

Фотореверсивный ток в светодиодных гетероструктурах на основе InGaN/GaN с разным количеством квантовых ям

© А.Э. Асланян¹, Л.П. Авакянц¹, А.В. Червяков¹, А.Н. Туркин¹, В.А. Курешов²,
Д.Р. Сабитов², А.А. Мармалюк²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (физический факультет),
119991 Москва, Россия

² ООО „Сигм плюс“,
117342 Москва, Россия

E-mail: aslanyan.artyom@physics.msu.ru

Поступила в Редакцию 28 октября 2019 г.

В окончательной редакции 6 ноября 2019 г.

Принята к публикации 6 ноября 2019 г.

Исследованы светодиодные гетероструктуры на основе InGaN/GaN с различным количеством квантовых ям методом спектроскопии фототока в диапазоне длин волн 350–500 нм. В результате анализа серии спектров, полученных при различных смещениях p – n -перехода, обнаружен эффект смены направления фототока при изменении длины волны возбуждения (фотореверсивный эффект). Установлен диапазон смещений p – n -перехода, при котором наблюдается указанный эффект для структур с разным количеством квантовых ям в активной области.

Ключевые слова: светодиодные гетероструктуры, фототок, квантовая яма, нитрид галлия.

DOI: 10.21883/FTP.2020.03.49035.9296

1. Введение

Развитие технологии изготовления приборов на основе гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) InGaN/GaN невозможно без детального изучения процессов фотовозбуждения и протекания тока вдоль направления роста структуры. Такие исследования важны как для поглощающих [1], так и для светоизлучающих устройств на основе GaN [2], используемых в ультрафиолетовом, синем и зеленом диапазонах оптического спектра. Одним из инструментов для таких исследований является метод спектроскопии фототока (ФТ). Этот метод связан с поглощением монохроматического излучения при фотовозбуждении связанных электронов из валентной зоны в зону проводимости [3]. Ранее такие исследования проводились для структур на основе слоев InGaN/GaN с разной концентрацией индия в квантовых ямах активной области [4], при гидростатическом давлении [5], с разной концентрацией Mg в барьерах [6]. В указанных работах авторы изменяли состав, количество слоев, а также концентрацию примесей в активной области с целью поиска оптимальной зонной структуры готового устройства.

Помимо состава слоев и концентрации примесей, зонная структура определяется напряженностью электрического поля в этих слоях. Внешнее электрическое поле, приложенное к p – n -переходу с помощью источника постоянного напряжения, позволяет изменять наклон зон. В этом случае обратное напряжение приводит к уменьшению наклона зон в КЯ InGaN и увеличению в барьерах GaN. Кроме того, увеличивается разность энергий между зонами одного типа в n -GaN- и p -GaN-областях и между барьерами активной области. Таким образом, конфигурация зонной структуры задает

высоту потенциальных барьеров для носителей зарядов, оказывая влияние на величину и направление тока в структуре. В гетероструктурах с p – n -переходом можно изменять внутренние электрические поля по направлению и величине, подавая смещение на соответствующие контакты. Небольшое смещение вызывает существенное изменение внутренних электрических полей за счет высокоомной обедненной области, в которой расположены активные элементы структуры — квантовые ямы. Таким образом, исследованные в данной работе светодиодные гетероструктуры являются модельными объектами для изучения процессов поглощения и излучения света в полупроводниковых гетероструктурах.

В настоящей работе представлены результаты исследования спектров ФТ при смещениях p – n -перехода разного знака в светодиодных гетероструктурах InGaN/GaN с разным количеством КЯ в активной области.

2. Образец и методика эксперимента

Исследованные образцы были получены методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD). Последовательно на сапфировой подложке диаметром 50.8 мм и толщиной 430 мкм выращивались затравочный низкотемпературный слой и буферный слой i -GaN суммарной толщиной 2 мкм; слой n -GaN, легированный Si с концентрацией доноров $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; активная область, состоящая из барьера i -GaN толщиной 16 нм и пар InGaN/GaN с толщинами 2.5/15 нм, составляющих КЯ; слой p -GaN толщиной 110 нм с концентрацией акцепторов $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (рис. 1). На поверхности образцов были сформированы индиевые контакты к слоям n -GaN и p -GaN. Длина волны свечения

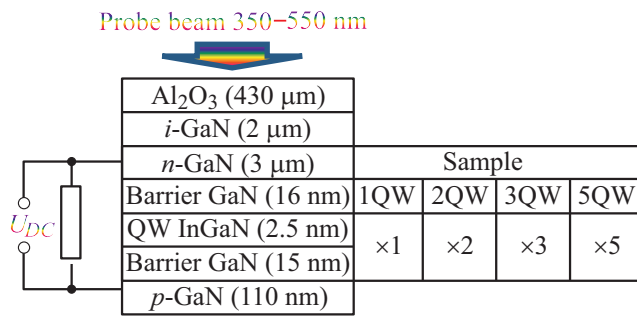


Рис. 1. Структура образца и схема подключения смещения U_{DC} к $p-n$ -переходу.

структур ~ 510 нм по данным спектроскопии электролюминесценции.

В светодиодных структурах на основе InGaN/GaN, как правило, применяют специальные слои AlGaIn, ограничивающие перемещение носителей вдоль направления роста структуры. Это позволяет уменьшить утечку электронов из активной области, что важно для мини-

мизации эффекта резкого уменьшения эффективности инжекции с ростом тока [7]. Однако в данной работе для уменьшения количества факторов, влияющих на ФТ и зонную структуру, были использованы образцы без слоев AlGaIn. Для регистрации спектров ФТ использовалась экспериментальная установка, реализующая метод синхронного детектирования. Для этого свет от лампы накаливания, прошедший через монохроматор в диапазоне длин волн 350–550 нм, модулировался механическим прерывателем с частотой 370 Гц. Затем модулированное излучение падало на образец под углом 8° . Сигнал с прерывателя (меандр) подавался на вход опорного напряжения синхронного детектора. Напряжение на контактах $p-n$ -перехода пропорционально переменной составляющей тока, возникающей между p - и n -контактами при модуляции излучения из монохроматора. Это же напряжение подавалось на вход синхронного детектора. Таким образом, напряжение на выходе синхронного детектора было пропорционально фототоку, возникающему в структуре. Постоянное смещение $p-n$ -перехода U_{DC} с источника напряжения изменялось в диапазоне $-1 \text{ В} \dots +4 \text{ В}$ с шагом 0.5 В.

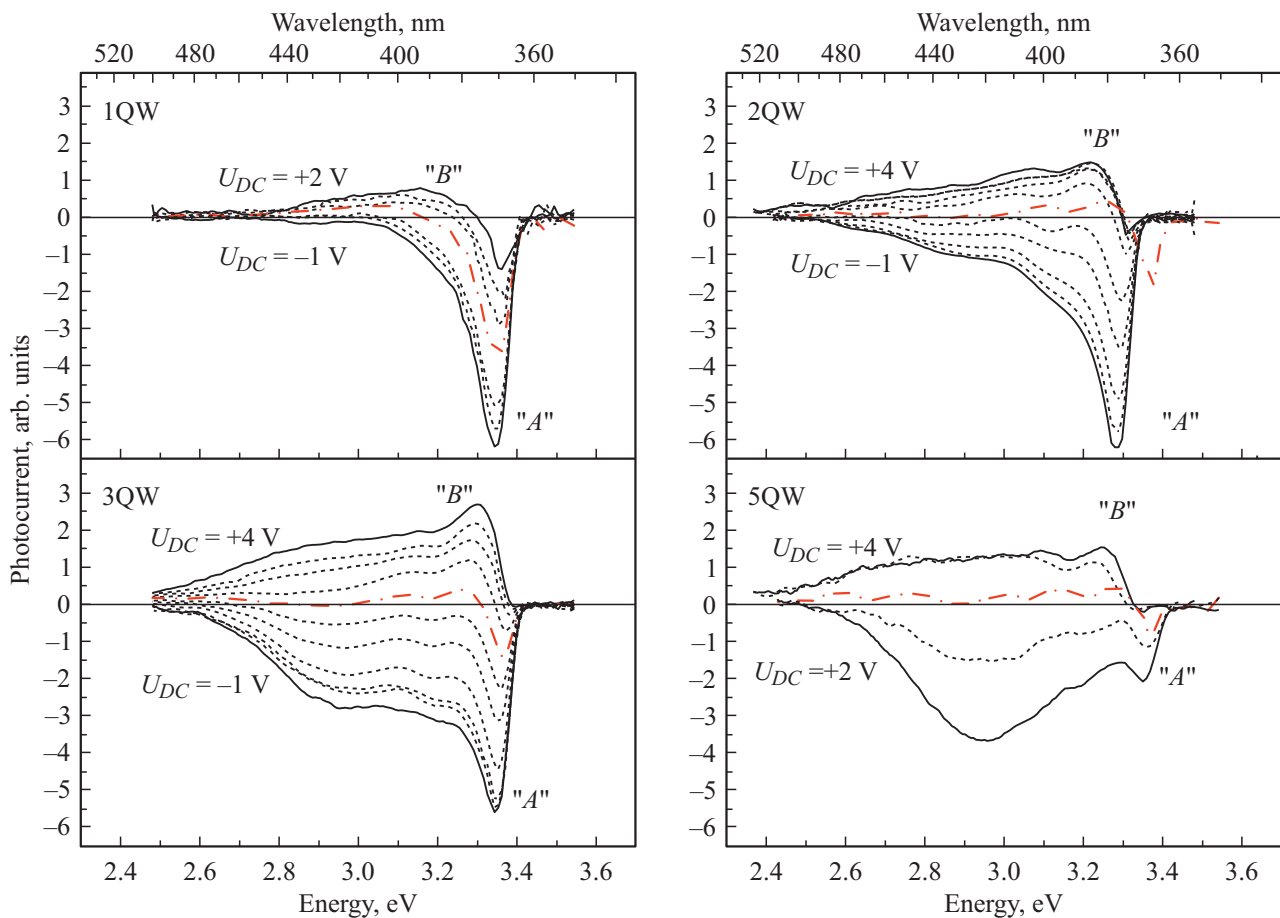


Рис. 2. Спектры ФТ при разных смещениях $p-n$ -перехода U_{DC} для образцов с 1, 2, 3 и 5 КЯ в активной области. Сплошной линией обозначены спектры ФТ при минимальных и максимальных смещениях U_{DC} в серии. Штриховой линией обозначены спектры ФТ при промежуточных смещениях U_{DC} . Штрихпунктирной линией выделены спектры ФТ при минимальном смещении $p-n$ -перехода U_{DC} , при котором возникает фотореверсивный эффект.

3. Результаты и обсуждение

Как правило, для анализа спектров ФТ проводится нормировка либо на максимальное значение фототока [8,9], либо на фототок при энергии, относящейся к фундаментальному краю поглощения GaN [10]. Такая процедура позволяет определить ширину запрещенной зоны и избежать влияния смещения $p-n$ -перехода U_{DC} на изменения амплитуды сигнала фототока, связанного с изменением квантового выхода. В данной работе, в связи с необходимостью анализа величины фототока, нормировка не проводилась.

Спектры ФТ для образцов с 1, 2, 3 и 5 КЯ при разных смещениях $p-n$ -перехода U_{DC} представлены на рис. 2. Сплошной линией выделены спектры, соответствующие максимальному положительному и отрицательному смещению U_{DC} . Штриховыми линиями обозначены спектры с промежуточными значениями U_{DC} с шагом 0.5 В. Для каждого образца красной штрихпунктирной линией обозначен спектр при минимальном смещении U_{DC} , при котором наблюдается фотореверсивный эффект. Этот эффект состоит в следующем. Обычно фототок может быть только прямым или обратным при любой длине волны возбуждения (например, сплошная линия для образца с тремя КЯ на рис. 2). Но мы обнаружили, что фототок может менять направление в зависимости от длины волны возбуждающего излучения в определенном диапазоне смещений. На рис. 2 штрихпунктирной линией выделены спектры ФТ при минимальном смещении $p-n$ -перехода U_{DC} , при котором возникает фотореверсивный эффект. Указанный эффект может быть объяснен следующими процессами:

1) поглощением в нелегированных барьерных слоях GaN при энергии около 3.34–3.37 эВ. Соответствующий спектральный пик обозначен „А“ на рис. 2. Этот спектральный пик создает обратный ток практически при всех смещениях;

2) поглощением при участии донорно-акцепторных переходов в диапазоне энергий 2.6–3.3 эВ [11]. Соответствующий спектральный пик обозначен „В“ на рис. 2. Этот спектральный пик создает прямой ток.

В случае процесса „А“ электроны возбуждаются из валентной зоны барьера в зону проводимости (рис. 3). Свободные электроны, сформированные таким образом, создают обратный ток даже при небольшом прямом смещении $p-n$ -перехода. С ростом прямого смещения электрическое поле в барьере уменьшается, зоны выравниваются и обратный ток прекращается. Наблюдается смещение пика „А“ в коротковолновую область спектра.

Поглощение в случае процесса „В“ объясняется возбуждением электрона в зону проводимости с акцепторного уровня валентной зоны барьерного слоя около области p -GaN. Потенциальный барьер для таких электронов достаточно мал для прямого тока, возникающего даже при отрицательном смещении. С ростом смещения прямой ток будет увеличиваться в соответствии с процессами в гомогенном $p-n$ -переходе.

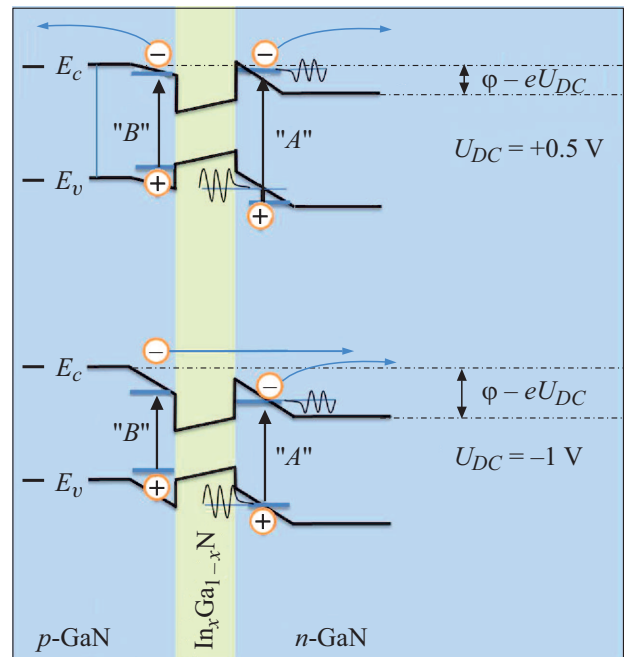


Рис. 3. Схема зонной структуры при двух смещениях $p-n$ -перехода U_{DC} для гетероструктуры с одной квантовой ямой.

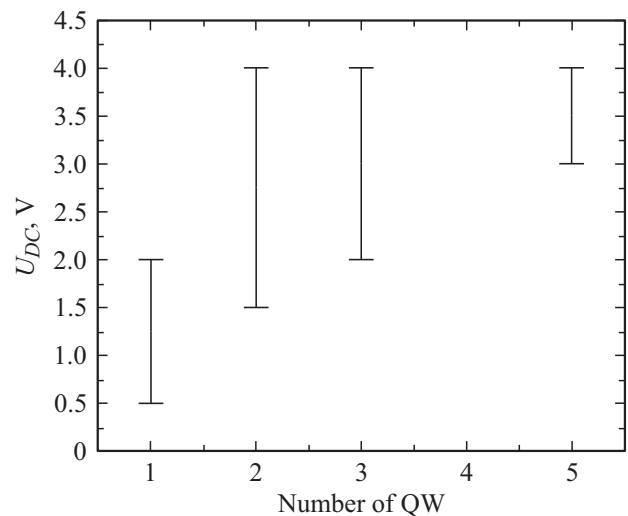


Рис. 4. Диапазон смещений $p-n$ -перехода, при котором возникает фотореверсивный эффект, в зависимости от количества квантовых ям в активной области.

Заметим, что указанные энергии связаны только с барьерными слоями. Особенности, соответствующие квантово-размерной области гетероструктуры, находятся в области энергий ~ 2.5 эВ и слабо выделяются на фоне поглощения в барьерах.

На рис. 4 показана зависимость диапазона смещений, при которых наблюдается фотореверсивный эффект, от числа КЯ. Наблюдаемый рост среднего значения смещения из этого диапазона связан с тем, что при

увеличении количества КЯ увеличивается концентрация формирующих обратный ток „барьерных“ электронов, возникающих в нелегированных слоях GaN между КЯ. Таким образом, с ростом числа КЯ компенсация электронов, образованных в нелегированных барьерах (типа „А“), происходит при больших положительных смещениях, и нижняя граница диапазона смещений на рис. 4 увеличивается.

4. Заключение

При комнатной температуре зарегистрированы спектры ФТ для разных смещений $p-n$ -перехода U_{DC} для образцов с 1, 2, 3 и 5 КЯ в активной области. Обнаружено, что для всех образцов существует определенное смещение, при котором ток, возбуждаемый падающим на структуру излучением, может иметь разное направление в зависимости от длины волны этого излучения. Предположительно, электроны, возбуждаемые в барьерных слоях, создают обратный ток, в то время как электроны, возбуждаемые вблизи активной области с акцепторного уровня в слое p -GaN, создают прямой ток даже при отрицательных смещениях U_{DC} . Установлен диапазон смещений $p-n$ -перехода, при котором наблюдается указанный эффект для структур с разным количеством квантовых ям в активной области. С ростом количества квантовых ям в активной области эффект реверсивного тока наблюдается при больших смещениях $p-n$ -перехода.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.M. Sze, K.K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices* (Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., 2006).
- [2] E.F. Schubert. *Light-Emitting Diodes* (Cambridge, Cambridge University Press, 2006).
- [3] K. Seeger. *Semiconductor Physics* (Berlin, Springer Berlin Heidelberg, 1991) v. 40.
- [4] A.B.M.H. Islam, J.-I. Shim, D.-S. Shin. *IEEE J. Quan. Electron.*, **55**, 1(2019).
- [5] A. Bercha, W. Trzeciakowski, M. Gładysiewicz-Kudrawiec, Y. Ivonyak, S. Grzanka. *J. Appl. Phys.*, **125**, 115702 (2019).
- [6] N. Zhang, Z. Liu, Z. Si, P. Ren, X.-D. Wang, X.-X. Feng, P. Dong, C.-X. Du, S.-X. Zhu, B.-L. Fu, H.-X. Lu, J.-M. Li, J.-X. Wang. *Chinese Phys. Lett.*, **30**, 087101 (2013).
- [7] S.H. Han, D.Y. Lee, S.J. Lee, C.Y. Cho, M.K. Kwon, S.P. Lee, D.Y. Noh, D.J. Kim, Y.C. Kim, S.J. Park. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 1 (2009).
- [8] G. Franssen, P. Perlin, T. Suski. *Phys. Rev. B*, **69**, 45310 (2004).
- [9] D. Shin, J. Lee, J. Shim. *IEEE J. Quan. Electron.*, **49**, 1062 (2013).
- [10] S.-I. Park, J.-I. Lee, D.-H. Jang, H.-S. Kim, D.-S. Shin, H.-Y. Ryu, J.-I. Shim. *IEEE J. Quant. Electron.*, **48**, 500 (2012).

- [11] M. A. Reshchikov, H. Morkoç. *J. Appl. Phys.*, **97**, 061301 (2005).

Редактор Г.А. Оганесян

Photoreversible current in InGaN/GaN based LED heterostructures with different number of QWs

A.E. Aslanyan¹, L.P. Avakyants¹, A.V. Chervyakov¹, A.N. Turkin¹, V.A. Kureshov², D.R. Sabitov¹, A.A. Marmalyuk²

¹ Lomonosov Moscow State University (Faculty of Physics), 119991 Moscow, Russia

² Sigm Plus Co, 117342 Moscow, Russia

Abstract InGaN/GaN-based LED heterostructures with a different number of quantum wells were studied by photocurrent spectroscopy in the wavelength range of 350–500 nm. As a result of the analysis of a series of spectra obtained at various $p-n$ -junction biases, the effect of a change in the direction of the photocurrent with a change in the excitation wavelength (photoreversible effect) was discovered. A range of displacements of the $p-n$ -junction is established at which this effect is observed for structures with different numbers of quantum wells in the active region.