

# 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  $\kappa$  и удельное электросопротивление  $\rho$  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  $\mu$ 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 $\alpha$ -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  $\sim 29$  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]

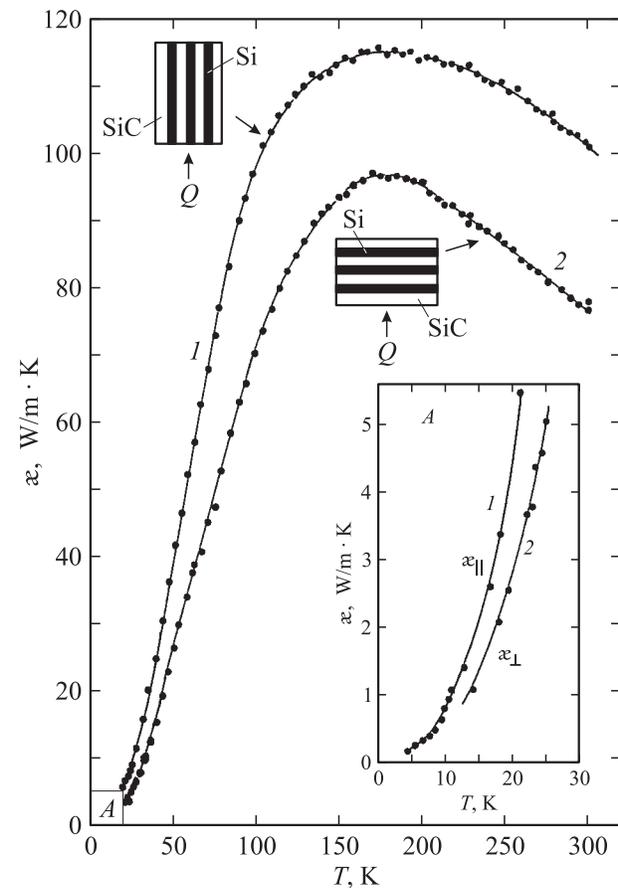
$$\rho_0 = (1 - p)\rho, \quad (1)$$

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

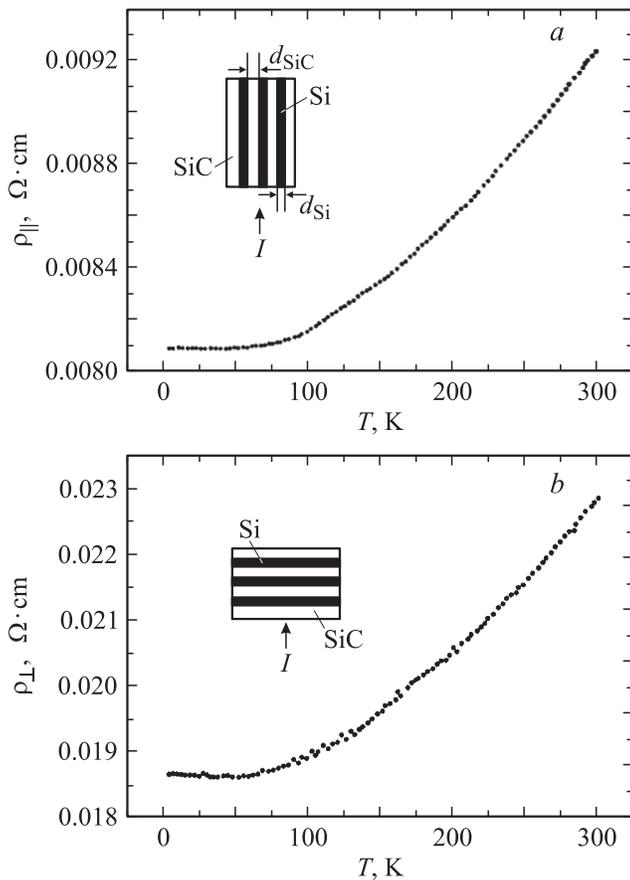
где  $\rho_0$  и  $\kappa_0$  — удельное электросопротивление и теплопроводность безпористого материала;  $\rho$  и  $\kappa$  — значения, полученные на эксперименте без учета пористости исследованных образцов; а  $p$  — величина пористости. Как отмечалось выше, для исследованных нами образцов она была 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  $\kappa$  образцов биоморфного композита 3C-SiC/Si с концентрацией Si  $\sim 30 \text{ vol.}\%$ . 1 и 2 — соответственно измерения на образцах, вырезанных параллельно ( $\kappa_{\parallel}$ ) и перпендикулярно ( $\kappa_{\perp}$ ) 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  $\rho$  образцов биоморфного композита 3C-SiC/Si с концентрацией Si  $\sim 30$  vol.%. *a* и *b* — соответственно измерения на образцах, вырезанных параллельно ( $\rho_{\parallel}$ ) и перпендикулярно ( $\rho_{\perp}$ ) оси роста дерева. Данные для  $\rho_{\parallel}$  и  $\rho_{\perp}$  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  $\sim 30$  vol.%), полученного на основе биоуглеродной матрицы дерева белого эвкалипта. Видно, что  $\beta_x$  уменьшается с повышением температуры от  $\sim 1.6$  (при 50 К) до  $\sim 1.2$  (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  $\beta_x$  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

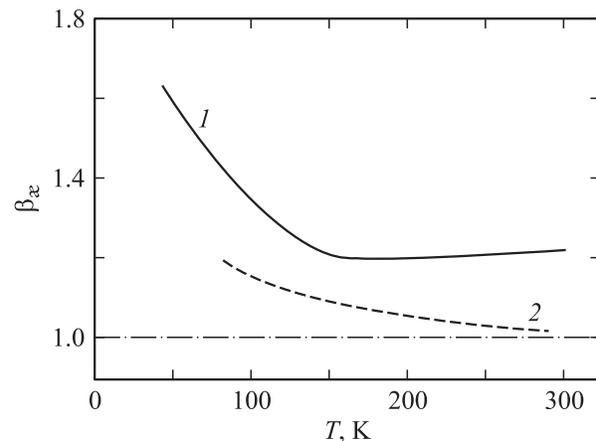
дислокаций, имеющих преимущественную ориентацию в направлении роста образцов.

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 фоновых 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  $\beta_{\rho}$  существенно менялась от образца к образцу у исследованных биоморфных композитов 3C-SiC/Si. Так, например, в композите, полученном на основе биоуглеродной матрицы дерева сапели,  $\beta_{\rho}$  при 300 К изменялась от  $\sim 1.33$  до 5.7 [6] (хотя при этом наблюдалась некоторая закономерность изменения  $\beta_{\rho}$  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,  $\beta_{\rho}$  при 300 К изменялась от  $\sim 1.3$  [7] до 10 и более (при этом корреляции с концентрацией Si в композите не наблюдалось). По данным настоящей работы, величина  $\beta_{\rho}$  исследованных в ней образцов почти для всего интервала температур равна  $\sim 2$  (рис. 2).

Такого большого разброса значений для  $\beta_x$  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  $\beta_{\rho}$  композита 3C-SiC/Si? Попробуем 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  $\sim 30$  vol.%. *2* — данные для анизотропии теплопроводности текстурированных образцов CdTe [15].

Проведем сначала расчетную оценку величин  $\rho_{\parallel}$  и  $\rho_{\perp}$  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  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — соответственно удельные электросопротивления 3C-SiC и Si в биоморфном композите 3C-SiC/Si.

Оценим с помощью экспериментальных значений для  $\rho_{\parallel}$  (рис. 2, а) и формулы (3) параметр  $n$ , определим с его помощью по формуле (4) расчетную величину  $\rho_{\perp}^c$  и сравним ее с экспериментальными значениями  $\rho_{\perp}$  (рис. 2, б). Расчеты проведем для температуры 300 К. При этом будем использовать данные  $\rho_{\parallel}$  и  $\rho_{\perp}$  для композита и  $\rho_1$  [19], полученные с учетом пористости образцов по формуле (1).

В расчетах полагалось, что при 300 К  $\rho_1$  равно  $\sim 0.70 \Omega \cdot \text{cm}$  [19], а  $\rho_2 \sim 2 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  [20]. Значения для  $\rho_1$  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.

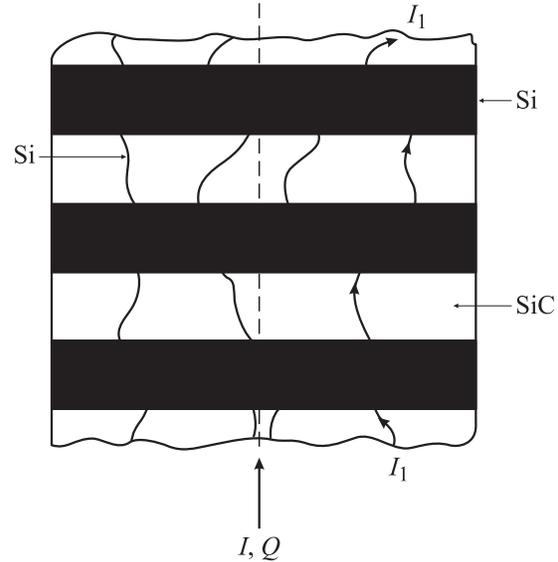
В результате проведенных расчетов  $n$  и  $\rho_{\perp}^c$  по формулам (3) и (4) получены следующие результаты:  $n = 0.33$  и  $\rho_{\perp}^c \sim 0.52 \Omega \cdot \text{cm}$ .

Если считать, что средние диаметры каналов, заполненных Si в биокомпози-те 3C-SiC-Si ( $d_{\text{Si}}$ , 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 ( $d_{\text{SiC}}$ , рис. 2, а) в идеальной структуре рассматриваемого композита будет равен  $\sim 189 \mu\text{m}$ . Такая величина для среднего размера  $d_{\text{SiC}}$  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  $\rho_{\perp}^c$  и  $\rho_{\perp}$ , полученного в эксперименте. Экспериментальное значение  $\rho_{\perp}$  составляет  $\sim 0.023 \Omega \cdot \text{cm}$  (рис. 2, б), а  $\rho_{\perp}^c$ , как отмечалось выше, равно  $\sim 0.52 \Omega \cdot \text{cm}$ .

Несмотря на достаточно грубую оценку величин  $n$  и  $\rho_{\perp}$  (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  $\rho_{\perp}^c$  и полученных на эксперименте  $\rho_{\perp}$  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,  $\rho$  для Si при 300 К

$\sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  [20], а  $\rho$  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  $\beta_{\rho}$ , поскольку в различных образцах исходной биоматрицы число „боковых“ каналов и образующихся при этом „электрических“ мостиков может быть различным. Величина  $\beta_{\rho}$  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  $\beta_x$  к особенностям структуры композита, связанным с наличием в образцах тонких „боковых“ каналов, заполненных Si. В отличие от случая  $\beta_{\rho}$ , когда  $\rho_{\text{Si}} \ll \rho_{\text{SiC}}$  и электрический ток при измерении  $\rho_{\perp}$  стремится протекать по „электрическим“ мостикам из Si, в случае  $\beta_x$   $\kappa_{\text{Si}}$  лишь незначительно превышает  $\kappa_{\text{SiC}}$  (особенно при низких температурах [8,20]). При высоких температурах  $\kappa_{\text{SiC}}$  уже не сильно отличается от  $\kappa_{\text{Si}}$  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  $\beta_x$  биокompозита 3C-SiC/Si более близки к реальной величине анизотропии для этого параметра по сравнению с  $\beta_{\rho}$ . Этот вывод подтверждается и проведенными нами расчетами  $\kappa_{\perp}^c$  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  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$  — соответственно значения теплопроводностей био-3C-SiC и Si. При расчетах использовалась для параметра  $n$  величина, полученная нами ранее из данных для  $\rho_{\parallel}$ . Расчеты  $\kappa_{\perp}^c$  проводились для температуры 300 К.  $\kappa_{\text{Si}}$  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

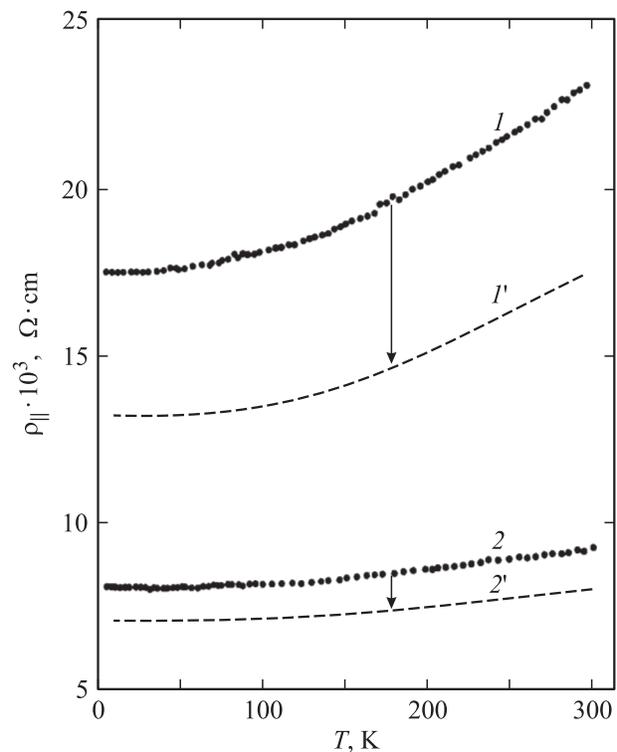
биокompозита 3C-SiC/Si, составляла при 300 К с учетом пористости образца  $\sim 113 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  [20].

Величина  $\kappa_{\perp}^c$  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)  $\sim 96 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ .

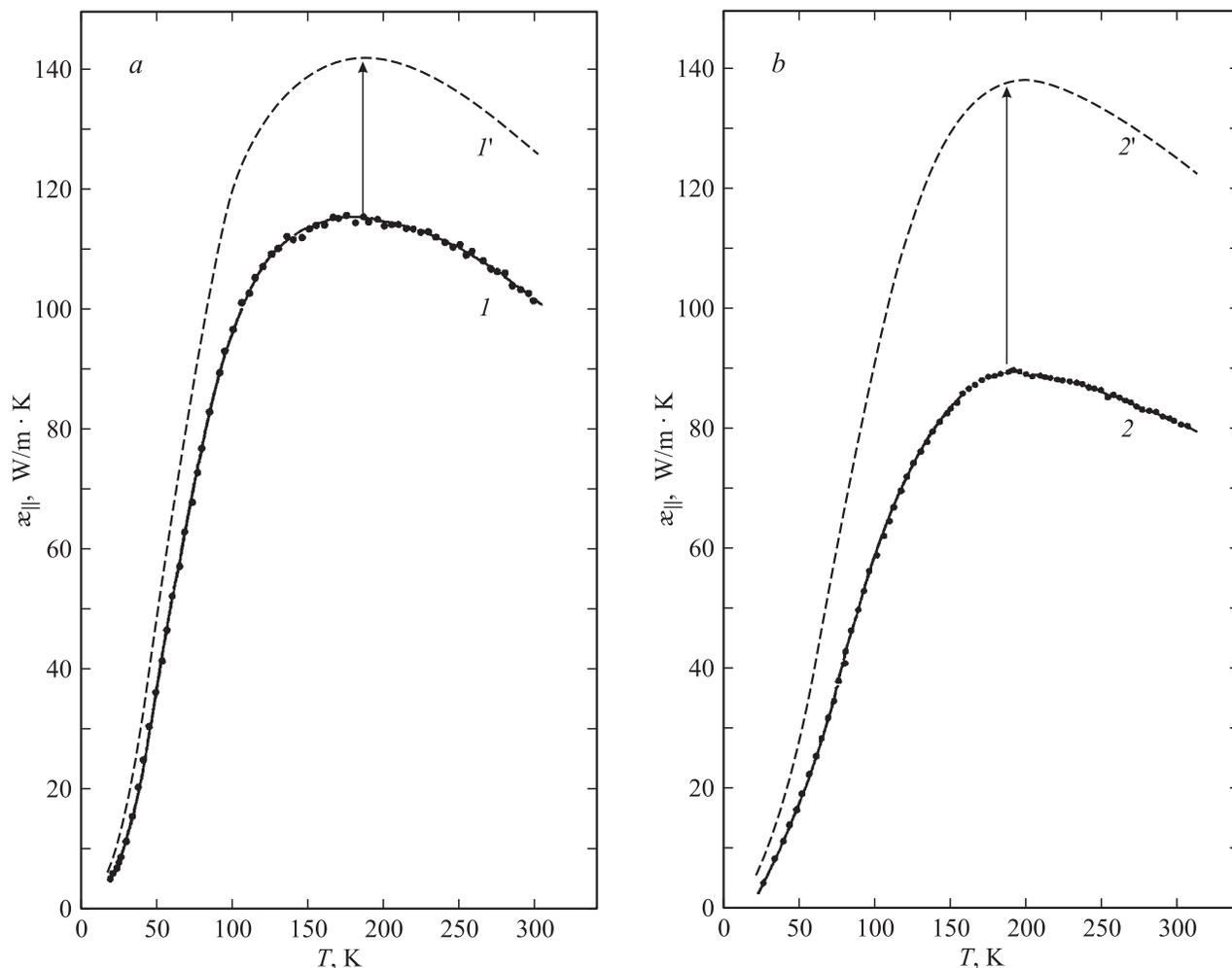
Таким образом, различие между расчетными и экспериментальными значениями  $\kappa_{\perp}$  не очень большое, оно связано, вероятно, на эксперименте с существованием дополнительного теплового сопротивления на границах раздела фаз Si и 3C-SiC в биокompозите 3C-SiC/Si, о природе возникновения которого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

Вклад в величину  $\kappa_{\perp}^c$ , 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  $\kappa_{\perp}^c$  составляет  $121 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , а экспериментальная величина  $\kappa_{\parallel}$  для этого же образца (рис. 1), полученная с учетом его пористости, равна  $126 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , так что обнаруженная ранее анизотропия  $\beta_x$  для теплопроводности этих образцов наблюдается лишь на эксперименте. Она отсутствует, если рассматривать данные для  $\kappa_{\parallel}$ , полученные экспериментально, и  $\kappa_{\perp}^c$ , рассчитанные с помощью формулы (5).



**Рис. 5.** Температурные зависимости  $\rho_{\parallel}(T)$  образцов биоморфного композита 3C-SiC/Si с различными концентрациями Si: 1 —  $\sim 18$  [8] и 2 —  $\sim 30$  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  $\sim 30$  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  $\rho$  и  $\kappa$  в биокompозите 3C-SiC/Si. На рис. 5 и 6 приведены экспериментальные данные, полученные в настоящей и в нашей предыдущей работе [8], для  $\rho_{\parallel}$  и  $\kappa_{\parallel}$  у образцов биокompозита 3C-SiC/Si, приготовленных на основе биоуглеродной матрицы белого эвкалипта с содержанием кремния соответственно 30 и 18<sup>1</sup> vol.%. Значения  $\rho_{\parallel}$  и  $\kappa_{\parallel}$  на этих рисунках приведены без учета (кривые 1 и 2) и с учетом (кривые 1' и 2') пористости исследованных образцов. Учет пористости для  $\rho_{\parallel}$  и  $\kappa_{\parallel}$  проводился соответственно по формулам (1) и (2).

На рис. 7 на основании результатов, представленных на рис. 5 и 6, проводится сравнение данных для  $\kappa_{\parallel}$  и  $\rho_{\parallel}$  (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.%

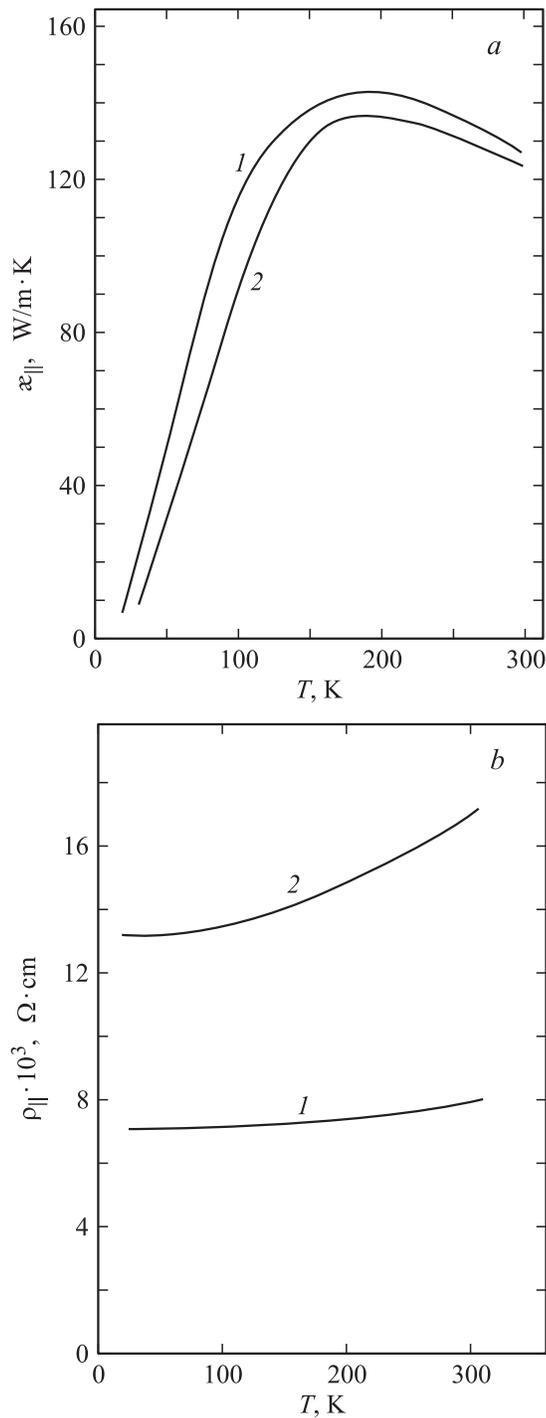
$\rho_{\parallel}$  меньше, а  $\kappa_{\parallel}$  больше, чем у образца с концентрацией Si 18 vol.%. Таким образом, у биокompозита 3C-SiC/Si, приготовленного на основе биоуглеродной матрицы белого эвкалипта, поведение исследованных параметров ( $\rho_{\parallel}$ ,  $\kappa_{\parallel}$ ) коррелирует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

Такой закономерности в поведении  $\rho_{\parallel}$  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  $\kappa$  и  $\rho$  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

<sup>1</sup> По пересчитанным уточненным данным концентрация Si и величина пористости в образце, исследованном в [8], составляют соответственно  $\sim 18$  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  $\rho_{\perp}$ .

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.