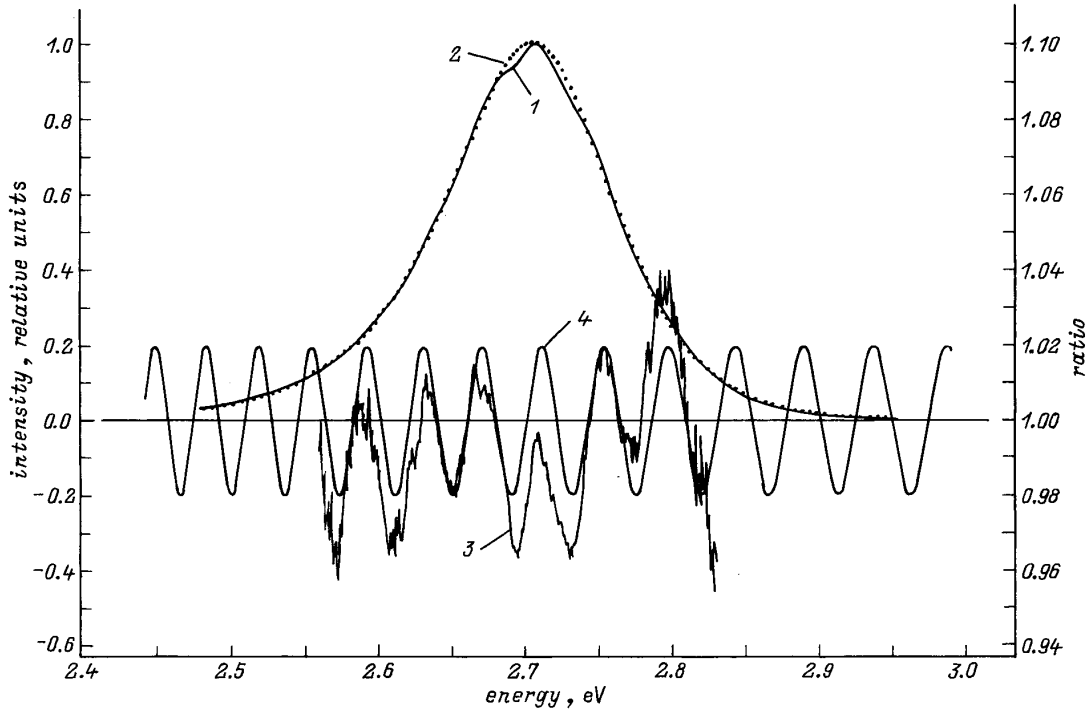


Рис. 4. Структура спектра ЭЛ (I) голубого светодиода (N2, см. табл. 1), обусловленная интерференцией в слое GaN. Точечная линия 2 — гладкая аппроксимация формулами (5)–(8); 3 — отношение аппроксимационного (2) к экспериментальному (I) спектру; 4 — множитель $(1 + a \cdot \cos(2p(\lambda - \lambda_0)/\Delta\lambda))$; $a = 0.020 \pm 0.001$; $\Delta\lambda = 7.02 \pm 0.07$. Для кривых 3 и 4 ось ординат справа.

падала при уменьшении J , $J < 0.7 \div 0.3$ мА. Это падение можно описать законом

$$\Phi \sim J^p. \tag{2}$$

Показатель p изменялся для голубых диодов в пределах $p = 4.5 \div 5.2$. Такая резкая зависимость обусловлена изменением соотношения безызлучательной и излучательной рекомбинации в структуре. Для зеленых диодов падение I было менее резким, $p \approx 1.5$. Это обусловлено различием механизмов протекания тока в исследованных диодах. В области малых токов для голубых диодов $U \approx V$ (V — напряжение на диоде), так что

$$I_{\max} = \text{const} \cdot \exp(eU/E_1), \tag{3}$$

где E_1 — показатель для интенсивности излучения. При больших токах сказывается последовательное сопротивление: $V = U + JR_s$. Исследование электрических свойств диодов дано в [9].

4. Обсуждение результатов

4.1. Энергетическая диаграмма. Рассмотрим энергетическую диаграмму гетероструктуры (рис. 1).

Эффективная ширина запрещенной зоны в активном слое E_g^* равна

$$E_g^* = E_g(x, T) + \Delta E_{1c} + \Delta E_{1v} + \Delta E_p - E_{\text{exc}} - \Delta E_{D,A}, \tag{4}$$

где $E_g(x, T)$ — ширина запрещенной зоны в слое, ΔE_{1c} , ΔE_{1v} — уровни размерного квантования в квантовых

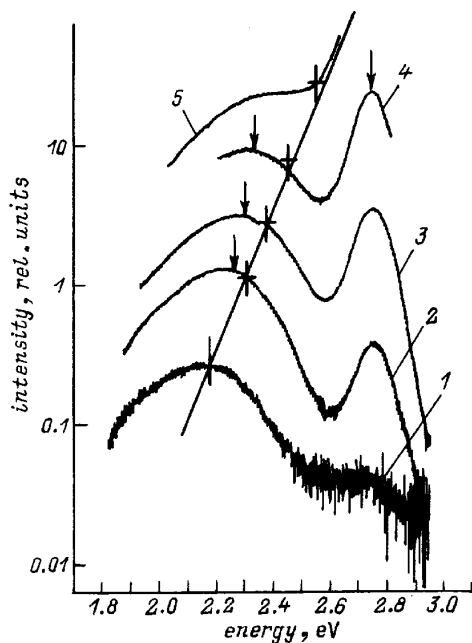


Рис. 5. Спектры люминесценции голубого СД (N5) при малых токах, комнатная температура. Пересечения прямой со спектрами обозначают энергии, соответствующие напряжению на диоде. J , мА: 1 — 0.025, 2 — 0.05, 3 — 0.075, 4 — 0.1, 5 — 0.15. Положение максимума полосы туннельного излучения, эВ: 1 — 2.13, 2 — 2.21, 3 — 2.27, 4 — 2.33. Энергия максимума коротковолновой полосы — 2.75 эВ.

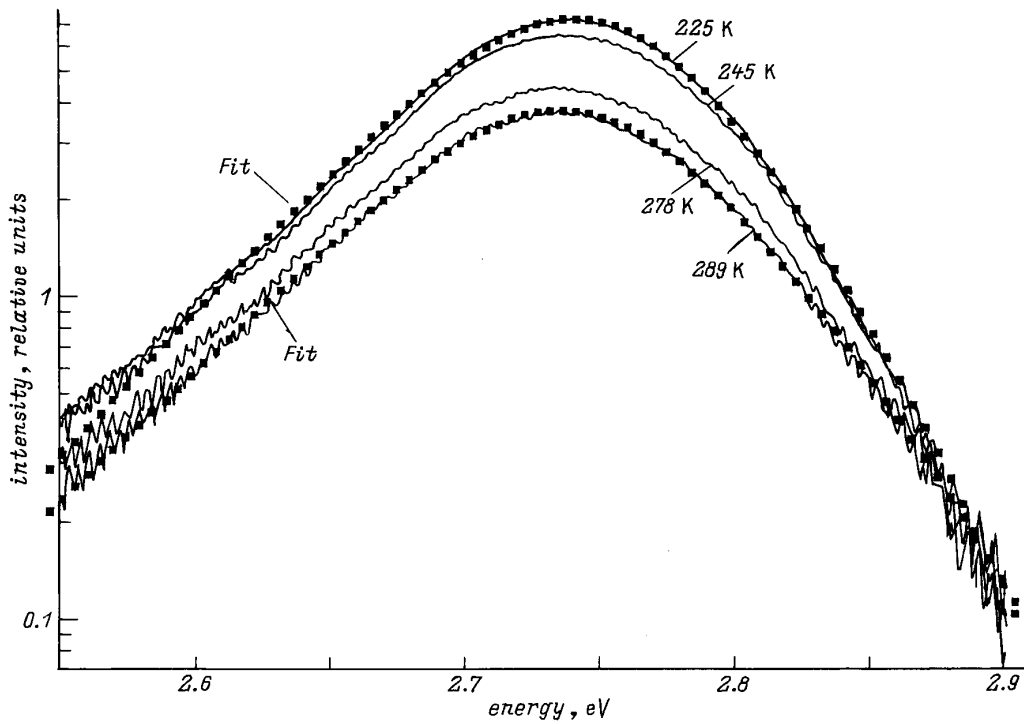


Рис. 6. Спектры люминесценции голубого диода (N2, см. табл. 1) при различных температурах. Точки — аппроксимация по формулам (5)–(8).

ямах зон проводимости и валентной, ΔE_p — изменение E_g вследствие деформаций из-за различия постоянных решетки в слоях гетероструктуры, E_{exc} — энергия связи двумерного экситона, $\Delta E_{D,A}$ — сдвиги краев эффективной запрещенной зоны, обусловленные потенциалом доноров и акцепторов [10,11]. Для расчетов надо знать зависимости $E_g^*(x, T)$, $m_{c,v}(X, T)$, зависимости ΔE_{1c} , ΔE_{1v} от разрывов зон $\Delta E_{c,v}$ на обеих гетерограницах и от толщины активного слоя d . Надо знать тензоры упругих постоянных, потенциалы деформаций, энергии ионизации (E_D, E_A) и концентрации (N_D, N_A) доноров и акцепторов, их флуктуации в квантовой яме. Надо оценить флуктуации потенциала в зависимости от толщины ямы и концентраций примесей. Поскольку электрическое поле E в $p-n$ -переходе велико, E_g^* , ΔE_{1c} , ΔE_{1v} могут зависеть от E .

Расчеты E_g^* громоздки и содержат не всегда известные конкретные параметры.

4.2. Модель описания спектров люминесценции. Здесь мы ограничимся анализом спектров в основной полосе, исходя из следующей модели. Эффективная излучательная рекомбинация идет тогда, когда носители тока обоих знаков инжектируются в активный слой — в квантовую яму. При малых токах может быть существенна туннельная компонента. При больших токах часть напряжения падает на последовательном сопротивлении, что обуславливает нагрев. Рассмотрим спектры излучения в квантовой яме в области токов и напряжений, соответствующих эффективному излучению.

Будем считать, что оптические переходы идут между краями двумерных зон проводимости и валентной, которые имеют хвосты плотности состояний, обусловленные различными флуктуациями потенциала (кулоновского поля примесей, уровней размерного квантования, состава твердого раствора, шероховатостей границ). Применим в этом случае формулу для $2D$ -плотности состояний $N^2(\hbar\omega - E_g^*)$, которая использовалась для описания люминесценции квантовых ям GaAs/AlGaAs в [11,12]:

$$I(\hbar\omega) \sim N^2 D(\hbar\omega - E_g^*) f_c(\hbar\omega, kT, F_n) \times (1 - f_v(\hbar\omega, kT, F_p)); \quad (5)$$

$$N^{2D}(\hbar\omega - E_g^*) = \left(1 + \exp(-(\hbar\omega - E_g^{eff})/E_0)\right)^{-1}. \quad (6)$$

Энергетический параметр E_0 характеризует экспоненциальный спад плотности состояний в длинноволновой области. В формуле (5) f_c и $(1 - f_v)$ — функции заполнения состояний вблизи краев зон:

$$f_c(\hbar\omega, kT, F_n) = \left[1 + \exp\left(\left(\frac{1}{m}\right)(\hbar\omega - E_g^*) - \Delta F_n\right)/kT\right]^{-1}, \quad (7)$$

$$(1 - f_v(\hbar\omega, kT, F_p)) = \left[1 + \exp\left(\left(\frac{1}{m}\right)(\hbar\omega - E_g^*) - \Delta F_p\right)/kT\right]^{-1}, \quad (8)$$

где $\Delta F_n = (F_n - E_c^*)$, $\Delta F_p = (E_v^* - F_p)$ — квазиуровни Ферми для электронов и дырок в активной области,

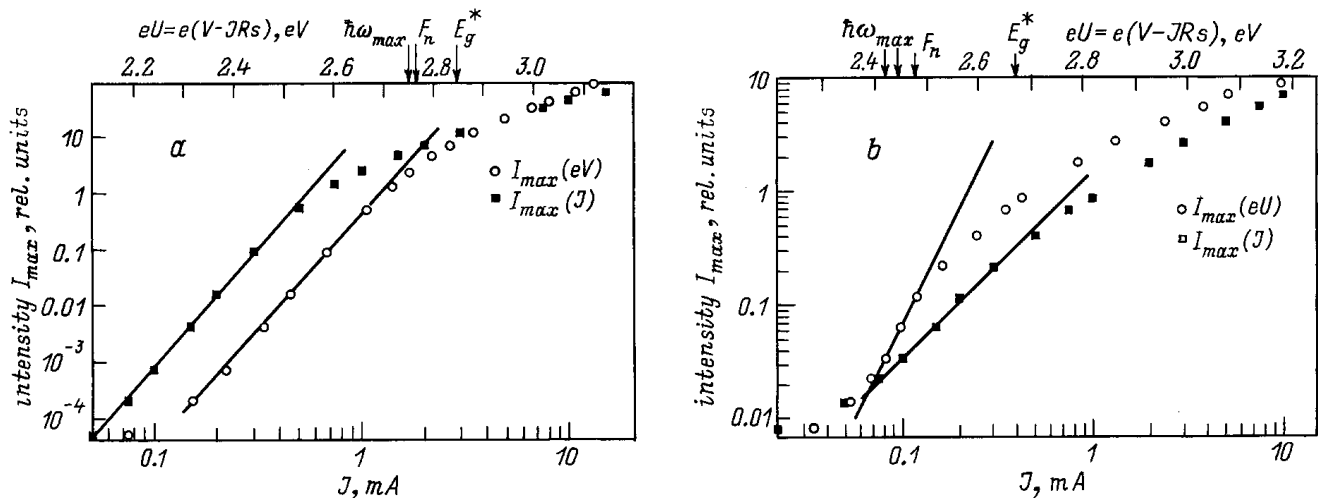


Рис. 7. Зависимости интенсивности излучения от напряжения (по верхней шкале) и от тока (по нижней шкале) для голубого (а) и зеленого (b) светодиодов; прямые соответствуют формулам (2) и (3); на верхней шкале указаны параметры аппроксимации по формулам (5)–(8); комнатная температура.

связанные соотношениями

$$F_n - F_p = eU; \Delta F_p = eU - E_g^* - \Delta F_n, E_g^* + E_c^* - E_v^*, \quad (9)$$

где U — падение напряжения на активной области, которое, вообще говоря, может быть меньше падения напряжения на p - n -переходе.

Параметры $1/m$ и $(1 - 1/m)$ характеризуют доли энергии $(\hbar\omega - E_g^*)$, которую имеет электрон над эффективным краем зоны проводимости E_c^* и дырка под эффективным потолком валентной зоны E_v^* . Для прямых переходов в случае параболических зон $m = (1 + m_c^*/m_v^*)$; для переходов зона проводимости — уровень акцептора $m = 1$. В предлагаемой модели m — феноменологический параметр; если температура диода не измеряется непосредственно, увеличение параметра m с увеличением тока может свидетельствовать о нагреве диода.

Экспериментальные спектры были нормированы к единице в максимуме и описаны формулами (5)–(8) с помощью программ ORIGIN и EASY PLOT подгонкой параметров $\hbar\omega_{max}$, E_g^* , m , E_0 , ΔF_n для наилучшего описания формы спектров в зависимости от напряжения U и температуры T .

Результаты представлены на рис. 3–5 и в табл. 2. Видно, что при изменении тока в широких пределах и изменении интенсивности в каждом спектре на два десятичных порядка аппроксимация хорошо описывает спектры. Среднеквадратичные отклонения по 2000 точкам составляли не более $7 \cdot 10^{-3}$ на спектрах, нормированных к единице в максимуме; было обработано более 50 спектров. В табл. 2 представлены значения параметров и показано их изменение с током для двух диодов.

Энергия в показателе экспоненты, описывающей длинноволновый спад спектральной полосы — параметр E_0 , почти не изменяется с изменением J для каждого диода,

пока (для голубых СД) не начинает сказываться туннельное излучение. E_0 увеличивается от диода к диоду от 49 до 70 мэВ по мере сдвига максимума $\hbar\omega_{max}$ в длинноволновую сторону. Таким образом, можно заключить, что флуктуации потенциала в квантовых ямах возрастают по мере увеличения содержания In в активном слое диодов. Анализ характерных флуктуаций потенциала в квантовых ямах рассматриваемых структур в известных авторам публикациях не проводился.

Таблица 2. Параметры в формулах (5)–(8), полученные подгонкой для экспериментальных спектров голубого и зеленого светодиодов. Число значащих цифр соответствует точности подгонки

N диода	J, мА	$V - JR_s$, В	$\hbar\omega_{max}$, эВ	E_0 , мэВ	m	ΔF_n , эВ	E_g^* , эВ
B3	0.2	2.464	2.708	79.5	0.96	-0.176	2.899
	0.5	2.615	2.707	60.4	0.99	-0.143	2.858
	1	2.692	2.709	56.5	1.00	-0.132	2.845
	2	2.772	2.708	55.5	0.99	-0.138	2.848
	5	2.880	2.709	54.8	0.99	-0.140	2.850
	10	3.080	2.709	54.5	1.01	-0.141	2.853
	20	3.028	2.708	54.6	1.02	-0.144	2.858
G4	0.022	2.285	2.409	65.9	1.05	-0.238	2.672
	0.05	2.351	2.409	65.9	1.04	-0.236	2.668
	0.1	2.422	2.409	70.1	1.02	-0.241	2.670
	0.2	2.480	2.410	70.0	1.00	-0.254	2.678
	0.5	2.597	2.416	69.6	0.96	-0.303	2.722
	1	2.683	2.423	69.0	0.94	-0.293	2.712
	2	2.791	2.426	68.6	0.94	-0.370	2.790
	5	2.955	2.435	68.3	1.00	-0.212	2.666
	10	3.078	2.446	66.8	1.12	-0.123	2.599
20	3.188	2.460	67.7	1.23	-0.106	2.602	

Параметр m , характеризующий отличие энергии в показателе экспоненты в формулах (7), (8) от величины kT (в расчетах табл. 2 предполагалось, что kT соответствует комнатной температуре), почти равен единице для всех диодов, пока с увеличением тока не начинается нагрев. Это увеличение сказывается сильнее для зеленых диодов, для которых $R_s = 27 \div 30$ Ом. Если принять, что кажущееся изменение m полностью обусловлено нагревом, то при постоянном токе $20 \div 30$ мА температура активной области диода может достигать $T \approx 390$ К. Значение $m \approx 1$ может означать, что излучательные переходы идут из хвоста плотности состояний в зоне проводимости на локальные акцепторные уровни; это предположение необходимо проверить.

Полученное при подгонке значение квазиуровня Ферми для электронов ΔF_n изменяется при малых токах в пределах от -0.11 до -0.36 эВ (от фиолетовых диодов к зеленым). Более глубокое положение уровня Ферми в зеленых диодах коррелирует с большими R_s и отсутствием туннельного излучения. Увеличение ΔF_n на $1 \div 2 kT$ при увеличении тока соответствует двойной инжекции носителей в активную область.

Значения $E_g^* = \hbar\omega_{\max} + \Delta$ следует сравнить с оценками величины E_g^* по формуле (4). Подгонка проводилась для спектров, нормированных к единице в максимуме. Зависимость интенсивности излучения от напряжения U и от параметров аппроксимации требует совместного анализа спектров и электрических свойств диодов. Эти пункты выходят за рамки настоящей статьи.

5. Заключение

1. Спектры люминесценции светодиодов на основе гетероструктур с квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{GaN}$ с тонким активным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ имеют максимумы в видимой области от фиолетовой до зеленой части спектра в зависимости от содержания In в активном слое. Спектр экспоненциально спадает и в коротковолновой, и в длинноволновой части.

2. В спектрах диодов проявляется структура, обусловленная отражением излучения от подложки и интерференцией в слое GaN. Это показывает возможности управления оптическим выводом излучения из диодов.

3. В спектрах голубых диодов при малых токах наблюдается туннельная излучательная рекомбинация, максимум в спектре которой сдвигается пропорционально напряжению на p - n -переходе.

4. Зависимость интенсивности излучения от тока и напряжения имеет три участка: при малых токах в голубых диодах существенна туннельная безызлучательная компонента тока; в промежуточной области токов и напряжений, зависящей от содержания In в активном слое ($\hbar\omega_{\max} \leq eU \leq E_g^*$), квантовый выход излучения максимален, при больших токах существен нагрев диодов и квантовый выход падает.

5. Форма основной спектральной полосы в указанной области максимального квантового выхода хорошо описывается моделью рекомбинации в двумерной квантовой

яме с учетом экспоненциального спада хвоста приведенной плотности состояний, обусловленного флуктуациями потенциала.

6. Параметр экспоненты, описывающей в модели спад спектров в длинноволновой области, имеет значения в интервале $E_0 = 45 \div 70$ мэВ, что характеризует флуктуации потенциала, обусловленные различными причинами (шероховатости гетерограниц, неоднородности состава твердого раствора, кулоновский потенциал примесей и т.д.).

7. Коротковолновый спад спектров имеет энергию в показателе экспоненты, близкую к kT ; ее изменение дает оценки нагрева активной области до 100°C при $J \approx 20$ мА.

Авторы выражают глубокую благодарность д-ру Ш. Накамуре за присланные в МГУ образцы светодиодов, А.Е. Ковалеву за помощь в компьютеризации установки, С.С. Шумилову за помощь в программном обеспечении, А.Н. Ковалеву и Ф.И. Маняхину за электрические измерения.

Список литературы

- [1] *The first international symposium on gallium nitride and related materials*. Abstracts of Mat. Res. Soc. 1995 Fall Meeting, Symp. AAA (Boston, 1995).
- [2] *Abstracts of first European GaN workshop* (Rigi, Switzerland, 1996).
- [3] S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, S. Hagahama. *J. Appl. Phys.*, **34**, Part 2, 797 (1995).
- [4] S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, S. Hagahama, T. Yamada, T. Mukai. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, Part 2, L1332 (1995).
- [5] А.Э. Юнович. *Светотехника*, вып. 5/6, 2 (1996).
- [6] K.G. Zolina, V.E. Kudryashov, A.N. Turkin, A.E. Yunovich, A. Nakamura. *MJ-NSR* **1**, Article 11 (1996), <http://nsr.mij.mrs.org/1/11/>.
- [7] S. Nakamura. *Jap. J. Appl. Phys.*, **30**, 1620 (1991).
- [8] А.Э. Юнович, А.Б. Ормонт. *ЖЭТФ*, **51**, 1292 (1966).
- [9] А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин, А.Э. Юнович. *ФТП* (в печати).
- [10] М. Херман. *Полупроводниковые сверхрешетки* (М., Мир, 1984).
- [11] Б.Р. Варданян, А.Э. Юнович. *ФТП*, **29**, 1976 (1995).
- [12] R. Chingolani, W. Stolz, K. Ploog. *Phys. Rev. B*, **40**, 2950 (1989).

Редактор В.В. Чалдышев

Luminescence spectra of blue and green InGaN/AlGaIn/GaN light-emitting diodes

K.G. Zolina, V.E. Kudryashov, A.N. Turkin, A.E. Yunovich

Moscow State Lomonosov University,
Department of Physics,
119899 Moscow, Russia.

E-mail: yunovich@scon175.phys.msu.ru