

# Туннельные эффекты в светодиодах на основе гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с квантовыми ямами

© В.Е. Кудряшов, К.Г. Золин, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович, А.Н. Ковалев\*, Ф.И. Маняхин\*

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

\*Московский институт стали и сплавов,  
119235 Москва, Россия

(Получена 28 января 1997 г. Принята к печати 18 марта 1997 г.)

Исследованы туннельные эффекты в спектрах люминесценции и электрических свойствах голубых светодиодов на основе гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN. Туннельное излучение в области энергий  $2.1 \div 2.4$  эВ преобладает при малых токах ( $< 0.2$  мА), его роль растет по мере сдвига максимума основной голубой полосы в коротковолновую область. Положение максимума  $\hbar\omega_{\max}$  приблизительно пропорционально напряжению  $eU$ . Форма и интенсивность полосы описываются теорией туннельного излучения. Вольт-амперные характеристики при малых прямых токах имеют туннельную компоненту с показателем  $E_f = 130\text{--}140$  мэВ. Распределение электрически активных центров выявляет протяженные компенсированные слои в  $n$ - и  $p$ -областях, прилегающих к активному слою, и указывает на наличие заряженных стенок на границах гетеропереходов. В активной области InGaN существенно сильное электрическое поле. Обсуждается энергетическая диаграмма структур.<sup>1</sup>

## 1. Введение

В наших работах [2–4] было обнаружено, что в спектрах люминесценции сверхъярких голубых светодиодов (СД) на основе гетероструктур (ГС) InGaN/AlGaIn/GaN при малых токах существенна роль туннельного излучения. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диодов имела компоненту туннельного тока. Отличие голубых СД от зеленых на основе аналогичных ГС с разным содержанием In в активной области InGaIn было объяснено меньшей толщиной области пространственного заряда и большим электрическим полем [3]. Предлагалось [2,4] использовать для анализа модели туннельного излучения, разработанные для других соединений  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$  [5,6].

В настоящей работе проведены подробные исследования спектров туннельного излучения и электрических свойств голубых светодиодов, описанных в [2–4]. Проанализированы измерения динамической емкости и распределение зарядов в структурах. Показано, что туннельные эффекты являются определяющими, когда достаточно велика напряженность поля в активной области — квантовой яме. Уточнена энергетическая диаграмма гетероструктур. Проведен анализ спектров на основе теорий диагонального туннелирования. Обсуждается роль флуктуаций в активном слое.

## 2. Методика эксперимента

Были исследованы СД из структур InGaIn/AlGaIn/GaN, выращенных газовой эпитаксией с использованием металлоорганических соединений, которые были переданы д-ром Ш. Накамура [7]. На сапфировой подложке

<sup>1</sup> Работа доложена на Конференции материаловедческого общества, Бостон, 1996 г. [1].

были выращены  $n$ -GaIn:Si ( $t \approx 5$  мкм) и активный тонкий ( $d = 2.5 \div 3.5$  нм) слой  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ . За ним следовали слои  $p$ -Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N:Mg ( $\approx 100$  нм) и  $p$ -GaIn:Mg ( $\approx 0.5$  мкм). Длина волны в максимуме излучения изменялась в пределах значений, соответствующих голубой и зеленой области спектра, если состав  $x$  изменялся в пределах  $0.2 \div 0.43$  (более подробно см. [2–4,7]).

Спектры исследовались в интервале токов  $J = 0.02 \div 30$  мА на комплексе КСВУ-12 с компьютером IBM PC-486. Прямая и обратная ветви вольт-амперных характеристик (ВАХ) измерялись в интервале  $J = 1 \cdot 10^{-7} \div 30$  мА. Измерения динамической емкости области пространственного заряда по методике [8] позволяли определить распределение электрически активных центров в  $p$ -слое.

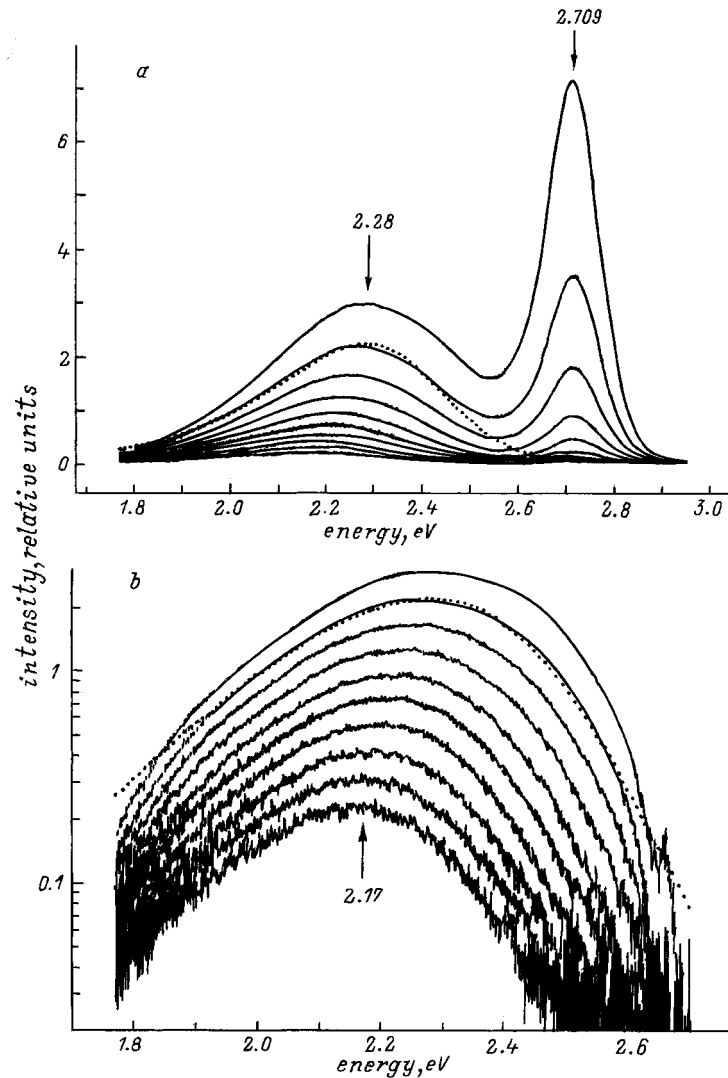
## 3. Экспериментальные результаты

### 3.1. Спектры при комнатной температуре.

Спектры одного из голубых СД при комнатной температуре и изменении тока в пределах  $J = 0.03 \div 0.1$  мА показаны на рис. 1. Спектральная полоса, максимум спектра которой сдвигается от  $\hbar\omega_{\max} = 2.20$  до  $2.34$  эВ с изменением напряжения  $V$  на диоде, связана с туннельной излучательной рекомбинацией. Эта полоса преобладает при малых  $J$ ; при  $V > 2.30$  В резко растет голубая полоса, преобладающая при больших токах.

На рис. 2 показано, что по мере того, как для разных СД максимум голубой полосы сдвигается в коротковолновую область (уменьшается доля In), растет (при равных напряжениях  $U$  на  $p$ - $n$ -переходе) относительная роль туннельной полосы.

На рис. 3 показаны зависимости  $\hbar\omega_{\max}$  и интенсивности  $I_{\max}$  от напряжения  $eU = e(V - JR_s)$  ( $R_s$  — последовательное сопротивление). Величина  $\hbar\omega_{\max}$  линейно



**Рис. 1.** Спектры туннельного излучения голубого СД № 3 при комнатной температуре, токах  $J = 35 \div 100$  мкА, напряжениях  $V = 2.16 \div 2.34$  В. *a* — линейный масштаб; *b* — логарифмический масштаб, голубая линия вычтена. Точками показана теоретическая аппроксимация при токах 60 и 90 мкА.

зависит от  $eU$ :  $\hbar\omega_{\max} = eU - D$ ;  $I_{\max}$  — экспоненциально:  $I_{\max} \sim \exp(eU/E_I)$ , с энергией в знаменателе показателя  $E_I = 70 \div 80$  мэВ.

### 3.2. Вольт-амперные характеристики.

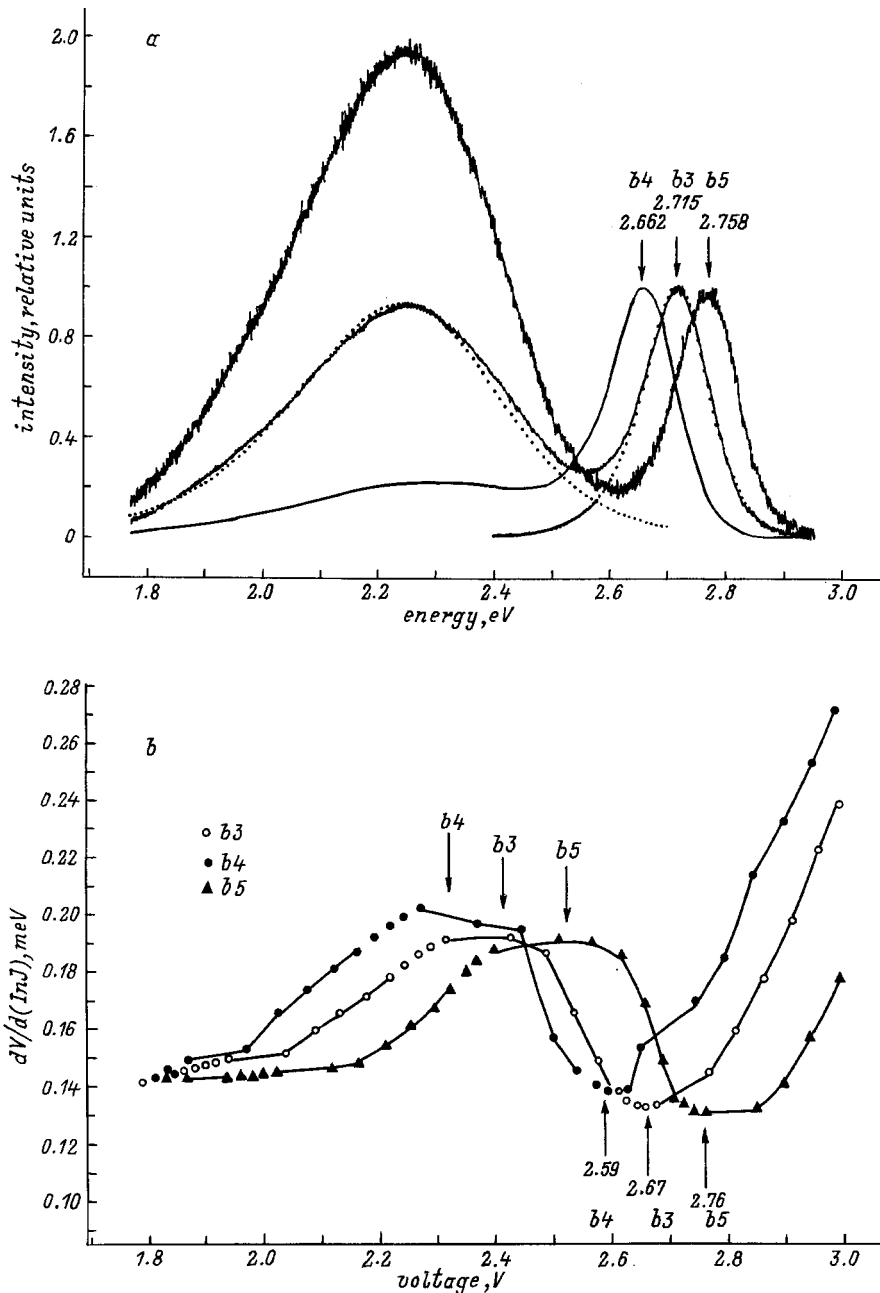
На рис. 4 показаны ВАХ в прямой и обратной ветви при 300 м 77 К, показано и изменение производной  $E_J = dV/d(\ln J)$  в области  $U = 1.8 \div 3.0$  В. Экспоненциальная часть при малых прямых токах  $J \sim \exp(eU/E_J)$  имеет в знаменателе показателя энергию  $E_J = 130 \div 140$  мэВ (при напряжении  $V = 1.5 \div 2.5$  В); аналогичные результаты были приведены в [9]. Величина  $E_J$  слабо зависит от  $T$  (155  $\div$  165 мэВ при 77 К). Эта часть соответствует туннельной компоненте тока. В этом интервале интенсивность туннельной полосы приблизительно квадратично

зависит от тока,  $I_{\max} \sim J^2$ . При больших напряжениях,  $V > 2.6 \div 2.7$  В, преобладает инжекционная компонента тока:

$$J \sim \exp(eU/mkT); \quad U = V - JR_s.$$

Следует заметить, что в интервале  $1.8 < V < 3.0$  В полулогарифмическая производная  $E_J(V) = dV/d(\ln J)$  имеет максимум вблизи  $V = 2.3 \div 2.5$  В и минимум вблизи  $V = 2.5 \div 2.6$  В, т. е. в области перехода спектров от туннельной к основной полосе (рис. 2). Сдвиг этих экстремумов от диода к диоду совпадает со сдвигом максимума голубой полосы. Чем выше  $\hbar\omega_{\max}$ , тем ниже минимум  $E_J$ , тем меньше  $R_s$ . Это является свидетельством в пользу изменения механизмов тока и излучения от туннелирования к инжекции в активную область.

На рис. 4 показаны также ВАХ при обратных напряжениях. Они имеют два экспоненциальных участ-



**Рис. 2.** *a* — спектры голубых СД при одинаковом напряжении  $V = 2.304$  В. Спектры нормированы на максимальное значение интенсивности голубой полосы излучения. Точками показана аппроксимация голубой и туннельной линий. *b* — зависимость производной  $dV/d(\ln J)$  от  $V$  для тех же СД.

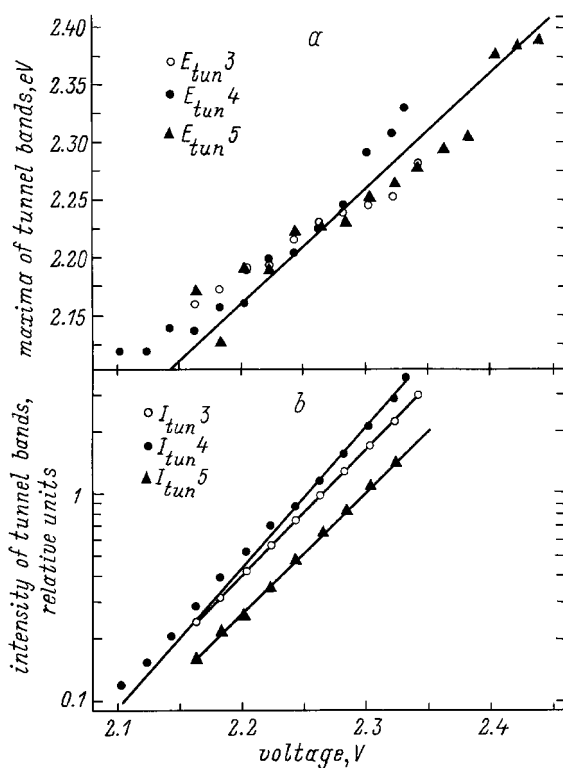
ка,  $J \sim \exp(-eV/E_J)$ , с энергиями в показателе  $E_J \approx 0.6$  эВ при напряжениях  $3.4 < -V < 6.8$  В и  $E_J \approx 0.96 \div 0.98$  эВ при напряжениях  $6.8 < -V < 10$  В. Значения  $E_J$  не зависели от  $T$ . Эти компоненты тока можно описать как туннельный пробой.

При напряжениях  $-eV > 10$  эВ  $\approx 3 \cdot E_g$  (GaN) началась ударная ионизация, наблюдалась люминесценция, обусловленная электронно-дырочной плазмой. Обратные токи и спектры излучения при ударной ионизации будут рассмотрены в следующей публикации.

### 3.3. Вольт-емкостные характеристики, распределение поля и потенциала.

Измерения зависимости емкости от напряжения,  $C(V)$ , и ее представление в двойных логарифмических координатах показали, что область пространственного заряда (ОПЗ) может быть представлена эквивалентно в виде двух последовательно соединенных емкостей: одной —  $C_n$ , величина которой слабо зависит от обратного напряжения, и другой —  $C_p$ , которая определяет изменение

емкости всей структуры. При отсутствии напряжения смещения часть ОПЗ, приходящаяся на  $C_n$ , составляет около 45% от общей ширины ОПЗ. Эта емкость обусловлена зарядом  $n$ -слоя, расширение которого ограничивается сильно легированной  $n$ -областью структуры. Изменение общей емкости структуры связано с расширением ее в сторону менее сильно легированной области  $p$ -типа (GaAlN:Mg). Часть контактного потенциала, относящаяся к области  $p$ -типа,  $\Delta V_p$ , определенная из кривых  $C(V)$ , была  $\Delta V_p \approx 0.5 \div 0.6$  В. Часть контактного потенциала, относящаяся к  $n$ -области, была  $\Delta V_n \approx 0.4 \div 0.5$  В; так что  $\Delta V_p + \Delta V_n \approx 0.9 \div 1.0$  В. Компенсированные слои, прилегающие к активной области, имеют с обеих сторон толщину порядка 10–15 нм. Часть контактного потенциала  $\Delta V_{qn}$  падает на этих квазинейтральных слоях, но большая часть,  $\Delta V_i \approx 2.0 \div 2.4$  В, падает на тонком (2.5 ÷ 4 нм) активном слое. Распределение потенциала такого типа образуется заряженными стенками на гетерограницах ( $p$ -AlGaIn/InGaIn и InGaIn/ $n$ -GaIn). Модель таких стенок, в частности, обсуждалась в [10]. Образование стенок может быть обусловлено восходящей диффузией примесей из-за деформационного потенциала, электрического поля и оборванных связей на границах слоев.



**Рис. 3.** *a* — зависимость положения максимумов туннельной полосы от напряжения для трех голубых СД; прямая линия:  $\hbar\omega = eU - eU_0$ ,  $U_0 = 0.04$  эВ. *b* — зависимость интенсивности туннельного излучения от напряжения для тех же СД; прямые линии — аппроксимация функцией  $I_{tun} = A \exp(|eU|/E_i)$ , значения  $E_{i(3,4,5)}$  для СД 3, 4 и 5 соответственно: 0.0712, 0.0640, 0.0740 эВ.

## 4. Обсуждение результатов

### 4.1. Распределение потенциала и поля, энергетическая диаграмма.

Модельное распределение потенциала и электрического поля в рассматриваемой структуре, полученное из анализа экспериментальных результатов, представлено на рис. 5. Следует заметить, что в активном слое существует сильное электрическое поле, до  $\mathcal{E} = 6 \cdot 10^6$  В/см. При увеличении прямого напряжения, начиная со значений  $U \approx \Delta V_i \approx 2.0 \div 2.2$  В, это поле уменьшается, но еще преобладает туннельная компонента тока. Такая ситуация иллюстрируется на рис. 6, *a*. Когда напряжение увеличивается до значений  $U \approx \Delta V_i + \Delta V_{qn} \approx 2.4 \div 2.6$  эВ, преобладает инжекционная компонента (рис. 6, *b*).

### 4.2. Туннельная излучательная рекомбинация.

Теория туннельной излучательной рекомбинации была разработана для гомогенных  $p$ - $n$ -переходов, вырожденных с обеих сторон [6,7]. Мы использовали ее с некоторыми изменениями для нашего более сложного случая многослойного гетероперехода. Спектр туннельного излучения может быть описан формулой

$$I(\hbar\omega) \sim [\hbar\omega / (E_g - \hbar\omega)] \times [(\hbar\omega - eU) / (\exp((\hbar\omega - eU)/mkT) - 1)] \times [\exp(-(4/3)(E_g - \hbar\omega)/E_0)^{3/2}], \quad (1)$$

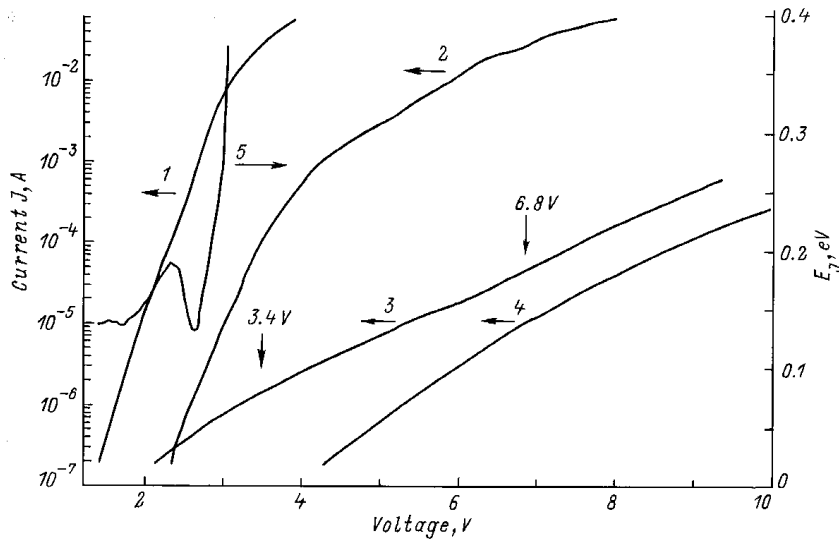
где  $E_g$  — эффективная ширина запрещенной зоны;  $m$  — безразмерный параметр, зависящий от отношения эффективных масс электронов и дырок;

$$E_0 = [(\hbar/(2m_{cv}^*)^{1/2})e\mathcal{E}]^{2/3} \quad (2)$$

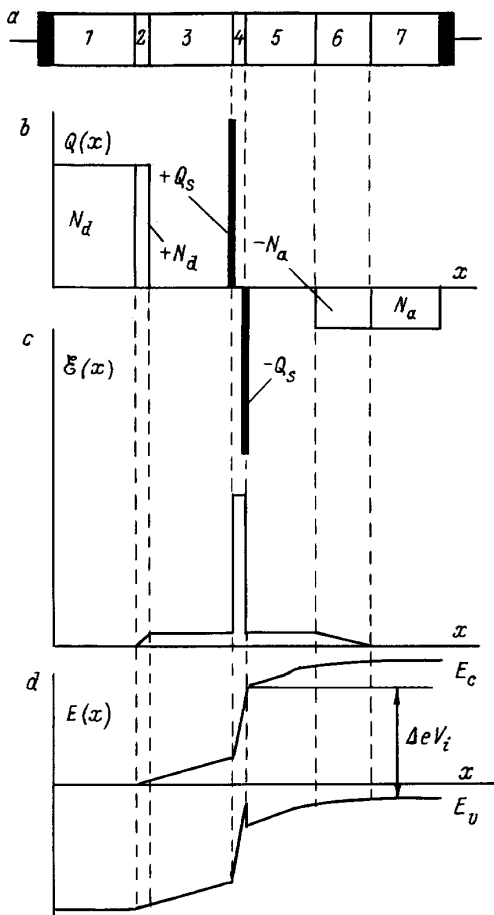
показатель в теории эффекта Франца–Келдыша;  $m_{cv}^*$  — приведенная эффективная масса;  $\mathcal{E}$  — электрическое поле, предполагаемое постоянным в области перекрытия волновых функций электронов и дырок.

Экспериментальные спектры на рис. 1, 2 были описаны формулой (1) подбором параметров для наилучшего согласия теории с опытом. Предварительно основная голубая полоса вычиталась из суммарных спектров (рис. 1, 2); при этом она аппроксимировалась теоретической кривой, как это было описано в [2–4]. Видно, что теоретические кривые хорошо описывают экспериментальные спектры. Подбор параметров показал, что величина  $eU$  в формуле (1) равна в пределах точности измеряемому напряжению на структуре; эффективная ширина запрещенной зоны, необходимая для согласия,  $E_g = 2.6 \div 2.9$  эВ; параметр  $m = 1.6$ .

Наиболее существенным результатом оказалось значение параметра  $E_0$ , необходимое для согласия:  $E_0 = 0.35 \div 0.42$  эВ. Отсюда была получена



**Рис. 4.** Вольт-амперные характеристики голубого СД № 3. 1, 2 — прямое напряжение, 3, 4 — обратное напряжение; 1, 3 —  $T = 300$  К; 2, 4 —  $T = 77$  К; 5 —  $E_d = dV/d(\ln J)$ .



**Рис. 5.** Схема гетероструктуры (а), распределения электрически активных центров и пространственного заряда (б), электрического поля (с) и энергетической диаграммы в равновесии. 1, 7 — квазинейтральные слои  $n$ - и  $p$ -GaN; 2, 6 — ионизированные доноры и акцепторы в области пространственного заряда; 3, 5 — компенсированные слои в  $n$ -GaN и  $p$ -AlGaIn; 4 — активный слой — квантовая яма InGaIn.

оценка поля, нужного для туннельного излучения:  $\mathcal{E} = (4 \div 6) \cdot 10^6$  В/см; эффективные массы в InGaIn рассчитывались пропорциональными  $E_g$  из значений для GaIn ( $m_c^* = 0.20m_0$  и  $m_v^* = 0.54m_0$  [11]). Большие значения  $\mathcal{E}$  согласуются с анализом распределения полей из емкостных измерений.

#### 4.3. Туннельные эффекты и флуктуации потенциала.

Модель излучательной рекомбинации для основной, голубой линии в спектрах принимала во внимание флуктуациями потенциала в двумерном активном слое, обусловленные неоднородностями твердого раствора, флуктуациями ширины ямы и кулоновскими полями примесей [2–4]. Оценки флуктуационных электрических полей из этой модели дают значения  $\mathcal{E} \approx (2 \div 3) \cdot 10^5$  В/см. Поля флуктуаций действуют совместно с электрическим полем  $p$ - $n$ -гетероперехода и должны влиять на туннельное излучение.

Мы не обсуждаем здесь вопросов об уровнях размерного квантования в структурах с большим электрическим полем в квантовой яме. Вне настоящей дискуссии и роль примесей (акцепторов Mg и доноров Si) в туннельных переходах. Вообще говоря, нужно принять во внимание и природу полосы люминесценции с максимумом 2.2 эВ, обусловленную дефектами и рассмотренную в [12]. Эти вопросы требуют отдельного рассмотрения.

## 5. Выводы

1. Спектры в области  $\hbar\omega = 2.1 \div 2.5$  эВ, наблюдаемые при малых токах ( $J < 0.2$  мА) в излучении голубых светодиодов из структур InGaIn/AlGaIn/GaN с тонкой

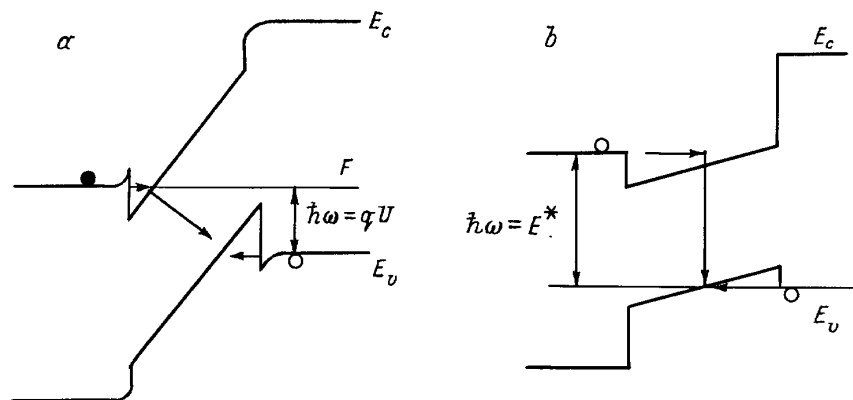


Рис. 6. Энергетическая диаграмма гетероструктуры при прямых смещениях; *a* — туннелирование; *b* — инжекция.

областью пространственного заряда, обусловлены туннельной излучательной рекомбинацией электронов и дырок в активном слое InGaN.

2. Распределение зарядов в этих структурах включает не только области пространственного заряда, но и компенсированные квазинейтральные слои и заряженные стенки на гетерограницах. Это распределение обуславливает большое электрическое поле в квантовой яме, до  $(4 \div 6) \cdot 10^6$  В/см.

3. Модель диагонального туннелирования качественно описывает спектры и их изменение с изменением напряжения на структуре.

4. Предложенная энергетическая диаграмма описывает люминесцентные и электрические свойства светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN.

Авторы приносят глубокую благодарность д-ру Н. Накамуре за присланные в МГУ светодиоды, а также С.С. Шумилу за помощь в компьютерном обеспечении.

## Список литературы

- [1] A.E. Yunovich, A.N. Kovalev, V.E. Kudryashov, F.I. Manyachin, A.N. Turkin, K.G. Zolina. *Abstracts of Mat. Res. Soc. Fall Meeting 1996, Sympos. N* (Boston, USA, 1996) Abstr. N 9–37, p. 347.
- [2] K.G. Zolina, V.E. Kudryashov, A.N. Turkin, A.E. Yunovich, S. Nakamura. *MRS Int. J. Nitride Semic. Res.*, 1/11; <http://nsr.mij.mrs.org> 1 11.
- [3] A.N. Kovalev, V.E. Kudryashov, F.I. Manyachin, A.N. Turkin, K.G. Zolina, A.E. Yunovich. *Abstracts 23rd Int. Symp. on Semiconductor Compounds* (St.Petersburg, 1996) Abstr. 03.P3.04.
- [4] К.Г. Золина, В.Е. Кудряшов, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович. *ФТП*, **31** (1997).
- [5] А.Э. Юнович, А.Б. Ормонт. *ЖЭТФ*, **51**, 1292 (1966).
- [6] T.N. Morgan. *Phys. Rev.*, **148**, 890 (1966).
- [7] S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, T. Yamada, T. Mukai. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, Part 2, L1332 (1995).
- [8] Ф.И. Маняхин. *Измер. техника*, **11**, 49 (1996).

- [9] J. Zeller, P.G. Eliseev, P. Sartori, P. Perlin, M. Osinski. *MRS Symp. Proc.*, **395**, 937 (1996).
- [10] A. Satta, V. Fiorentini, A. Bosin, F. Meloni. *MRS Symp. Proc.*, **395**, 515 (1996).
- [11] U. Kaufmann, M. Kunser, C. Mers, I. Akasaki, H. Amano. *MRS Symp. Proc.*, **395**, 633 (1996).
- [12] D.M. Hoggmann, D. Kovalev, G. Steude, D. Volm, B.K. Meyer, C. Xavier, T.Momteiro, E. Pereira, E.N. Mokhov, H. Amano, I. Akasaki. *MRS Symp. Proc.*, **395**, 619 (1996).

Редактор В.В. Чалдышев

## Tunnelling in light-emitting diodes based on InGaN/AlGaN/GaN heterostructures with quantum wells

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

M.V. Lomonosov Moscow State University, 119899 Moscow, Russia

E-mail: [yunovich@scon175.phys.msu.su](mailto:yunovich@scon175.phys.msu.su)