

УДК 538.958

ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ InGaN/GaN-ДИОДАХ*

В. Т. Шамирзаев¹, В. А. Гайслер^{1,2}, Т. С. Шамирзаев^{2,3}

¹Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

²Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

³Уральский федеральный университет,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
E-mail: tim@isp.nsc.ru

Демонстрируется отрицательное дифференциальное сопротивление в ультрафиолетовых лазерных InGaN/GaN-диодах. Переключение между нижней и верхней ветвями S-образной вольт-амперной характеристики приводит к изменению мощности оптического излучения на шесть порядков при увеличении тока от 3 до 15 мА. Появление отрицательного дифференциального сопротивления объясняется сверхлинейной инжекцией носителей заряда одного знака в высокоомную квантовую InGaN-яму.

Ключевые слова: лазерный диод, отрицательное дифференциальное сопротивление.

DOI: 10.15372/AUT20160505

Введение. В последние годы изучение полупроводниковых гетероструктур на основе соединений нитрида галлия — одно из магистральных направлений физики полупроводников. Использование этих широкозонных материалов позволило разработать высокоэффективные светодиодные и лазерные InGaN/GaN-излучатели ультрафиолетового диапазона, которые широко применяются для оптической записи информации [1]. В настоящее время исследования светоизлучающих InGaN/GaN-гетероструктур направлены главным образом на увеличение их оптической мощности и эффективности излучения при высоких уровнях накачки [2–6]. Гораздо меньше внимания уделяется характеристикам гетероструктур при небольших плотностях тока. Между тем наличие в таких структурах встроенных в *p-n*-переход нелегированных InGaN-областей в условиях экспоненциальной зависимости текущего через *p-n*-переход тока от напряжённости приложенного к нему электрического поля [7] может приводить к сильным, но практически неизученным нелинейным эффектам уже при малых уровнях накачки. В лазерных диодах (ЛД) на основе InGaN/GaN было обнаружено стимулированное линейно поляризованное излучение при низких (существенно ниже порога лазерной генерации) уровнях протекающего через ЛД тока [8, 9]. Согласно расчётам, приведённым в [10], другим проявлением нелинейности в лазерных структурах должно быть немонотонное поведение дифференциального сопротивления.

Задача данной работы — экспериментальная демонстрация отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) в ультрафиолетовых ($\lambda = 407$ нм) лазерных InGaN/GaN-диодах, которое сопровождается сильной бистабильностью их излучательных свойств. Рост тока I от 3 до 15 мА при прохождении участка ОДС на вольт-амперной характеристике (ВАХ) приводит к увеличению мощности излучения диода на шесть порядков (от $5 \cdot 10^{-12}$ до $3 \cdot 10^{-6}$ Вт).

*Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-02-00033).

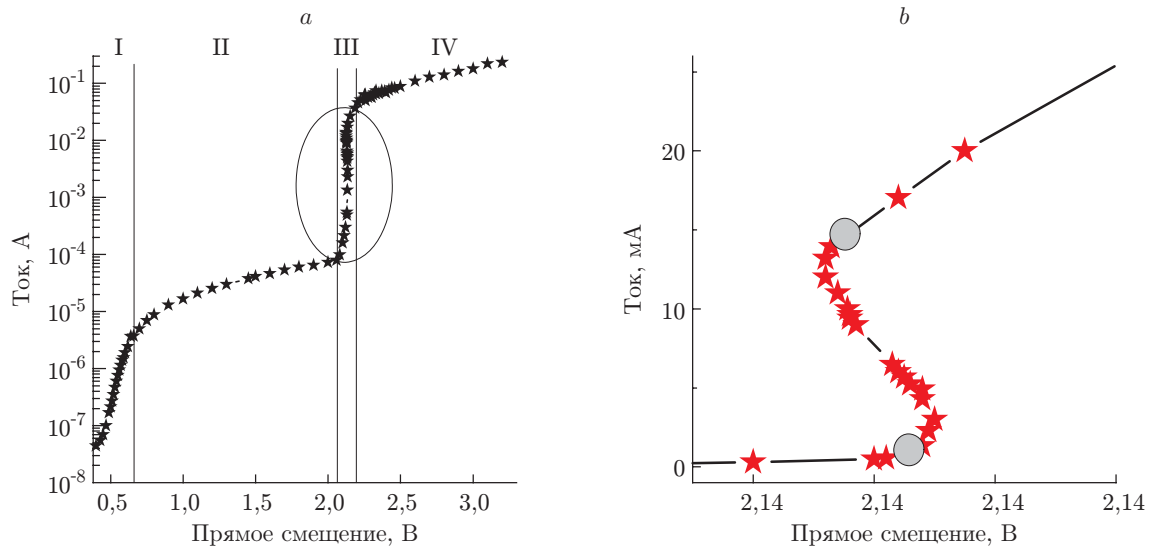


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика ЛД: *a* — прямая ветвь (S-образный участок выделен овалом); *b* — участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (кружками отмечены устойчивые положения в точках с током 0,9 мА на нижней и 15,3 мА на верхней ветвях S-образной характеристики при подключении ЛД к источнику напряжения)

Условия эксперимента. В предлагаемой работе исследовались коммерческие лазерные InGaN/GaN-диоды производства фирмы "Sanuo", аналогичные изученным в [8, 9]. Спектры электролюминесценции измерялись при комнатной температуре на установке, построенной на основе спектрометра SP2500A фирмы "Acton", оснащённого охлаждаемой жидким азотом ПЗС-камерой Spes-10 с повышенной чувствительностью в ультрафиолетовой области спектра. Мощность излучения ЛД контролировалась измерителем оптической мощности PM100USB фирмы "Thorlabs" в условиях прямого контакта ЛД с фотодиодным сенсором [11].

Результаты и обсуждение. Зависимость текущего через лазерную структуру тока от приложенного прямого напряжения U представлена на рис. 1, *a*. На графике можно выделить несколько участков. На участке I в области малых напряжений ($U < 0,7$ В) и токов ($I < 10^{-5}$ А) положительная ветвь ВАХ описывается экспоненциальной функцией

$$I \propto \exp\left(\frac{eU}{2kT}\right), \quad (1)$$

где kT — тепловая энергия, e — элементарный заряд. На участке II при повышении напряжения от 0,7 до 2,1 В эта зависимость сменяется медленным ростом тока. При дальнейшем увеличении напряжения на ВАХ появляется участок III с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рост тока на 10 мА сопровождается падением напряжения на 10 мВ), что видно на рис. 1, *b*. И наконец, на участке IV ВАХ при $U > 2,15$ В ток линейно растёт с напряжением. При переключении питания лазера в режим источника напряжения на участке III ВАХ лазерный диод имеет только два устойчивых положения в точках с током 0,9 мА на нижней и 15,3 мА на верхней ветвях S-образной характеристики.

Ватт-амперная характеристика ЛД приведена на рис. 2, *a*. Пороговый ток, при котором регистрировалось излучение света мощностью 4 пВт, был равен 1,9 мА и соответствовал началу области ОДС, как это видно на рис. 2, *b*. В области ОДС мощность излучения экспоненциально возрастает до 20 мкВт при токе 15 мА. В диапазоне токов 15–80 мА мощность почти линейна, а при токе > 80 мА зависимость мощности становится сверхлинейной.

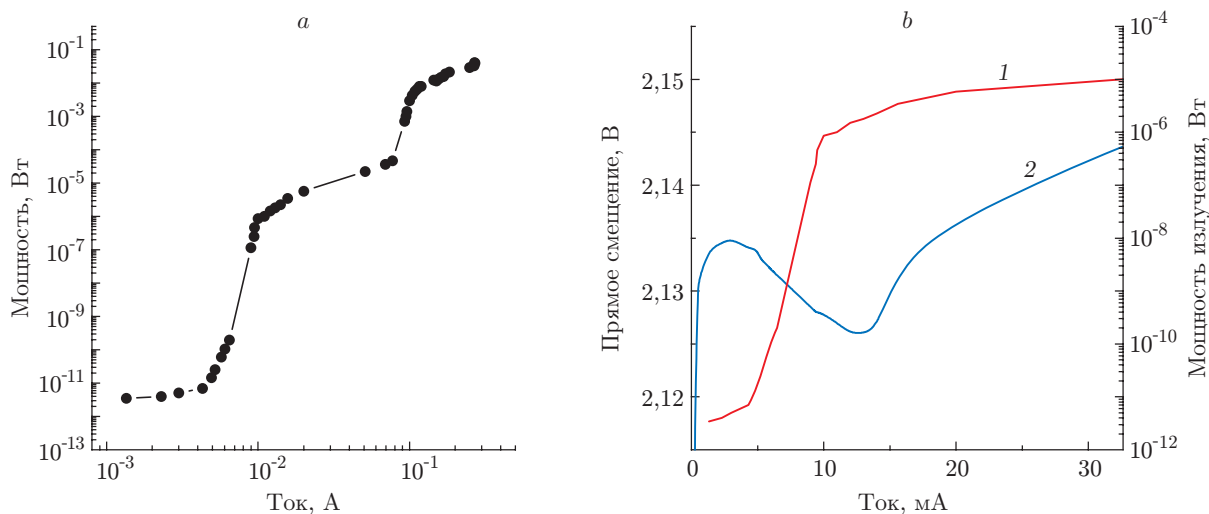


Рис. 2. Ватт-амперные зависимости ЛД: *a* — мощности излучения от тока, текущего через структуру; *b* — в области ОДС (кривая 1 — ватт-амперная характеристика, кривая 2 — вольт-амперная характеристика)

Спектры электролюминесценции ЛД, измеренные при комнатной температуре, приведены на рис. 3. При незначительном превышении порогового тока (5 мА) в спектре возникает широкая полоса *D* (500–550 нм), обусловленная рекомбинацией носителей заряда через состояния дефектов в области квантовой InGaN-ямы [12]. Небольшое повышение тока (до 6 мА) приводит к появлению полосы *L* с максимумом 407 нм, интенсивность которой резко увеличивается с ростом тока, как это видно на рис. 3, *a*. При токе 7,2 мА интегральная интенсивность полосы *L* сравнивается с интенсивностью полосы *D*, а при токе 8 мА интенсивность полосы *L* превышает интенсивность полосы *D* более чем на два порядка. Необходимо отметить, что рост интенсивности излучения на несколько порядков сопровождается незначительным уменьшением ширины полосы с максимумом 407 нм. Резкое сужение полосы *L* происходит только при токах, превышающих 90 мА (рис. 3, *b*).

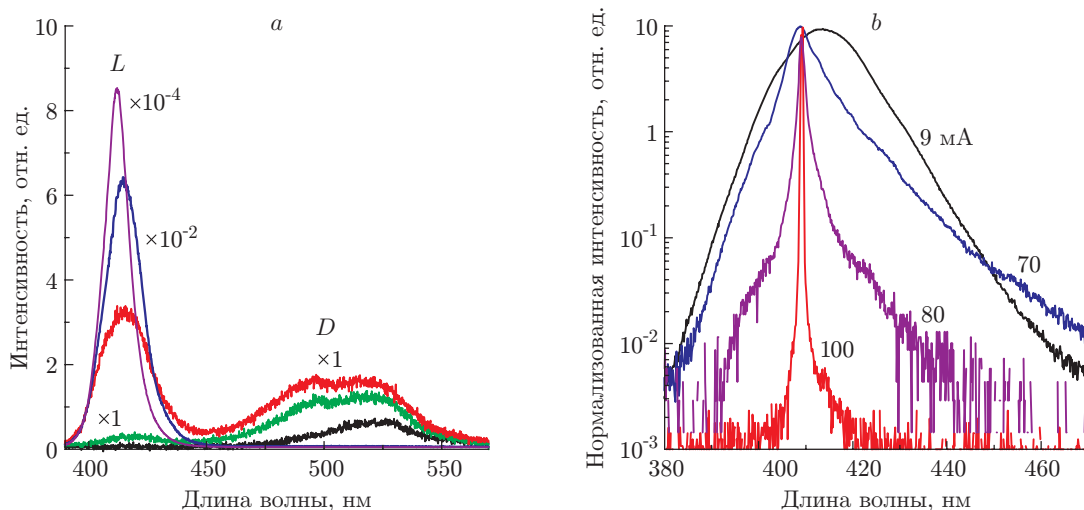


Рис. 3. Спектры электролюминесценции ЛД, измеренные при комнатной температуре: *a* — токи, соответствующие участку с ОДС (сверху вниз при 15, 8, 7, 6 и 5 мА); *b* — сравнение форм спектров, измеренных при разных токах

Следуя подходу, предложенному в работе [13], мы оценили максимальную внешнюю квантовую эффективность в полосе L , используя выражение

$$\eta = \frac{Pe}{\hbar\omega I}, \quad (2)$$

где P — мощность излучения, а $\hbar\omega$ — энергия излучаемых фотонов. Максимальная эффективность достигает 7 % при токе 0,26 А.

Рассмотрим механизмы протекания тока через ЛД, которые определяют его характеристики. На начальных участках (I и II) с ростом напряжения ВАХ демонстрируется экспоненциальное увеличение тока, переходящее в насыщение. Такое поведение связано с безызлучательной рекомбинацией протекающих через гетероструктуру носителей заряда на глубоких уровнях в области пространственного заряда p - n -перехода [14]. На этих участках ВАХ излучение из гетероструктуры не наблюдается. Механизм протекания тока резко изменяется на участке ВАХ с ОДС (III). Для объяснения электрических и оптических характеристик ЛД на участке с ОДС предлагаем следующую модель. Область p - n -перехода ЛД можно разделить на три зоны: гетеропереход p -AlGaIn/InGaIn, квантовая яма (КЯ) InGaIn и гетеропереход InGaIn/ n -GaIn [10]. Таким образом, напряжение U , приложенное к p - n -переходу, распределяется между этими зонами: $U = U_p + U_{\text{КЯ}} + U_n$. Проницаемость гетеропереходов для носителей зарядов разного знака не одинакова. Соотношение коэффициентов инжекции электронов и дырок в InGaIn-КЯ зависит от высоты барьеров, созданных разрывами зон на гетерограницах, температуры и напряжения смещения. Предположим, что при напряжении смещения, которое приложено к p - n -переходу в начале участка III ВАХ, проницаемость перехода p -AlGaIn/InGaIn для дырок выше, чем проницаемость перехода InGaIn/ n -GaIn для электронов и, следовательно, InGaIn-КЯ заполнена дырками. Небольшое повышение напряжения U_n на переходе InGaIn/ n -GaIn сопровождается увеличением инжекции электронов в КЯ, что, в свою очередь, соответствует появлению люминесценции из InGaIn-КЯ, т. е. дополнительного канала рекомбинации носителей заряда. При малом уровне инжекции практически все электроны захватываются на состоянии дефектов в области InGaIn-КЯ, что приводит к появлению полосы D в спектрах электролюминесценции. Однако с ростом инжекции электронов дефектный канал рекомбинации быстро насыщается, и в спектрах начинает доминировать полоса L , связанная с рекомбинацией электронов и дырок, находящихся на уровнях размерного квантования InGaIn-КЯ. Рост тока рекомбинации в InGaIn-КЯ сопровождается уменьшением её электрического сопротивления, что приводит к перераспределению напряжения в различных областях p - n -перехода: $U_{\text{КЯ}}$ снижается, а U_p и U_n возрастают. Сопротивление на переходе p -AlGaIn/InGaIn меньше, чем на переходе InGaIn/ n -GaIn, и основное возрастание приходится на U_n . Поскольку протекание электронов через барьер, созданный разрывами зон на гетерогранице InGaIn/ n -GaIn, экспоненциально зависит от высоты барьера (от напряжения, падающего на переходе), увеличение U_n приводит к резкому росту инжекции электронов в InGaIn-КЯ и запуску механизма положительной обратной связи, ответственного за появление ОДС. В таком режиме ток через p - n -переход ограничен скоростью инжекции электронов в КЯ с плотностью дырок, сильно превышающей плотность электронов. Когда плотность электронов, инжектированных в InGaIn-КЯ, сравнивается с плотностью инжектированных в неё дырок, процесс сверхлинейной инжекции электронов прекращается. В данный момент на ВАХ заканчивается участок отрицательного дифференциального сопротивления, а на ватт-амперной характеристике резкое увеличение интенсивности излучения сменяется линейным ростом. При этом сопротивление p - n -перехода ЛД уменьшается настолько, что ток через структуру начинает ограничиваться последовательным сопротивлением подводящих слоёв, которое, судя по наклону ВАХ, равно 1,4 Ом.

Несмотря на переход к резкому возрастанию интенсивности люминесценции на участке отрицательного дифференциального сопротивления, внешне похожего на переход через порог генерации, излучение ЛД на участке ОДС идёт в светодиодном режиме, о чём свидетельствует слабое изменение ширины полосы излучения L . Переход в режим лазерного излучения происходит только при токах, превышающих 90 мА, что хорошо видно по уменьшению ширины полосы излучения на рис. 3, b , которое сопровождается резким ростом тока на ватт-амперной характеристике (см. рис. 2, a).

Особенностью структур с S-образными ВАХ является неоднородное протекание тока, что актуально для мощных излучательных диодов, поскольку одним из следствий высокой мощности оптического излучения становится большая площадь поперечного сечения (порядка $0,35 \times 0,35$ мм [15]) гетероструктур. Повышение площади поперечного сечения ЛД может приводить к латеральной неоднородности токовой инжекции носителей заряда в активную область прибора. Источниками такой неоднородности являются:

1) отсутствие подложек, согласованных по постоянной решётки с GaN и его твёрдыми растворами, приводящее к формированию столбчатой структуры плёнок GaN и InGaN [16, 17];

2) неоднородность толщины и состава твёрдого раствора в квантовых ямах InGaN [18];

3) неоднородное распределение температуры из-за неравномерного отвода тепла [19].

Действительно, неоднородное распределение тока и связанное с ним неоднородное распределение излучения по площади светоизлучающего диода наблюдались экспериментально [20].

Заключение. Отметим, что в предлагаемой работе сообщается об обнаружении отрицательного дифференциального сопротивления в лазерных InGaN/GaN-диодах ультрафиолетового диапазона. Появление участка ОДС обусловлено несимметричностью инжекции носителей заряда через гетерограницы p -AlGaIn/InGaIn и InGaIn/ n -GaIn в область нелегированной квантовой ямы InGaIn. Пятикратное повышение тока в области ОДС приводит к росту интенсивности излучения лазерного диода на шесть порядков. Гигантский контраст между бистабильными состояниями делает эффект интересным для оптоэлектронных применений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Taylor J., Zink M., Crawford C., Armbrust C.** Blu-ray Disc Demystified. N. Y.: McGraw-Hill Education, 2008. 432 p.
2. **Piprek J.** Origin of InGaIn/GaN light-emitting diode efficiency improvements using tunnel-junction-cascaded active regions // Appl. Phys. Lett. 2014. **104**, N 5. 051118.
3. **Kuo Y.-K., Wang T.-H., Chang J.-Y.** Advantages of blue InGaIn light-emitting diodes with InGaIn-AlGaIn-InGaIn barriers // Appl. Phys. Lett. 2012. **100**, N 3. 031112.
4. **Piprek J., Li Z. M. S.** Sensitivity analysis of electron leakage in III-nitride light-emitting diodes // Appl. Phys. Lett. 2013. **102**, N 13. 131103.
5. **Sadaf S. M., Ra Y.-H., Nguyen H. P. T. et al.** Alternating-current InGaIn/GaN tunnel junction nanowire white-light emitting diodes // Nano Lett. 2015. **15**, Is. 10. P. 6696–6701.
6. **Бочкарева Н. И., Иванов А. М., Клочков А. В. и др.** Прыжковый транспорт в области объёмного заряда p - n -структур с квантовыми ямами InGaIn/GaN как источник избыточного $1/f$ -шума и потеря эффективности светодиодов // Физ. и техн. полупроводников. 2015. **49**, вып. 6. С. 847–855.
7. **Shockley W.** The theory of p - n junctions in semiconductors and p - n junction transistors // Bell Syst. Techn. Journ. 1949. **28**, Is. 3. P. 435–489.

8. **Li D., Zong H., Yang W. et al.** Stimulated emission in GaN-based laser diodes far below the threshold region // *Opt. Express*. 2014. **22**, Is. 3. P. 2536–2544.
9. **Li D., Yang W., Feng L. et al.** Stimulated emission related anomalous change of electrical parameters at threshold in GaN-based laser diodes // *Appl. Phys. Lett.* 2013. **102**, N 12. 123501.
10. **Li X., Liu Z. S., Zhao D. G. et al.** Differential resistance of GaN-based laser diodes with and without polarization effect // *Appl. Opt.* 2015. **54**, Is. 29. P. 8706–8711.
11. **Galkin N. G., Chusovitin E. A., Goroshko D. L. et al.** Room temperature 1,5 μm light-emitting silicon diode with embedded $\beta\text{-FeSi}_2$ nanocrystallites // *Appl. Phys. Lett.* 2012. **101**, N 16. 163501.
12. **Paskov P. P., Schifano R., Paskova T. et al.** Structural defect-related emissions in nonpolar a-plane GaN // *Phys. B: Condensed Matter*. 2006. **376–377**. P. 473–476.
13. **Schubert E. F.** *Light-Emitting Diodes*. N. Y.: Cambridge University Press, 2006. 434 p.
14. **Булярский С. В., Грушко Н. С., Сомов А. И., Лакалин А. В.** Рекомбинация в области пространственного заряда и ее влияние на коэффициент передачи биполярного транзистора // *Физ. и техн. полупроводников*. 1997. **31**, вып. 9. С. 1146–1150.
15. **Nakamura S.** Current status and future prospects of InGaN-based laser diodes // *JSAP Intern.* 2000. **1**. P. 5–17.
16. **Zhong Z., Ambacher O., Link A. et al.** Influence of GaN domain size on the electron mobility of two-dimensional electron gases in AlGaIn/GaN heterostructures determined by x-ray reflectivity and diffraction // *Appl. Phys. Lett.* 2002. **80**, N 19. P. 3521–3523.
17. **Кютт Р. Н., Мосина Г. Н., Щеглов М. П., Сорокин Л. М.** Дефектная структура сверхрешеток AlGaIn/GaN, выращенных методом МOCVD на сапфире // *Физика твердого тела*. 2006. **48**, вып. 8. С. 1491–1497.
18. **Nakamura S.** The roles of structural imperfections in InGaIn-based blue light-emitting diodes and laser diodes // *Science*. 1998. **281**, N 5379. P. 956–961.
19. **Сергеев В. А., Ходаков А. М.** Расчет и анализ распределений плотности тока и температуры по площади структуры InGaIn/GaN мощных светодиодов // *Физ. и техн. полупроводников*. 2010. **44**, вып. 2. С. 230–234.
20. **Бочкарева Н. И., Ефремов А. А., Ребане Ю. Т. и др.** Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов // *Физ. и техн. полупроводников*. 2006. **40**, вып. 1. С. 122–127.

Поступила в редакцию 2 февраля 2016 г.
