

поле при $\lambda = 18$ мкм сосредоточено ниже кремниевых островков в слое диоксида кремния. Пик поглощения на этой длине волны может быть обусловлен плазмонными модами, поддерживаемыми диэлектрическим слоем между слоями кремния [3]. Пространственное распределение электрического поля на длине волны $\lambda = 15$ мкм показывает его удержание в верхней и нижней частях кремниевых островков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом FDTD проведено моделирование спектра поглощения структуры Si/SiO₂/Si с периодом 8 мкм и размером островков 4 мкм. Показано, что полоса пропускания со средней поглощающей способностью более 90 %, составляет около 10 мкм. Проведен анализ пространственного распределения полей, полученного FDTD методом. Показано, что появление пиков поглощения в спектре исследуемой структуры можно объяснить наличием плазмонных колебаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Kaikai Du Wavelength and Thermal Distribution Selectable Microbolometers Based on Metamaterial Absorbers / Kaikai Du, Qiang Li, Weichun Zhang, Yuanqing Yang, Min Qiu// IEEE Photonics Journal. – Vol. 7. – Is. 3, – 2015.
2. Tan C. L., Mohseni H. Emerging technologies for high performance infrared detectors / C.L. Tan, H. Mohseni // Nanophotonics. – Vol. 8. – pp. 169-197. – 2018.
3. Gorgulu, K. All-Silicon Ultra-Broadband Infrared Light Absorbers / K. Gorgulu, A. Gok, M. Yilmaz // Scientific reports. – Vol. 6. – p. 38589.–2016.
4. Мухаммад, А.И., Гайдук П.И. Моделирование локализованных плазмонов в структурах на основе кремния // сборник статей 1 международной научно-технической конференции «ОПТО-, МИКРО И СВЧ ЭЛЕКТРОНИКА - 2018» г. Минск, 22-26 октября 2018 года, под редакцией Н.С. Казака [и др.]. – стр. 320-323. – 2018.
5. E. D. Palik, Handbook of optical constants of solids vol. 2, London: Academic Press, 1091 p, 1985.
6. Lumerical FDTD Solutions [Electronic resource]. Lumerical Solutions, Inc, 2003-2020, Mode of access: <http://www.lumerical.com/> - Date of access : 14.02.2020
7. Власов А. Г. Инфракрасные спектры неорганических стекол и кристаллов / Под редакцией Власова А. Г., Флоринской В. А. и др.// Химия, Ленинград, 1972, 304с– Р. 86–89.

ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРОВ ЭПР ОБРАЗЦОВ СПЕЧЕННЫХ ПОРОШКОВ НАНОАЛМАЗА ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА

**А. Н. Олешкевич¹, В. Ю. Долматов², Нгуен Тхи Тхань Бинь³, С. Мунгцецег⁴,
Г. Шилагарди⁴, Т. М. Лапчук¹, Н. М. Лапчук¹**

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: lapchukn@gmail.com,

²⁾ ФГУП «СКТБ «Технолог», 192076, пр. Советский, 33-а, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: diamondcentre@mail.ru

³⁾ Каунг Бинь университет, Провинция Каунг Бинь, Вьетнам, e-mail: binhnttquangbinhuni.edu.vn

⁴⁾ Национальный университет Монголии, Улан-Батор, Монголия,
e-mail: munkhtsetsegs@gmail.com

В работе исследуется влияние СВЧ излучения на структуру композиционного материала, полученного спеканием при высоком давлении (8 ГПа) и высокой температуре (1800 °С) порошка детонационного наноалмаза. Анализируются изменения па-

раметров спектров ЭПР исследуемых образцов при разных уровнях микроволнового излучения.

Ключевые слова: электронный парамагнитный резонанс; спекание; детонационные нанодиамазы; микроволновое излучение.

INFLUENCE OF THE POWER OF MICROWAVE RADIATION ON THE PARAMETERS OF EPR SPECTRA OF SAMPLES OF SINTERED DIAMOND NANODIAMOND POWDERS OF DETONATION SYNTHESIS

A. N. Oleshkevich¹, V. Yu. Dolmatov², Nguyen Thi Thanh Binh³,
S. Munkhtsetseg⁴, G. Shilagardi⁴, T. M. Lapchuk¹, N. M. Lapchuk¹

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

²⁾ *Federal State Unitary Enterprise "Special Design and Technological Bureau"Technologist",
St. Petersburg, Russia,*

³⁾ *Quang Binh university, Quang Binh province, Vietnam,*

⁴⁾ *National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia*

Corresponding author: N. M. Lapchuk (lapchukn@gmail.com)

The paper investigates the effect of microwave radiation on the structure of a composite material obtained by sintering at high pressure (8 GPa) and high temperature (1800 °C) of detonation nanodiamond powder. Changes in the parameters of the EPR spectra of the samples under study are analyzed at different levels of microwave radiation.

Key words: electron paramagnetic resonance; sintering; detonation nanodiamonds; microwave radiation.

ВВЕДЕНИЕ

В ряде метеоритных кратеров в застывших импактных расплавах кроме кварца часто встречаются гипербарические полиморфные модификации, возникшие за счет преобразования при высоких импульсных нагрузках таких минералов, как графит и ряд других углеродсодержащих материалов [1]. Характер преобразований в таких условиях углеродистого вещества остается пока неизвестным. Возможность использования в лабораторных условиях высоких импульсных механических и тепловых нагрузок на углеродистые вещества позволит установить основные закономерности, лежащие в основе целенаправленного структурирования таких материалов.

Структура углеродных материалов значительно изменяется в зависимости от условий синтеза и дальнейшей их обработки [2]. Это дает возможность получать необходимые физические характеристики материалов и использовать их в промышленности. Информация о влиянии различных методов обработки на тепловые, электрические, механические и другие свойства углеродного материала важна для целевого создания образцов с заданными функциональными параметрами [3]. Особенно углеродные материалы являются перспективными «строительными блоками» для создания устройств в нанoeлектронике, нанофотонике и высокочувствительных сенсоров с улучшенными механическими, электрическими, теплофизическими характеристиками.

Наука о нанокompозитных и наноструктурированных материалах развивается весьма интенсивно, невзирая на свою молодость. Сама идея исследования наноматериалов, в том числе нанокompозитов, прочно вошла в планы многих научных кол-

лективов уже к середине 1980-х гг. Изучение углеродных нанообъектов, по сравнению с другими наносистемами, проводится наиболее широко. В данной работе рассмотрим нанокпозиционный материал на основе порошка наноалмаза детонационного синтеза, спеченного при высоких давлениях и температурах. Исследуемый материал представляет научный интерес в области фундаментальных исследований, как новый композиционный материал.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Методом ЭПР исследовались порошкообразные образцы ДНА, и спеченные на их основе таблетки. Спекание порошкообразных образцов проводили при режиме термобарической обработки в вакууме 10^{-2} – 10^{-3} мм рт.ст. при давлении $P = 8$ ГПа и температуре $T = 1800$ °С в течение времени $t = 20$ секунд. Обработка исходных порошков ДНА высокими давлениями и температурой использовалась для проверки их влияния на структуру и парамагнетизм спеченных порошков ДНА. Исходный порошок ДНА был синтезирован путем подрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ) массой в 500 г, которое готовили прессованием. Регистрация спектров ЭПР осуществлялась на модифицированном спектрометре «RadioPAN» SE/X-2543 в X-диапазоне при включенной автоподстройке частоты клистрона по частоте СВЧ-резонатора с типом колебаний H_{102} . Поляризующее магнитное поле модулировалось с частотой 9,3 ГГц; чувствительность спектрометра $\approx 3 \cdot 10^{12}$ спин/мТл. Для контроля добротности резонатора и настройки фазы модуляции магнитного поля использовался сигнал ЭПР рубина.

Известно, что для исследования релаксационных процессов в парамагнитных образцах и для расчета времени парамагнитной релаксации необходимы измерения спектров ЭПР исследованных образцов при разном уровне мощности в резонаторе [4].

На рисунке 1 приведены фотография поверхности (а) и спектр ЭПР спеченного образца ДНА при $P = 8$ ГПа и $T = 1800$ °С за $t = 20$ с (б).

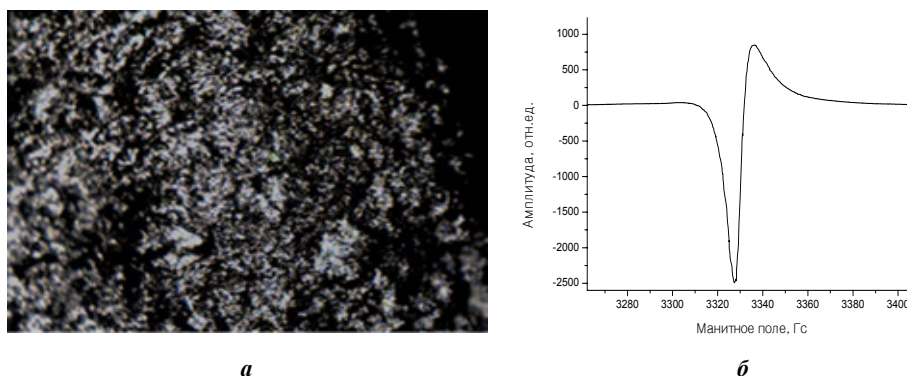


Рисунок 1. – Фотография поверхности (а) и спектр ЭПР спеченного образца ДНА при $P = 8$ ГПа и $T = 1800$ °С за $t = 20$ с

Спектр ЭПР зарегистрирован при максимальной мощности СВЧ излучения 200 мВт, что соответствует шкале ослабления микроволнового излучения в резонаторе 0 дБ. Параметры спектра ЭПР, приведенного на рисунке 1 равны: фактор спектроскопического расщепления $g = 2,00006 \pm 0,00003$, ширина линии $\Delta H = 8,94$ Гс, параметр асимметрии сигнала ЭПР $a/b = 2,92$. Асимметрия сигнала более, чем 2,7, свидетельствует, согласно теории Дайсона, о наличии в образце проводящих структур.

Нами анализировалась зависимость амплитуды первой производной сигнала поглощения от H_1 -компоненты СВЧ поля, нормированной на максимальное значение H_{10} , когда ослабление мощности равно 0 децибел (дВ). Мощность СВЧ излучения в резонаторе регулировалась с помощью аттенюатора с контролируемым ослаблением мощности.

На рисунке 2 показано влияние уровня мощности СВЧ в резонаторе на амплитуду (а) и на характер изменения параметра асимметрии (б) спектра ЭПР спеченного образца ДНА.

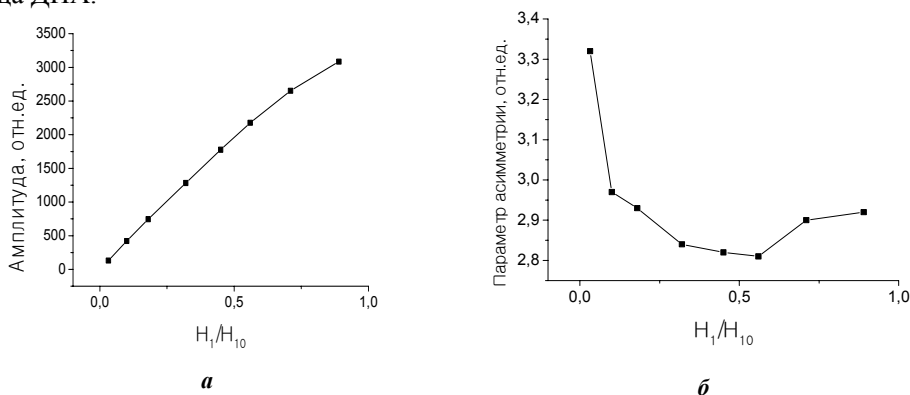


Рисунок 2. – Зависимость амплитуды (а) и параметра асимметрии (б) сигнала спектров ЭПР спеченного образца ДНА ($P = 8$ ГПа, $T = 1800$ °С, $t = 20$ с) от уровня мощности СВЧ в резонаторе. Погрешность измерения параметров сигнала $\pm 0,01$

Из рисунка 2, а видно, что зависимость имеет слабо насыщающийся характер. Расчет времен спин-решеточной (T_1) и спин-спиновой релаксации (T_2) показал: $T_1 = 5,46 \cdot 10^{-6}$ с, $T_2 = 8,16 \cdot 10^{-9}$ с. Такие короткие времена парамагнитной релаксации свидетельствуют о наличии в образцах большого числа дефектов, таких как границы раздела двух фаз, например, «графит-алмаз» и других дефектов, обусловленных напряжениями внутри структуры спеченного композита.

На рисунке 3 представлены изменения величины фактора спектроскопического расщепления (а) и ширины линии сигнала ЭПР исследуемого образца.

Исследование влияния мощности СВЧ излучения на спиновую систему спеченных образцов ДНА показало, что существуют как минимум две подсистемы спинов, которые по-разному реагируют на возрастание уровня мощности СВЧ в резонаторе. Так, при увеличении уровня мощности одна спиновая система, участвуя в резонансном поглощении СВЧ излучения, приводит к уменьшению ширины линии спектров ЭПР, g-фактора и параметра асимметрии линии, что видно из рисунков 2 и 3. При уровне мощности СВЧ порядка 100 мВт и выше начинает проявлять свой вклад в поглощение система спинов, приводящая к увеличению значений этих же параметров спектров ЭПР.

Так уменьшение параметра асимметрии с увеличением мощности СВЧ, как видно из рисунка 2, б, свидетельствует об уменьшении проводимости образца. Изменение величины фактора спектроскопического расщепления (рисунок 3, а), также свидетельствует о том, что при разных уровнях мощности проявляется вклад как спинового момента электрона, когда g-фактор уменьшается, так и орбитального момента, когда g-фактор увеличивается с увеличением мощности микроволнового излучения.

Все это коррелирует с изменением ширины линии спектра ЭПР. Как видно из рисунка 3, б, минимальная ширина сигнала наблюдается при уровне мощности СВЧ порядка 100 мВт.

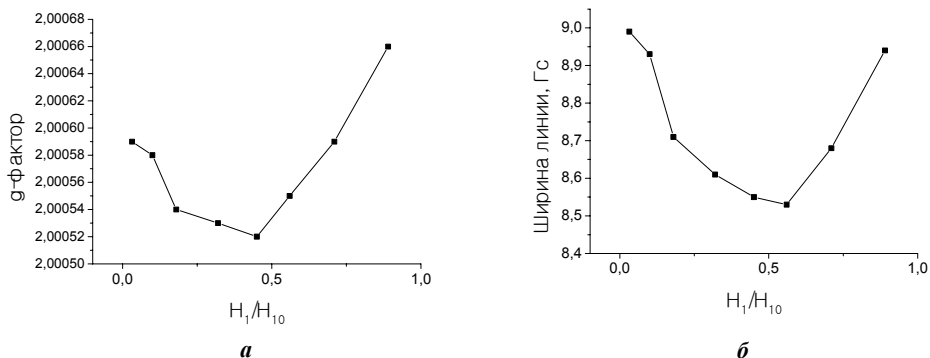


Рисунок 3. – Зависимость g-фактора и ширины линии спектров ЭПР спеченного образца ДНА ($P = 8$ ГПа, $T = 1800$ °С, $t = 20$ с) от уровня мощности СВЧ в резонаторе. Погрешность измерения ширины линии $\pm 0,03$ Гс

Известно, что СВЧ-нагрев происходит при преобразовании энергии электромагнитного поля в тепловую энергию [5–7]. Существует два принципиально различных механизма этого процесса: индукционный и диэлектрический. Индукционный механизм имеет место в материалах с высокой электропроводностью, таких как, к примеру, медь или другие металлы. Под воздействием переменного электромагнитного поля, в таких материалах, индуцируются вихревые токи и нагрев происходит за счет резистивных потерь. С другой стороны, диэлектрический механизм нагрева реализуется в непроводящих материалах. В переменном электромагнитном поле полярные молекулы диэлектрика стремятся переориентироваться вдоль вектора напряженности электрического поля в волне, причем делают это многократно с частотой внешнего воздействия. В условиях плотного окружения они вынуждены преодолевать сопротивление соседей, что приводит к трению, которое и вызывает нагрев.

Из приведенных выше результатов исследования, видно, что параметры спектров ЭПР в спеченных порошках ДНА очень чувствительны к уровню мощности СВЧ в резонаторе. Можно предположить, что для данных образцов тепловой разогрев при поглощении микроволнового излучения становится существенным при мощности свыше 100 мВт. Разогрев образца может происходить на границах раздела «графит-алмаз» и приводить к освобождению летучих компонент, таких как кислород и водород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследуя методом ЭПР спеченные при высоком давлении и температуре порошки детонационного наноалмаза, было показано, что параметры спектров ЭПР таких образцов чувствительны к уровню мощности СВЧ излучения. Изменения в спектрах происходят вследствие микроволнового разогрева на границах раздела между проводящей и диэлектрической областями образцов полученного спеканием композиционного материала. Установлено, что локальный тепловой разогрев при поглощении микроволнового излучения образцом становится существенным при мощности свыше 100 мВт, что приводит к увеличению значений основных параметров спектров ЭПР, обусловленному разрывом химических связей и освобождению летучих компонентов, таких как кислород и водород.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Минеральные ассоциации и минералогические критерии генезиса астроблем / В.Л. Масайтис, М.А. Гневушев, Р.И. Шафрановский // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. – 1979. – Вып. 3. С. 257–273.
2. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе / А.С. Фиалков. – М. : Аспект-пресс, 1997. – 717 с.
3. Haddad, M. Study of trimming damages of CFRP structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behavior / M. Haddad, R. Zitoune, H. Bougherara, F. Eyma, V. Castanié // Composites Part B: Engineering. – 2014. – V. 57. – P. 136–143.
4. Пул, Ч. Техника ЭПР-спектроскопии / Ч. Пул. – М.: Мир, 1970. – 557 с.
5. Микроволновый нагрев диэлектриков в рабочей камере с ограниченным объемом / В.И. Анфиногентов, Т.К. Гараев, Г.А. Морозов // Электронное приборостроение. – 2002. – Вып. 1(22). – С. 62.
6. Математическое моделирование микроволнового нагрева трехмерной диэлектрической среды / В.И. Анфиногентов, Т.К. Гараев, Г.А. Морозов // Электронное приборостроение. – 2003. – Вып. 6(34). – С. 64.
7. Abramovitch, R. Application of microwave energy to organic synthesis: improved technology / R. Abramovitch, D. Abramovitch, K. Iyanar, K. Tamareselvy // Tetrahedron Lett. – 1991. – V. 32, № 39. – P.5251–5254.

СИНХРОНИЗАЦИЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ БИСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ В ЭЛЕМЕНТЕ РЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГАФНИЯ

Д. А. Подрябинкин

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск, Беларусь, e-mail: podryabinkin@bsuir.by*

Приведены результаты моделирования синхронизации переключения бистабильных состояний в элементе резистивной памяти на основе оксида гафния, стимулированного шумом из состояния с высоким сопротивлением в состояние с низким сопротивлением.

Ключевые слова: оксид гафния; резистивная память; переключение сопротивления; бистабильные состояния; синхронизация.

SYNCHRONIZATION OF SWITCHING OF BISTABLE STATES IN A RESISTIVE MEMORY ELEMENT BASED ON HAFNIUM OXIDE

D. A. Podryabinkin

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Browka 6, 220013, Minsk, Belarus
Corresponding author: D. A. Podryabinkin (podryabinkin@bsuir.by)*

The results of modeling the synchronization of switching of bistable states in a resistive memory element based on hafnium oxide, stimulated by noise from a state with a high resistance to a state with a low resistance, are presented.

Key words: hafnium oxide; resistive memory; switching resistance; bistable states; synchronization.