

Анизотропия теплопроводности и удельного электросопротивления биоморфного композита SiC/Si, полученного на основе биоуглеродной матрицы белого эвкалипта

© Л.С. Парфеньева, Т.С. Орлова, Б.И. Смирнов, И.А. Смирнов, Н. Misiorek*,
J. Mucha*, A. Jezowski*, 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

* Trzebiatowski Institute of Low Temperature and Structure Research, Polish Academy of Sciences,
50–950 Wrocław, Poland

** Universidad de Sevilla,
41080 Sevilla, Spain

E-mail: igor.smirnov@mail.ioffe.ru
smir.bi@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 11 апреля 2006 г.)

В интервале температур 5–300 К измерены теплопроводность κ и удельное электросопротивление ρ экокерамики канального типа — биоморфного композита SiC/Si, приготовленного на основе канальной биоуглеродной матрицы, полученной из дерева белого эвкалипта с помощью пиролиза в атмосфере аргона, с последующей инфильтрацией в сквозные каналы биоуглеродной матрицы расплавленного Si. Исследованы образцы с концентрацией Si \sim 30 vol.%. Температурные зависимости $\kappa(T)$ и $\rho(T)$ измерялись на образцах, вырезанных параллельно и перпендикулярно оси роста дерева. Приводятся данные об анизотропии $\kappa(T)$. С использованием результатов для $\kappa(T)$ и $\rho(T)$ настоящей работы и литературных данных обсуждается поведение этих параметров в биоморфном композите SiC/Si в зависимости от концентрации в нем Si.

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

PACS: 81.05.Zx, 65.90.+i, 72.80.Tm

Биоморфные композиты SiC/Si, которые в литературе называются также экокерамикой, в последние годы вызвали большой интерес у технологов, физиков и инженеров после обнаружения в этих материалах интересных физических свойств и весьма заманчивых перспектив для их практического применения [1]. Биоморфные композиты конструируются на основе „канальных“ углеродных матриц, получаемых путем пиролиза (обугливания) различных сортов дерева (сосны, эвкалипта, манго, дуба, бука, клена и др.), с последующей инфильтрацией в пустые сквозные каналы этих матриц (с диаметрами каналов от \sim 4 до \sim 100 μ m) расплавленного Si. После химической реакции Si с углеродной матрицей образуется композит SiC/Si, в котором могут остаться также небольшие островки не вступившего в реакцию с Si углерода. Композиты в зависимости от технологии их приготовления и сорта дерева образуют индивидуальные ячеистые (канальные) структуры. При этом основная масса композита состоит из SiC, а вытянутые в направлении роста дерева каналы частично или полностью заполнены Si. Некоторые из этих каналов могут оставаться пустыми. Таким образом, в процессе приготовления композита образуется искусственный анизотропный материал [2].

В последние годы исследования биоморфных композитов SiC/Si были сконцентрированы главным образом на изучении их структурных и механических

свойств [1,3–5]. Мы провели ряд измерений некоторых основных физических характеристик этих композитов: удельного электросопротивления [6,7], теплопроводности [8], коэффициента линейного расширения [9], термоэдс [7], эффекта Холла [7]. В работах [6,7,9] рассматривалась анизотропия поведения в SiC/Si удельного электросопротивления и коэффициента линейного расширения.

Анизотропия теплопроводности биоморфной керамики SiC/Si ранее не исследовалась. В основном этому вопросу и посвящена настоящая работа.

При этом в процессе проведения работы предполагалось: 1) оценить величину анизотропии теплопроводности в искусственно анизотропном объекте — биоморфном композите 3C-SiC/Si, полученном на основе биоуглеродной матрицы белого эвкалипта, и попытаться объяснить наблюдающийся в нем разброс значений для величины анизотропии удельного электросопротивления; 2) оценить влияние Si в 3C-SiC/Si на величину его удельного электросопротивления и теплопроводности.

1. Приготовление образцов и их идентификация

Образцы биоморфного композита SiC/Si были приготовлены путем инфильтрации в вакууме расплавленного Si в углеродную канальную матрицу дерева белого

эвкалипта, полученную в результате его пиролиза в атмосфере аргона при 1000°C [1].

После инфильтрации из готового бруска биоморфного композита SiC/Si вырезались образцы в виде параллелепипедов размером 3 × 3 × 15 mm. Длинные стороны различных образцов были направлены параллельно или перпендикулярно оси роста дерева. На этих образцах при 300 K были проведены микроструктурные и рентгеноструктурные исследования и измерена их плотность.

Микрофотографии, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа Philips XL30, были подобны микрофотографиям, приведенным в работе [3], а дифрактометрические кривые интенсивности, измеренные на аппарате ДРОН-2 (CuK α -излучение), аналогичны полученным в работе [8].

Рентгенограмма биоморфного композита SiC/Si дает дифракционную картину смеси кубического 3C-SiC (параметр решетки $a = 4.358 \text{ \AA}$) и Si ($a = 5.430 \text{ \AA}$). Обе фазы хорошо сформированы. Содержание кремния в образце SiC/Si по рентгенометрической оценке данных для образцов композита и кремния составляет $\sim 30 \text{ vol.}\%$.

На основании электронно-микроскопических измерений на большом числе образцов углеродной матрицы белого эвкалипта было установлено [10], что небольшие поры (отвечающие среднему диаметру каналов $\sim 4 \mu\text{m}$) и большие поры (отвечающие среднему диаметру каналов $\sim 62.5 \mu\text{m}$) занимают в ней соответственно ~ 29 и $\sim 14\%$ от общего объема образца. Таким образом, пористость исследованных образцов композитов 3C-SiC/Si составляла $\sim 13 \text{ vol.}\%$.

2. Экспериментальные результаты

Теплопроводности $\kappa_{\parallel}(T)$, $\kappa_{\perp}(T)$ и удельные электропроводности $\rho_{\parallel}(T)$ и $\rho_{\perp}(T)$ образцов биоморфного композита 3C-SiC/Si, вырезанных соответственно параллельно и перпендикулярно направлению роста дерева, были измерены в интервале 5–300 K на установке, аналогичной использованной в [11]. Полученные результаты представлены на рис. 1 и 2. На вставках на этих рисунках для наглядности приведены соответствующие идеализированные схемы биоморфного композита SiC/Si. Из-за достаточно больших величин $\rho_{\parallel}(T)$ и $\rho_{\perp}(T)$ и малости вследствие этого электронных составляющих теплопроводности полученные на эксперименте $\kappa_{\parallel}(T)$ и $\kappa_{\perp}(T)$ фактически являются теплопроводностями кристаллической решетки (фононными теплопроводностями).

Данные для $\kappa_{\parallel}(T)$, $\kappa_{\perp}(T)$, $\rho_{\parallel}(T)$ и $\rho_{\perp}(T)$ приведены на рис. 1 и 2 без учета пористости исследованных образцов. При дальнейшей обработке полученных экспериментальных данных для удельного электропроводности и теплопроводности учет пористости проводился

соответственно по формулам (1) [12,13] и (2) [14]

$$\rho_0 = (1 - p)\rho, \quad (1)$$

$$\kappa = \kappa_0(1 - p)\sqrt{1 - p}, \quad (2)$$

где ρ_0 и κ_0 — удельное электросопротивление и теплопроводность безпористого материала; ρ и κ — значения, полученные на эксперименте без учета пористости исследованных образцов; а p — величина пористости. Как отмечалось выше, для исследованных нами образцов она была равна 0.13.

3. Обсуждение результатов

3.1. Анизотропия теплопроводности биоморфного композита 3C-SiC/Si. На рис. 3 (кривая 1) приведена рассчитанная по представленным на рис. 1 данным величина анизотропии теплопровод-

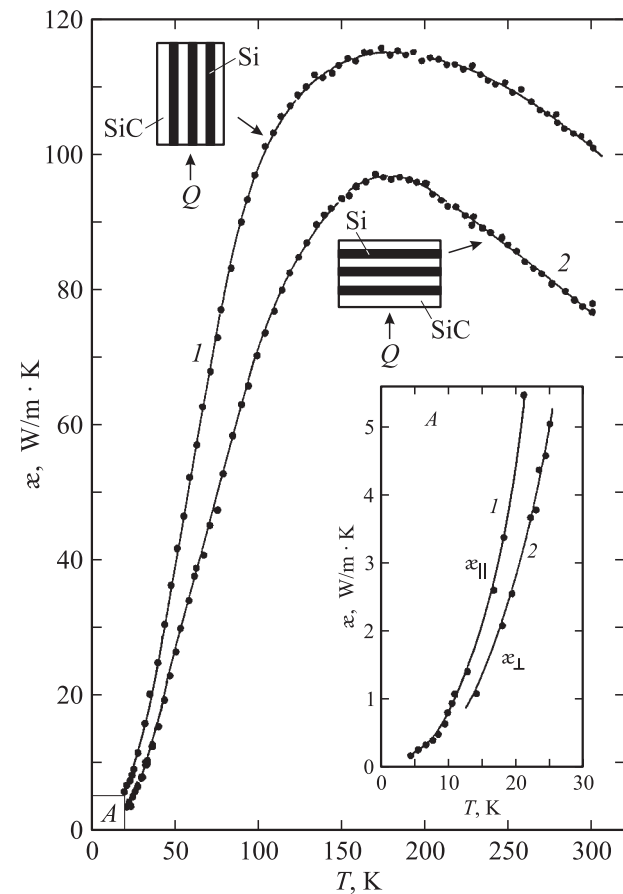


Рис. 1. Температурные зависимости фононной теплопроводности κ образцов биоморфного композита 3C-SiC/Si с концентрацией Si $\sim 30 \text{ vol.}\%$. 1 и 2 — соответственно измерения на образцах, вырезанных параллельно (κ_{\parallel}) и перпендикулярно (κ_{\perp}) оси роста дерева. Данные для $\kappa_{\parallel}(T)$ и $\kappa_{\perp}(T)$ приведены без учета пористости образцов. На вставке A представлены низкотемпературные данные. На вставках к кривым 1 и 2 показаны идеализированные схемы строения исследованных образцов. Q — направление распространения теплового потока при измерении теплопроводности.

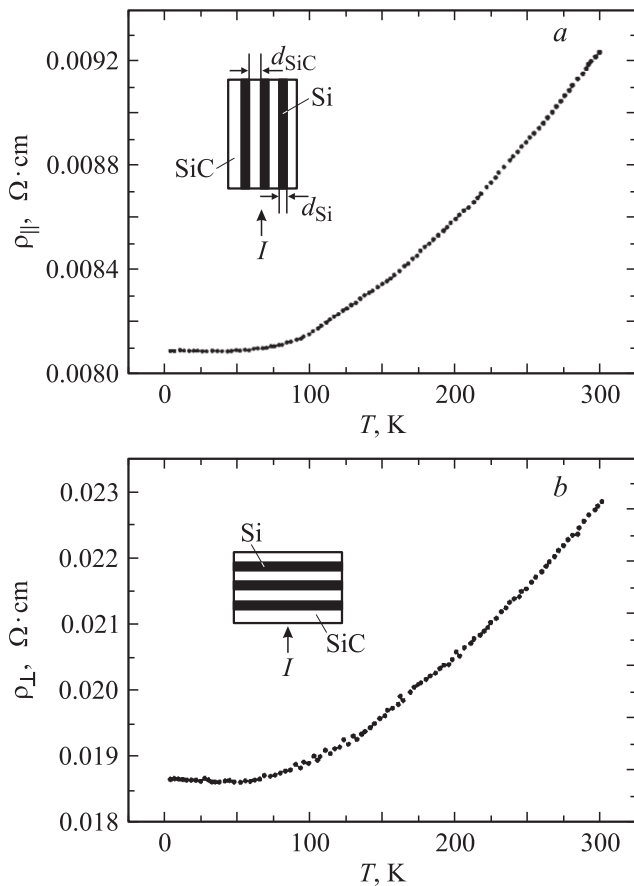


Рис. 2. Температурная зависимость удельного электросопротивления ρ образцов биоморфного композита 3C-SiC/Si с концентрацией Si ~ 30 vol.%. *a* и *b* — соответственно измерения на образцах, вырезанных параллельно (ρ_{\parallel}) и перпендикулярно (ρ_{\perp}) оси роста дерева. Данные для ρ_{\parallel} и ρ_{\perp} приведены без учета пористости образцов. На вставках представлены идеализированные схемы строения исследованных образцов. *I* — направление распространения тока при измерении $\rho_{\parallel}(T)$ и $\rho_{\perp}(T)$.

ности $\beta_x = \kappa_{\parallel}(T)/\kappa_{\perp}(T)$ биоморфного композита 3C-SiC/Si (с концентрацией Si ~ 30 vol.%), полученного на основе биоуглеродной матрицы дерева белого эвкалипта. Видно, что β_x уменьшается с повышением температуры от ~ 1.6 (при 50 К) до ~ 1.2 (при 300 К). При этом следует отметить, что в искусственно анизотропном объекте — биоморфном композите 3C-SiC/Si — оба материала, образующие композит, относятся к кубическим модификациям.

Подобный эффект в изменении β_x наблюдался ранее в [15] при исследовании теплопроводности сильно текстурированных поликристаллических образцов ZnS, ZnSe и CdTe с кубической структурой и зернами, вытянутыми в направлении оси роста кристаллов (кривая 2 на рис. 3). Обнаруженную анизотропию теплопроводности в этих сильно текстурированных образцах авторы [15] связали с наличием в них специфически „анизотропных“ протяженных дефектов — винтовых

дислокаций, имеющих преимущественную ориентацию в направлении роста образцов.

Наблюдаемую нами анизотропию теплопроводности в искусственно анизотропном объекте — биоморфном композите 3C-SiC/Si — можно также попытаться связать с наличием протяженных „анизотропных“ дефектов — дислокаций несоответствия [16,17], которые могут возникать в композите на границе между 3C-SiC и Si. Кроме того, обнаруженная анизотропия может быть обусловлена и особенностями фононных спектров 3C-SiC и Si, возникающих на границах раздела этих материалов в композите 3C-SiC/Si [18].

При исследовании анизотропии удельного электросопротивления $\beta_{\rho} = \rho_{\perp}/\rho_{\parallel}$ и интерпретации полученных результатов мы столкнулись с некоторыми трудностями. Величина β_{ρ} существенно менялась от образца к образцу у исследованных биоморфных композитов 3C-SiC/Si. Так, например, в композите, полученном на основе биоуглеродной матрицы дерева сапели, β_{ρ} при 300 К изменялась от ~ 1.33 до 5.7 [6] (хотя при этом наблюдалась некоторая закономерность изменения β_{ρ} от величины концентрации Si в композите 3C-SiC/Si). У ряда исследованных нами образцов композита 3C-SiC/Si, полученных на основе биоуглеродной матрицы дерева белого эвкалипта, β_{ρ} при 300 К изменялась от ~ 1.3 [7] до 10 и более (при этом корреляции с концентрацией Si в композите не наблюдалось). По данным настоящей работы, величина β_{ρ} исследованных в ней образцов почти для всего интервала температур равна ~ 2 (рис. 2).

Такого большого разброса значений для β_x в проведенных нами измерениях теплопроводности различных образцов биокомпозита 3C-SiC/Si не наблюдалось.

В чем же заключается возможная причина наблюдаемого достаточно большого разброса данных для β_{ρ} композита 3C-SiC/Si? Попытаемся хотя бы качественно понять это.

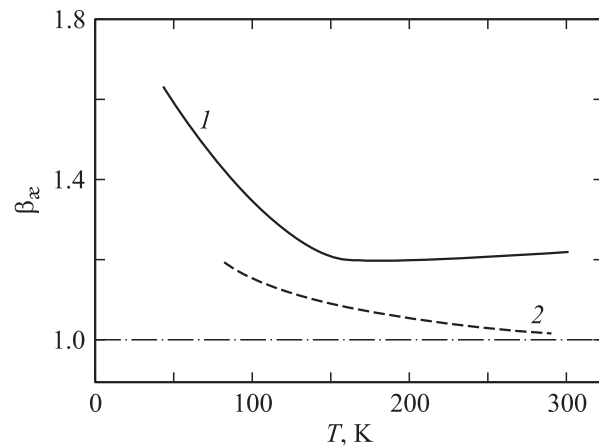


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента анизотропии теплопроводности $\kappa_{\parallel}(T)/\kappa_{\perp}(T)$ (*1*) для образцов биоморфного композита 3C-SiC/Si с концентрацией Si ~ 30 vol.%. *2* — данные для анизотропии теплопроводности текстурированных образцов CdTe [15].

Проведем сначала расчетную оценку величин ρ_{\parallel} и ρ_{\perp} для исследованных образцов биоморфного композита 3C-SiC/Si с помощью формул (3) и (4), полученных в [2] для искусственно анизотропных материалов с идеальной структурой, представленной на вставках к рис. 1 и 2,

$$\rho_{\parallel} = (n + 1)(1/\rho_1 + n/\rho_2)^{-1}, \quad (3)$$

$$\rho_{\perp} = (\rho_1 + n\rho_2)(n + 1)^{-1}, \quad (4)$$

где $n = d_{\text{Si}}/d_{\text{SiC}}$ (рис. 2, а) а ρ_1 и ρ_2 — соответственно удельные электросопротивления 3C-SiC и Si в биоморфном композите 3C-SiC/Si.

Оценим с помощью экспериментальных значений для ρ_{\parallel} (рис. 2, а) и формулы (3) параметр n , определим с его помощью по формуле (4) расчетную величину ρ_{\perp}^c и сравним ее с экспериментальными значениями ρ_{\perp} (рис. 2, б). Расчеты проведем для температуры 300 К. При этом будем использовать данные ρ_{\parallel} и ρ_{\perp} для композита и ρ_1 [19], полученные с учетом пористости образцов по формуле (1).

В расчетах полагалось, что при 300 К ρ_1 равно $\sim 0.70 \Omega \cdot \text{cm}$ [19], а $\rho_2 \sim 2 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ [20]. Значения для ρ_1 3C-SiC получено в [19] на образце биокомпози-та 3C-SiC после удаления из него химическим путем кремния. Полученный таким образом карбид кремния в отличие от синтетического SiC будем в дальнейшем называть био-3C-SiC.

В результате проведенных расчетов n и ρ_{\perp}^c по формулам (3) и (4) получены следующие результаты: $n = 0.33$ и $\rho_{\perp}^c \sim 0.52 \Omega \cdot \text{cm}$.

Если считать, что средние диаметры каналов, заполненных Si в биокомпози-те 3C-SiC-Si (d_{Si} , рис. 2, а), приготовленном на основе биоуглеродной матрицы белого эвкалипта, как отмечалось выше, $\sim 62.5 \mu\text{m}$ [10], то слой био-3C-SiC (d_{SiC} , рис. 2, а) в идеальной структуре рассматриваемого композита будет равен $\sim 189 \mu\text{m}$. Такая величина для среднего размера d_{SiC} по сечению образца в композите на основе биоуглеродной матрицы белого эвкалипта вполне реальна (см. микрофотографии, полученные в сканирующем электронном микроскопе структур белого эвкалипта, представленные на рис. 1 в работе [3]).

Существенное различие наблюдается в величинах расчетного ρ_{\perp}^c и ρ_{\perp} , полученного в эксперименте. Экспериментальное значение ρ_{\perp} составляет $\sim 0.023 \Omega \cdot \text{cm}$ (рис. 2, б), а ρ_{\perp}^c , как отмечалось выше, равно $\sim 0.52 \Omega \cdot \text{cm}$.

Несмотря на достаточно грубую оценку величин n и ρ_{\perp} (в расчетах полагалось, что в исследованном образце имеет место упорядоченное расположение каналов, заполненных кремнием, и сохраняется равенство их диаметров и расстояний между этими каналами по всему сечению образца) все же можно было попытаться извлечь из них некоторые полезные выводы.

1) Основные вклады в поведение $\rho_{\parallel}(T)$ и $\rho_{\perp}(T)$ в 3C-SiC/Si дают соответственно кремний, расположенный

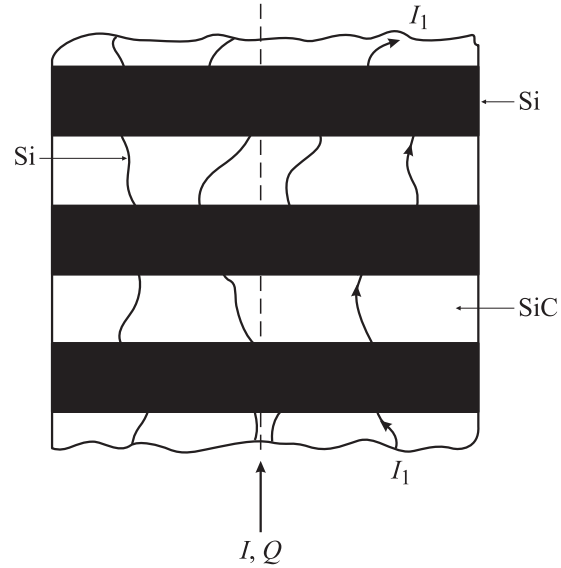


Рис. 4. Более близкая к реальности (по сравнению с идеализированной, рис. 1) схема строения биоморфного композита 3C-SiC/Si для случая измерения $\rho_{\perp}(T)$ и $\kappa_{\perp}(T)$. I и Q — соответственно направления тока и теплового потока при измерении $\rho_{\perp}(T)$ и $\kappa_{\perp}(T)$. I_1 — один из возможных гипотетических путей распространения тока в исследованном образце биоморфного композита.

в каналах биокомпози-та, и его основной каркас, состоящий из био-3C-SiC.

2) Значительное различие в величинах ρ_{\perp}^c и полученных на эксперименте ρ_{\perp} может явиться ключом к пониманию отмеченного выше большого разброса от образца к образцу значений $\beta_{\rho} = \rho_{\perp}/\rho_{\parallel}$ в биоморфных композитах 3C-SiC/Si. По-видимому, оба этих эффекта имеют одну и ту же природу.

Обсудим более детально второй вывод. Как представляется, причины обнаруженных аномалий могут заключаться в более сложной структуре биоморфных композитов.

Идеальной картины композита, представленной на вставках к рис. 1 и 2, конечно, не существует. В достаточно рыхлом дереве, вероятно, имеются более тонкие каналы, которые соединяют между собой толстые продольные каналы в дереве (будем называть их „боковыми“ каналами). При инфильтрации кремния в биоматрицу он заполняет как основные („толстые“), так и „боковые“ (тонкие) каналы. На рис. 4 представлена схема такой более сложной структуры биокомпози-та. По-прежнему для простоты будем полагать, что все „толстые“ каналы биокомпози-та заполнены кремнием.

При измерении $\rho_{\perp}(T)$ ток в образце с такой структурной схемой будет преимущественно распространяться по „боковым“ каналам, заполненным Si, по так называемым „электрическим“ мостикам (см., например, распространение тока I_1 по такому „мостику“ на рис. 4), поскольку, как отмечалось выше, ρ для Si при 300 К

$\sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ [20], а ρ слоев био-3C-SiC при той же температуре равно $\sim 0.7 \Omega \cdot \text{cm}$ [19].

Предложенная модель строения биокompозита может объяснить неприменимость формулы (4) для описания поведения $\rho_{\perp}(T)$, так как для структурной схемы, представленной на рис. 4, следует, вероятно, уже использовать для определения $\rho_{\perp}(T)$ формулу (3).

Предложенная схема (рис. 4) может объяснить также и большой разброс от образца к образцу величины β_{ρ} , поскольку в различных образцах исходной биоматрицы число „боковых“ каналов и образующихся при этом „электрических“ мостиков может быть различным. Величина β_{ρ} будет больше в образцах с меньшим числом „боковых“ каналов по сравнению с образцами, у которых таких каналов будет больше.

Все указанное выше не будет противоречить поведению электрического тока при наличии в композите „боковых“ каналов, заполненных кремнием, и для более реальной схемы биокompозита, когда наряду с полностью или частично заполненными кремнием „толстыми“ каналами в материале имеются и пустые каналы. Однако пути тока по „электрическим“ мостикам в этом случае будут более сложными.

Предложенная усложненная геометрическая картина строения биоморфного композита (рис. 4) может объяснить также слабую чувствительность β_x к особенностям структуры композита, связанным с наличием в образцах тонких „боковых“ каналов, заполненных Si. В отличие от случая β_{ρ} , когда $\rho_{\text{Si}} \ll \rho_{\text{SiC}}$ и электрический ток при измерении ρ_{\perp} стремится протекать по „электрическим“ мостикам из Si, в случае β_x κ_{Si} лишь незначительно превышает κ_{SiC} (особенно при низких температурах [8,20]). При высоких температурах κ_{SiC} уже не сильно отличается от κ_{Si} кремния, находящегося в каналах биокompозита 3C-SiC/Si [8,20]. Поэтому возможный тепловой поток по „боковым“ каналам биокompозита не будет сильно влиять на поведение $\kappa_{\perp}(T)$ этой системы.

В результате полученные данные для β_x биокompозита 3C-SiC/Si более близки к реальной величине анизотропии для этого параметра по сравнению с β_{ρ} . Этот вывод подтверждается и проведенными нами расчетами κ_{\perp}^c с помощью формулы (5), полученной в [2] для искусственной анизотропной модели материала, совпадающей со схемами, приведенными на вставках к рис. 1 и 2.

$$\kappa_{\perp} = (n + 1) \cdot (1/\kappa_1 + n/\kappa_2)^{-1}, \quad (5)$$

где n , как уже отмечалось ранее, равно отношению $d_{\text{Si}}/d_{\text{SiC}}$ (рис. 2, а), а κ_1 и κ_2 — соответственно значения теплопроводностей био-3C-SiC и Si. При расчетах использовалась для параметра n величина, полученная нами ранее из данных для ρ_{\parallel} . Расчеты κ_{\perp}^c проводились для температуры 300 К. κ_{Si} для кремния, расположенного в каналах биокompозита 3C-SiC/Si, полученного на основе биоматрицы белого эвкалипта, согласно [20], при 300 К была $\approx 156 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Теплопроводность био-3C-SiC, полученного путем химического удаления Si из

биокompозита 3C-SiC/Si, составляла при 300 К с учетом пористости образца $\sim 113 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ [20].

Величина κ_{\perp}^c для исследованного в настоящей работе образца, определенная по формуле (5), оказалась равной $121 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, а полученная экспериментально с учетом пористости (рис. 1) $\sim 96 \text{ W/m} \cdot \text{K}$.

Таким образом, различие между расчетными и экспериментальными значениями κ_{\perp} не очень большое, оно связано, вероятно, на эксперименте с существованием дополнительного теплового сопротивления на границах раздела фаз Si и 3C-SiC в биокompозите 3C-SiC/Si, о природе возникновения которого уже упоминалось ранее.

Вклад в величину κ_{\perp}^c , вычисленную по формуле (5), вносят оба материала, принимающие участие в конструировании биокompозита, но все же больший вклад вносит 3C-SiC.

Необходимо отметить интересный факт. При 300 К расчетное значение κ_{\perp}^c составляет $121 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, а экспериментальная величина κ_{\parallel} для этого же образца (рис. 1), полученная с учетом его пористости, равна $126 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, так что обнаруженная ранее анизотропия β_x для теплопроводности этих образцов наблюдается лишь на эксперименте. Она отсутствует, если рассматривать данные для κ_{\parallel} , полученные экспериментально, и κ_{\perp}^c , рассчитанные с помощью формулы (5).

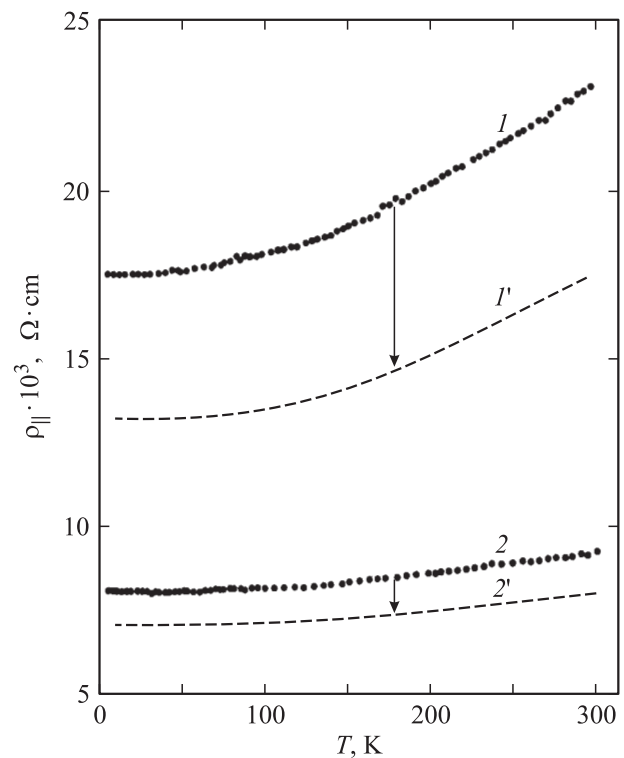


Рис. 5. Температурные зависимости $\rho_{\parallel}(T)$ образцов биоморфного композита 3C-SiC/Si с различными концентрациями Si: 1 — ~ 18 [8] и 2 — ~ 30 vol.% (настоящая работа). 1, 1' и 2 и 2' — соответственно значения $\rho_{\parallel}(T)$ без учета и с учетом пористости образцов.

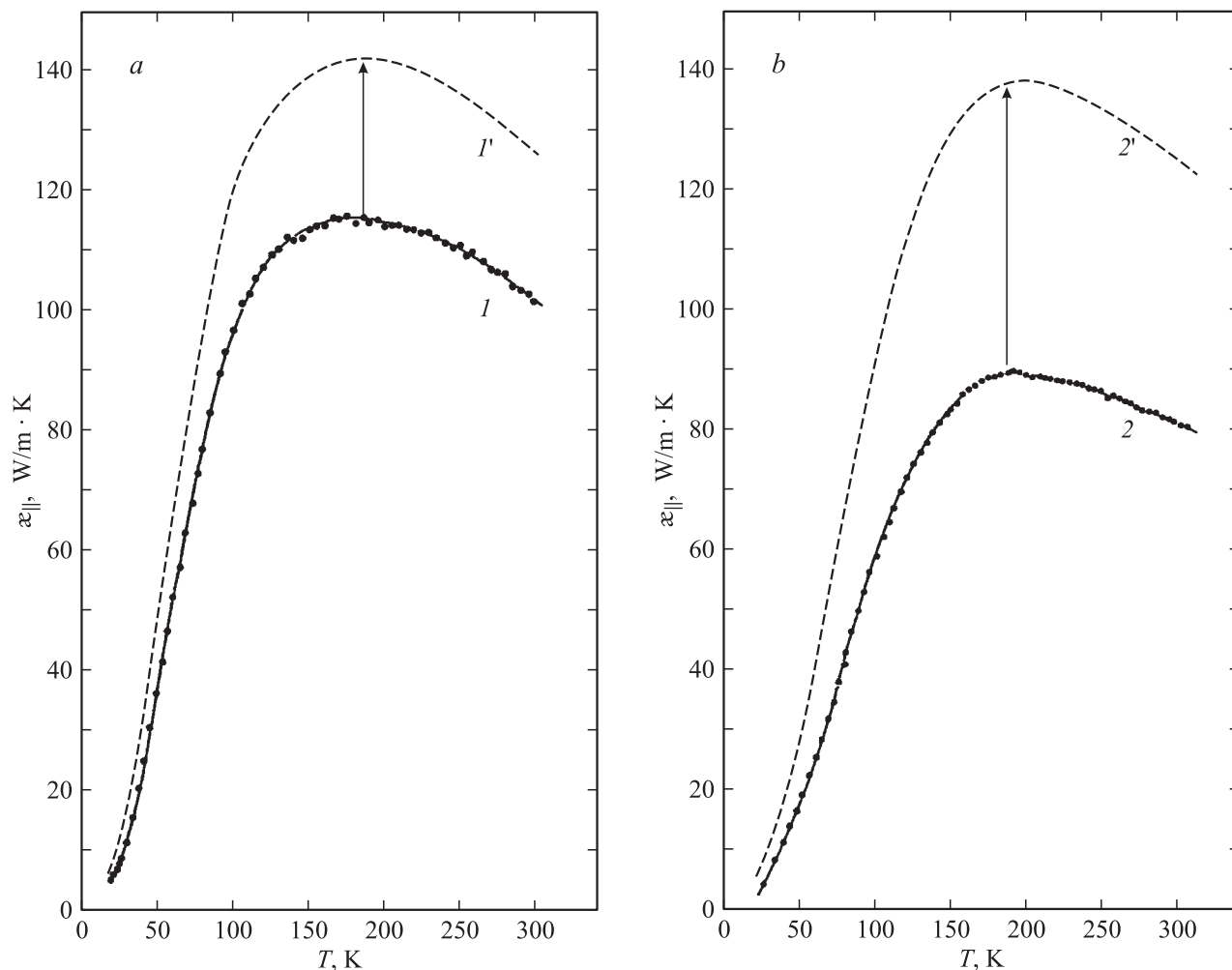


Рис. 6. Температурные зависимости фоновой теплопроводности образцов биоморфного композита 3C-SiC/Si. *a* и *b* — соответственно для композита с концентрацией Si ~ 30 и 18 [8] vol.%. 1, 1' и 2, 2' — соответственно значения $\kappa_{\parallel}(T)$ без учета и с учетом пористости образцов.

3.2. Оценка влияния Si на величину ρ и κ в биокompозите 3C-SiC/Si. На рис. 5 и 6 приведены экспериментальные данные, полученные в настоящей и в нашей предыдущей работе [8], для ρ_{\parallel} и κ_{\parallel} у образцов биокompозита 3C-SiC/Si, приготовленных на основе биоуглеродной матрицы белого эвкалипта с содержанием кремния соответственно 30 и 18¹ vol.%. Значения ρ_{\parallel} и κ_{\parallel} на этих рисунках приведены без учета (кривые 1 и 2) и с учетом (кривые 1' и 2') пористости исследованных образцов. Учет пористости для ρ_{\parallel} и κ_{\parallel} проводился соответственно по формулам (1) и (2).

На рис. 7 на основании результатов, представленных на рис. 5 и 6, проводится сравнение данных для κ_{\parallel} и ρ_{\parallel} (полученных с учетом пористости) для образцов 3C-SiC/Si с концентрацией Si 30 и 18 vol.%. Как видно из этого рисунка, у образца с концентрацией 30 vol.%

ρ_{\parallel} меньше, а κ_{\parallel} больше, чем у образца с концентрацией Si 18 vol.%. Таким образом, у биокompозита 3C-SiC/Si, приготовленного на основе биоуглеродной матрицы белого эвкалипта, поведение исследованных параметров (ρ_{\parallel} , κ_{\parallel}) коррелирует с концентрацией Si в образцах.

Такой закономерности в поведении ρ_{\parallel} в биокompозите 3C-SiC/Si, приготовленном на основе биоуглеродной матрицы дерева сапели, не наблюдалось [6]. Возможно, это связано с особенностями канальной структуры исходного дерева сапели.

В заключение можно сделать следующие выводы о поведении κ и ρ в биокompозите 3C-SiC/Si, приготовленном на основе биоуглеродной матрицы белого эвкалипта.

1) Определена величина анизотропии теплопроводности. Она уменьшается с повышением температуры от 1.6 (при 50 K) до 1.2 (при 300 K). Наблюдающийся разброс данных для анизотропии удельного электросопротивления может быть связан с более сложной структурой

¹ По пересчитанным уточненным данным концентрация Si и величина пористости в образце, исследованном в [8], составляют соответственно ~ 18 и 25 vol.%

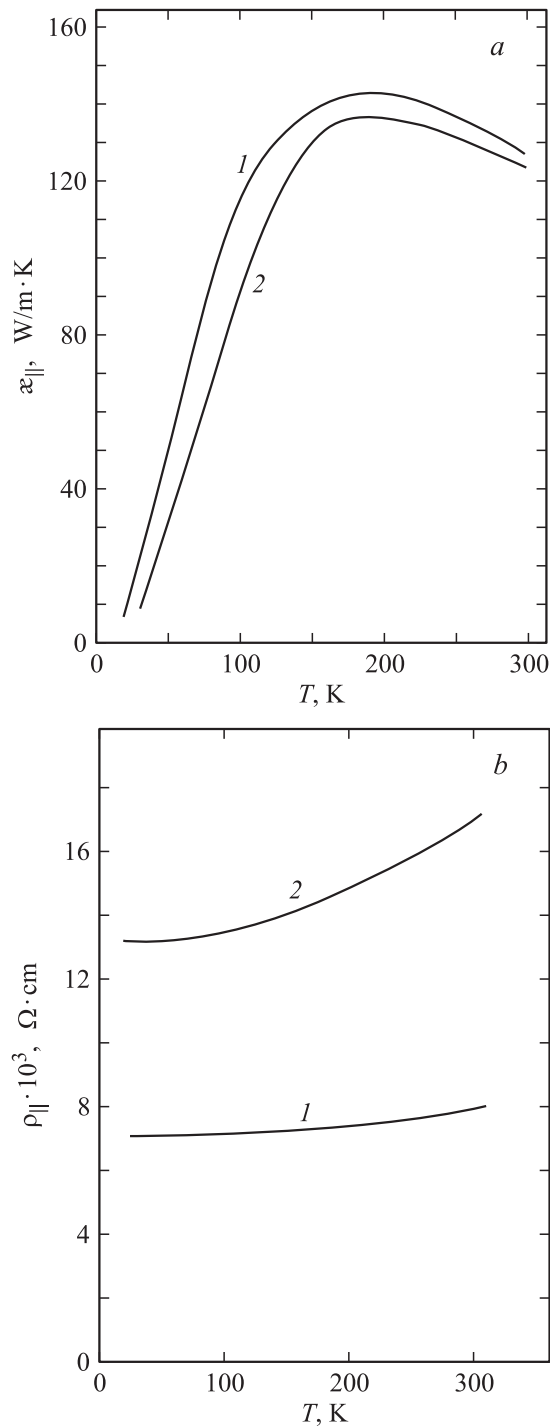


Рис. 7. Температурные зависимости фоновой теплопроводности $\kappa_{||}$ (a) и удельного электросопротивления $\rho_{||}$ (b) образцов биоморфного композита 3C-SiC/Si с учетом их пористости. 1 и 2 — соответственно для образцов с концентрацией Si \sim 30 и 18 [8] vol.%.

биокомпозита, в которой наряду с „толстыми“ питательными каналами исходного дерева, вытянутыми в направлении роста дерева и заполненными кремнием, имеются и „боковые“ более тонкие каналы, также заполненные кремнием, выполняющие роль „электронных“

мостиков между „толстыми“ каналами и оказывающие существенное влияние на величину ρ_{\perp} .

2) Оценено влияние кремния на величину $\rho_{||}$ и $\kappa_{||}$. Показано, что у образцов с концентрацией кремния 30 vol.% $\rho_{||}$ меньше, а $\kappa_{||}$ больше, чем у образцов с концентрацией кремния \sim 18 vol.%.

Авторы выражают благодарность Н.Ф. Картенко и Н.В. Шаренковой за проведение рентгеноструктурных исследований образцов.

Список литературы

- [1] A.R. de Arellano-Lopez, J. Martinez-Fernandez, P. Gonzalez, C. Dominguez, V. Fernando-Quero, M. Singh. *Int. J. Appl. Cer. Technol.* **1**, 1 (2004).
- [2] В.П. Бабин, Т.С. Гудкин, З.М. Дашевский, Л.Д. Дудкин, Е.К. Иорданишвили, В.И. Кайданов, Н.В. Коломоец, О.М. Нарва, Л.С. Стильбанс. *ФТП* **8**, 748 (1974).
- [3] Б.И. Смирнов, Ю.А. Буренков, Б.К. Кардашев, F.M. Varela-Feria, J. Martinez-Fernandez, A.R. de Arellano-Lopez. *ФТТ* **45**, 456 (2003).
- [4] Б.К. Кардашев, Ю.А. Буренков, Б.И. Смирнов, A.R. de Arellano-Lopez, J. Martinez-Fernandez, R. Sepulveda. *ФТТ* **46**, 1811 (2004).
- [5] Б.К. Кардашев, А.С. Нефагин, Б.И. Смирнов, A.R. de Arellano-Lopez, J. Martinez-Fernandez, R. Sepulveda. *ФТТ* **48**, 1617 (2006).
- [6] T.S. Orlova, B.I. Smirnov, A.R. de Arellano-Lopez, J. Martinez-Fernandez, R. Sepulveda. *ФТТ* **47**, 220 (2005).
- [7] А.И. Шельх, Б.И. Смирнов, Т.С. Орлова, И.А. Смирнов, A.R. de Arellano-Lopez, J. Martinez-Fernandez, F.M. Varela-Feria. *ФТТ* **48**, 214 (2006).
- [8] Л.С. Парфеньева, Т.С. Орлова, Н.Ф. Картенко, Б.И. Смирнов, И.А. Смирнов, H. Misiorek, A. Jezowski, F.M. Varela-Feria, J. Martinez-Fernandez, A.R. de Arellano-Lopez. *ФТТ* **47**, 1175 (2005).
- [9] А.И. Шельх, Б.И. Смирнов, И.А. Смирнов, A.R. de Arellano-Lopez, J. Martinez-Fernandez, F.M. Varela-Feria. *ФТТ* **48**, 202 (2006).
- [10] F.M. Varela-Feria. Ph.D. Thesis. Universidad de Sevilla (2004).
- [11] A. Jezowski, J. Mucha, G. Pompe. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **20**, 1500 (1987).
- [12] Э.А. Бельская, А.С. Тарабанов. В сб.: *Теплофизические свойства твердых тел. Наукова думка, Киев* (1971). С. 111.
- [13] A.L. Loeb. *J. Appl. Phys.* **22**, 252 (1951).
- [14] Е.Я. Литовский. *Изв. АН СССР. Неорган. материалы* **16**, 559 (1980).
- [15] Н.В. Лугуева, С.М. Лугуев. *ТВТ* **42**, 58 (2004).
- [16] A.E. Romanov. *Z. Metallkunde* **96**, 455 (2005).
- [17] R.C. Vilela, R.N. Costa Filho, E.F. Nobre, V.N. Friere, E.L. Albuquerque. *Phys. Rev. B* **68**, 033 307 (2003).
- [18] M.A. Ansari, A. Kumar, B.K. Srivastava. *Phys. Stat. Sol. (b)* **119**, 113 (1983).
- [19] Т.С. Орлова, Д.В. Ильин, Б.И. Смирнов, И.А. Смирнов, A.R. de Arellano-Lopez, J. Martinez-Fernandez, R. Sepulveda. *ФТТ* **49** (2007), в печати.
- [20] Л.С. Парфеньева, Т.С. Орлова, Б.И. Смирнов, И.А. Смирнов, H. Misiorek, J. Mucha, A. Jezowski, A.R. de Arellano-Lopez, J. Martinez-Fernandez, R. Sepulveda. *ФТТ* **49** (2007), в печати.