

Люминесценция $p-n$ -гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN при ударной ионизации

© А.Н. Ковалев, Ф.И. Манягин, В.Е. Кудряшов*, А.Н. Туркин*, А.Э. Юнович*

Московский институт стали и сплавов,
119235 Москва, Россия

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

(Получена 22 мая 1997 г. Принята к печати 28 мая 1997 г.)

Исследованы спектры люминесценции $p-n$ -гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN при обратном смещении, достаточном для ударной ионизации. Инжекционная люминесценция светодиодов с такими структурами была изучена ранее. В активном слое InGaN гетероструктур существует сильное электрическое поле, и при малом обратном смещении преобладает туннельная составляющая тока. Лавинный пробой начинается при напряжениях $V_{th} > 8 \div 10$ В, т.е. $\sim 3E_g$ (E_g — ширина запрещенной зоны), в отличие от слабо легированных структур. Спектры излучения имеют коротковолновый край, соответствующий ширине запрещенной зоны GaN (3.40 эВ), и максимумы в области $2.60 \div 2.80$ эВ, соответствующие максимумам спектров инжекционной люминесценции в активном слое. Длинноволновый край спектров в области $1.7 \div 1.8$ эВ может быть связан с глубокими уровнями рекомбинации. Обсуждаются механизмы рекомбинации горячей электронно-дырочной плазмы в сильных электрических полях $p-n$ -гетероструктур.

1. Введение

Спектры инжекционной люминесценции сверхярких голубых и зеленых светодиодов на основе гетероструктур из InGaN/AlGaN/GaN были изучены в [1–5]. Представлялось интересным исследование люминесценции этих структур при ударной ионизации с целью получить дополнительную информацию о механизмах, влияющих на свойства и эффективность светодиодов (СД).

Люминесценция при ионизационном пробое в GaN первоначально была изучена в случаях $i-n$ - и МДП диодов [6–9]. Было показано, что при обратном смещении электроны туннелируют из металла в n -область структуры и при достаточно высоком напряжении наступает ударная ионизация и лавинный пробой.

В активном слое голубых СД на основе InGaN/AlGaN/GaN существует сильное электрическое поле, что следует из спектральных и емкостных измерений [3–5].

Сильно легированная p -область и тонкий активный слой отличают эти СД от первоначальных структур [6–9]. В настоящей статье описаны спектры люминесценции голубых СД при пробое и проанализированы электрические и люминесцентные свойства структур на основе InGaN/AlGaN/GaN при обратном смещении.

2. Экспериментальные результаты

Спектры люминесценции и электрические свойства СД на основе структур InGaN/AlGaN/GaN с тонким активным слоем InGaN были описаны в [1,2]. Для измерений были отобраны голубые СД с известными параметрами спектров инжекционной люминесценции [2–4]. Обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ) голубого диода (образец 3) показаны на рис. 1, *a*. Основная

часть ВАХ может быть аппроксимирована двумя экспонентами типа

$$J \sim \exp(|eV|/E_J) \quad (1)$$

с параметрами E_J , изменяющимися вблизи напряжений $V = 5 \div 7$ В в диапазоне $0.8 \div 0.9$ эВ, изменение наклонов в этой области четко выявляется на полулогарифмических производных $E_J = dV/d(\ln J)$ (см. рис. 1, *a*). Значения E_J почти не зависели от температуры в диапазоне $T = 80 \div 300$ К. Эта часть ВАХ определяется туннельной компонентой тока. Заметим, что изменения на обратных ветвях ВАХ диодов из GaN вблизи $|V| = 5 \div 6$ В наблюдались и другими авторами [10,11], но этому не придавалось значения.

Ударная ионизация начинается при более высоких напряжениях, $|V| > 8 \div 10$ В, как можно заключить из минимума вольт-фарадных ($C-V$) характеристик (на рис. 1, *b* показан максимум кривой $1/C^2 = f(V)$). Люминесценция была обнаружена при пороговом напряжении $V_{th} \simeq -11$ В. Спектры были сняты при токах $|J| < 5$ мА, при которых голубые диоды не выходили из строя. Излучательная рекомбинация служила указанием на генерацию неосновных носителей в результате ударной ионизации. Люминесценция визуально была неоднородной, что связано с микроплазменным характером тока.

Спектры пробойной люминесценции для трех СД показаны на рис. 2. На этом рисунке также показаны спектры инжекционной люминесценции. Интенсивность пробойной люминесценции на $6 \div 7$ десятичных порядков меньше, чем инжекционной, что показано масштабом на осях ординат. Широкая полоса люминесценции видна в области $1.7 \div 3.5$ эВ. В области высоких энергий край спектра примерно соответствует ширине запрещенной зоны в GaN при комнатной температуре $E_g = 3.4$ эВ.

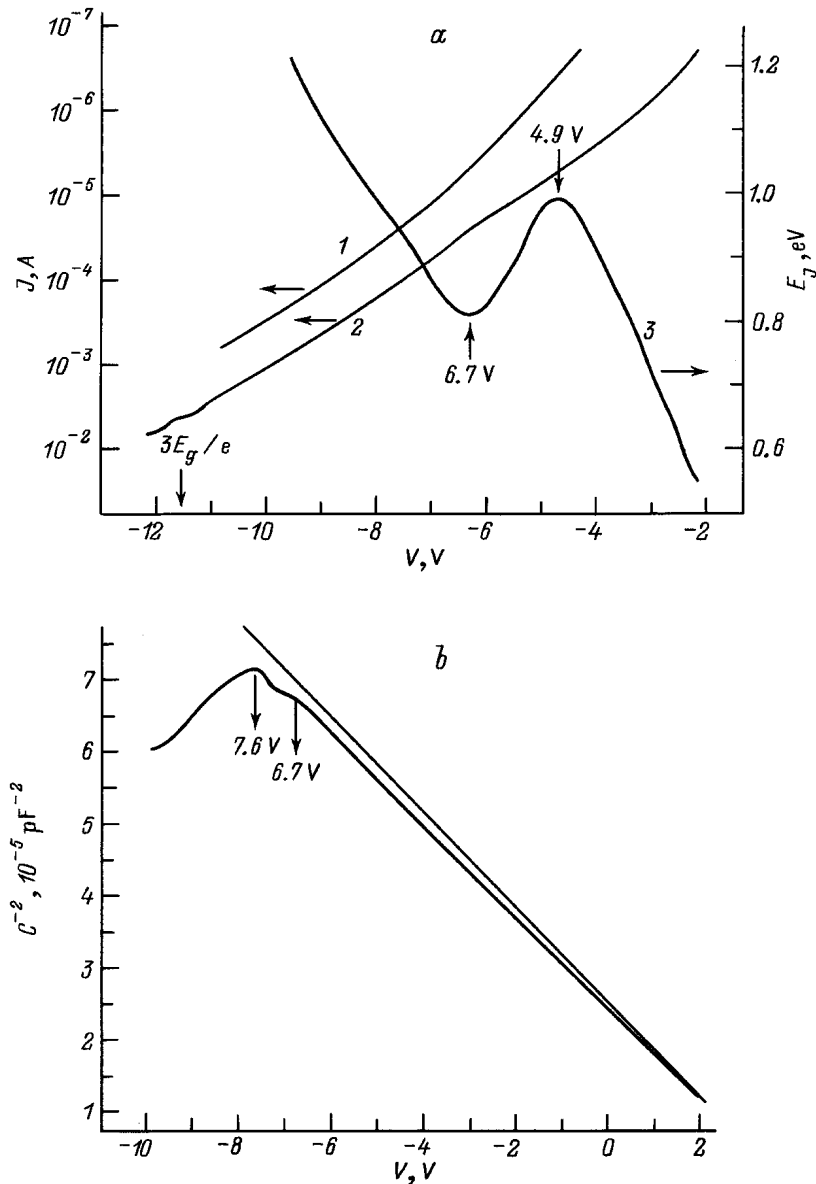


Рис. 1. *a* — вольт-амперные характеристики голубого диода на основе гетероструктуры InGaN/AlGaIn/GaN (образец 3) при обратном смещении, температуре $T = 77$ (1) и 300 К (2), а также $E_j(V) = dV/d(\ln J)$ при $T = 300$ К (3). *b* — вольт-фарадная характеристика голубого диода на основе гетероструктуры InGaN/AlGaIn/GaN (образец 3) при обратном смещении.

Плечо при энергии 3.2эВ соответствует энергии $E_g - \Delta E_A$, где ΔE_A — энергия ионизации акцепторов Mg. Максимумы в области 2.6÷2.8эВ соответствуют максимумам инжекционной люминесценции. Широкие максимумы в области 2.2÷2.3эВ соответствуют хорошо известной "желтой полосе" в *n*-GaIn, связанной с донорно-акцепторными парами и (или) с двойными уровнями доноров [12].

Распределение плотности зарядов в слабо легированной *p*-области структуры было определено из измерений динамической емкости (см. метод в [13]). Вольт-фарадные характеристики в координатах $1/C^2 = f(V)$ до пробоя имеют более сложный вид, чем линейная зависимость.

3. Обсуждение результатов

3.1. Для описания вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик следует предложить модель исследованных структур, распределение зарядов и электрических полей, энергетическая диаграмма которых при обратном смещении показана на рис. 3. Активный слой InGaIn расположен между двумя компенсированными областями протяженностью примерно 10 нм (соответственно со стороны *n*- и *p*-областей). Анализ вольт-фарадных измерений указывает на наличие заряженных стенок на границах активного слоя и компенсированных областей. Концентрация зарядов в *p*-области вблизи гетерограницы составляет $(1 \div 2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (тол-

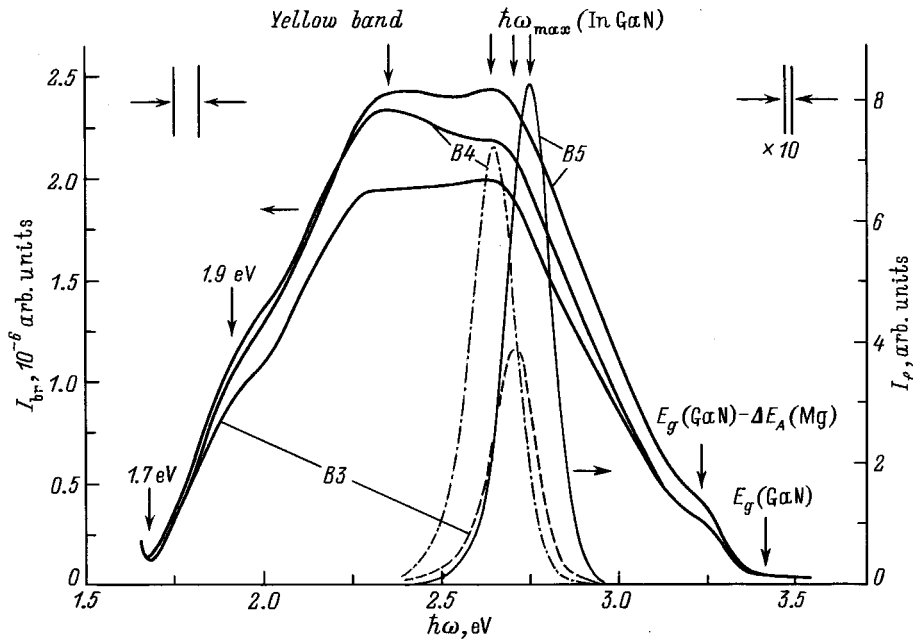


Рис. 2. Спектры люминесценции при ионизационном пробое (I_{br}) в голубых СД на основе гетероструктур $\text{InGaN}/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ (ток $J = -4$ мА, левая шкала) и спектры инжекционной люминесценции (I_f) (ток $J = +15$ мА, правая шкала). B3, B4, B5 — разные образцы.

шина 11 нм), в n -области — $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (толщина 1.5 нм).

Электрическое поле в активном слое InGaN велико, $\mathcal{E} \simeq 10^7$ В/см, значения полей в смежных слоях $\mathcal{E} \simeq (2 \div 4) \cdot 10^6$ В/см.

3.2. Туннельная компонента обратного тока может быть описана теорией вольт-амперных характеристик резких сильно легированных $p-n$ -переходов в прямозонных полупроводниках [14]

$$J \sim (V - V_k) \exp[B(e|V|/2E_g)], \quad (2)$$

$$B = (\pi/2)^{3/2} (2m_{cv}^*/\hbar^2)^{1/2} (E_g^{3/2}/eE),$$

$$m_{cv}^* = m_c^* m_v^* / (m_c^* + m_v^*),$$

где V_k — контактная разность потенциалов; E_g — эффективная ширина запрещенной зоны; m_c^* , m_v^* — эффективные массы. Подставив параметры $m_c^* = 0.22m_0$, $m_v^* = 0.54m_0$, $E_g = 3.4$ эВ, получим для значений $V_k = 3.2$ эВ, $E_f = 0.8 \div 0.9$ эВ оценку электрического поля в активной области $\mathcal{E} \simeq 2 \cdot 10^7$ В/см.

3.3. Пороговое значение напряжения ударной ионизации связано с концентрацией заряженных примесей в $p-n$ -переходе эмпирическим соотношением [15]

$$V_{th} = 60(E_g/1.1)^{3/2} (N/10^{16})^{-3/4}. \quad (3)$$

Подставив значения параметров $E_g = 3.4$ эВ, $V_{th} = 11.5$ В, мы получаем из этого соотношения значение $N \simeq N_A \simeq 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Это значение находится в согласии с анализом емкостных измерений и оценкой распределения электрических полей [3,5].

Ударная ионизация происходит благодаря туннелированию электронов из валентной зоны p -области в активную область InGaN с последующим дрейфом в смежные квазинейтральные и заряженные n -области структуры.

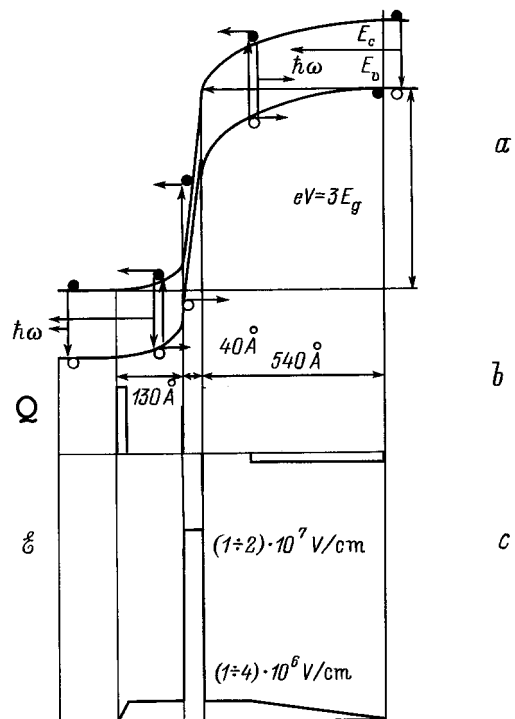


Рис. 3. Модель энергетической диаграммы (a), распределения электрических зарядов Q (b) и полей \mathcal{E} (c) в $p-n$ -гетероструктурах на основе $\text{InGaN}/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$.

В сильном поле они ускоряются и приобретают энергию $\sim 3E_g$, достаточную для ударной ионизации.

Коэффициент ударной ионизации электронов можно предположить много большим по сравнению с коэффициентом ударной ионизации дырок, $\alpha_n \gg \alpha_p$. Для оценки α_n нужно знать среднюю длину свободного пробега электронов λ_{ff} и эффективную энергию фононов $k\theta$, принимая во внимание дополнительные высокоэнергетичные экстремумы в зоне проводимости. Экстремум между Λ - и M -точками составляет 5.5 эВ, а в Γ -точке 5.6 эВ [16]. Можно предположить, что изменения наклонов ВАХ при $|V| = 5 \div 6$ В связаны с вероятностью попадания электронов в экстремумы в точке Γ с большими эффективными массами, переходы в непрямые экстремумы менее вероятны. Проблема горячих электронов в GaN еще далека от разрешения.

3.4. Можно объяснить малую эффективность люминесценции при пробое, предполагая, что электронно-дырочные пары разделяются электрическим полем за время $w/v_T \simeq 10^{-13} \div 10^{-14}$ с (тепловая скорость электронов $v_T \simeq 2 \cdot 10^7$ см/с), и лишь малая часть электронов проходит до внешней границы n -области пространственного заряда и рекомбинирует в нейтральной области. Если излучательные времена порядка 10^{-9} с, то лишь малая часть пар может излучательно рекомбинировать в структуре.

Спектральные максимумы в области 2.2 \div 2.3 эВ, связанные с излучательной рекомбинацией донорно-акцепторных пар и (или) двойных доноров, наблюдались ранее в n -GaN [12,17]. Это — свидетельство того, что большая часть излучательной рекомбинации происходит благодаря электронам, рожденным вблизи n -области структуры. Эта рекомбинация является следствием некоторых структурных дефектов, сильные электрические поля и ударная ионизация концентрируются около дефектов.

Плечо при энергии 3.2 эВ может быть связано с оптическим переходом на акцептор Mg. Таким образом, часть дырок, рожденных при ударной ионизации, может рекомбинировать с электронами в p -области структуры.

4. Заключение

1. В голубых СД на основе p - n -гетероструктур из InGaN/AlGaIn/GaN обнаружена пробойная люминесценция при обратных напряжениях $|eV| \simeq 11 \div 12$ эВ $\simeq 3E_g$, достаточных для ударной ионизации, интенсивность излучения на 6 \div 7 порядков меньше интенсивности инжекционной люминесценции. Высокоэнергетичный край спектров соответствует ширине запрещенной зоны GaN (3.4 эВ).

2. В активном слое InGaN гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN при обратных смещениях создается сильное, до 10^7 В/см, электрическое поле, в прилегающих слоях поля достигают $(2 \div 4) \cdot 10^6$ В/см. При обратном смещении, меньшем 10 В, преобладает

туннельная составляющая тока, туннелирование электронов вызывает ударную ионизацию при смещении $\gtrsim 3E_g/e$. Особые точки вольт-амперных характеристик вблизи (5 \div 6) В обусловлены переходами электронов в вышележащие экстремумы зоны проводимости GaN.

3. Низкая эффективность пробойной люминесценции обусловлена разделением электронов и дырок сильными электрическими полями. Широкая полоса спектров электролюминесценции (2.14 \div 3.4 эВ) соответствует рекомбинации носителей главным образом на внешних границах области пространственного заряда.

Авторы благодарят доктора Ш. Накамуру за образцы, любезно предоставленные для исследования в МГУ, и К.Г. Золину за помощь в работе.

Список литературы

- [1] S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, T. Yamada, T. Mukai. Japan. J. Appl. Phys., **34**, pt. 2, L1332 (1995).
- [2] K.G. Zolina, V.E. Kudryashov, A.N. Turkin, A.E. Yunovich, S. Nakamura. MRS Int. J. of 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. Zolina, A.E. Yunovich. *Abstr. of 23rd Int. Symp. on Semicond. Comp.*, ISCS-23 (St.-Peterburg, 1996) abstr. 03.P3.04.
- [4] К.Г. Золина, В.Е. Кудряшов, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович. ФТП, **31**, 1055 (1997).
- [5] A.E. Yunovich, A.N. Kovalev, V.E. Kudryashov, F.I. Manyachin, A.N. Turkin, K. Zolina. *Abstr. of MRS Fall Meeting* (Boston, 1996) symp. N, abstr. N9-37, 347 (1996).
- [6] J.I. Pankove, E.A. Miller, J.E. Berkeyheiser. J. Luminesc., **5**, 84 (1972); **6**, 482 (1973).
- [7] J.I. Pankove, M. Lampert. Phys. Rev. Lett., **33**, 361 (1974).
- [8] Л.Н. Михайлов, Ю.К. Шалабутов, М.Д. Шагалова, В.Г. Сидоров, Л.Н. Василищев. ФТП, **9**, 1808 (1975).
- [9] V.A. Dmitriev, N.I. Kuznetsov, K.G. Irvine, C.H. Carter, Jr. *MRS Symp. Proc.*, **395**, 909 (1996).
- [10] R.P. Vaudo, I.D. Goepfert, T.D. Moustakas, D.M. Beyea, T.J. Frey, K. Meehan. J. Appl. Phys., **79**, 2779 (1996).
- [11] R.J. Moinar, R. Singh, T.D. Moustakas. Appl. Phys. Lett., **66**, 268 (1995).
- [12] D.M. Hoffmann, D. Kovalev, G. Steude, D. Volm, B.K. Meyer, C. Xavier, T. Monteiro, E. Pereira, E.N. Mokhov, H. Amano, I. Akasaki. *MRS Symp. Proc.*, **395**, 619 (1996).
- [13] Ф.И. Маняхин. Измер. техника, **11**, 49 (1996).
- [14] Г.Е. Пикус. *Теория полупроводниковых приборов* (М., Наука, 1965) с. 347.
- [15] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 1, с. 111.
- [16] W.E. Carlos, J.A. Freitas, M. Azif Khan, D.T. Olson, J.N. Kuznya. Phys. Rev. B, **48**, 17 878 (1993).
- [17] F.A. Ponce. MRS Bulletin, **22**, 51 (1997).

Редактор Л.В. Шаронова

Impact ionization luminescence of $p-n$ heterostructures InGaN/AlGaN/GaN

A.N. Kovalev, F.I. Manyakhin, V.E. Kudryashov*,
A.N. Turkin*, A.E. Yunovich*

Moscow Institute of Steel and Alloys,
119899 Moscow, Russia

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

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