

6. Даниленко В. В. Взрыв: физика, техника, технология. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 784 с.
7. «Environmental Issues Related to Preparation of Detonation Nanodiamonds. Surface and Functionalization» / A. P. Voznyakovskii, F. A. Shumilov, A. Kh. Ibatullina, I. V. Shugalei // Rus. J. of Gen. Chem. – 2012. – **82**. – N 13. – P. 2253–2255.
8. Кулакова И. И. Модифицирование детонационного наноалмаза: влияние на физико-химические свойства // Рос. хим. журн. – 2004. – **48**. – С. 97–106.

Поступила 17.06.13

УДК 666.233

**В. Ю. Долматов**, д-р техн. наук<sup>1</sup>; **Н. М. Лапчук**, канд. физ.-мат. наук<sup>2</sup>; **А. Н. Панова**, канд. техн. наук<sup>3</sup>; **К. А. Рудометкин**, канд. экон. наук<sup>1</sup>; **Н. А. Поклонский**, д-р физ.-мат. наук<sup>2</sup>; **В. Мюллюмяки**, PhD<sup>4</sup>, **А. Веханен**, PhD<sup>4</sup>; **С. А. Душенок**, д-р техн. наук<sup>1</sup>; **О. В. Базанов**<sup>1</sup>; **Е. В. Никитин**<sup>5</sup>, **А. П. Возняковский**<sup>6</sup>, доктора технических наук

<sup>1</sup>ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля, НАН Украины, г. Киев

<sup>4</sup>«Carbodeon Ltd. Oy», г. Хельсинки, Финляндия

<sup>5</sup>ООО «СИДАЛ», г. Лесной, Россия

<sup>6</sup>Федеральное унитарное государственное предприятие «НИИ синтетического каучука  
им. акад. С. В. Лебедева», г. Санкт-Петербург, Россия

## ОСОБЕННОСТИ ПАРАМАГНЕТИЗМА И КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗАХ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В ПРИСУТСТВИИ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Исследование детонационных наноалмазов (ДНА), полученных при детонационном синтезе в присутствии легирующих элементов или их неорганических соединений, показало, что более совершенная структура ДНА получается при использовании легирующих элементов, введенных непосредственно в состав заряда взрывчатого вещества (ВВ).*

*Корреляции между шириной гауссовской линии, g-фактором, количеством и качеством примесей не обнаружено.*

*Возможное введение в кристаллическую решетку Ge, Si и S приводит к практически идеальному g-фактору и наименьшему количеству парамагнитных центров.*

*Наибольшее количество дефектов имеют ДНА, полученные при подрыве заряда ВВ в чистой воде или с растворенными в ней легирующими добавками.*

**Ключевые слова:** детонационные наноалмазы, легирование, синтез, электронный парамагнитный резонанс, комбинационное рассеяние света, g-фактор, парамагнитные центры.

Детонационные наноалмазы (ДНА), как и природные алмазы, обладают парамагнитными свойствами, обусловленными наличием парамагнитных центров (ПМЦ).

В целях выяснения природы и локализации ПМЦ были зарегистрированы спектры электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) стандартного ряда образцов ДНА, обработанного и модифицированного в различных условиях (окисленные с поверхности

ДНА, восстановленные водородом, хлорированные, карбоксилированные, ДНА с привитыми группами  $\text{H-C}_{16}\text{H}_{33}$ ,  $\text{H-C}_6\text{H}_{13}$ ).

Исходя из предположения о поверхностной локализации ПМЦ в ДНА, было [1] высказано предположение, что кислород воздуха должен существенно влиять на формирование сигнала ЭПР. В этой связи спектры регистрировали как после вакуумирования образцов, так и после вскрытия ампул и выдерживания образцов на воздухе. Однако для всех образцов ДНА вид спектров был одинаковым,  $g$ -фактор составлял  $2,0021 \pm 0,0001$ , концентрация спинов практически не зависела от условий обработки.

Полученные данные показали, что химическое модифицирование поверхности ДНА, как и кислород воздуха, не влияет на концентрацию ПМЦ. Исходя из среднего размера первичных частиц ДНА (~4 нм), плотности алмазного ядра и средней концентрации спинов в исследованных образцах было определено, что количество спинов в одной частице составляет около 10.

Лоренцева форма линий ЭПР и отсутствие зависимости парамагнитных свойств от способа обработки поверхности засвидетельствовали, что парамагнетизм ДНА обусловлен структурными дефектами ядра наноалмазной частицы (разорванные С-С-связи, азотные примесные центры) и не связан с поверхностными центрами [1]. Этот факт, а также значение  $g$ -фактора указывают на внутрикристаллическую локализацию формирующегося в ДНА ЭПР-сигнала.

Цель настоящей работы – подтвердить или опровергнуть возможность легирования кристаллической решетки ДНА в процессе детонационного синтеза методами ЭПР и КРС (комбинационного (рамановского) рассеяния света).

Попытки легирования ДНА осуществляли двумя методами: подрывом заряда ВВ в водном растворе неорганического соединения бора и фосфора (серия Н) или подрыва модифицированного заряда ВВ, содержащего легирующий элемент (бор, кремний, алюминий, серу) или его неорганическое соединение (фосфора, бора, германия) в водном растворе комплексона (серия Б). В первоначальном составе ВВ во всех случаях содержалось 50% масс. тротила и 50% масс. гексогена.

После подрыва ВВ получаемый полупродукт – алмазосодержащая шихта (АШ) – подвергали многостадийной последовательной очистке кипящими растворами смеси кислот, щелочей и комплексонов. Последнюю стадию обработки АШ осуществляли 57%-ной азотной кислотой при температуре ~230 °С и давлении ~100 атм. [2].

Для каждого вида АШ необходимо было подбирать соответствующие условия очистки.

Изучаемые образцы ДНА получили следующим образом:

- № 2-Б – подрыв заряда ВВ, содержащего 6% масс. неорганического соединения фосфора, в водной растворе комплексона;
- № 3-Б – аналогично № 2-Б при содержании соединения фосфора 10%;
- № 5-Б – подрыв заряда ВВ, содержащего 6% масс. неорганического соединения бора;
- № 7-Б – подрыв заряда ВВ, содержащего 2,5% масс. чистого аморфного бора;
- № 10-Б – подрыв заряда ВВ, содержащего 3,0% масс. кристаллического кремния;
- № 12-Б – подрыв заряда ВВ, содержащего 5,0% масс. неорганического соединения германия;
- № 13-Б – подрыв заряда ВВ, содержащего 5,0% масс. серы;
- № 19-Н – подрыв заряда ВВ в чистой воде;
- № 21-Н – подрыв заряда ВВ в водном растворе неорганического соединения бора (аналогично [3]);
- № 24-Н – подрыв заряда ВВ в водном растворе, содержащем неорганическое соединение фосфора.

Регистрировали спектры ЭПР модифицированным спектрометром «RadioPAN» SE/X-2543 в X-диапазоне при включенной автоподстройке частоты клистрона по частоте СВЧ-резонатора с типом колебаний  $\text{H}_{102}$ . Поляризуемое магнитное поле модулировали с частотой 100 кГц;

чувствительность спектрометра составляла  $\approx 3 \cdot 10^{12}$  спин/мТл. Для контроля добротности резонатора и настройки фазы модуляции магнитного поля использовали сигнал ЭПР рубина.

Спектры КРС образцов ДНА № 10-Б и № 19-Н записывали с помощью Nanofinder High End (LOTIS ТП) – микрорамановского спектрометра, совмещенного с 3D сканирующим конфокальным микроскопом. Регистровали спектры по схеме обратного рассеяния; разрешение спектрометра составляло  $0,3 \text{ см}^{-1}$ . Использовали возбуждение излучением твердотельного лазера с длиной волны 473 нм; подводимая к образцу мощность составляла 240 мВт.

**Спектры ЭПР.** В исследованных образцах ДНА наблюдался сигнал ЭПР, представляющий собой интенсивную синглетную симметричную линию, параметры которой изменялись в зависимости от технологических условий синтеза ДНА (рис. 1). Ширина линии ЭПР для различных образцов составляла 6,8–9,4 Гс (в зависимости от примесного окружения парамагнитных центров); величина  $g$ -фактора составляла  $(2,0027-2,0042) \pm 0,00005$ .

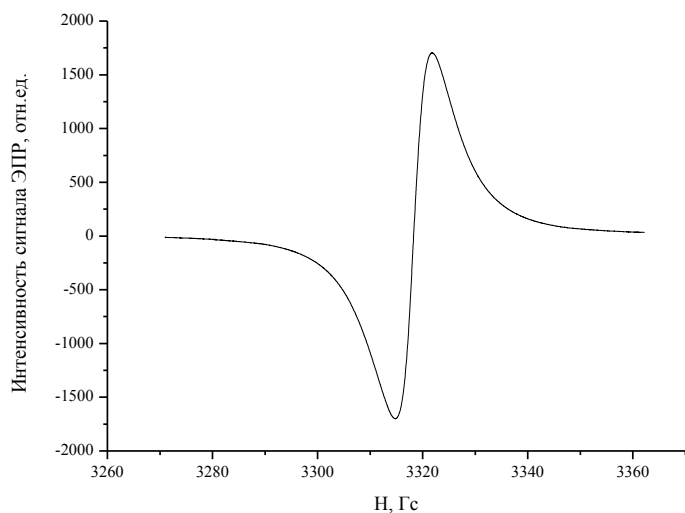


Рис. 1. Синфазный сигнал спектра ЭПР образца ДНА № 10-Б (Лоренц: 0,7296, Гаусс: 0,2704)

Природа парамагнетизма центров с  $g = 2,0027$  обусловлена возникающими при пластической деформации дефектами структуры непримесного характера, а также оборванными С–С связями на поверхности и в объеме кристаллов алмаза при облучении нейтронами или ионами [4, 5]. Такое значительное отклонение фактора спектроскопического расщепления от его значения для свободного электрона в некоторых образцах ДНА может обуславливаться присутствием в оболочке, окружающей зерно ДНА, металлсодержащей примеси [6]. Парамагнитные центры, связанные

с присутствием примесного азота в С-форме (атом азота замещает в узле кристаллической решетки алмаза атом углерода), в образцах ДНА не обнаружены. Азот является одной из основных примесей, входящих в кристаллическую решетку природных и синтетических алмазов. В природных алмазах типа Па примеси образуют непарамагнитные комплексы, в синтетических алмазах азотные центры и их ассоциации преимущественно парамагнитные. Это своеобразная устойчивая и надежная спин-метка для оценки степени совершенства синтетического алмазного сырья. Известно, что при температуре  $T \geq 1600 \text{ }^\circ\text{C}$  происходит обратимая трансформация непарамагнитных комплексов азота в парамагнитные и наоборот [7]. Вероятно, трансформация азотных комплексов обусловлена кратковременностью процесса синтеза и воздействием очень высокой температуры (до 5000 К).

Основные параметры спектров ЭПР исследованных образцов ДНА, количество несоргаемых примесей и количество ПМЦ приведено в табл. 1.

При уменьшении количества разорванных С–С связей в наноалмазах уменьшается ширина линии ЭПР, и величина фактора спектроскопического расщепления приближается к 2,0027, что может свидетельствовать о повышении качества зерен ДНА. Наблюдаемая при этом корреляция концентрации парамагнитных центров и фактора спектроскопического расщепления показана на рис. 2. Такая зависимость характерна только для кристаллических систем.

Таблица 1. Основные параметры спектров ЭПР исследованных образцов ДНА, количество несгораемых примесей и ПМЦ

№ обр.	Внесенный примесный элемент	g-фактор	Ширина линии, Гс	Вклад в форму контура линии ЭПР		$N_{\text{нп}}$ , % масс.	$N_{\text{эп}}$ , % масс.	$N_{\text{пц}}$ , $\times 10^{18}$ см <sup>-3</sup>
				Лоренц	Гаусс			
12-Б	Ge	2,00262	7,30	0,7519	0,2481	0.37	1.859	0.85
10-Б	Si	2,00270	6,85	0,7448	0,2552	1.14	1.840	6.16
13-Б	S	2,00270	6,82	0,7296	0,2704	0.91	1.781	8.35
3-Б	P	2,00289	6,94	0,7311	0,2689	0.18	1.969	13.4
2-Б	P	2,00289	7,29	0,7221	0,2779	0.63	1.394	14.5
5-Б	B	2,00285	7,01	0,7388	0,2612	0.43	1.734	14.7
24-Н	P	2,00306	9,06	0,8087	0,1913	0.26	1.394	15.5
7-Б	B	2,00332	6,97	0,7237	0,2763	1.36	1.453	16.9
19-Н	-	2,00371	9,41	0,8302	0,1698	0.37	1.971	17.2
21-Н	B	2,00417	9,31	0,8261	0,1739	0.43	1.380	17.6

Примечание.  $N_{\text{нп}}$  – содержание несгораемых примесей в ДНА, % масс.;  $N_{\text{эп}}$  – содержание некислородных элементов в несгораемых примесях, % масс.;  $N_{\text{пц}} \times 10^{18}$  – количество парамагнитных центров в 1 см<sup>3</sup> ДНА.

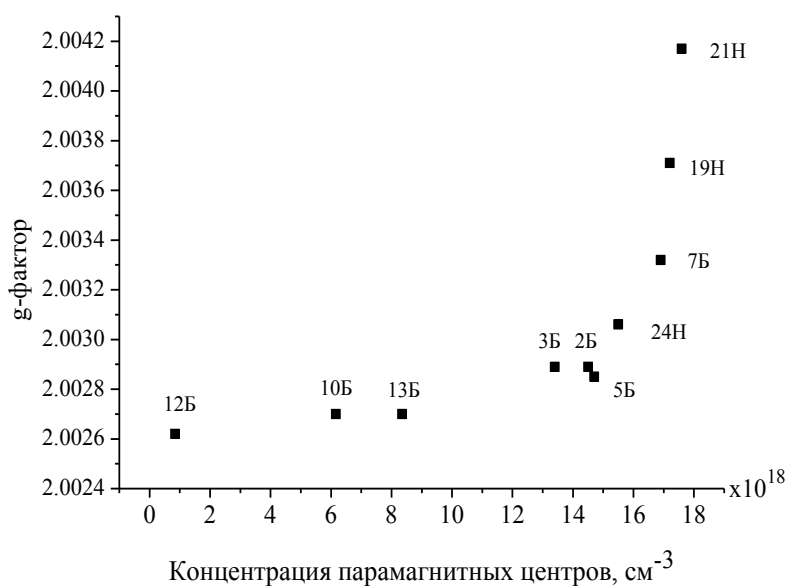


Рис. 2. Зависимость фактора спектроскопического расщепления (g-фактора) от концентрации парамагнитных центров в образцах наноалмазов

Содержание несгораемых примесей по элементному составу в исследуемых образцах ДНА (учитывали примеси с концентрацией  $\geq 0,01\%$  масс.) приведена в табл. 2.

Таблица 2. Элементный примесный состав ДНА ( $\geq 0,01\%$  масс.)

Элемент	Содержание в ДНА по образцам									
	№ 12-Б	№ 10-Б	№ 13-Б	№ 3-Б	№ 2-Б	№ 5-Б	№ 7-Б	№ 24-Н	№ 19-Н	№ 21-Н
Na	0,0343	0,1425	0,0425	–	–	–	–	0,0214	–	0,0130
Al	0,0490	0,0478	0,0437	–	0,0150	–	0,0332	0,0176	–	–
Si	0,0276	0,0997	0,1512	–	0,0204	–	0,1515	0,0163	0,0637	0,0446
P	–	–	–	0,010	0,0265	–	–	0,1098	–	–
K	–	–	0,0264	–	–	–	–	–	–	–
Ca	–	0,0228	0,0249	–	0,010	–	–	–	–	0,0449
Ti	0,0429	0,2510	0,1232	0,0493	0,1016	0,1560	0,3506	0,0100	0,0587	0,0524
Fe	0,0209	0,0386	0,0351	0,0321	0,1769	0,0578	0,0213	0,0114	0,0387	0,0789
Cu	–	–	0,010	–	–	–	0,0163	–	–	–
W	0,0145	0,0170	0,0541	–	0,010	0,0342	0,3633	–	0,0266	0,0777
Ge	0,010	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Общее кол-во несоргаемых примесей	0,37	1,14	0,91	0,18	0,63	0,43	1,36	0,26	0,37	0,43

Анализ данных табл. 1 и 2 позволяет сделать следующие выводы:

- корреляции между содержанием металлосодержащих примесей и  $g$ -фактором не обнаружено, возможно, вследствие широкой номенклатуры элементов в примесях;
- более совершенная структура ДНА получается при использовании легирующих элементов, введенных непосредственно в состав заряда ВВ, где они, возможно,

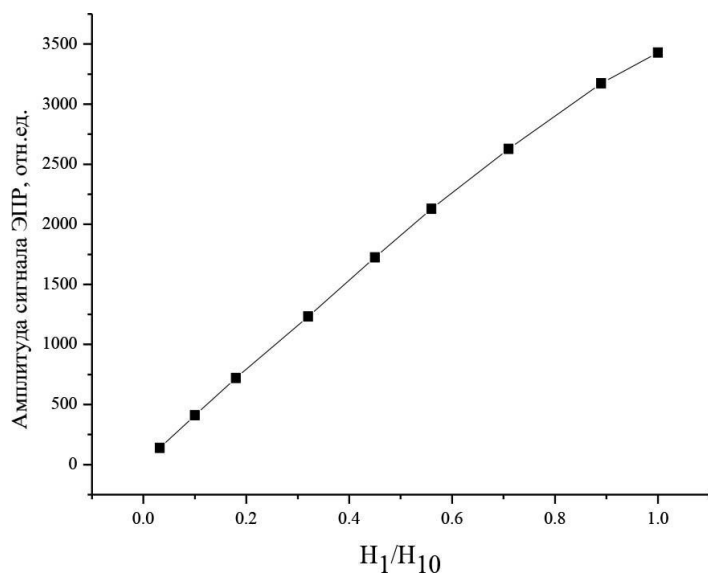


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала ЭПР ДНА (образец № 10-Б) от напряженности  $H_1$  магнитной компоненты СВЧ-поля в резонаторе

конкурируют с азотом за вакантные места в кристаллической решетке ДНА;

- корреляции между шириной гауссовской линии, величиной  $g$ -фактора, содержанием и качеством примесей также не обнаружено;
- ярко выражена зависимость между  $g$ -фактором и количеством ПМЦ в кристаллах ДНА;
- введение в кристаллическую решетку Ge, Si и S приводит к практически идеальному  $g$ -фактору и, соответственно, к наименьшему числу ПМЦ;
- наибольшее количество

дефектов у ДНА, полученных при подрыве заряда ВВ в чистой воде или с растворенными в ней легирующими добавками.

Для одного из наиболее совершенных образцов ДНА (№ 10-Б), предположительно легированного кремнием, продолжительность парамагнитной релаксации рассчитывали по

кривой насыщения синфазного сигнала ЭПР (рис. 3) с учетом характера насыщения квадратурного сигнала.

В результате проведенных при комнатной температуре измерений были получены следующие значения продолжительностей парамагнитной релаксации: спин-спиновой –  $T_2 = 8,92 \cdot 10^{-8}$  с, спин-решеточной –  $T_1 = 2,18 \cdot 10^{-5}$  с. Аналогичные значения были получены для поликристаллов синтетических алмазов, что свидетельствует о высокой когерентности системы спинов даже при комнатной температуре [8].

Наблюдали также скачкообразное изменение  $g$ -фактора и ширины линии ЭПР при повышении мощности  $P$  СВЧ-излучения (рис. 4, 5).

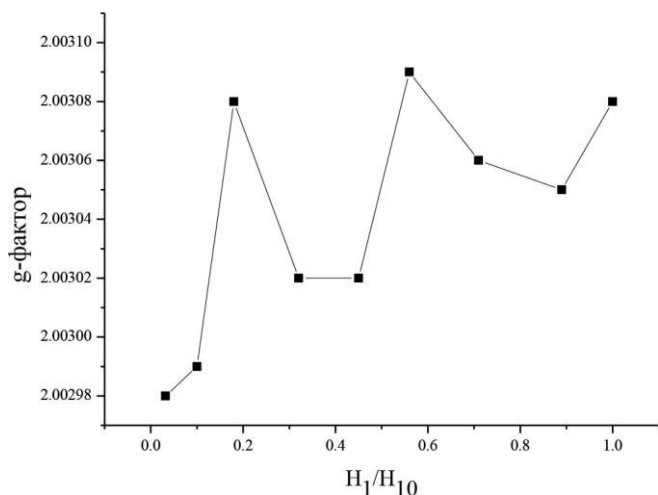


Рис. 4. Зависимость  $g$ -фактора сигнала ЭПР ДНА (образец № 10-Б) от напряженности  $H_1$  магнитной компоненты СВЧ-поля в резонаторе

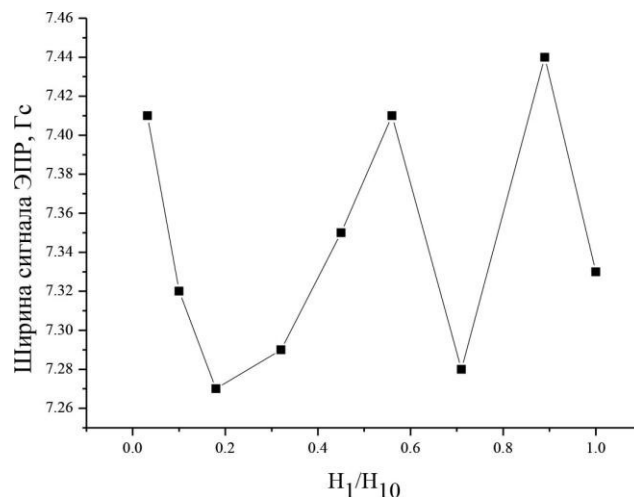


Рис. 5. Зависимость ширины сигнала ЭПР ДНА (образец № 10-Б) от напряженности  $H_1$  магнитной компоненты СВЧ-поля в резонаторе

Отметим, что мощность  $P$  пропорциональна квадрату напряженности  $H_1$  магнитной компоненты СВЧ-поля; значению  $H_{10}$  соответствует  $P_m = 70$  мВт. Это обусловлено тем, что регистрация ЭПР в образцах ДНА сопровождается изменением дефектов структуры: релаксацией механических напряжений в окружающем зерно ДНА слое и его окрестности, изменением концентрации точечных дефектов и пр.

В нормальных условиях под воздействием магнитного поля и СВЧ-излучения примерно в 400 раз повышается скорость деградиационных процессов, что приводит к изменению концентрации парамагнитных центров в пористых композитах на основе  $\text{SiO}_2$  [9].

Немонотонное (скачкообразное) изменение  $g$ -фактора при повышении СВЧ-мощности в целом согласуется с представлениями [10, 11] о поведении нескомпенсированных магнитных моментов электронов в иерархических конденсированных системах и наблюдалось ранее в монокристаллах природного алмаза, имплантированных высокоэнергетичными ионами [12, 13].

**Спектры КРС.** Спектральное положение линий КРС соответствует рассеянию возбуждающего излучения на оптическом ТО фононе и, как следует из данных рис. 6 а, б, для исследуемых образцов ДНА № 19-Н (наиболее дефектная структура) и № 10-Б (наименее дефектная структура) составляет  $1328 \text{ см}^{-1}$ .

Смещение максимума пика  $1332 \text{ см}^{-1}$   $sp^3$ -углерода (алмазная фаза) в спектрах КРС исследуемых образцов ДНА связано с размерным эффектом [14] или присутствием примеси и аллотропных форм углерода, экранирующих алмазное ядро [15].

Наряду с указанным пиком в зависимости от технологических параметров синтеза НА проявляется пик в области  $1600\text{--}1640 \text{ см}^{-1}$ , который относится к  $sp^2$ -углероду [16].

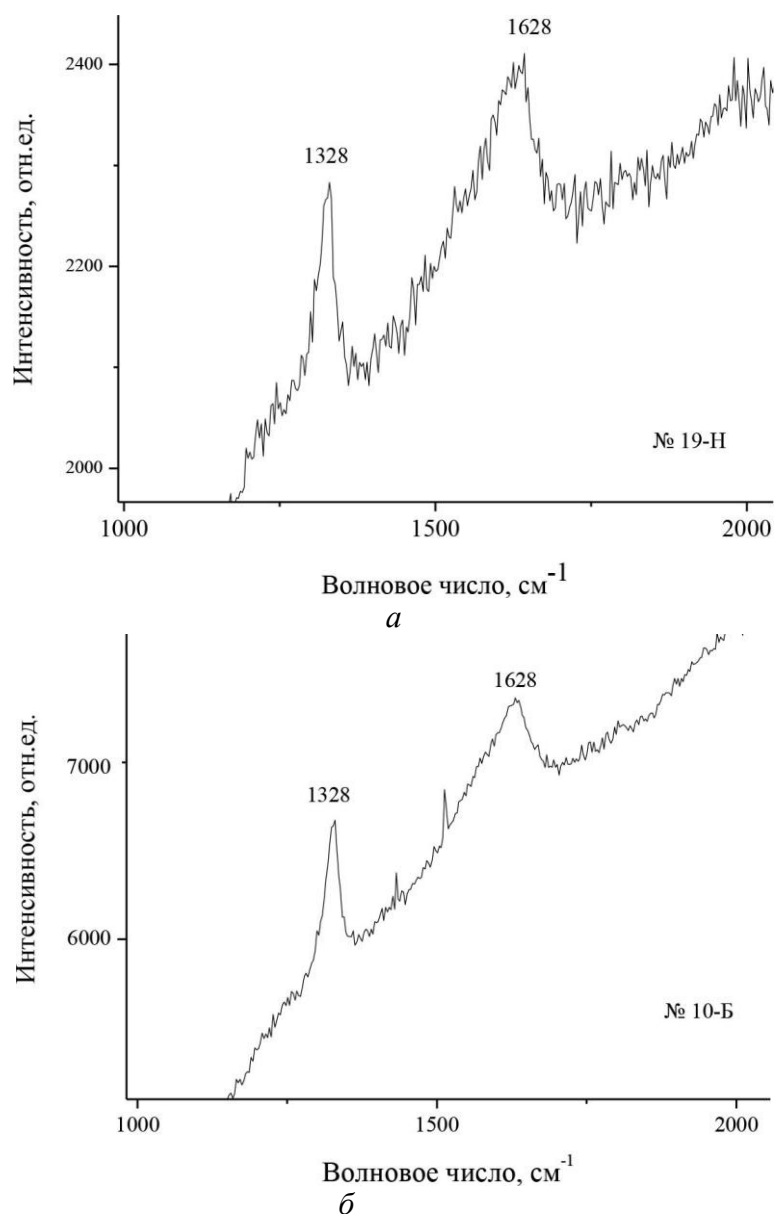


Рис.6. Спектр КРС образцов ДНА № 19-Н (а) и № 10-Б (б)

### Выводы

Методами ЭПР и КРС установлено, что в исследуемых образцах ДНА обнаружены наноалмазы, совершенство структуры которых зависит от технологических особенностей синтеза. Наблюдается зависимость фактора спектроскопического расщепления от содержания свободных радикалов в исследуемых ДНА.

Методы ЭПР и КРС не позволяют подтвердить или опровергнуть факт легирования ДНА в двух описанных вариантах детонационного синтеза.

Наиболее совершенная структура ДНА получается при использовании легирующих элементов (Ge, Si, S), введенных непосредственно в состав заряда ВВ.

Обнаружена ярко выраженная корреляция между g-фактором и количеством парамагнитных центров в ДНА.

*Дослідження детонаційних наноалмазів (ДНА), отриманих при детонаційному синтезі в присутності легуючих елементів або їх неорганічних сполук, показало, що більші*

досконала структура ДНА формується при використанні легуючих елементів, введених безпосередньо до складу заряду вибухової речовини (ВР).

Кореляції між шириною гаусівської лінії, g-фактором, кількістю і якістю домішок не виявлено. Можливе введення в кристалічну решітку Ge, Si і S призводить до практично ідеального g-фактора і найменшій кількості парамагнітних центрів. Найбільша кількість дефектів мають ДНА, отримані при підриві заряду ВР у чистій воді або з розчиненими в ній легуючими добавками.

**Ключові слова:** детонаційні наноалмази, легування, синтез, електронний парамагнітний резонанс, комбінаційне розсіювання світла, g-фактор, парамагнітні центри.

*Investigation of detonation nanodiamonds (DND) obtained when detonation synthesis in the presence of doping elements or their inorganic compounds showed that the most perfect structure of the DND is obtained when using the doping elements added directly to the explosive charge composition.*

*Correlation between a width of Gauss line, g-factor, quality and quantity of impurities has not been found out. Possible introduction of Ge, Si and S into the crystalline lattice results in practically ideal g-factor and the least number of paramagnetic centers. The most number of defects is observed for DND obtained when blasting an explosive in pure water or in water with dissolved doping additives in it.*

**Key words:** detonation nanodiamonds, doping, synthesis, electronic paramagnetic resonance, Raman scattering, g-factor, paramagnetic centers.

### Литература

1. Строеие частиц химически модифицированного наноалмаза детонационного синтеза / И. И. Кулакова, В. В. Корольков, Р. Ю. Яковлев и др. // Породоразаушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2009 – Вып. 12. – С. 299–305.
2. Пат. 2109683 РФ, С01В 31/06. Способ выделения синтетических ультрадисперсных алмазов / В. Ю. Долматов, В. Г. Суцев, В. А. Марчуков, Т. М. Губаревич, А. П. Корженевский. – Опул. 27.04. 98, Бюл. № 12.
3. Пат. 2202514 РФ, МПК<sup>7</sup> С01В 31/06. Способ получения легированных ультрадисперсных алмазов / В. Ф. Герасименко, Л. Е. Колегов, В. А. Мазанов. – Опул. 20.04.2003.
4. Brosious P. R., Corbett J. W., Bourgoin J. C. EPR measurements in ion-implanted diamond // Phys. Status Solidi (a). – 1974. – 21. – P. 677–683.
5. Ройцин А. Б., Маевский В. М. Электронный парамагнитный резонанс поверхности твердых тел // Успехи Физических Наук. – 1989. – 159. – С. 297–333.
6. Поклонский Н. А., Лапчук Т. М., Горбачук Н. И. Измерение методом ЭСР размагничивающего поля на поверхности металлических образцов // Журн. прикладной спектроскопии. – 2001. – 68. – № 4. – С. 419–422.
7. The Properties of Natural and Synthetic Diamond / Ed. J. E. Field. – London: Acad. Press, 1992. – 710 p.
8. Баев В. Г., Лапчук Н. М. Релаксационные процессы в кристаллах синтетического алмаза с учетом квадратурного сигнала ЭСР // Доклады БГУИР. – 2007. – № 4 (20). – С. 93–100.
9. Поклонский Н. А., Потоцкий И. В., Горбачук Н. И. Увеличение парамагнетизма композитов (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/SiO<sub>2</sub> во время регистрации спектров ЭПР // Междунар. конф. «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», г. Санкт-Петербург, 5–7 июля 2004 г.: сб. тр. – СПб: Изд-во СПбГПУ, 2004 – Т. IV. – С. 151–152.



10. Коренблит И. Я., Шендер Е. Ф. Спиновые стекла и неэргодичность // Успехи физ. наук. – 1989. – **157**. – № 2. – С. 267–310.
11. Дорофеев Е. А., Доценко В. С. Спиновые стекла: новая термодинамика // Природа. – 1994. – № 12. – С. 12–22.
12. Имплантированный ионами ксенона кристалл природного алмаза; состояние спинового стекла / О. Н. Поклонская, Н. М. Лапчук, Н. А. Поклонский, С. А. Вырко // 8-я междунар. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом», г. Минск, 23–25 сент. 2009 г.: сб. тр. – Минск: БГУ, 2009. – С. 117–119.
13. Электронный спиновый резонанс и комбинационное рассеяние света в природном кристалле алмаза, имплантированном ионами бора с энергией 92 МэВ / О. Н. Поклонская, Н. М. Лапчук, Н. А. Поклонский и др. // 8-я междунар. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом», г. Минск, 23–25 сент. 2009 г.: сб. тр. – Минск: БГУ, 2009. – С. 120–122.
14. Kien Wen Sun, Ching Yao Wang. Optical properties of a single free standing nanodiamond // J. of Phys.: Conf. Series 92(2007) PHONONS 2007 IOP.
15. Laser heating versus phonon confinement effect in the Raman spectra of diamond nanoparticles / M. Chaigneau, G. Picardi, A. G Hugues et all. // J. of Nanoparticle Res. – 2012. – **14**, N 6. – P. 955.
16. Исследование строения графитов и других  $sp^2$ -углеродных материалов методами микроспектроскопии КР рентгеновской дифрактометрии / С. С. Букалов, Л. А. Михалицын, Я. В. Зубавичус и др. // Рос. Хим. журн. – 2006. – **59**, № 1. – С. 83–91.

Поступила 29.05.13

УДК 621.921.34:621.921.34–413:621.923.4:662.23.05

А. А. Шульженко, чл.-кор. НАН Украины<sup>1</sup>; Е. Е. Ашкинази, канд. техн. наук,  
В. Г. Ральченко, канд. физ.-мат. наук<sup>2</sup>; Л. Н. Александрова, канд. техн. наук;  
С. Н. Иванов; А. Н. Соколов, В. Г. Гаргин, кандидаты технических наук<sup>1</sup>; А. А. Хомич<sup>2</sup>;  
И. И. Власов, А. П. Большаков, кандидаты физ.-мат. наук<sup>2</sup>; С. Г. Рыжков<sup>2</sup>;  
В. И. Конов, чл.-кор. РАН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, г. Москва

## СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ГИБРИДНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ CVD АЛМАЗОВ И АЛМАЗНЫХ ПОРОШКОВ СТАТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

*Изучены структурные изменения в монокристаллическом CVD-алмазе, помещенного в оболочку из АКТМ, в результате воздействия высоких давлений и температур. Проведена оценка перспектив его использования в качестве рабочей части наконечника для измерения твердости сверхтвердых материалов четырехгранной пирамидой Виккерса.*

**Ключевые слова:** высокое давление, монокристалл, CVD-алмаз, твердость, индентор Виккерса, комбинационное рассеяние света

### Введение

Монокристаллический CVD алмаз, благодаря своим уникальным свойствам находит широкое применение в инструментах различного функционального назначения. В частности, в настоящее время усилия материаловедов направлены на решение такой фундаментальной проблемы, как управление структурой и свойствами материалов, полученных с