

Фотоэлектрический метод диагностики гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами

© М.В. Барановский[¶], Г.Ф. Глинский, М.С. Миронова

Санкт-Петербургский государственный университет „ЛЭТИ“,
197376 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 15 мая 2012 г. Принята к печати 21 мая 2012 г.)

Исследованы зависимости фототока гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами от обратного смещения. Обнаружены характерные особенности, связанные с последовательным прохождением границы области объемного заряда через квантовые ямы исследуемой структуры. Экспериментально показано, что для каждой квантовой ямы существует область обратных смещений с отрицательной дифференциальной проводимостью, которая исчезает при увеличении энергии фотонов оптического возбуждения. Предполагается, что этот эффект обусловлен смещением края оптического поглощения в квантовой яме, которое происходит при частичной компенсации пьезоэлектрического поля в области квантовой ямы электрическим полем $p-n$ -перехода.

1. Введение

В настоящее время полупроводниковые наногетероструктуры широко используются при создании электронных приборов различного назначения, чему способствовали значительные успехи, достигнутые в последние годы как в теории таких систем [1,2], так и в технологии их получения. Гетероструктуры InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами представляют особый интерес в связи с перспективой их использования в системах светодиодного освещения, однако нерешенным остается ряд проблем, препятствующих значительному увеличению интенсивности светодиодов на их основе. В первую очередь это относится к качеству интерфейсов гетероструктуры, обеспечивающих пространственную локализацию носителей заряда в квантовых ямах. В этой связи первостепенное значение приобретает разработка эффективных методов характеристики гетероструктур InGaN/GaN, содержащих множественные квантовые ямы. На сегодняшний день наиболее широкое распространение, благодаря высокой информативности и относительной простоте измерительного оборудования, получили адмиттантные методы исследования гетероструктур [3–6], в частности метод вольт-фарадного профилирования [7–12]. С его помощью можно определить распределение свободных носителей заряда по глубине гетероструктуры, т.е. получить информацию о местоположении и качестве отдельных квантовых ям. Однако более информативным является метод адмиттантных измерений, сочетающихся с оптическим возбуждением гетероструктуры на определенной длине волны. Если энергия падающих фотонов больше ширины запрещенной зоны материала, составляющего квантовые ямы InGaN, но меньше ширины запрещенной зоны барьеров GaN, то поглощение света и генерация избыточных носителей заряда происходит только в областях квантовых ям. В результате на вольт-фарадной характеристике отклик от каждой квантовой ямы увеличивается. Так, в работе [13] подобная методика

применялась для прямого определения неоднородности гетероструктуры InGaN/GaN, обусловленной различием параметров отдельных квантовых ям.

В данной работе предлагается новый фотоэлектрический метод диагностики светодиодных гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами [14]. В основе метода лежит исследование зависимости фототока I_{ph} от обратного смещения U_r , прикладываемого к $p-n$ -переходу, при возбуждении светом в диапазоне длин волн, соответствующих краю оптического поглощения материала квантовых ям InGaN. При увеличении обратного смещения область объемного заряда расширяется так, что граница этой области последовательно проходит через квантовые ямы исследуемой структуры, в результате чего на зависимости $I_{ph}(U_r)$ появляются ярко выраженные особенности [15]. При этом для каждой квантовой ямы существует область обратных смещений, где дифференциальная проводимость структуры dI_{ph}/dU_r принимает отрицательные значения.

2. Исследуемые образцы и методика эксперимента

В качестве образцов использовались промышленные синие светодиоды фирмы A-Bright (длина волны света в максимуме излучения составляла 465 нм). Площадь $p-n$ -перехода, измеренная с использованием оптического микроскопа, составляла 0.067 мм². Из вольт-фарадных измерений, проводимых ранее [16–18], было определено, что исследуемые структуры содержат 5 квантовых ям, расположенных на расстоянии приблизительно 18 нм друг от друга (рис. 1).

Проводились два типа измерений фототока. В первом случае измерялся обратный ток в статическом режиме при постоянной подсветке широкополосным спектром $\Delta\lambda \approx 30$ нм с $\lambda_{max} \approx 465$ нм. Измерения проводились в диапазоне температур от 50 до 300 К на установке, описанной в работе [19]. Исследуемые образцы помещались в камеру гелиевого криостата. В качестве источника

[¶] E-mail: maxim.bmw.spb@gmail.com

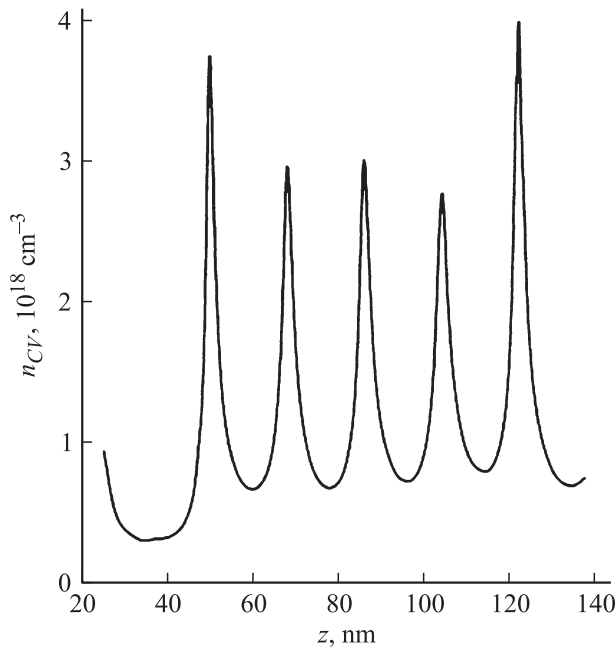


Рис. 1. Наблюдаемый профиль концентрации свободных носителей заряда в исследуемых структурах, определенный из вольт-фарадных измерений на частоте 1 МГц при комнатной температуре.

оптического излучения использовался синий светодиод, спектральная характеристика которого была аналогична характеристикам исследуемых диодов. Оптическая мощность его излучения составляла приблизительно 1 мВт, а максимум спектра был близок к краю оптического поглощения в квантовых ямах исследуемых структур. Излучение фокусировалось на образце через оптическое окно в камере криостата. Постоянное обратное напряжение устанавливалось внешним источником, а сквозной ток регистрировался измерителем иммитанса Е7-20 в режиме измерения тока утечки.

Во втором случае измерения проводились на переменном токе при комнатной температуре. Излучение от мощного синего светодиода проходило через дифракционный монохроматор спектрофотометра СФ-56, в результате чего выделялась спектральная линия шириной $\Delta\lambda \approx 1$ нм в диапазоне длин волн от 430 до 480 нм. В зависимости от длины волны оптическая мощность излучения на выходе монохроматора изменялась от 0.02 до 1.5 мкВт. Световой поток, сфокусированный на образце, прерывался механическим модулятором с частотой 280 Гц. Постоянное обратное смещение устанавливалось внешним источником напряжения, а переменный сигнал, пропорциональный амплитуде фототока, регистрировался фазочувствительным нановольтметром Unipan-232В.

3. Экспериментальные данные и их обсуждение

Экспериментальные исследования зависимости фототока гетероструктур InGaN/GaN с множественными

квантовыми ямами от обратного смещения при оптическом возбуждении широкополосным ($\Delta\lambda \approx 30$ нм) источником света выявили наличие ярко выраженных характерных особенностей. При увеличении обратного смещения наблюдались участки нарастания и спада фототока (рис. 2, *a*). Сопоставления этих данных с вольт-фарадными характеристиками (рис. 2, *b*) позволили сделать вывод о том, что эти особенности отражают внутреннюю структуру исследуемых образцов. Они возникают при напряжениях, когда граница области объемного заряда последовательно пересекает области, где расположены квантовые ямы. Действительно, в том случае, когда квантовая яма находится в области квазинейтральности, где электрическое поле $p-n$ -перехода отсутствует, потоки генерируемых светом носителей заряда во всех направлениях одинаковы, и полный фототок в этом случае равен нулю. Напротив, если квантовая яма находится внутри области объемного заряда, то электрическое поле $p-n$ -перехода приводит к эффективному пространственному разделению генерируемых светом электронов и дырок, преодолевших потенциальный барьер квантовой ямы вследствие теплового выброса, и возникновению фототока. Таким образом, при увеличении обратного смещения, в момент, когда граница области объемного заряда проходит квантовую яму, фототок должен резко расти, что и наблюдается в эксперименте (рис. 2, *a*).

Отметим, что особенности на обратной ветви вольт-амперной характеристики наиболее отчетливо наблюдаются при комнатной температуре. Это связано с тем, что носители заряда, генерируемые светом, для участия в процессе фотопроводимости должны преодолеть потенциальный барьер квантовой ямы. Наиболее вероятным механизмом такого процесса является тепловой выброс, поэтому увеличение температуры приводит как к росту фототока, так и к обострению особенностей на вольт-амперной характеристике. Заметим, что особенности на вольт-фарадной характеристике, напротив, наиболее отчетливо наблюдаются при низких температурах, когда функция распределения Ферми-Дирака имеет наиболее резкий характер в области энергии Ферми.

Другой важной особенностью зависимости фототока от обратного смещения является наличие участков отрицательной дифференциально проводимости, т. е. спада фототока при увеличении обратного смещения. Мы предполагаем, что это связано с уменьшением коэффициента поглощения света на данной длине волны при расширении области объемного заряда. При малых обратных смещениях, когда квантовая яма находится в области квазинейтральности (рис. 3, *a*), в ней присутствует встроенное пьезоэлектрическое поле, и на энергетический зазор между основными состояниями электрона и дырки ΔE_1 сильное влияние оказывает квантово-размерный эффект Штарка. В этом случае коэффициент поглощения света с энергией фотонов $\hbar\omega_0$, превышающей пороговую энергию ΔE_1 , будет высоким (см. вставку на рис. 3, *a*). При увеличении обратного смещения квантовая яма оказывается в области объемного заряда

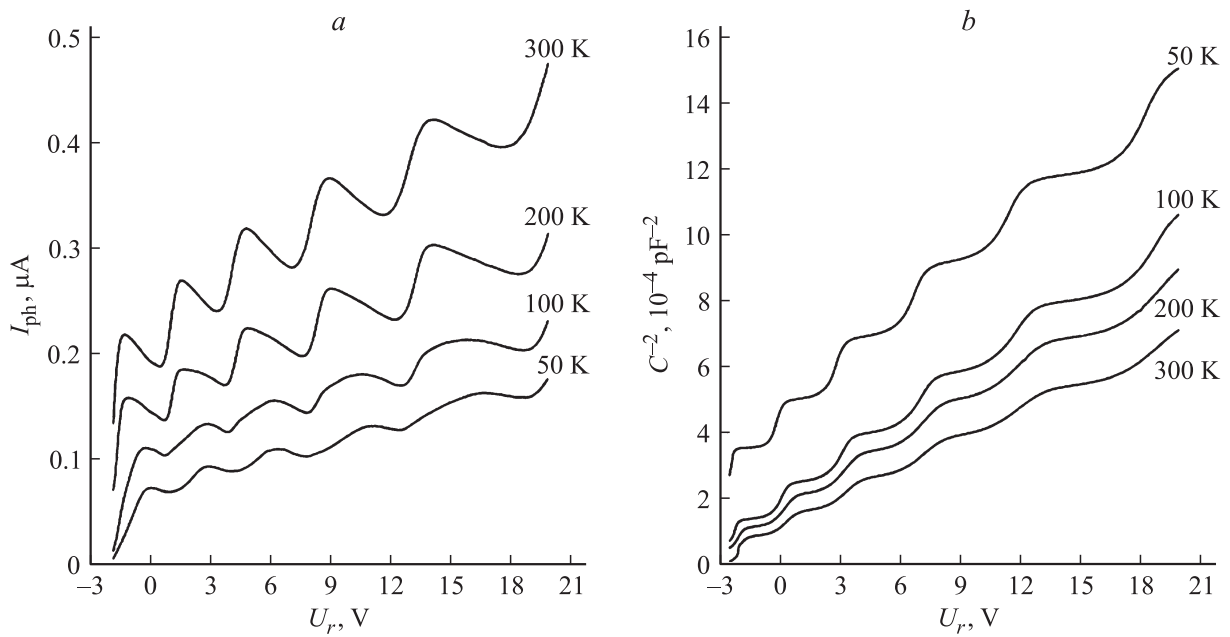


Рис. 2. Сравнение фотоэлектрических (а) и вольт-фарадных (б) характеристик исследуемого образца при различных температурах.

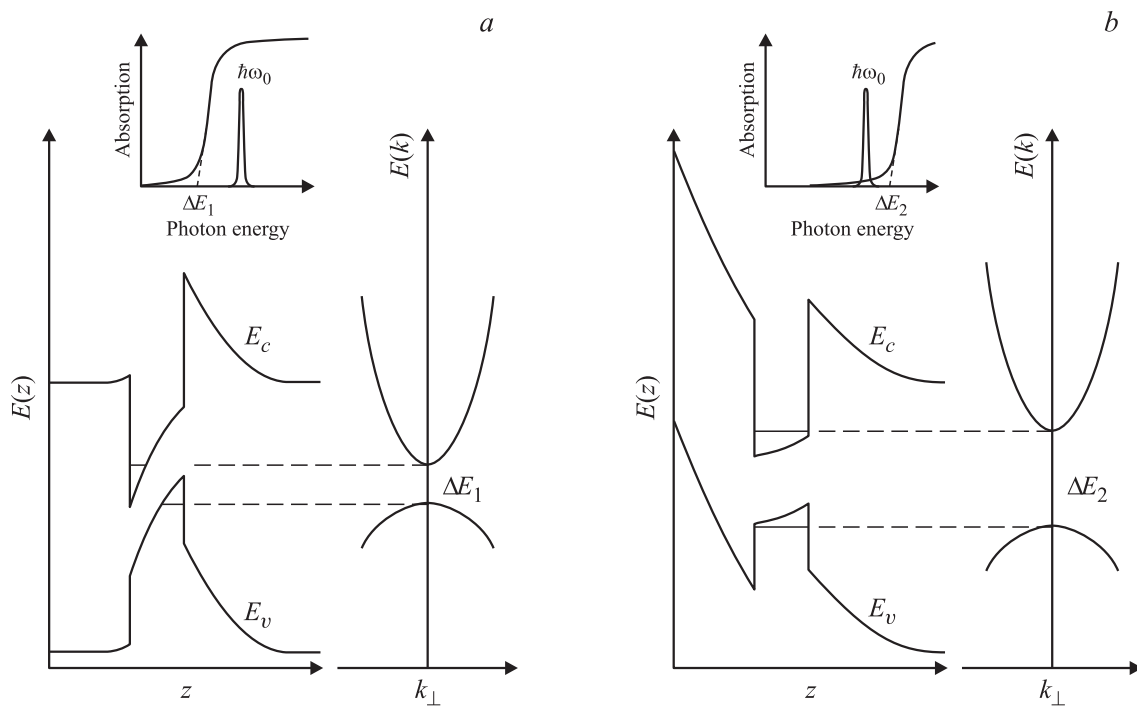


Рис. 3. Энергетическая диаграмма квантовой ямы в области квазинейтральности (а) и в области объемного заряда p – n -перехода (б). На вставках показано положение линии оптического возбуждения относительно края собственного поглощения в квантовой яме.

p – n -перехода (рис. 3, б), электрическое поле которого частично компенсирует встроенное пьезоэлектрическое поле квантовой ямы. При этом происходит увеличение энергетического зазора между основными состояниями электрона и дырки, что приводит к смещению края оптического поглощения квантовой ямы из точки ΔE_1

в точку ΔE_2 . В результате число поглощаемых фотонов с энергией $\hbar\omega_0$ существенно уменьшается (см. вставку на рис. 3, б).

В пользу этой модели свидетельствуют результаты спектральных исследований фототока. На рис. 4 приведены зависимости фототока от обратного смещения,

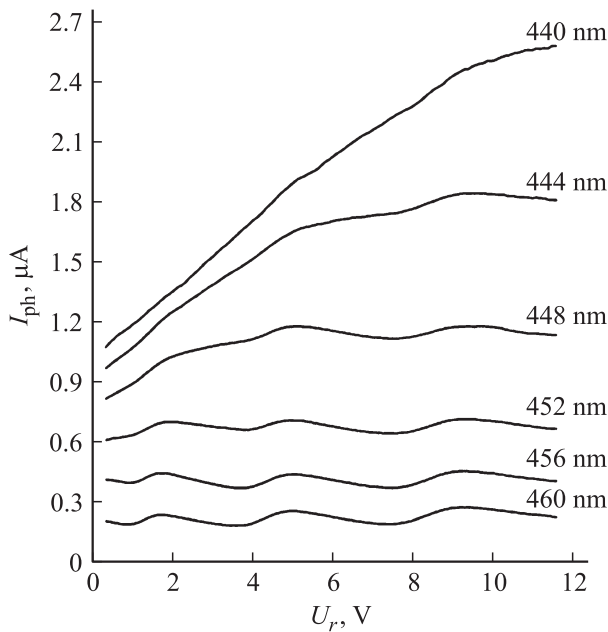


Рис. 4. Зависимости фототока от обратного смещения при различных длинах волн оптического возбуждения.

измеренные при оптическом возбуждении монохроматическим светом, нормированные на интенсивность светового потока. При энергиях фотонов, близких к оптическому порогу ΔE_1 ($\lambda \approx 460$ нм), наблюдаются участки нарастания и спада фототока. Увеличение энергии фотонов приводит к тому, что участки отрицательной дифференциальной проводимости постепенно исчезают, причем в первую очередь у квантовых ям, находящихся ближе к металлургической границе $p-n$ -перехода. Так, в диапазоне обратных смещений $U_r = 1.6-3.7$ В отрицательная дифференциальная проводимость исчезает уже при длине волны света $\lambda = 448$ нм, а в диапазоне $U_r = 4.9-7.4$ В — только при $\lambda = 444$ нм. Причиной этой неоднородности может быть различие пьезоэлектрического поля в разных квантовых ямах, на что указывалось в работе [13]. Дальнейшее увеличение энергии фотонов ($\lambda \approx 440$ нм) приводит к тому, что смещение оптического порога во всех квантовых ямах перестает влиять на коэффициент поглощения света на данной длине волны, в результате чего участки отрицательной дифференциальной проводимости исчезают во всем диапазоне обратных напряжений.

4. Заключение

Исследования гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами показали, что зависимость фототока I_{ph} от обратного смещения U_r отражает внутреннюю структуру исследуемых образцов. При напряжениях, когда граница области объемного заряда $p-n$ -перехода проходит области расположения квантовых ям, наблюдается резкое увеличение фототока,

что связано с пространственным разделением генерируемых светом носителей заряда в электрическом поле $p-n$ -перехода. Для участия в процессе фотопроводимости носители заряда должны преодолеть потенциальный барьер квантовой ямы. Поскольку наиболее вероятным механизмом такого процесса является тепловой выброс, особенности фототока наиболее ярко выражены при комнатной температуре. Экспериментально показано, что при оптическом возбуждении на длине волны, близкой к краю оптического поглощения в квантовых ямах, существуют участки отрицательной дифференциальной проводимости dI_{ph}/dU_r . Предполагается, что их наличие связано со смещением края оптического поглощения в квантовых ямах в коротковолновую область, вызванным компенсацией пьезоэлектрического поля в квантовых ямах электрическим полем $p-n$ -перехода. С увеличением энергии фотонов оптического возбуждения отрицательная дифференциальная проводимость исчезает, причем в первую очередь у квантовых ям вблизи металлургической границы $p-n$ -перехода. Это может быть объяснено различием пьезоэлектрического поля в разных квантовых ямах. На основе полученных данных можно сделать вывод, что исследование зависимости фототока от обратного смещения может использоваться в качестве эффективного неразрушающего метода диагностики полупроводниковых гетероструктур, в частности светодиодных структур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN.

Список литературы

- [1] Г.Ф. Глинский. В кн.: *Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы*, под ред. В.В. Лучинина, Ю.М. Таирова (М., Физматлит, 2006) с. 16.
- [2] Г.Ф. Глинский. *Полупроводники и полупроводниковые наноструктуры: симметрия и электронные состояния* (СПб., Технолит, 2008) с. 270.
- [3] В.И. Зубков. *Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса* (СПб., Элмор, 2007).
- [4] V.I. Zubkov, S.M.A. Kapteyn, A.V. Solomonov, D. Bimberg. *J. Phys.: Condens. Matter*, **17**, 2435 (2005).
- [5] О.В. Кучерова, В.И. Зубков, Е.О. Цвелев, И.Н. Яковлев, А.В. Соломонов. *Завод. лаб. Диаг. мат.*, **76**, 24 (2010).
- [6] О.В. Кучерова, В.И. Зубков, А.В. Соломонов, Д.В. Давыдов. *ФТП*, **44**, 352 (2010).
- [7] В.И. Зубков, М.А. Мельник, А.В. Соломонов. *ФТП*, **32**, 61 (1998).
- [8] В.И. Зубков, М.А. Мельник, А.В. Соломонов, А.Н. Пихтин, Ф. Бугге. *ФТП*, **33**, 940 (1999).
- [9] V.I. Zubkov, M.A. Melnik, A.V. Solomonov, E.O. Tsvelev, F. Bugge, M. Weyers, G. Trankle. *Phys. Rev. B*, **70**, 075 312 (2004).
- [10] В.И. Зубков. *ФТП*, **40**, 1236 (2006).
- [11] В.И. Зубков. *ФТП*, **41**, 331 (2007).
- [12] А.Н. Петровская, В.И. Зубков. *ФТП*, **43**, 1368 (2009).
- [13] Tae-Soo Kim, Byung-Jun Ahn, Yanqun Dong, Ki-Nam Park, Jin-Gyu Lee et. al. *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 071 910 (2012).
- [14] М.В. Барановский, Г.Ф. Глинский. Пат. 117714 РФ, МПК H01L21/66, приоритет 09.12.2011.

- [15] М.В. Барановский, Г.Ф. Глинский. *Тез. докл. 13-й Всерос. молодеж. конф. по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике* (СПб., Россия, 2011) с. 34.
- [16] М.В. Барановский, Г.Ф. Глинский. *Тез. докл. 12-й науч. молодеж. шк. по твердотельной электронике* (СПб., Россия, 2009) с. 28.
- [17] М.В. Барановский, Г.Ф. Глинский. *Тез. докл. 11-й Всерос. молодеж. конф. по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике* (СПб., Россия, 2009) с. 74.
- [18] М.В. Барановский, Г.Ф. Глинский. *Тез. докл. 12-й Всерос. молодеж. конф. по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике* (СПб., Россия, 2010) с. 105.
- [19] М.В. Барановский, Г.Ф. Глинский. *Изв. СПбГЭГУ „ЛЭТИ“*, **4/2012**, 3 (2012).

Редактор Т.А. Полянская

Photoelectric method for diagnostics of multiple quantum well InGaN/GaN heterostructures

M.V. Baranovskiy, G.F. Glinskii, M.S. Mironova

St. Petersburg State Electrotechnical University „LETI“,
197376 St. Petersburg, Russia

Abstract Photocurrent of multiple quantum well InGaN/GaN heterostructures as a function of applied reverse bias is investigated. We observed characteristic features related to consequently moving space charge boundary through the quantum wells. It is experimentally shown that for each quantum well there is a range of reverse bias with negative differential conductance, which disappears with increasing of photon energy. We assume that this effect is caused by absorption edge shift in quantum well due to partial compensation of piezoelectric field in $p-n$ -junction electric field.