

УДК 538.911:535.376

В.И. ОЛЕШКО, С.Г. ГОРИНА*, В.И. КОРЕПАНОВ*, В.М. ЛИСИЦЫН*, И.А. ПРУДАЕВ**, О.П. ТОЛБАНОВ***

СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ¹

Изучено влияние плотности энергии электронного пучка на амплитудные и спектрально-кинетические характеристики люминесценции светодиодных гетероструктур InGaN/GaN, нанесенных на сапфировые подложки. Обнаружено стимулированное излучение, возникающее в эпитаксиальных слоях GaN и InGaN в отдельных светодиодных структурах при достижении плотности энергии электронного пучка порогового значения.

Ключевые слова: светодиодные гетероструктуры, электронные пучки, стимулированное излучение.

Введение

В последнее время ведется активная работа по совершенствованию способов выращивания нитридных соединений третьей группы A^3N , свойства которых позволяют создать оптоэлектронные приборы с уникальными параметрами. Однако на пути получения качественных гетероструктур существуют объективные сложности, связанные с подбором оптимальных технологических режимов, влияющих на свойства эпитаксиальных слоев GaN, InGaN и AlGaIn.

В последние годы технология изготовления светодиодных структур сделала большой шаг вперед, поскольку для контроля стали использоваться новые методы [1]. Особая роль принадлежит люминесцентным методам, которые позволяют контролировать наличие дефектов собственной и примесной природы и определять пригодность структур для изготовления источников света [1–4].

При исследовании люминесценции светодиодных структур толщиной 10–100 нм обычно используется возбуждение фотонами с энергией кванта, превышающей ширину запрещенной зоны эпитаксиальных слоев [1, 2]. Метод фотолюминесценции (ФЛ) позволяет получать информацию о достаточно тонких слоях, что связано с большим коэффициентом поглощения возбуждающего излучения. Преимущество катодолуминесцентного (КЛ) метода диагностики светодиодных структур заключается в возможности более однородного возбуждения толстых (единицы микрон) слоев и получении информации обо всей структуре в целом. Для реализации КЛ метода обычно используют электронные пучки с энергией 10–50 кэВ и током 10^{-9} – 10^{-7} А [3, 4].

При проведении фундаментальных исследований и катодолуминесцентной диагностики полупроводниковых и диэлектрических макрокристаллов широкое распространение получили высокоэнергетические (100–400 кэВ), сильноточные (1– 10^3 А) электронные пучки (СЭП), формируемые в высоковольтном вакуумном диоде со взрывоэмиссионным катодом [5–8]. Малая длительность импульса тока СЭП и высокая энергия электронов позволяют реализовать метод импульсной спектрометрии при однородном возбуждении слоя твердого тела толщиной ~ 10 мкм. В литературе отсутствуют сведения о люминесценции тонкопленочных (10–100 нм) светодиодных гетероструктур на основе InGaN-квантовых ям, возбуждаемой СЭП.

Цель настоящей работы заключается в изучении влияния плотности энергии высокоэнергетического электронного пучка на амплитудные и спектрально-кинетические характеристики люминесценции гетероструктур на основе InGaN/GaN-квантовых ям, выращенных на сапфировых подложках.

1. Методика эксперимента

Исследовались три светодиодные структуры AlGaIn/InGaIn/GaN ($ГС_1$, $ГС_2$ и $ГС_3$), выращенные в различных лабораториях методом металлоорганической газофазной эпитаксии на сапфире с ориентацией [0001]. Активная область состояла из квантовых ям и барьеров InGaIn/GaN. Светодиодные структуры изучались методом импульсной КЛ с возбуждением СЭП. Использовались две

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (ГЗ 2.3302.2011) и ФЦП, ГК №16.516.11.6100.

схемы облучения и регистрации люминесценции светодиодных структур. Облучение образцов проводилось при температуре 300 К со стороны гетероструктуры под углами 90 и 45° к поверхности пластины. В первом случае люминесценция измерялась с торца пластины (схема измерения $\alpha = 90^\circ$), во втором – под углом 45° к облучаемой поверхности образца (схема измерения $\alpha = 45^\circ$). Средняя энергия электронов в спектре ~ 250 кэВ, длительность импульса тока ~ 10 нс. Плотность энергии электронного пучка H варьировалась в диапазоне 0,005–0,4 Дж/см². Время-разрешенные спектры КЛ (метод измерений «спектр по точкам») регистрировались с помощью монохроматора МДР-23, ФЭУ-84 и осциллографа TDS 2014. Интегральные (по времени) спектры КЛ (метод измерений «спектр за импульс») регистрировались за один импульс возбуждения зеркальной цифровой фотокамерой SONY DSLR-A500 через монохроматор МДР-23 со снятой выходной щелью (спектральный диапазон измерений 410–700 нм, обратная линейная дисперсия 1,3 нм/мм).

2. Результаты и их обсуждение

Типичные для комнатной температуры спектры КЛ светодиодных структур ГС₁ (кривая 2) и ГС₃ (кривая 1), измеренные при $H = 0,04$ Дж/см², приведены на рис. 1. Видно, что при малой H в спектрах КЛ образцов наблюдается две явно выраженные полосы излучения, максимумы которых соответствуют энергиям 3,35–3,37 эВ и 2,80–2,82 эВ. УФ-линия излучения в области 3,35–3,37 эВ (ширина на полувысоте FWHM ~ 100 мэВ, время затухания $\tau \leq 10$ нс), согласно данным, приведенным в [9], принадлежит GaN ($E_g = 3,39$ эВ при 300 К) и обусловлена рекомбинацией связанных на дефектах экситонов.

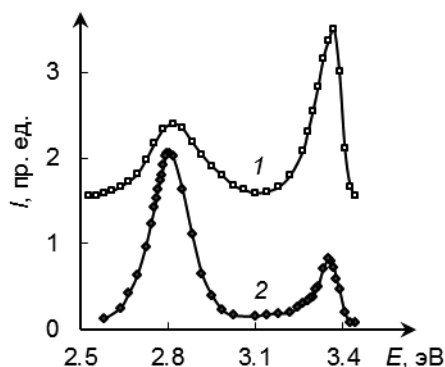


Рис. 1. Спектры КЛ образцов ГС₃ (кр. 1) и ГС₁ (кр. 2), измеренные «по точкам» при $H = 0,04$ Дж/см²

«Голубая» полоса люминесценции ($E_m \sim 2,80$ – $2,82$ эВ, FWHM ~ 160 – 200 мэВ) связана с излучением квантовых ям (слои InGaN). Время затухания полосы $E_m \sim 2,80$ – $2,82$ эВ не экспоненциально, находится во временном диапазоне 50–250 нс при 300 К и определяется предысторией образцов.

Изучено влияние плотности энергии электронного пучка H на спектрально-кинетические характеристики и интенсивность КЛ светодиодных структур. Обнаружено, что при достижении H порогового значения (для образца ГС₁ $H \approx 0,06$ Дж/см²) на фоне широкой «голубой» полосы начинает формироваться узкая линия излучения с пиком при $h\nu = 2,78$ эВ. При увеличении H наблюдается сверхлинейный рост её интенсивности и уменьшение длительности импульса свечения, что свидетельствует о переходе спонтанной люминесценции в режим вынужденного излучения.

На рис. 2 представлены спектры КЛ образцов ГС₁ и ГС₂, измеренные в геометрии $\alpha = 45^\circ$ (а) и $\alpha = 90^\circ$ (б, в) при $H = 0,4$ Дж/см². Слева показана линия ртути Hg I 435,83 нм.

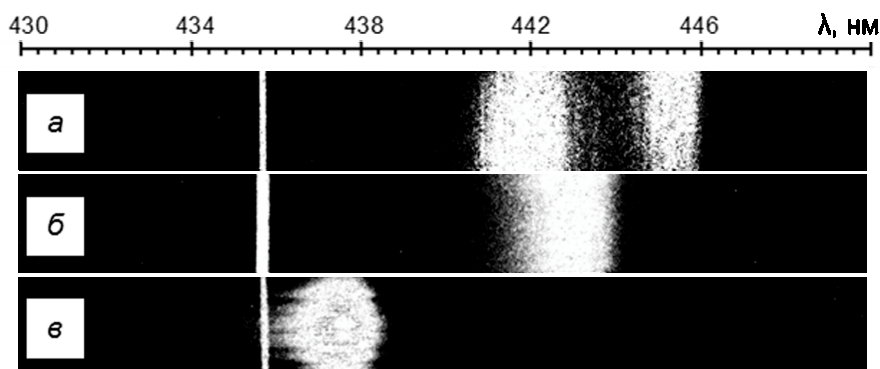


Рис. 2. Спектры КЛ образцов ГС₁ (а, б) и ГС₂ (в), измеренные цифровой фотокамерой SONY DSLR-A500 за один импульс возбуждения при $H = 0,4$ Дж/см²: а – схема измерения $\alpha = 45^\circ$; б и в – схема измерения $\alpha = 90^\circ$

Видно, что в образце ГС₁ при измерении люминесценции в геометрии $\alpha = 45^\circ$ на фоне широкой «голубой» полосы формируются две узкие линии вынужденного излучения при $\lambda \approx 445,5$ и 442 нм (FWHM ~ 12 мэВ). При измерении люминесценции с торца пластины ГС₁ максимум излу-

чения наблюдается при $\lambda \approx 443$ нм. В образце ГС₂, вынужденное излучение наблюдается только с торца пластины при $\lambda \approx 437,2$ нм (FWHM ~ 12 мэВ). Формирование узких линий интенсивного излучения можно объяснить вынужденной излучательной рекомбинацией в электронно-дырочной плазме, которая образуется в эпитаксиальных слоях при достижении уровня возбуждения порогового значения. Причины, приводящие к изменению спектрального состава излучения в образце ГС₁ при изменении геометрии регистрации люминесценции, требуют отдельных исследований. В образце ГС₃ наблюдаются только полосы спонтанной люминесценции. Отсутствие вынужденного излучения в образце ГС₃ свидетельствует о высокой концентрации дефектов, образующихся при выращивании данной структуры.

Заключение

Впервые исследованы характеристики КЛ светодиодных гетероструктур AlGaIn/InGaIn/GaN, возбуждаемых сильноточным электронным пучком. Установлено, что при низкой плотности энергии СЭП ($H \leq 0,04$ Дж/см²) в спектре КЛ исследованных образцов наблюдаются полосы спонтанной люминесценции эпитаксиальных слоев GaN и InGaIn-квантовых ям. Спектрально-кинетиические, амплитудные и плотностные характеристики спонтанной КЛ гетероструктур могут быть использованы для получения информации о типе и концентрации дефектов, образующихся в процессе их выращивания. Дополнительными параметрами, характеризующими качество светодиодных структур, являются пороговая плотность энергии СЭП, при которой наблюдается переход спонтанной КЛ в режим стимулированного излучения, спектральный состав и интенсивность стимулированного излучения эпитаксиальных слоев.

Результаты исследований позволяют сделать заключение о возможности разработки экспрессного метода контроля генерационных свойств эпитаксиальных слоев светодиодных гетероструктур с возбуждением сильноточным электронным пучком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reshchikov M.A., Shahedipour F., Korotkov R.Y., et al. // J. Appl. Phys. – 2000. – V. 87. – No. 7. – P. 3351–3354.
2. Xu S.J., Li G., Chua S.J., et al. // J. Appl. Phys. – 1998. – V. 72. – No. 19. – P. 2451–2453.
3. Домрачева Я.В., Загорянская М.В., Попова Т.Б., Флегонтова Е.Ю. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2009. – № 8. – С. 10–15.
4. Dassonneville S., Amokrane A., Sieber B., and Farvacque J.-L. // J. Appl. Phys. – 2001. – V. 89. – No. 12. – P. 7966–7972.
5. Lipatov E.I., Lisitsyn V.M., Oleshko V.I., et al. Cathodoluminescence. – Rijeka: InTech, 2012. – 324 p.
6. Oleshko V.I., Vilchinskaya S.S., Lisitsyn V.M., and Korepanov V.I. // Functional Materials. – 2011. – V. 18. – No. 4. – P. 457–461.
7. Oleshko V.I., Vilchinskaya S.S., and Gorina S.G. // Euras. Phys. Techni. J. – 2011. – V. 8. – No. 1(15). – P. 3–9.
8. Лисицына Л.А., Олешко В.И., Путинцева С.Н., Лисицын В.М. // Опт. и спектр. – 2008. – Т. 105. – № 4. – С. 598–604.
9. Reshchikov M.A. and Markoç H. // J. Appl. Phys. – 2005. – V. 97. – P. 061301.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия Поступила в редакцию 15.01.13.

**Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
E-mail: oleshko@tpu.ru

Олешко Владимир Иванович, д.ф.-м.н., профессор каф. лазерной и световой техники;

Горина Светлана Геннадьевна, аспирантка;

Корепанов Владимир Иванович, д.ф.-м.н., профессор каф. лазерной и световой техники;

Лисицын Виктор Михайлович, д.ф.-м.н., профессор, зав. каф. лазерной и световой техники;

Прудаев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н., доцент каф. полупроводниковой электроники;

Толбанов Олег Петрович, д.ф.-м.н., профессор каф. полупроводниковой электроники, зав. научно-образовательным центром «Физика и электроника сложных полупроводников».