

7. Бочечка А. А. Влияние десорбированных газов на спекание алмазных порошков под действием высокого давления // Сверхтвердые матер. – 1998. – № 4. – С. 10–16.

Поступила 07.07.17

УДК 544.65 : 539.233

А. А. Шульженко, член-корр. НАН Украины¹; **L. Jaworska**, dr hab. inż.²;
Л. А. Романко, **А. Н. Соколов**, **В. Г. Гаргин**, кандидаты технических наук¹;
А. Д. Шевченко, д-р техн. наук³

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

²The Institute of Advanced Manufacturing Technology, Krakow, Poland

³Институт металлофизики им. В. Г. Курдюмова НАН Украины, г. Киев

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛМАЗНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Исследованы электрофизические свойства (электропроводность, магнитные характеристики) полученного НРНТ-спеканием поликристаллического сверхтвердого материала на основе алмаза, n-слоистого графена и оксида графена.

Установлено, что с увеличением содержания графена в алмазном поликристаллическом компакте резко (почти в 4 раза) снижается удельное электросопротивление. При одинаковом содержании n-слоистого графена в поликристаллическом композите его удельное электросопротивление зависит от размеров алмазных зерен: с их уменьшением удельное электросопротивление снижается. Ферромагнитные свойства в полученных поликристаллических алмазных композитах могут формироваться как вследствие ферромагнитных примесей в порошках природного алмаза, а также примесей и включений металлов-растворителей углерода (Ni, Fe, Co) в порошках синтетического алмаза, так и спонтанного магнитного упорядочения в нанографеновых слоях.

Ключевые слова: алмаз, графен, высокое давление, композит, электропроводность, петля гистерезиса.

Введение

Относительно электрических свойств алмаз представляет собой изолятор. Вместе с тем путем легирования растущих кристаллов алмаза в процессе синтеза донорной или акцепторной примесью (например, бором, фосфором) в достаточной концентрации были получены алмазы с полупроводниковым [1] и металлическим [2] типами проводимости, а также сверхпроводимостью [3].

В случае алмазных поликристаллов электрическая проводимость реализуется в основном за счет дислокационной проводимости (образования в алмазном поликристалле дислокационных проводящих каналов с полупроводниковыми характеристиками) [4]. В случае повышения температуры спекания определенного значения дислокационный механизм проводимости изменяется на фрактальный. Повысить электропроводность поликристаллов возможно путем создания в каркасе поликристалла проводящих каналов, формирующихся благодаря содержанию в исходных порошках для спекания примесей, количество и фазовый состав которых может быть существенным [5].

Одним из перспективных путей модифицирования свойств алмазных поликристаллических композиционных материалов, позволяющих значительно расширить область их применения, является введение в структуру материала небольшого количества наноразмерной электропроводящей фазы, например, *n*-слоистого графена [6].

Выбор в качестве электропроводящей добавки *n*-слоистого графена обусловлен тем, что благодаря уникальным свойствам (высокому коэффициенту теплопроводности в сочетании с высокими электрическими и механическими характеристиками, а также химической и термической стабильности), графены различного строения (моно- и *n*-слоистые с $n = 1-20$) и размеров (от микронных до нанодиапазона) с недавнего времени активно изучают относительно возможности их использования в качестве компонента, способного формировать электропроводящие свойства материалов при сохранении их других свойств [7].

Цель настоящей работы – исследовать электрофизические свойства (электропроводность, магнитные характеристики) полученного НРНТ-спеканием поликристаллического сверхтвердого материала на основе алмаза, *n*-слоистого графена и оксида графена.

Материалы и методика экспериментов

В качестве исходных материалов использовали микропорошки синтетического алмаза АСМ 20/10 и АСМ 40/28 [8], микропорошок природного алмаза АМ 14/10 [9] и порошки *n*-слоистого графена двух типов: марки Gn(4) (фирма «Chear Tubes Inc.», США) [10], частицы которого состоят из нанопластинок, представляющих собой стопку из менее четырех слоев графена, и марки N002-PDR (фирма «Angstrom Materials», Корея) [11], представляющих собой стопку из менее трех слоев графена. Удельный насыпной объем порошка графена марки N002-PDR значительно превышал этот показатель порошка графена марки Gn(4).

Наряду с графеном использовали также оксид графена. Выбирали эту добавку из следующих соображений. В отличие от графена проводимость оксида графена значительно ниже. Однако очень часто в экспериментах используют восстановленный оксид графена, получаемый путем термообработки при температуре 800–1100 °С, основная цель которой заключается в восстановлении высокой проводимости графена [12]. В этой связи представляет интерес исследовать влияние на оксид графена совместного воздействия высокого давления и температуры, а также выявить общие закономерности и различия в формировании электрофизических свойств алмазного поликристалла с добавками графена и оксида графена. В экспериментах использовали оксид графена марки SLGO (Single Layer Graphene Oxide) фирмы «Chear Tubes Inc.» США [13] с толщиной слоя $1,1 \pm 0,2$ nm, а для сравнения – лабораторный образец многослойного (два – четыре слоя) оксида графена.

Исходную шихту для спекания брали как однокомпонентную (порошок АСМ 40/28), так и двухкомпонентную, содержащую алмазные микропорошки и 0,1–1,0% (по массе) графена (или 0,2–0,3% (по массе) оксида графена).

Спекание при высоком давлении проводили на прессовой установке ДО-043, развивающей усилие до 20 МН с использованием аппарата высокого давления типа «тороид» конструкции ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины с центральным углублением диаметром 30 мм. Шихту для спекания в защитной оболочке из ниобиевой фольги размещали в отверстиях многопозиционной матрицы [14], которую, в свою очередь, помещали в составной контейнер, центральная часть (втулка) которого выточена из литографского камня, периферийная часть тороидальной формы спрессована из смеси крошки литографского камня со связующим. Спекали шихту при давлении 7,0 ГПа, температуре 1470–1970 К в течение приблизительно 60 с.

Методика измерения сопротивления полученных образцов электропроводящего поликристаллического сверхтвердого материала на основе алмаза и *n*-слоистых графенов основана на регистрации падения напряжения на образце в зависимости от силы тока, проходящего через образец. Для измерения образец зажимали непосредственно между

измерительными электродами. При этом измеряли объемные характеристики образца. Для измерения сопротивления на образцы методом магнетронного распыления в вакууме наносили электроды из меди [6].

Сопротивления определяли на омическом участке вольтамперной характеристики (ВАХ).

Удельное сопротивление рассчитывается по формуле $\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{S_{эл}}{h}$, где U – падение напряжения на образце; I – сила тока через образец; $S_{эл}$ – площадь измерительных электродов; h – толщина образца. Для исключения влияния внешних воздействий температурную зависимость электропроводности (σ) измеряли в малоинерционном вакуумном криостате ($P \cong 10^{-3}$ Па) в температурном интервале 300–500 К в режиме стабилизации температуры. Стабилизировали температуру с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$ во всем температурном диапазоне. Силу тока измеряли электрометром В7-49, позволяющим регистрировать силу тока 10^{-3} – 10^{-13} А. Падение напряжения на образце измеряли нановольтметром NV-724 в интервале 10^{-7} – 10^{-3} В.

Магнитные характеристики образцов исследовали методом магнитометрии с помощью вибрационного магнитометра «Vibrating Magnetometer 7404 VSM» (фирмы «Lake Shore Cryotronics, Inc.», США) [15] в магнитных полях напряженностью до 13 кЭ. Чувствительность магнитометра составляла 10^{-7} эмо, что позволяло измерять магнитный момент образцов массой до единиц миллиграмм. Массу исследуемых образцов определяли с помощью электронных микровесов АВ135-S/ФАСТ с автокомпенсацией (фирмы «Mettler Toledo», Швейцария). Чувствительность весов составляла 10^{-5} г.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты измерения электросопротивления образцов, полученных спеканием шихты, содержащей микропорошок алмаза АСМ 40/28 с добавкой графена Gn(4) и без него, приведены в табл. 1.

Для сравнения в табл. 1 приведены значения удельного электросопротивления алмазного композиционного поликристаллического материала (АКТМ), полученного НРНТ-спеканием в присутствии активирующей спекания добавки кремния. В последнем случае [16] носители заряда переносятся по межкристаллитным границам основной связующей фазы – SiC высокой электропроводности.

Таблица 1. Электросопротивление полученных НРНТ-спеканием образцов с различным содержанием графена Gn(4) и без него

Содержание графена в шихте, % (по массе)	Активирующая спекание добавка	Удельное электросопротивление, Ом·см	Примечание
0,1	–	135	
0,5	–	2,8	[6]
1,0	–	0,76	[6]
0	Si	235	[16]

Как следует из данных табл. 1, с увеличением содержания графена в алмазном поликристаллическом компакте резко (почти в 4 раза) снижается удельное электросопротивление. Однако, при содержании графена более 1,0% (по массе) ухудшаются физико-механические свойства алмазного поликристаллического компакта из-за снижения прочности формируемых при спекании межкристаллитных границ алмаз – алмаз [5].

Результаты исследования температурной зависимости электросопротивления (рис. 1) показали, что с повышением температуры сопротивление образцов снижается, что характерно

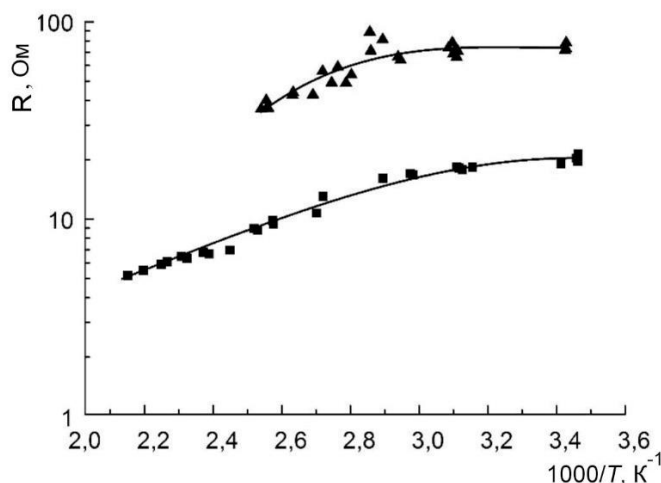


Рис. 1. Температурная зависимость электросопротивления образцов поликристаллического сверхтвёрдого материала на основе алмаза при содержании графена Gn(4) в шихте (по массе): ▲ – 0,5%; ■ – 1,0%

для полупроводникового типа проводимости.

Результаты изучения электросопротивления поликристаллических компактов, полученных спеканием природных алмазных микропорошков разной зернистости с добавкой графена различных марок приведены в табл. 2. Для удаления влаги и других летучих примесей образцы предварительно термообработывали при температуре $T = 700$ К.

Согласно приведенным в табл. 2 данным при одинаковом содержании n-слоя графена в поликристаллическом композите его удельное электросопротивление зависит от размера алмазных зерен: с их уменьшением удельное

электросопротивление снижается. В то же время при уменьшении количества слоев в графене удельное электросопротивление существенно (на два порядка) повышается.

Таблица 2. Электросопротивление алмазных поликристаллических композитов, различающихся размерами зерен и марками добавленного графена

Алмазный микропорошок	Содержание графена, % (по массе)	Удельное электросопротивление, Ом·см
АМ 20/14	0,1 Gn(4)	$3,38 \cdot 10^3$
АМ 14/10	0,1 Gn(4)	$1,55 \cdot 10^2$
АМ 20/14	0,1 N002-PDR	$3,23 \cdot 10^5$

Согласно приведенным в табл. 2 данным при одинаковом содержании n-слоя графена в поликристаллическом композите его удельное электросопротивление зависит от размера алмазных зерен: с их уменьшением удельное электросопротивление снижается. В то же время при уменьшении количества слоев в графене удельное электросопротивление существенно (на два порядка) повышается.

Электрофизическими измерениями также установлено, что в образцах, содержащих добавку графена Gn(4), при увеличении и уменьшении прикладываемого напряжения вольт-амперные характеристики практически не отличаются. Это свидетельствует об отсутствии поляризации образцов в электрическом поле.

Результаты измерения температурных зависимостей удельного электросопротивления этих образцов показаны на рис 2.

Для установления влияния НРНТ-обработки на электрические свойства многослойного оксида графена его термообработали при температуре 1470 К и давлении 7,0 ГПа. После

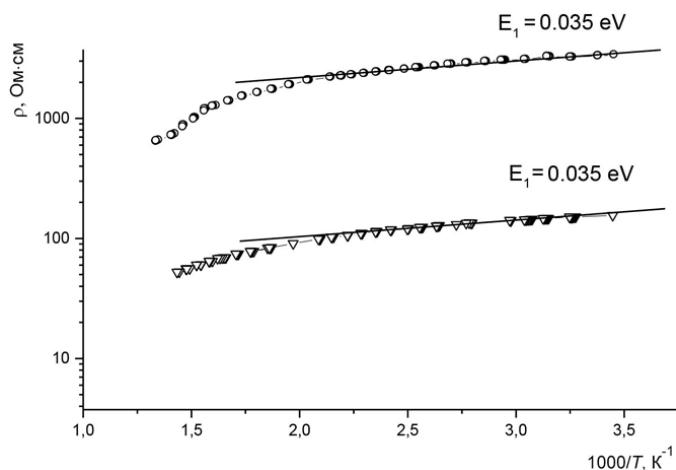


Рис. 2. Температурные зависимости удельного сопротивления алмазных композитов с добавлением графена 0,1 % (по массе) Gn(4), спеченных из алмазных микророшков АМ 20/14 (○) и АМ 14/10 (▽)

полученного НРНТ-спеканием алмазного микророшка АСМ 40/28 с добавлением 0,2% (по массе) многослойного оксида графена, составило $1,6 \cdot 10^4$ Ом·см.

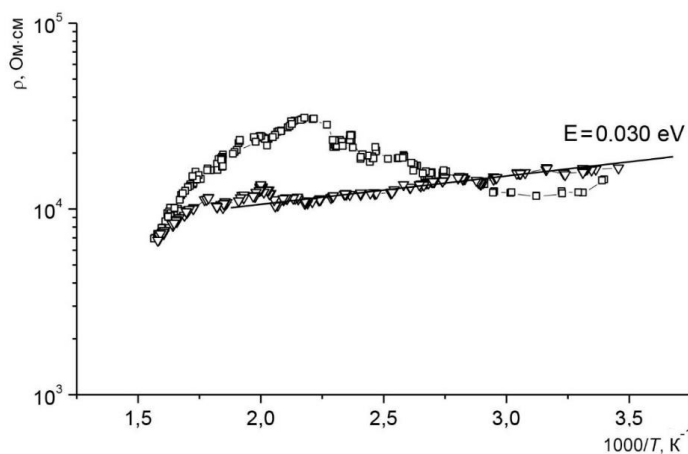


Рис. 3. Температурные зависимости удельного сопротивления алмазного композита с добавкой 0,2% (по массе) многослойного оксида графена: □ – исходное измерение; ▽ – повторное после термообработки

возрастает с повышением температуры на конечном температурном интервале. При последующих измерениях после термообработки наблюдается характерное для полупроводников увеличение проводимости при повышении температуры (рис. 3).

Электрофизическими исследованиями образцов алмазных композитов, полученных спеканием алмазных микророшков АСМ 20/10 и АСМ 40/28 с добавлением 0,3% (по массе) монослойного оксида графена марки SLGO, предварительно термообработанного в среде аргона при температуре 1100 °С, установлено, что в первом случае удельное электросопротивление

после термообработки его удельное электросопротивление составило $3,0 \cdot 10^{-2}$ Ом·см, до НРНТ-обработки – $3 \cdot 10^4$ Ом·см, т.е. проводящие свойства материала существенно восстанавливаются. Тем не менее, электрическая проводимость на порядок ниже, чем в случае восстановленного оксида графена: $(0,76-2,9) \cdot 10^{-3}$ Ом·см [12]. Следовательно, при термообработке при температуре 1470 К и давлении 7,0 ГПа восстанавливается многослойный оксид графена лишь частично.

Удельное электросопротивление алмазного поликристаллического композита,

согласно полученным данным удельное сопротивление образцов алмазного композита с добавлением многослойного оксида графена на два порядка выше, чем для образцов с добавкой графена Gn(4). При этом в образцах образуются объемные заряды, что характерно для поведения высокоомных материалов с неоднородной структурой в электрическом поле. Исследованием температурной зависимости установлено, что с повышением температуры разрушается объемный заряд с компенсацией носителей заряда. При этом наблюдается аномальная зависимость удельного сопротивления от температуры, а именно, удельное сопротивление

составляло $9,98 \cdot 10^3$ Ом·см, а во втором – $4,10 \cdot 10^6$ Ом·см. Таким образом, снижение зернистости спекаемого алмазного микропорошка способствует снижению удельного электросопротивления так же, как при использовании в качестве добавки графена.

В то же время вопреки ожиданиям предварительная термообработка оксида графена не способствовала повышению электропроводности алмазных композитов. Возможно, это связано с затрудненным восстановлением монооксида графена как при отжиге, так и в условиях высоких давления и температуры, что коррелирует с экспериментальными данными [17]. Кроме того, этот результат коррелирует с данными, полученными при спекании композитов с добавлением различных марок графенов – удельное электросопротивление композитов с добавлением графена марки N002-PDR (с количеством слоев меньше трех) и восстановленного оксида графена SLGO (монослойный оксид графена) имеют один и тот же порядок.

В температурном интервале 20–100 °С энергия активации проводимости примерно одинаковая для образцов как с добавлением монослойного графена, так и многослойного, и составляет $E = 0,03\text{--}0,05$ эВ и изменяется с изменением температуры (рис. 4).

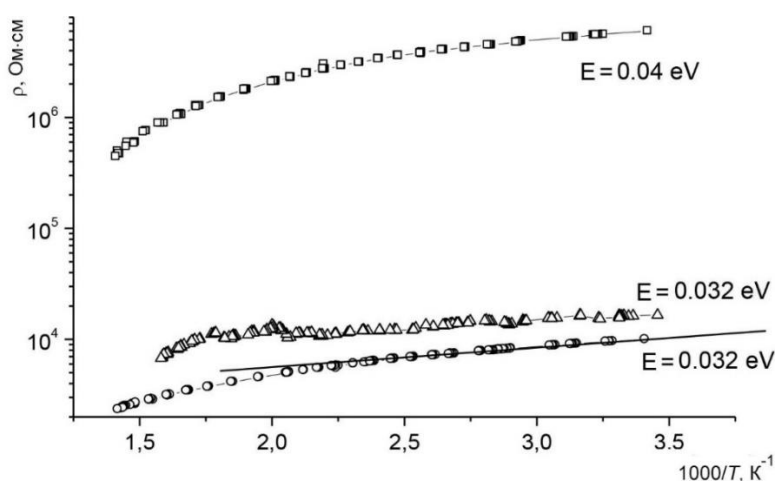


Рис. 4. Температурные зависимости удельного сопротивления алмазных композитов состава: □ – АСМ 40/28 + 0,3% (по массе) термообработанного оксида графена марки SLGO; Δ – АСМ 20/10 + 0,3% (по массе) термообработанного оксида графена марки SLGO; ○ – АСМ 40/28 + 0,2% (по массе) многослойного оксида графена

Таким образом, применение в качестве добавки оксида графена требует дополнительных исследований. В дальнейшем планируется использовать его при разработке технологий получения алмазных поликристаллических материалов с высокой электрической проводимостью.

Результаты исследования магнитных свойств, полученных образцов алмазных композитов, показаны на рис. 5 и приведены табл. 3.

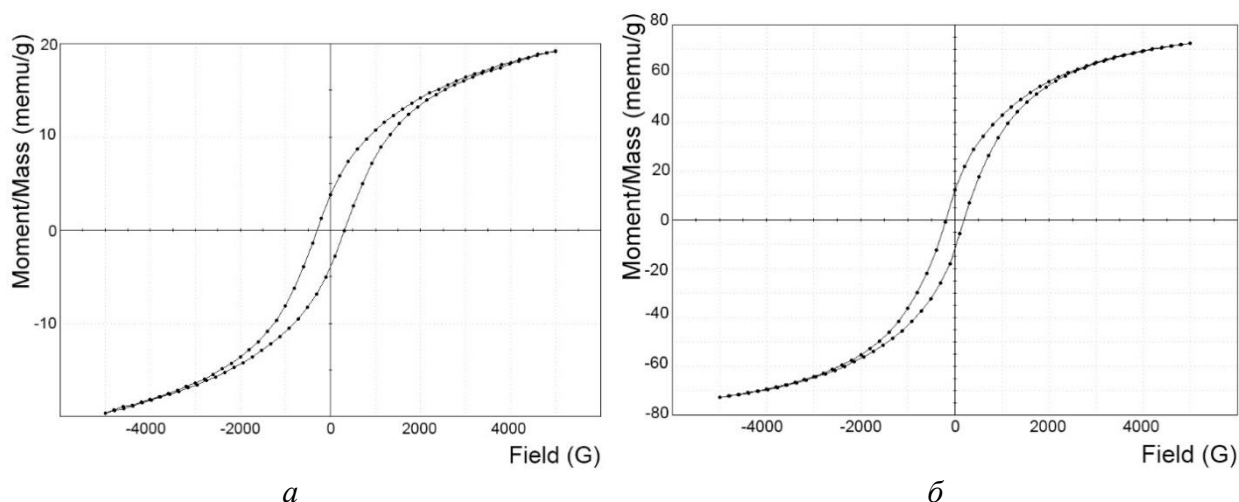


Рис. 5. Петля гистерезиса в образцах алмазного композита состава: а – микророшок природного алмаза АМ 14/10 и 0,3% (по массе) графена G_n(4); б – микророшок синтетического алмаза АСМ 40/28 и 0,5% (по массе) графена G_n(4)

Таблица 3. Магнитные свойства образцов алмазного поликристаллического композита различного состава

Образец	Магнитный момент насыщения m_s , эмо/г	Коэрцитивная сила H_c , э	Площадь петли гистерезиса, эрг/г
АСМ 40/28 + 0,5% (по массе) графена G _n (4)	$72,561 \cdot 10^{-3}$	189,79	39,66
АСМ 40/28 + 1,0% (по массе) графена G _n (4)	$75,435 \cdot 10^{-3}$	215,01	43,67
АМ 10/14 + 0,3% (по массе) графена G _n (4)	$19,423 \cdot 10^{-3}$	303,22	15,99

Проанализировав данные рис. 5 и табл. 3, пришли к следующим выводам. Петля гистерезиса указывает на наличие ферромагнитных свойств образцах. Напряженность магнитного поля H_{ms} , при которой достигается магнитный момент насыщения m_s , во всех случаях составляет 5000 э. По коэрцитивной силе образцы относятся к магнитотвердым материалам, таким как сплавы викаллой и кунифе, кунико, Fe-Co-Cr, применяемые для изготовления постоянных магнитов [18]. При увеличении содержания графена с 0,5 до 1,0% (по массе) коэрцитивная сила возрастает примерно на 14%; уменьшение размера зерен спекаемых алмазных порошков влияет существенно: коэрцитивная сила возрастает в 1,4–1,6 раза, при этом магнитные потери, определяемые по площади петли гистерезиса, уменьшаются в 2,5–2,7 раза.

Природа проявления ферромагнитных свойств в исследуемых образцах может определяться несколькими причинами. Как известно, беспримесный алмаз является диамагнетиком, а магнитные свойства реальных порошков алмаза, как и электрические, зависят от наличия в них примесей и включений [19]. Однако, в последние десятилетия появились публикации, посвященные анализу условий, при которых углерод может проявлять ферромагнитные свойства [20–23]. В частности, было показано, что при определенных

экстремальных условиях, таких как, например, высокие температуры, давления, возникает особое упорядочение углеродных атомов, благоприятное для спонтанного намагничивания.

Таким образом, ферромагнитные свойства полученных нами поликристаллических алмазных композитах могут формироваться как вследствие содержания ферромагнитных примесей в порошках природного алмаза, а также примесей и включений металлов-растворителей углерода (Ni, Fe, Co) в порошках синтетического алмаза, так и спонтанного магнитного упорядочения в нанографеновых слоях, появление которого регулируется искажениями решетки, вызванными электрон–фононным взаимодействием [23].

Следовательно, совершенствование технологии получения алмазных поликристаллических композитов с добавлением n-слоиных графенов с ферромагнитными свойствами позволит расширить области применения алмазных композитов, в частности, для создания постоянных магнитов.

Кроме того, если дальнейшие экспериментальные исследования приведут к воспроизводимым результатам, подтверждающим гипотезу об индуцированном магнетизме в n-слоиных графенах, это откроет перспективы использования поликристаллических алмазных композитов с добавлением n-слоиных графенов в медицине и биологии как уникальных биосовместимых магнитов.

Выводы

1. Увеличение содержания графена в алмазном поликристаллическом компакте приводит к резкому (почти в 4 раза) снижению удельного электросопротивления. При одинаковом содержании n-слоиного графена в поликристаллическом композите его удельное электросопротивление зависит от размеров алмазных зерен: с их уменьшением удельное электросопротивление снижается. В то же время при уменьшении количества слоев в графене удельное электросопротивление существенно (на два порядка) возрастает.

2. Удельное сопротивление образцов алмазного композита с добавлением многослойного оксида графена на два порядка выше, чем образцов с добавкой графена Gp(4). При этом в образцах образуются объемные заряды, что характерно для поведения высокоомных материалов с неоднородной структурой в электрическом поле.

3. Предварительная термообработка оксида графена не способствовала повышению электропроводности алмазных композитов. Возможно это, связано с затрудненным восстановлением монооксида графена, как при отжиге, так и в условиях высоких давления и температуры.

4. Ферромагнитные свойства полученных нами поликристаллических алмазных композитов формируются как вследствие ферромагнитных примесей в порошках природного алмаза, а также примесей и включений металлов-растворителей углерода (Ni, Fe, Co) в порошках синтетического алмаза, так и спонтанного магнитного упорядочения в нанографеновых слоях.

5. При увеличении содержания графена с 0,5 до 1,0% (по массе) коэрцитивная сила возрастает примерно на 14%; с уменьшением размеров зерен спекаемых алмазных порошков влияние существенное: коэрцитивная сила возрастает в 1,4–1,6 раза. При этом магнитные потери, определяемые по площади петли гистерезиса, уменьшаются в 2,5–2,7 раза.

6. Совершенствование технологии получения алмазных поликристаллических композитов с добавлением n-слоиных графенов с ферромагнитными свойствами позволит расширить области применения алмазных композитов, в частности, для создания постоянных магнитов, в перспективе – уникальных биосовместимых магнитов.

Досліджено електрофізичні властивості (електропровідність, магнітні властивості) отриманого HPNT-спіканням полікристалічного надтвердого матеріалу на основі алмазу, n-шарового графену і оксиду графену.

Встановлено, що зі збільшенням вмісту графену в алмазному полікристалічному компактті різко (майже в 4 рази) знижується питомий електроопір. За однакового вмісту n-шарового графену в полікристалічному композиті, його питомий електроопір залежить від розміру алмазних зерен: – з їх зменшенням питомий електроопір знижується. Ферромагнітні властивості в отриманих полікристалічних алмазних композитах можуть формуватись як внаслідок вмісту ферромагнітних домішок у порошках природного алмазу, а також домішок і включень металів-розчинників вуглецю (Ni, Fe, Co) у порошках синтетичного алмазу, так і спонтанного магнітного впорядкування в нанографенових шарах.

Ключові слова: алмаз, графен, високий тиск, композит, електропровідність, петля гістерезису.

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF DIAMOND COMPOSITE MATERIAL

A study of the electrical properties (electrical conductivity, magnetic characteristics) of a polycrystalline superhard material obtained by HPNT sintering, based on diamond, n-layer graphene and graphene oxide was made.

It is established that an increase in the content of graphene in a diamond polycrystalline compact leads to a sharp (almost 4 times) decrease in the resistivity. With the same content of n-layer graphene in the polycrystalline composite, its specific electrical resistance depends on the size of the diamond grains – as the grain size decreases, the resistivity also decreases. The formation of ferromagnetic properties in the obtaining polycrystalline diamond composites can be due either to ferromagnetic impurities in natural diamond powders and impurities and the inclusion of carbon-soluble metals (Ni, Fe, Co) in synthetic diamond powders or as a result of spontaneous magnetic ordering in nanographene layers.

Key words: diamond, graphene, high pressure, composite, electrical conductivity, hysteresis loop.

Литература

1. Tsay F. Y., Ananthanarayanan K. P., Giellisse P. J., Mitra S. S. // Electrical conductivity of heavily doped diamond. – J. Appl. Phys. – 1972. – 43. – N 9. – P. 3677–3682.
2. Вишне夫斯基 А. С., Гонтарь А. Г., Торишний В. И., Шульженко А. А. Электропроводность сильно легированного алмаза p-типа // ФТП. – 1981. – 15. – № 6. – С. 1145–1149.
3. Superconductivity in diamond / E. A. Ekimov, V. A. Sidorov, E. D. Bauer et al. // Nature. – 2004. – 428. – N 6982. – P. 542–545.
4. Самсоненко С. Н. Одномерная дислокационная электрическая проводимость поликристаллических алмазных компактов // ФТВД. – 2011. – 21. – № 1. – С. 26–32.
5. Special features of magnetoresistance in nanostructural diamond compacts / V. M. Dmitriev, A. V. Terekhov, V. N. Uvarov et al. // J. Superhard Mater. – 2011. – 33. – N 1. – P. 29–33.
6. Electrically conductive polycrystalline super hard material based on diamond and n-layer graphene's / A. A. Shul'zhenko, L. Jaworska, A. N. Sokolov // Chemistry and chem. technol. – 2016. – V. 59. – N 8. – P. 69–74.
7. Сорокин П. Б. Теоретические исследования физико-химических свойств низкоразмерных структур: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния». – М., 2014. – 324 с.
8. Государственный стандарт Украины 3292-95. Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия. – К.: Госстандарт Украины. 1995. – 71 с.
9. ГОСТ 9206-80. Порошки алмазные. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 55 с.

10. Graphene Nanoplatelets [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.cheaptubes.com/product-category/graphene-nanoplatelets/
11. N002-PDR Few Layer Graphene Powder [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.angstrommaterials.com/shop/n002-graphene-powder/>.
12. Pei S., Cheng H.-M. The reduction of graphene oxide // Carbon – 2012. – 50. – N 9. – P. 3210–3228.
13. Single Layer Graphene Oxide [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.cheaptubes.com/product/single-layer-graphene-oxide/>
14. Фазовые превращения n-слойных графенов в алмаз в условиях высоких давлений и температур / А. А. Шульженко, Л. Яворска, А. Н. Соколов и др. // Сверхтвердые матер. 2017. – № 2. – С. 3–13.
15. Model 7404. Vibrating Sample Magnetometer [Электронный ресурс] – // <http://www.askcorp.co.kr/sub/newpro/7404.pdf>.
16. Влияние некоторых добавок на прочность и электрофизические свойства композита алмаз – карбид кремния / А. А. Шульженко, В. Г. Гаргин, А. А. Бочечка, Л. А. Романко // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: сб. науч. тр. / Отв. ред. А. А. Шульженко. – К.: Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2000. – С. 79–88.
17. Однослойные пленки оксида графена на поверхности кремния / А. Е. Алексенский, П. Н. Брунков, А. Т. Дидейкин и др. // Журнал техн. физики. – 2013. – 83. – № 11. – С. 67–71.
18. Вольфарт Э. Магнитно-твердые материалы. – М.;Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 200 с.
19. Физические свойства алмаза: справочник / Н. В. Новиков (ред). – К.: Наук. думка, 1987. – 188 с.
20. González J., Guinea F., Vozmediano M. A. H. Electron-electron interactions in graphene sheets // Phys. Rev. – 2001. – В 63. – N 13. – P. 134421.
21. Макарова Т. Л. Магнитные свойства углеродных структур // Физика и техника полупроводников. – 2004. – 38. – № 6. – С. 641–665.
22. Mielke A., Tasaki H. Ferromagnetism in the Hubbard model. Examples from models with degenerate single-electron ground states // Comm. Math. Phys. – 1993. – 158. – N 2. – P. 341–371.
23. Magnetic structure of graphite ribbon / K. Wakabayashi, M. Fujita, K. Kusakabe, K. Nakada // Czechosl. J. Phys. – 1996. – 46. – N 4. – P. 1865–1866.

Поступила 17.05.17

УДК 620.22-419:621.921.34:661.657.5

В. Г. Полторацкий, канд. техн. наук

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

**СВЕРХТВЕРДЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОРОШКИ АБРАЗИВНОГО
НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АЛМАЗА И КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА,
СТРУКТУРИРОВАННЫЕ УГЛЕРОДНОЙ СВЯЗКОЙ**

Решена актуальная научно-техническая задача создания абразивных сверхтвердых композиционных материалов на основе алмаза и кубического нитрида бора за счет структурирования порошкового материала углеродной связкой при давлении ниже атмосферного. Описана технология