

12,16

Особенности изменения электросопротивления углеродных нанокompозитов на основе наноалмазов при нейтронном облучении

© С.К. Гордеев¹, Р.Ф. Коноплева², В.А. Чеканов², С.Б. Корчагина¹, С.П. Беляев^{2,4},
И.В. Голосовский², И.А. Денисов³, П.И. Белобров³

¹ Центральный научно-исследовательский институт материалов,
Санкт-Петербург, Россия

² Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова,
Гатчина, Ленинградская обл., Россия

³ Сибирский федеральный университет, Институт биофизики СО РАН,
Красноярск, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: krf@npi.spb.ru

(Поступила в Редакцию 1 ноября 2012 г.)

В окончательной редакции 25 декабря 2012 г.)

Исследованы физические свойства объемных композиционных материалов, состоящих из наноалмаза, пироуглерода и наноразмерных пор. Образцы облучали в канале реактора быстрыми нейтронами ($E > 0.5 \text{ MeV}$) в ампулах с гелием и в водной среде. Изучены зависимости электротранспортных свойств материалов различного состава от дозы облучения быстрыми нейтронами. Обнаружено немонотонное изменение электросопротивления с увеличением флюенса нейтронов. Предлагаются возможные объяснения наблюдаемой зависимости электросопротивления от флюенса нейтронов, в частности, связанные с физическими процессами, происходящими в поверхностных состояниях в трехфазной системе нанокompозита.

Работа выполнена при поддержке грантов Министерства образования и науки 14.518.11.7028, 16.518.11.7034 и гранта РФФИ 10-02-00576.

1. Введение

Наноалмазы, как известно, впервые были получены в России детонационным синтезом из молекул взрывчатых веществ [1]. Они представляют собой чрезвычайно малые трехмерно упорядоченные частицы со средним размером 4–5 nm и являются уникальной наноразмерной формой углерода, построенной из атомов в состоянии гибридизации sp^3 .

В настоящей работе объектом исследования служили образцы углеродного композиционного материала на основе наноалмазов. Используя синтетический метод, отдельные частицы в порошковой наноалмазной заготовке связывали пироуглеродом. Последний получали путем гетерогенной химической реакции разложения метана на всей внутренней поверхности заготовки. Результатом синтеза явился композитный углеродный материал, в котором отдельные частицы наноалмаза связаны пироуглеродом [2]. Кроме того, для композита характерна большая открытая пористость. Он получил название NDC. Пироуглеродная матрица имеет особое графитоподобное строение, поскольку большинство составляющих ее атомов находится в sp^2 -гибридизованном состоянии. Средняя толщина слоя пироуглерода, покрывающего частицы алмаза, очень небольшая и не превышает 1 nm. Метод получения NDC позволяет значительно (от 0 до 80%) варьировать содержание графитоподобной фазы, а следовательно, ее среднюю толщину, которая

рассчитывается как отношение объемного содержания пироуглерода к площади поверхности пор (см. таблицу).

Таким образом, в NDC сочетаются и взаимосвязаны три типа нанофрагментов — наноалмазы, наноразмерная графитоподобная матрица (пироуглерод) и наноразмерные поры (рис. 1). В макромасштабе все три фазы образуют единый композит, обладающий достаточной прочностью для сохранения заданной объемной формы.

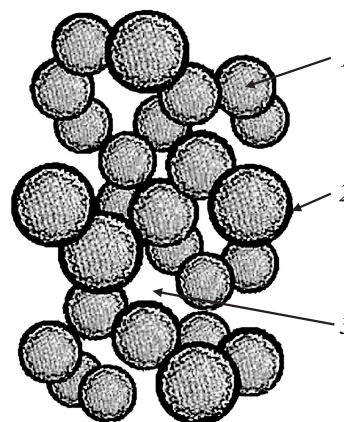


Рис. 1. Структура нанокompозита алмаз-пироуглерод; 1 — наноалмазы диаметром 4–5 nm, 2 — слой пироуглерода толщиной до 1 nm, 3 — нанопоры с характерным размером 8–10 nm.

Состав исследованных образцов

Тип NDC	Содержание пирouглерода, %	Пористость материала, %	Содержание наноалмаза, %	Средняя толщина слоя пирouглерода, Å
NDC10	5	67	28	2
NDC30	15	57	28	6
NDC40	20	52	28	8

Большая величина отношения площади поверхности к объему материала обуславливает решающую роль поверхности в контактных явлениях и в процессах транспорта электричества в композите. Как установлено в работах [2,3], температурная зависимость электропроводности композитов NDC имеет полупроводниковый характер: с увеличением температуры электропроводность повышается. Кроме того, анализ показал, что в композите NDC реализуется проводимость по прыжковому механизму, что очевидно указывает на то, что перенос заряда осуществляется по наноалмазной подсистеме. В то же время электропроводность NDC при температуре кипения жидкого азота изменяется более чем на 9 порядков с увеличением содержания пирouглерода от 5 до 20%, что свидетельствует об определяющей роли пирouглеродной матрицы в формировании электрофизических свойств материала [2,3].

Все сказанное делает нанокompозиты NDC весьма интересным объектом исследования. Изучение механизмов формирования свойств подобных наноструктурных композитов является актуальной задачей физики конденсированного состояния. Особый интерес представляет возможность модификации электрофизических свойств композитов за счет воздействия на электропроводящую графитоподобную матрицу облучением частицами высокой энергии, например быстрыми нейтронами. Можно ожидать, что за счет создания радиационных дефектов и трансформации структуры наноалмазов и графитоподобной матрицы возможно направленно модифицировать электронные свойства NDC.

Таким образом, целью настоящей работы явилось исследование влияния облучения быстрыми нейтронами на электрофизические свойства углеродных нанокompозитов NDC.

2. Результаты экспериментов

Исследовались образцы NDC10, NDC30 и NDC40 с содержанием компонентов, приведенным в таблице. С целью структурной характеристики проведены нейтронографические исследования состава NDC30 — промежуточного между составами NDC10 и NDC40. Эксперименты выполнены на многосчетчиковом нейтронном дифрактометре Петербургского института ядерной физики. На рис. 2 виден сильно размытый рефлекс 002 от графитоподобного (пирouглеродного) слоя, сформированного в композите на поверхности частиц наноалмаза. Силь-

ное уширение этого дифракционного рефлекса означает очень малый характерный размер, что соответствует модели композита, представленной на рис. 1.

Измеренная нейтронограмма (рис. 2) имеет рефлексы, соответствующие структуре кубического алмаза с размером элементарной ячейки 3.5570(5) Å, что несколько меньше, чем у монокристалла алмаза — 3.5668 Å. Рассчитанный в изотропном приближении средний дифракционный размер алмазной наночастицы составляет 3.1(1) nm. Форма дифракционных рефлексов от алмазных наночастиц не описывается гауссовым профилем: на рисунке виден характерный затянутый „хвост“ справа, что типично для дифракции на квазидвумерных объектах [4]. Эту особенность дифракции нейтронов можно объяснить различием в строении поверхностного слоя алмазной наночастицы и ее ядра. Следует подчеркнуть, что этот тонкий поверхностный слой имеет кристаллическую структуру алмаза и не является графитоподобным.

Электросопротивление образцов измеряли четырехконтактным методом в диапазоне температур 77–400 К. Для высокоомных образцов отсутствие выпрямления в

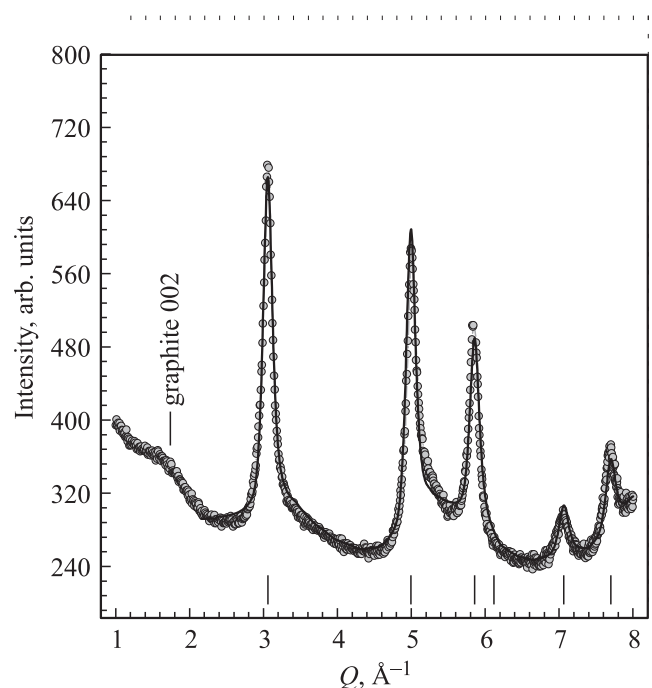


Рис. 2. Нейтронограмма образца NDC 30. Штрихами показано положение дифракционных рефлексов. Длина волны нейтрона 1.38 Å.

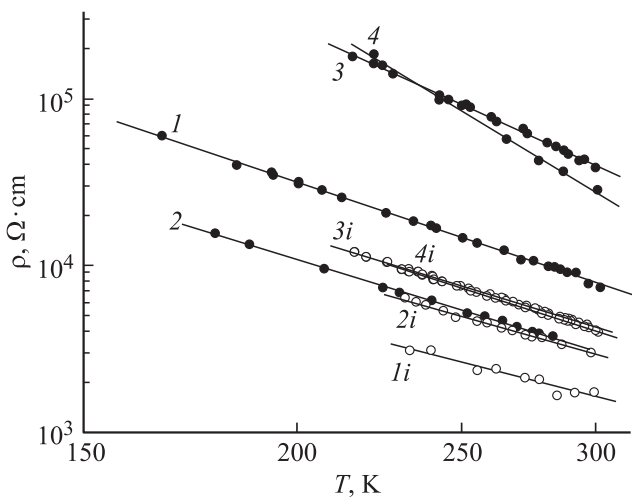


Рис. 3. Температурная зависимость сопротивления облученных и исходных образцов NDC10.1 (F, cm^{-2} : 1 — $5 \cdot 10^{16}$, 2 — $1 \cdot 10^{17}$, 3 — $5 \cdot 10^{17}$, 4 — $5 \cdot 10^{18}$; 1i, 2i, 3i, 4i — до облучения).

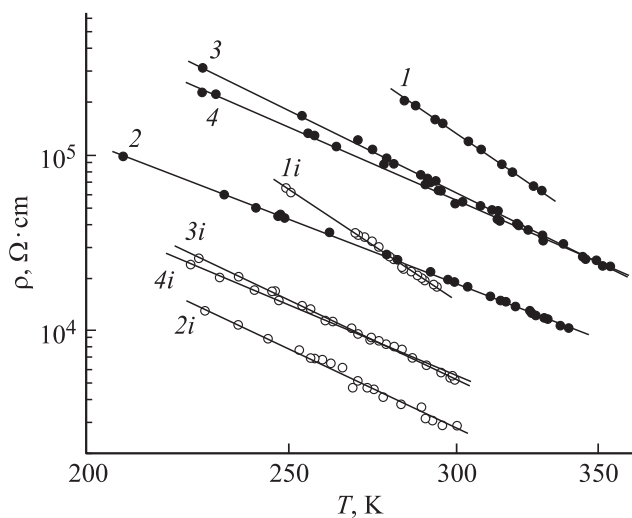


Рис. 4. Температурная зависимость сопротивления облученных и исходных образцов NDC10.2 (F, cm^{-2} : 1 — $5 \cdot 10^{17}$, 2 — $1 \cdot 10^{18}$, 3 — $2 \cdot 10^{18}$, 4 — $5 \cdot 10^{18}$; 1i, 2i, 3i, 4i — до облучения).

контактах контролировали измерением вольт-амперной характеристики. Для стабилизации сопротивления все образцы предварительно отжигали при температуре 500°C 30 минут в аргоне. Несмотря на это, исследуемые исходные образцы имели некоторый разброс по сопротивлению.

На рис. 3 представлены температурные зависимости сопротивления исходных и облученных в водной среде образцов NDC10.1. Как видно из рисунка, сопротивление увеличивается с понижением температуры и имеет активационный характер, свойственный полупроводникам. На рис. 4 приведены такие же зависимости для образцов NDC10.2, облученных в атмосфере гелия.

Поскольку NDC имеют высокое объемное содержание пор с размерами около 10 nm, необходимо было проверить адсорбционные свойства образцов до облучения. С этой целью исследовали влияние воды на температурную зависимость сопротивления. Измерения показали, что после выдержки в воде в течение нескольких суток при температуре 80°C сопротивление возрастало в несколько раз.

Как известно, адсорбция изменяет заполнение поверхностных уровней электронами и действует аналогично внешнему электрическому полю [5]. Уровни могут быть как акцепторного, так и донорного типа с концентрацией $10^{11} - 10^{12} \text{cm}^{-2}$. Это обстоятельство необходимо было учитывать при облучении образцов в каналах реактора, заполненных водой.

Облучение быстрыми нейтронами проводили в вертикальных каналах реактора ВВР-М Петербургского института ядерной физики ($E > 0.5 \text{MeV}$). Для фильтрации тепловых нейтронов, создающих примеси за счет трансмутации, образцы помещали в кадмиевый чехол толщиной 0.5 mm и в алюминиевый контейнер с отверстиями для охлаждения водой. Для снятия нагрева, который происходит за счет поглощения γ -квантов, облучение образцов в реакторе проводили в водной среде экспериментальных каналов при температуре $\sim 50^\circ\text{C}$. Образцы NDC10.1 и NDC40 облучали в водной среде, а образцы NDC10.2 — в кварцевых ампулах с гелием, где водная среда отсутствовала. Облучение проводили флюенсами быстрых нейтронов от $5 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-2}$ до $5 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-2}$. Ошибка в определении величины флюенса составляла 20%.

На рис. 3 и 4 представлены температурные зависимости сопротивления образцов NDC10 после облучения различными флюенсами быстрых нейтронов в водной среде и в кварцевых ампулах, заполненных гелием. Как видно из рисунков, сопротивление образцов NDC10 после облучения немонотонно изменяется с флюенсом нейтронов.

Образцы NDC40 имели удельное сопротивление значительно меньше, чем NDC10 (рис. 5), поскольку толщина электропроводящего слоя пироуглерода в них была в 4 раза больше чем в NDC10 (см. таблицу). Облучение NDC40 проводили только в водной среде. Важным обстоятельством является то, что, как и в образцах NDC10, сопротивление образцов NDC40 немонотонно изменяется с ростом флюенса нейтронов.

Для анализа немонотонного изменения электросопротивления с флюенсом нейтронов были построены зависимости относительного изменения сопротивления при различных температурах измерения от флюенса нейтронов. Зависимости, построенные в таких координатах, позволяют отчетливо выявить закономерности изменения сопротивления, сведя к минимуму влияние существенного разброса свойств исследуемых образцов.

На рис. 6 представлены относительные изменения электросопротивления при 300 K ($\Delta\rho/\rho$) от флюенса нейтронов для NDC10.1 (рис. 6, a) и NDC40 (рис. 6, c),

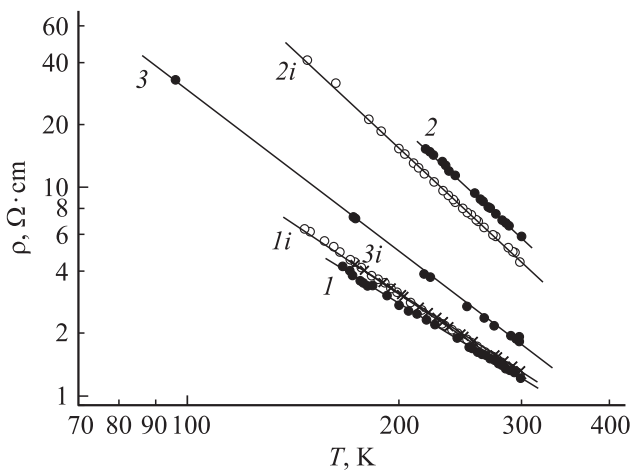


Рис. 5. Температурная зависимость сопротивления облученных и исходных образцов NDC40 (F , cm^{-2} : 1 — $1 \cdot 10^{17}$, 2 — $1 \cdot 10^{18}$, 3 — $5 \cdot 10^{18}$; 1i, 2i, 3i — до облучения).

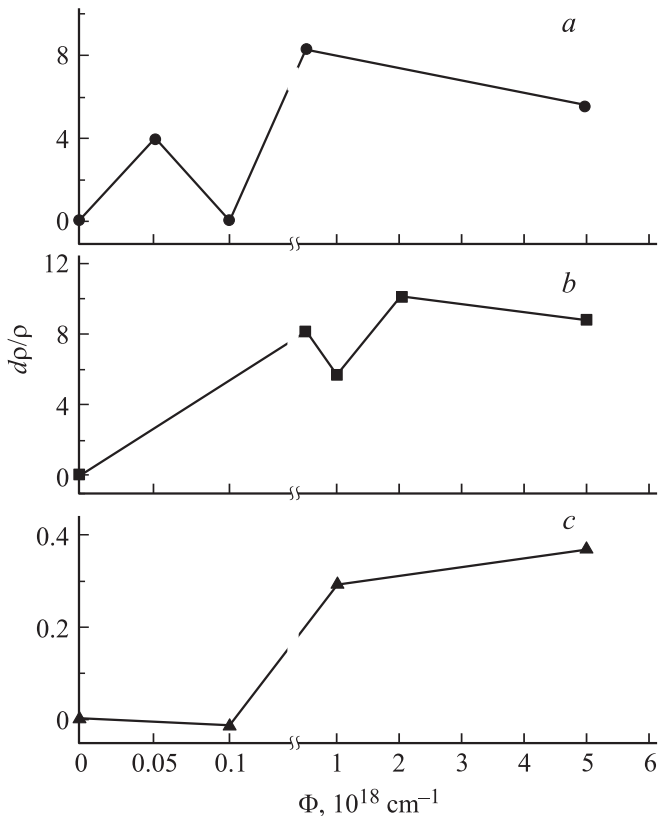


Рис. 6. Относительное изменение сопротивления образцов NDC в зависимости от флюенса быстрых нейтронов при 300 К: *a* — NDC10.1, *b* — NDC10.2, *c* — NDC40.

облученных в водной среде и для NDC10.2 (рис. 6, *b*) — в ампулах с гелием. На графиках указана ошибка измерения относительного сопротивления, обусловленная технологическим разбросом свойств исследуемых образцов. Ход зависимости электросопротивления от флюенса нейтронов имеет сложный немонотонный ха-

рактер. Обычно в случае облучения различных материалов (металлов, полупроводников, диэлектриков и др.) с ростом флюенса нейтронов происходит деградация основных свойств материала, в частности, увеличение электросопротивления за счет создания радиационных дефектов и возрастания степени разупорядочения.

Как видно из рис. 6, *a* и *b*, сопротивление NDC10 на начальных стадиях облучения растет, затем уменьшается практически до исходных значений (NDC10.1), а затем опять начинает расти и при флюенсах выше 10^{18} cm^{-2} практически не меняется. В облученных в водной среде образцах NDC40 (рис. 6, *c*) отсутствует начальная область роста сопротивления, наблюдаемая в образцах NDC10. Сопротивление практически не меняется до флюенса нейтронов $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. Затем происходит резкий рост сопротивления до флюенса $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, переходящий в плавное изменение сопротивления до флюенса нейтронов $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$.

3. Обсуждение результатов

Для объяснения необычного изменения электросопротивления с флюенсом нейтронов необходимо понять характер изменения температурных зависимостей электросопротивления до и после облучения нейтронами. Сразу отметим, что в настоящее время не существует общепринятых физических представлений о механизмах переноса заряда в подобных наноразмерных углерод-углеродных композитах.

Как отмечалось выше, в NDC сочетаются и взаимосвязаны три типа нанофрагментов — нанодiamondы, наноразмерная графитоподобная (пироуглеродная) матрица и нанопоры. Проводящая пироуглеродная матрица имеет квазидвумерную графитоподобную структуру, в которой большинство атомов углерода находится в sp^2 -гибридизации, а проводимость имеет активационный характер [6–11]. Пироуглеродная фаза частично заполняет пространство между частицами нанодiamondа, и проводимость может осуществляться за счет туннелирования через потенциальные барьеры по локализованным состояниям, расположенным вблизи поверхности частиц [11]. Можно полагать, что суммарная проводимость такой системы должна иметь степенную зависимость от температуры, которая будет определяться средним количеством локализованных состояний [12].

В ряде работ [11,12–14] было показано, что в материалах с квазидвумерной графитовой структурой — такую структуру в NDC имеет пироуглеродная фаза — для объяснения температурной зависимости проводимости может применяться зонная модель двумерного графита, в которой учтено размытие плотности состояний из-за нетеплового рассеяния электронов слоевыми дефектами. В нашем случае представленные экспериментальные данные температурных зависимостей электросопротивления образцов NDC10 и NDC40 (рис. 3–5) до

и после облучения наилучшим образом аппроксимируются степенной зависимостью

$$\rho(T) \sim \exp(-C/T)^{1/n} \quad (1)$$

со значением параметра $n = 4$.

Как известно, зависимость (1) характерна для прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка в случае так называемой сильной локализации в системах с полупроводниковой проводимостью при наличии локального беспорядка [10]. При высоких температурах ($T > 100$ К) прыжковая зависимость с $n = 3$ наблюдалась в работе [9] и связывалась с двумерной локализацией в графитоподобных системах, когда существенный вклад в концентрацию носителей тока вносят несобственные носители, связанные с дефектами в графитовых слоях. В случае низких температур, близких к гелиевым ($T < 20$ К), полученное значение $n = 2$, указывает на доминирующую роль кулоновской щели [13,15]. В общем случае значение коэффициента в выражении (1) может изменяться от 2 до 4 в зависимости от размерности движения носителей тока и оттого, существует или нет кулоновская щель [13]. Можно полагать, что проводимость углерод-углеродных композитов будет определяться поправками, связанными с механизмом двумерной слабой локализации [10,13].

В работе [12] предполагалось, что переход от линейной к степенной зависимости проводимости углеродных композитов от температуры связан с влиянием переходов носителей между оборванными и деформированными графеновыми слоями в композите со сложной микроструктурой. Предполагается также, что структура пироуглерода вокруг наноалмаза в композите NDC подобна структуре искривленного графена при высокотемпературном превращении наноалмаза в „луковичные“ структуры [11,16,17].

Как известно, взаимодействие излучения с твердым телом приводит к созданию различного рода структурных дефектов в решетке. Характер возникающих нарушений и их влияние на основные электрофизические свойства облучаемого материала определяются как структурой решетки, так и природой и энергией бомбардирующих частиц. В зависимости от энергии, передаваемой атому решетки налетающей частицей, возможны два типа конечных дефектов. Если энергия, передаваемая атому решетки налетающей частицей, незначительно превышает пороговую энергию E_d , в основном создаются простые изолированные дефекты Френкеля (вакансии и междоузельные атомы), а также их комплексы с атомами примесей. В случае когда энергия частиц достаточно велика ($E \gg E_d$), первично смещенный атом способен создать целый каскад смещений.

Состояние вещества при такой передаче энергии можно представить как мгновенный ($\approx 10^{-12}$ с) нагрев ограниченной области решетки до температур, превышающих температуру плавления [18,19]. При этом создаются области размерами ~ 10 nm, содержащие

примерно 10^3 – 10^4 атомов в виде клиньев смещения, дислокаций или разупорядоченных областей сферической формы [20]. Как показано в [20], такие разупорядоченные области в полупроводниках достигают размеров ~ 10 nm, т. е. охватывают десятки межатомных расстояний. Аналогичная картина должна наблюдаться и в NDC, причем как в частицах наноалмаза, так и в графитоподобной пироуглеродной матрице, размеры которых меньше, чем размеры разупорядоченных областей, создаваемых нейтронами. Таким образом, облучение быстрыми нейтронами должно приводить к очень сильному разупорядочению всех углеродных фаз композита.

Исходя из представленной на рис. 1 схемы строения материала можно предположить, что изменение удельного электрического сопротивления материала может быть связано с двумя процессами его перестройки: фазовым переходом алмаз–графит или структурными изменениями в графитоподобной матрице („порядок“–„беспорядок“). При этом увеличение электросопротивления можно связать с частичным переходом графитоподобной матрицы в алмаз. Последнее возможно, если принять во внимание, что в рассматриваемых материалах из-за малой толщины графитоподобной матрицы, даже переход доли ее монослоя в алмаз будет приводить к существенному повышению электросопротивления. Как ранее отмечалось, наноалмаз размером 4–6 nm является термодинамически более стабильным, чем графит тех же размеров, поэтому переход структуры части графитоподобного слоя матрицы, примыкающей к поверхности наноалмазной частицы, в алмазную структуру представляется возможным. Заметим, что с химической точки зрения переход графит–алмаз сводится к изменению характера гибридизации атома углерода и его перестроению в тетраэдрическое окружение.

Возможно, что при графитизации наноалмазов за счет существенного различия мольных объемов углерода в таких структурах в ходе облучения быстрыми нейтронами не будет происходить кардинального изменения общего строения материала.

Анализируя изложенные выше соображения и результаты, можно предполагать, что при облучении композита NDC малыми флюенсами нейтронов, по-видимому, происходит упорядочение графитоподобной составляющей материала. Повышение флюенса нейтронов приводит к частичному переходу графитоподобной матрицы в алмаз, происходящему на границе сопряжения этих фаз. То, что процесс образования алмаза происходит после упорядочения структуры графитоподобной матрицы, следует из известных результатов по синтезу алмаза при повышенном давлении и высокой температуре, поскольку использование явно кристаллических графитов является более предпочтительным и позволяет смягчить условия образования алмаза (понизить давление и температуру). Можно ожидать, что и в рассматриваемом случае образование алмаза происходит после упорядочения структуры графитоподобной матрицы материала.

Наряду с этим, сложная картина наблюдаемого изменения сопротивления с флюенсом нейтронов, обусловленная многофазной наноструктурой NDC, во многом определяется поверхностными состояниями в каждой нанопазе в соответствии с теоретическими представлениями, развитыми в работах Тамма [21], Лифшица, Пекара [22] об одномерных и двумерных зонах поверхностных электронных состояний в алмазе.

Можно также полагать, что при облучении нейтронами, когда происходит локальный разогрев всех фаз наноконпозита до температур плавления, возможен процесс отслаивания графеновых оболочек от алмазной сердцевины („луковицы“) [11,23,24]. Однако все предложенные объяснения носят чисто качественный характер и, очевидно, не исчерпывают сложных процессов, происходящих в наноконпозите NDC.

4. Заключение

В результате выполненных исследований установлено, что температурная зависимость электросопротивления наноконпозита NDC описывается экспонентой с показателем степени $1/4$ как для необлученных образцов, так и для образцов, облученных быстрыми нейтронами в атмосфере аргона или в водной среде. С увеличением флюенса нейтронов сопротивление изменяется немонотонно.

Однозначное объяснение полученных результатов весьма затруднительно, поскольку не существует общепринятой модели, в полной мере описывающей перенос заряда в структурах на основе наноалмаза. Можно полагать, что в условиях нейтронного облучения происходит превращение „пироуглерод–алмаз“ на границе контакта этих структурных составляющих. Вместе с тем нельзя исключить возможность обратного перехода. Представляется очевидным также, что облучение нейтронами сильно возмущает поверхность частиц алмаза за счет постоянной генерации точечных дефектов и их миграции к поверхности. При этом спектр поверхностных таммовских состояний изменяется, что может приводить к изменению электротранспортных свойств. Детали таких процессов неясны, и требуются дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования для полного понимания природы электрофизических свойств наноконпозита NDC и их зависимости от радиационного воздействия.

Список литературы

- [1] В.В. Даниленко. Синтез и спекание алмаза взрывом. Энергоатомиздат, М. (2003). 272 с.
- [2] С.К. Гордеев. Сверхтвердые материалы **6**, 60 (2002).
- [3] S.K. Gordeev, P.I. Belobrov, N.I. Kiselev, E.A. Petrakovskaya, T.C. Ekstrom. Mater. Res. Soc. Symp. — Proceedings. 638, F14.16.1 (2001).
- [4] I.V. Golosovsky, I. Mirebeau, E. Elkaim, D.A. Kurdyukov, Yu.A. Kumzerov. Europ. Phys. J. B **47**, 55 (2005).
- [5] Е.И. Григорьев, П.С. Воронцов, С.А. Завьялов, С.Н. Чвалун. Письма ЖЭТФ **28**, 20, 15 (2002).
- [6] А.С. Котосонов. Письма ЖЭТФ **43**, 1, 30 (1986).
- [7] А.С. Котосонов. ЖЭТФ **93**, 11, 1870 (1987).
- [8] А.С. Котосонов. ФТТ **33**, 9, 2616 (1991).
- [9] А.С. Котосонов. ФТТ **31**, 8, 146 (1989).
- [10] Л.В. Лунев. Письма ЖЭТФ **27**, 15, 84 (2001).
- [11] П.И. Белобров. Высокие технологии в промышленности России. Техномаш, М. (2003). С. 235.
- [12] Е.И. Жмуриков. Препринт ИЯФ № 18, Новосибирск (2005). 11 с.
- [13] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. Электронные свойства легированных полупроводников. Наука, М. (1979). 416 с.
- [14] А.И. Романенко, О.Б. Аникеева, А.В. Окопуб, Л.Г. Булушева, В.Л. Кузнецов, Ю.В. Бутенко, А.Л. Чувилин, С. Dong, Y. Ni. ФТТ **44**, 3, 468 (2002).
- [15] А.Г. Забродский. ФТТ, **11**, 3, 595 (1977).
- [16] V.L. Kuznetsov, A.L. Chuvilin, Y.V. Butenko, I.Yu. Mal'kov, V.M. Titov. Chem. Phys. Lett. **222**, 343 (1994).
- [17] F. Banhart. Phys. Solid State **44**, 3, 399 (2002).
- [18] Д. Динс, Д. Виниард. Радиационные эффекты в твердых телах. ИЛ, М. (1960). 244 с.
- [19] М. Томпсон. Дефекты и радиационные повреждения в металлах. Мир, М. (1971). 368 с.
- [20] Р.Ф. Коноплева, В.Л. Литвинов, Н.А. Ухин. Особенности радиационного повреждения полупроводников частицами высоких энергий. Атомиздат, М. (1971). 176 с.
- [21] Ig. Tamm. Z. Phys. **76**, 11–12, 849 (1932).
- [22] И.М. Лифшиц, С.М. Пекар. УФН **4**, 26, 556 (1955).
- [23] А.С. Крылов, Н.П. Шестаков, С.Б. Корчагина, С.С. Цегельник, Д.А. Знак, А.А. Латынина, И.А. Денисов, Н.В. Волков, С.К. Гордеев, П.И. Белобров. XVII Междунар. науч.-техн. конф. „Высокие технологии в промышленности России“. М. (2011). С. 382.
- [24] Н.И. Киселев, Д.А. Великанов, С.Б. Корчагина, Э.А. Петраковская, А.Д. Васильев, Л.А. Соловьев, Д.А. Балаев, О.А. Баюков, И.А. Денисов, С.С. Цегельник, Е.В. Еремин, Д.А. Знак, К.А. Шайхутдинов, А.А. Шубин, Н.П. Шестаков, Н.В. Волков, С.К. Гордеев, П.И. Белобров. Рос. хим. ж. **LVI**, 1–2 (2012).