

# Коэффициент линейного расширения биоморфного композита SiC/Si

© А.И. Шелых, Б.И. Смирнов, И.А. Смирнов, A.R. de Arellano-Lopez\*,  
J. Martinez-Fernandez\*, F.M. Varela-Feria\*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* Universidad de Sevilla,  
41080 Sevilla, Spain

E-mail: Igor.Smirnov@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 25 апреля 2005 г.)

В интервале температур 100–650 К измерен коэффициент линейного расширения  $\beta$  биоморфного композита SiC/Si — новой экокерамики канального типа, приготовленной на основе пористой канальной углеродной матрицы, полученной из дерева (белого эвкалипта) с помощью его пиролиза в атмосфере аргона, с последующей имплантацией в сквозные каналы этой матрицы расплавленного кремния и образованием 3C-SiC. Исследовались образцы SiC/Si с „избыточной“ объемной концентрацией Si  $\sim 30\%$  и пористостью  $\sim 13\text{--}15\%$ . Измерения проводились на образцах, вырезанных вдоль ( $\beta_{\parallel}$ ) и поперек ( $\beta_{\perp}$ ) направления роста дерева. Проведено сравнение полученных результатов  $\beta(T)$  для SiC/Si с литературными данными для коэффициентов линейного расширения Si и 3C-SiC.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-03-33183), программы Президиума РАН (П-28) и Министерства науки и технологии Испании (проект MAT 2003-05202-C02-01).

PACS: 72.80.Tm, 65.40.De

Настоящая работа является продолжением проводимого нами цикла исследований физических свойств (модуля Юнга [1,2], удельного электросопротивления [3,4] и теплопроводности [4]) композита SiC/Si — биоморфной экокерамики (ecoceramics — environment conscious ceramics [5]).

Биоморфные композиты конструируются на основе „канальных“ пористых углеродных матриц, получаемых путем пиролиза (обугливания) в атмосфере аргона при 1300 К различных сортов дерева (эвкалипта, Sapele, дуба и др.), с последующей инфильтрацией в пустые сквозные каналы этих матриц (с диаметрами каналов от  $\sim 4$  до  $\sim 100\ \mu\text{m}$  [6]) расплавленного Si. После химической реакции Si с углеродной матрицей образуется 3C-SiC и затем при наличии „избыточного“ Si конструируется композит 3C-SiC/Si [5]. Композиты в зависимости от сорта дерева образуют индивидуальные ячеистые (канальные) структуры, в которых 3C-SiC, пустые каналы и каналы, заполненные не вступившим в реакцию с углеродом матрицы „избыточным“ кремнием, располагаются вдоль направления роста дерева.

Экокерамики SiC/Si являются весьма перспективными материалами для практических приложений, так как они обладают большой механической прочностью, противостоят окислению и коррозии, имеют небольшой вес (их плотность составляет  $\sim 2.3\ \text{g/cm}^3$ ) и могут быть использованы при достаточно высоких температурах.

В настоящей работе мы провели измерения в интервале температур 100–650 К коэффициента линейного расширения  $\beta$  биоморфного композита SiC/Si, полученного на основе пористой канальной углеродной матрицы белого эвкалипта.

Экспериментальные данные по измерению коэффициента линейного расширения экокерамики SiC/Si в литературе отсутствуют.

Исследованные образцы композита содержали, согласно оценкам на основании данных по рентгеноструктурному анализу,  $\sim 30\ \text{vol.}\%$  Si, а их пористость составляла  $\sim 13\text{--}15\ \text{vol.}\%$ . Исследование  $\beta(T)$  проводилось с помощью кварцевого dilatометра на образцах размером  $2 \times 3 \times 17\ \text{mm}$ , вырезанных как вдоль ( $\beta_{\parallel}$ ), так и поперек ( $\beta_{\perp}$ ) направления роста дерева.

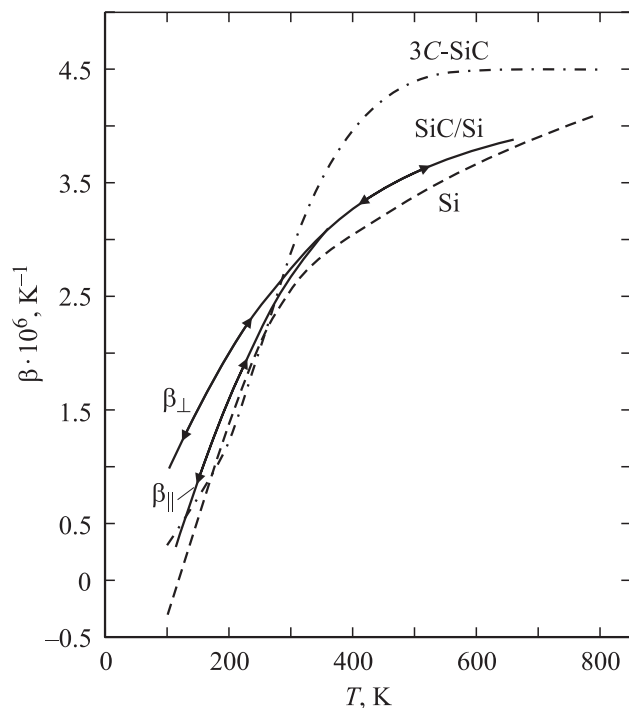
Измерения были выполнены на воздухе, что особенно важно для практического использования, поскольку эксплуатация большого числа объектов, выполненных на основе экокерамики SiC/Si, проходит на воздухе.

Полученные зависимости  $\beta(T)$  для указанных образцов SiC/Si представлены на рисунке. Там же приведены литературные данные для  $\beta(T)$  Si и 3C-SiC [7].

Видно, что при измерении  $\beta_{\perp}(T)$  и  $\beta_{\parallel}(T)$  SiC/Si до высоких температур их прямой и обратный ход совпадает, что указывает на отсутствие каких-либо изменений в образцах при высокотемпературном нагреве.

Анализ данных, приведенных на рисунке, позволяет выделить ряд особенностей, представляющих научный и практический интерес.

Так, в интервале температур 100–350 К наблюдается анизотропия в поведении  $\beta(T)$ , а при  $T > 350\ \text{K}$  она исчезает. При этом в области проявления анизотропии  $\beta(T)$  выполняется соотношение  $\beta_{\perp} > \beta_{\parallel}$  (при 200 К  $\beta_{\perp}/\beta_{\parallel} \sim 1.3$ ). Таким образом, расширение образца происходит легче, когда он имеет структуру типа „слоеного пирога“, т. е. наблюдается чередование слоев Si и 3C-SiC.



Температурные зависимости коэффициентов линейного расширения 3C-SiC [7], Si [7] и образцов биоморфного композита SiC/Si на основе дерева белого эвкалипта с концентрацией Si  $\sim 30$  vol.%, измеренных соответственно вдоль ( $\beta_{\parallel}$ ) и поперек ( $\beta_{\perp}$ ) направления роста дерева. Стрелки на кривых обозначают прямой и обратный ход при измерении  $\beta_{\perp}(T)$  и  $\beta_{\parallel}(T)$ .

При исследовании температурной зависимости удельного электросопротивления ( $\rho$ ) SiC/Si тоже была обнаружена анизотропия в поведении  $\rho(T)$  [3]. Здесь также во всем исследованном интервале температур (10–300 К) из-за наличия граничного электросопротивления между слоями Si и 3C-SiC  $\rho_{\perp}(T)$  было больше  $\rho_{\parallel}(T)$  ( $\rho_{\parallel}$  и  $\rho_{\perp}$  — соответственно удельное электросопротивление SiC/Si, измеренное вдоль и поперек направления роста дерева).

Характерно также, что во всем исследованном интервале температур (особенно это проявляется при  $T > 300$  К) коэффициенты линейного расширения исследованных образцов ( $\beta_{\perp}$  и  $\beta_{\parallel}$ ) SiC/Si имеют значения, близкие к величинам  $\beta(T)$  для Si-материала с меньшим (хотя и незначительно) коэффициентом ангармоничности по сравнению с 3C-SiC.

В этой связи можно отметить еще один интересный факт, который наблюдался нами при измерении теплопроводности кристаллической решетки ( $\kappa_{\text{ph}}$ ) SiC/Si для образцов, вырезанных вдоль направления роста дерева [4]. Величина  $\kappa_{\text{ph}}$ , как и коэффициент линейного расширения, связана с ангармоничностью тепловых упругих волн [7]. Экспериментально установлено [4], что  $\kappa_{\text{ph}}(T)$  SiC/Si при  $T > 200$  К, так же как и  $\beta(T)$ , стремится к значению  $\kappa_{\text{ph}}$ , характерному для Si.

Таким образом, в результате проведенного цикла измерений  $\beta(T)$  биоморфного композита SiC/Si можно сделать следующие основные выводы.

1) Полученные в эксперименте значения  $\beta(T)$  образцов SiC/Si находятся в промежутке между величинами  $\beta(T)$  для Si и 3C-SiC, при этом  $\beta(T)$  SiC/Si во всем исследованном интервале температур (100–650 К) располагается ближе к данным для  $\beta(T)$  Si.

2) В интервале 100–350 К наблюдается анизотропия в поведении  $\beta(T)$  SiC/Si ( $\beta_{\perp}/\beta_{\parallel} > 1$ ), которая исчезает при  $T > 350$  К.

Авторы благодарят Н.Ф. Картенко и Н.В. Шаренкову за проведение рентгеноструктурного анализа исследованных образцов и оценку концентрации кремния в них.

## Список литературы

- [1] Б.И. Смирнов, Ю.А. Буренков, Б.К. Кардашев, F.M. Varela-Feria, J. Martinez-Fernandez, A.R. de Arellano-Lopez. ФТТ **45**, 3, 456 (2003).
- [2] Б.К. Кардашев, Ю.А. Буренков, Б.И. Смирнов, A.R. de Arellano-Lopez, J. Martinez-Fernandez, F.M. Varela-Feria. ФТТ **46**, 10, 1811 (2004).
- [3] T.S. Orlova, B.I. Smirnov, A.R. de Arellano-Lopez, J. Martinez-Fernandez, R. Sepúlveda. ФТТ **47**, 2, 229 (2005).
- [4] Л.С. Парфеньева, Т.С. Орлова, Н.Ф. Картенко, Н.В. Шаренкова, Б.И. Смирнов, И.А. Смирнов, Н. Misiorek, A. Jezowski, F.M. Varela-Feria, J. Martinez-Fernandez, A.R. de Arellano-Lopez. ФТТ **47**, 7, 1175 (2005).
- [5] A.R. de Arellano-Lopez, J. Martinez-Fernandez, P. Gonzalez, C. Dominguez, V. Fernando-Quero, M. Singh. Int. J. Appl. Cer. Technol. **1**, 1, 1 (2004).
- [6] F.M. Varela-Feria, Ph.D. Thesis. Universidad de Sevilla (2004).
- [7] С.И. Новикова. Тепловое расширение твердых тел. Наука, М. (1974). 291 с.