

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

14-86-411

**В.С.Вариченко*, А.Ю.Дидык, А.М.Зайцев*,
В.И.Кузнецов, В.А.Скуратов, В.Ф.Стельмах*,
В.Д.Шестаков**

ВЛИЯНИЕ

**ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ
НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА АЛМАЗА**

* Белорусский государственный университет
им. В.И.Ленина

1986

1. ВВЕДЕНИЕ

Образование радиационных дефектов и распределение примесных атомов в кристаллах, облученных тяжелыми ионами с энергиями выше $0,1$ МэВ/а.е.м., значительно отличается от аналогичных процессов, происходящих при традиционной ионной имплантации /энергии ионов десятки и сотни кэВ/а.е.м./ . Основные отличия заключаются в следующем: в глубоком проникновении ионов, когда выполняется условие $R_p \gg \Delta R_p$ (R_p – средний проективный пробег, а ΔR_p – среднее квадратичное отклонение величины R_p); в доминирующей роли неупругого электронного торможения в процессах дефектообразования и формировании специфических протяженных дефектных областей – треков; в протекании ядерных реакций при энергиях ионов, превышающих кулоновский барьер ядер решетки; в возникновении значительных статистических давлений в облучаемой области за счет воздействия окружающей твердотельной матрицы /1-3/. Отмеченные эффекты определяют специфику формирования дефектно-примесной структуры слоя, облученного тяжелыми ионами. В настоящее время имеется весьма ограниченное количество работ, например /4,5/, посвященных изучению особенностей высокоэнергетической ионной имплантации, в связи с чем проведение таких исследований представляется актуальным.

Одним из модельных кристаллов, перспективных для изучения образования в них дефектов, является кристалл алмаза, характеризующийся наибольшей величиной межатомных ковалентных связей, устойчивой дефектной структурой и отсутствием сколько-нибудь заметной атомной диффузии. Выделенные особенности делают кристаллы алмаза уникальными при исследовании процессов первичного дефектообразования в сильно неоднородных системах – ионно-имплантированных слоях.

Настоящая работа посвящена исследованию оптических характеристик кристалла алмаза, облученного тяжелыми ионами высоких энергий, а также изучению влияния возникающих при этом статических давлений на оптически активные центры.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА. РЕЗУЛЬТАТЫ

Образцы природного алмаза типа IIa с исходным содержанием азота не более 10^{15} см⁻³ облучались ионами углерода с энергией 82 МэВ /дозами 10^{14} – $1,2 \cdot 10^{16}$ см⁻²/ на циклотроне У-300 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Дефектная структура образцов ис-

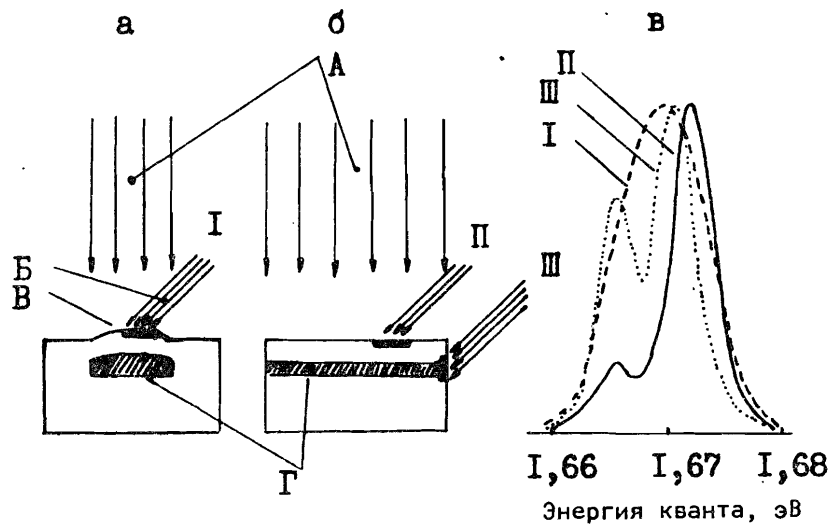


Рис. 1. Схема возбуждения КЛ и облучения ионами: а/ центральной части образца; б/ всей поверхности образца; А- бомбардирующие ионы, Б - электронный пучок, В - области кристалла, возбуждаемые в КЛ, Г - ионно-имплантированные слои; в/ спектры бесфононных линий центра GR1, зарегистрированного в областях I, II, III.

следовалась методами катодолюминесценции /КЛ, энергия возбуждающих электронов до 15 кэВ/ и фотолюминесценции /ФЛ, длина волны возбуждающего света 0,53 мкм/ при температуре 80 К. После имплантационный отжиг проводился в вакууме $\sim 10^{-4}$ Па в течение часа при температурах до 1000°C. Профили пространственного распределения интенсивности центров люминесценции получены методом послойного ионного травления. На рис.1 а,б представлены схемы ионного облучения и возбуждения КЛ исследуемых образцов.

Спектры КЛ и ФЛ, полученные на разных стадиях облучения и отжига образцов, приведены на рис.2. Широкая полоса с максимумом в области 440 нм, наблюдающаяся в спектрах КЛ исходных образцов /рис.2а/, обусловлена дефектами нерадиационного происхождения и, вероятнее всего, дислокациями^{18/}. После имплантации /рис.2б/ в спектрах КЛ возникают электронно-колебательные системы полос хорошо известных центров GR1 /нейтральная вакансия^{17/} /, TR12 /предположительно двойная пара френкеля^{18/} /, 3Н /природа дефекта в настоящее время однозначно не установлена^{19/} / с бесфононными линиями 741, 470 и 503,5 нм соответственно. В спектрах ФЛ присутствуют только линии центра GR1 /рис.2в/.

Отжиг при температуре 700°C /рис.3/ приводит к исчезновению центров GR1, TR12, 3Н и появлению ряда узких линий в области

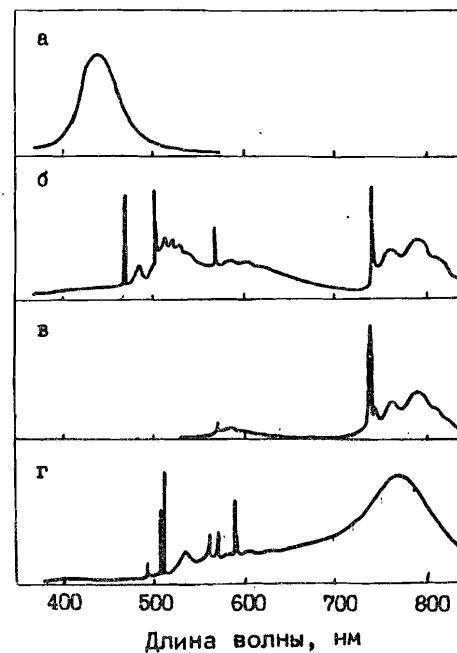
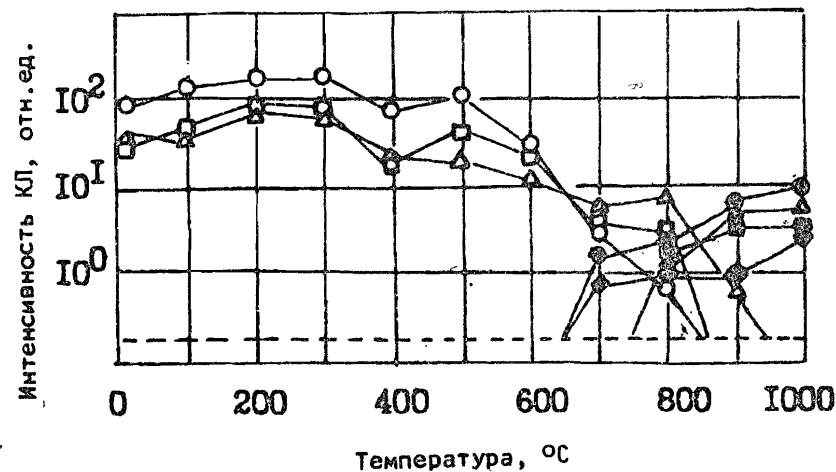


Рис.2. Спектры люминесценции алмазов типа IIa: а/ КЛ, до имплантации; б/ КЛ, после имплантации; в/ ФЛ, после имплантации; г/ КЛ, после имплантации и отжига при температуре 1000°C.

Рис.3. Зависимость интенсивности радиационных центров в имплантированном алмазе от температуры отжига: ○ - GR1, □ - TR12, Δ - 3Н, ▲ - 510,5 нм, ● - 513,2 нм, ◆ - 563 нм, ■ - 591,8 нм. Штриховая линия указывает уровень чувствительности установки КЛ.



500±600 нм, среди которых доминируют линии 509; 511,5; 563 и 590 нм /рис.2г/. На основании анализа экспериментальных результатов работы^{18/}, в которой исследовались алмазы, облученные

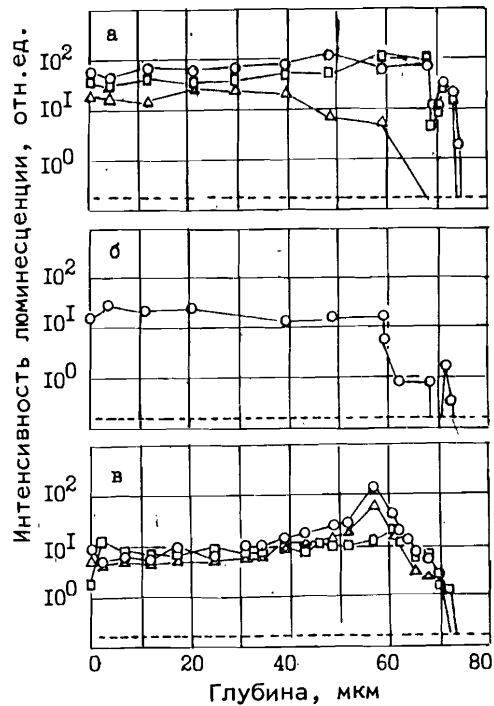


Рис.4. Распределение интенсивности радиационных центров по глубине облученного слоя: а/ КЛ, ○ – GR1, □ – TR12, △ – 3Н; б/ ФЛ, ○ – GR1; в/ КЛ, температура отжига 1000°C, △ – 510,5 нм, ○ – 513,2 нм, □ – 591,8 нм. Штриховая линия указывает уровень чувствительности установки КЛ.

ионами C^+ с энергией 350 кэВ, и данных настоящего исследования можно предположить, что наблюдаемые центры соответствуют собственным междуузельным дефектам. Отличительной особенностью спектров люминесценции алмазов типа IIa, имплантированных ионами углерода с энергией, превышающей кулоновский барьер ядерной реакции $C^{12} + C^{12}$, является появление хорошо известного центра с бесфононной линией 575 нм, обусловленного азото-содержащим дефектом ^{9/}.

На рис.4 представлены профили распределения интенсивности отмеченных выше центров по глубине облученного слоя. Аналогично случаю высокоэнергетической имплантации ионами азота ^{3/} пространственное распределение центров GR1 и TR12 однородно по всей глубине имплантированного слоя, в то время как центры 3Н появляются преимущественно в облученной, но не легированной области, то есть не в области остановки ионов. По-видимому, наблюдаемое различие связано с тем, что центры 3Н по сравнению с центрами GR1 и TR12 более эффективно рекомбинируют с междуузельными атомами, концентрация которых в слое остановки ионов, характеризуемом доминированием упругого механизма дефектообразования, значительно выше.

Профиль распределения центра GR1, регистрируемого в ФЛ, обнаруживает поведение, аналогичное случаю КЛ, за исключением полного исчезновения излучения этого центра в слое 68÷70 мкм от поверхности. Эта особенность объясняется, вероятно, значительным уменьшением времени жизни неравновесных носителей заряда в указанной области кристалла из-за сильного дефектообразования /область остановки ионов/, что ведет, соответственно, к падению

интенсивности излучательной рекомбинации в условиях малого уровня возбуждения, имеющего место в случае ФЛ /в отличие от КЛ/.

Распределение по глубине междуузельных центров /рис.4в/, характеризуемых бесфононными линиями 509; 511,5 и 590 нм, имеет ярко выраженный максимум, расположенный на глубине 56±61 мкм. Наличие этого максимума подтверждает междуузельную природу соответствующих дефектов и объясняется увеличением на указанной глубине концентрации междуузельных атомов углерода, введенных имплантацией. Смещение по сравнению с расчетным максимума профиля распределения междуузельных центров к поверхности /72 мкм ^{10/} обусловлено, по-видимому, диффузией имплантированных атомов, стимулированной радиационными дефектами ^{11/}. Аналогичное перемещение примесных атомов наблюдалось в экспериментах по высокоэнергетической имплантации азота в алмаз ^{1/}.

В спектрах люминесценции облученных областей было обнаружено искажение спектральной формы бесфононных линий /БФЛ/ выше описанных радиационных центров GR1, TR12 и 3Н, которое можно объяснить упругими неоднородными деформациями в изучаемой области кристалла, что может служить индикатором развивающихся там механических напряжений. На рис.1в сравниваются формы БФЛ центра GR1, регистрируемые от разных частей облученных образцов. Линия излучения с поверхности образца, облученного по всей площади /рис.1б, II/, практически совпадает по форме с БФЛ неискаженных центров GR1, введенных в алмаз, например, электронами ^{12/}, что позволяет сделать вывод об отсутствии заметных напряжений в приповерхностных слоях таких образцов. БФЛ центра GR1, возбуждаемого с боковой грани этого образца /рис.1б, III/, имеет меньшее расщепление между своими компонентами, что указывает на изменение ян-теллеровского искажения нейтральных вакансий в поле упругих напряжений, возникающих в заглубленных имплантированных слоях. Полоса GR1, регистрируемая с поверхности локально облученного образца /рис.1а, I/, сильно уширена и сдвинута в длинноволновую область. Анализ спектрального искажения БФЛ центра GR1 в соответствии с результатами работы ^{12/} позволяет предположить развитие анизотропных напряжений в плоскости <110> в области I до значения 0,5 ГПа.

Представленное на рис.5 изменение ширины основной БФЛ центра GR1 при отжиге образца можно объяснить повышением упругих напряжений в имплантированном слое при температурах ~ 300°C из-за вероятной активации движения собственных междуузельных атомов при этой температуре ^{6/} и частичного восстановления межатомных связей в облученном слое.

Зависимость спектральной ширины БФЛ радиационных центров от дозы облучения имеет пороговый характер /рис.6/ с критической дозой в области $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Возможное объяснение этого факта заключается в том, что при дозе ~ $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ начинают перекрываться создаваемые ионами дефектные области, что приводит к сильному росту механических напряжений.

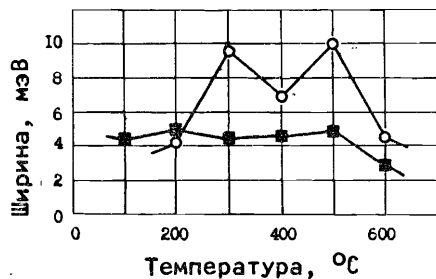


Рис. 5. Зависимость от температуры отжига спектральной ширины главного компонента ВФЛ центра GR1 /1,673 эВ/, возбуждаемого в области II - ■ и III - O, см.рис.16.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

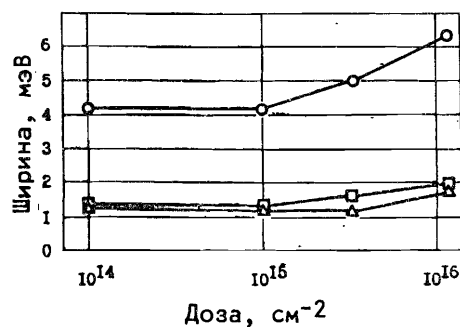
В данной работе показано, что высокоэнергетическая ионная имплантация в алмазе приводит к образованию радиационных дефектов с различной по глубине облученного слоя структурой, а также возникновению анизотропного перераспределения примесных атомов, стимулированного радиационными дефектами. Кроме того, в слое, облученном тяжелыми ионами, развиваются значительные анизотропные механические напряжения, величина которых может существенно различаться по глубине.

В заключение авторы выражают благодарность академику Г.Н.Флерову за постановку задачи, профессору Ю.Ц.Оганесяну и В.А.Щеголеву за внимание к работе и полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вариченко В.С. и др. В кн.: Тезисы докладов XV Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Изд.МГУ, М., 1985, с.153.
2. Fahnner W.R. et al. *phys.stat.sol.(a)*, 1982, vol.70, p.463.
3. Вариченко В.С. и др. В кн.: Материалы VII Всесоюзной конференции "Взаимодействие атомных частиц с твердым телом". Изд.БГУ, Минск, 1984, ч.III, с.5.
4. Ziegler J.F. *Nucl.Instrum.and Meth.*, 1985, vol.86, p.270.
5. Byrne P.F. *J.Appl.Phys.*, 1983, vol.54, p.1146.
6. Соболев Е.В. Тверже алмаза. "Наука", Новосибирск, 1984.

Рис. 6. Дозовая зависимость спектральной ширины ВФЛ радиационных центров, возбуждаемых в области II /см.рис.16/: O - GR1, □ - TR12, Δ - 3H.



7. Field J.E. *The Properties of Diamond*. Academic Press, London-New York, 1979.
8. Гиппиус А.А. и др. ФТП, 1982, 16, с.404.
9. Зайцев А.М. и др. ФТП, 1982, 16, с.397.
10. Hubert F. et al. *Supplement aux Annales de Physique*, 1980, No.5, p.19.
11. Физические процессы в облученных полупроводниках /под ред. Смирнова Л.С./ "Наука", Новосибирск, 1977.
12. Clark C.D. et al. *Proc.R.Soc., London*, 1973, vol.A334, p.241.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 июня 1986 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
D1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергии. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
D17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к.
D10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
D11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.
D13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна 1985.	4 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Вариченко В.С. и др.

14-86-411

Влияние высокоэнергетического ионного облучения на люминесцентные свойства алмаза

Методом люминесценции исследовано влияние высокоэнергетического ионного облучения на образование радиационных дефектов в алмазах. Показано, что распределение дефектов по глубине облученного слоя определяется их структурой и возникновением анизотропного перераспределения примесных атомов, стимулированного радиационными дефектами. Кроме того, в облученном слое кристалла развиваются значительные анизотропные механические напряжения.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Varichenko V.S. et al.

14-86-411

Influence of High Energy Ion Irradiation on the Luminescence Diamond Properties

High energy ion irradiations influence on formation damage in diamonds are investigated by using luminescence method. It is shown that the depth distribution of defects is determined by their structure and by arising of anisotropic redistribution of impurities atoms, which stimulated the radiation damage. Anisotropic mechanical strains are developed in the irradiated crystal.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986