

УДК 546.26.539

**ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ  
ДЕЙТЕРИЯ И ОТОЖЖЕННЫХ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 1665 °С ПЛЕНКАХ CVD АЛМАЗА**

**Олешкевич А.Н.<sup>1</sup>, Хомич А.В.<sup>2</sup>, Сернов С.П.<sup>3</sup>, Нгуен Тхи Тхань Бинь<sup>4</sup>,  
Лапчук Т.М.<sup>1</sup>, Лапчук Н.М.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
Фрязино, Российская Федерация*

<sup>3</sup>*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

<sup>4</sup>*Куанг Бинь университет,  
Провинция Куанг Бинь, Вьетнам*

**Аннотация.** В работе рассмотрены особенности облучения ионами дейтерия пленок CVD алмаза и на основе анализа спектров ЭПР изучено влияние на их структуру и свойства последующего высокотемпературного отжига. Анализ полученных результатов позволил сделать выводы о природе дефектов и возможности создания на их основе, с участием ионов дейтерия, стабильных магнитоупорядоченных структур в пленках CVD алмаза, что имеет важное значение для дальнейшего развития и применения этих материалов.

**Ключевые слова:** электронный парамагнитный резонанс; ионы дейтерия; пленки CVD алмаза; высокотемпературный отжиг; магнитоупорядоченные структуры.

**ELECTRON PARAMAGNETIC RESONANCE IN CVD DIAMOND FILMS IRRADIATED WITH  
DEUTERIUM IONS AND ANNEALED AT A TEMPERATURE OF 1665 °C**

**Oleshkevich A.N.<sup>1</sup>, Khomich A.V.<sup>2</sup>, Sernov S.P.<sup>3</sup>, Nguyen Thi Thanh Binh<sup>4</sup>,  
Lapchuk T.M.<sup>1</sup>, Lapchuk N.M.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Belarusian State University  
Minsk, Republic of Belarus*

<sup>2</sup>*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS  
Fryazino, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

<sup>4</sup>*Quang Binh university  
Quang Binh province, Vietnam*

**Abstract.** The work examines the features of irradiation of CVD diamond films with deuterium ions, and based on the analysis of ESR spectra, the effect of subsequent high-temperature annealing on their structure and properties is studied. Analysis of the results obtained allowed us to draw conclusions about the nature of defects and the creation on their basis with the participation of deuterium ions of stable magnetically ordered structures in CVD diamond films, which is important for the further development and application of these materials.

**Keywords:** electron paramagnetic resonance; deuterium ions; CVD diamond films; high-temperature annealing; magnetically ordered structures.

*Адрес для переписки: С.П. Сернов, пр. Независимости, 63, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
e-mail: ssernov@bntu.by*

Развитие электронного приборостроения на алмазе различного структурного совершенства [1] сдерживается недостатком знаний о собственных и примесных дефектах в алмазе [2], т. е. связано как с проблемой получения высококачественного синтетического сырья, так и с развитием методов его диагностики, что подчеркивает актуальность проведенных исследований.

**Цель работы** – изучение имплантированных ионами дейтерия и отожженных в вакууме поликристаллических CVD алмазных пленок с целью проверки гипотезы об ответственности водородсодержащих радиационных дефектов за проявление магнитного порядка в алмазах.

**Методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР)** исследованы: 1) исходная пленка CVD алмаза, 2) исходная пленка CVD алмаза после отжига при  $T = 1665$  °С и 3) имплантированные ионами дейтерия с  $E = 350$  кэВ и дозой  $D = 1,2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> пленки CVD алмаза с последующим их отжигом при  $T = 1665$  °С. Сравнение спектров ЭПР исходного и исходного отожженного при той же температуре, что и имплантированный ионами дейтерия CVD алмаз, проводилось для установления роли дейтерия в формировании структур с магнитным упорядочением. По своим оптическим и теплофизическим свойствам использовавшаяся в данной работе CVD алмазная

пленка толщиной 0,5 мм и содержанием азота на уровне  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  не уступала лучшим природным кристаллам. Концентрация связанного водорода, находящегося в CVD алмазах на межкристаллитных границах, не превышала  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ .

Спектр ЭПР исходной пленки CVD алмаза представляет симметричную линию лоренцевой формы с  $g$ -фактором 2,00355, величина которого не характерна для алмаза, и может быть объяснена значительным влиянием высокой концентрации водорода в этих пленках. После отжига при  $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$ , как видно из рисунка 1, а, линия ЭПР становится асимметричной,  $g$ -фактор уменьшается и становится равным 2,00275, что является характерным показателем для поликристаллических алмазов, осажденных из газовой фазы. Вследствие отжига при  $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$  имплантированной ионами дейтерия пленки алмаза линия спектра ЭПР, как видно из рисунка 1, б, становится симметричной,  $g$ -фактор снова возрастает до значения 2,0039 и наблюдается его анизотропия относительно направления поляризующего магнитного поля.

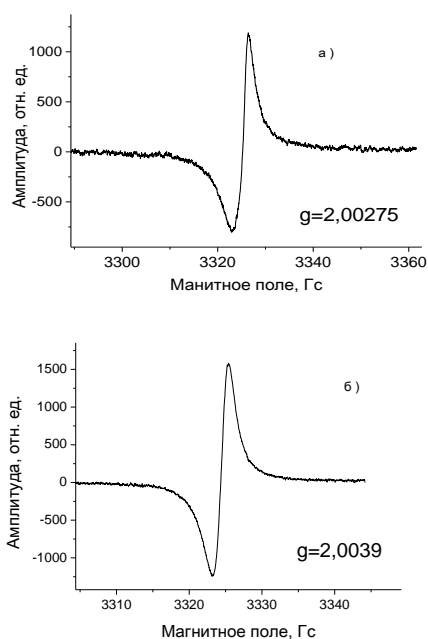


Рисунок 1 – Спектры ЭПР: а – исходной пленки CVD алмаза после отжига при  $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б – имплантированной ионами дейтерия пленки CVD алмаза после отжига при  $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$

При исследовании зависимости величины  $g$ -фактора от ориентации образца CVD алмаза относительно направления поляризующего магнитного поля в резонаторе, было зафиксировано, что исходная пленка до и после отжига при температуре  $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$  демонстрируют совпадение значений  $g$ -фактора при полном обороте образца в магнитном поле. Для объяснения природы данного явления были исследованы зависимости величины

резонансного поля в пленках CVD алмаза от ориентации образца в магнитном поле в полярных координатах. Обнаружено, что для исходной и отожженной при  $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$  пленок алмаза значение резонансного поля остается неизменным при полном обороте образца в магнитном поле (рисунок 2, а), а в случае имплантированной ионами дейтерия пленки CVD-алмаза, прошедшей отжиг при аналогичной температуре, наблюдается отличие в значениях резонансного поля при полном обороте образца в резонаторе (рисунок 2, б).

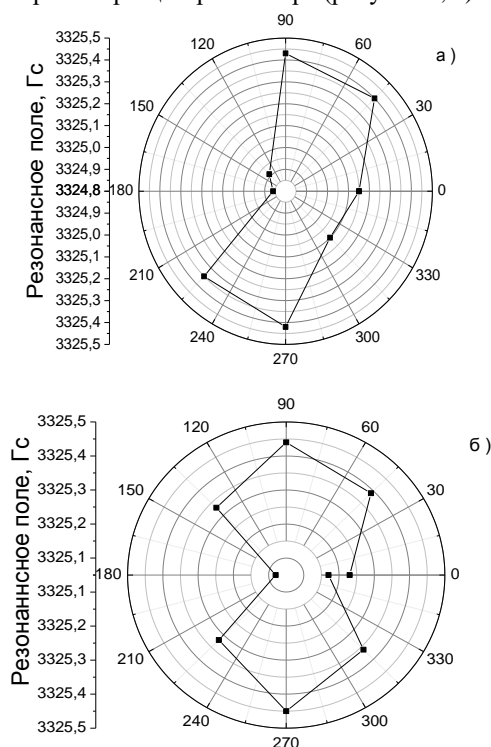


Рисунок 2 – Зависимость величины резонансного поля в спектрах ЭПР от ориентации образца в магнитном поле: а – исходной пленки CVD алмаза после отжига при  $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б – имплантированной ионами дейтерия пленки CVD алмаза, отожженной при  $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$

Установлено наличие высокотемпературного магнитного упорядочения в пленках поликристаллического CVD алмаза, имплантированного ионами дейтерия и отожженного при  $T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$ , явившееся следствием формирования скоплений (ассоциатов) не скомпенсированных электронных спинов [3].

### Литература

1. Ральченко, В.Г. CVD-алмазы: применение в электронике / В.Г. Ральченко, В.И. Конов // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2007. – № 4. – С. 58–67.
2. Poklonskaya, O.N. Paramagnetism of CVD diamonds irradiated with neutrons / O.N. Poklonskaya // Doklady Natsional'noy Akademii Nauk Belarusi. – 2013. – Vol. 57(5). – P. 49–54. (In Russian).
3. McConnell, H.M. Ferromagnetism in solid free radicals / H.M. McConnell // Journal of Chemical Physics. – 1963. – Vol. 39(7). – P. 49–54.