

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Труды XXVII Международного симпозиума

13–16 марта 2023 г., Нижний Новгород

Том 1

Секция 1

Сверхпроводящие наносистемы

Секция 2

Магнитные наноструктуры

Секция 4

Измерения и технологии атомарного и нанометрового масштаба на основе зондовых, электронно-лучевых и ионно-лучевых методов

Секция 6

Твердотельная элементная база квантовых технологий

Нижний Новгород
ИПФ РАН
2023

УДК 538.9(063)
ББК 22.37я431
32.844.2я431
Н-25

Н-25 В 2 томах. Том 1-й. — Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2023. — 496 с.
ISBN 978-5-8048-0120-6

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 программного комитета

С. В. Гапонов, академик РАН, ИФМ РАН, Нижний Новгород;
З. Ф. Красильник, чл.-корр. РАН, ИФМ РАН, Нижний Новгород.

Учёный секретарь Симпозиума

Д. А. Татарский, к.ф.-м.н., ИФМ РАН, Нижний Новгород

Программный комитет

А. Ю. Аладышкин, д.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, Черноголовка
В. А. Бушуев, д.ф.-м.н.	МГУ им. М. В. Ломоносова, 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, Нижний 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. Зайцев-Зотов, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
С. В. Иванов, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Е. Л. Ивченко, чл.-корр. РАН	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В. В. Кведер, академик РАН	ИФТТ РАН, Черноголовка
И. В. Кукушкин, академик РАН	ИФТТ РАН, Черноголовка
В. Д. Кулаковский, академик РАН	ИФТТ РАН, Черноголовка
А. В. Латышев, академик РАН	ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова, Новосибирск
А. С. Мельников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. А. Мильяев, д.ф.-м.н.	ИФП УрО РАН им. М. Н. Михеева, Екатеринбург
В. Л. Миронов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
С. А. Никитов, чл.-корр. РАН	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
А. В. Новиков, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Д. В. Рощупкин, д.ф.-м.н.	ИПТМ РАН, Черноголовка
В. В. Рязанов, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, Черноголовка
А. В. Садовников, к.ф.-м.н.	СГУ им. Н. Г. Чернышевского, Саратов
Н. Н. Салащенко, чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. В. Сапожников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
А. А. Саранин, чл.-корр. РАН	ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
Ю. А. Филимонов, д.ф.-м.н.	Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов
А. А. Фраерман, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Д. Р. Хохлов, чл.-корр. РАН	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
А. В. Чаплик, академик РАН	ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова, Новосибирск
Н. И. Чхало, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Т. В. Шубина, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

Организационный комитет

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

ISBN 978-5-8048-0120-6

ББК 22.37я431
32.844.2я431
© ИПФ РАН, 2023
© ИФМ РАН, 2023

Влияние электронного и ионного облучения на люминесценцию гексагонального нитрида бора

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

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

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

Люминесцентные свойства гексагонального нитрида бора и способы локального управления такими свойствами в последние годы вызывают повышенный интерес в связи с возможностью получения источников одиночных фотонов на основе данного материала. В качестве способов управления люминесцентными свойствами рассматривается облучение сфокусированными ионными и электронными пучками. В данной работе исследовано влияние локального облучения сфокусированным пучком ионов гелия и электронным пучком на катодолуминесценцию гексагонального нитрида бора. Показано, что последовательное воздействие ионами гелия и электронами приводит к усилению полосы люминесценции с энергией около 2 эВ.

Введение

Гексагональный нитрид бора (hBN) рассматривается в настоящее время как один из перспективных материалов для создания однофотонных источников, применяемых в квантовой криптографии [1, 2]. В качестве таких источников предлагается использовать центры люминесценции в hBN с положением максимумов полос около 4 эВ [1] и около 2 эВ [2]. Наибольший интерес в этом отношении представляют центры, характеризующиеся полосой люминесценции 2 эВ [2]. К настоящему времени уже опубликовано несколько работ, посвященных воздействию нейтронного, электронного, ионного и лазерного облучения на данную полосу люминесценции [2]. Особый интерес представляет облучение сфокусированными пучками ионов или электронов, позволяющее создать дефекты локально. В работе [3] было показано, что локальное облучение сфокусированным пучком ионов гелия подавляет люминесценцию и делает возможным наблюдение отдельных точечных источников.

Ранее нами было показано, что облучение пучком ионов гелия приводило как к уменьшению интенсивности полос катодолуминесценции (КЛ) 4 и 5,8 эВ, так и к возрастанию интенсивности полосы 2 эВ в интервале относительно небольших доз [4]. Настоящая работа посвящена более детальному изучению влияния облучения ионами гелия и электронами на катодолуминесценцию hBN.

Методика эксперимента

В работе исследовались тонкие кристаллы hBN, полученные методом отслаивания от монокристалла и перенесенные на подложку нитрида кремния на кремнии. Исследование методом катодолуминесценции проводилось в диапазоне длин волн 200–700 нм на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Zeiss SUPRA 40VP с системой регистрации Gatan Mono CL3+. Облучение образца сфокусированным пучком ионов гелия проводилось с помощью гелиевого ионного микроскопа Zeiss Orion Plus. Квадратные области со стороной 7 мкм были облучены с дозой 10^{14} см⁻² и энергией 30 кэВ.

Результаты и обсуждение

Спектры КЛ, полученные с образца, не облученного ионами гелия, и с одного из облученных участков, приведены на рис. 1. В спектрах необлученного hBN, помимо полосы межзонного излучения 215 нм (5,8 эВ), наблюдаются характерные полосы с максимумами около 320 нм (3,9 эВ) и 640 нм (1,9 эВ). В результате облучения ионами гелия интенсивность всех полос КЛ уменьшается примерно на два порядка. В процессе регистрации спектров КЛ было замечено изменение интенсивности полосы 1,9 эВ со временем, интенсивность полос 3,9 эВ и 5,8 эВ оставалась неизменной.

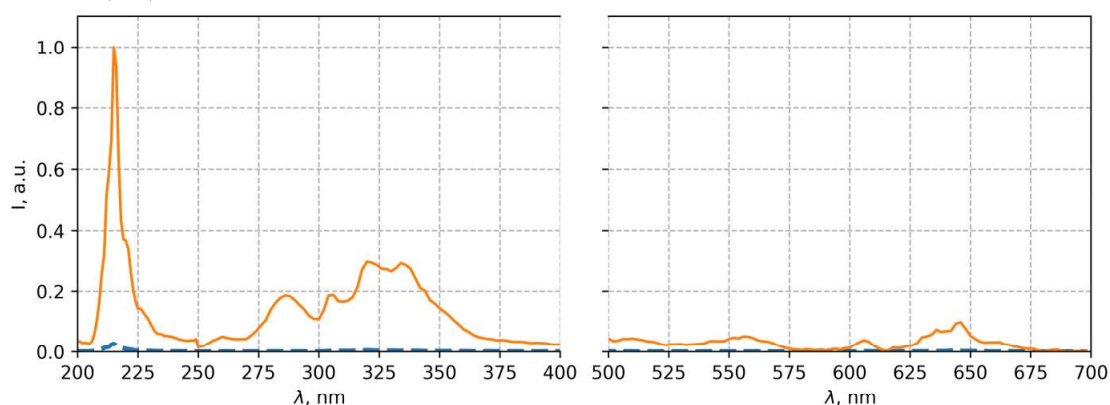


Рис. 1. Спектр КЛ необлученной ионами области (сплошная линия) и спектр КЛ области, облученной с дозой 10^{14} см⁻² (пунктирная линия)

Зависимость интенсивности полосы 1,9 эВ от времени при плотности потока облучения электронами $6,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ представлена на рис. 2. Интенсивность полосы КЛ 1,9 эВ возрастает со временем облучения электронами с постоянной времени 1,4 с и при больших временах превышает интенсивность той же полосы в необлученном ионами образце. Таким образом, можно утверждать, что комбинация ионного и последующего электронного облучения позволяет увеличить интенсивность полосы КЛ 1,9 эВ.

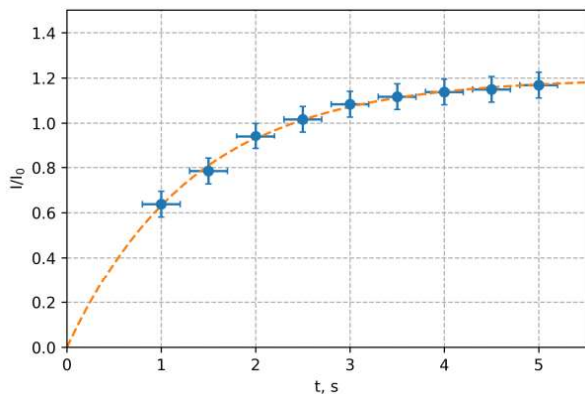


Рис. 2. Зависимость интенсивности полосы 1,9 эВ в облученной ионами гелия области от времени облучения электронами, нормированная на интенсивность в необлученной области

Уменьшение интенсивности полос КЛ свидетельствует об образовании в результате облучения ионами гелия центров рекомбинации, которые приводят к уменьшению времени жизни и концентрации неравновесных носителей заряда. Увеличение интенсивности полосы 1,9 эВ можно объяснить только значительным увеличением концентрации соответствующих дефектов, которая оказывается достаточной для

компенсации уменьшения концентрации неравновесных носителей заряда. Наиболее подходящим кандидатом на роль центра люминесценции 1,9 эВ является комплекс, состоящий из вакансии азота и антиструктурного дефекта — азота, находящегося на месте бора (V_N-N_B) [3].

Таким образом, можно предположить, что дефекты, образующиеся в процессе облучения ионами, играют роль центров безызлучательной рекомбинации. Рекомбинация неравновесных носителей заряда в процессе последующего облучения электронами стимулирует образование других дефектов (например, V_N-N_B), являющихся центрами люминесценции, с энергией перехода около 1,9 эВ.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования Междисциплинарного ресурсного центра по направлению «Нанотехнологии» Научного парка СПбГУ.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-22-00067, <https://rscf.ru/project/23-22-00067/>.

Литература

1. R. Bourrellier, S. Meuret, A. Tararan, *et al.* // *Nano Lett.*, **16**, 4317 (2016).
2. S. Castelletto, F. A. Inam, S. Sato *et al.* // *Beilstein J. Nanotechnol.*, **11**, 740 (2020).
3. G. Grosso, H. Moon, B. Lienhard, *et al.* // *Nature Comm.*, **8**, 705 (2017).
4. Ю. В. Петров, О. А. Гогина, О. Ф. Вывенко, *et al.* // *ЖТФ*, **92**(8), 1166 (2022).