

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/см². 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 (Al₂O₃). Из-за разницы параметров решетки непосредственное осаждение нитрида галлия на сапфире приводит к образованию сильнодефектных эпитаксиальных слоев с плотностью дислокаций $\sim 10^9$ см⁻² [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 Иванович¹, 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.

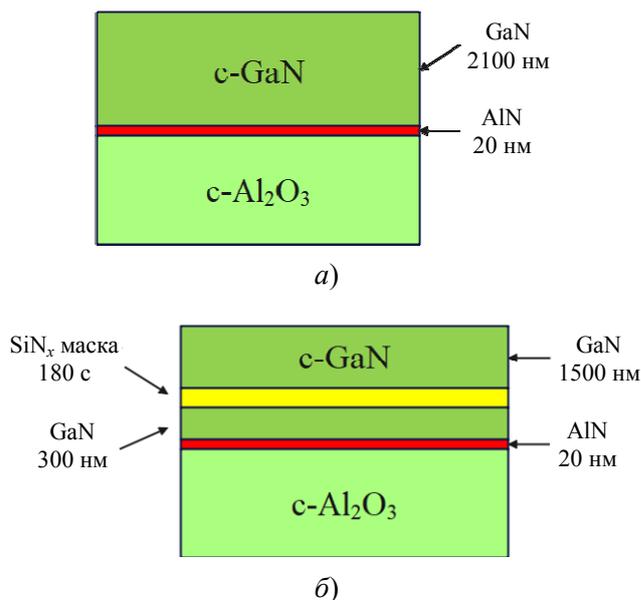


Рис. 1. Общая структура образцов: а) – GaN-4 (без маски); б) – GaN-1 (с маской SiN_x) [4]

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_x субмонослойной толщины, после чего доращивался слой GaN. Осаждение промежуточного слоя SiN_x позволяло уменьшить плотность пронизывающих дислокаций в верхнем эпитаксиальном слое GaN. SiN_x действует как самоорганизующаяся маска, частично скрепляя пронизывающие дислокации, распространяющиеся от границы раздела подложки. Изменением времени осаждения SiN_x 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 _x (с)	Плотность дислокаций (плотность ямок травления) (10 ⁸ см ⁻²)	Плотность дислокаций из моделирования (10 ⁸ см ⁻²)
1	180	2,6	2,9
2	150	4,8	5,3
3	120	7,6	8,5
4	0	20	22,7

Импульсная катодолюминесценция (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° , эффективная энергия электронов в спектре пучка составляла ~ 250 кэВ, длительность импульса тока ~ 12 нс, плотность энергии (H) $\sim 0,4$ Дж/см². 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 ~ 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.

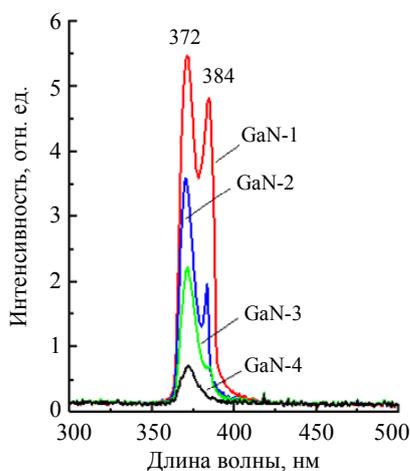


Рис. 2. Интегральные (за время импульса) спектры ИКЛ образцов GaN № (1–4) с разной плотностью дислокаций. $H \sim 0,4$ Дж/см²

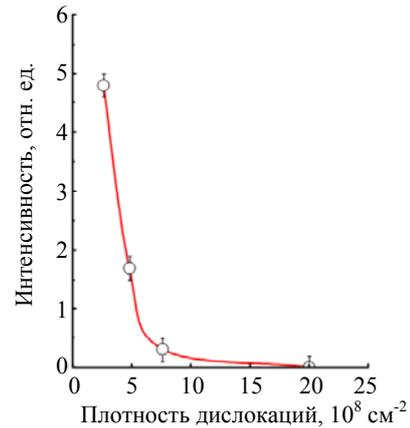


Рис. 3. Зависимость интенсивности суперлюминесценции эпитаксиальных слоев GaN от плотности дислокаций

Видно, что в образце № 4 с плотностью дислокаций $\sim 20 \times 10^8$ см⁻² 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 катодолюминесценции 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/см².

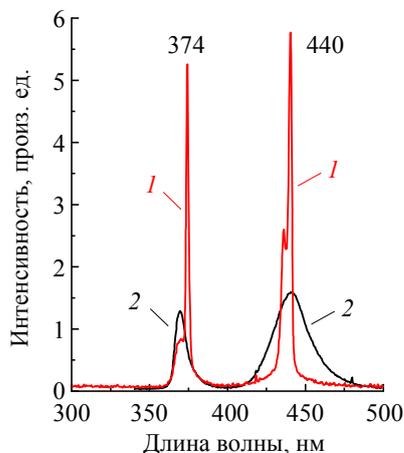


Рис. 4. Спектры суперлюминесценции (1) и спонтанной (2) ИКЛ светодиодной гетероструктуры InGaN/GaN (Китай), измеренные при $H \sim 0,2$ и $0,01$ Дж/см², соответственно

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 Al₂O₃. 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 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].