

10. Influence of Magnetic Field on Critical Stress and Mobility of Dislocations in Silicon / M. V. Badylevich [et al.] // Solid State Phenomena. – 2004. – V. 95-96. – P. 433–438.
11. Effect of magnetic field on dislocation-oxygen impurity interaction in silicon / I. Yonenaga, K. Takahashi // J. Appl. Phys. – 2007. – V.101. – P. 053528

## ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ДЕФЕКТЫ В ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ КСЕНОНА АЛМАЗАХ И ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДО И ПОСЛЕ ОТЖИГА

Н. М. Казючиц<sup>1</sup>, В. Н. Казючиц<sup>1</sup>, О. В. Королик<sup>1</sup>, М. С. Русецкий<sup>1</sup>,  
Н. С. Кирилкин<sup>2</sup>, В. А. Скуратов<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,  
e-mail: Kazuchits@bsu.by*

<sup>2)</sup> *Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри 6, 141980 Дубна, Россия  
e-mail: Skuratov@jinr.ru*

Распределения интенсивности центров комбинационного рассеяния света (КРС) и фотолюминесценции (ФЛ) были измерены в алмазе, имплантированном ионами Хе с энергией 167 МэВ. До отжига интенсивность наведенных облучением центров ФЛ уменьшалась вдоль траектории ионов Хе до проективного пробега ( $R_p$ ). После отжига центры ФЛ распространились глубже  $3R_p$ . Глубокие «хвосты» распределения центров ФЛ были следствием пластической деформации алмаза в течение отжига. Пластическая деформация алмаза при отжиге также ускоряла агрегацию азота. Используя возбуждение с длиной волны 875 нм, ФЛ связанного с Хе центра при 813 нм была обнаружена в окрестности  $R_p$ . Из распределения интенсивности центра 813 нм был измерен  $R_p$  ионов Хе с энергией 167 МэВ в алмазе, который составил 9.5 мкм. Это значение приблизительно на 1 мкм меньше рассчитанного методом Монте-Карло.

**Ключевые слова:** алмаз; ионная имплантация; комбинационное рассеяние света; радиационные дефекты; отжиг.

## OPTICALLY ACTIVE DEFECTS IN DIAMONDS IRRADIATED WITH XENON IONS AND THEIR DISTRIBUTION BEFORE AND AFTER ANNEALING

N. M. Kazuchits<sup>1</sup>, V. N. Kazuchits<sup>1</sup>, O. V. Korolik<sup>1</sup>, M. S. Rusetsky<sup>1</sup>,  
N. S. Kirilkin<sup>2</sup>, V. A. Skuratov<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> *Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus,*

<sup>2)</sup> *Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Russia  
Corresponding author: N. M. Kazuchits (Kazuchits@bsu.by)*

Depth profiles of intensities of Raman scattering (RS) and the photoluminescence (PL) signals have been measured in diamond implanted with 167 MeV Xe ions. Before annealing, the intensity of the irradiation-induced PL centers decreased along the path of the Xe ions up to ion projected range  $R_p$ . After annealing, PL centers were found at a depth more than  $3R_p$ . Such deep tails of PL centers was a consequence of annealing-induced plastic deformation in diamond. In addition, plastic deformation of the diamond during annealing was also an accelerator of nitrogen aggregation. Using excitation with a wavelength 875 nm,

the Xe related PL center 813 nm was detected near Rp. The 167 MeV Xe ion projected range deduced from the 813 nm center intensity profile was found to be equal 9.5  $\mu\text{m}$ . This value is approximately 1  $\mu\text{m}$  less than that calculated by the Monte Carlo method.

**Key words:** diamond; ion implantation; Raman scattering; radiation-induced defects; annealing.

## ВВЕДЕНИЕ

Имплантированные с энергией около 1 МэВ/нуклон ионы локализованы в узком слое мишени на глубине порядка 10 мкм. Индуцированные при этом структурные нарушения кристалла неоднородно распределены в облученном слое. Для исследования распределения примесей/дефектов в облученных высокоэнергетическими ионами алмазах необходимы информативные и чувствительные методы с высоким пространственным разрешением, такие, например, как КРС и ФЛ. Характеристики центров КРС очень чувствительны к структурным нарушениям алмаза, а достигнутое при облучении состояние аморфизации легко детектируется в КРС по образованию графитовой фазы. Сопровождающая КРС фотолюминесценция позволяет различать отдельные примесные и дефектные центры в алмазе, что удобно при регистрации профилей распределения примесей/дефектов в облученных ионами слоях.

Цель работы – исследование распределения примесей/дефектов в алмазах, облученных ионами Хе с энергией 167 МэВ, до и после отжига.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперименты были выполнены на пластинах синтетического алмаза типа Ib, выращенного методом высоких давлений и высоких температур в ООО «АдамасИнвест» [1]. Облучение ионами Хе флюенсом  $F = 6.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  проводили на ускорителе ИЦ-100 [2] в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, г. Дубна. Температура образцов при облучении не превышала 30 °С. Спектры КРС/ФЛ регистрировали по схеме обратного рассеяния микрорамановским спектрометром Nanofinder High End (LOTIS TII Tokyo Instruments), совмещенным с 3D сканирующим конфокальным микроскопом. Распределение интенсивности КРС/ФЛ до и после отжига при температуре  $T=1450 \text{ °C}$  в вакууме исследовали на полированных поперечных сечениях алмазных пластин. Для возбуждения КРС/ФЛ использовали лазеры с длиной волны излучения 355 нм, 532 нм и 785 нм. Диаметр сфокусированного на поверхности образца лазерного излучения составлял около 1 мкм. Измерения проводили при комнатной температуре.

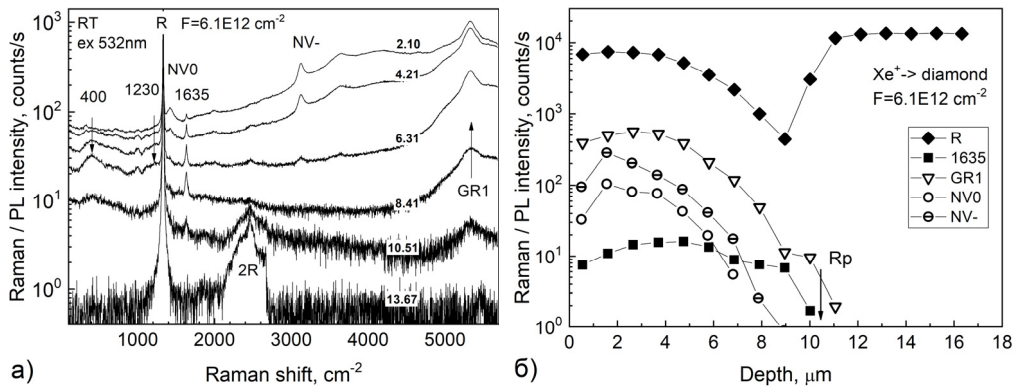
Расчеты потерь энергии ионов Хе при торможении в алмазной матрице, распределения вакансий углерода и внедренной примеси были выполнены методом Монте-Карло с использованием программы TRIM-2000. Рассчитанный средний пробег ионов Хе с энергией 167 МэВ в алмазе составлял 10.67 мкм, средний разброс пробега – 0.44 мкм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры КРС алмазных пластин до облучения ионами Хе содержали интенсивную узкую линию при  $1332 \text{ см}^{-1}$  от однофононного рассеяния света и полосу в диапазоне 2200 до  $2660 \text{ см}^{-1}$  от двухфононного рассеяния. Облучение ионами Хе вызвало уменьшение интенсивности основной линии КРС и ее уширение, привело к появлению (см. рис. 1а) узких линий ФЛ при  $3530 \text{ см}^{-1}$ ,  $3120 \text{ см}^{-1}$ ,  $1425 \text{ см}^{-1}$ , узкой

линии КРС  $1635\text{ см}^{-1}$  и широких полос КРС в окрестности  $1230\text{ см}^{-1}$  и  $400\text{ см}^{-1}$  [3]. Линия  $3530\text{ см}^{-1}$  ( $743\text{ нм}$ ) связана с вакансиями в нейтральном зарядовом состоянии – GR1-центр. Линии  $3120\text{ см}^{-1}$  ( $638\text{ нм}$ ) –  $\text{NV}^-$ -центр и  $1425\text{ см}^{-1}$  ( $575\text{ нм}$ ) –  $\text{NV}^0$ -центр связаны с отрицательно заряженным и нейтральным комплексом азот-вакансия, соответственно. Широкие полосы при  $400\text{ см}^{-1}$  и  $1230\text{ см}^{-1}$  связаны с аморфными  $\text{sp}^3$ -связанным кластерами углерода, локализованными в кристаллической матрице вдоль треков ионов, а линия при  $1635\text{ см}^{-1}$  связана [4, 5] с собственными междоузлиями алмаза.

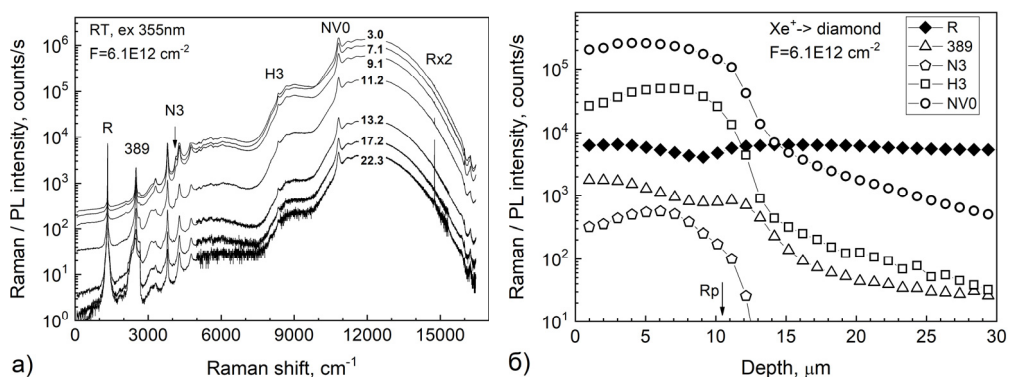
Эволюция спектров КРС/ФЛ в облученном ионами Xe слое и распределение интенсивности основных линий КРС/ФЛ с глубиной показаны на рис. 1. Видно, что интенсивность доминирующей линии КРС монотонно уменьшалась с глубиной проникновения ионов (с ростом радиационного повреждения решетки) вплоть до проективного пробега. Интенсивность широких полос КРС при  $400\text{ см}^{-1}$  и  $1230\text{ см}^{-1}$  росла от поверхности вглубь облученного слоя синхронно с ростом радиационных повреждений. Интенсивность наведенных облучением центров ФЛ (GR1,  $\text{NV}^-$ ,  $\text{NV}^0$ ) уменьшалась с ростом радиационного повреждения решетки. Очевидно, падение интенсивности ФЛ с ростом радиационного повреждения решетки (радиационное тушение) являлась следствием развития конкурирующих процессов безизлучательной рекомбинации. Линии ФЛ от комплексных дефектов  $\text{NV}^-$ ,  $\text{NV}^0$  исчезали на глубине около  $8\text{ мкм}$ , в то время как простой вакансионный центр GR1 регистрировался вплоть до пробега ионов Xe. Подобное распределение интенсивности характерно и для связанного с междоузлиями центра КРС  $1635\text{ см}^{-1}$ . Оба центра GR1 и  $1635\text{ см}^{-1}$  наблюдались в спектрах вплоть до  $10,5\text{ мкм}$  включительно. За пробегом ионов спектры КРС были такими же, как и до облучения.



**Рисунок 1.** – Эволюция спектров КРС/ФЛ (а) и распределения интенсивности КРС/ФЛ (б) в облученном ионами Xe слое до отжига,  $F = 6.1\text{E}12\text{ см}^{-2}$ , длина волны возбуждения  $532\text{ нм}$

После термического отжига облученных образцов при  $T = 1450\text{ °C}$  в вакууме ФЛ центр GR1 и широкие полосы КРС при  $400\text{ см}^{-1}$  и  $1230\text{ см}^{-1}$  отождились, выросла интенсивность  $\text{NV}^0$ -центра, появились содержащий междоузельный азот центр  $389\text{ нм}$  и состоящие из агрегатов азота и углеродной вакансии N3- и N3-центры (см. рис. 2, а). Эволюция спектров КРС/ФЛ и распределение интенсивности основных линий КРС/ФЛ с глубиной после отжига показаны на рис. 2. Как видно из рис. 2, б, после отжига интенсивность основной линии КРС восстановилась к значениям до облучения в приповерхностной облученной области и за пробегом ионов Xe.

По мере приближения к проективному пробегу интенсивность КРС уменьшалась, как это наблюдалось и до отжига. Приблизительно одинаковое колоколообразное распределение интенсивности всех центров ФЛ заметно снижалось в окрестности проективного пробега. За пробегом она монотонно уменьшалась, но не исчезала полностью даже на глубинах трехкратно превышающих пробег ионов Хе. Исключение составил N3-дефект (три атома азота и вакансии), который не распространился глубже 12 мкм вследствие существенно меньшей вероятности его образования.



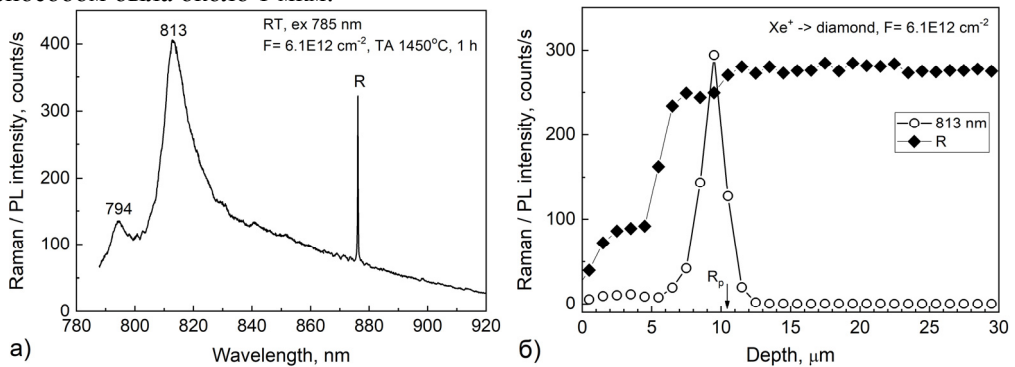
**Рисунок 2.** – Эволюция спектров (а) и распределения интенсивности центров (б) КРС/ФЛ в облученном ионами Хе алмазном слое после отжига при  $T=1450\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F = 6.1\text{E}12\text{ см}^{-2}$ , длина волны возбуждения 355 нм

Уменьшение интенсивности КРС/ФЛ в окрестности проективного пробега ионов Хе отражает не полное восстановление кристаллической решетки алмаза после отжига. Глубокие хвосты распределения интенсивности большинства центров ФЛ могут быть следствием диффузии созданных ионным облучением вакансий/междоузлий углерода и/или пластической деформации алмаза в течение отжига. Принимая во внимание, что вакансии/междоузлия радиационной природы отжигаются при температурах менее  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  [6], деформационный механизм генерации вакансий/междоузлий представляется более вероятным. В самом деле, внедрение ионов Хе на значительную глубину вызвало неоднородное расширение кристаллической решетки в облученном слое [3], которое сдерживалось неповрежденной частью пластины. На границе между облученным и неповрежденным алмазом создавалась напряженная структура. При температурах пластической деформации (для алмаза более  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  [7, 8]) напряжения релаксировали с образованием дислокаций [9], которое сопровождалось генерацией вакансий [10, 11]. Атомы азота захватывали подвижные вакансии и формировали азот-вакансионные комплексы. Этот процесс проходил синхронно с отжигом облученных ионами алмазов и становился более эффективным с повышением температуры.

Еще одним процессом, сопровождающим отжиг облученных ионами алмазов, была диффузия атомов азота с образованием его агрегатов. Индикатором агрегации азота стало образование N3- и N3-дефектов, состоящих из двух и трех атома азота и вакансии, соответственно. Как видно из рис. 2, б, интенсивность соответствующих центров ФЛ в облученном ионами слое намного превышает таковую за пределами облученного слоя. В отличие от необлученных, отжиг облученных ионами алмазов сопровождался пластической деформацией и генерацией большого количества ва-

кансий/междоузлий. Известно, что созданные предварительным электронным облучением вакансии [12] и междоузлия [13] в алмазах ускоряли агрегацию азота. По-видимому, созданные пластической деформацией вакансии/междоузлия также ускоряют агрегацию азота, что объясняет повышенную интенсивность ФЛ НЗ- и НЗ-центров в облученных слоях.

Возбуждение КРС/ФЛ излучением с длиной волны 785 нм вызывало приведенную на рис. 3, а ФЛ при 794 нм и 813 нм. Более коротковолновым светом (532 нм и 473 нм) эта ФЛ не возбуждалась. Спектральное положение линий на рис. 3, а соответствует излучательным переходам центра ФЛ, связанного с Хе [14]. Поперечное распределение интенсивности центра 813 нм, наряду с интенсивностью основной рамановской линии, приведены на рис. 3б. Измеренная из распределения интенсивности центра 813 нм глубина локализации внедренных в алмаз с энергией 167 МэВ ионов Хе составила 9.5 мкм, что приблизительно на 1 мкм меньше рассчитанной методом Монте-Карло. Точность определения глубины проникновения ионов таким способом была около 1 мкм.



**Рисунок 3.** – Спектр КРС/ФЛ в окрестности проективного пробега (а) и распределения интенсивности линий  $1332\text{ см}^{-1}$  и 813 нм (б) в облученном ионами Хе слое после отжига,  $F = 6.1E12\text{ см}^{-2}$ , возбуждение 785 нм

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распределения интенсивности сигналов КРС и ФЛ были измерены в алмазе, имплантированном ионами Хе с энергией 167 МэВ. До отжига интенсивность наведенных облучением центров ФЛ уменьшалась вдоль траектории ионов Хе до проекционного пробега  $R_p$ . После отжига центры ФЛ были обнаружены на глубине более  $3 R_p$ . Столь глубокие «хвосты» распределения центров ФЛ явились следствием пластической деформации алмаза при отжиге. Кроме того, пластическая деформация алмаза во время отжига также ускоряла агрегацию азота. Связанные с Хе центры ФЛ при 794 нм и 813 нм были обнаружены в окрестности проекционного пробега ионов Хе. Значение проективного пробега ионов Хе с энергией 167 МэВ в алмазе, полученное из профиля распределения интенсивности центра 813 нм, составило 9.5 мкм. Это значение приблизительно на 1 мкм меньше рассчитанного методом Монте-Карло.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Effect of synthesis conditions on the impurity composition of STM Almazot diamond single crystals / N.M. Kazyuchits [et al.] // *Inorganic Materials*. – 2014. – V. 50. – №. 2. – P. 130-135.
2. Ускорительный комплекс ИЦ-100 для проведения научно-прикладных исследований / Б.Н. Гикал [и др.] // *Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра*. – 2008. – Т. 5. – №. 1. – С. 59-85.
3. Raman scattering in diamond irradiated with high-energy xenon ions / N.M. Kazuchits [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2020. – V. 472. – P. 19-23.
4. Ion-implantation-induced defects in diamond and their annealing: experiment and simulation / R. Kalish [et al.] // *physica status solidi (a)*. – 1999. – V. 174. – №. 1. – P. 83-99.
5. Raman investigation of damage caused by deep ion implantation in diamond / J.O. Orwa [et al.] // *Physical Review B*. – 2000. – V. 62. – №. 9. – P. 5461.
6. Annealing of electron radiation damage in a wide range of Ib and IIa diamond samples / J.W. Steeds, S. Kohn // *Diamond and related materials*. – 2014. – V. 50. – P. 110-122.
7. Multiple slip in diamond due to a nominal contact pressure of 10 GPa at 1,000° C / C.A. Brookes, V.R. Howes, A.R. Parry // *Nature*. – 1988. – V. 332. – №. 6160. – P. 139-141.
8. Strength of diamond / D.J. Weidner, Y. Wang, M.T. Vaughan // *Science*. – 1994. – V. 266. – №. 5184. – P. 419-422.
9. A study of plastic deformation profiles of impressions in diamond / E.J. Brookes [et al.] // *Diamond and related Materials*. – 2000. – V. 9. – №. 3-6. – P. 1115-1119.
10. Photoluminescence studies of sintered diamond compacts / T. Evans, S.T. Davey, S.H. Robertson // *Journal of materials science*. – 1984. – V. 19. – №. 7. – P. 2405-2414.
11. Spectroscopic and microscopic characterizations of color lamellae in natural pink diamonds / Gaillou E. [et al.] // *Diamond and Related Materials*. – 2010. – V. 19. – №. 10. – P. 1207-1220.
12. Vacancy enhanced aggregation of nitrogen in diamond / A.T. Collins // *Journal of Physics C: Solid State Physics*. – 1980. – V. 13. – №. 14. – P. 2641.
13. Diffusion of nitrogen in diamond and the formation of A-centres / R. Jones [et al.] // *Diamond and Related Materials*. – 2015. – V. 53. – P. 35-39.
14. Photoluminescence spectra of xenon implanted natural diamonds / V.A. Martinovich [et al.] // *Journal of luminescence*. – 2003. – V. 102. – P. 785-790.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ПОЛЕВЫХ И БИПОЛЯРНЫХ СТРУКТУРАХ

С. А. Мискевич<sup>1</sup>, В. Н. Ювченко<sup>1</sup>, Ф. Ф. Комаров<sup>1</sup>, А. Ф. Комаров<sup>1</sup>, Г. М. Заяц<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Курчатова, 7, 220045 Минск, Беларусь,  
e-mail: sergei.miskevich@inbox.ru

<sup>2</sup> Институт математики НАН Беларуси, Сурганова 11, 220072 Минск, Беларусь,  
e-mail: zayats@im.bas-net.by

Разработаны физико-математические модели, программное обеспечение и управляющие программы для моделирования радиационных изменений рабочих характеристик биполярных транзисторов (БТ) и структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Проведено моделирование при облучении МДП гамма-квантами <sup>60</sup>Со 1,2 МэВ дозами до  $1,1 \cdot 10^7$  рад и БТ гамма-квантами, нейтронами и электронами. Получены зависимости порогового напряжения МДП структур, коэффициента усиления БТ от дозы облучения.