

## Термоэлектрические эффекты в наноразмерных слоях силицида марганца

© И.В. Ерофеева, М.В. Дорохин, В.П. Лесников, Ю.М. Кузнецов,  
А.В. Здоровейцев, Е.А. Питиримова

Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: irfeva@mail.ru

(Получена 27 апреля 2017 г. Принята к печати 12 мая 2017 г.)

Экспериментально получены значения величин термоэдс, слоевого сопротивления и коэффициента теплопроводности наноразмерного слоя  $Mn_xSi_{1-x}$  и сверхрешетки  $Mn_xSi_{1-x}/Si$  на кремнии в зависимости от температуры в диапазоне  $T = 300-600$  К. Обсуждается роль наноразмерной пленки и подложки в формировании термоэлектрического эффекта. Оценена величина термоэлектрической добротности одиночного слоя силицида марганца, сверхрешетки и системы слой/подложка. Наибольшее значение добротности  $ZT = 0.59 \pm 0.06$  получено для  $Mn_{0.2}Si_{0.8}$  при  $T = 600$  К.

DOI: 10.21883/FTR.2017.11.45090.04

### 1. Введение

В последние несколько десятилетий был достигнут существенный прогресс в области создания и исследования свойств наноструктурных термоэлектрических материалов. Особенности электронной структуры наноразмерных объектов могут приводить к значимому увеличению коэффициентов, характеризующих эффективность термоэлектрического преобразования. Эти особенности обусловлены тем, что в наноразмерном состоянии увеличивается плотность энергетических состояний вблизи уровня Ферми, а также с возникновением большого числа границ раздела, атомных дефектов и других структурных несовершенств, которые эффективно рассеивают фононы, но при этом оказывают малое влияние на транспорт носителей заряда. За счет рассеяния фононов на точечных дефектах и на границах уменьшается решеточная теплопроводность. В результате этого добротность наноразмерного термоэлектрика возрастает в сравнении с монокристаллическим образцом.

Так, например, термоэлектрическая добротность наноструктурных материалов на основе классических систем  $Bi_2Te_3$ ,  $PbTe$ ,  $SiGe$  и др. оказалась заметно выше по сравнению с кристаллическими аналогами [1].

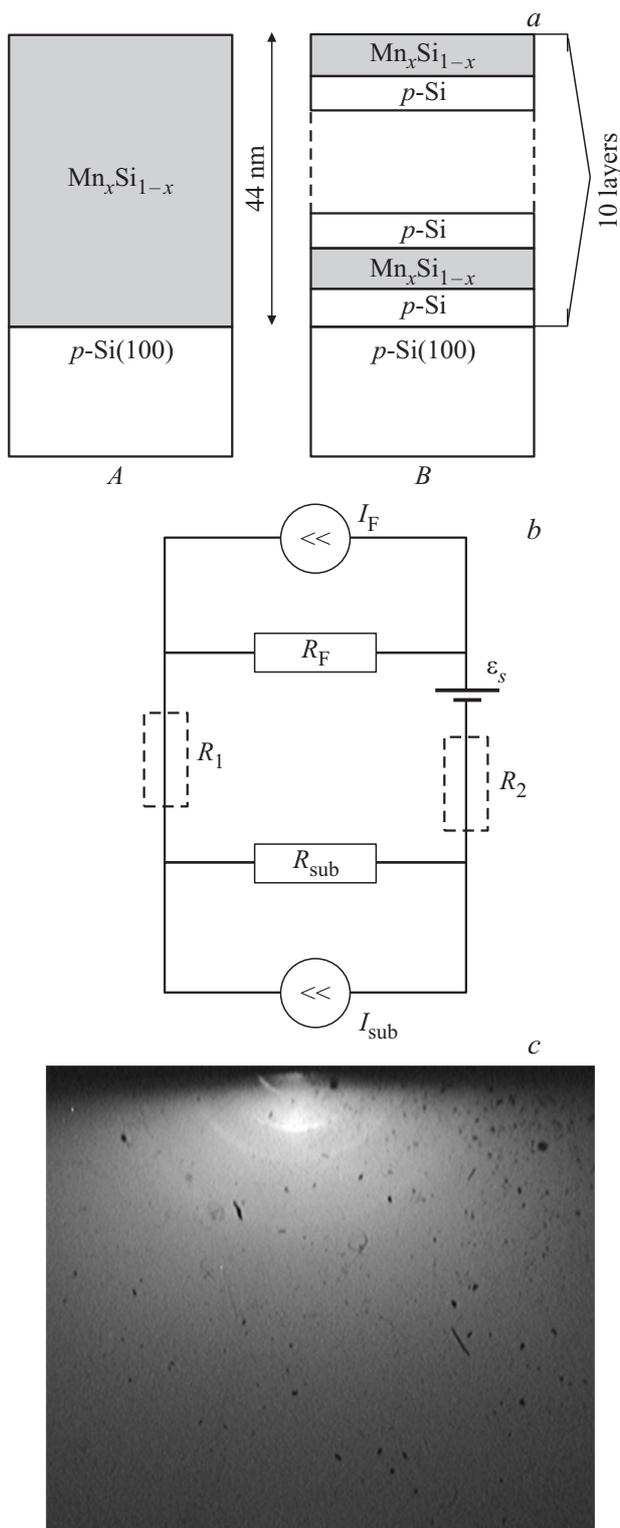
Выбор материалов основывается на требованиях к величине эффективности термоэлектрического преобразователя, а также к диапазону рабочих температур (каждый из перечисленных материалов характеризуется наибольшей эффективностью в сравнительно узком температурном интервале). Перспективным материалом для интервала 400–600 К считается высший силицид марганца [2]. Можно отметить работы по созданию наноструктур на основе объемного силицида марганца [3–5]. Нами ранее были получены поликристаллические тонкие пленки с ультрамелкой зернистой кристаллической структурой [6] и отработаны технологии получения подобных структур. В настоящей работе измерены ко-

эффициенты термоэдс, теплопроводность и удельное сопротивление тонких слоев силицида марганца и наноразмерных сверхрешеток  $Mn_xSi_{1-x}/Si$ , выращенных на кремниевых подложках, определена их термоэлектрическая добротность.

### 2. Методика эксперимента

Формирование тонких слоев  $Mn_xSi_{1-x}$  и наноструктур  $Mn_xSi_{1-x}/Si$  осуществлялось в установке импульсного лазерного осаждения в вакууме путем поочередного распыления Si (КДБ-12) и Mn мишеней. Состав слоев задавался соотношением времен распыления мишеней кремния и марганца. В настоящей работе сформированы слои с соотношением времен распыления  $t_{Mn}/t_{Si} = 1/4$ , что приблизительно соответствует составу  $Mn_{0.2}Si_{0.8}$ . Однородные слои силицида марганца осаждались на кремниевые подложки КДБ-0.005(100) при температуре  $T = 300^\circ C$  (образец А). Подобный температурный режим является оптимальным для формирования материалов со сверхструктурным упорядочением, как было получено в предшествующих опытах [4,6]. В тех же условиях на подложках КДБ-0.005(100) была сформирована многослойная структура, представляющая собой 10 чередующихся наноразмерных слоев  $Mn_xSi_{1-x}$  и Si ( $[Mn_xSi_{1-x}/Si]_{10}$  — образец В). Состав силицида марганца в однородных слоях и периодах  $Mn_xSi_{1-x}$  сверхрешетки совпадал. Общая толщина слоя оценивалась по времени роста и в обоих случаях составляла  $\sim 44$  нм. Схема структур представлена на рис. 1, а.

Исследования кристаллической структуры сформированных слоев силицида марганца выполнены с применением метода электронографии на отражение. На рис. 1, с представлена электронограмма поверхности слоя силицида марганца (образец В). На электронограмме наблюдаются сравнительно размытые кольца,



**Рис. 1.** *a* — схемы исследованных структур: *A* — структура  $Mn_xSi_{1-x}$ /КДБ-0.005, *B* — сверхрешетка  $[Mn_xSi_{1-x}/Si]_{10}$ /КДБ-0.005; *b* — эквивалентная электрическая схема структуры, содержащей слои на основе силицида марганца, осажденные на подложку Si. Направления токов источников тока и полярности источника эдс обозначены условно и могут не совпадать с истинными; *c* — электронограмма поверхности слоя  $Mn_xSi_{1-x}$  (*A*), нанесенного на подложку Si (100).

подобная картина соответствует мелкозернистой поликристаллической структуре. Отметим, что для всех исследованных структур вид электронограмм подобен и соответствует мелкозернистой структуре. Формирование слоев с данным типом кристаллической структуры связано с выбранными режимами осаждения [4,6]. Считается, что создание термоэлектрических материалов с поликристаллической структурой предпочтительно, поскольку рассеяние фононов на границах зерен приводит к снижению фононной составляющей теплопроводности, а следовательно, и к повышению коэффициента термоэлектрической добротности [6].

Для определения коэффициента Зеебека и удельного сопротивления на поверхность структур наносились омические контакты на основе Au. Измерение термоэдс и сопротивления проводилось в вакуумной камере при давлении  $10^{-3}$  Торр в диапазоне температур 300–600 К. При измерениях термоэдс образец располагался на проводящей графитовой пластине, разогреваемой излучением галогеновой лампы, и электрически изолировался от нее тонким слоем слюды. Градиент температур между краями образца создавался путем увеличенного теплоотвода с одного края (холодный конец). Температура графитовой пластины устанавливалась и поддерживалась постоянной ( $\pm 1$  К). Температура горячего и холодного концов образца регистрировалась с помощью термопар. В условиях эксперимента разность температур на концах образца увеличивается с ростом температуры нагревателя. Схема измерения сопротивления слоев совпадала со схемой измерения термоэдс, но теплоотвод на концах образца не различался (т.е. образец поддерживался при постоянной температуре в исследованном диапазоне). Откачка вакуума до  $10^{-3}$  Торр производилась для уменьшения отвода воздушной средой тепла от нагретых областей образца [7].

Измерение коэффициента теплопроводности выполнялось в той же вакуумной установке. Для измерения коэффициента теплопроводности был использован метод частотного разделения (метод горячей проволоки). Суть метода заключается в измерении градиента температур, полученного в измеряемом материале в результате протекания тока по тонкому металлическому проводнику, специально осажденному на поверхность этого материала [8–10]. Металлический проводник („горячая полоска“) служит одновременно источником нагрева и датчиком температур (изменение температуры регистрируется по изменению сопротивления полоски).

В использованной нами схеме измерений металлическая полоска наносилась на тонкий слой диэлектрика ( $10$  нм  $Al_2O_3$ ) во избежание утечек электрического тока в проводящую полупроводниковую структуру. Для измерения теплопроводности тонких пленок силицида марганца, а также для учета теплопроводности слоя  $Al_2O_3$  использовалась усовершенствованная методика измерения тонких пленок, предложенная в [11–13]. Суть методики заключается в рассмотрении пленки в качестве термического резистора, изменяющего максимальную

температуру подложки. Сопоставление полученного результата с результатами измерения коэффициента теплопроводности подложки позволяет вычислить искомый коэффициент теплопроводности слоя.

### 3. Измерение коэффициента Зеебека

На рис. 2 представлены температурные зависимости коэффициента Зеебека для слоев  $Mn_xSi_{1-x}$  (кривая 1) и сверхрешеток  $[Mn_xSi_{1-x}/Si]_{10}$  (кривая 2), сформированных на подложках КДБ-0.005. Температурная зависимость термоэдс подложки КДБ-0.005 также представлена на графике (кривая 3). Для подложки КДБ-0.005 величина коэффициента Зеебека отрицательная в большей части диапазона температур, что соответствует дырочной проводимости [14]. Отметим резкий пик при температуре  $\sim 540$  К на температурной зависимости коэффициента Зеебека. При этом в узком температурном интервале вблизи 540 К величина термоэдс меняет знак на положительный, что, по-видимому, обусловлено термической активацией глубоких донорных центров (оценочное значение энергии активации составляет 50 мэВ).

Для структур с осажденными слоями силицида марганца в исследованном диапазоне температур величина термоэдс и коэффициента Зеебека отрицательная, что также соответствует дырочной проводимости. Значение коэффициента Зеебека монотонно увеличивается по абсолютному значению с увеличением температуры в диапазоне 330–700 К (знак коэффициента при этом  $< 0$ ). Наибольшее значение составило  $-0.12$  мВ/К при 600 К. Отметим, что в диапазоне температур 300–400 К величина коэффициента Зеебека совпадает в пределах погрешности со значением, полученным для подложки КДБ-0.005, что может свидетельствовать о влиянии подложки на величину термоэдс в указанном диапазоне температур. При  $T > 400$  К значение термоэдс исследованных структур превышает таковое для подложки КДБ-

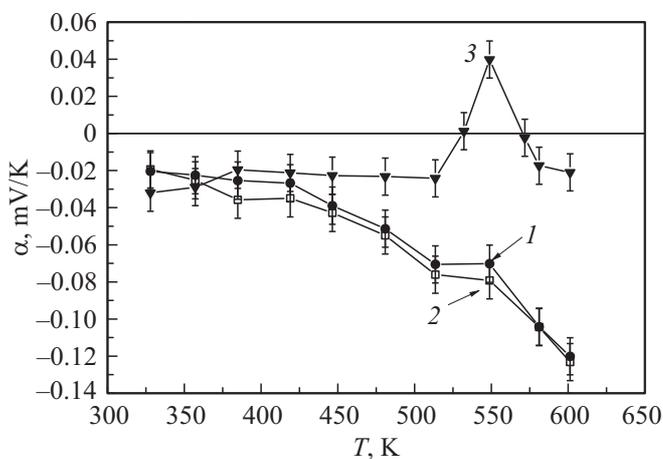


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента Зеебека: 1 — одиночный слой  $Mn_xSi_{1-x}$  (образец А), 2 — сверхрешетка (образец В), 3 — подложка КДБ-0.005.

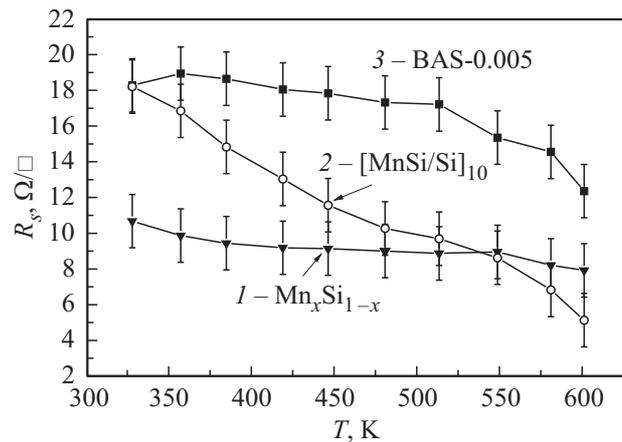


Рис. 3. Температурная зависимость слоевого сопротивления: 1 — одиночный слой  $Mn_xSi_{1-x}$  (образец А), 2 — сверхрешетка (образец В), 3 — подложка КДБ-0.005.

0.005, что свидетельствует о влиянии осажденного слоя на наблюдаемый эффект Зеебека.

### 4. Измерение сопротивления слоев

Температурные зависимости сопротивления структур представлены на рис. 3. Сопротивление подложки КДБ-0.005 слабо зависит от температуры в исследованном диапазоне и лежит в пределах 10–20 Ом/кв (кривая 3). Очевидно, проводимость низкоомной подложки является примесной во всем диапазоне температур и определяется уровнем легирования ( $\sim 10^{19}$  см $^{-3}$ ). Температурные зависимости сопротивления слоя  $Mn_xSi_{1-x}$  и структуры  $[Mn_xSi_{1-x}/Si]_{10}$  представлены на рис. 3 (кривая 1 и 2 соответственно). Для структуры с одиночным слоем силицида марганца получена слабая зависимость величины слоевого сопротивления от температуры измерений в выбранном диапазоне. Для структуры со сверхрешеткой  $[Mn_xSi_{1-x}/Si]_{10}$ , напротив, величина сопротивления с ростом температуры монотонно уменьшается, а вблизи комнатной температуры величина сопротивления структуры со сверхрешеткой  $[Mn_xSi_{1-x}/Si]_{10}$  близка к сопротивлению подложки.

### 5. Обсуждение результатов

Для учета влияния подложек на величину коэффициента Зеебека предложена простейшая модель, основанная на рассмотрении эквивалентной электрической схемы (рис. 1, б). Термоэдс пленки и подложки учитываются источниками тока  $I_f$  и  $I_{sub}$  соответственно. Резисторы  $R_f$  и  $R_{sub}$  учитывают сопротивления пленки и подложки при средней температуре  $(T_h - T_c)/2$ , где  $T_h$  — температура „горячего“ конца образца, а  $T_c$  — температура „холодного“ конца. Термоэдс подложки равна

$$\varepsilon_{sub} = I_{sub}R_{sub}, \quad (1)$$

а термоэдс пленки

$$\varepsilon_f = I_f R_f. \quad (2)$$

Примем, что сопротивление пленки в перпендикулярном направлении (между контактом и подложкой) много меньше, чем сопротивление вдоль пленки (между контактом к „горячему“ и „холодному“ концам образца). Такое предположение обосновано в том случае, если контакт, формируемый на поверхности структур, является диффузионным и одновременно обеспечивает электрическое соединение и к подложке, и к слою. Возможное наличие потенциального барьера между слоем силицида марганца и Si-подложкой учитывается путем введения дополнительных резисторов  $R_1$  и  $R_2$ . В случае формирования потенциального барьера между контактами к „горячему“ и „холодному“ концам образца возможно появление дополнительной контактной термоэдс, что в эквивалентной схеме учитывается источником  $\varepsilon_s$ .

Рассматривая простейший случай ( $R_1 = R_2 = 0$ ;  $\varepsilon_s = 0$ ), соответствующий низкобарьерному контакту  $\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ , можно показать, что измеряемая величина термоэдс, связанного с подложкой, составляет значение

$$\varepsilon'_{\text{sub}} = I_{\text{sub}} R_{\text{sub}} R_f / (R_{\text{sub}} + R_f), \quad (3)$$

меньшее, чем термоэдс подложки, на величину  $(R_{\text{sub}} + R_f)/R_f$ . Вклад подложки в термоэдс определяется соотношением сопротивлений подложки и пленки. Вклад термоэдс пленки в общую измеряемую величину термоэдс ( $\varepsilon'_f$ ) аналогичным образом зависит от сопротивления подложки:

$$\varepsilon'_f = I_f R_f R_{\text{sub}} / (R_{\text{sub}} + R_f). \quad (4)$$

Для низкоомной подложки этот вклад минимален, а в случае  $R_{\text{sub}} \gg R_f$  ( $R_{\text{sub}}/(R_{\text{sub}} + R_f) \approx 1$ ) вклад термоэдс пленки максимален и равен  $\varepsilon_f$ .

Рассмотренная эквивалентная схема позволяет проанализировать результаты исследования системы  $\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}/\text{КДБ-0.005}$  и  $[\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}]_{10}/\text{КДБ-0.005}$ . В области температур 300–400 К величина термоэдс и одиночного слоя силицида марганца, и сверхрешетки близка к термоэдс подложки, а сопротивление слоев сопоставимо или выше сопротивления подложки. Это свидетельствует о незначительном вкладе исследованных слоев в измеренную величину термоэдс (вероятно, основной вклад в диапазоне 300–400 К дает подложка). При увеличении температуры измерений выше 400 К величина термоэдс обеих структур резко возрастает и становится выше термоэдс подложки. В силу того что сопротивление слоев и подложки в указанном диапазоне также сопоставимы (а сопротивление сверхрешетки несколько ниже сопротивления подложки), можно предположить, что основной вклад в коэффициент Зеебека и в величину термоэдс вносят исследуемые слои. При этом вклад  $\varepsilon_{\text{sub}}$  подложки сводится к некоторому снижению общей величины термоэдс за

счет включения параллельного сопротивления подложки в эквивалентную схему. Отметим также появление локального максимума при 550 К на температурных зависимостях коэффициента Зеебека, полученных для обеих структур. Предположение, что данный максимум связан со вкладом  $\varepsilon_{\text{sub}}$  подложки в величину коэффициента Зеебека (при указанной температуре термоэдс подложки КДБ-0.005 положительная), вполне оправдано.

## 6. Оценка коэффициента термоэлектрической добротности

Для оценки эффективности термоэлектрического преобразования сформированных структур были вычислены значения коэффициента термоэлектрической эффективности. Под термином „коэффициент термоэлектрической эффективности“ понимается, как правило, безразмерный коэффициент, определяемый как

$$ZT = \alpha^2 \sigma T / \lambda, \quad (5)$$

где  $\alpha$  — коэффициент Зеебека, определяющий величину напряжения, создаваемого элементом при заданной разности температур,  $\sigma$  — электропроводность,  $T$  — температура,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности.

Для расчета коэффициента  $ZT$  исследуемых слоев величина  $\alpha$  была рассчитана из представленных на рис. 2 зависимостей с применением формул (3) и (4), в соответствии с предположением эквивалентной схемы и принципа суперпозиции. Исходя из (4) истинное значение коэффициента Зеебека пленки запишется как

$$\alpha = \alpha_{\text{mes}}(R_{\text{sub}} + R_f)/R_{\text{sub}} - \alpha_{\text{sub}}(R_{\text{sub}} + R_f)/R_f, \quad (6)$$

где  $\alpha_{\text{sub}}$  — измеренное значение коэффициент Зеебека подложки,  $\alpha_{\text{mes}}$  — измеренное значение коэффициента Зеебека для структур пленка/подложка.

Электропроводность пленок была вычислена из представленных на рис. 3 зависимостей по формуле для параллельных резисторов:

$$R_f = R_{\text{sub}} R_{\text{mes}} / (R_{\text{mes}} - R_{\text{sub}}), \quad (7)$$

где  $R_{\text{mes}}$  — измеренное значение сопротивления структур пленка/подложка.

Величина коэффициента теплопроводности была измерена в диапазоне температур 300–450 К. Результаты представлены в табл. 1. При температуре выше 450 К становятся существенными токи утечки из металлической полоски (источника и измерителя нагрева) в измеряемые полупроводниковые слои через диэлектрик. Данный эффект существенно увеличивает погрешность измерений  $\lambda$ . Для нахождения оценочного значения  $\lambda$  для температур 480–600 К обратимся к литературным данным [2,15]. В цитированных публикациях приведены измеренные значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  для высшего силицида марганца: в диапазоне температур 300–600 К величина  $\lambda \approx 2 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  и практически не

**Таблица 1.** Измеренные и литературные значения коэффициентов теплопроводности слоев силицида марганца и сверхрешеток  $[\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}]_{10}$ 

| Образец                       | T, K            |                 |                 |                 |     |     |     |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----|-----|-----|
|                               | 300             | 350             | 400             | 450             | 500 | 550 | 600 |
| $\lambda(A)$ , Вт/м·К         | $1.54 \pm 0.25$ | $1.27 \pm 0.21$ | $1.2 \pm 0.21$  | $1.15 \pm 0.19$ | –   | –   | –   |
| $\lambda(B)$ , Вт/м·К         | $1.77 \pm 0.31$ | $1.36 \pm 0.22$ | $1.26 \pm 0.21$ | $1.05 \pm 0.19$ | –   | –   | –   |
| По литературным данным [2,14] | 2.3             | 2.3             | 2.3             | 2.3             | 2.3 | 2.3 | 2.4 |

**Таблица 2.** Значения коэффициента термоэлектрической добротности исследованных структур

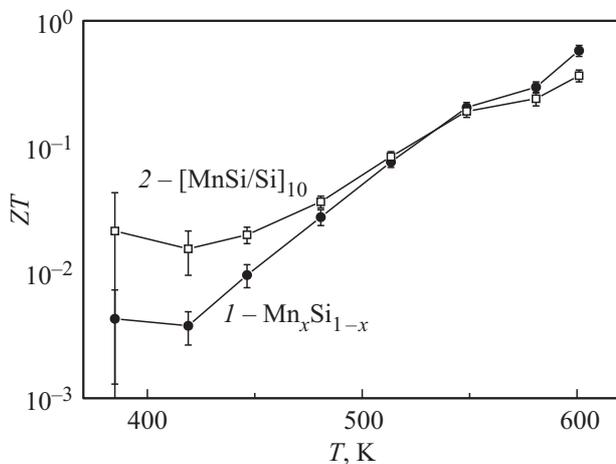
| № образца | Вид слоя                                      | ZT слоя*        | ZT усредненное**               |
|-----------|---|-----------------|--------------------------------|
| A         | $\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}$                  | $0.59 \pm 0.06$ | $(0.92 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}$ |
| B         | $[\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}]_{10}$ | $0.37 \pm 0.04$ | $(0.67 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}$ |
| КДБ-0.005 | Подложка                                      | $10^{-6}$       |                                |

*Примечание.* \* В качестве ZT приведены максимальные полученные значения. \*\* При расчете усредненного коэффициента ZT использовались усредненные значения теплопроводности и сопротивления.

зависит от температуры измерений. В настоящей работе для диапазона 300–450 К получены близкие, хотя и меньшие значения  $\lambda$ , что может быть связано с тем, что исследованные структуры являются поликристаллами, а величина  $\lambda$  для поликристаллов, как правило, ниже, чем для монокристаллов. Допуская неизменность коэффициента теплопроводности для исследованных слоев при  $450 < T < 600$  К, для грубой оценки примем значения  $\lambda$  в диапазоне 480–600 К равными 1 Вт/м·К.

На основании выполненных расчетов и приведенных рассмотрений были рассчитаны значения коэффициента термоэлектрической эффективности по формуле (5). Результаты для слоев  $\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}/\text{КДБ-0.005}$  и  $[\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}]_{10}/\text{КДБ-0.005}$  представлены на рис. 4 и в табл. 2. Результаты получены исходя из предположения

об изотропном характере теплопроводности (значение коэффициента теплопроводности в направлении, перпендикулярном плоскости слоя, близко к коэффициенту теплопроводности в плоскости). Для обоих видов структур имеет место монотонное увеличение ZT с ростом температуры измерений до 600 К. Согласно известным литературным данным, максимум добротности для высшего силицида марганца наблюдается вблизи температуры 700 К и составляет  $\sim 0.2$  [2,6,15]. Это дает основания предполагать, что полученное в работе наибольшее значение  $ZT = 0.59 \pm 0.06$  близко к максимальному. Отметим также, что в области низких температур измеренные значения ZT неточны из-за значительного вклада  $R_{\text{sub}}$ -подложки. Однако в силу низкого значения коэффициента Зеебека для исследованных слоев в указанном диапазоне эти значения не представляют практического интереса.

**Рис. 4.** Температурные зависимости коэффициента термоэлектрической эффективности (ZT) структур A (кривая 1) и B (кривая 2).

## 7. Заключение

Таким образом, показано, что использование наноразмерных слоев на основе силицида марганца с ультрамелкозернистой поликристаллической структурой позволяет получить повышенные значения термоэлектрической добротности. Отметим, что исследования не выявили существенного различия между величинами термоэдс и ZT для структур на основе однороднолегированных слоев  $\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}$  и сверхрешеток  $[\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}]_{10}$ . Можно предположить, что в силу диффузии атомов марганца и близких режимов роста образцы имеют схожую кристаллическую структуру. Общее уменьшение концентрации марганца, по-видимому, не приводит к существенному изменению механизмов термоэдс в структурах.

Следует также подчеркнуть, что значения  $ZT$ , представленные на рис. 4, являются фундаментальной термоэлектрической характеристикой слоев  $Mn_xSi_{1-x}$  или  $[Mn_xSi_{1-x}/Si]_{10}$ , поскольку были получены вычислением сопротивления этих слоев, а также оценкой их вклада в термоэдс. С практической точки зрения для оценки величины  $ZT$  следует рассматривать свойства всей структуры, т.е. подложку с осажденным на нее слоем. Для оценки коэффициента термоэлектрической добротности в таком случае вместо рассчитанных для слоя значений термоэдс следует рассматривать значения термоэдс, непосредственно полученные для исследованной структуры, а также ввести усредненное значение удельного сопротивления, учитывающего сопротивление подложки, и усредненное значение теплопроводности. Подобный анализ был выполнен, данные представлены в табл. 2. Видно, что рассчитанные таким образом значения существенно занижены относительно значений  $ZT$  для исследованных слоев. Очевидно, термоэлектрики на основе наноразмерных слоев не позволяют накапливать достаточное количество электрического заряда для создания источников питания высокой мощности (речь идет не об удельной мощности, а об общей мощности). В то же время величина термоэлектрической добротности структуры с пленкой значительно выше  $ZT$ , полученного для подложки КДБ-0.005. Поэтому можно заключить, что использование наноразмерных пленок имеет практический потенциал.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания — проект № 8.1751.2017/ПЧ Министерства образования и науки России, при поддержке РФФИ (гранты № 15-02-07824\_а, 16-07-01102\_а), гранта МК-8221.2016.2 президента Российской Федерации, государственного задания № 16.7443.2017/БЧ Министерства образования и науки РФ.

## Список литературы

- [1] A.J. Minnich, M.S. Dresselhaus, Z.F. Ren, G. Chen. *Energy & Environ. Sci.*, **2** (5), 466 (2009).
- [2] L.D. Ivanova, A.A. Baikov. *J. Thermoelectricity*, **3**, 60 (2009).
- [3] Е.С. Демидов, Е.Д. Павлова, А.И. Бобров. *Письма ЖЭТФ*, **96** (11), 790 (2012).
- [4] Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, Е.Д. Павлова, А.И. Бобров, В.В. Карзанов, Н.В. Малехонова, А.А. Тронова. *Письма ЖЭТФ*, **100** (11), 818 (2014).
- [5] C. Gayner, K.K. Kar. *Prog. Mater. Sci.*, **83**, 330 (2016).
- [6] И.В. Ерофеева, М.В. Дорохин, В.П. Лесников, А.В. Здоровейцев, А.В. Кудрин, Д.А. Павлов, Ю.В. Усов. *ФТП*, **50** (11), 1473 (2016).
- [7] А.Т. Бурков, А.И. Федотов, А.А. Касьянов, Р.И. Пантелеев, Т. Накама. *Науч.-техн. вестн. инф. технологий, механики и оптики*, **15** (2), 173 (2015).
- [8] D.G. Cahill, H.E. Fischer, T. Klitsner, E.T. Swartz, R.O. Pohl. *J. Vac. Sci. Tech. A*, **7** (3), 1259 (1989).
- [9] K. Maize, Y. Ezzahri, X. Wang, S. Singer, A. Majumdar, A. Shakouri. 24 th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (16–20 March; San Jose, Ca, USA), 185 (2008).
- [10] D.G. Cahill. *Rev. Sci. Instrum.*, **61** (12), 802 (1990).
- [11] S.-M. Lee, D.G. Cahill. *J. Appl. Phys.*, **81** (6), 2590 (1997).
- [12] T. Borca-Tasciuc, D.W. Song, J.R. Meyer, I. Vurgaftman, M.-J. Yang, B.Z. Noshov, L.J. Whitman, H. Lee, R.U. Martinelli, G.W. Turner, M.J. Manfra, G. Chen. *J. Appl. Phys.*, **92** (9), 4994 (2002).
- [13] C.-K. Liu, C.-K. Yu, H.-C. Chien, S.-L. Kuo, C.-Y. Hsu, M.-J. Dai, G.-L. Luo, S.-C. Huang, M.-J. Huan. *J. Appl. Phys.*, **104** (11), 114301 (2008).
- [14] *CRC Handbook of Thermoelectrics*, ed. by D.M. Rowe (N.Y., CRC Press., 1995).
- [15] M.I. Fedorov. *J. Thermoelectricity*, **2**, 51 (2009).

Редактор Г.А. Оганесян

## Thermoelectric effects in nanoscale layers of manganese silicide

I.V. Erofeeva, M.V. Dorokhin, V.P. Lesnikov, Yu.M. Kuznetsov, A.V. Zdoroveyshchev, E.A. Pitirimova

Research Institute for Physics and Technology, Nizhny Novgorod State University, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The values of thermoelectric power, thermal conductivity and resistivity for  $Mn_xSi_{1-x}$  nanolayer and the  $Mn_xSi_{1-x}/Si$  superlattice grown on Si substrates were measured in the temperature range of  $T = 300–600$  K. The role structure, composition and size of the thin films in the generation of the thermoelectric power is discussed. The values of thermoelectric figure of merit of a single manganese silicide layer, and the superlattice layer/substrate system were estimated. The highest figure of merit  $ZT = 0.59 \pm 0.06$  was obtained for  $Mn_{0.2}Si_{0.8}$  at  $T = 600$  K.