

06.2

Локализованные состояния в активной области голубых светодиодов, связанные с системой протяженных дефектов

© Д.В. Давыдов, А.Л. Закгейм, Ф.М. Снегов, М.М. Соболев,
А.Е. Черняков, А.С. Усиков, Н.М. Шмидт

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: Natalia.Shidt@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 8 августа 2006 г.

Представлены результаты сравнительных исследований $C-V$ - и DLTS-методами в диапазоне температур 100–450 К и при освещении белым светом синих и голубых светодиодов (СД) на основе InGaN/GaN с разным характером организации системы протяженных дефектов (СПД), пронизывающих активную область СД. Выявлены широкие пики E1 и E2, амплитуды которых зависели от оптической подсветки. Поведение этих пиков может быть объяснено присутствием локализованных состояний в активной области СД, связанных с СПД. Обнаруженная более высокая концентрация донорных ловушек в СД с более развитой СПД, приводящая к росту концентрации свободных носителей в квантовых ямах, экранирующих электронно-дырочное взаимодействие, может быть одной из причин в несколько раз меньших значений квантовой эффективности таких СД.

PACS: 85.60.Jb

Несмотря на бурное и успешное развитие технологии получения синих и голубых светодиодов (СД) на основе InGaN/GaN, многие физические процессы, определяющие основные параметры СД, такие как излучательная и безызлучательная рекомбинация, деградация квантовой эффективности, поведение системы протяженных дефектов, включающей высокую плотность дислокаций и мозаичную (доменную) структуру, а также влияние свойств этой системы на основные параметры, по существу, не выяснены; и это препятствует дальнейшему совершенствованию параметров голубых светодиодов и получению эффективных СД для зеленой и ультрафиолетовой областей спектра.

Для выяснения влияния особенностей системы протяженных дефектов (СПД) на параметры СД в данной работе методами DLTS

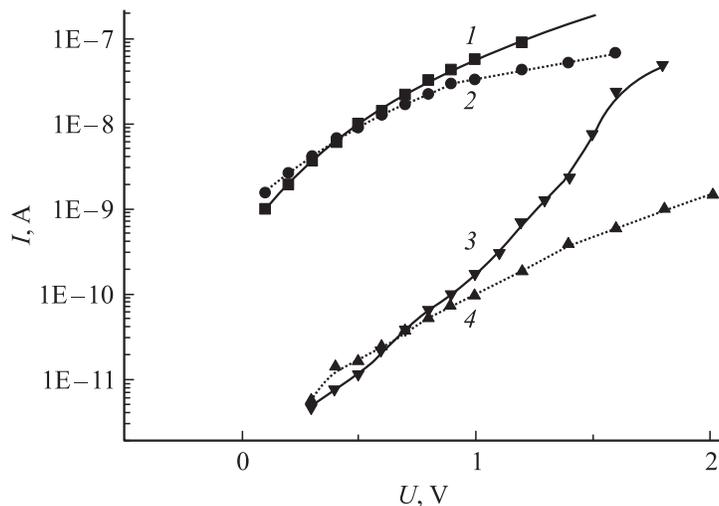


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики СД: 1 — прямая ветвь СД типа *B*, 2 — обратная ветвь СД типа *B*; 3 — прямая ветвь СД типа *A*, 4 — обратная ветвь СД типа *B*.

исследовались параметры ловушек в активной области СД, выращенных в одном процессе, но на n^+ -слоях GaN, предварительно выращенных в разных режимах с одинаковым уровнем легирования. Активная область, содержащая 5 квантовых ям (КЯ) InGaN/GaN с общепринятым соотношением толщин слоев 3 nm/12 nm, и p^+ -слой GaN были выращены методом эпитаксии из металлорганических соединений. Выращенные СД отличались по характеру структурной организации СПД. СД типа *A* имели хорошо упорядоченную мозаичную структуру, для которой, как было показано ранее [1–4], характерно преимущественно когерентное согласование доменов путем образования дилатационных границ. СД типа *B* имели менее упорядоченную мозаичную структуру, что привело к появлению большей плотности дислокационных стенок на границах плохо сросшихся доменов мозаичной структуры. Кроме того, эти два типа СД заметно отличались по значениям квантовой эффективности (η) и величине прямого и обратного тока (I) при напряжениях смещения (V) меньше 1 V (рис. 1): для СД типа *A* η — 18% при $I = 1$ mA; для СД типа *B* η — 2–3% при $I = 1$ mA и достигает 10% при токах более 10 mA.

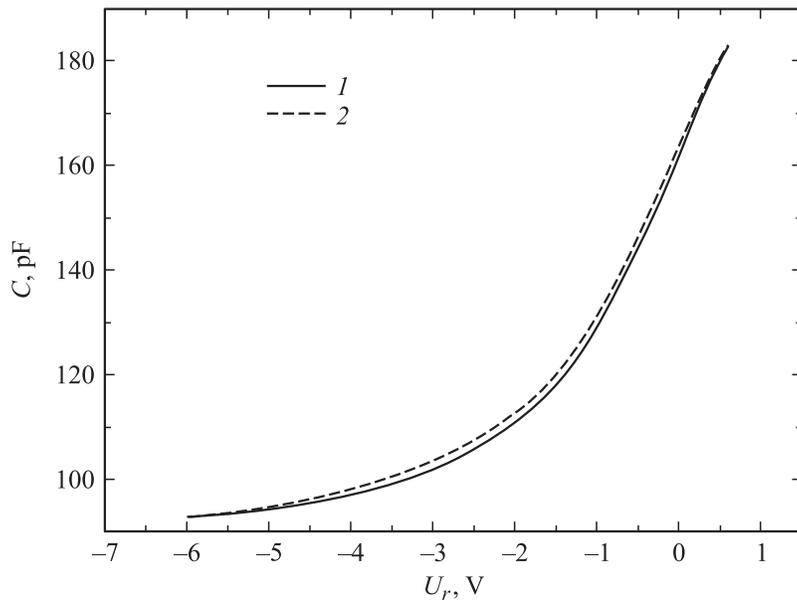


Рис. 2. C - V -характеристики p - n -гетероструктуры InGaN/GaN с МКЯ при измерении в темноте (1) и при освещении белым светом (2).

DLTS исследования глубоких ловушек в активной области СД производились с помощью спектрометра DL4600 фирмы BIO-RAD, работающего в режиме двухстробного интегрирования. Перед каждым DLTS измерением образец охлаждался до $T = 80$ К при приложенном ($U_{ra} < 0$) напряжении обратного смещения, измерения проводились в темноте или при освещении белым светом. В этих условиях были проведены измерения вольт-фарадных (C - V) характеристик СД. Результаты C - V измерений А и В гетероструктур (рис. 2) показывают, что при понижении температуры измерения образца до $T = 80$ К наблюдается смещение C - V -характеристик в сторону уменьшения измеряемых емкостей, которые превышают изменения, обусловленные температурным ходом диффузионного потенциала. C - V -характеристики СД типа А и В подобны. Наиболее вероятной причиной таких изменений C - V -характеристик в зависимости от температуры могут быть интерфейсные состояния на гетерогранице p^+ -GaN/ n -InGaN/GaN

при ее совпадении со слоем объемного заряда p - n -перехода. Влияние плотности состояний на гетерогранице N_{ss} на C - V -характеристику p - n -гетероперехода исследовалось ранее в работах [5,6]. Сравнение C - V -характеристик, измеренных в темноте и при освещении белым светом, показывает также небольшое смещение их относительно друг друга, которое может быть обусловлено перезарядкой глубоких уровней доноров и акцепторов, находящихся в активной области СД. Причем концентрация глубоких доноров (N_{td}) в СД типа B сравнима с концентрацией мелких доноров (N_d), концентрация компенсирующих глубоких акцепторов (N_{ta}) превышает концентрацию глубоких доноров.

Из C - V -измерений были определены диапазоны напряжений смещения, при которых в спектрах DLTS должны наблюдаться сигналы, связанные с эмиссией носителей из квантовых состояний ям, рассчитаны профили распределения эффективной концентрации электронов по толщине структуры. Оказалось, что ширина области объемного заряда (ООЗ) при напряжении обратного смещения $U_r = 0$ равна примерно $0.06 \mu\text{m}$, что на $0.015 \mu\text{m}$ меньше суммарной толщины пяти квантовых ям InGaN/GaN. Это означает, что из пяти КЯ InGaN/GaN четыре должны находиться в ООЗ при $U_r = 0$. Таким образом, при проведении DLTS-измерений у нас имеется возможность исследовать эмиссию электронов из пятой КЯ, которая находится за пределами ООЗ, варьируя величину импульса напряжения регистрации DLTS сигнала U_r , и при напряжении импульса заполнения $U_f = 0$. На рис. 3, *a* и *b* представлены DLTS-спектры СД типа A и B соответственно. Видно, что DLTS-спектры этих СД содержат два широких пика: низкотемпературный E1 и высокотемпературный E2. Для СД типа A (рис. 3, *a*) низкотемпературный пик E1 наблюдался только при проведении DLTS-измерений с оптической подсветкой и при $U_r \approx 1 \text{ V}$, а для СД типа B (рис. 3, *b*) пики E1 и E2 проявляются при DLTS-измерениях в темноте и незначительно увеличиваются по амплитуде при оптической подсветке. Пик E2 в СД типа A появляется при $U_r \approx 2.2 \text{ V}$, а в СД типа B при этих значениях U_r амплитуда этого пика увеличивалась на порядок. Для обоих типов СД наблюдалось смещение положения максимума E1-пика в сторону более высоких температур: для СД типа A пик смещался на $\Delta T \approx 70 \text{ K}$ при варьировании U_r от 0.72 до 1.09 V (рис. 3, *a*), а для СД типа B только на $\Delta T \approx 10 \text{ K}$ (рис. 3, *b*). Подобные изменения амплитуд DLTS-сигналов ΔC при оптической подсветке авторы статьи ранее уже наблюдали на других материалах с квантовыми ямами и связывали принадлежность таких DLTS-пиков с

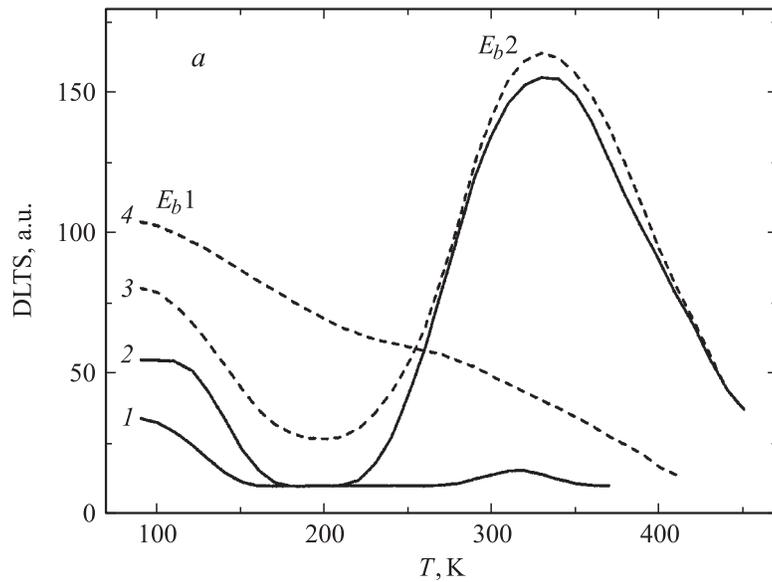


Рис. 3. Спектры DLTS p - n -гетероструктур InGaN/GaN с МКЯ: a — образец A , $U_f = 0$ и $U_r = -1.0$ (1) и -2.39 В (2) в темноте, $U_r = -1.0$ (4) и -2.39 В (3) при освещении белым светом; b — образец B , $U_f = 0$ и $U_r = -0.72$ (1) и -1.09 В (2) при освещении белым светом, $U_f = 1.16$ В и $U_r = -2.20$ В (3) в темноте.

эмиссией носителей с пространственно локализованных состояний, для которых ΔC зависит от изменения положения уровня Ферми и степени заполнения квантовых или поверхностных состояний [5–8]:

$$\Delta C/C = n_d L / (2N_d W^2), \quad (1)$$

где n_d — поверхностная плотность электронов, захваченных на локализованное состояние; L — глубина слоя квантовых ям, N_d — концентрация доноров в слое GaN. Эта зависимость является отличительной характеристикой для пространственно локализованных состояний в отличие от глубоких уровней дефектов, распределенных по толщине полупроводника [5–8]. Как отмечалось выше, оптическая подсветка при измерении C - V -характеристик в области низких температур приводила

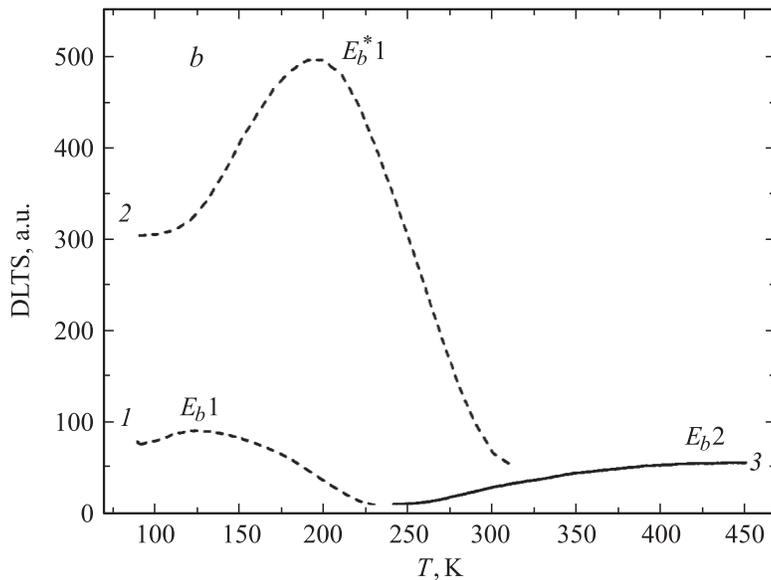


Рис. 3 (продолжение).

к росту емкости СД и амплитуд DLTS пиков E1 и E2 (рис. 2 и 3), который связан с захватом на глубокие донорные и акцепторные ловушки электронов и дырок, расположенных в активной области и возбуждаемых светом. При условии, что $N_{ta} > N_{td}$ концентрация нескомпенсированных доноров увеличивается тем больше, чем больше интенсивность света, соответственно изменяются и все остальные величины. Из этих исследований следует однозначный вывод о том, что уровни E1 и E2 являются пространственно локализованными состояниями. Причем E1-пик, по-видимому, связан с эмиссией электронов с квантовых состояний ямы, и его смещение в высокотемпературную область спектра определяется проявлением квантово-ограниченного эффекта Штарка [8–10]. Различие в поведении E1-пика для СД типа A и B связано с тем, что концентрация донорных ловушек в СД типа B увеличивается примерно в 4–5 раз по сравнению с СД типа A и уровень Ферми смещается ближе к зоне проводимости, увеличивая тем самым степень заселенности квантовых состояний в КЯ. Кроме того, это приводит к росту концентрации свободных носителей

в КЯ, экранирующих электронно-дырочное взаимодействие, которое определяет величину смещения Штарка в КЯ [11]. Широкий пик E2, по-видимому, связан с эмиссией электронов с близко расположенных пространственно локализованных дефектов. Поведение этого пика подобно ранее наблюдавшемуся в радиационно-облученном протоном GaAs [12,13] и объясненному образованием протяженных кластеров дефектов. В этих работах было показано, что присутствие близко расположенных дефектов может привести к многофононному туннелированию электрона с более глубокого уровня на более мелкий уровень. Темп туннелирования электрона будет зависеть от энергии ионизации уровней дефектов, входящих в кластер, расстояния между дефектами и электрического поля [12]. Данные этих работ и результаты проведенных исследований позволяют предполагать, что широкий пик E2 связан с системой протяженных дефектов, пронизывающих активную область.

Таким образом, в результате $C-V$ и DLTS-исследований эмиссии установлено, что в активной области СД реализуются следующие соотношения между концентрациями мелких/глубоких доноров и акцепторов: $N_{td} \approx N_d$, $N_{ta} \geq N_{td}$. В DLTS-спектрах обнаружено два широких пика E1 и E2, амплитуды которых зависели от оптической подсветки в процессе DLTS-измерений, что позволило определить связь этих пиков с пространственно локализованными состояниями. Затем, используя результаты $C-V$ -измерений, связать E1-пик с состоянием КЯ, а наблюдаемое смещение DLTS-пика в высокотемпературную область спектра с ростом величины напряжения обратного смещения с проявлением квантово-ограниченного эффекта Штарка для состояния электронов в КЯ. Относительно E2-пика было определено, что он связан с проявлением эмиссии электронов посредством многофононного туннелирования с состояний более глубокого уровня на более мелкий уровень. Результаты DLTS-измерений хорошо коррелируют с данными по измерению η и наблюдаемыми особенностями вольт-амперных характеристик (ВАХ) СД (рис. 1). Величина тока при прямом и обратном смещении для СД типа B, как правило, на 1–2 порядка выше при напряжениях смещения меньше 2 В, а совпадение хода прямой и обратной ветви ВАХ (для наглядности ветви построены в абсолютных значениях тока и напряжения) для многих СД вплоть до напряжений 1 В хорошо коррелирует с выводами DLTS-измерений о близкой концентрации глубоких донорных и акцепторных центров. Более высокая концентрация донорных ловушек в СД типа B, приводящая к росту концентрации свободных носителей в КЯ, экранирующих

электронно-дырочное взаимодействие, может быть одной из причин малых значений η СД этого типа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 06-02-08088-офи и № 05-02-17774а).

Список литературы

- [1] *Ankudinov A.V., Besyulkin A.I., Kolmakov A.G., Lundin W.V., Ratnikov V.V., Sitnikova A.A., Titkov A.N., Usikov A.S., Yakimov E.B., Zolotareva R.V.* // Physica B. 2003. V. 340–342. P. 462–465.
- [2] *Анкудинов А.В., Золотарева Р.В., Колмаков А.Г., Ратников В.В., Тутков А.Н., Шмидт Н.М.* // Труды 3-й Всероссийской конференции „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“. 2004. С. 76–78.
- [3] *Donnelly J.P., Milnes A.G.* // IEEE Trans. Electron. Dev. 1967. V. ED-14. N 2. P. 63–68.
- [4] *Соболев М.М., Гитцович А.В., Папенцев М.И., Кочнев И.В., Явич Б.С.* // ФТП. 1992. Т. 26. В. 10. С. 1760–1767.
- [5] *Соболев М.М., Ковш А.Р., Устинов В.М., Егоров А.Ю., Жуков А.Е., Мусихин Ю.Г.* // ФТП. 1999. Т. 33. В. 2. С. 184–193.
- [6] *Sobolev M.M., Kovsh A.R., Ustinov V.V., Egorov A.Yu., Zhukov A.E., Musikhin Yu.G.* // J. Electronic Mat. 1999. V. 28. P. 491–495.
- [7] *Соболев М.М., Кочнев И.В., Лантратов В.М., Берт Н.А., Черкашин Н.А., Леденцов Н.Н.* // ФТП. 2000. Т. 34. В. 2. С. 200–210.
- [8] *Соболев М.М., Жуков А.Е., Васильев А.П., Семенова Е.С., Михрин В.С., Цырлин Г.Э., Мусихин Ю.Г.* // ФТП. 2006. Т. 40. В. 3. С. 84–90.
- [9] *Соболев М.М., Устинов В.М., Жуков А.Е., Мусихин Ю.Г., Леденцов Н.Н.* // ФТП. 2002. Т. 36. В. 9. С. 1089–1096.
- [10] *Соболев М.М., Цырлин Г.Э., Самсоненко Ю.Б., Поляков Н.К., Тонких А.А., Мусихин Ю.Г.* // ФТП. 2005. Т. 39. В. 1. С. 131–134.
- [11] *Moseley A.J., Robbins D.J., Marshall A.C., Kearley M.Q., Davies J.I.* // Semicond. Sci. Technol. 1989. V. 4. P. 184–190.
- [12] *Makram-Ebeid S., Boher P.* // Rev. Phys. Appl. 1988. V. 23. N 5. P. 847–862.
- [13] *Brunkov P.N., Kalinovskiy V.S., Nikitin V.G., Sobolev M.M.* // Semicond. Sci. Technol. 1992. V. 7. P. 1237–1240.