

УДК 535.37  
EDN: NAVOVO

PACS: 78.60.Hk



## Влияние плотности дислокаций на суперлюминесценцию эпитаксиальных слоев GaN, выращенных методом металлоорганической газофазной эпитаксии на сапфировых подложках

В. И. Олешко, Zixuan Li

*Исследованы излучательные свойства эпитаксиальных слоев GaN, выращенных методом металлоорганической газофазной эпитаксии на сапфировых подложках. Образцы возбуждались сильноточным электронным пучком с плотностью энергии  $\sim 0,4$  Дж/см<sup>2</sup>. Установлена корреляция интенсивности суперлюминесценции с плотностью дислокаций. Показано, что с уменьшением плотности дислокаций на длинноволновом крыле спонтанной люминесценции формируется пик суперлюминесценции, интенсивность которой нарастает с уменьшением плотности дислокаций.*

*Ключевые слова:* нитрид галлия, дислокации, сильноточный электронный пучок, суперлюминесценция.

DOI: 10/51368/1996-0948-2024-3-58-62

### Введение

Нитрид галлия (GaN) интенсивно исследовался в последние годы благодаря своему применению в оптоэлектронике. Структуры на основе GaN перспективны также для разработки компонентной базы силовой и СВЧ-электроники [1–3]. GaN обычно послойно наносят на инородную подложку, такую как сапфир (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Из-за разницы параметров решетки непосредственное осаждение нитрида галлия на сапфире приводит к образованию сильнодефектных эпитаксиальных слоев с плотностью дислокаций  $\sim 10^9$  см<sup>-2</sup> [4]. Производители эпитаксиальных структур постоянно

совершенствуют технологию роста и пытаются уменьшить плотность дислокаций, являющихся одним из основных факторов, определяющих эффективность излучения GaN. Среди современных методов определения плотности дислокаций в эпитаксиальных структурах наибольшее распространение получили следующие: метод измерения плотности ямок травления (ПЯТ) [5], просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) [6], атомно-силовая микроскопия (АСМ) [7] и рентгенодифракционный метод [4, 8].

ПЯТ является эффективным методом определения общей плотности дефектов, однако во время анализа происходит разрушение образцов. С помощью ПЭМ можно напрямую определять пространственное распределение дислокаций, однако его главными недостатками являются локальность, разрушающее действие и необходимость в специальной подготовке образцов. АСМ в отличие от ПЭМ является неразрушающим методом, однако этот метод также ограничен сравнительно небольшой по размеру площадью исследования, кроме того, АСМ дает возможность получить информацию только о поверхности образца. Рентгенодифракционный метод свободен от

Олешко Владимир Иванович<sup>1</sup>, профессор, д.ф.-м.н.

E-mail: oleshko@tpu.ru

Li Zixuan, аспирант.

E-mail: li8633@yandex.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

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

Статья поступила в редакцию 1.04.2024

После доработки 17.04.2024

Принята к публикации 25.04.2024

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Олешко В. И., Li Zixuan, 2024

недостатков, присущих ПЯТ, ПЭМ и АСМ. С помощью этого неразрушающего метода можно получить полную информацию о кристаллической структуре. Однако обработка дифракционных данных для получения информации о плотности дислокаций является довольно сложным и трудоемким процессом, требующим затрат значительного времени.

В настоящее время широкое распространение для контроля качества излучающих структур получили экспрессные и экономичные люминесцентные методы [9–13].

Так, например в [12] продемонстрирована высокая чувствительность интенсивности спонтанной фото- и катодолуминесценции к плотности дислокаций в эпитаксиальных слоях GaN.

Применение сильноточных электронных пучков (СЭП) наносекундной длительности для возбуждения люминесценции эпитаксиальных слоев GaN и наногетероструктур InGaN/GaN позволяет реализовать ряд преимуществ по сравнению с другими способами возбуждения [9–11]. Одно из них – это возможность получения стимулированного излучения (суперлюминесценции) в отсутствие внешнего резонатора.

Цель настоящей работы – изучить влияние плотности дислокаций на порог и интенсивность суперлюминесценции эпитаксиальных слоев GaN, возбуждаемых СЭП.

### Объекты исследований и методика эксперимента

В качестве исследуемых образцов использовались тонкие пленки GaN с разной плотностью дислокаций, выращенные на с-ориентированной сапфировой подложке методом металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) в реакторе горизонтального потока AIXTRON 200/RF-S авторами работы [4].

На рисунке 1 представлены структуры исследуемых образцов.

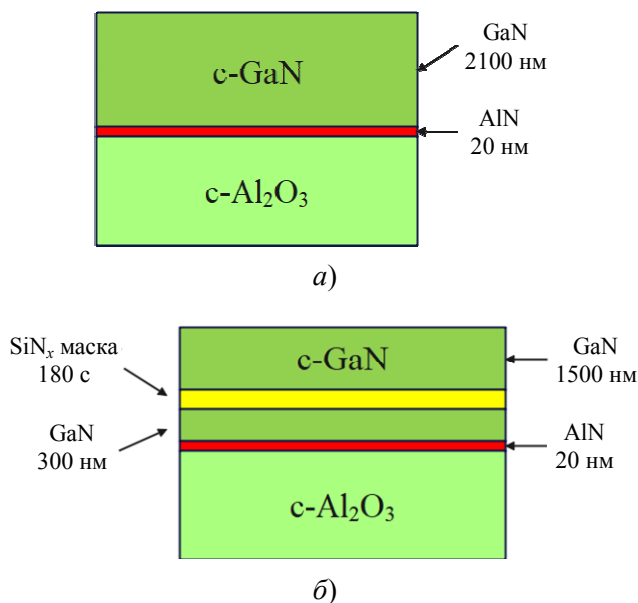


Рис. 1. Общая структура образцов: а) – GaN-4 (без маски); б) – GaN-1 (с маской SiN<sub>x</sub>) [4]

Сначала на подложку осаждали легированный кислородом зародышевый слой AlN (~20 нм), после чего слой GaN (~300 нм). Рост GaN прерывался для нанесения промежуточного слоя SiN<sub>x</sub> субмонослойной толщины, после чего доращивался слой GaN. Осаждение промежуточного слоя SiN<sub>x</sub> позволяло уменьшить плотность пронизывающих дислокаций в верхнем эпитаксиальном слое GaN. SiN<sub>x</sub> действует как самоорганизующаяся маска, частично скрепляя пронизывающие дислокации, распространяющиеся от границы раздела подложки. Изменением времени осаждения SiN<sub>x</sub> от 0 до 180 с варьировали плотность дислокаций в слоях GaN. Данные о плотности пронизывающих дислокаций в четырех исследуемых образцах были получены в работе [4] из исследования плотностей ямок травления и с использованием интеграции метода моделирования Монте-Карло и диффузного рассеяния рентгеновских лучей. Сводная информация о плотности дислокаций в исследуемых образцах представлена в таблице.

Таблица

Плотность дислокаций в исследуемых образцах [4]

№ образца	Время осаждения SiN <sub>x</sub> (с)	Плотность дислокаций (плотность ямок травления) (10 <sup>8</sup> см <sup>-2</sup> )	Плотность дислокаций из моделирования (10 <sup>8</sup> см <sup>-2</sup> )
1	180	2,6	2,9
2	150	4,8	5,3
3	120	7,6	8,5
4	0	20	22,7

Импульсная катодоллюминесценция (ИКЛ) образцов возбуждалась со стороны эпитаксиального слоя, а измерялась со стороны сапфировой подложки при комнатной температуре. Угол между направлением распространения СЭП и облучаемой поверхностью составлял  $90^\circ$ , эффективная энергия электронов в спектре пучка составляла  $\sim 250$  кэВ, длительность импульса тока  $\sim 12$  нс, плотность энергии ( $H$ )  $\sim 0,4$  Дж/см<sup>2</sup>. Интегральные (за время импульса) спектры ИКЛ измерялись с помощью оптоволоконного спектрометра AvaSpec-ULS2048CL-EVO-RS (спектральный диапазон 190–1100 нм, спектральное разрешение  $\sim 1,5$  нм).

## Результаты экспериментов и их обсуждение

Измерение интегральных (за время импульса) спектров ИКЛ (рис. 2) показало, что во всех исследуемых образцах преимущественной в спектре является полоса спонтанной люминесценции с максимумом при  $\lambda_m = 372$  нм (FWHM  $\sim 10$  нм), время затухания  $\tau \leq 12$  нс) которая принадлежит GaN ( $E_g = 3,39$  эВ при 300 К), и обусловлена излучением связанных на дефектах экситонов [14]. Сдвиг максимума полосы ИКЛ ( $\lambda_m = 372$  нм) GaN в длинноволновую область спектра по сравнению со спектром ФЛ ( $\lambda_m = 363$  нм) этих же образцов, измеренным в [12] связан с реабсорбцией излучения, распространяющегося из более глубоких слоев GaN, возбуждаемых высокоэнергетическим СЭП.

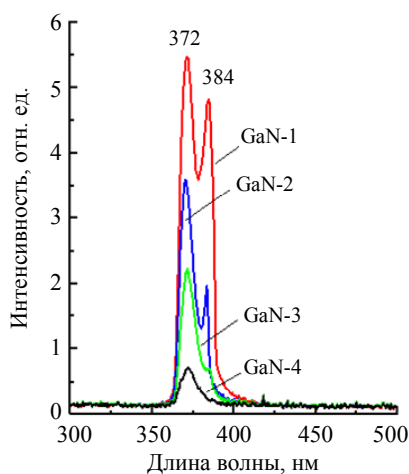


Рис. 2. Интегральные (за время импульса) спектры ИКЛ образцов GaN № (1–4) с разной плотностью дислокаций.  $H \sim 0,4$  Дж/см<sup>2</sup>

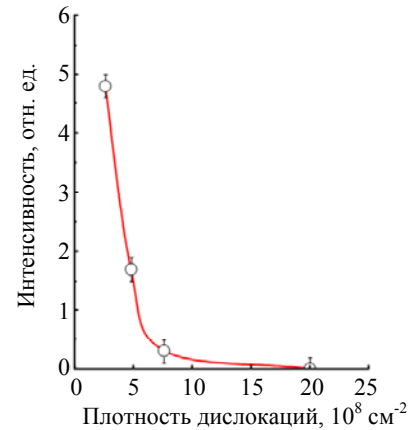


Рис. 3. Зависимость интенсивности суперлюминесценции эпитаксиальных слоев GaN от плотности дислокаций

Видно, что в образце № 4 с плотностью дислокаций  $\sim 20 \times 10^8$  см<sup>-2</sup> регистрируется одна полоса спонтанной ИКЛ, а в образцах № 1–3, на длинноволновом крыле формируется узкая полоса вынужденного излучения (суперлюминесценция) с максимумом при  $\lambda_m = 384$  нм. Интенсивность полос спонтанной и стимулированной катодоллюминесценции нарастает с уменьшением плотности дислокаций при постоянной плотности энергии СЭП (рис. 3). Формирование узких линий на длинноволновом крыле спонтанной люминесценции в эпитаксиальных слоях GaN и гетероструктурах InGaN/GaN связывают с вынужденной излучательной рекомбинацией в электронно-дырочной плазме, которая образуется при достижении уровня возбуждения полупроводника порогового значения [15]. Вынужденное излучение в этом случае формируется в отсутствие внешнего резонатора и обеспечивается за счет многократного отражения от граней кристалла.

Для сравнения характеристик суперлюминесценции образцов GaN № 1–4 с характеристиками суперлюминесценции буферных слоев GaN светодиодных гетероструктур, нами были исследованы светодиодные гетероструктуры с InGaN/GaN квантовыми ямами различных производителей (Китай, Semiled и др.), выращенные на сапфировых подложках методом МОГФЭ. Установлено, что пороги формирования суперлюминесценции в буферных слоях GaN отличаются в несколько раз, а интенсивность суперлюминесценции может превышать интенсивность спонтанной ИКЛ более, чем в 4–8 раз (рис. 4). Пороги формирования суперлюминесценции в буферных

слоях GaN в исследованных нами светодиодных гетероструктурах варьировались в диапазоне от 0,16 до 0,4 Дж/см<sup>2</sup>.

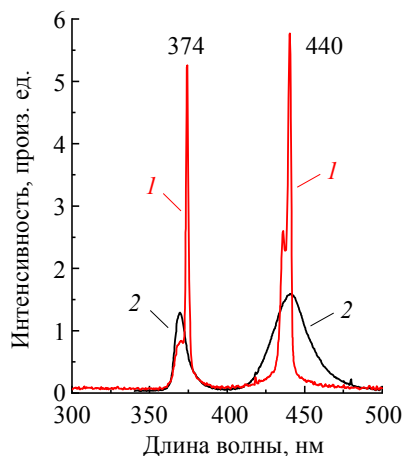


Рис. 4. Спектры суперлюминесценции (1) и спонтанной (2) ИКЛ светодиодной гетероструктуры InGaN/GaN (Китай), измеренные при  $H \sim 0,2$  и  $0,01$  Дж/см<sup>2</sup>, соответственно

### Заключение

Исследовано влияние плотности дислокаций на суперлюминесценцию эпитаксиальных слоев GaN, выращенных методом МОГФЭ на сапфировых подложках. Установлено, что основным фактором, влияющим на порог формирования и интенсивность суперлюминесценции эпитаксиальных слоев нитрида галлия, является плотность дислокаций, образующихся из-за несоответствия параметров кристаллических решеток GaN и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Полученная зависимость интенсивности вынужденного излучения от плотности дислокаций и плотности энергии электронного пучка позволяет реализовать способ отбраковки эпитаксиальных слоев GaN для создания на их основе приборов оптоэлектроники.

### ЛИТЕРАТУРА

- Gallium nitride (GaN): physics, devices, and technology / Ed. Medjdoub Farid. – CRC Press, 2017.
- Tyler J. F., Pushpakaran B. N., Bayne S. B. / Journal of Electronic Materials. 2016. Vol. 45. № 6. P. 2673–2682.
- Туркин А. / Компоненты и технологии. 2011. № 5. P. 176–180.
- Barchuk M., Holý V., Miljević B., Krause B., Baumbach T., Hertkorn J., Scholz F. / J. Appl. Phys. 2010. Vol. 45. № 108. P. 043521.
- Habel F., Seyboth M. / Phys. Status Solidi C. 2003. Vol. 0. № 7. P. 2448–2451.
- Selvaraj S. L., Egawa T. / The Transmission Electron Microscope / Ed. Dr. Khan Maaz. – InTech, 2012. P. 99–112.
- Chen Z., Su L. W., Shi J. Y., Wang X. L., Tang C. L., Gao P. / Atomic Force Microscopy – Imaging, Measuring and Manipulating Surfaces at the Atomic Scale / Ed. Dr. V. Bellitto. – InTech, 2012. P. 189–208.
- Kaganer V. M., Brandt O., Trampert A., Ploog K. H. / Phys. Rev. B. 2005. Vol. 72. P. 045423.
- Oleshko V. I., Gorina S. G., Korepanov V. I., Lisitsyn V. M., Prudaev I. A., Tolbanov O. P. / Russian Physics Journal. 2013. Vol. 56. № 1. P. 62–66.
- Прудаев И. А., Олешко В. И., Корепанов В. И., Лисицын В. М., Толбанов О. П., Ивонин И. В. / Способ контроля внутреннего квантового выхода полупроводниковых светодиодных гетероструктур на основе GaN. Патент на изобретение № 2503024 (РФ). 2013.
- Олешко В. И., Горина С. Г. / Способ диагностики электрических микронеоднородностей в полупроводниковых гетероструктурах на основе InGaN/GaN. Патент на изобретение № 2606200 (РФ). 2016.
- Oleshko V. I., Gorina S. G., Lazarev S. V., Lopatin V. V. / Известия вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 12–3. С. 62–65.
- Li Zixuan, Oleshko V. I., Vorobjeva L. V. / Russian Physics Journal. 2023. Vol. 65. № 11. P. 1875–1880 (Russian Original № 11, November, 2022).
- Reshchikov M. A., Morkoç H. / J. Appl. Phys. 2005. Vol. 97. № 061301.
- Грузинцев А. Н., Редькин А. Н. / Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. № 10. С. 1200–1203.

## Effect of dislocation density on superluminescence of GaN epitaxial layers grown by organometallic gas-phase epitaxy on sapphire substrates

V. I. Oleshko and Zixuan Li

The National Research Tomsk Polytechnic University  
30 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: oleshko@tpu.ru

Received 1.04.2024; revised 17.04.2024; accepted 25.04.2024

*The radiative properties of GaN epitaxial layers grown by organometallic gas-phase epitaxy on sapphire substrates have been studied. The samples were excited by a high-current electron beam with an energy density of  $0.4 \text{ J/cm}^2$ . The correlation of the intensity of superluminescence with the density of dislocations has been established. It is shown that with a decrease in the density of dislocations on the long-wavelength wing of spontaneous luminescence, a peak of superluminescence is formed, the intensity of which increases with a decrease in the density of dislocations.*

*Keywords:* GaN, dislocation density, high-current electron beam, superluminescence.

### REFERENCES

1. Gallium nitride (GaN): physics, devices, and technology / Ed. Medjdoub Farid. CRC Press, 2017.
2. Tyler J. F., Pushpakaran B. N. and Bayne S. B., Journal of Electronic Materials **45** (6), 2673 (2016).
3. Turkin A., Components and technologies, № 5, 176 (2011) [in Russian].
4. Barchuk M., Holý V., Miljević B., Krause B., Baumbach T., Hertkorn J. and Scholz F., J. Appl. Phys. **45** (108), 043521 (2010).
5. Habel F. and Seyboth M., Phys. Status Solidi C. **0** (7), 2448 (2003).
6. Selvaraj S. L. and Egawa T. The Transmission Electron Microscope / Ed. Dr. Khan Maaz. InTech, 2012, pp. 99–112.
7. Chen Z., Su L. , Shi J. Y., Wang X. L., Tang C. L. and Gao P. Atomic Force Microscopy – Imaging, Measuring and Manipulating Surfaces at the Atomic Scale / Ed. Dr. V. Bellitto. InTech, 2012, pp. 189–208.
8. Kaganer V. M., Brandt O., Trampert A. and Ploog K. H., Phys. Rev. B. **72**, 045423 (2005).
9. Oleshko V. I., Gorina S. G., Korepanov V. I., Lisitsyn V. M., Prudaev I. A. and Tolbanov O. P., Russian Physics Journal **56** (1), 62 (2013).
10. Prudayev I. A., Oleshko V. I., Korepanov V. I., Lisitsyn V. M., Tolbanov O. P. and Ivanin I. B. A method for controlling the internal quantum yield of semiconductor LED heterostructures based on GaN. Patent for invention. № 2503024 (RF). 2013 [in Russian].
11. Oleshko V. I. and Gorina S. G. A method for diagnosing electrical microuniformities in semiconductor heterostructures based on InGaN/GaN. Patent for invention № 2606200 (RF). 2016 [in Russian].
12. Oleshko V. I., Gorina S. G., Lazarev S. V. and Lopatin V. V., Izvestiya vuzov. Fizika. **57** (12–3), 62 (2014).
13. Li Zixuan, Oleshko V. I. and Vorobjeva L. V., Russian Physics Journal **65** (11), 1875 (2023) (Russian Original № 11, November, 2022).
14. Reshchikov M. A. and Morkoç H., J. Appl. Phys. **97**, 061301 (2005).
15. Gruzintsev A. N. and Redkin A. N., Physics and technology of semiconductors **39** (10), 1200 (2005) [in Russian].