

## Люминесцентный контроль светодиодных гетероструктур, выращенных методом металлоорганической газофазной эпитаксии на сапфире

*Ли Цзысюань<sup>\*</sup>, В.И. Олешко, Л.В. Воробьева*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

*<sup>\*</sup>li8633@yandex.ru*

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований спектральных и кинетических характеристик импульсной катодо- и фотолюминесценции светодиодных гетероструктур AlGaIn/GaN и InGaIn/GaN, выращенных методом металлоорганической газофазной эпитаксии на сапфире. Изучено влияние плотности энергии сильнофокусированного электронного пучка на спектральные и амплитудные характеристики люминесценции гетероструктур. Исследовано пространственное распределение люминесцентных характеристик по поверхности выращенных пластин. Обнаружено, что в гетероструктуре InGaIn/GaN наблюдается сдвиг максимума спектра стимулированной катодолюминесценции, измеренного в различных точках образца. Этот результат объясняется варьированием состава и толщины квантоворазмерной активной области, что обусловливается не идеальностью технологического процесса выращивания пластин.

**Ключевые слова:** светодиод, гетероструктура, сверхрешетка, катодо- и фотолюминесценция.

### 1. Введение

Полупроводниковые гетероструктуры на основе GaN являются одним из самых перспективных материалов оптоэлектроники [1, 2]. Однако получение структур высокого качества сопровождается целым рядом трудностей. Существенное влияние на свойства слоев и гетероструктуры в целом оказывают неконтролируемые примеси, собственные дефекты и дислокации, образующиеся в кристаллической решетке при выращивании.

Поэтому успешное развитие современной оптоэлектроники определяется созданием технологий, позволяющих выращивать высокосовершенные полупроводниковые гетероструктуры. Люминесцентная диагностика, как известно, позволяет контролировать степень стехиометрии, наличие примесей и дефектов, определять пригодность структур для изготовления источников света [3–8].

В представленной работе методами импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) и импульсной фотолюминесценции (ИФЛ) исследовались светодиодные гетероструктуры на основе AlGaIn/GaN и структура с квантовыми ямами InGaIn/GaN, выращенные на сапфировых подложках.

### 2. Методика эксперимента

Объектом исследований являлись светодиодные гетероструктуры фиолетового (390–420 нм) и синего (450–470 нм) диапазона длин волн, выращенные методом газофазной эпитаксии их металлоорганических соединений на сапфировых подложках с ориентацией (0001). Гетероструктура AlGaIn/GaN (ГС-1) содержала сверхрешетку (60 пар с содержанием алюминия в AlN – 25%). Гетероструктура InGaIn/GaN (ГС-2) с множественными квантовыми ямами без сверхрешеток. Возбуждение люминесценции осуществлялось сильнофокусированным электронным пучком (СЭП) и излучением азотного лазера ( $\lambda = 337.1$  нм,  $\tau = 10$  нс) при температуре 300 К. Плотность энергии СЭП регулировалась в диапазоне от 0.005 до 0.3 Дж/см<sup>2</sup>. Средняя энергия электронов в спектре пучка составляла ~250 кэВ, длительность импульса тока ~ 15 нс. Плотность мощности оптического возбуждения составляла 10<sup>4</sup>–10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup>. Регистрация спектров ИФЛ в различные моменты времени и кинетики свечения ИФЛ и ИКЛ производились методом «спектр по точкам» с применением монохроматора МДР – 23, ФЭУ-84 и осциллографа Tektronix DPO-3034. Интегральные за импульс спектры ИКЛ и

ИФЛ (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 ~0.25 нм. Эта методика позволяет с высокой точностью регистрировать сдвиг максимума спектра стимулированной ИКЛ при его регистрации в различных точках выращенной гетероструктуры.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Результаты сравнительных исследований люминесцентных характеристик двух гетероструктур ГС-1 и ГС-2 представлены на Рис.1–5.

Типичные спектры ИКЛ и ИФЛ светодиодных гетероструктур ГС-1(кр.1) и ГС-2 (кр.2) приведены, соответственно, на Рис.1а и Рис.1б. Спектры, представленные на Рис.1а, измерены методом «спектр за импульс», а спектры на Рис.1б – методом «спектр по точкам». Видно, что в спектрах ИКЛ образцов ГС-1 и ГС-2 регистрируется полоса буферного слоя GaN ( $\lambda_m = 368$  нм), на котором выращены гетероструктуры. 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, а в спектре синей гетероструктуры – полоса с максимумом при  $\lambda_m \sim 435$  нм, FWHM  $\approx 210$  мэВ.

Основное отличие спектров ИКЛ (Рис.1а) от спектров ИФЛ (Рис.1б) заключается в отсутствии полосы фотолюминесценции буферного слоя GaN ( $\lambda_m = 368$  нм), что связано с поглощением лазерного излучения активными слоями гетероструктур ГС-1 и ГС-2.

В отличие от лазерного излучения высокоэнергетический электронный пучок возбуждает все слои гетероструктуры, в том числе и буферный слой GaN, спектр которого всегда регистрируется при возбуждении СЭП.

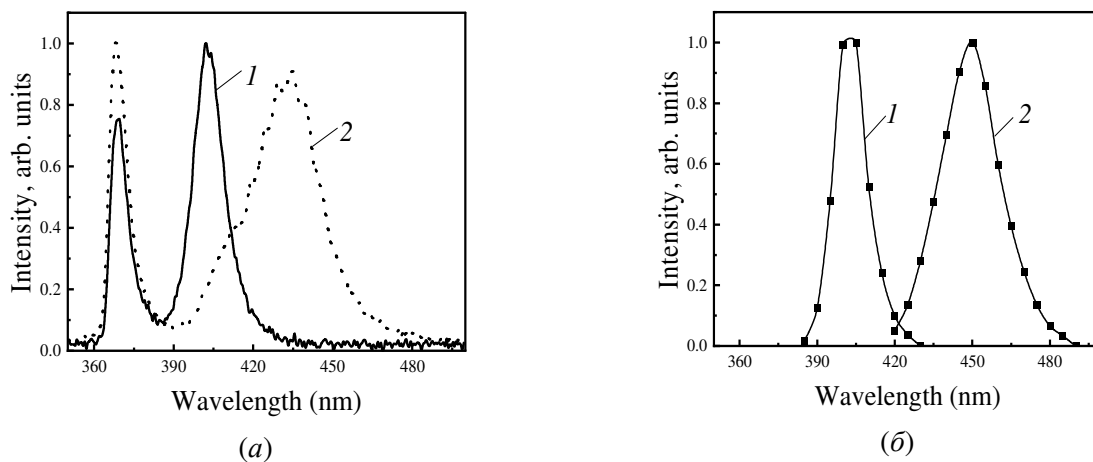


Рис.1. Спектры ИКЛ (а) и ИФЛ (б) образцов ГС-1(кр.1) и ГС-2(кр.2).

На Рис.2 показаны кинетики затухания ИФЛ образцов ГС-1 (Рис.2а, кривые 1–3) и ГС-2 (Рис.2б, кривые 1–7), измеренные при разных энергиях излучения в спектральном диапазоне от 401–490 нм. В образце ГС-1 кинетика ИФЛ и ИКЛ, измеренная в различных спектральных областях полосы люминесценции, практически не изменяется. В образце ГС-2 наблюдается увеличение длительности импульса люминесценции в спектральной области 430–490 нм и

соответствующий сдвиг максимума спектра ИФЛ во времени в длинноволновую область. Подобная закономерность наблюдалась в работе [9] и объяснялась донорно-акцепторным механизмом люминесценции синих светодиодных гетероструктур.

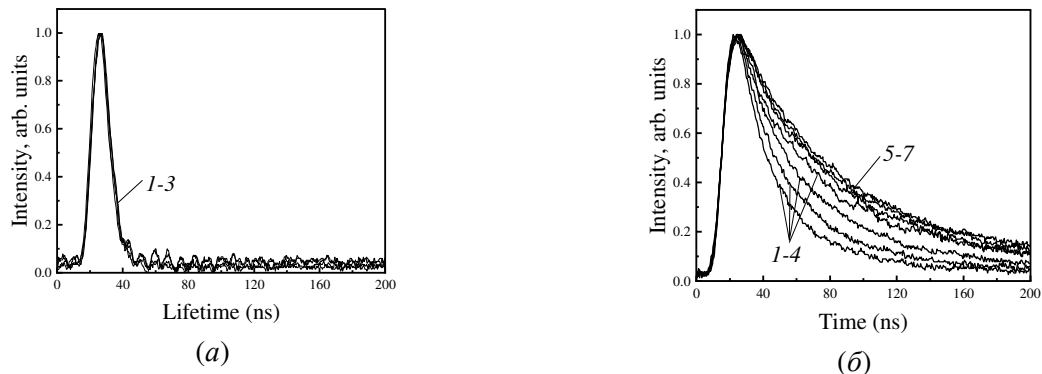


Рис.2. Кинетики ИФЛ образцов ГС-1(а) и ГС-2(б). а): 1 – 401 нм, 2 – 410 нм, 3 – 420 нм б): 1 – 430 нм, 2 – 440 нм, 3 – 450 нм, 4 – 460 нм, 5 – 470 нм, 6 – 480 нм, 7 – 490 нм.

Увеличение плотности энергии ( $H$ ) электронного пучка приводит к формированию на длинноволновом крыле полосы спонтанной люминесценции гетероструктуры ГС-1 узкой полосы стимулированной ИКЛ при  $\lambda_m \sim 411$  нм, FWHM  $\approx 23$  мЭВ, интенсивность которой нарастает с увеличением  $H$  с 0.03 до 0.2 Дж/см<sup>2</sup> (Рис.3а). Появление полосы стимулированной ИКЛ при  $\lambda_m \sim 435$  нм, FWHM  $\approx 18$  мЭВ наблюдается и в образце ГС-2, но при более высокой плотности энергии СЭП (Рис.3б).

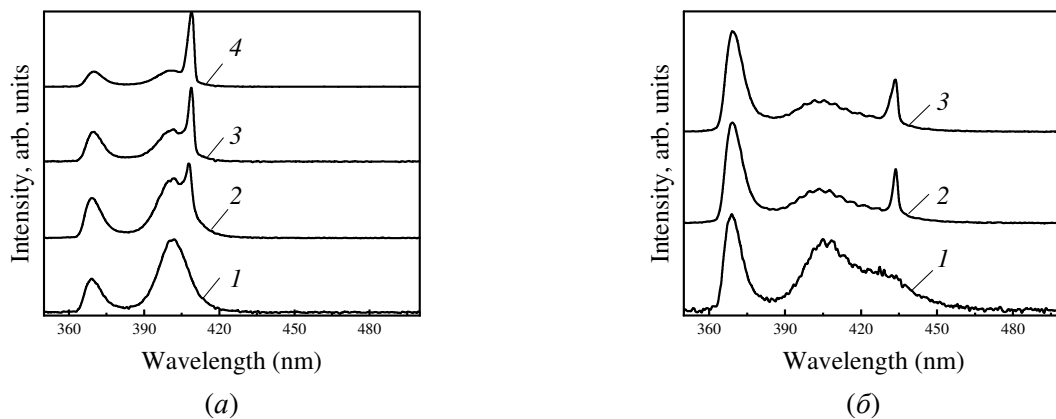


Рис.3. Спектры ИКЛ исследуемых образцов ГС-1 (а) и ГС-2 (б) при различных плотностях энергии СЭП. а) 1 – 0.01 Дж/см<sup>2</sup>, 2 – 0.03 Дж/см<sup>2</sup>, 3 – 0.08 Дж/см<sup>2</sup>, 4 – 0.2 Дж/см<sup>2</sup>; б) 1 – 0.03 Дж/см<sup>2</sup>, 2 – 0.08 Дж/см<sup>2</sup>, 3 – 0.2 Дж/см<sup>2</sup>.

В процессе исследований было обнаружено, что в образце ГС-2 спектры стимулированной ИКЛ, измеренные в различных точках ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ), различаются (Рис.4а–Рис.4б). На рис.4 представлены спектры стимулированной ИКЛ гетероструктуры ГС-2, измеренные с высоким  $\sim 0.25$  нм (Рис.4а) и сравнительно низким  $\sim 1.5$  нм (Рис.4б) спектральным разрешением с применением методик, приведенным выше. Измерение спектра в различных точках образца производилось сдвигом гетероструктуры, изображение которой строилось на входной щели монохроматора, вдоль координаты  $X$ . Средние размеры зон зондирования составляли 0.5 мм. Видно, что при сдвиге образца на 10 мм, максимум стимулированной ИКЛ монотонно сдвигается на 7 нм с 433 до 439 нм, что может быть обусловлено флуктуацией состава квантовых ям в гетероструктуре InGaN/GaN.

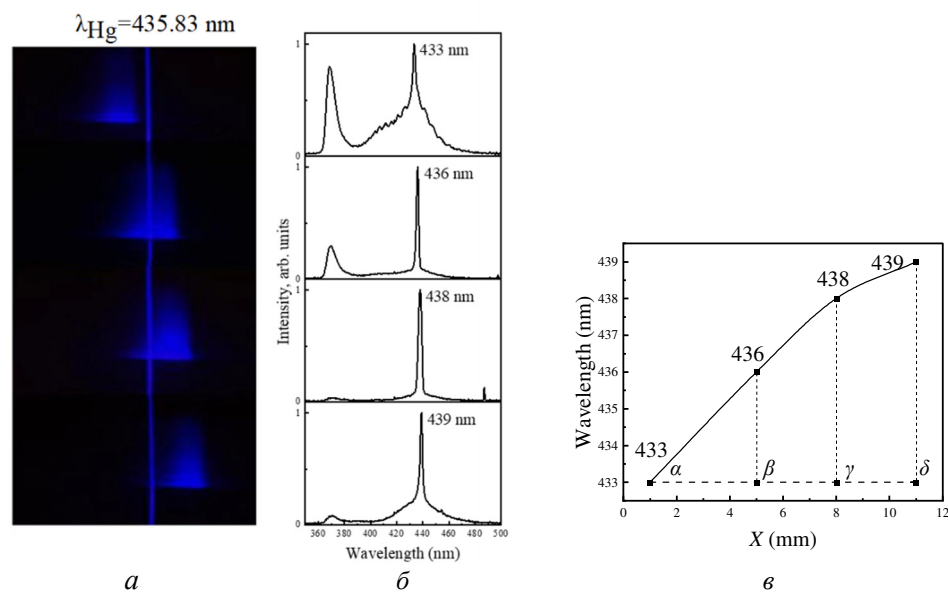


Рис.4. Спектры стимулированной люминесценции (а, б) светодиодной гетероструктуры ГС-2, полученные в точках  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ , отмеченных на карте люминесценции (в).

Спектр стимулированной ИКЛ, измеренный в различных точках ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) образца ГС-1, не изменялся (Рис.5).

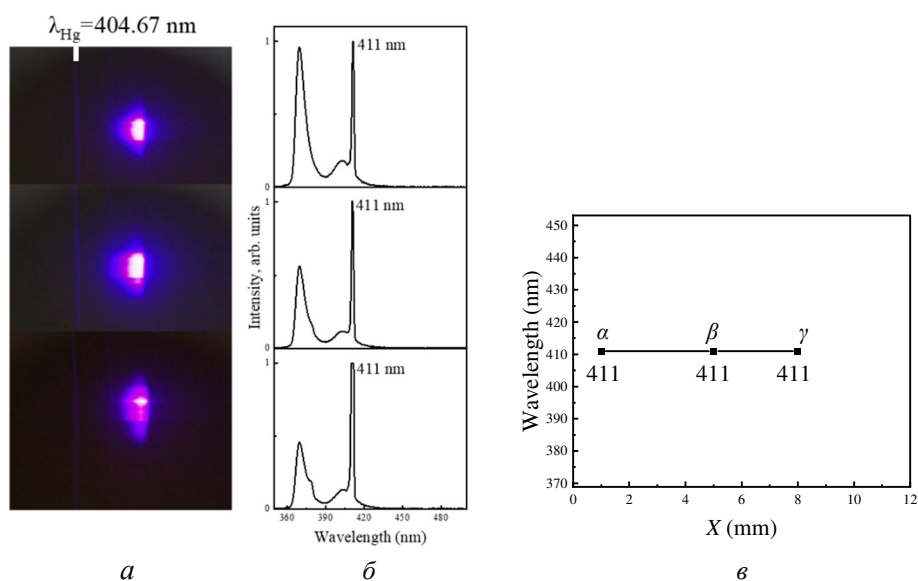


Рис.5. Спектры стимулированной люминесценции (а, б) светодиодной гетероструктуры ГС-1, полученные в точках  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , отмеченных на карте люминесценции (в).

#### 4. Заключение

Проведены сравнительные исследования спектрально-кинетических характеристик спонтанной и стимулированной люминесценции двух гетероструктур AlGaIn/GaN и InGaIn/GaN при возбуждении электронным пучком и лазерным излучением.

Показано, что высокоэнергетические электронные пучки, в отличие от лазерного излучения, позволяют возбуждать более глубокие слои (до сотен микрон) и, таким образом,

получать интегральную информацию обо всей гетероструктуре, включая дефекты в переходных слоях, буфере и подложке. Установлено, что спектры стимулированной ИКЛ, измеренные в различных локальных областях гетероструктуры InGaN/GaN, различаются. Наблюдается изменение положения максимума полосы вынужденного излучения в диапазоне 433–439 нм, что может быть обусловлено изменением состава квантовых ям в различных областях гетероструктуры.

## 5. Список литературы

- [1] Туркин.А, *Полупроводниковая светотехника*, **6**, 6, 2011.
- [2] Лундин В.В., и др., *Письма в ЖТФ*, **36**(22), 89, 2010;  
url: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/14206>
- [3] Горина С.Г., Цзысюань Ли, Сычева А.В., *сборник докладов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*, Томск, Россия, 103, 2014.
- [4] Андрианов А.В., и др., *Физика и техника полупроводников*, **36**(6), 679, 2002;  
url: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/39883>
- [5] Домрачева, Я.В., и др., *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 8, 10, 2009.
- [6] Oleshko V.I., et al., *Изв. вузов. Физика*, **57**(12/3), 62, 2014.
- [7] Олешко В.И., и др., *Изв. вузов. Физика*, **56**(1), 55, 2013.
- [8] Олешко В.И., и др., *Изв. вузов. Физика*, **56**(1/2), 175–177, 2013.
- [9] Олешко В.И., Горина С.Г., *Изв. вузов. Физика*, **56**(7/2), 82; 2013.