

В данной работе исследовалась передача непрерывного лазерного излучения через оптическое волокно. Были определены угловые характеристики ввода лазерного излучения в ОВ. По результатам работы видно, что для волокон с малым сердечником, угол ввода имеет предел ( $\sim 15^\circ$ ) больше которого ввести энергию можно с большими потерями. Для волокон с 600 мкм сердечником ввести энергию (принимая потери не более 20%) можно с углом ввода  $\sim 30^\circ$ .

Были проведены опыты с изогнутым волокном (рис. 5). Установлено, что для изогнутого волокна значение числовой апертуры меньше, чем для прямых волокон.

Результаты данной работы актуальны для разработки систем согласования и передачи лазерного излучения по оптическому тракту, расчетов потерь при передаче и допустимых углов ввода, изгибов волокна.

### Список литературы:

1. Григорьянц В.В, Королев В. А. Смирнов В. И. и др. / Исследование волоконных световодов для передачи мощного излучения в лазерной технологии // Квантовая электроника. – 1989. – №1. – С.128–130.
2. Кизеветтер Д.В., Малюгин В. И. /Измерение угловых характеристик ввода излучения в волоконные световоды // Оптика и спектрометрия. – 1988. – Т. 64. – № 5. – С.1139–1143.
3. А.Г. Вознюк, С.Е. Зайцев, В.М. Лисицин, В.П. Ципилев / Согласованный с параметрами технологических лазеров передачи излучения по волоконно-оптическому тракту //Оптотехнология. Межвузовский сборник статей. СПб. – 1995. – С.82–87.
4. Апенко Н.И., Дубовик А.С. Прикладная оптика // Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М., 1971. – С.381–392.

## ВЛИЯНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ GAN

*В.И.Олешко д.ф.-м.н,*

*Б.К.Садуова, магистрант группы 4ВМ41,*

*Ли Фэй, магистрант группы 4ВМ41,*

*Ли Цзысюань, магистрант группы 4ВМ 3Б*

*Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30,  
тел.(3822)-701-777*

*E-mail: samai\_b\_91@mail.ru*

На протяжении последних трех десятилетий наблюдается неуклонный рост интереса к прямозонным широкозонным нитридам III-группы, считающимися перспективными материалами для создания современных оптоэлектронных устройств [1–3]. В настоящее время они являются основой многих ИК и УФ светодиодов, лазерных диодов, полноцветных светодиодных дисплеев и т.д. Нитрид галлия (GaN) обычно послойно наносят на инородную подложку, такую как сапфир ( $Al_2O_3$ ). Из-за разницы параметров решетки непосредственное осаждение нитрида галлия на сапфире приводит к образованию сильнодефектных эпитаксиальных слоев с плотностью

дислокаций  $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$  [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) дислокаций [5], просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) [6], атомно-силовая микроскопия (АСМ) [7] и рентгенодифракционный метод [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 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 люминесцентные методы получают широкое распространение для контроля качества излучающих структур на многих стадиях технологического процесса. Фото- и катодолуминесценцию можно назвать одними из основных методов экспресс-диагностики гетероструктур, предназначенных для создания оптоэлектронных приборов [9, 10]. В гетероструктурах, выращенных в различных технологических условиях, имеется несколько каналов безызлучательной рекомбинации: атомы неконтролируемой примеси, точечные дефекты и дислокации.

Цель настоящей работы – изучить влияние плотности дислокаций на интенсивность экситонной фото- и катодолуминесценции (ФЛ и КЛ) эпитаксиальных слоев GaN, выращенных в контролируемых условиях.

В качестве исследуемых образцов использовались тонкие пленки GaN с разной плотностью дислокаций, выращенные на с-ориентированной сапфировой подложке (001) методом металлоорганической газовой эпитаксии в реакторе горизонтального потока AIXTRON 200/RF-S. На рисунке 1 представлена общая структура исследуемых образцов.

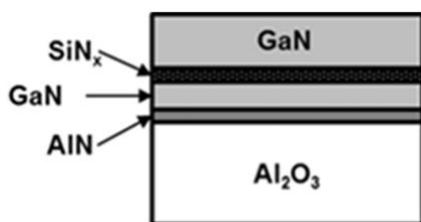


Рис. 1. Общая структура исследуемых образцов.

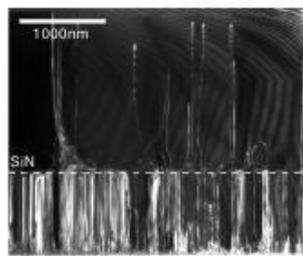


Рис. 2. Микроснимок поперечного сечения образца с наименьшей плотностью дислокаций, сделанный с помощью ПЭМ [11].

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 дорастивался слой GaN. Осаждение промежуточного слоя SiN<sub>x</sub> позволяет уменьшить плотность пронизывающих дислокаций в эпитаксиальном слое GaN [11]. SiN<sub>x</sub> действует как самоорганизующаяся маска частично скрепляя пронизывающие дислокации, распространяющиеся от границы раздела подложки (рис.2). Изменением времени осаждения SiN<sub>x</sub> от 0 до 180 с варьировалась плотность дислокаций в слоях GaN. Общая толщина пленки GaN составляла 1,8 мкм для образцов со слоем SiN<sub>x</sub> и 2,4 мкм для образца без него.

Данные о плотности пронизывающих дислокаций в четырех исследуемых нами образцах были получены авторами работы [11] из исследования плотностей ямок травления и с использованием интеграции метода моделирования Монте-Карло и диффузного рассеяния рентгеновских лучей [4]. Сводная информация о плотности дислокаций в исследуемых образцах представлена в таблице 1.

Таблица 1. Плотности винтовых и краевых пронизывающих дислокаций в исследуемых образцах (точность результатов ±10%) [4, 11].

№ 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

Фотолюминесценция образцов возбуждалась излучением импульсного азотного лазера ( $\lambda=337,1$  нм), работающего с частотой 10 Гц при длительности импульса 4 нс. Уровень оптического возбуждения составлял  $I_{ex} \sim 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>.

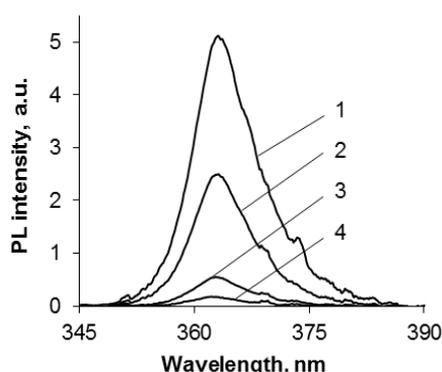


Рис. 3. Интегральные (за время импульса) спектры ФЛ исследуемых образцов №1 – №4 с разными плотностями дислокаций (табл.1).

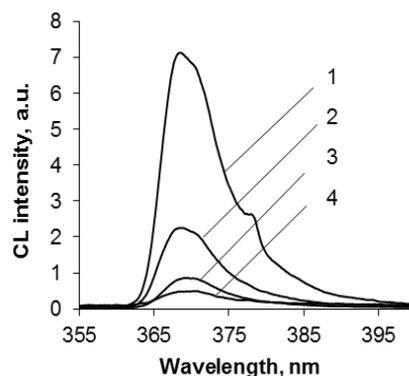


Рис. 4. Интегральные (за время импульса) спектры КЛ исследуемых образцов №1 – №4 с разными плотностями дислокаций (табл.1).

Катодолюминесценция образцов возбуждалась сильноточным электронным пучком (эффективная энергия электронов  $\sim 250$  кэВ, длительность импульса тока  $\sim 15$  нс). Плотность энергии электронного пучка  $H$ , выведенного в атмосферу, варьировалась в диапазоне (0,05-0,25) Дж/см<sup>2</sup>.

Интегральные (за время импульса) спектры ФЛ и КЛ измерялись с помощью оптоволоконного спектрометра AvaSpec-DUAL. Облучение образцов и измерение КЛ и ФЛ осуществлялось со стороны эпитаксиальных слоев GaN при температуре 300 К.

Измерение интегральных (за время импульса) спектров ФЛ (рис. 3) показало, что во всех исследуемых образцах преимущественной в спектре является полоса с максимумом при 363 нм (полуширина  $\sim 90$  мэВ, время затухания  $\tau \leq 15$  нс) которая принадлежит GaN ( $E_g=3,39$  эВ при 300 К). Данная полоса обусловлена рекомбинацией связанных на дефектах экситонов [12]. Спектры экситонной катодолюминесценции эпитаксиальных слоев GaN оказалась близкими по своим характеристикам к спектрам фотолюминесценции. В интегральных спектрах КЛ (рис. 4) также как и в спектрах ФЛ доминирует экситонная полоса, однако ее максимум смещен в длинноволновую область и расположен при 368 нм (полуширин  $\sim 90$  мэВ, время затухания  $\tau \leq 15$  нс).

Известно, что высокоэнергетический электронный пучок обеспечивает возбуждение образца на большую глубину, по сравнению с возбуждением лазерным излучением, энергия кванта которого превышает ширину запрещенной зоны нитрида галлия. В связи с этим наблюдается сдвиг максимума полосы КЛ в длинноволновую область, что связано с реабсорбцией коротковолновой части экситонной полосы люминесценции, распространяющейся в направлении детектора из более глубоких слоев GaN.

Зависимость интенсивности ФЛ от плотности дислокаций в исследованных образцах приведена на рис. 5. Видно, что имеется пороговая плотность дислокаций ( $\sim 8 \cdot 10^8$  см<sup>-2</sup>), начиная с которой наблюдается резкое (близкое к линейному) увеличение интенсивности ФЛ слоев GaN.

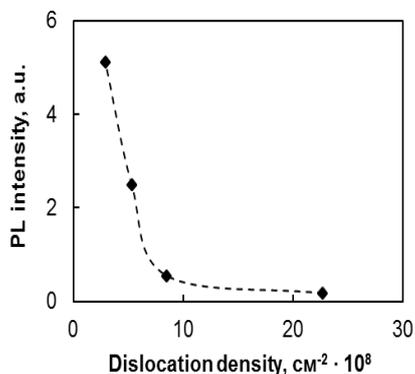


Рис. 5. Зависимость интенсивности экситонной ФЛ от плотности дислокаций в эпитаксиальных слоях GaN.

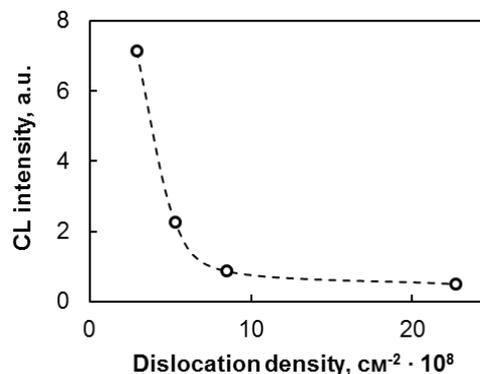


Рис.6. Зависимость интенсивности экситонной КЛ от плотности дислокаций в эпитаксиальных слоях GaN.

Зависимость интенсивности экситонной КЛ от плотности дислокаций (рис. 6) также как и ФЛ демонстрирует пороговый характер влияния общей плотности пронизывающих дислокаций на интенсивность экситонной полосы люминесценции GaN.

Таким образом в настоящей работе изучено влияния плотности дислокаций на интенсивность экситонной фото- и катодолюминесценции эпитаксиальных слоев GaN, выращенных на с-ориентированных сапфировых подложках. Экспериментальные

результаты свидетельствуют о том, что дислокации, образующиеся в процессе выращивания гетероструктур, являются одним из основных видов дефектов, ответственных за безызлучательную рекомбинацию экситонов в эпитаксиальных слоях GaN. Полученная зависимость интенсивности экситонной люминесценции от плотности дислокаций для образцов GaN может служить градуировочным графиком, позволяющим определять концентрацию дислокаций по интенсивности экситонной люминесценции в эпитаксиальных слоях GaN, выращенных по одной и той же технологии. Построение пространственного распределения интенсивности экситонной люминесценции по поверхности гетероструктуры позволит быстро прогнозировать будущую эффективность излучения светодиодных чипов, изготовленных из разных областей пластины.

### Список литературы:

1. S. Strite and H. Morkoc. GaN, AlN, and InN: A review // *J. Vac. Sci. Technol. B*10. – 1992. – P. 1237–1266.
2. Y.S. Park. Wide bandgap III-Nitride semiconductors: opportunities for future optoelectronics // *Opto-electronics Review*. – 2001. – V. 9. – № 2. P.117–124.
3. Junqiao Wu. When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives // *J. Appl. Phys.* – 2009. – V. 106. – № 1. P. 01110-1–01110-28.
4. M. Barchuk, V. Holý, B. Miljević, B. Krause, T. Baumbach, J. Hertkorn, and F. Scholz. X-ray diffuse scattering from threading dislocations in epitaxial GaN layers // *J. Appl. Phys.* – 2010. – V. 108. – P. 043521-1–043521-7.
5. F. Habel, M. Seyboth. Determination of dislocation density in epitaxially grown GaN using an HCl etching process // *Phys. Status Solidi C*. – 2003. – № 7. – P. 2448–2451.
6. S.L. Selvaraj, T. Egawa. Transmission Electron Microscopy to Study Gallium Nitride Transistors Grown on Sapphire and Silicon Substrates Available from: <http://www.intechopen.com/books/the-transmission-electron-microscope/transmission-electron-microscopy-to-study-gallium-nitride-transistors-grown-on-sapphire-and-silicon->.
7. Z. Chen, L.W. Su, J.Y. Shi, X.L. Wang, C.L. Tang, P. Gao. Application in III-Nitride Materials and Devices, Atomic Force Microscopy. Available from: <http://www.intechopen.com/books/atomic-force-microscopy-imaging-measuring-and-manipulating-surfaces-at-the-atomic-scale/afm-application-in-iii-nitride-materials-and-devices>.
8. V.M. Kaganer, O. Brandt, A. Trampert, K.H. Ploog. X-ray diffraction peak profiles from threading dislocations in GaN epitaxial films // *Phys. Rev. B*. – 2005. – V. 72. – P. 1–12.
9. V.I. Oleshko, S.G. Gorina, V.I. Korepanov et. al. Luminescence of thin-film light-emitting diode structures upon excitation by a high-current electron beam // *Russian Physics Journal*. – 2013. – V.56. – № 1. P. 62–66.
10. Y. Yamada, Y. Yoshida, T. Taguchi et. al. Time-resolved nonlinear luminescence of excitonic transitions in GaN // *J. Appl. Phys.* – 2004. – V.96 – №1. P. 138–143.
11. J. Hertkorn, Verbesserung der lateralen Stromführung in Hocheffizienten Halbleiterlichtquellen (Cuvillier Verlag, Goettingen, 2009).
12. Bunea G.E., Herzog W.D., Unlu M.S., Goldberg B.B., Molnar R.J. // *Appl. Phys. Lett.* – 1999. – V. 75. – № 6. P. 838–840.