

ЛОКАЛИЗАЦИЯ И СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ
В УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКНАХ

Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский

Углеродные волокна, представляющие собой нити цилиндрической или неправильной формы, вызывают интерес как с точки зрения практического применения в композитных материалах, так и в связи с необычными электрофизическими свойствами. Как и массивные монокристаллы хорошо ориентированного пиролитического графита, углеродные волокна с высокой температурой тепловой обработки (ТТО) хорошо интеркалируются, образуя соединения внедрения определенной ступени N (т.е. соединения со строгим чередованием слоя внедренного вещества через N слоев графита), у которых отчетливо наблюдаются осцилляции магнитосопротивления при гелиевых температурах [1]. В менее упорядоченных волокнах, интеркалированных пентахлоридом сурьмы или хлоридом меди [2, 3], т.е. в волокнах, образующих соединения внедрения в графит (СВГ) акцепторного типа, обнаружен эффект слабой локализации носителей тока. Эффект слабой локализации наблюдается также и в неинтеркалированных волокнах [4].

В соответствии с теорией квантовых поправок к проводимости [5] по экспериментальным данным — зависимостям сопротивления волокна от магнитного поля при разных температурах можно рассчитать константы $g(T)$ и $\beta(T)$, описывающие взаимодействие носителей тока и сверхпроводящие флуктуации соответственно. Измерения, выполненные на одном и том же моноволокне до и после интеркалирования монохлоридом иода, показывают, что увеличение числа дырок при интеркалировании (монохлорид иода является акцептором) ослабляет взаимодействие носителей: $g(T)$ и $\beta(T)$ уменьшаются [6]. В то же время проведенное в настоящей работе создание СВГ донорного типа на основе углеродных волокон приводит к увеличению $g(T)$ и $\beta(T)$.

В связи с этим представляло интерес синтезировать материал на основе волокон, обладающий сверхпроводящими свойствами. Для этой цели использовались два типа волокон — на основе вискозы с диаметром 7 мкм и ТТО, равной 2700 °С, и пековые, диаметром 10 мкм и ТТО, равной 2400 °С. Удельные сопротивления исходных волокон составляли 7000 мкОм·см и 1100 мкОм·см соответственно. Все измерения проводились на постоянном токе величиной 10 мкА четырехконтактным методом на отдельно взятом волокне, расстояние между потенциальными контактами составляло 1 см. При понижении температуры от комнатной до гелиевой сопротивление вискозных волокон росло приблизительно на 10% (рис. 1), а пековых приблизительно на 6% (вставка на рис. 2). При гелиевых температурах в исходных волокон наблюдалось отрицательное магнитосопротивление,

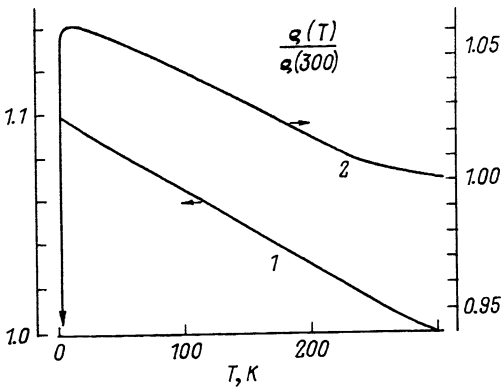


Рис. 1. Зависимости сопротивления от температуры исходного (1) и обработанного солями ниобия (2) вискозного моноволокна.

квадратичное в слабых магнитных полях и логарифмическое в сильных. На рис. 2 приведены зависимости $\rho(T)$ исходных пековых волокон при двух температурах

(кривые 1, 2). Увеличение температуры расширяло область квадратичной зависимости $\rho(B)$ в слабых полях и наклон зависимости $\rho(\ln B)$ в сильных (до $T \approx 20$ K). Все данные полностью описываются теорией [5] для случая слабой двумерной локализации носителей с учетом их взаимодействия, аналогично тому, как это происходит в полиакрилонитриловых волокнах [4, 6]. Интеркалирование волокон из раствора циклопентадиенилтетракарбонилем ниобия и последующая термообработка при 2300°C приводили согласно микросондovому анализу к образованию на поверхности волокон слоя из карбида ниобия с включением чистого ниобия. Удельное сопротивление волокон при 300 K падало до ≈ 800 мкОм·см у пековых и ≈ 2000 мкОм·см у вискозных. Локализационный рост сопротивления с понижением температуры сохранялся (см. рис. 1, вставку на рис. 2), однако наблюдался сверхпроводящий переход, у пековых волокон начинающийся с $T \approx 10$ K, а у вискозных с $T \approx 4$ K. Оба перехода заканчивались при $T \approx 1.3$ K. Перпендикулярное к оси волокна магнитное поле $B \approx 2$ T полностью разрушает сверхпроводимость, при этом в больших полях наблюдается отрицательное магнитосопротивление, логарифмически зависящее от величины B . Таким образом, после обработки, вызывающей образование на поверхности волокна сверхпроводящего слоя, проводимость волокна в магнитном поле описывается теорией квантовых поправок для неупорядоченных систем для двумерного случая [5]. Двумерными объектами в волокне являются кристаллиты, из которых оно состоит. Довольно низкая температура сверхпроводящего перехода T_c связана на наш взгляд с сильной неоднородностью слоя NbC , т.к. известно, что T_c уменьшается до нуля уже при 20% вакансий в NbC [7]. Подобрать соответствующие условия обработки волокна, можно существенно повысить T_c . Критический ток для вискозного моноволокна составил приблизительно 1 мА, а для пекового приблизительно 10 мА. Учитывая глубину проникновения интеркалята до термообработки, которая составляет по оценкам ≈ 0.5 мкм, можно получить соответствующие критические плотности тока $\approx 2 \cdot 10^4$ А/см и $\approx 10^5$ А/см².

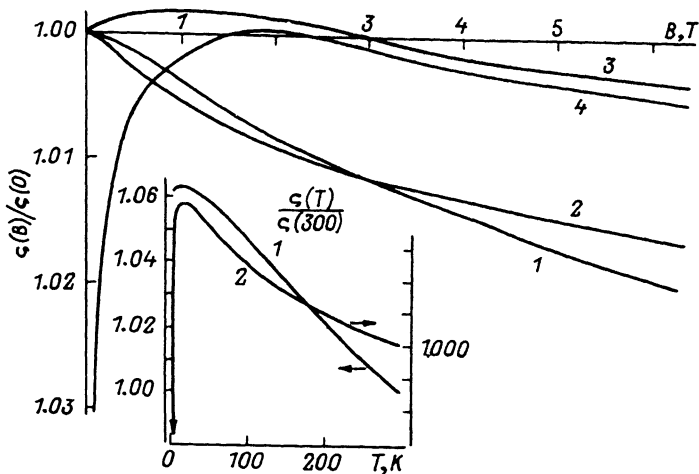


Рис. 2. Зависимости поперечного сопротивления пековых волокон от магнитного поля (на вставке - от температуры) до обработки солями ниобия (1, 2), на вставке - 1 и после (3, 4), на вставке - 2, температура T, K : 1, 3 - 4,2; 2, 4 - 1,3.

соответственно. Небольшие значения критического тока связаны, по-видимому, с тем, что сверхпроводимость наблюдается в неупорядоченной системе с наличием слабой связи. Мелкокристаллическая структура с различной ориентацией кристаллитов приводит также к размытию перехода в магнитном поле (см. рис. 2).

Двумерная локализация носителей с последующим сверхпроводящим переходом наблюдалась ранее в пленках алюминия [8], однако в этом случае сопротивление падало при понижении температуры в связи с существенной ролью электрон-фононного рассеяния в алюминии. В углеродных волокнах с понижением температуры наблюдается возникновение режима слабой локализации носителей тока, при этом, как показывают расчеты, существенную роль при низких температурах играют взаимодействие электронов и сверхпроводящие флуктуации (поправки Маки-Томпсона). В неупорядоченной системе (волокна, покрытые карбидом ниобия) при низких температурах система слабо локализованных электронов переходит в сверхпроводящее состояние, т.е. поправки Маки-Томпсона становятся доминирующими.

Л и т е р а т у р а

- [1] Natarajan V., Wollam J.A., Yavrouian A. - Synth. Met., 1983, v. 8, N 2, p. 291-295.

- [2] Piraux L., Issi J.-P., Michenaud J.-P., McRae E., Mareche J.F. Sol. St. Comm., 1985, v. 56, N 7, p. 567-569.
- [3] Piraux L., Bayot V., Michenaud J.-P., Issi J.-P., Mareche J.F., McRae E. - Sol. St. Comm., 1986, v. 59, N 11, с. 711-715.
- [4] Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А., Никитина О.М., Чудинов С.М. - ФНТ, 1986, т. 12, № 10, с. 1115-1117.
- [5] Альтшулер Б.Л., Аронов А.Г., Ларкин А.И., Хмельницкий Д.Е. - ЖЭТФ, 1981, т. 81, № 2, с. 768-783.
- [6] Авдеев В.В., Аким В.Я., Кульбачинский В.А., Никитина О.М., Рыбачук В.А. - Вестник МГУ, сер. 3, физика, астрономия, 1987, т. 28, № 5, с. 55-61.
- [7] Pickett W.E., Klein B.M., Zeiler R. - Phys. Rev. B, 1986, v. 34, N 4, p. 2517-2521.
- [8] Santhanam P., Wind S., Prober D.E. - Phys. Rev. B, 1987, v. 35, N 7, p. 3188-3206.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию
7 июля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 18

26 сентября 1988 г.

ОПТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В ТРОИЧНОЙ СИСТЕМЕ СЧИСЛЕНИЯ

Г.Г. Воеводкин, Е.М. Дианов,
А.А. Кузнецов, С.М. Нефедов

Основное достоинство троичной системы счисления заключается в ее потенциально более высокой экономичности. При использовании n знаков в m -ичной системе счисления (т.е. n/m разрядов) можно записать $m^{n/m}$ чисел. Легко показать, что эта функция достигает максимума (по m) при m , равном e . Ближайшее к e целое число есть 3. Используя 60 знаков в двоичном коде, возможно записать 2^{30} чисел, а в троичной системе 3^{20} , что почти в четыре раза больше. В [1] рассматривается эмпирическая функция $f(m)$, показывающая, во сколько раз количество оборудования, необходимого для изображения одного числа в системе счисления с основанием m , больше необходимого для изображения одного числа в двоичной системе (при одинаковой точности). При этом предпола-