

и самоподдерживающийся характер синхронизма электронов с комбинационным полем, в результате чего в пренебрежении истощением накачки процесс ускорения продолжается неограниченно долго.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Bonifacio R., Casagrand F. - Nucl. Inst. and Meth Phys. Res. 1985. V. A 239. P. 36-42.
- [2] Железняков В.В., Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В. // Изв. вузов. Радиопизика. 1986. Т. 29. С. 1095.
- [3] Гинзбург Н.С. // Письма в ЖТФ, 1988. Т. 13, Вып. 5. С. 173-176.
- [4] Гинзбург Н.С., Зотова И.В. // Письма в ЖТФ, 1989, т. 14, Вып. 15.
- [5] Ильинский Ю.А., Маслова Н.С. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. № 1. С. 171-174.
- [6] Гапонов А.В., Миллер М.А. // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. № 3. С. 751-752.
- [7] Palmer R.B. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. N 4. P. 3014-3024.

Институт прикладной физики
АН СССР, Горький

Поступило в Редакцию
1 августа 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 19

12 октября 1989 г.

05.4

ФРАКТАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

А.Б. Мосолов

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости в металлооксидной керамике [1] вызвало многочисленные исследования, направленные на изучение различных свойств этих новых сверхпроводящих материалов.

Образцы сверхпроводящих керамик, полученные по стандартной технологии путем высокотемпературного синтеза представляют собой конгломерат зерен различного размера (от долей до десятков микрон) и обычно содержат достаточно большое количество пор, размеры и распределение которых зависят от технологии изготовления и режима термомеханической обработки. Условлено, что на свойства сверхпроводящих керамик существенное влияние оказывают различные структурные характеристики, также как размеры и

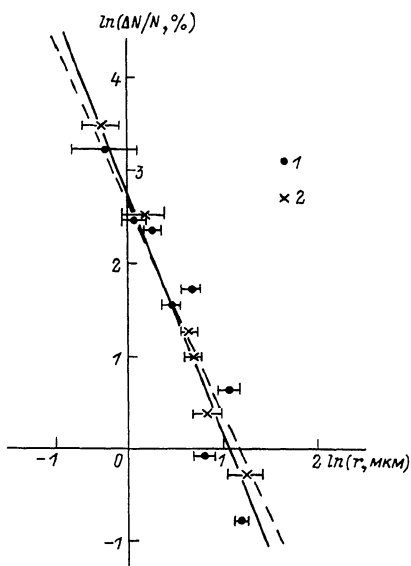


Рис. 1. Распределение по размерам относительного числа пор (● - 1) и частиц (× - 2) в сверхпроводящей керамике $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ [2].

форма образовавшихся зерен (гранул), связность микроструктуры, фазовая и концентрационная неоднородность, наличие различного рода несовершенств и дефектов и т.д. Этими параметрами в немалой степени определяются не только электрофизические, но также и механические свойства (упругость, прочность, пластичность) рассматриваемых материалов. Поскольку пористость керамических сверхпроводников обычно весьма велика при изучении механической прочности и химической активности таких материалов важное значение приобретает вопрос о строении порового пространства керамик [2-4].

В работе [2] приведены гистограммы распределения частиц и пор по размерам для керамики $La_{2-x}Sr_xCuO_4$. Ниспадающие ветви диаграмм, перестроенные в логарифмическом масштабе показаны на рис. 1. Отсюда можно заключить, что для частиц и пор пригоден степенной закон распределения относительного числа структурных элементов $n(r) = \Delta N/N$ (%) по размерам $r: n(r) \sim r^{-\alpha}$. Для пор $\alpha_c = 2.5 \pm 0.4$, а для частиц $\alpha_p = 2.7 \pm 0.2$.

Степенной закон распределения структурных элементов по размерам наводит на мысль, что на рассматриваемых масштабах структура керамики характеризуется фрактальной геометрией.

Действительно, нетрудно установить, что фракталом является, например, поверхность порового пространства (как, впрочем, и поверхность частиц). В самом деле, если измерять поверхность пор S с точностью r , то

$$S(r) \sim \int_r^R n(r) r^2 \frac{dr}{r},$$

где R — максимальный (во фрактальной области) размер пор. При $R \gg r$ имеем $S \sim r^{2-\alpha_c}$. Из определения фрактальной размерности d_f [5] следует, что $S \sim r^{-(d_f-2)}$ и поэтому $d_{fc} = \alpha_c = 2.5 \pm 0.4$. Аналогично фрактальная размерность поверхности частиц $d_{fp} = \alpha_p = 2.7 \pm 0.2$.

В работе [4] фрактальная поверхность пор (каверн) и частиц обнаружена в керамике $YBaCuO$. В отличие от рассмотренного выше случая, фрактальная размерность в [4] оценивалась по двумерному образу структуры как показатель степени в законе связи периметра P площади S пор и частиц соответственно: $P \sim S^{d_{fp}}$. Были исследованы два образца А и В, отличающиеся технологией, $T_c(A) \approx 90$ К, $T_c(B) \approx 70$ К, процентное содержание каверн (пор) $\sigma(A) = 38.7\%$; $\sigma(B) = 60\%$.

В результате анализа получено:

$$d_{fp}^{2D}(A) = 1.283, d_{fp}^{2D}(B) = 1.316; d_{fc}^{2D}(A) = 1.66, d_{fc}^{2D}(B) = 1.23. \text{ Отсюда можно получить оценку фрактальной размерности поверхности порогового пространства и поверхности частиц } (d_f \geq d_f^{2D} + 1):$$

$d_{fp}(A) \geq 2.283, d_{fp}(B) \geq 2.316; d_{fc}(A) \gg 2.166, d_{fc}(B) \gg 2.23$. Видно, что как и в рассмотренном выше случае фрактальная размерность поверхности пор лишь несколько меньше размерности поверхности частиц. Пренебрегая этим отличием для описания структуры керамики можно предложить скейлинговую модель пористой среды — скейл, подробно рассмотренную в работе [6].

Скейл строится итерационно, так, что на каждом шаге элементарная ячейка D_i i -го поколения превращается в k_1 частиц P_{i+1} , k_2 пор C_{i+1} и k_3 ячеек D_{i+1} $i+1$ -го поколения, характерные размеры изменяются при этом в λ^{-1} раз, $k_1 + k_2 + k_3 = \lambda^D$, где D — размерность пространства.

Легко убедиться, что для такой модели $\alpha = \ln k_3 / \ln \lambda$, а пористость $m = f k_2 k_3^{-D/\alpha} / (1 - k_3^{1-D/\alpha})$, (f — коэффициент формы, число порядка 1). Типичный пример $2D$ -скейла показан на рис. 2.

Попытки улучшить электрофизические и механические характеристики высокотемпературных сверхпроводников привели к созданию и изучению керметов на их основе. В настоящее время наиболее обнадеживающие результаты (заметное увеличение J_c , повышение пластичности и трещиностойкости и т.д.) получены в системе $Ag-YBa_2Cu_3O_x$ [7-9].

В настоящей работе исследована микроструктурная геометрия таких композитов, изготовленных из порошков $YBa_2Cu_3O_x$ и Ag , полученных криохимическим методом. Были приготовлены сверхпроводящие композиты с объемной долей серебра C от 0 до 60%. Спекание образцов, спрессованных в виде таблеток диаметром 8 и высотой 2-4 мм проводилось в потоке кислорода при температуре 910-935 °С в течение полутора часов с последующим отжигом

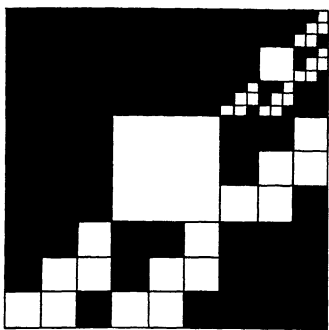


Рис. 2. Второй и третий (в верхнем правом углу) шаг итерационного построения $2D$ -скейла с $k_1 = 4$, $k_2 = 1$, $k_3 = 4$, $\lambda = 3$. В этом случае $d = \ln 4 / \ln 3$, $m = 0.2$.

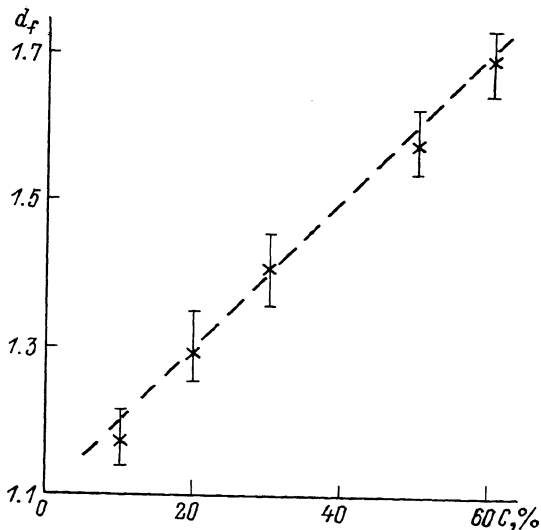


Рис. 3. Зависимость фрактальной размерности серебряного кластера в композите $Ag-YBa_2Cu_3O_x$ от весовой доли серебра c . Штриховая линия - зависимость $d_f = 1.1 + 0.9c$.

и медленным охлаждением в кислородной атмосфере. После спекания и отжига таблетки полировались, а затем были сфотографированы с помощью оптического и электронного микроскопов при различных увеличениях. Граница серебряных кластеров представляла собой нерегулярную кривую, степень изрезанности которой увеличивалась с увеличением c . По фотографиям была оценена фрактальная размерность границы кластеров с помощью зависимости $P \sim S^{-d_f}$, где P - периметр кластера, S - масштаб измерения. Результаты приведены на рис. 3 и достаточно хорошо описываются простой формулой

$$d_f \approx 1.1 + 0.9c.$$

При $c \rightarrow 1$ (предел чистого серебра) получаем, как и должно быть $d_f \sim 2$, а на пороге перколяции ($c \sim 0.6$) имеем $d_f \sim 1.7$, что хорошо согласуется с размерностью перколяционного кластера.

Таким образом, структура сверхпроводящих керметов $Ag-YBa_2Cu_3O_x$ характеризуется фрактальной геометрией и это мо-

жет быть существенно при описании электрофизических (например, транспортных) и механических свойств таких материалов. Автор выражает благодарность М.В. Елашкину, А.В. Лужкову и В.П. Шабатину за возможность использования в работе синтезированных ими композитов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Bednorz J.G., Müller K.A. // Z. Phys. 1986. V. 64. P. 189-194.
- [2] Веркин Б.И., Бандурян Б.Б., Барыльник А.С. и др. // ФНТ. 1987. Т. 13. № 7. С. 771-783.
- [3] Добромыслов А.В., Долгих Г.В., Та-луц Г.Г. и др. // ФММ. 1988. Т. 65. № 4. С. 763-771.
- [4] Daolin Chen, Dexing Pang, Zhongjin Yang et al. // J. Phys. C: Sol. State Phys. 1988. V. 21. N 9. P. L271-L275.
- [5] Mandelbrot B.B. Fractal geometry of nature. San-Francisco: Freeman. 1982. P. 432.
- [6] Мосолов А.Б., Динариев О.Ю. // ЖТФ. 1988. Т. 58. № 2. С. 233-238.
- [7] Sharma R.G., Reddy Y.S., Jha S.R. et al // Pramana - J. Phys. 1988. V. 30. N 1. P. L75-80.
- [8] Свистунов В.М., Таренков В.Ю., Дьяченко А.И. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 49. № 11. С. 614-617.
- [9] Pavana D., Berger H., et al. // Prys. C. 1988. V. C153-155. P. 1339-1340.

Институт проблем
механики АН СССР

Поступило в Редакцию
2 августа 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 19

12 октября 1989 г.

01; 04

ПРИБЛИЖЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОРМОЗНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЛАЗМЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ

А.Я. Полищук, В.Е. Фортгов,
В.С. Хлопонин

1. Один из проектов осуществления управляемой термоядерной реакции с инерционным удержанием плазмы основан на использовании пучков заряженных частиц для сжатия и разогрева мишени