

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

INTERACTION OF RADIATION WITH SOLIDS



ВИТТ-2017

Материалы
12-й Международной
конференции
Минск, Беларусь
19—22 сентября 2017 г.

IRS-2017

Proceedings
of the 12th International
Conference
Minsk, Belarus
September 19—22, 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
БЕЛОРУССКИЙ РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

Материалы 12-й Международной конференции
Минск, Беларусь, 19—22 сентября 2017 г.

INTERACTION OF RADIATION WITH SOLIDS

Proceedings of the 12th International Conference
Minsk, Belarus, September 19—22, 2017

Минск
Издательский центр БГУ
2017

УДК 538.97- 405(06)
ББК 22.37я431
В40

Редакционная коллегия:
профессор доктор физико-математических наук
В. В. Углов (ответственный редактор);
кандидат физико-математических наук *Л. В. Баран*;
кандидат физико-математических наук *И. И. Азарко*

Взаимодействие излучений с твердым телом = Interaction of Radiation with Solids : материалы 12-й Междунар. конф., Минск, Беларусь, 19—22 сент. 2017 г. / редкол. : В. В. Углов (отв. ред.) [и др.]. — Минск : Изд. центр БГУ, 2017. — 483 с.
ISBN 978-985-553-446-5.

В сборнике приведены доклады, представленные на 12-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (19—22 сентября 2017 г., Минск) и охватывающие следующие тематики: процессы взаимодействия излучений с твердым телом, радиационные эффекты в твердом теле, пучковые методы формирования наноматериалов и наноструктур, модификация свойств материалов, влияние излучений на структуру и свойства покрытий, современное оборудование для радиационных технологий.

Адресуется научным сотрудникам и студентам естественнонаучных факультетов вузов.

УДК 538.97- 405(06)
ББК 22.37я431

ISBN 978-985-553-446-5

© БГУ, 2017
© Оформление. РУП «Издательский центр БГУ», 2017

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ НА ИНФРАКРАСНЫЕ СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ CVD-АЛМАЗОВ

А.А. Хомич^{1, 2)}, В.Г. Ральченко^{1, 3)}, О.Н. Поклонская⁴⁾, А.И. Ковалев⁴⁾, М.В. Козлова⁵⁾,
А.Ф. Попович^{1, 2)}, Р.А. Хмельницкий^{1, 6)}, Н.А. Поклонский⁴⁾, А.В. Хомич^{1, 6)}

¹⁾Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского 1, 141190 Фрязино, Россия, antares-610@yandex.ru

²⁾Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН,
ул. Вавилова 38, 117942 Москва, Россия, vg_ralchenko@mail.ru

³⁾Харбинский технологический институт, Харбин, Китай, vg_ralchenko@mail.ru

⁴⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь, poklonski@bsu.by

⁵⁾Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1, 119991 Москва, Россия, marija-kozlova@yandex.ru

⁶⁾Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН,
Ленинский пр. 53, 117924 Москва, Россия, roma@lebedev.ru

Обнаружено, что облучение быстрыми нейтронами приводит к уширению, ослаблению и длинноволновому смещению полосы двухфононного поглощения в спектрах инфракрасного (ИК) поглощения поликристаллических CVD-алмазов, усилению однофононного поглощения и повышению термостабильности алмазов. Исследованы процессы восстановления радиационно-поврежденной алмазной решетки в ходе термических отжигов в вакууме при 260-1700 °С в течение часа при каждой температуре.

Введение

Осажденный из газовой фазы (CVD) алмаз представляет фундаментальный и практический интерес как материал для использования в оптоэлектронике, а также для изготовления сенсоров, работающих в агрессивных средах, при повышенных рабочих температурах и уровнях радиации [1]. Хотя радиационная стойкость алмаза на порядок выше, чем у кремния, имеющего такую же кристаллическую структуру, но и у нее есть предел. Радиационное разупорядочение приводит к окраске и потемнению алмаза, снижению его теплопроводности и появлению электрической проводимости на постоянном токе [2]. Высокотемпературные отжиги облученных алмазов широко используются для устранения радиационных дефектов [3].

Цель работы — исследование влияния термического отжига в вакууме на микроструктуру и оптические свойства CVD-алмазных пленок (АП), облученных быстрыми нейтронами.

Результаты и их обсуждение

Измерения спектров ИК поглощения проводились спектрометром Perkin Elmer Spectrum 100 на образцах поликристаллических АП, синтезированных в СВЧ плазме из газовой фазы и облученных в ядерном реакторе ИВВ-2М [4] в потоке быстрых нейтронов интенсивностью $\sim 10^{14}$ см⁻²·с⁻¹ флюенсами $\Phi = 0.1, 0.3$ и $2.0 \cdot 10^{19}$ см⁻². Отжиг АП проводился в вакууме в графитовой печи при температурах от 260 до 1700 °С в течение 1 часа при каждой температуре.

В спектрах ИК пропускания необлученных CVD АП доминирует полоса двухфононного (1500-2670 см⁻¹) поглощения. Ввиду высокой симметрии алмазной решетки однофононное (ниже 1340 см⁻¹) поглощение электромагнитного излучения в алмазе (так же, как и в кристаллах кремния и германия) запрещено правилами отбо-

ра. Однако однофононное поглощение становится возможным при нарушении трансляционной симметрии кристаллической структуры примесными и собственными дефектами, в данном случае дефектами радиационного происхождения. В спектрах однофононного поглощения алмазов, облученных с флюенсами $1 \cdot 10^{18}$ и $3 \cdot 10^{18}$ см⁻², появляются полосы с максимумами вблизи 770, 960 и 1200 см⁻¹. После облучения нейтронами флюенсом $2 \cdot 10^{19}$ см⁻² CVD АП (толщина 480 мкм) остается относительно прозрачной только в интервале от 1400 до 2000 см⁻¹ (рис. 1, спектр 1) за счет резкого усиления поглощения в области однофононного поглощения и широкой бесструктурной полосы поглощения в более коротковолновой области.

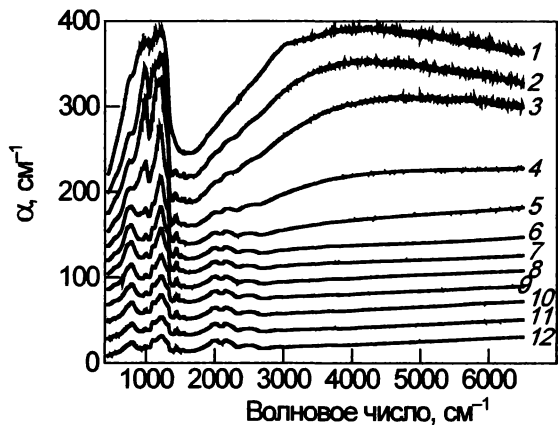


Рис. 1. Спектры ИК поглощения CVD АП, облученной быстрыми нейтронами (флюенс $2 \cdot 10^{19}$ см⁻²) после отжига при температуре, °С: 260 (1), 700 (2), 800 (3), 900 (4), 1005 (5), 1080 (6), 1150 (7), 1285 (8), 1375 (9), 1465 (10), 1520 (11) и 1555 (12) (Для наглядности спектры смещены по вертикали друг относительно друга на 20 см⁻¹)

Отжиг облученных нейтронами алмазов приводит к уменьшению уровня радиационного по-

вреждения и к общему снижению интенсивности дополнительных полос в спектрах ИК поглощения. На рис. 1 представлена трансформация при отжигах в диапазоне температур от 260 до 1555 °С спектров ИК поглощения для CVD АП, облученной быстрыми нейтронами с флюенсом $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$. По графикам Аррениуса (зависимость логарифма коэффициента поглощения ИК излучения $\lg \alpha$ от обратной температуры $1/T$) выделено три характерных интервала: а) до 900–1000 °С (температура диффузии одиночных вакансий), б) от 1000 до 1550 °С и в) от 1550 °С до температуры спонтанной графитизации поверхности алмаза (рис. 2), причем форма спектра однофононной полосы во втором и третьем интервалах изменяется незначительно (рис. 1). Показано, что все полосы на спектрах однофононного поглощения соответствуют максимумам плотности фононных состояний в кристаллической алмазной матрице.

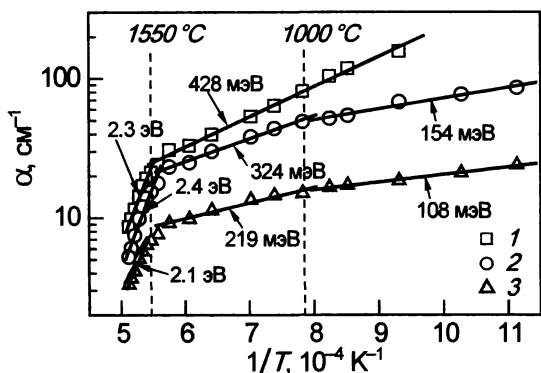


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента поглощения α на частотах 1220 см^{-1} (1), 790 см^{-1} (2) и 1436 см^{-1} (3) для образца CVD АП, облученной реакторными нейтронами с флюенсом $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Для разных температурных интервалов указаны энергии термической активации, вычисленные по наклону графиков ($\lg \alpha$ от $1/T$); $1 \text{ мэВ} = 9.65 \cdot 10^{-2} \text{ кДж/моль}$

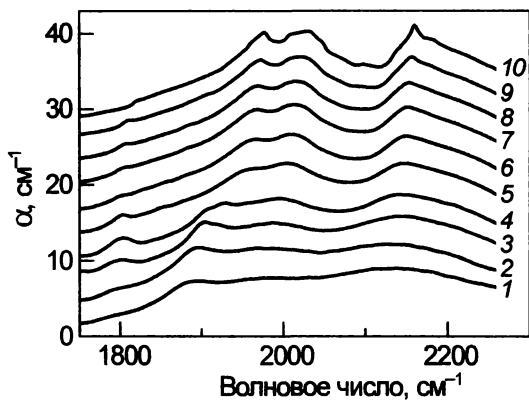


Рис. 3. Трансформация при последовательных изохронных (1 час) отжигах формы полосы двухфононного поглощения CVD АП, облученной быстрыми нейтронами (флюенс $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$). Спектр 1 получен при аппроксимации спектра, измеренного после отжига при 300 °С, 2 – 400 °С, 3 – 550 °С, 4 – 700 °С, 5 – 900 °С, 6 – 940 °С, 7 – 1080 °С, 8 – 1285 °С, 9 – после отжига при 1555 °С и 10 – измерен на необлученном CVD-алмазе, вырезанном из той же пластины. (Для наглядности спектры 2–10 последовательно смещены по вертикали друг относительно друга на 3 см^{-1} .)

Обнаружено, что облучение быстрыми нейтронами алмазов приводит к уширению, ослаблению и длинноволновому смещению полосы двухфононного поглощения (рис. 3). По мере повышения температуры отжига амплитуда, форма и спектральное положение характерных полос двухфононного ИК поглощения частично восстанавливаются (рис. 3). Тем не менее, даже после отжига при 1680 °С полоса двухфононного поглощения в CVD АП, облученной нейтронами с флюенсом $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$, остается смещенной в длинноволновую часть спектра (рис. 4), а амплитуда полос поглощения – ниже наблюдающейся в необлученном образце. Кроме того, в спектрах ИК поглощения появляются в данном спектральном диапазоне дополнительные полосы с максимумами вблизи 1800 и 1900 см^{-1} (рис. 3), не наблюдающиеся в спектрах неповрежденных алмазов.

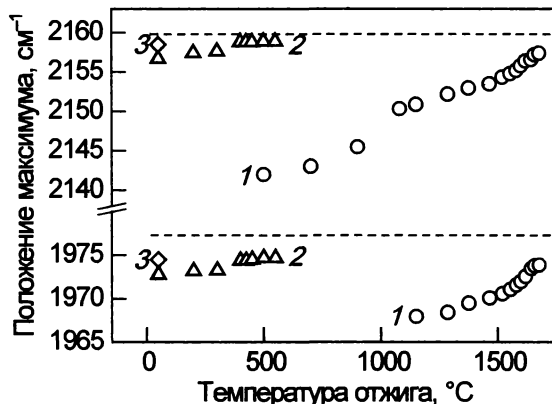


Рис. 4. Положение характерных экстремумов в спектрах ИК поглощения CVD АП, облученной быстрыми нейтронами с флюенсами: $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ (1), $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (2) и $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (3) в зависимости от температуры отжига. Пунктиром обозначены положения соответствующих ИК полос в объемном неповрежденном алмазе

В спектрах ИК поглощения CVD АП в диапазоне $2700\text{--}3150 \text{ см}^{-1}$ после облучения нейтронами и высокотемпературного отжига разрешается не менее 15 полос CH_x -групп (рис. 5), многие из которых обусловлены колебаниями $sp^2 \text{ CH}_x$ -групп, а полоса на 3123 см^{-1} – центрами (NVH^0) [5].

Формирование центров NVH^0 в нейтронно-облученных CVD АП объяснено смещением водорода с межкусталлитных границ в объем алмазных кристаллитов [6]. Две CH_x -полосы (на 2898 и 2950 см^{-1}) не имеют аналогов в спектрах необлученных CVD-алмазов и отличаются высокой стабильностью к термическим отжигам (рис. 5), поскольку они обусловлены валентными колебаниями CH_x -групп, формирующихся в результате облучения нейтронами и последующего отжига не на межкусталлической границе, а вблизи комплексов радиационных дефектов,

Обнаружено, что за счет радиационного повреждения быстрыми нейтронами структуры межкусталлитных границ в CVD АП существенно (на $\sim 200^\circ$) возрастает термостабильность CVD АП (рис. 6), которая в свою очередь определяется температурой графитизации межкусталлитных

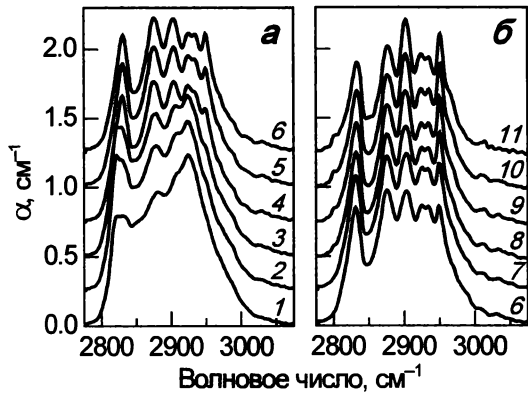


Рис. 5. Трансформация полосы валентных колебаний CH_x -групп в спектрах поглощения CVD АП, облученной быстрыми нейтронами (флюенс $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$) при последовательных изохронных (1 час) отжигах при температуре, °С: 1285 (1), 1375 (2), 1465 (3), 1520 (4), 1555 (5), 1580 (6), 1600 (7), 1620 (8), 1645 (9), 1660 (10), 1680 (11). (Для наглядности спектры разнесены по вертикали друг относительно друга на 0.25 см^{-1})

границ, происходящей вследствие разрывов С-Н_x связей [7].

Заключение

Исследовано влияние допорогового радиационного повреждения на ИК спектры поглощения CVD-алмазов. Изучены процессы восстановления алмазной решетки при отжигах в вакууме вплоть до $1700 \text{ }^\circ\text{C}$. Обнаружено, что облучение быстрыми нейтронами алмазов приводит к уширению, ослаблению и длинноволновому смещению полосы двухфононного поглощения. Обнаружен и объяснен эффект повышения термостабильности поликристаллических CVD-алмазов в результате облучения быстрыми нейтронами.

Работа выполнена при поддержке грантов 17-52-04085 и 15-02-02875 РФФИ, а также гранта

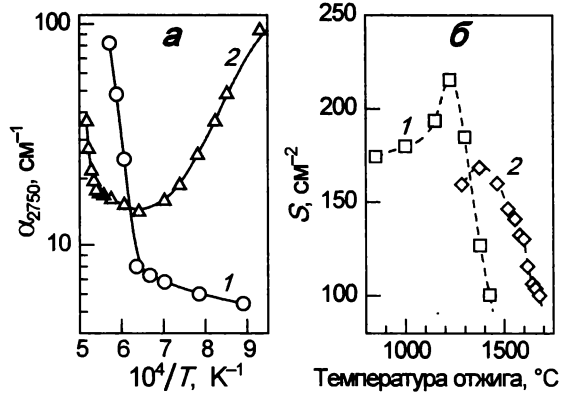


Рис. 6. Влияние термического отжига (в вакууме, в течение часа при каждой температуре) на коэффициент поглощения α на частоте 2750 см^{-1} (а) и на интегральную интенсивность поглощения S валентными колебаниями CH_x -групп (б) для необлученной CVD АП (1) и той же CVD АП, облученной нейтронами с флюенсом $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ (2).

Ф17PM-091 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

1. Sussmann R.S. CVD Diamond for electronic devices and sensors. New York: Wiley, 2009. p.
2. Kalish R., Reznik A., Nugent K.W. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 1999. V. 148. № 1-4. P. 626-633.
3. Хомич А.В., Хмельницкий П.А., Дравин В.А. и др. // ФТТ. 2007. Т. 49. № 9. С. 1585-1589.
4. Karkin A.E., Voronin V.I., Berger I.F. et al. // Phys. Rev. B. 2008. V. 78. P. 033204 (4 pp.).
5. Khan R.U.A., Cann B.L., Martineau P.M. et al. // J. Phys.: Condens. Matter. 2013. V. 25. № 27. P. 275801 (11 pp.)
6. Khomich A., Ralchenko V., Nistor L. et al. // Phys. Status Solidi A. 2000. V. 181. № 1. P. 37-44.
7. Ralchenko V., Nistor L., Pleuler E. et al. // Diamond Relat. Mater. 2003. V. 12. № 10-11. P. 1964-1970.

EFFECT OF IRRADIATION BY FAST NEUTRONS ON INFRARED ABSORPTION SPECTRA OF CVD DIAMONDS

A.A. Khomich^{1,2}, V.G. Ralchenko^{1,3}, O.N. Poklonskaya⁴, A.I. Kovalev⁴, M.V. Kozlova⁵, A.F. Popovich^{1,2}, R.A. Khmel'nitskiy^{1,6}, N.A. Poklonski⁴, A.V. Khomich^{1,6}

¹Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, pl. Vvedenskogo 1, 141190 Fryazino, Russia, antares-610@yandex.ru

²Institute of General Physics. A.M. Prokhorov RAN, 38 Vavilova str., 117942 Moscow, Russia, vg_ralchenko@mail.ru

³Harbin Institute of Technology, Harbin, P.R. China, vg_ralchenko@mail.ru

⁴Belarusian State University, 4 Nezavisimosti ave., 220030 Minsk, Belarus, poklonski@bsu.by

⁵Moscow State University, 1 Leninskie gory, 119991 Moscow, Russia, marija-kozlova@yandex.ru

⁶Lebedev Physical Institute RAS, 53 Leninskii ave., 117924 Moscow, Russia, roma@lebedev.ru

It was found that the fast neutron irradiation leads to the broadening, attenuation, and long-wavelength shift of the two-phonon absorption band in the infrared (IR) absorption spectra of polycrystalline CVD and natural diamonds, the enhancement of the one-phonon absorption, and the increasement of thermal stability of CVD diamonds. The processes of the recovery of a radiation-damaged diamond lattice during thermal annealing runs at $260\text{--}1700^\circ\text{C}$ are studied.