

Захват магнитного потока и ядерная спин-решеточная релаксация в углеродных образцах с нанотрубными структурами

О. Е. Омеляновский, А. В. Садаков, В. И. Цебро

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

Е. Г. Николаев

Институт физических проблем им. П.Л. Капицы, 119334 Москва, Россия

Исследованы магнитные свойства углеродных катодных депозитов, содержащих многосвязную структуру из многослойных нанотрубок. В этих образцах обнаружено сильное влияние термомагнитной предыстории на величину остаточной намагниченности, а также на характер ядерной спин-решеточной релаксации ^{13}C при 4.2 К. Кроме этого установлено, что зависимость остаточной намагниченности от времени при комнатной температуре удовлетворительно описывается логарифмическим законом.

Ранее [1,2] сообщалось об экспериментальном наблюдении захвата магнитного потока в образцах катодных депозитов, содержащих многосвязную структуру из многослойных углеродных нанотрубок. В данной работе основное внимание уделялось исследованию поведения остаточной намагниченности M_r образцов при их охлаждении из области высоких температур до 4.2 К в режимах охлаждения в магнитном поле и без поля (т.н. “field cooling” (FC) и “zero-field cooling” (ZFC)). Кроме того представляло интерес измерить кривые релаксации $M_r(t)$ при высоких (комнатных) температурах, поскольку ранее (см. [1]) была сделана только оценка характерного времени релаксации захваченного магнитного потока. Для получения дополнительной информации о причинах захвата потока в этих образцах были проведены эксперименты ЯМР, и в частности исследовано влияние режимов охлаждения образца (FC и ZFC) на характер спин-решеточной релаксации ядер ^{13}C при 4.2 К.

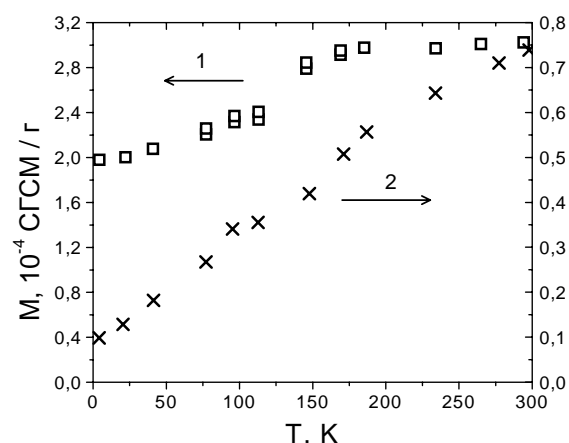


Рис.1. Зависимость остаточной намагниченности M_r от температуры начала охлаждения образца в магнитном поле 500 Э (режим FC, см. текст) для образцов №1 и №2.

Также как и в [1], измерения намагниченности проводились на СКВИД-магнитометре в полях до 500 Э. Образцы представляли собой набор из углеродных колонок внутренней части катодного депозита с содержанием многослойных нанотрубок порядка 30 (об.) %. Однако в отличие от предыдущих исследований, где углеродные колонки общей массой от одного до нескольких миллиграмм были собраны вместе и ориентированы, в новых экспериментах измерения проводились на образцах массой от 40 до 80 мг, состоящих из хаотически ориентированных отдельных колонок или их связок. Сравнение результатов измерений при $T = 4.2$ К намагниченности образцов, приготовленных как из различных частей одного депозита, так и из разных депозитов, показало, что при общем примерном равенстве магнитной восприимчивости гистерезис кривых намагничивания $M(H)$ имеет место практически во всех случаях – меняется только величина остаточного намагниченности M_r , причем от образца к образцу в очень широких пределах.

На рис.1 в качестве примера показаны результаты измерения величины M_r в зависимости от температуры начала охлаждения (режим FC) для двух образцов с сильно отличающейся величиной остаточной намагниченности. Левые крайние точки при 4.2 К соответствуют значениям M_r , полученным после охлаждения образца в нулевом магнитном поле (режим ZFC) и последующего ввода и вывода поля. Остальные точки получены следующим образом: образец нагревался до температуры T , затем вводилось поле 500 Э, а после охлаждения до 4.2 К поле выводилось и измерялась остаточная намагниченность. Из приведенных данных видно, что охлаждение в поле приводит к существенному росту остаточного момента с увеличением температуры начала охлаждения образца. Причем для образца с малым значением остаточной намагниченности этот рост оказывается куда более сильным – примерно на порядок величины при увеличении температуры начала охлаждения от 4.2 до 300 К (см. кривую для образца №2 на рис.1).

Были проведены также измерения зависимости остаточной намагниченности от времени при длительной выдержке образцов при комнатной температуре. Оказалось, что релаксационные зависимости $M_r(t)$ удовлетворительно описываются логарифмическим законом, характерным для явления термически активированного крипа потока в сверхпроводниках II рода, при этом остаточная намагни-

ченность уменьшалась примерно на 10 % величины при увеличении времени выдержки в 10 раз.

Эксперименты ЯМР на образцах с более сильным эффектом захвата магнитного потока обнаружили сильную зависимость характера спин-решеточной релаксации ^{13}C при температуре 4.2 К от термомагнитной предыстории. На рис.2 показаны фрагменты кривых восстановления продольной намагниченности ядер углерода для образца №1. Данные, обозначенные белыми кружками, получены после охлаждения образца в поле 20 кЭ, а обозначенные черными кружками получены после выдержки образца в течении 15 часов при 4.2 К в нулевом магнитном поле и последующего ввода магнитного поля 20 кЭ.

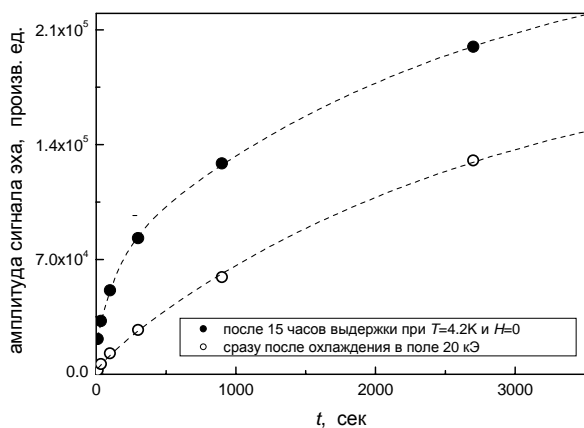


Рис. 2 Зависимости амплитуды сигнала эха ^{13}C от времени задержки после насыщающей последовательности. $T=4.2\text{ K}$, $H=20\text{ кЭ}$. Пунктирные линии – аппроксимация суммой двух экспонент.

Как видно из рисунка, релаксационные кривые достаточно хорошо аппроксимируются суммой двух экспоненциальных вкладов. В случае выдержки образца без поля времена спин-решеточной релаксации T_1 для этих вкладов равны 140 и 2700 сек, при этом доля более быстрого вклада составляет около 20%. Охлаждение образца в этом поле приводило к уменьшению быстрого вклада примерно в десять раз, при этом более медленный вклад не претерпевал заметных изменений. Следует также отметить, что в обоих случаях длительная выдержка образцов в поле 20 кЭ при 4.2 К не привела к сколько-нибудь заметному изменению характера релаксации. Повторение этих экспериментов через год показало, что качественно эффект сохранился, однако стал менее ярко выраженным, а именно, для наблюдения изменения характера релаксации образец пришлось выдерживать при низкой температуре без поля существенно дольше (около двух суток). Кроме этого заметно увеличилась доля быстрого вклада в релаксацию после охлаждения образца в поле.

Существенное уменьшение быстрого вклада в релаксацию после охлаждения в поле можно рассматривать как результат сильного уширения спектра ЯМР областей, ответственных за этот вклад, из-

за чего сигнал от них становится ненаблюдаемым. Такое уширение спектра можно естественным образом связать с локальной неоднородностью намагниченности в этих областях, возникающей при охлаждении в силу тех же причин, что и наблюдаемый в магнитных измерениях остаточный момент. Уменьшение эффекта со временем также коррелирует с ранее проведенными с интервалом в год измерениями намагниченности, которые показали значительное уменьшение остаточного момента за это время. Пока непонятными остаются причины, по которым длительная выдержка образца при гелиевой температуре без поля приводит к росту быстрого вклада в релаксацию. Отметим, что магнитные измерения не обнаружили заметного затухания остаточного момента при 4.2 К.

Обсуждая возможные причины происхождения остаточной намагниченности и необычного поведения спин-решеточной релаксации ^{13}C в исследованных образцах углеродных катодных депозитов можно рассмотреть два основных сценария. Первый сценарий предполагает захват потока в многосвязной сетке из углеродных нанотрубок, что подразумевает существование в этой сетке сверхпроводимости с достаточно высокой температурой перехода или бездиссипативного электронного транспорта иной природы. Другое объяснение связано возможностью ферромагнитного упорядочения в различных углеродных модификациях при высоких температурах [3]. Полученные нами результаты пока не позволяют сделать однозначный выбор в пользу одного из этих сценариев. Большинство фактов (захват потока, увеличение остаточной намагниченности при охлаждении в поле, релаксация остаточной намагниченности) могут быть объяснены как с точки зрения сверхпроводимости, так и ферромагнетизма. Уменьшение сигнала ЯМР при охлаждении в поле (FC), свидетельствующее о возникновении заметной неоднородности намагниченности, является аргументом скорее в пользу ферромагнетизма (сверхпроводящее состояние обычно более однородно после FC, чем после ZFC и ввода поля). Вместе с тем рост быстрого вклада в релаксацию ^{13}C только после длительной выдержки при гелиевой температуре без поля пока вообще не имеет объяснения. Таким образом для окончательного выбора между упомянутыми двумя возможностями необходимы дальнейшие исследования.

Авторы благодарны А.П. Моравскому за изготовление образцов катодных депозитов.

Работа поддержана РФФИ (грант №03-02-17445) и Федеральным агентством по науке РФ (контракты №541-02 и №40.012.1.1.1357).

1. В.И. Цebro, О.Е. Омеляновский, А.П. Моравский, Письма в ЖЭТФ 70, 457 (1999).
2. В.И. Цebro, О.Е. Омеляновский, УФН 170, 906 (2000).
3. Т.Л. Макарова, ФТП 38, 641 (2004).