

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

**Труды XXVI Международного
симпозиума**

14–17 марта 2022 г., Нижний Новгород

Том 1

Секции 1, 2, 4, 5

Нижний Новгород
Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского
2022

УДК 538.9
ББК 22.37; 22.33
Н-25

Нанозеллектроника. Труды XXVI Международного симпозиума (Нижний Новгород, 14–17 марта 2022 г.) В 2 т. Том 1. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2022. — 643 с.
ISBN 978-5-91326-720-7

Организаторы

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации;
Отделение физических наук РАН;
Научный совет РАН по физике полупроводников;
Научный совет РАН по физике конденсированных сред;
Институт физики микроструктур РАН;
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
Благотворительный фонд «От сердца к сердцу».

Сопредседатели Симпозиума

С.В. Гапонов, академик РАН, ИФМ РАН
З.Ф. Красильник, член-корр. РАН, ИФМ РАН

Учёный секретарь Симпозиума

Д.А. Татарский, к. ф.-м. н., ИФМ РАН

Программный комитет

А.Ю. Аладышкин, к.ф.-м.н.,	ИФМ РАН, Нижний Новгород
В.В. Бельков, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
И.С. Бурмистров, д.ф.-м.н.	ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, Черногловка
В.А. Бушуев, д.ф.-м.н.	МГУ, Москва
В.А. Быков, д.т.н.	NT-MDT Spectrum Instruments, Москва
В.А. Волков, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва
В.И. Гавриленко, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.Б. Грановский, д.ф.-м.н.	МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
К.Н. Ельцов, д.ф.-м.н.	ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва
С.В. Иванов, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Е.Л. Ивченко, чл.-корр. РАН	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В.В. Кведер, академик	ИФТТ РАН, Черногловка
А.В. Латышев, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
А.С. Мельников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
В.Л. Миронов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
С.А. Никитов, чл.-корр. РАН	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
Д.В. Рощупкин, д.ф.-м.н.	ИПТМ РАН, Черногловка
В.В. Рязанов, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, Черногловка
Н.Н. Салашенко, чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Н. Новгород
М.В. Сапожников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
А.А. Саранин, чл.-корр. РАН	ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
В.Б. Тимофеев, академик	ИФТТ РАН, Черногловка
Ю.А. Филимонов, д.ф.-м.н.	Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов
А.А. Фраерман, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
Д.Р. Хохлов, чл.-корр. РАН	МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
А.В. Чаплик, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
Е.В. Чупрунов, д.ф.-м.н.	ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород
Н.И. Чхало, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород

Организационный комитет

В.Г. Беллюстин	ИФМ РАН, Н. Новгород
М.В. Зорина	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.В. Иконников	МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
Д.А. Камелин	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.А. Копасов,	ИФМ РАН, Н. Новгород
Р.С. Малофеев	ИФМ РАН, Н. Новгород
М.С. Михайленко	ИФМ РАН, Н. Новгород
С.В. Морозов	ИФМ РАН, Н. Новгород
Е.Н. Садова	ИФМ РАН, Н. Новгород
Е.Е. Пестов	ИФМ РАН, Н. Новгород

ISBN 978-5-91326-720-7

ББК 22.37; 22.33

© Нижегородский госуниверситет
им. Н.И. Лобачевского, 2022
© Институт физики микроструктур
РАН, 2022

Ионно-лучевая модификация локальных люминесцентных свойств гексагонального нитрида бора

Ю.В. Петров^{1,*}, О.Ф. Вывенко¹, О.А. Гогина¹, К. Bolotin², S. Kovalchuk², К. Watanabe³, Т. Taniguchi³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034.

² Free University of Berlin Kaiserswerther Str., 16-18, Berlin, 114195.

³ National Institute for Materials Science, Tsukuba, Ibaraki 305-0047.

*y.petrov@spbu.ru

Гексагональный нитрид бора (hBN) является перспективным материалом для современной оптоэлектроники, дефекты которого могут служить однофотонными источниками света. В работе исследуется модификация люминесцентных свойств hBN посредством локального воздействия сфокусированным пучком ионов Ga⁺ и He⁺. Показано, что интенсивность катодолуминесценции (КЛ) в области зона-зонного излучения монотонно уменьшается с увеличением дозы воздействия обоих типов ионов, а полоса примесной люминесценции 2 эВ может разгораться после воздействия ионов He.

Введение

Среди полупроводниковых материалов в настоящее время все больший интерес вызывают материалы с широкой и сверх-широкой запрещенной зоной [1]. Гексагональный нитрид бора (h-BN) является одним из таких материалов и представляет интерес не только с фундаментальной точки зрения, но и как материал для создания источников одиночных фотонов на основе точечных дефектов [2]. В спектре люминесценции h-BN наблюдаются полосы с максимумами около 2 эВ и 4.1 эВ [3], а также полоса с максимумом около 5.8 эВ, соответствующая зона-зонным переходам [4]. В данной работе рассматривается возможность управляемого изменения люминесцентных свойств h-BN с помощью локальных внешних воздействий.

Эксперимент

Тонкие кристаллы гексагонального нитрида бора толщиной от 10 до 170 нм и латеральными размерами от десятков до сотен мкм, которые были получены методом эксфолиации из массивного монокристалла и перенесены на подложку Si₃N₄/Si. Исследования спектров и карт катодолуминесценции (КЛ) проводились в диапазоне температур от 7 до 300 К в сканирующем электронном микроскопе Zeiss Supra, оборудованном системой регистрации катодолуминесценции Gatan MonoCL3+, при ускоряющем напряжении 5 кВ. Исследовалось влияние различных вариантов воздействий на h-BN. Ло-

кальное облучение сфокусированным пучком ионов галлия с энергией 30 кэВ и дозами в диапазоне $5 \cdot 10^{12} - 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ проводилось с использованием двулучевой системы Zeiss Auriga. Локальное облучение сфокусированным пучком ионов гелия с энергией 30 кэВ, проводилось с помощью гелиевого ионного микроскопа Zeiss Orion Plus. Доза облучения варьировалась в диапазоне $5 \cdot 10^{13} - 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Результаты и обсуждение

В спектрах КЛ исходных образцов наблюдалась полоса зона-зонного излучения с максимумом около 5.8 эВ, а также полоса КЛ с максимумом около 2.0 эВ.

Облучение ионами галлия приводило к быстрому уменьшению интенсивности обеих полос КЛ (рисунки 1). Численное моделирование процессов рассеяния ионов в веществе с помощью SRIM, а также процесса возбуждения КЛ с помощью CASINO, показало, что ионы галлия создают нарушения в тонкой приповерхностной области, а возбуждение КЛ происходит по всей глубине образца. Это позволяет сделать предположение об образовании дополнительных центров рекомбинации неравновесных носителей заряда в приповерхностной области и заключить, что длина диффузии неравновесных носителей заряда в направлении перпендикулярном плоскости слоев h-BN порядка или не меньше толщины образца (170 нм).

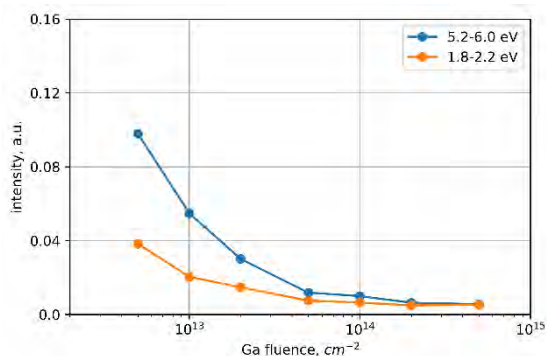


Рис. 1. Зависимость интегральной интенсивности катодолуминесценции различных спектральных полос от дозы облучения ионами галлия. Значения интенсивности нормированы на интенсивность зона-зонного излучения в необлученном образце

На карте КЛ наблюдалось существенное уменьшение яркости области, облученной ионами галлия. Аппроксимация профиля сигнала КЛ, построенного перпендикулярно границе облученной области, функцией ошибок (рисунок 2) дает оценку размытия границы 680 ± 90 нм. При этом, согласно численному моделированию, и функция возбуждения КЛ и латеральный размер области рассеяния ионов галлия имеют полуширину менее 20 нм, а следовательно, наблюдаемое размытие границы можно рассматривать, как оценку длины диффузии неравновесных носителей заряда в плоскости слоев h-BN.

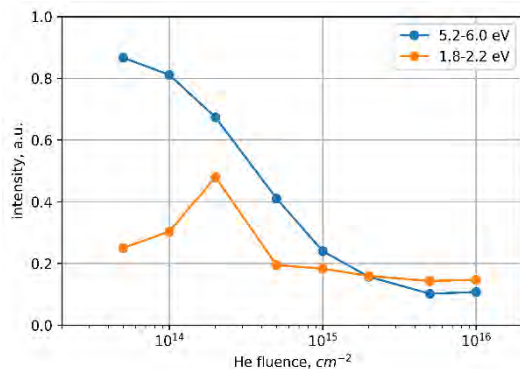


Рис. 3. Зависимость интегральной интенсивности катодолуминесценции в различных спектральных диапазонах от дозы облучения ионами гелия. Значения интенсивности нормированы на интенсивность зона-зонного излучения в необлученном образце

Облучение ионами гелия также приводило к уменьшению интенсивности полосы, связанной с зона-зонным излучением, однако при этом интен-

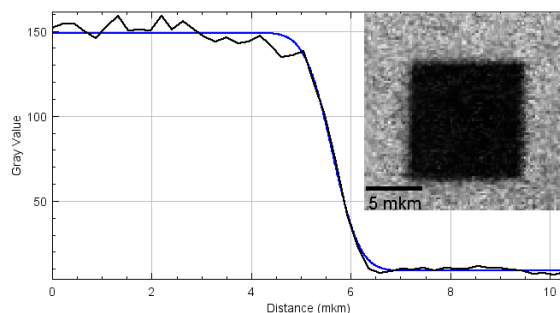


Рис. 2. Профиль интенсивности катодолуминесценции, построенный перпендикулярно границе облученной области (черный) и аппроксимация данного профиля функцией ошибок (синий). На вставке приведена карта распределения интенсивности КЛ для области, облученной ионами галлия с дозой $5 \cdot 10^{12}$ см⁻²

сивность люминесценции около 2 эВ меняется с дозой облучения немонотонно (рисунок 3).

При малых дозах облучения интенсивность полосы 2 эВ возрастала, а при больших дозах медленно убывала, так что превышала интенсивность зона-зонного излучения. Таким образом, облучения ионами гелия приводит к уменьшению интенсивности зона-зонного излучения не только за счет образования центров рекомбинации, но и за счет образования центров люминесценции, ответственных за полосу излучения около 2 эВ, что делает облучение сфокусированным пучком ионов гелия перспективным методом локального формирования однофотонных источников излучения.

Результаты получены с использованием оборудования междисциплинарного ресурсного центра по направлению «Нанотехнологии» Научного парка СПбГУ.

Литература

1. Tsao J.Y., Chowdhury S., Hollis M.A. *et al.* // *Advanced Electronic Materials*, V. 4, 1600501 (2018)
2. Bourrellier R., Meuret S., Tararan A. *et al.* // *Nano Letters*, V.16, 4317 (2016)
3. Weston L., Wickramaratne D., Mackoite M. *et al.* // *Physical Review B*, V. 97, 214104 (2018)
4. Watanabe K., Taniguchi T. and Kanda H. // *Nature Materials*, V. 3, 404 (2004)