

Магнитные свойства углеродных нанотрубок, полученных методом дугового разряда при различных условиях

© А.С. Котосонов, Д.В. Шило, А.П. Моравский*

"НИИГрафит",

111524 Москва, Россия

* Институт проблем химической физики,

142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

E-mail: grafit@aha.ru

Исследованы диамагнитная восприимчивость и сигнал ЭПР многослойных углеродных нанотрубок, полученных при различных давлениях гелия и скоростях подачи графитового анода. Установлено, что уменьшение давления гелия и скорости подачи анода приводит к росту диамагнитной восприимчивости и g -фактора сигнала ЭПР, связанного с нанотрубками. Анализ магнитных свойств в рамках зонной модели квазидвумерного графита показал, что увеличение диамагнитной восприимчивости и g -фактора сигнала ЭПР обусловлено уменьшением числа слоевых дефектов в нанотрубках. Изучение спектров ЭПР позволило установить, что при давлении гелия в камере ниже 200 Торг в катодных осадках кроме нанотрубок содержится значительная доля полиэдрических наночастиц. Аналогичная ситуация наблюдалась и для катодных осадков, полученных при малых скоростях подачи анода.

Работа поддержана программой "Фуллерены и атомные кластеры" (проект № 20006) и Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 99-03-32382).

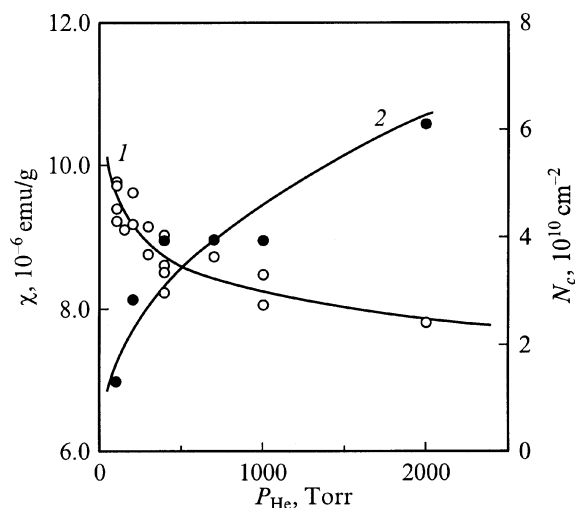
Как показывают теоретические расчеты [1] и результаты экспериментальных исследований [2–5], электронная структура и магнитные свойства многослойных углеродных нанотрубок (МСНТ) чувствительны к числу слоев в нанотрубках и наличию слоевых дефектов и примесных атомов. Очевидно, что концентрация и тип дефектов в МСНТ во многом должны определяться условиями получения нанотрубок.

Ранее было показано [1,4,5], что температурная зависимость диамагнитной восприимчивости (ДМВ) и параметров сигнала ЭПР в МСНТ с пятнадцатью и более слоями может быть описана в рамках зонной модели квазидвумерного графита (КДГ) [6,7]. Кроме того, в рамках этой модели могут быть определены тип и концентрация дефектов, находящихся в графитовых слоях МСНТ.

Авторами были проведены исследования магнитных свойств катодных осадков, полученных методом дугового разряда при различных давлениях гелия (от 50 до 2000 Торг) и скоростях подачи графитового анода (от 0.8 до 8 mm/min) при токе дуги 65 А. Образцы для измерений выбирались из центральной части катодного осадка. Диамагнитную восприимчивость измеряли методом Фарадея на установке "Oxford Instruments". Ошибка измерения восприимчивости не превышала 10^{-8} emu/g. Сигнал ЭПР измеряли на спектрометре E-109 фирмы "Varian", работающем на частоте 9.3 GHz. Погрешность определения величины g -фактора не превышала 10^{-4} .

Проведенные измерения показали, что ориентационно-усредненная ДМВ катодных осадков увеличивается с 7.9 до $9.2 \cdot 10^{-6}$ emu/g при уменьшении давления гелия с 2000 до 200 Торг. Сопоставление ДМВ катодных осадков с давлением гелия в камере получения приведено на рисунке. Исследование ЭПР катодных осадков, полученных в указанном диапазоне давлений, показало, что

спектр ЭПР состоит из синглета, связанного с МСНТ, величина g -фактора которого увеличивается с 2.015 до 2.021 при понижении давления гелия. Такое поведение магнитных свойств указывает на то, что концентрации слоевых дефектов в МСНТ уменьшается при понижении давления гелия. Проведенный теоретический анализ экспериментальных зависимостей ДМВ от температуры для ряда образцов в рамках зонной модели КДГ показал, что уменьшение давления гелия с 2000 до 200 Торг приводит к уменьшению концентрации дефектов линейного типа с 6.1 до $2.8 \cdot 10^{10}$ cm $^{-2}$ (см. рисунок). Исследования ЭПР катодных осадков, полученных при давлениях гелия 50–150 Торг, показало, что кроме сигнала, связанного



Ориентационно-усредненная ДМВ (1) и концентрация слоевых дефектов в МСНТ (2), полученных при различных давлениях гелия.

с МСНТ, в спектре ЭПР наблюдается дополнительный сигнал с g -фактором 2.01, обусловленный наночастицами. Относительная интенсивность сигнала от МСНТ с понижением давления гелия уменьшалась, а интенсивность сигнала, связанного с наночастицами, увеличивалась, что свидетельствовало об увеличении доли частиц в катодном осадке. Данный вывод был подтвержден просвечивающей электронной микроскопией высокого разрешения, и было показано, что для этих образцов характерно малое количество МСНТ и большое число наночастиц полиэдрической формы.

Влияние скорости подачи графитового анода на структуру и магнитные свойства катодных осадков изучали на серии образцов, полученных при давлении гелия 500 Торг.

Уменьшение скорости подачи анода приводило к увеличению ДМВ и g -фактора сигнала ЭПР, связанного с МСНТ, что является следствием уменьшения числа слоевых дефектов в нанотрубках. Теоретический анализ температурных зависимостей ДМВ показал, что уменьшение скорости подачи анода с 8 до 0.8 mm/min приводит к уменьшению концентрации дефектов с 6 до $3 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$. Однако образцы, полученные при скорости подачи меньше 2 mm/min, на являются однородными. В спектрах ЭПР таких образцов при низких температурах (150 К) кроме сигнала от МСНТ наблюдался сигнал с меньшим значением g -фактора, что связано с присутствием другой, более дефектной формы углерода. По данным просвечивающей электронной микроскопии, в этих образцах кроме МСНТ и наночастиц полиэдрической формы наблюдались графитовые частицы и "аморфный" углерод.

Таким образом, на основе полученных экспериментальных данных можно заключить, что магнитные свойства МСНТ могут использоваться для контроля процесса получения нанотрубок с заданными свойствами.

Список литературы

- [1] А.С. Котосонов, В.В. Атражев. Письма в ЖЭТФ **72**, 76 (2000).
- [2] M. Kosaka, T.W. Ebbesen, H. Hiura et al. Chem. Phys. Lett. **233**, 47 (1995).
- [3] S.J. Bandow. Appl. Phys. **80**, 1 020 (1996).
- [4] A.S. Kotosonov, S.V. Kuvshinnikov. Phys. Lett. **A299**, 377 (1977).
- [5] A.S. Kotosonov, D.V. Shilo. Mol. Materials **13**, 113 (2000).
- [6] А.С. Котосонов. ЖЭТФ **93**, 1 870 (1987).
- [7] A.S. Kotosonov. Carbon **26**, 735 (1988).