

УДК 535.37

**СТИМУЛИРОВАННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР  
ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

Цзысюань Ли

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. В.И. Олешко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [li8633@yandex.ru](mailto:li8633@yandex.ru)

**STIMULATED LUMINESCENCE OF LED HETEROSTRUCTURES WHEN EXCITED  
BY A HIGH-CURRENT ELECTRON BEAM**

Zixuan Li

Scientific Supervisor: Prof., Dr. V.I. Oleshko

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [oleshko@tpu.ru](mailto:oleshko@tpu.ru)

***Abstract.** In the present study, we performed the effect of electron beam energy density on the amplitude and spectral characteristics of two LED heterostructures AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> and InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> grown by sapphire metal organic vapor epitaxy. The spatial distribution of stimulated cathodoluminescence characteristics on the growth plate surface was studied.*

**Введение.** В последнее время ведется активная работа по совершенствованию способов выращивания нитридных соединений третьей группы A<sup>3</sup>N, 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, InGa<sub>N</sub>, AlGa<sub>N</sub>. В последние годы технология изготовления светодиодных гетероструктур сделала большой шаг вперед, поскольку стали использоваться новые методы контроля материалов. Особая роль принадлежит люминесцентным методам, которые позволяют контролировать наличие дефектов собственной и примесной природы и определять пригодность структур для изготовления источников света. При проведении фундаментальных исследований и катодолюминесцентной диагностики полупроводниковых кристаллов и тонкопленочных гетероструктур широкое распространение получили высокоэнергетические (~ 300 кэВ) сильноточные (10<sup>2</sup>–10<sup>3</sup> А) электронные пучки (СЭП), формируемые в вакуумном диоде со взрывоэмиссионным катодом [1].

Цель настоящей работы заключается в изучении влияния плотности энергии СЭП на спектральные, амплитудные и пространственные характеристики импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) двух гетероструктур – AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> (ГС–1) и InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> (ГС–2), выращенных методом металлоорганической газофазной эпитаксии на сапфире.

**Экспериментальная часть.** Образцы получены различными производителями. Гетероструктура AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> (ГС–1) содержала сверхрешетку (60 пар с содержанием алюминия в AlN–25 %).

Гетероструктура InGaN/GaN (ГС-2) с множественными квантовыми ямами – без сверхрешеток. Возбуждение люминесценции осуществлялось сильноточным электронным пучком (СЭП) при температуре 300 К. Плотность энергии СЭП регулировалась в диапазоне от 0,01 до 0,25 Дж/см<sup>2</sup>. Средняя энергия электронов в спектре пучка составляла ~ 250 кэВ, длительность импульса тока ~ 12 нс. Интегральные за импульс спектры ИКЛ (метод «спектр за импульс») регистрировались с помощью оптоволоконного спектрометра AvaSpec ULS2048CL-EVO-RS (диапазон 190-1100 нм, спектральное разрешение ~ 1,5 нм). Для увеличения спектрального разрешения использовался дополнительный метод регистрации спектра ИКЛ с помощью МДР-23 и цифровой фотокамеры SONY DSLR-A500, которая устанавливалась на выходе монохроматора при снятой выходной щели. В этом случае появлялась возможность регистрации фрагментов спектра ИКЛ, шириной ~ 25 нм за один импульс возбуждения со спектральным разрешением ~ 0,13–0,2 нм. Эта методика позволяла с высокой точностью регистрировать изменение спектра стимулированной ИКЛ при регистрации в различных областях поверхности, выращенных гетероструктур.

**Результаты.** На рис. 1 приведены спектры ИКЛ спонтанного (а, в) и стимулированного (б, г) излучения гетероструктур ГС-1 и ГС-2, измеренные методом «спектр за импульс».

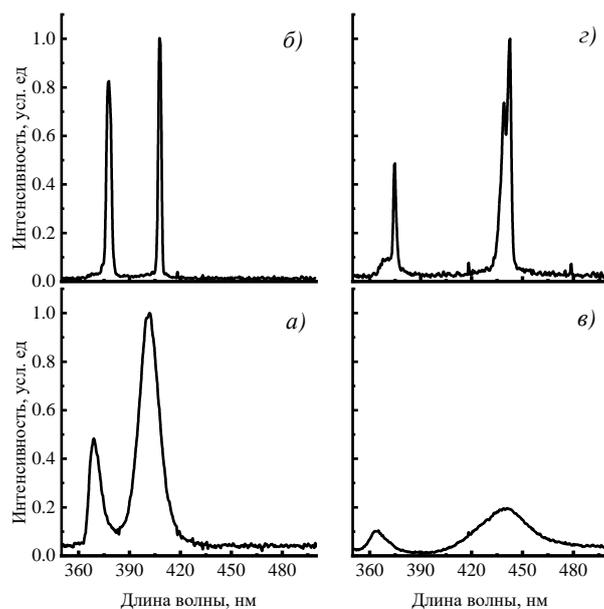


Рис. 1. Спектры спонтанного (а, в) и стимулированного (б, г) излучения гетероструктур ГС-1 и ГС-2, измеренные методом «спектр за импульс»

Видно, что при плотности энергии электронного пучка ( $H$ ) ~ 0,01 Дж/см<sup>2</sup> в спектрах образцов ГС-1 и ГС-2 регистрируются полосы спонтанной люминесценции буферного слоя GaN ( $\lambda_m = 368$  нм) с полушириной на полувысоте FWHM  $\approx 70$  мэВ. Дополнительно к ней в спектре ИКЛ гетероструктуры AlGaIn/GaN наблюдается полоса спонтанной люминесценции с максимумом при  $\lambda_m \sim 404$  нм и шириной на полувысоте FWHM  $\approx 98$  мэВ (рис. 1, а), а в спектре синей гетероструктуры – полоса с максимумом при  $\lambda_m \sim 441$  нм, FWHM  $\approx 207$  мэВ (рис. 1, в). Увеличение плотности энергии ( $H$ ) электронного пучка

приводит к формированию на длинноволновом крыле полосы спонтанной люминесценции гетероструктуры ГС-1 узкой полосы стимулированной ИКЛ при  $\lambda_m \sim 408$  нм, FWHM  $\approx 23$  мэВ, интенсивность которой нарастает с увеличением  $H$  с 0,01 до 0,2 Дж/см<sup>2</sup> (рис. 1, б). В образце ГС-2 при 0,2 Дж/см<sup>2</sup> формируется две близко расположенные полосы вынужденного излучения при  $\lambda_m \sim 439$  и 443 нм с суммарной полушириной FWHM  $\approx 75$  мэВ (рис. 1, з). Для увеличения спектрального разрешения мы использовали метод регистрации спектра с применением МДР-23 и цифровой фотокамеры SONY DSLR-A500. Изображение кристалла проецировалось на входную щель монохроматора. Пространственное (по поверхности образца) распределение спектра вынужденного излучения в ГС-1 (а) и ГС-2 (б) приведены на рис. 2.

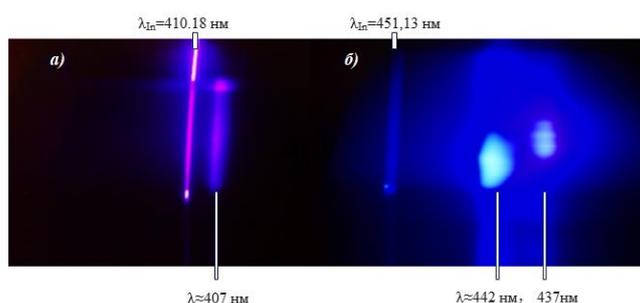


Рис. 2. Пространственное распределение спектра вынужденного излучения в ГС-1 (а) и ГС-2 (б)

Для определения максимумов в спектрах вынужденного излучения использовали атомные линии индия – In I 410,18 и 451,13 нм. Средние размеры зон зондирования варьировались в диапазоне от 0,5 до 2,7 мм. Видно, что спектр вынужденного излучения, измеренный из зоны зондирования в ГС-1, не изменяется ( $\lambda_m \sim 407$  нм). В ГС-2 формируется две полосы вынужденного излучения с максимумами при  $\lambda_m \sim 437$  и 442 нм с неоднородным пространственным распределением. В других пространственных зонах ГС-2 регистрировалось до 3-4 полос вынужденного излучения с различным спектральным составом, изменяющимся в диапазоне от 437 до 442 нм.

**Заключение.** Проведены сравнительные исследования спектральных характеристик спонтанной и стимулированной люминесценции двух гетероструктур AlGaIn/GaN и InGaIn/GaN при возбуждении высокоэнергетическим электронным пучком с плотностью энергии, варьируемой в диапазоне 0,01–0,2 Дж/см<sup>2</sup>. Определены максимумы и полуширины полос спонтанной и стимулированной катодолюминесценции.

Установлено, что в ГС-2 спектры стимулированной катодолюминесценции, измеренные в различных локальных областях гетероструктуры InGaIn/GaN, различаются. Наблюдается изменение положения максимумов полос вынужденного излучения в диапазоне 437–442 нм, что может быть обусловлено изменением состава квантовых ям в различных областях гетероструктуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ли Цзысюань, Олешко В.И., Воробьева Л.В. Люминесцентный контроль светодиодных гетероструктур, выращенных методом металлоорганической газофазной эпитаксии на сапфире // Изв. вузов. Физика. – 2022. – Т. 65., № 11. – С. 77–81.