

Спектры электроотражения множественных квантовых ям InGaN/GaN, помещенных в неоднородное электрическое поле $p-n$ -перехода

© Л.П. Авакянц, А.Э. Асланян, П.Ю. Боков[¶], К.Ю. Положенцев, А.В. Червяков

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (физический факультет),
119991 Москва, Россия

[¶] E-mail: pavel_bokov@physics.msu.ru

(Получена 12 апреля 2016 г. Принята к печати 20 апреля 2016 г.)

В спектрах электроотражения гетероструктуры GaN/InGaN/AlGaN обнаружена линия $E = 2.77$ эВ шириной $\Gamma = 88$ мэВ, связанная с межзонными переходами в области множественных квантовых ям активной области. При уменьшении амплитуды модулирующего напряжения от 2.9 до 0.4 В наблюдается расщепление этой линии на две с энергиями $E_1 = 2.55$ эВ и $E_2 = 2.75$ эВ, ширины которых составляют $\Gamma_1 = 66$ мэВ и $\Gamma_2 = 74$ мэВ соответственно. Это указывает на то, что эти линии обусловлены межзонными переходами в отдельных квантовых ямах активной области. Различие энергий межзонных переходов E_1 и E_2 в идентичных квантовых ямах активной области связано с тем, что квантовые ямы помещены в неоднородное электрическое поле. В работе оценивались модули напряженности электрических полей в отдельных квантовых ямах активной области гетероструктуры. Их значения составили 1.6 и 2.2 МВ/см.

DOI: 10.21883/FTP.2017.02.44104.8271

1. Введение

Излучающей частью современных светодиодных гетероструктур является помещенная в $p-n$ -переходе активная область, которая содержит одну или несколько квантовых ям [1]. Квантовые ямы аккумулируют инжектируемые через $p-n$ -переход носители заряда, увеличивая вероятность излучательной рекомбинации в активной области. Увеличение числа квантовых ям необходимо для уменьшения концентрации носителей в отдельных ямах, так как их переизбыток приводит к росту вероятности оже-рекомбинации ([1], с. 56; [2]). Пространственное разделение электронов и дырок в квантовой яме, обусловленное наличием пьезоэлектрических полей, уменьшает вероятность излучательной рекомбинации [3,4]. В работе [5] показано, что в системе множественных квантовых ям (МКЯ) основную роль в формировании излучения, как правило, играет одна квантовая яма. Поэтому исследование неоднородности встроенных пьезоэлектрических полей в квантовых ямах активной области светодиодной гетероструктуры является актуальным.

Светодиоды, изготовленные на сапфировой подложке и смонтированные на теплоотвод по технологии „flip-chip“, допускают исследования методами спектроскопии отражения [4], фотоотражения [6] и электроотражения (ЭО) [7]. В последнем случае модуляция отражения осуществляется приложением к контактам $p-n$ -перехода переменного напряжения. Прикладывая к контактам $p-n$ -перехода переменное напряжение с разной постоянной составляющей, можно оценивать напряженности пьезоэлектрических полей за счет эффекта Штарка [8].

В данной работе метод спектроскопии ЭО применен для исследования неоднородности встроенных пьезоэлектрических полей в квантовых ямах активной области светодиодной гетероструктуры GaN/InGaN/AlGaN.

Обнаружено, что при малых амплитудах модулирующего напряжения, линия, связанная с сигналом от МКЯ, расщепляется на две. Указанное расщепление спектральных линий происходит за счет уменьшения их перекрытия. По разнице энергий компонент расщепленной линии оценены значения напряженностей электрических полей в отдельных квантовых ямах активной области гетероструктуры.

2. Образец и методика эксперимента

Исследованный образец представлял собой светодиод сине-зеленого свечения. Гетероструктура на основе МКЯ типа GaN/InGaN/AlGaN выращивалась методом газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD) на сапфировой подложке и монтировалась в теплоотводящий корпус методом „flip-chip“ [9]. На подложке последовательно выращивались (рис. 1, а): затравочный слой GaN толщиной 20 нм; буферный слой i -GaN толщиной < 0.7 мкм; слой n -GaN толщиной 4.5 мкм; буферная сверхрешетка InGaN/GaN; активная область — 5 квантовых ям/барьеров $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ толщиной 4 нм/4 нм; слой, блокирующий поперечный транспорт электронов $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (20 нм), $x = 0.12-0.15$ ([1], с. 107); слой p -GaN толщиной 0.12 мкм. Со стороны контакта к p -области монтировалось отражающее зеркало. Излучение такого светодиода, формируемое в активной области, отражается от зеркала-теплоотвода и выводится наружу через прозрачную в сине-зеленой части спектра сапфировую подложку. Площадь кристалла составляла 0.4 мм².

Измерение спектров ЭО проводилось на установке, описанной ранее в работах [4,6]. Вторая часть монохроматора в ходе измерений не задействовалась: анализировалось отраженное от образца монохроматиче-

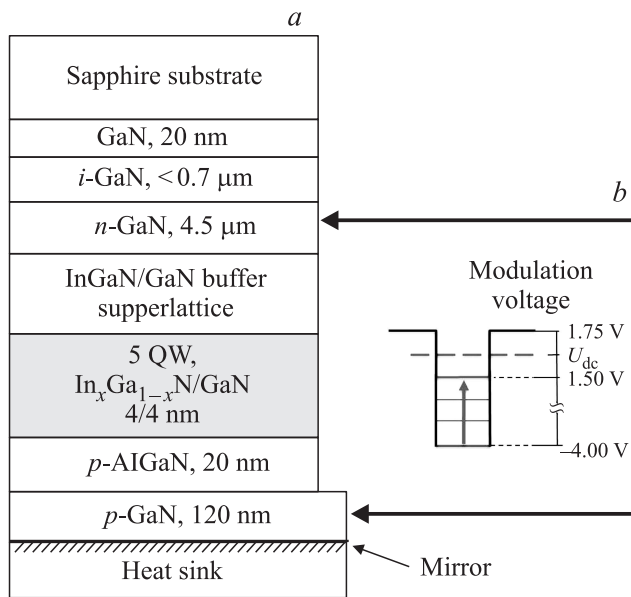


Рис. 1. Структура исследуемого светодиода (а) и схема приложения к p – n -переходу модулирующего напряжения (b).

ское излучение, сформированное первым монохроматором. Гетероструктуры GaN/InGaN/AlGaIn освещались через сапфировую подложку (рис. 1, а). Спектральный диапазон падающего на образец излучения составлял 390–500 нм. Угол падения составлял 8° .

Для модуляции коэффициента отражения R к контактам p – n -перехода прикладывались импульсы напряжения прямоугольной формы. Частота модуляции составляла 370 Гц. В серии экспериментов амплитуда импульсов U_{mod} и постоянное смещение U_{dc} (рис. 1, b) изменялись независимо. Постоянное смещение U_{dc} выбиралось из диапазона, обеспечивающего запираение p – n -перехода. Максимальное значение напряжения модулирующего меандра, равное 1.75 В, не менялось, а минимальное изменялось в пределах от -4.00 до 1.00 В. Спектры ЭО регистрировались при комнатной температуре. Указанному режиму соответствуют изменения постоянного смещения U_{dc} от -1.1 до 1.7 В и амплитуды сигнала U_{mod} от 0.1 до 2.9 В.

Таким образом, сигнал ЭО $\Delta R/R$ может быть описан как

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R(U_{\text{mod}} + U_{\text{dc}}) - R(U_{\text{dc}})}{R} = \frac{R(F_1) - R(F_2)}{R}, \quad (1)$$

где F_1 и F_2 — напряженности электрического поля в структуре (в квантовой яме) при приложении модулирующего напряжения U_{mod} и в его отсутствии. В выбранном режиме модуляции все падение напряжения приходится на область запертого p – n -перехода, при этом увеличение обратного смещения приводит к уменьшению напряженности электрического поля в квантовых ямах InGaN/GaN активной области [4], а уменьшение амплитуды модулирующего напряжения приводит к меньшим изменениям напряженности электрического поля $F_1 - F_2$.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены спектры ЭО, зарегистрированные при указанных амплитудах модулирующего напряжения U_{mod} . В спектрах присутствуют линии в области энергий (2.63–3.0) эВ, соответствующие межзонным переходам в МКЯ активной области гетероструктуры [10]. Видно, что при напряжениях ($1.9 \leq U_{\text{mod}} \leq 2.9$) В наблюдается единая широкая спектральная линия („E“), амплитуда которой уменьшается с уменьшением U_{mod} . При $U_{\text{mod}} \leq 1.4$ В возникает расщепление этой линии на две, обозначенные на рис. 2 как „E₁“ и „E₂“. Линия „E₁“ в области меньших энергий имеет большую амплитуду, чем линия „E₂“ в области больших энергий.

Широкий контур линии в спектре ЭО представляет собой совокупность линий от тех квантовых ям активной области, в которых электрическое поле модулируется наиболее интенсивно. Наблюдаемое расщепление линии связано одновременно с уменьшением перекрытия отдельных линий, ширина каждой из которых уменьшается с уменьшением U_{mod} и со сдвигами линий „E₁“ и „E₂“. Последнее можно объяснить неоднородностью электрического поля в p – n -переходе, приводящего к сдвигам энергетических уровней электронов и дырок в силу эффекта Штарка. Различие амплитуд линий „E₁“ и „E₂“ можно объяснить различной глубиной модуляции

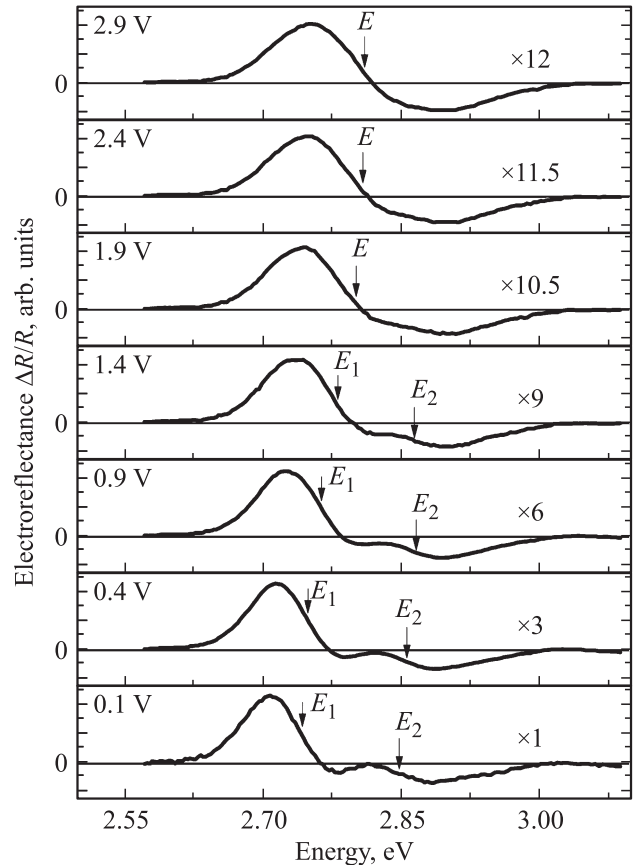


Рис. 2. Спектры ЭО, полученные при амплитудах модулирующего напряжения U_{mod} от 0.1 до 2.0 В.

электрического поля в квантовых ямах, ответственных за формирование соответствующих линий в спектре ЭО.

Определение параметров единой широкой спектральной линии, т.е. полученной при больших амплитудах модулирующего сигнала, проводилось с помощью выражения Аспнеса [11]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \text{Re} (A \cdot e^{i\varphi} (E - E_i + i\Gamma)^{-m}), \quad (2)$$

где A, φ — амплитудный и фазовый параметры соответственно, $E = \hbar\omega$ — энергия отраженного излучения, E_i — энергия перехода, соответствующая спектральной линии, Γ — феноменологический параметр уширения, m — размерность критической точки (в нашем случае

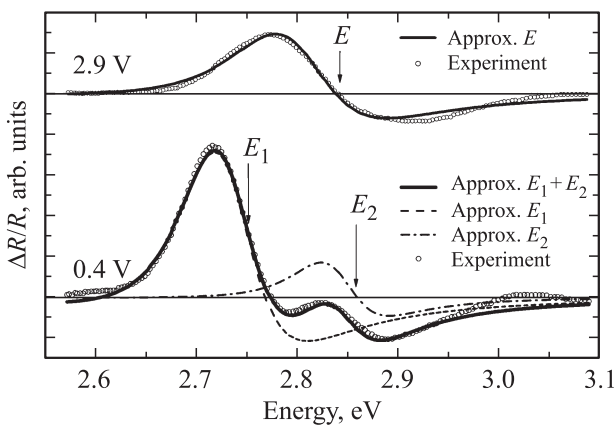


Рис. 3. Пример аппроксимации спектров ЭО, соответствующих двум амплитудам модуляции U_{mod} : 2.9 и 0.4 В. Штриховая и штрихпунктирные линии — аппроксимация линий E_1 и E_2 , сплошные линии — суммарная аппроксимация двух выражений Аспнеса для $U_{\text{mod}} = 0.4$ В и аппроксимация по формуле (1) для $U_{\text{mod}} = 2.9$ В.

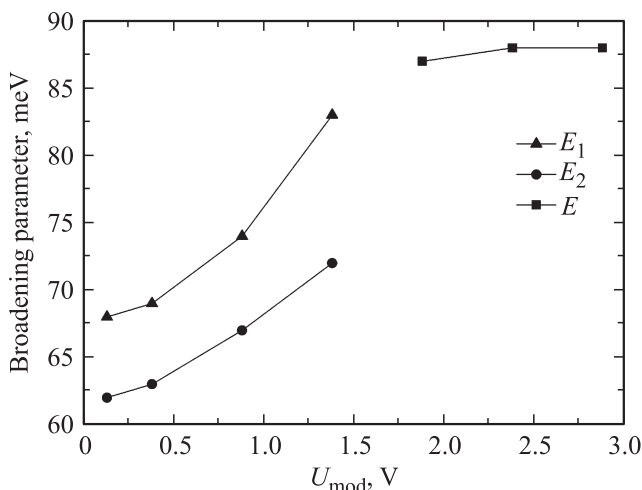


Рис. 4. Зависимость параметра уширения линий спектров ЭО от амплитуды модулирующего сигнала. Квадратами отмечены точки, полученные аппроксимацией по формуле (1) для единой спектральной линии. Треугольниками и квадратами отмечены точки, полученные аппроксимацией суммой двух выражений Аспнеса (1) для линий E_1 и E_2 .

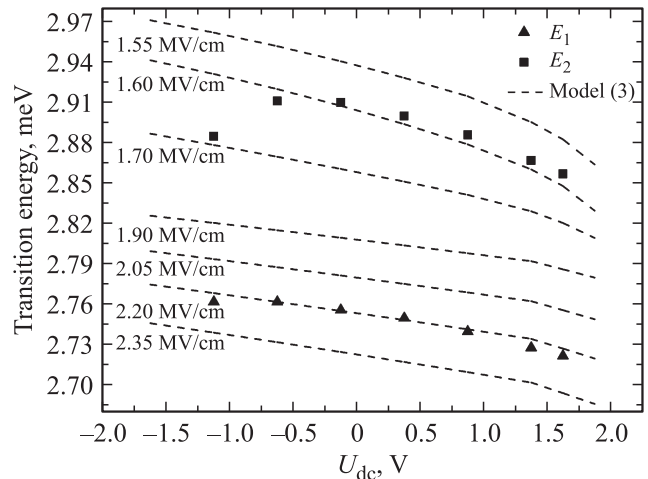


Рис. 5. Зависимость энергий переходов E_1 (треугольники) и E_2 (квадраты) в квантовых ямах активной области от напряжения смещения. Штриховые линии — теоретические зависимости (2), соответствующие различным значениям напряженности электрического поля F .

$m = 2$ [11]). Для аппроксимации спектров с расщепленными линиями (при $U_{\text{mod}} \leq 1.3$ В) в качестве подгоночной формулы использовалась сумма двух выражений (1) Аспнеса (рис. 3).

На рис. 4 приведен график зависимости параметра уширения от амплитуды модулирующего напряжения. В диапазоне напряжений ($1.9 \leq U_{\text{mod}} \leq 2.9$) В это одна широкая линия с $\Gamma \approx 88$ эВ. В диапазоне напряжений ($0.1 \leq U_{\text{mod}} \leq 1.4$) В это две линии с монотонно уменьшающимися параметрами уширения при уменьшении U_{mod} (Γ_1 от 83 до 66 мэВ; Γ_2 от 72 до 63 мэВ).

Определенные по результатам аппроксимации зависимости энергий переходов в квантовых ямах E_1 и E_2 от модулирующего напряжения U_{mod} представлены на рис. 5. Видно, что увеличение U_{mod} приводит к сдвигу обеих линий в область больших энергий. Наблюдаемые уменьшения параметров уширения и сдвиги линий в область меньших энергий при уменьшении амплитуды модулирующего напряжения указывают на то, что основным механизмом, ответственным за формирование линий в спектрах ЭО, является квантово-размерный эффект Штарка. При этом с ростом амплитуды модулирующего напряжения неоднородности электрического поля в области множественных квантовых ям частично маскируются электрическим полем, формируемым при модуляции. Последнее и приводит к уширению и перекрытию линий ЭО.

В работе [12] предложено выражение, описывающее зависимость значения энергии E_{1e1h} квантовой ямы светодиодной гетероструктуры от напряженности электрического поля F в квантовой яме:

$$E_{1e1h} = E_{1e1h}(F = 0) - \frac{15 - \pi^2 (m_e + m_h) e^2 F^2 L_w^4}{24\pi^4 \hbar^2}, \quad (3)$$

где E_{1e1h} — энергия электронно-дырочного перехода в присутствии электрического поля F , $E_{1e1h}(F = 0)$ —

энергия электронно-дырочного перехода в отсутствие электрического поля в квантовой яме, m_e, m_h — эффективные массы электронов и дырок, F — модуль вектора напряженности внутреннего электрического поля, L_w — ширина квантовой ямы.

Видно (см. рис. 5), что экспериментальные значения E_1 сосредоточены вблизи линии, соответствующей напряженности электрического поля $F_1 = 1.60$ МВ/см, а E_2 — соответствующей напряженности электрического поля $F_2 = 2.20$ МВ/см.

Эти данные согласуются с расчетом модуля встроенного электрического поля в рамках теории пьезоэлектрического эффекта для такого рода структур: 1.9 ± 0.3 МВ/см [13] и нашими предыдущими экспериментами [14]. Таким образом, паре квантовых ям, дающих основной вклад в спектр ЭО, соответствуют электрические поля, напряженности которых различаются на 0.6 МВ/см. Относительная неоднородность электрического поля составляет 32%.

4. Заключение

При комнатной температуре зарегистрированы спектры ЭО светодиодной гетероструктуры на основе соединений GaN/InGaN/AlGaN при амплитудах модулирующего напряжения от 0.1 до 2.9 В. В спектрах ЭО присутствует линия, связанная с межзонными переходами $1e-1h$ в области МКЯ. Наблюдаемые уменьшения параметров уширения и сдвиги линий в область меньших энергий при уменьшении амплитуды модулирующего напряжения указывают на то, что основным механизмом, ответственным за формирование линий в спектрах ЭО, является квантово-размерный эффект Штарка.

Различие в энергиях линий ЭО, наблюдаемых от области МКЯ, позволяет сделать вывод о том, что электрическое поле в активной области $p-n$ -перехода неоднородно.

Исследована зависимость энергии переходов в квантовых ямах от приложенного напряжения к $p-n$ -переходу. По зависимости энергий переходов для двух спектральных линий от прикладываемого к контактам $p-n$ -перехода напряжения оценены значения модуля напряженности электрических полей отдельных квантовых ям активной области. Для первой квантовой ямы эта оценка составила 1.60 МВ/см, для второй — 2.20 МВ/см.

Показано, что метод спектроскопии ЭО может использоваться не только для оценки напряженности электрического поля в активной области $p-n$ -перехода светодиодной полупроводниковой гетероструктуры, но и для оценки его неоднородности.

Список литературы

- [1] Ф. Шуберт. *Светодиоды* (М., Физматлит, 2008).
- [2] N.F. Gardner, G.O. Mueller, Y.C. Shen, G. Chen, S. Watanabe, W. Gotz, M. R. Krames. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 243506 (2007).

- [3] H. Zhao, L. Guangyu, J. Zhang, J.D. Poplawsky, V. Dierolf, N. Tans. *Opt. Express*, **19** (S4), 991 (2011).
- [4] Л.П. Авакянц, М.Л. Бадгутдинов, П.Ю. Боков, А.В. Червяков, С.С. Широков, А.Э. Юнович, А.А. Богданов, Е.Д. Васильева, Д.А. Николаев, А.В. Феопентгов. *ФТП*, **41** (9), 1078 (2007).
- [5] A. David, M.J. Grundmann, J.F. Kaeding, N.F. Gardner, T.G. Mihopoulos, M.R. Krames. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 053502 (2008).
- [6] Л.П. Авакянц, П.Ю. Боков, А.В. Червяков. *ЖТФ*, **75** (10), 66 (2005).
- [7] R.J. Kaplar, S.R. Kurtz, D.D. Koleske, A.J. Fischer. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 4905 (2004).
- [8] T. Takeuchi, C. Wetzel, S. Yamaguchi, H. Sakai, H. Amano, I. Akasaki, Y. Kaneko, S. Nakagawa, Y. Yamaoka, N. Yamada. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 1691 (1998).
- [9] J.J. Wierer, D.A. Steigerwald, M.R. Krames, J.J. O'Shea, M.J. Ludowise, G. Christenson, Y.-C. Shen, C. Lowery, P.S. Martin, S. Subramanya, W. Götz, N.F. Gardner, R.S. Kern, S.A. Stockman. *Appl. Phys. Lett.*, **78** (22), 3379 (2001).
- [10] H. Shen, M. Dutta. *J. Appl. Phys.*, **78**, 2151 (1995).
- [11] D. Aspnes. *Surf. Sci.*, **37**, 418 (1973).
- [12] M.E. Aumer, S.F. Le Boeuf, B.F. Moody, S.M. Bedair. *Appl. Phys. Lett.*, **79** (23), 3803 (2001).
- [13] M. Feneberg, K. Thonke. *J. Phys.: Condens. Matter*, **19**, 403201 (2007).
- [14] L.P. Avakyants, P.Yu. Bokov, A.V. Chervyakov, A.E. Yunovich, E.D. Vasileva, B.S. Yavich. *Phys. Status Solidi C*, **7**, 1863 (2010).

Редактор А.Н. Смирнов

Electroreflectance spectra from InGaN/GaN multiple quantum wells placed into non-uniform electric field of $p-n$ -junction

L.P. Avakyants, A.E. Aslanyan, P.Yu. Bokov, K.Yu. Polozhentsev, A.V. Chervyakov

Lomonosov Moscow State University
(Faculty of Physics),
119991 Moscow, Russia

Abstract There was spectral line at $E = 2.77$ eV with broadening $\Gamma = 88$ meV in electroreflectance spectra of heterostructure based on GaN/InGaN/AlGaN connected with interband transition in area of quantum wells. Reduction of the amplitude of modulation bias from 2.9 to 0.4 V leads to splitting this line into two with transition energies of $E_1 = 2.55$ eV and $E_2 = 2.75$ eV with broadening $\Gamma_1 = 66$ meV and $\Gamma_2 = 74$ meV. The smaller width of the separate lines points that these lines were provided by interband transitions in particular quantum wells of active area. The difference between interband transition energy E_1 and E_2 into similar quantum wells reveal that these quantum wells put into inhomogeneous electric field of $p-n$ -junction. The magnitudes of electric fields strengths in particular quantum wells in active area of the heterostructure have been estimated as 1.6 and 2.2 MV/cm.