



Российская Академия Наук

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Труды XXVIII
Международного симпозиума

11–15 марта 2024 года

Том 2

Нижний Новгород
2024

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Труды XXVIII Международного симпозиума

11–15 марта 2024 г., Нижний Новгород

Том 2

Секция 3

Полупроводниковые наноструктуры: электронные, оптические свойства, методы формирования

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

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

Н-25 Нанофизика и нанoeлектроника. Труды XXVIII Международного симпозиума (Нижний Новгород, 11–15 марта 2024 г.).
В 2 томах. Том 2-й. — Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2024. — 492 с.
ISBN 978-5-8048-0124-4

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»

Программный комитет

А. В. Акимов, к.ф.-м.н.	РКЦ, ФИАН им. П. Н. Лебедева РАН, Москва
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
С. В. Гапонов, академик РАН	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
З. Ф. Красильник, чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Нижний Новгород, председатель
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. Миляев, д.ф.-м.н.	ИФМ УрО РАН им. М. Н. Михеева, Екатеринбург
В. Л. Миронов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
С. В. Морозов, 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
<u>Н. Н. Салашенко</u> , 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
Д. А. Татарский, к.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород, учёный секретарь
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

А. В. Новиков	ИФМ РАН, Нижний Новгород, председатель
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 978-5-8048-0124-4

ББК 22.37я431
32.844.2я431

© ИПФ РАН, 2024
© ИФМ РАН, 2024

Люминесценция гексагонального нитрида бора и влияние на нее электронного и ионного облучения

Ю. В. Петров^{1,*}, О. Ф. Вывенко¹, О. А. Гогина¹, С. Ковальчук², К. Болотин²

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

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

*y.petrov@spbu.ru,

Интерес к центрам люминесценции в широкозонных полупроводниках, и в частности в гексагональном нитриде бора, связан с возможностью использования таких центров люминесценции в качестве источников одиночных фотонов. В данной работе исследовано влияние локального облучения сфокусированным пучком ионов гелия и электронным пучком на люминесценцию гексагонального нитрида бора. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света показано, что в результате облучения ионами гелия возможно образование включений кубической фазы нитрида бора. Показано, что интенсивность катодолюминесценции в области от 3,5 до 4,5 эВ растет в процессе облучения электронами, а в некоторых образцах и при облучении ионами гелия с небольшими дозами.

Введение

Исследование люминесценции гексагонального нитрида бора (h-BN) вызывает в последние годы повышенный интерес, поскольку точечные дефекты в данном материале рассматриваются как потенциальные кандидаты на роль источников одиночных фотонов. В качестве таких источников первыми были предложены центры люминесценции с положениями максимумов полос около 4 эВ [1] и около 2 эВ [2]. В случае полосы с максимумом около 4 эВ центрами люминесценции вероятнее всего являются точечные дефекты, связанные с присутствием примеси углерода [3], природа центров люминесценции в области 2 эВ до сих пор остается под вопросом, поскольку существует большое количество разнообразных моделей от комплексов из вакансии азота с антиструктурным дефектом [4] до органических молекул, захваченных между слоем нитрида бора и подложкой [5]. С точки зрения будущего применения центров люминесценции в нитриде бора в качестве однофотонных источников необходимо разработать методы их локального формирования, и в качестве такого метода может быть использовано облучение ускоренными заряженными частицами. Облучение ионами гелия с последующим отжигом рассматривалось в качестве метода создания отдельных точечных источников в работе [4]. Ранее нами было показано, что облучение пучком ионов гелия приводит к уменьшению интенсивности всех полос катодолюминесценции в образцах h-BN, полученных при высоком давлении, а последующее облучение таких образцов электронами позволяет восстановить и даже усилить люминесценцию в области 2 эВ [6]. Настоящая работа посвящена более детальному изучению влияния облучения ионами гелия и электронами на катодолюминесценцию гексагонального нитрида бора, полученного по различным технологиям.

Методика эксперимента

В работе исследовались тонкие кристаллы гексагонального нитрида бора, полученные методом отслаивания от монокристаллов, полученных по различным технологиям, а именно, ростом из бариевого расплава при высоком давлении (образец 1) и методом газотранспортной реакции (образец 2), которые были перенесены на подложку нитрида кремния на

кремнии. Толщина образцов контролировалась с помощью атомно-силовой микроскопии и составляла от 10 до 200 нм. Спектральные распределения катодолюминесценции (КЛ) в диапазоне длин волн 200–700 нм были получены при возбуждении электронами с энергией 5 кэВ в сканирующем электронном микроскопе Zeiss SUPRA 40VP с системой регистрации Gatan Mono CL3+. Помимо спектральных распределений были получены карты катодолюминесценции и зависимости интенсивности катодолюминесценции от времени облучения электронами с энергиями в диапазоне 5–20 кэВ. Облучение образца сфокусированным пучком ионов гелия проводилось с помощью гелиевого ионного микроскопа Zeiss Orion Plus с энергиями от 15 до 35 кэВ и дозами от 10^{14} см⁻² до 10^{17} см⁻². Дополнительно проводились исследования облученных ионами гелия образцов методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) с использованием спектрометра Bruker Senterra.

Результаты

В спектрах катодолюминесценции образца 1 до облучения ионами и электронами наблюдались полосы межзонного излучения 215 нм (5,8 эВ), а также менее интенсивные полосы с максимумами около 320 нм (3,9 эВ) и 640 нм (1,9 эВ). Картирование катодолюминесценции на длине волны 320 нм позволило обнаружить в тонком участке образца отдельные локальные центры свечения. Детальное исследование показывает, что полоса 320 нм разбивается на серию полос, включающих бесфонную линию 4,08 эВ и серию фоновых повторений с энергией фона 188 мэВ. В спектрах катодолюминесценции образца 2 обнаружены те же спектральные полосы, а также полосы с максимумами около 450 нм (2,8 эВ) и 560 нм (2,2 эВ). Необходимо отметить, что в спектрах КЛ образца 2 в области 4 эВ, помимо полосы 4,08 эВ и соответствующих фоновых повторений, наблюдаются широкие полосы с максимумами около 3,5 эВ, 4,1 эВ и 4,7 эВ.

После облучения ионами гелия в образце 1 наблюдается уменьшение интенсивности всех полос катодолюминесценции. В образце 2 наблюдается небольшое увеличение интенсивности полос в области 320 нм при дозах менее $5 \cdot 10^{14}$ см⁻², а при дальнейшем увеличении дозы облучения наблюдается уменьшение

их интенсивности. При этом интенсивность остальных полос КЛ уменьшается при облучении ионами.

При длительном облучении электронами образца 2 происходит быстрое уменьшение интенсивности полосы зона-зонного излучения 215 нм и медленное увеличение интенсивности полос в коротковолновой области, соответствующей энергиям от 3,5 до 4,5 эВ. При этом скорость возрастания интенсивности КЛ в коротковолновой области увеличивается при увеличении плотности тока электронов и уменьшается при увеличении энергии электронов. Вероятнее всего, наблюдаемое увеличение интенсивности КЛ связано с увеличением концентрации соответствующих центров люминесценции за счет диффузии примесей, усиленной электронным облучением. Численное моделирование взаимодействия электронов с образцами показывает, что при увеличении энергии электроны пролетают сквозь образцы нитрида бора в подложку, при этом суммарные потери энергии электрона в слое h-BN уменьшаются, что и приводит к замедлению роста интенсивности КЛ.

В спектрах комбинационного рассеяния исходных образцов наблюдается характерный для h-BN пик с максимумом около 1366 см^{-1} . Спектры комбинационного рассеяния, полученные с образцов, облученных ионами гелия с разными дозами, приведены на рис. 1. Как можно видеть на рисунке, при увеличении дозы облучения ионами гелия происходит уменьшение интенсивности основного пика с максимумом около 1366 см^{-1} и его уширение. При этом для доз порядка 10^{15} см^{-2} и более появляется дополнительный широкий пик с максимумом около 1300 см^{-1} , который, согласно литературным данным, соответствует кубическому нитриду бора [7]. Можно заметить, что интенсивность этого широкого пика максимальна при дозе облучения порядка $5 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$, а при больших дозах облучения уменьшается.

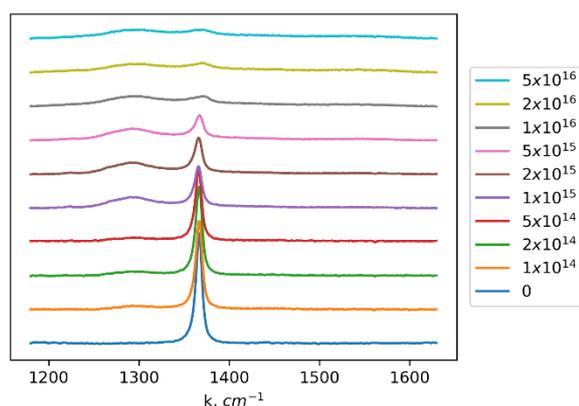


Рис. 1. Спектры КРС образца 1, облученного ионами гелия с различными дозами

В спектрах КРС, полученных с образца 2, облученного ионами гелия, также наблюдается появление новой полосы, соответствующей кубическому нитриду бора, интенсивность которой возрастает при

увеличении дозы ионного облучения. Таким образом, на основании полученных данных можно предположить, что при облучении ионами гелия в гексагональном нитриде бора происходит образование включений кубической фазы.

Выводы

Показано, что облучение ионами и электронами приводит к изменению интенсивности полос люминесценции гексагонального нитрида бора, что в дальнейшем может быть использовано для локального управления концентрацией центров люминесценции. Образцы, полученные методом газотранспортной реакции, более чувствительны к облучению электронами, чем образцы, полученные при высоком давлении, а в их спектре содержится больше различных полос люминесценции при меньшей интенсивности межзонной люминесценции, что свидетельствует о большей концентрации различных дефектов.

Анализ спектров комбинационного рассеяния позволяет предположить образование включений кубического нитрида бора в результате облучения ионами гелия, однако для подтверждения этой гипотезы необходимо проведение дополнительных исследований.

Финансирование

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

Благодарности

Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования Междисциплинарного ресурсного центра по направлению «Нанотехнологии» и ресурсного центра «Оптические и лазерные методы исследования вещества» Научного парка СПбГУ. Авторы благодарны К. Ватанабе и Т. Танигучи за предоставленный образец гексагонального нитрида бора, а также Е. В. Борисову за помощь с проведением измерений методом спектроскопии комбинационного рассеяния света.

Литература

1. R. Bourrellier, S. Meuret, A. Tararan, et al. // *Nano Lett.* 2016. V. 16. P. 4317–4321.
2. S. Castelletto, F. A. Inam, S. Sato, et al. // *Beilstein J. Nanotechnol.* 2020. V. 11. P. 740–769.
3. A. Vokhmintsev, I. Weinstein, D. Zamyatin // *J. Luminesc.* 2019. V. 208. P. 363–370.
4. G. Grosso, H. Moon, B. Lienhard, et al. // *Nature Comm.* 2017. V. 8. P. 705.
5. M. Neumann, X. Wei, L. Morales-Inostroza, et al. // *ACS Nano.* 2023. V. 17. P. 11679–11691.
6. Ю. В. Петров, О. А. Гогина, О. Ф. Вывенко и др. // *ЖТФ.* 2023. Т. 93. С. 921–927.
7. E. Aradi, S. R. Naidoo, F. Cummings, et al. // *Diamond Rel. Mat.* 2018. V. 92. P. 168–173.