

4. K. Iakoubovskii and G. J. Adriaenssens, Optical studies of some interstitial-related centers in CVD diamond, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 181 (2000) 59–64.
5. P. M. Martineau, S. C. Lawson, A. J. Taylor, S. J. Quinn, D. J. F. Evans and M. J. Crowder. Identification of synthetic diamond grown using chemical vapour deposition (CVD), *Gems and Gemology*, (2004) Vol. 40, p. 2–25.
6. P. M. Martineau, M. P. Gaukroger, K. B. Guy, S. C. Lawson, D. J. Twitchen, I. Friel, J. O. Hansen, G. C. Summerton, T. P. G. Addison and R. Burns, High crystalline quality single crystal chemical vapour deposition diamond, *J. Phys.: Condens. Matter* 21 (2009) 364205 (8pp).
7. A. Muchnikov, U. F. S. Haenens-Johansson, S. Stoupin, L. C. Loudin, A. M. Zaitsev, "Study of multi-layered thick single-crystal CVD diamond", (2018), GIA lab report, (unpublished).

ПАРАМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НРHT АЛМАЗОВ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ И ОТЖИГА

И. И. Азарко¹, И. А. Карпович¹, О. В. Игнатенко²,
А. В. Коновалова², А. В. Колесникова¹

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: azarko@bsu.by*

²⁾ *Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь*

Изучено влияние облучения ускоренными электронами с энергией 6 МэВ и последующего отжига на парамагнитные свойства пластинок алмаза, вырезанных из кристаллов, синтезированных методом НРHT в системах Fe-Ni-C. Установлено, что для всех исследованных образцов наблюдается рост интенсивности сигнала С-дефекта уже при флюенсе $1,5 \cdot 10^{17}$ эл/см², а также сигналов, ответственных за наличие примесного никеля. Спектры ЭПР облученных электронами пластинок алмаза после вакуумного отжига вернулись к исходным значениям.

Ключевые слова: НРHT алмазы; ЭПР; электронное облучение; вакуумный отжиг.

PARAMAGNETIC PROPERTIES OF HPHT DIAMONDS AFTER IRRADIATION WITH ACCELERATED ELECTRONS AND ANNEALING

I. I. Azarko¹, I. A. Karpovich¹, O. V. Ignatenko², A. V. Konovalova², A. V. Kolesnikova¹

¹⁾ *Belarusian State University, Nezavisimosti Ave. 4, 220030, Minsk, Belarus*

²⁾ *Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science,
P. Brovki str, 19, 220072 Minsk, Belarus
Corresponding author: I. I. Azarko (azarko@bsu.by)*

The effect of the fluence of accelerated electrons with an energy of 6 MeV on the paramagnetic properties of diamond crystals synthesized by the HPHT method in the Fe – Ni – C was studied. It was found that for diamonds, a sharp increase in the intensity of the signal from the C-defect was observed at a fluence of $1.5 \cdot 10^{17}$ el/cm², as well as a change in the saturation power for the central signal component.

Key words: HPHT diamonds; ESR; accelerated electrons; vacuum annealing.

ВВЕДЕНИЕ

Алмаз привлекает внимание многих исследователей не только как драгоценный камень, но и благодаря его кристаллической структуре. Исследование парамагнитной системы НРНТ алмазов позволит расширить сферу практического использования синтетических алмазов как в сфере ювелирной промышленности, так и в производстве электронных приборов, способных работать в экстремальных условиях.

Одним из основных методов выращивания синтетических алмазов является метод высоких температур и высоких давлений – НРНТ. Суть метода сводится к искусственному воссозданию природного процесса роста алмазных кристаллов при давлении от единиц ГПа и температуре порядка 1500°С [1]. Наряду с задачей роста крупных структурно-совершенных кристаллов алмаза проблема влияния технологических примесей и обусловленных ими эффектов в сверхтвердой матрице на физические свойства полученных материалов имеет первоочередное значение при разработке научных направлений нанoeлектроники.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе продолжено исследование НРНТ алмазов, облученных ускоренными электронами с энергией 6 МэВ. Синтез алмазов осуществлялся в условиях, описанных в работе [2]. Из кристаллов алмаза, с большим содержанием азотной примеси в виде Р1-центров, т.е. одиночных атомов азота в узлах кристаллической решетки, были вырезаны пластинки желтого цвета. В спектрах ЭПР исходных образцов, зарегистрированных при температуре жидкого азота помимо сигналов от Р1-центров присутствовали также сигналы от парамагнитного никеля. Далее было проведено облучение высокоэнергетичными электронами с набором доз от $1,5 \cdot 10^{17}$ эл/см² до $3,0 \cdot 10^{18}$ эл/см², и последующий отжиг при высокой температуре в условиях вакуумной откачки. В спектрах ЭПР облученных высокоэнергетичными электронами пластинок алмаза помимо парамагнитных сигналов от одиночных атомов азота и никеля в положении замещения наблюдается сигнал от обменно-связанных атомов азота [3]. Воздействие радиации на кристаллы алмазов исследовалось нами ранее при больших и малых флюенсах нейтронов когда концентрация введенных дефектов, например, вакансий, была гораздо выше или сопоставима количества собственных дефектов [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке представлены зависимости интенсивности сигнала центральной и боковой компонент Р1-центров от мощности СВЧ для исходных пластинок алмаза, после электронного облучения дозами от $3 \cdot 10^{17}$ эл/см² до $3 \cdot 10^{18}$ эл/см² и затем оттоженных. При облучении образцов с флюенсом $3 \cdot 10^{17}$ эл/см² для центральной и боковой компонент наблюдался рост интенсивности сигнала ЭПР при уменьшении ширины линии, при этом мощность насыщения данных сигналов также увеличивалась до 1,5 мВт. При дальнейшем увеличении флюенса до $3 \cdot 10^{18}$ эл/см² продолжалось увеличение интенсивности только центральной компоненты сигналов при уменьшении ширины линии, а интенсивности сигнала боковых компонент С-дефекта уменьшились.

Следует отметить, что уже при дозе облучения $3 \cdot 10^{17}$ эл/см² наблюдается обратный рост интенсивности центрального сигнала при мощностях СВЧ излучения бо-

лее 15 мВт, что может быть связано с увеличением оборванных углерод-углеродных связей. С увеличением дозы видно сглаживание графиков, что связано с уменьшением интенсивности пика Р1-центра и ростом числа вакансий, захваченных одиночными атомами азота, находящимися в узлах кристаллической решетки.

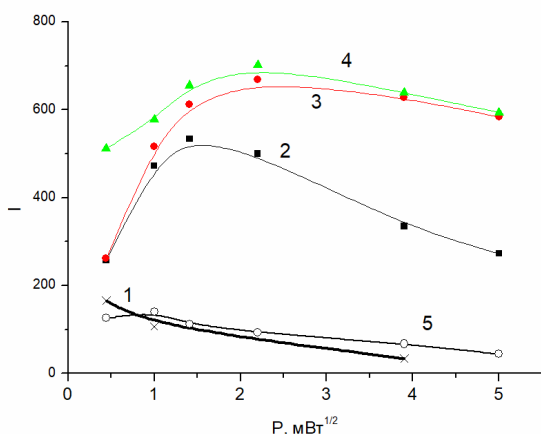


Рисунок – Зависимости интенсивности сигнала центральной компоненты Р1-центра от мощности СВЧ:
1 – исходные пластины алмаза;
2, 3, 4 – после электронного облучения дозами от $3 \cdot 10^{17}$ эл/см² до $3 \cdot 10^{18}$ эл/см²;
5 – отожженные после облучения

Спектры ЭПР Р1-центров в облученных алмазах в результате последующего высокотемпературного отжига в условиях вакуумирования вернулись к исходным значениям. Как видно из рисунка зависимости интенсивности сигнала от мощности СВЧ для исходных и отожженных после электронного облучения пластинок практически совпадают.

Парамагнитный никель также является очень чувствительным индикатором состояния кристаллической решетки алмаза. В НРНТ алмазах концентрация атомов никеля, захваченных дислокациями или межблоковыми границами алмазной решетки может превышать число находящихся в узлах решетки, с чем может быть связано изменение числа ионов узельного никеля в пластинках алмаза вследствие электронного облучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Облучение ускоренными электронами синтетических алмазов с высокой концентрацией С-дефекта приводит к изменению парамагнитных и оптических свойств. Для всех пластинок наблюдалось первоначальное увеличение концентрации Р1-центров при флюенсе $3 \cdot 10^{17}$ эл/см², а также изменение мощности насыщения для центральной и боковых компонент сигнала. Последующий высоко-температурный отжиг в вакууме приводит к изменению окраски образцов и возвращению интенсивности сигналов ЭПР Р1 центров к исходным значениям, записанным при СВЧ-мощности от 0,01 до 36 мВт. В НРНТ алмазах присутствуют также захваченные дислокациями или межкристаллитными границами алмазной решетки атомы парамагнитного никеля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Пальянов Ю.Н. Где растут алмазы // Наука из первых рук. 2008. №1 (19).
2. Влияние флюенса ускоренных электронов на парамагнитные свойства НРНТ алмазов / И.И. Азарко, И.А. Карпович, О.В. Игнатенко, А.В. Коновалова, С.Б. Ластовский, В.А. Комар // «Взаимодействие излучений с твердым телом». Материалы 13 межд. конф.. Минск. 2019. – Мн., Изд. Центр БГУ, 2019. – С.126–129.

3. Н.А. Поклонский. Инвертирование при нормальных условиях сигнала электронного парамагнитно-го резонанса Р1-центра в монокристалле синтетического алмаза. Письма в журнал технической физики, том 32, выпуск 7, с. 61, 2006.
4. Дутов, В.Б. Шипило, В.А. Комар, И.И. Азарко, Н.В. Шипило. Воздействие малых доз нейтронного облучения на свойства кристаллов синтетических алмазов. Неорганические материалы, 2003, Т. 39, № 4, с. 1–4.

СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ В СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

О. М. Бородавченко¹, В. Д. Живулько¹, А. В. Мудрый¹,
М. А. Сулимов², И. А. Могильников², М. В. Якушев^{2,3}

¹⁾ Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь, e-mail: borodavchenko@physics.by

²⁾ Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН,
ул. Софьи Ковалевской, 18, 620108 Екатеринбург, Россия, e-mail: Sulimov.m.a@gmail.com

³⁾ Уральский федеральный университет,
ул. Мира, 19, 620002 Екатеринбург, Россия, e-mail: michael.yakushev@strath.ac.uk

Микроструктура поверхности и размеры нанокристаллических зерен тонких пленок твердых растворов $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ в структуре солнечных элементов исследовались с использованием сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. По спектрам фотолюминесценции и спектрам возбуждения люминесценции определена оптическая ширина запрещенной зоны поглощающего слоя $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ солнечных элементов, которая составила $E_g \sim 1.122$ эВ при температуре ~ 4.2 К.

Ключевые слова: $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$; твердый раствор; солнечный элемент; фотолюминесценция; ширина запрещенной зоны.

STRUCTURAL AND OPTICAL CHARACTERISTICS OF BASIC ABSORBING LAYERS OF $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ SOLID SOLUTIONS IN SOLAR CELLS

О. М. Borodavchenko¹, V. D. Zhiyulko¹, A. V. Mudryi¹,
M. A. Sulimov², I. A. Mogilnikov², M. V. Yakushev^{2,3}

¹⁾ Scientific-Practical Material Research Centre of the National Academy of Science of Belarus,
P. Brovki str., 19, 220072 Minsk, Belarus

²⁾ M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of RAS,
Sophia Kovalevskaya str, 18, 620108 Ekaterinburg, Russia

³⁾ Ural Federal University, Mira str., 19, 620002 Ekaterinburg, Russia
Corresponding author: O. M. Borodavchenko (borodavchenko@physics.by)

The surface microstructure and sizes of $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ nanocrystalline solid solutions in solar cells have been studied using scanning electron microscopy and X-ray diffraction. The photoluminescence and luminescence excitation spectra were used to determine the optical band gap of $E_g \sim 1.122$ eV at ~ 4.2 K for the solid solutions.

Key words: $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$; solid solution; solar cell; photoluminescence; band gap.