

Интерференционные эффекты в спектрах электроотражения и электролюминесценции светодиодных гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN

© Л.П. Авакянц*, П.Ю. Боков*[¶], А.В. Червяков*, А.В. Чуяс*, А.Э. Юнович*,
Е.Д. Васильева⁺, Д.А. Бауман⁺, В.В. Уелин, Б.С. Явич^{†¶}

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

⁺ ЗАО „Светлана-Оптоэлектроника“,
194156 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 13 января 2010 г. Принята к печати 18 января 2010 г.)

Методами спектроскопии электроотражения и электролюминесценции исследованы интерференционные эффекты в светодиодных гетероструктурах InGaN/AlGaIn/GaN синего свечения. Наблюдаемые в спектрах электроотражения и электролюминесценции в синей области спектра периодические полосы обусловлены интерференционными эффектами в структуре в целом. Появление интерференционных полос в спектрах электроотражения объясняется модуляцией встроенных электрических полей в активной области гетероструктуры. Наблюдаемые в спектрах электроотражения длиннопериодные интерференционные полосы в широкой области спектра, от инфракрасной до ультрафиолетовой, позволяют определить положение активной области гетероструктуры по отношению к различным отражающим поверхностям в резонаторе.

1. Введение

Одним из способов увеличения эффективности вывода излучения светодиодов является создание светодиодов с резонаторами [1]. Спектры электролюминесценции в таких случаях зависят не только от свойств активной области светодиода, в которой идет излучательная рекомбинация, но и от свойств резонатора.

Интерференционные эффекты в многослойных полупроводниковых гетероструктурах ранее наблюдали в спектрах отражения [2], электролюминесценции [3], а также в модуляционных спектрах [4]. Если появление интерференционных полос в спектрах отражения и люминесценции связывают с многократным отражением излучения от границ слоев гетероструктуры, то единого мнения о причинах появления интерференционных полос в спектрах электро- и фотоотражения не существует. В случае фотоотражения это явление может быть связано с модуляцией показателя преломления в области пространственного заряда [4] или с термической зависимостью показателя преломления [2]. В случае электроотражения интерференционные эффекты связывают с модуляцией показателя преломления, обусловленной изменением напряженности электрического поля в области пространственного заряда [2,4].

В настоящей работе приводятся результаты исследования интерференционных эффектов в спектрах электроотражения (ЭО) и электролюминесценции (ЭЛ) в светодиодах на основе гетероструктур AlGaIn/GaN/InGaIn. Исследованные образцы различались толщиной слоя p -AlGaIn, блокирующего поперечный транспорт электронов.

2. Образцы и методика эксперимента

В работе исследовались тестовые светодиоды синего свечения, изготовленные в лаборатории ЗАО „Светлана-Оптоэлектроника“.

Кристаллы светодиодов с p - n -гетероструктурами типа InGaIn/AlGaIn/GaN, выращенные методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD) на сапфировой подложке (Al_2O_3), монтировались в теплоотводящий корпус методом „flip-chip“ [5,6]. На подложке последовательно выращивались: низкотемпературный зародышевый слой GaN; переходный нелегированный слой GaN (номинальная толщина 0.9 мкм); слой n -GaN (номинальная толщина 3.5 мкм); буферная сверхрешетка GaN/InGaIn; 5 квантовых ям $In_xGa_{1-x}N/GaN$ ($x = 0.13-0.15$, номинальные толщины квантовых ям 3 нм, барьеров 12 нм); слой, блокирующий поперечный транспорт электронов, p -AlGaIn (толщина 20 нм) и слой p -GaN (толщина 110 нм). Со стороны контакта к p -области наносилось отражающее зеркало. Площадь кристаллов исследованных светодиодов составляла 0.4 мм². Схематическое изображение структуры исследуемых образцов и их зонная диаграмма приведены на рис. 1.

Исследовались базовый образец 3 и образцы с измененными относительно базового параметрами: образец 6 — увеличена в 3 раза концентрация легирующей примеси в буферной сверхрешетке, образец 21 — увеличена в 10 раз концентрация легирующей примеси в буферной сверхрешетке, образец 36 — уменьшена в 1.5 раза (до 13 нм) толщина барьера p -AlGaIn.

Исследования светодиодов (СД) методом спектроскопии ЭО проводились на установке, описанной ранее [7,8]. При регистрации спектров гетероструктура освещалась через прозрачную в оптическом диапазоне сапфировую подложку [8]. Угол падения зондирующего

[¶] E-mail: pavel_bokov@rambler.ru

^{¶¶} E-mail: byavich@soptel.ru

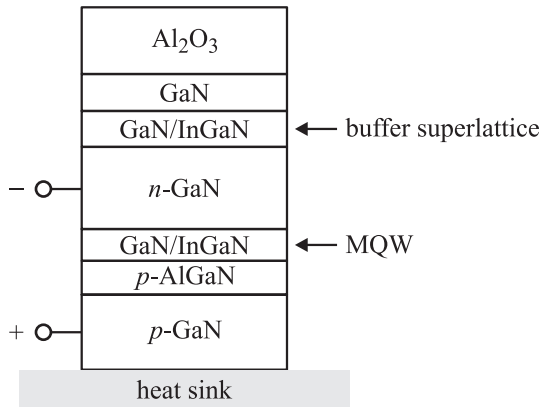
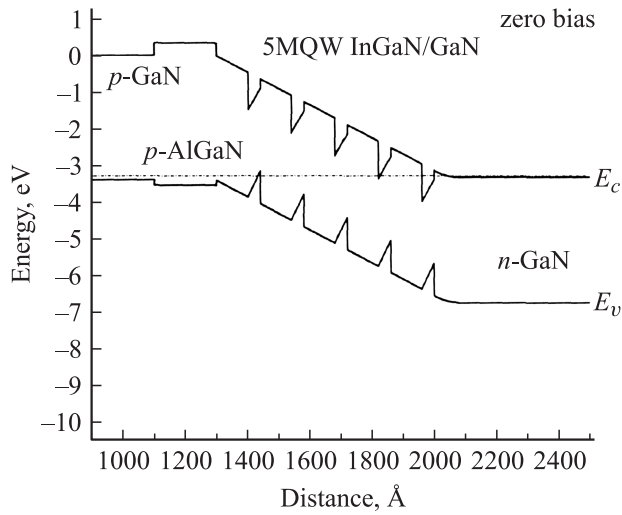


Рис. 1. Схематическое изображение структуры (внизу) и зонная диаграмма (вверху) исследуемых образцов. E_c — зона проводимости, E_v — валентная зона; MQW — множественные квантовые ямы.

излучения на кристалл светодиода составлял 8° . Спектральное разрешение установки было не хуже 1 мэВ.

Модуляция коэффициента отражения осуществлялась приложением к контактам светодиода периодического напряжения в виде прямоугольных импульсов со скважностью 2 и постоянным смещением, при котором p – n -переход оставался закрытым (от -7 до $+2$ В). Частота модуляции составляла 370 Гц. Были получены серии спектров в зависимости от амплитуды импульсов или величины постоянного смещения. Параллельно измерялись спектры отражения. Измерения проводились при комнатной температуре.

Спектры ЭО сопоставлялись со спектрами ЭЛ при токах от 0.1 до 350 мА (см. методику в [8]). Для регистрации спектров использовались автоматизированные установки на базе дифракционного монохроматора МДР-12 или призмного монохроматора Zeiss-SPM-2 [2]. Спектральное разрешение установки не хуже 0.3 мэВ. Дополнительно проводились измерения коэффициента полезного действия светодиодов [9].

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

3.1. В спектрах ЭЛ (рис. 2) светодиодов в полосе излучения, связанной с межзонными переходами в активной области (метка EL на рисунке), наблюдались интерференционные полосы.

В соответствии с теорией резонатора Фабри–Перо [10] период интерференции в шкале длин волн ($\Delta\lambda$) определяется формулами для положения максимумов:

$$2Dn = s\lambda, \quad (1)$$

$$2D(n + \Delta n) = (s + 1)(\lambda - \Delta\lambda), \quad (2)$$

где D — толщина слоя; $n(\lambda)$ — показатель преломления, зависящий от длины волны λ ; s — порядок интерференции; Δn — изменение показателя преломления, обусловленное изменением длины волны $\Delta\lambda$. Тогда

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{1 + 2D(n/\lambda + dn/d\lambda)}, \quad (3)$$

или, в шкале энергий фотонов $E \equiv \hbar\omega$,

$$\Delta E = \frac{1239.8}{2Dn[1 + (E/n)(dn/dE)]}, \quad (4)$$

где ΔE — период интерференции в эВ, D в нм, E в эВ.

Для идентификации пространственной области, в которой происходит интерференция, была проведена аппроксимация спектров электролюминесценции на основании формул (1)–(4) с учетом предложенного в [11] выражения для дисперсии показателя преломления

$$n^2(E) - 1 = \alpha \left[1 + \beta \frac{E^2}{(E - \gamma)^2} \right] \quad (5)$$

с параметрами $\alpha = 4.93$, $\beta = 0.0113$, $\gamma = 4.00$ эВ. Из экспериментального спектра вычитался контур ЭЛ

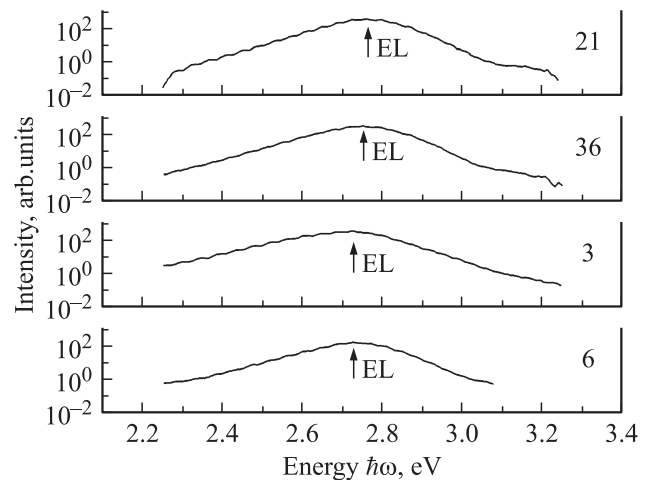


Рис. 2. Спектры электролюминесценции светодиодов 3, 6, 21, 36 при токе 350 мА.

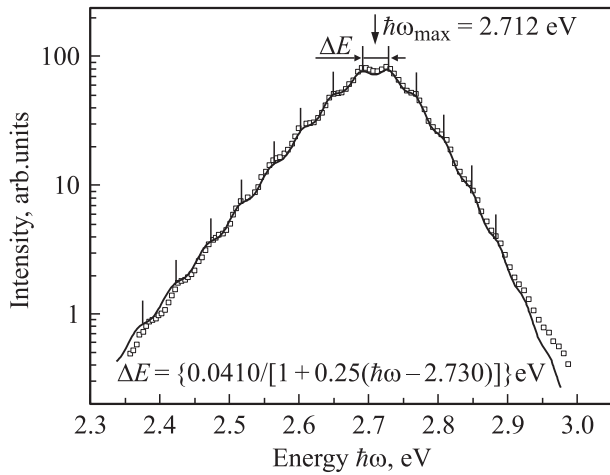


Рис. 3. Пример аппроксимации (сплошная линия) спектра электролюминесценции (точки) с учетом интерференционных эффектов (образец 6). Отмечены положения максимумов интерференции. Приведена формула для зависимости периода интерференции ΔE от энергии кванта $\hbar\omega$.

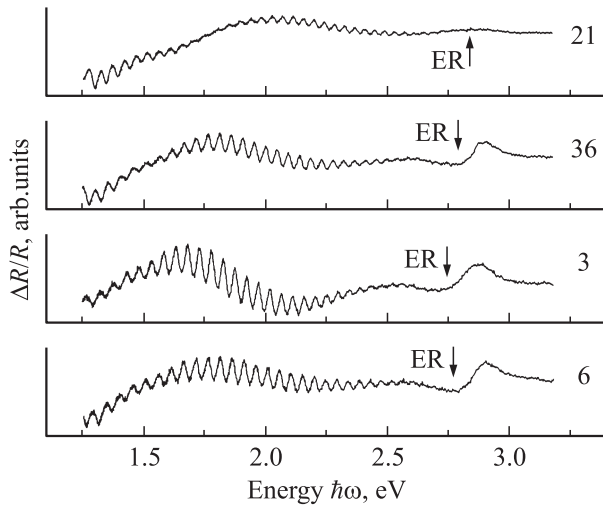


Рис. 4. Спектры электроотражения образцов светодиодов 3, 6, 21, 36.

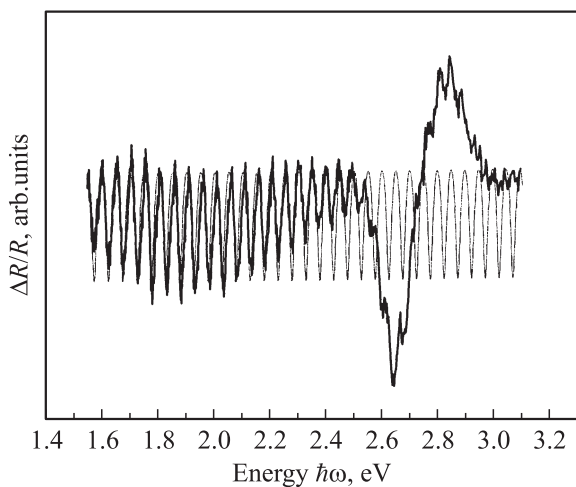


Рис. 5. Пример аппроксимации (тонкая линия) интерференционных полос в спектре электроотражения образца 3.

от активной области гетероструктуры [3]. Пример аппроксимации спектра ЭЛ с учетом интерференционных эффектов приведен на рис. 3. Из полученного с помощью аппроксимации значения периода $\Delta\lambda$ была определена толщина слоя, в котором наблюдается интерференция: для образцов 3, 6, 21 и 36 составила (5.1 ± 0.1) , (4.9 ± 0.1) , (5.4 ± 0.1) и (5.3 ± 0.1) мкм соответственно. Указанные размеры соответствуют толщине всей гетероструктуры без учета подложки: общая номинальная толщина структуры составляет ~ 4.6 мкм. Наблюдаемые различия для разных образцов связаны, по-видимому, с вариацией толщин переходного нелегированного слоя GaN и слоя n -GaN.

Таким образом, наблюдаемые в спектрах ЭЛ гетероструктур интерференционные полосы связаны с отражением от подложки Al_2O_3 и от зеркала резонатора со стороны области p -GaN.

3.2. В спектрах ЭО $\Delta R/R$ (рис. 4, 5) исследуемых образцов наряду с низкополевой линией ER в области энергий 2.7–2.8 эВ, соответствующей межзонным переходам в активной области светодиода [8], наблюдаются два типа интерференционных полос, различающихся периодами.

Интерференционные полосы с такими же периодами наблюдались в спектрах отражения [8] этих образцов. Сопоставление периода интерференционных полос, наблюдаемых в спектрах ЭЛ, ЭО и отражения, представляется затруднительным, так как отчетливо различимые полосы оказываются в разных энергетических областях (см. рис. 2, 4 и 5). Поэтому в дальнейшем будем сравнивать характерные толщины областей, в которых происходит интерференция.

3.3. Рассмотрим модель, описывающую появление интерференционных полос в модуляционном спектре (в двулучевом приближении). При нормальном падении и отражении излучения с длиной волны λ от слоя толщиной D с показателем преломления n сигнал в спектре отражения, обусловленный интерференцией, будет иметь вид

$$I_R \propto \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} 2nD\right). \quad (6)$$

Предположим, что приложенное электрическое поле изменяет показатель преломления на величину δn (данное изменение может быть вызвано как изменением напряженности электрического поля в области пространственного заряда, так и, например, тепловыми эффектами). Тогда сигнал, обусловленный интерференцией, в спектре ЭО будет иметь вид

$$\begin{aligned} I_{ER} &\propto \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} 2nD\right] - \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} 2(n + \delta n)D\right] \\ &\propto \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda} 2nD\right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, следует ожидать, что интерференционные полосы в спектрах ЭО будут иметь такой же период, как и в спектрах отражения.

Была проведена аппроксимация спектров ЭО в рамках модели (7) с учетом дисперсии показателя преломления (5). Пример аппроксимации модуляционного спектра с учетом интерференционных эффектов приведен на рис. 5. Из полученных при аппроксимации значений периодов интерференции были определены характерные толщины слоев, в которых наблюдается интерференция. Полосы короткого периода в спектрах электроотражения образцов 3, 6, 21 и 36 соответствуют интерференции в слоях толщиной (5.2 ± 0.1) , (4.8 ± 0.1) , (5.5 ± 0.1) и (5.2 ± 0.1) мкм, что совпадает с данными ЭЛ и спектроскопии отражения [8]. Полосы длинного периода (удалось наблюдать 2–4 экстремума) в спектрах ЭО образцов 3, 6, 21 и 36 соответствуют интерференции в слоях толщиной (212 ± 25) , (216 ± 18) , (273 ± 25) и (220 ± 60) нм.

Можно считать, что источником „короткопериодного“ сигнала, как и в случае спектров ЭЛ и отражения, является вся область гетероструктуры от подложки Al_2O_3 до зеркала резонатора со стороны области $p\text{-GaIn}$.

3.4. Источником „длиннопериодного“ сигнала можно считать область, состоящую из системы множественных квантовых ям, слоев $p\text{-AlGaIn}$ и $p\text{-GaIn}$ (общая толщина ~ 205 нм). При обратном смещении $p\text{-}n$ -перехода основное падение напряжения приходится на область множественных квантовых ям, поэтому наибольшая глубина модуляции встроенного электрического поля приходится именно на эту область, что обеспечивает появление интерференционного сигнала в спектрах ЭО. Следует отметить, что методом спектроскопии ЭО по интерференционным полосам длинного периода фактически определяется положение активной области гетероструктуры по отношению к зеркалу резонатора.

В [1] представлены данные об оптимальном положении активной области светодиода относительно отражающего зеркала в области $p\text{-GaIn}$ с точки зрения увеличения коэффициента оптического вывода излучения. Это положение должно быть близко к пучности излучаемой светодиодом электромагнитной волны, если ее узел приходится на зеркало резонатора. Для максимума спектра ЭЛ (λ_{max}) положение активной области относительно зеркала (d_{act}) соответствует пучности волны в кристалле, если

$$d_{\text{act}} = \frac{\lambda_{\text{max}}}{2n} \left(m + \frac{1}{2} \right), \quad (8)$$

где m — целое число.

По данным „Philips-Lumileds“, для светодиодов на основе GaN внешний квантовый выход излучения зависит от положения активной области и свойств зеркала со стороны p -области в конструкциях типа „flip-chip“ [12].

Для спектра ЭЛ светодиода 6 на рис. 2 ($\lambda_{\text{max}} = 457$ нм) показатель преломления $n = 2.53$; тогда при $m = 2$ $d_{\text{act}} = 225$ нм, что совпадает со значениями, полученными из длинного периода интерференции в спектрах ЭО. Таким образом, можно заключить, что в исследованных светодиодах положение активной области относительно зеркала со стороны p -области близко к оптимальному.

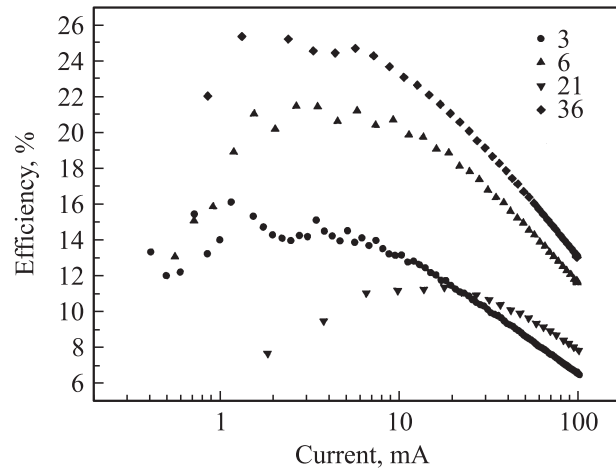


Рис. 6. Зависимость КПД образцов светодиодов 3, 6, 21, 36 от прямого тока через $p\text{-}n$ -переход.

3.5. Отдельный интерес представляют результаты измерения коэффициента полезного действия (КПД) светодиодов. Зависимости КПД от тока через $p\text{-}n$ -переход приведены на рис. 6. Из рисунка видно, что уменьшение в 1.5 раза толщины слоя $p\text{-AlGaIn}$ приводит к увеличению КПД. Увеличение концентрации легирующей примеси в барьерах буферной сверхрешетки в 3 раза приводит к увеличению КПД, тогда как увеличение концентрации легирующей примеси в 10 раз приводит к уменьшению КПД светодиодов.

Обсудим возможные причины увеличения интенсивности линии ER, амплитуды интерференционных полос и КПД светодиода, вызванные уменьшением в 1.5 раза толщины слоя $p\text{-AlGaIn}$, блокирующего поперечный транспорт электронов. Введение данного слоя предназначено для уменьшения перетекания электронов из активной области гетероструктуры в p -область (см. рис. 1) и, следовательно, для повышения КПД светодиода. Однако введение в гетероструктуру такого барьерного слоя приводит также к уменьшению количества дырок, поступающих в активную область из слоя $p\text{-GaIn}$. В итоге, начиная с определенной толщины слоя $p\text{-AlGaIn}$, когда туннелирование дырок сквозь него в активную область частично подавляется, электронов в зоне проводимости активной области оказывается больше, чем дырок. В результате вероятность излучательной рекомбинации уменьшается. Это приводит к уменьшению КПД светодиода.

При обратном включении светодиода (режим регистрации спектров электроотражения) основную роль в формировании модуляционных спектров играет модуляция встроенного электрического поля в области $p\text{-}n$ -перехода. Чем большее число носителей перемещается из p - и n -областей в активную область в процессе модуляции, тем больше глубина модуляции встроенного электрического поля и, следовательно, больше амплитуда интерференционных полос (7) и интенсивность линии ER, связанной с переходами в активной области гетероструктуры.

Ранее нами было установлено [13], что в спектрах гетероструктур без слоя p -AlGaN модуляционный сигнал существенно меньше, чем в спектрах гетероструктур с таким слоем. Таким образом, наблюдаемые изменения в модуляционных спектрах и изменения КПД светодиода, обусловленные изменением толщины слоя p -AlGaN, по-видимому, связаны с особенностями строения гетероструктуры.

3.6. Рассмотрим изменения в модуляционных спектрах, происходящие при увеличении концентрации легирующей примеси в барьерах буферной сверхрешетки. Изменения интенсивности низкополевой линии, КПД и амплитуды интерференционных полос можно объяснить следующим образом. При увеличении в 3 раза концентрации легирующей примеси в барьерах буферной сверхрешетки происходит, как и ожидалось [5,6], уменьшение плотности дефектов в активной области гетероструктуры. Дальнейшее увеличение концентрации легирующей примеси в 10 раз приводит, по-видимому, напротив, к увеличению плотности дефектов. Известно, что при эпитаксиальном росте дефекты концентрируются в области гетерограниц [14]. Таким образом, указанное увеличение концентрации легирующей примеси в барьерах буферной сверхрешетки должно приводить к увеличению пространственной неоднородности гетерограниц. Сигнал электроотражения снимается с достаточно большой площади поверхности гетероструктуры (0.4 мм^2), что и приводит к размытию низкополевой линии в спектре ЭО (и линии излучения в спектре ЭЛ), увеличению доли рассеянного излучения и уменьшению амплитуды интерференционных полос.

3.7. Нами дополнительно исследовались светодиоды синего свечения, изготовленные фирмами „Philips-Lumileds“ и „CREE“. Отличие этих светодиодов от исследованных в настоящей работе заключается в наличии шероховатого слоя на поверхности [15], который вызывает подавление интерференционных явлений, а также частичную компенсацию пьезоэлектрических полей в квантовых ямах активной области. В спектрах электроотражения таких образцов отсутствуют интерференционные полосы, а сигнал от области множественных квантовых ям на порядок слабее, чем для образцов, изготовленных на ЗАО „Светлана-Оптоэлектроника“. Последнее, по-видимому, можно связывать как с наличием муарового покрытия, так и с компенсацией пьезоэлектрических полей в области множественных квантовых ям.

Итак, наблюдаемые изменения амплитуды модуляционного сигнала в спектрах электроотражения, обусловленные изменением концентрации легирующей примеси в барьерах буферной сверхрешетки, коррелируют с соответствующими изменениями КПД светодиодов.

4. Заключение

Итак, в спектрах электролюминесценции, отражения и электроотражения светодиодных гетероструктур на

основе AlGaIn/GaN/InGaIn наряду с линиями, связанными с межзонными переходами в активной области (2.6–2.8 эВ), наблюдаются два типа интерференционных полос, различающиеся периодами.

Характерные толщины областей, от которых наблюдаются интерференционные полосы в спектрах электролюминесценции, отражения и электроотражения, совпадают.

Полосы с „коротким“ периодом обусловлены интерференцией в слоях толщиной $\sim 5.2 \text{ мкм}$, что соответствует всей толщине гетероструктуры от подложки Al_2O_3 до зеркала резонатора.

Полосы с „длинным“ периодом обусловлены интерференцией в слоях толщиной $\sim 200 \text{ нм}$, что соответствует области, образованной слоями p -GaN, p -AlGaIn и множественными квантовыми ямами.

Уменьшение в 1.5 раза толщины барьерного слоя p -AlGaIn приводит как к увеличению интенсивности линии ER, так и к увеличению амплитуды интерференционных полос в спектрах электроотражения. Изменения амплитуды интерференционных полос и интенсивности линии ER в спектрах электроотражения коррелируют с изменением КПД светодиода.

Увеличение концентрации легирующей примеси в буферной сверхрешетке в 3 раза приводит как к увеличению КПД светодиода, так и к увеличению интенсивности линии ER и амплитуды интерференционных полос в спектре электроотражения. Легирование буферной сверхрешетки до определенной концентрации приводит к уменьшению плотности дефектов в активной области гетероструктуры, дальнейшее увеличение концентрации примеси плотность дефектов увеличивает.

Метод спектроскопии электроотражения может быть использован для определения положения активной области гетероструктуры по отношению к зеркалу резонатора, что практически важно для контроля внешнего квантового выхода излучения.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-612.2008.2.

Список литературы

- [1] Ф.Е. Шуберт. *Светодиоды* (М., Физматлит, 2008) гл. 10, 15.
- [2] N. Watanabe, T. Kimoto, J. Suda. *Abstr. Int. Workshop on Nitride Semiconductors 2008* (Montreux, Switzerland, 2008) p. 487.
- [3] М.Л. Бадгутдинов, А.Э. Юнович. *ФТП*, **48**, 438 (2008).
- [4] T. Taekuchi, C. Wetzel, S. Yamaguchi, H. Sakai, H. Amano, I. Akasaki, Y. Kaneko, S. Nakagawa, N. Yamada. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 1691 (1998).
- [5] Д.А. Закгейм, И.П. Смирнова, И.В. Рожанский, С.А. Гуревич, М.М. Кулагина, Е.М. Аракчеева, Г.А. Онушкин, А.Л. Закгейм, Е.Д. Васильева, Г.В. Иткинсон. *ФТП*, **49**, 885 (2005).
- [6] Н.И. Бочкарева, Е.А. Жирнов, А.А. Ефремов, Ю.Т. Ребане, Р.И. Горбунов, А.В. Клочков, Д.А. Лавринович, Ю.Г. Шрептер. *ФТП*, **39**, 829 (2005).

- [7] Л.П. Авакянц, П.Ю. Боков, А.В. Червяков. ЖТФ, **75**, 66 (2005).
- [8] 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. Феопентов. ФТП, **41**, 1078 (2007).
- [9] М.Л. Бадгутдинов, Е.Ф. Коробов, Ф.А. Лукьянов, А.Э. Юнович, Л.М. Коган, Н.А. Гальчина, И.Т. Рассохин, Н.П. Сощин. ФТП, **40**, 758 (2006).
- [10] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (М., Наука, 1972).
- [11] A. Billeb, W. Grieshaber, D. Stocker, E.F. Schubert, R.F. Karlicek. Appl. Phys. Lett., **70**, 2790 (1997).
- [12] R.D. Dupuis, M.R. Krames. J. Lightwave Technol., **26**, 1154 (2008).
- [13] A.E. Yunovich, M.L. Batgutdinov, L.P. Avakyants, P. Yu. Bokov, A.V. Chervyakov, S.S. Shirokov, E.D. Vasileva, A.V. Feopentov, F.M. Snegov, D.A. Bauman, B.S. Yavich. Mater. Res. Soc. Symp., **955**, 0955-I15-36 (2007).
- [14] M. Herman, D. Bimberg, J. Christen. J. Appl. Phys., **70**, R1 (1991).
- [15] Z.Z. Chen, B. Shen, Z.X. Qin, J.M. Zhu, R. Zhang, Y.D. Zheng, G.Y. Zhang. Physica B: Condens. Matter, **324**, 59 (2002).

Редактор Л.В. Шаронова

The interference in electroreflectance and electroluminescence spectra of LED InGaN/AlGaIn/GaN heterostructures

L.P. Avakyants*, P.Yu. Bokov*, A.V. Chervyakov*,
A.V. Chuyas*, A.E. Yunovich*, E.D. Vasileva⁺,
V.V. Uelin⁺, D.A. Bauman⁺, B.S. Yavich⁺

* M.V. Lomonosov Moscow State University
(Department of Physics),
119991 Moscow, Russia

⁺ JSC „Svetlana-Optoelektronika“,
194156 St. Petersburg, Russia

Abstract The interference effects in blue LED InGaN/AlGaIn/GaN heterostructures have been studied by means of electroreflectance and electroluminescence spectroscopy. The interference fringes in the electroreflectance spectra and in the blue part of the electroluminescence spectra are connected with the interference in the whole heterostructure. The interference fringes in the electroreflectance spectra are connected with the modulation of built-in electric fields in the heterostructure active layer. The long-period interference fringes in the electroreflectance spectra are in the wide range from ultraviolet to infrared. They allow to determine a position of the active region in the heterostructure.