

# 硅纳米线复合 $Mg_2Si$ 基热电材料的制备与性能研究

杜子良<sup>1</sup>, 陈少平<sup>1,2</sup>, 王彦坤<sup>2</sup>, 樊文浩<sup>2</sup>, 孟庆森<sup>1,2</sup>, 杨江锋<sup>2</sup>, 崔教林<sup>3</sup>

(1. 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

(2. 太原理工大学, 山西 太原 030024)

(3. 宁波工程学院, 浙江 宁波 315016)

**摘要:** 利用溶液法混合粉体并通过电场激活压力辅助烧结 (FAPAS) 方法制备了不同硅纳米线含量的  $Mg_2Si$  基复合热电材料, 研究了硅纳米线的掺入及含量对基体材料热电性能的影响。结果表明: 硅纳米线掺入后材料电导率大幅降低, 塞贝克系数基本不变, 热导率小幅降低。随着硅纳米线掺量增加, 材料电导率降低, 塞贝克系数稍有提高, 热导率有升高趋势。硅纳米线掺量为 0.1at% 的样品在 800 K 时  $ZT$  值达到最高值 0.5。

**关键词:** 热电性能; SiNWs;  $Mg_2Si$ ; 纳米复合; SPB

中图分类号: TB34

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)10-2717-06

热电材料是一种能够实现热与电之间直接相互转换的功能材料, 利用热电材料制备的热电器件无噪音、无污染、质量轻、无需机械部件、无需液态或气态工质, 因此受到科研工作者的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。热电转换性能由材料本身的性质和温度条件决定, 一般用无量纲热电优值  $ZT$  来衡量其转换效率, 即  $ZT=S^2\sigma T/\kappa$ , 其中  $S$  为 Seebeck 系数,  $\sigma$  为电导率,  $T$  为绝对温度,  $\kappa$  为热导率。 $ZT$  值越高, 热电转换效率越高。 $S^2\sigma$  被称为热电材料的功率因子, 是表征热电材料电学性能优劣的物理量。

$Mg_2Si$  基热电材料是优秀的中温域 (500~800 K) 热电材料。它的原料 Mg、Si 地壳储量丰富, 价格便宜, 无毒无害, 被认为是环境友好的绿色材料。从性能上看, 镁硅基固溶体载流子有效质量大、迁移率大, 晶格热导率小, 其材料参数  $\beta \propto \mu(m^*)^{3/2}/\kappa_l$  达到 14, 远高于其它同样具有环境友好优点的硅化物热电材料<sup>[4]</sup>, 但纯  $Mg_2Si$  晶格热导率较高, 对  $ZT$  值提高不利。目前国内外学者一般采用固溶掺杂来降低其热导率, 研究集中在 Sb、Sn、Ge、Bi 及稀土元素 La、Y 等, 使镁硅基热电材料的热电性能有了较大提高<sup>[5]</sup>。近期 Liu 等<sup>[6]</sup>采用单椭球带模型 (SPB) 对  $Mg_2Si_{0.45}Sn_{0.55}$  固溶体电输运性能进行了深入分析, 通过 Pisarenko 图确认了态密度有效质量的增加, 验证了能带收敛的存在。同时发现该体系低的变形势和合金散射势补偿了有效质量增加所引起的迁移率下降, 这也正是  $Mg_2(Si,Sn)$  固溶体具有高热电性能的主要物理机制之一。

与常见的采用固溶掺杂降热导的方法相比, 微纳复合是降低固体材料晶格热导率的另一有效途径<sup>[7-9]</sup>。Hsu 等<sup>[9]</sup>在 *Science* 杂志上报道了具有高热电性能的块体材料  $AgPb_mSbTe_{2+m}$ , 由于材料中存在原位析出的纳米点, 在 800 K 时其  $ZT$  值达到 2.2。微纳复合结构在材料中引入了大量晶界, 一方面, 由于晶界对声子的散射比对载流子的散射更强, 热导率下降远比电导率的下降要多; 另一方面, 由微纳复合结构引起的量子约束效应也能提高材料的 Seebeck 系数。但是纳米点本身的导电性几乎为零, 如果能够将具有一定电性能的纳米线引入基体结构中, 则有望大幅度提高材料的热电优值。

硅纳米线 (SiNWs) 本身是一种非常有应用前景的低维热电材料<sup>[10-12]</sup>, Hochbaum 等<sup>[10]</sup>利用化学刻蚀法<sup>[13,14]</sup>制备的直径 50 nm 硅纳米线室温下热导率可低至 1.6 W/(m K), 晶格热导率接近无定形硅极限值, 在不明显削减功率因子的基础上  $ZT \approx 1$ , 继续减小硅线直径可使  $ZT > 1$ 。但硅纳米线本身作为低维热电材料其应用受限, 如果将其引入到其它块体材料中形成纳米复合材料则有更好的实用化前景。然而硅纳米线在制备过程中极易发生团聚, 对材料性能提升不利, 因此采用硅纳米线作为复合物相来提高基体材料热电性能的研究鲜有发表。

本实验通过溶液法在无水乙醇中超声振荡混合 SiNWs 与  $Mg_2Si$  粉体, 有效抑制 SiNWs 在复合块体材料制备过程中的团聚问题, 采用电场激活压力辅助烧结 (FAPAS) 方法<sup>[15]</sup>制备出具有微纳结构的 SiNWs- $Mg_2Si$

收稿日期: 2015-10-22

基金项目: 国家自然科学基金 (51101111); 山西省回国留学人员科研资助项目 (2012-031)

作者简介: 杜子良, 男, 1989 年生, 硕士, 太原理工大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024, 电话: 0351-6010520, E-mail: duziliang1989@163.com

复合热电材料, 对其物相及微观结构进行表征, 并研究不同含量硅纳米线对基体材料热电性能的影响。

## 1 实验

本实验通过化学刻蚀法制备了直径在 50~500 nm, 长度可达几十微米的 P 型硅纳米线, 刻蚀液为 0.035 mol/L 的  $\text{AgNO}_3$  溶液与 20% (质量分数) 的 HF 酸的混合液, 常温刻蚀 3 h。为提高硅线产率, 采用双面抛光单晶硅片, P 型<100>晶向, 直径(50.8±0.3) mm, 电阻率 0.015~0.016  $\Omega\cdot\text{cm}$ , 厚度(380±10)  $\mu\text{m}$ 。刻蚀后的硅片经 60% 浓硝酸处理, 以去除硅片表面的银。

以  $\text{Mg}_2\text{Si}$  粉 (纯度>99%, 粒径约 750  $\mu\text{m}$ )、Bi 粉 (纯度 99.99%, 粒径约 75  $\mu\text{m}$ ) 及刻蚀后的 Si 片为原料, 其中  $\text{Mg}_2\text{Si}$ 、Bi 粉按摩尔比  $\text{Mg}_2\text{Si}:\text{Bi} = 1:0.02$  称量。将  $\text{Mg}_2\text{Si}$ 、Bi 粉与刻蚀后的 Si 片置于无水乙醇中同步超声振荡, 通过称量振荡前后硅片的质量可对硅纳米线定量。混合溶液真空烘干 (相对真空度<-0.09 MPa), 同时加磁力搅拌。另外试验中发现, 采用上述大颗粒度  $\text{Mg}_2\text{Si}$  粉体有利于混合粉体的充分烘干, 否则残余乙醇将严重影响后续的烧结过程以及块体材料的致密度。

烘干后的混合粉末球磨 4 h, 以给予其充分的烧结活性并细化粉体颗粒, 然后置于石墨磨具中, 采用 FAPAS 方法烧结成形, 烧结温度 1023 K, 保温时间 20 min, 压力 60 MPa。由此制备了按摩尔比  $\text{Mg}_2\text{SiBi}_{0.02}:\text{SiNWs}$  为 1:0.001 和 1:0.003 2 组硅纳米线复合材料。另外为了充分利用刻蚀后的硅片以及改善材料电性能, 在硅片未去银条件下, 制备了一组按摩尔比  $\text{Mg}_2\text{SiBi}_{0.02}:\text{SiNWs}:\text{AgNWs} = 1:0.003:0.001$  的硅银双线纳米复合材料。

样品微观结构用日本进口的 S-4800 型扫描电子显微镜和 JEM-2100 型透射电子显微镜表征。热电性能测试包括电性能和热性能两部分内容, 电性能主要为电导率  $\sigma$  和 Seebeck 系数  $S$ , 由日本进口的 ZEM-2 型热电测试仪测试。热性能即热导率  $\kappa$ , 由公式  $\kappa = \rho\alpha C_p$  计算, 其中  $\alpha$  为热扩散系数, 由日本进口的 TC-1200RH 型激光闪光热常数测试系统测定;  $C_p$  为样品热容, 取 Schiltz & Riffel 所测值<sup>[16]</sup>;  $\rho$  为样品密度, 由阿基米德法测定, 溶剂为甲苯。电性能与热性能测温范围均为室温至 800 K。

## 2 结果与分析

### 2.1 物相和显微结构分析

图 1 为利用化学刻蚀法刻蚀后的硅片表面, 图 1a 为未去银硅片表面银纳米线 (AgNWs) 形貌, 呈树枝

晶结构, 硅纳米线正是覆于银纳米线下方; 图 1b 为去银后的硅纳米线形貌, 硅纳米线垂直硅片表面生长, 局部区域由于刻蚀不良形成纳米带。将刻蚀后的硅片置于无水乙醇中超声振荡后可得到游离的硅纳米线, 如图 1b 插图所示, 线体表面光洁, 直径约 100 nm, 长度可达数十微米, 可见 SiNWs 具有很大的长径比, 这使其表现出一些区别于块体硅的特性, 如可在不明显减小功率因子的基础上显著降低热导率<sup>[9]</sup>。

图 2 为  $\text{SiNWs-Mg}_2\text{Si}$  复合热电材料断口 SEM 照片, 可以看出, 样品致密度较高, 测试密度达到理论密度的 98% 以上。SiNWs 平均尺寸约 100 nm, 无序均匀分布于基体的晶内和晶界, 无明显团聚, 如图 2a; 局部区域发现少量平行阵列分布的 SiNWs, 如图 2b, 关于这种阵列的形成原因及其对材料性能的影响目前尚不明确, 需做进一步探究。

图 3 为  $\text{SiNWs-Mg}_2\text{Si}$  复合热电材料的 TEM 照片, 根据电子衍射花样可以确定图 3a 中黑色线状物即为 SiNWs, 进而可以证实: SiNWs 可在基体中存留, 且与基体结合良好。基体晶粒尺寸属微米级别, 局部存在高密度位错 (图 3a) 与孪晶 (图 3b)。这些高密度位错与孪晶的存在可对材料的力学性能起到强化作用, 但同时也会引入新的界面, 破坏晶格的完整性, 使电子受到新界面散射而产生电阻, 从而对电性能产生不利影响。

### 2.2 样品的电传输性能

$\text{SiNWs-Mg}_2\text{Si}$  复合热电材料的电导率与温度的关系如图 4 所示, 材料电导率随温度升高而单调升高,

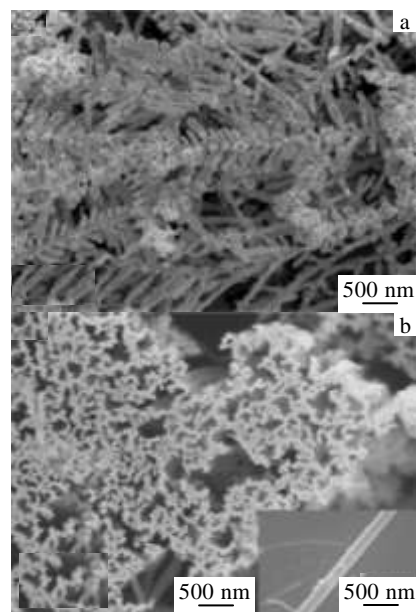


图 1 刻蚀后硅片表面形貌

Fig.1 Surface morphologies of the etched silicon wafer: (a) undersilvered and (b) desilvered

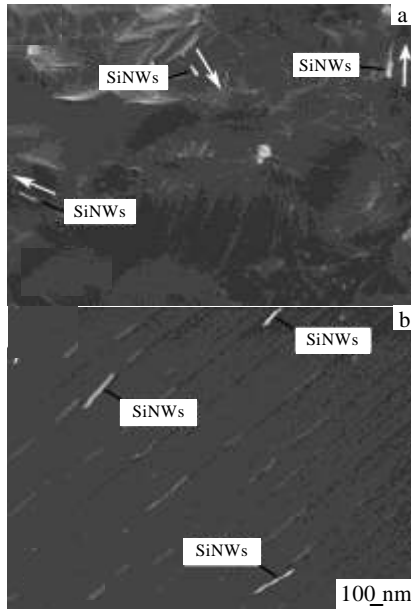


图 2 SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si 复合热电材料的断面形貌

Fig.2 Fracture morphologies of the SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si nanocomposites: (a) random distribution and (b) array distribution

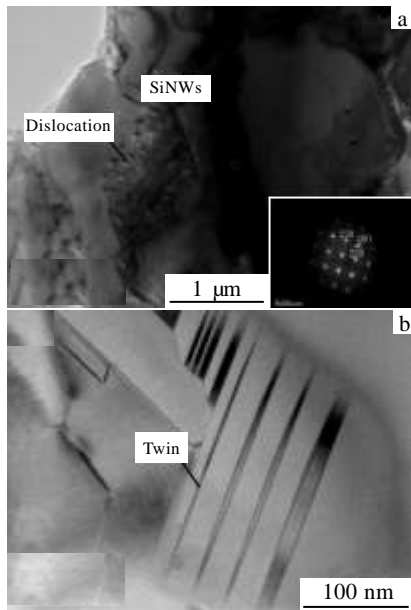


图 3 Mg<sub>2</sub>Si 基纳米复合热电材料内的硅纳米线与孪晶

Fig.3 TEM images of the SiNWs (a) and twins (b) in the SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si nanocomposites

表现出典型的半导体性质。根据电导率公式： $\sigma = ne\mu$  ( $n$  为载流子浓度,  $e$  为单位电荷,  $\mu$  为载流子迁移率), 电导率的大小由载流子浓度和载流子迁移率二者决定。Mg<sub>2</sub>Si 掺 2at%Bi 时为重掺杂<sup>[17]</sup>, 材料处于简并状态, 此时 Bi 原子并未完全电离, 随着温度升高

Bi 原子电离率将不断增大<sup>[18]</sup>, 从而载流子浓度增加, 且其增加速度比由于载流子增加而导致迁移率下降的影响大, 因此电导率随着温度升高而升高。表 1 为室温下各试样的电性能参数。

作为对比, 图 4 还做出了 Kido<sup>[19]</sup>采用 SPS 方法制得的 Mg<sub>2</sub>SiBi<sub>0.02</sub> 样品的电导率与温度的关系曲线, 比较可知, SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si 复合热电材料的电导率较其有显著差距。由表 1 可知, SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si 复合热电材料的载流子浓度与迁移率均有明显降低, 这意味着 Bi 的有效掺杂量不足, 一部分 Bi 以单质的形态存在于材料内的缺陷中或简单存在于晶界, 这种存在方式不仅对材料的载流子浓度没有贡献, 而且 Bi 将作为第二相进一步增加载流子散射, 使迁移率下降<sup>[20]</sup>; 同时 SiNWs 的存在也对载流子具有散射作用, 从而使其迁移率进一步下降, 这也是整个体系电性能较差的主要原因。另外, 材料内部存在许多缺陷如位错、孪晶等, 也会阻碍载流子的运动, 进而引起材料电导率降低<sup>[21]</sup>。

随着硅纳米线含量增加, SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si 复合热电材料的电导率进一步降低。引起这一结果的原因, 从宏观上看, 是由于利用化学刻蚀法制备的 SiNWs 其导电能力取决于所用硅片 ( $10^4 \sim 10^5$  S/m, 300 K), 弱于 Mg<sub>2</sub>SiBi<sub>0.02</sub> 基体 ( $10^5 \sim 10^6$  S/m, 300 K), 从而 SiNWs 的掺量增加将使材料电导率进一步降低。从微观上看,

表 1 各样品 300 K 时的电性能参数

Table 1 Electrical properties of the nanocomposites at 300 K

Sample	$n/\times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$\mu/\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$	$\sigma/\times 10^3 \text{ S m}^{-1}$
Mg <sub>2</sub> SiBi <sub>0.02</sub> SiNWs <sub>0.001</sub>	3.96	11.94	7.1
Mg <sub>2</sub> SiBi <sub>0.02</sub> SiNWs <sub>0.003</sub>	3.12	10.24	5.1
Mg <sub>2</sub> SiBi <sub>0.02</sub> Si&AgNWs	2.95	9.04	4.3
Mg <sub>2</sub> SiBi <sub>0.02</sub> by Kido	11	64.0	110

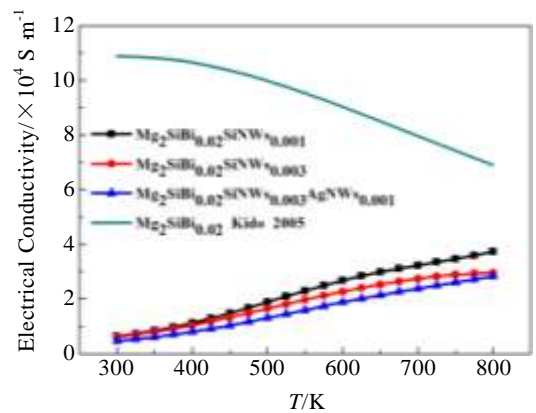


图 4 SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si 复合热电材料的电导率与温度关系

Fig.4 Temperature dependence of electrical conductivity of SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si nanocomposites

硅纳米线的掺入增加了材料内部的界面密度，受界面散射作用，载流子的迁移率降低，进而导致电导率下降<sup>[22,23]</sup>。

Ag 是电的良好导体，理论上掺入 Ag 后可使材料的电导率增大。但是可以看到，掺 AgNWs 样品的电导率反而较同条件下未掺的样品要低，其原因是由于在烧结过程中，金属银粒子有聚合的趋势，而银的聚合导致基体中产生大量的微孔<sup>[24]</sup>，如图 5 所示，使得材料的致密度降低，电性能下降。总之，微量的银对于基体导电性的改善不足以弥补其对于烧结影响所带来的电导损害，掺银后材料电导率不增反降的现象也在姜<sup>[25]</sup>的博士论文中有出现。

图 6 为 SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si 复合热电材料的 Seebeck 系数随温度的变化关系。可以看出，各样品塞贝克系数均为负数，表现为 n 型导电。随温度的升高，各样品 Seebeck 系数绝对值单调增加，其变化趋势均表现出良好的线型，这点是重掺杂半导体一典型特征<sup>[26]</sup>，与

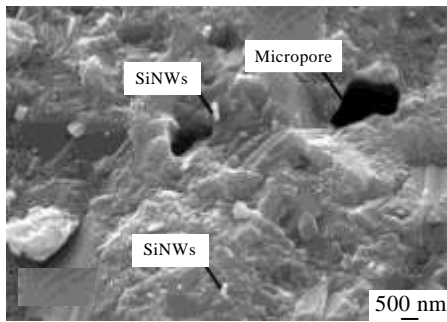


图 5 SiNWs & AgNWs 双掺样品中的微孔

Fig.5 SEM image of the micropore in the SiNWs & AgNWs doped sample

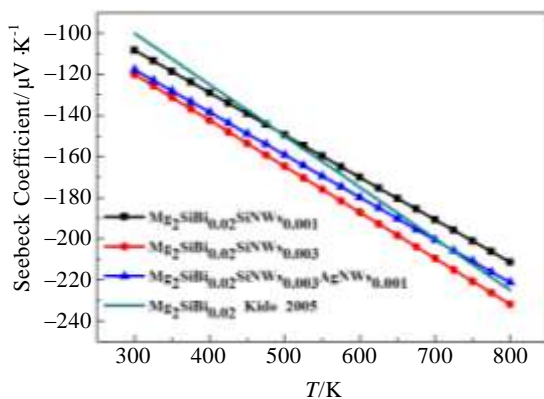


图 6 SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si 复合热电材料的 Seebeck 系数与温度的关系

Fig.6 Temperature dependence of Seebeck coefficient of SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si nanocomposites

Kido<sup>[19]</sup>的结果一致。SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si 材料的 Seebeck 系数较 Kido<sup>[19]</sup>的结果基本保持不变，随着硅纳米线掺量增加，材料 Seebeck 系数稍有增加，这可根据下列公式解释<sup>[21,27]</sup>：

$$S = \frac{k}{e} \left[ \frac{(2 + \lambda) F_{1+\lambda}(\eta)}{(1 + \lambda) F_{\lambda}(\eta)} \right] - \eta \quad (1)$$

$$n = 4\pi \left( \frac{2m^*kT}{h^2} \right)^{3/2} F_{1/2}(\eta) \quad (2)$$

$$F_j(\eta) = \int_0^\infty \frac{\zeta^j d\zeta}{1 + \exp(\zeta - \eta)} \quad (3)$$

$$|S| = \frac{k}{e} \left[ \frac{3}{2} - \ln \frac{nh^3}{2(2\pi m^*kT)^{3/2}} \right] \quad (4)$$

其中， $k$  为玻尔兹曼常数， $e$  为单位电荷； $\lambda$  为与声子散射类型有关的参数，声子间散射占主导时， $\lambda=0$ <sup>[27]</sup>； $\eta$  为简约费米能级，由公式(1)利用 SPB 模型<sup>[27]</sup>计算； $F_j(\eta)$ 为费米积分； $m^*$ 为载流子有效质量， $h$  为普朗克常数。由公式(1)~(3)计算可知，室温下 Kido<sup>[19]</sup>的 Mg<sub>2</sub>SiBi<sub>0.02</sub> 样品  $m^*$  为  $1.23m_e$ ，SiNWs 掺量为 0.1at% 与 0.3at% 的样品  $m^*$  分别为  $0.68m_e$  与  $0.67m_e$ ，载流子有效质量  $m^*$  明显减小；由公式(4)可知，Seebeck 系数的绝对值与载流子浓度  $n$  成反比，与有效质量  $m^*$  成正比，由于材料载流子浓度  $n$  降低，同时有效质量  $m^*$  减小，在两者共同影响下，材料 Seebeck 系数最终变化不大。 $m^*$  减小从根本上来讲主要是由于 Bi 的有效掺杂量不足引起的，而材料的不致密以及硅线掺入后界面密度增加都是其可能诱因。掺 AgNWs 样品 Seebeck 系数较未掺的要低是因为 Ag 是 P 型掺杂材料，它在不改变材料导电类型的前提下，将对 Seebeck 系数有着不利影响，使 n 型材料的 Seebeck 系数降低。由此看来，微量的银并没有起到改善材料电性能的目的。

综上所述，硅纳米线的掺入使材料电导率显著降低，Seebeck 系数基本不变，从而导致材料电传输性能有大幅度的恶化。

### 2.3 样品的热传输性能

SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si 复合热电材料热导率与温度的关系如图 7a 所示。随着温度增长，SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si 复合热电材料的热导率具有相近的变化趋势，均单调降低。可以看到，SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si 复合热电材料的热导率较 Kido<sup>[19]</sup>的 Mg<sub>2</sub>SiBi<sub>0.02</sub> 样品有所降低，但降幅有限，且随着硅纳米线掺量增加，热导有升高趋势。

材料热导率  $\kappa$  为电子热导率  $\kappa_e$  和晶格热导率  $\kappa_l$  之和，即  $\kappa = \kappa_l + \kappa_e$ 。电子热导率  $\kappa_e$  与电导率  $\sigma$  之间满足 Wiedemann-Franz 关系，即： $\kappa_e = L\sigma T$ ， $L$  为洛伦兹常数，取文献参考值  $2.2 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-2}$ <sup>[17]</sup>， $T$  为绝对温度。由图 7b 可以看出，SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si 复合热电材料的

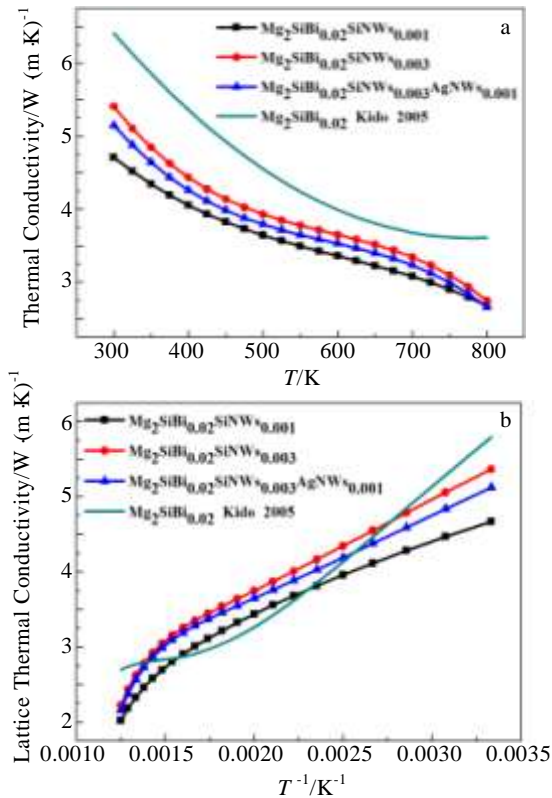


图 7 SiNWs- $Mg_2Si$  复合热电材料热导率与温度的关系  
Fig.7 Temperature dependence of thermal conductivity (a) and lattice thermal conductivity (b) of SiNWs- $Mg_2Si$  nanocomposites

晶格热导率较 Kido<sup>[19]</sup>的  $Mg_2SiBi_{0.02}$  样品在曲线两端有较大降低, 但从整个测温范围看, 并没有明显差距。

当 SiNWs 掺量增加时, 材料晶格热导率升高, 可能是由于 SiNWs 在烧结阶段发生轻度团聚, 导致其热性能接近块体硅, 而块体硅的热导率在整个测温范围内均高于  $Mg_2SiBi$  基体的热导率<sup>[17,19]</sup>, 从而导致随着 SiNWs 掺量增加材料热导率升高; 掺 AgNWs 样品晶格热导率较未掺的稍低, 是由于一部分纳米级微孔的存在增加了材料内部的点缺陷数量, 而引入点缺陷是降低晶格热导率的有效手段<sup>[24]</sup>。另外除高温段外,  $\kappa_l$  表现为正相关于  $T^{-1}$ , 这点与 Kido<sup>[19]</sup>的结果一致, 表明声子主要散射机制为声子间散射即倒逆过程。

由此可知, SiNWs- $Mg_2Si$  复合热电材料热导率的降低主要是由于电导率显著降低所导致的电子热导率  $\kappa_e$  的降低引起的, 硅纳米线对于材料晶格热导率的降低作用并不明显。

图 8 为 SiNWs- $Mg_2Si$  复合热电材料  $ZT$  值与温度的变化关系, 可以看出, 材料  $ZT$  值都是随温度的升高而单调升高, 在整个测温范围内  $Mg_2SiBi_{0.02}SiNWs_{0.001}$  样品性能最优, 在 800 K 时取得最大  $ZT$  值 0.5。

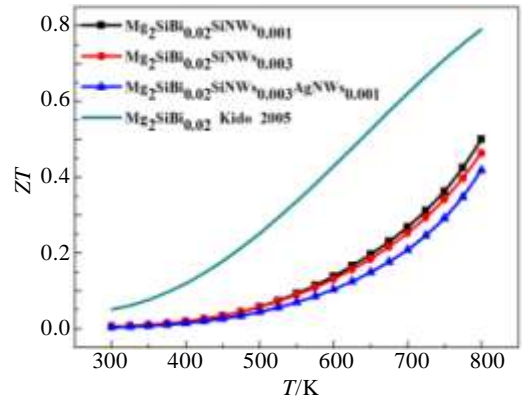


图 8 SiNWs- $Mg_2Si$  复合热电材料  $ZT$  值与温度关系  
Fig.8 Temperature dependence of  $ZT$  of SiNWs- $Mg_2Si$  nanocomposites

### 3 结 论

1) 采用溶液法对粉体进行超声混合后烧结可以起到有效抑制硅纳米线在基体中团聚的效果, 并有利于其在基体中均匀分散。

2) 硅纳米线可在  $Mg_2Si$  基体中存留, 其掺入后材料的电导率大幅降低, 塞贝克系数基本不变, 热导率小幅降低。随着硅纳米线掺量增加, 材料电导率降低, 塞贝克系数稍有提高, 热导率有上升趋势。

3) SiNWs- $Mg_2Si$  复合热电材料的  $ZT$  值均随温度升高而单调增加, 硅线掺量为 0.1 at% 样品性能最优, 在 800 K 时获得最大  $ZT$  值 0.5。

### 参考文献 References

[1] Zhou M, Li J F, Kita T N. *J Am Chem Soc*[J], 2008, 130(13): 4527  
 [2] Cao Y Q, Zhu T J, Zhao X B. *J Alloy Compd*[J], 2010, 493: 423  
 [3] Shi X, Chen L, Yang J et al. *Appl Phys Lett*[J], 2004, 84: 2301  
 [4] Yang Meijun(杨梅君), Shen Qiang(沈 强), Tang Xinfeng(唐新峰) et al. *Journal of the Chinese Ceramic Society*(硅酸盐学报)[J], 2011, 30(10): 1603  
 [5] Zhou Shucui(周书才). *Thesis for Doctoral*(博士论文)[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 8  
 [6] Liu X H, Zhu T J, Wang H et al. *Adv Energy Mater*[J], 2013, 3(9): 1238  
 [7] Chen Lidong(陈立东), Xiong Zhen(熊 震), Bai Shengqiang(柏胜强). *Journal of Inorganic Materials*(无机材料学报)[J], 2010, 25(6): 561

- [8] Yi Ma, Richard Heijl, Anders E C Palmqvist. *Journal of Materials Science*[J], 2013, 48(7): 2767
- [9] Hsu K F, Loo S, Guo F *et al. Science*[J], 2004, 303(5659): 818
- [10] Hochbaum A I, Chen R K, Delgado R D *et al. Nature*[J], 2008, 451(7175): 163
- [11] Boukai A I, Bunimovich Y, Tahir-Kheli J *et al. Nature*[J], 2008, 451(7175): 168
- [12] Trinh T M Vo, Andrew J Williamson, Vincenzo Lordi *et al. Nano Lett*[J], 2008, 8(4): 1111
- [13] Zhang M L, Peng K Q, Fan X *et al. Journal of Physical Chemistry C*[J], 2008, 112 (12): 4444
- [14] Peng K Q, Hu J J, Yan Y J *et al. Adv Funct Mater*[J], 2006, 16: 387
- [15] Chen Shaoping(陈少平). *Thesis for Doctoral*(博士论文)[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010: 6
- [16] Riffel M, Schilz J. *16th International Conference on Thermoelectrics*[C]. Dresden: IEEE, 1997: 283
- [17] Yi T H, Chen S P, Li Shawn *et al. J Mater Chem*[J], 2012, 22(47): 24 805
- [18] Liu Enke(刘恩科), Zhu Bingsheng(朱秉生), Luo Jinsheng(罗晋升). *Semiconductor Physics*(半导体物理学)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1994: 84
- [19] Tani J, Kido H. *Physica B*[J], 2005, 364(1-4): 218
- [20] Nikhil Satyala, Jerzy S Krasinski, Daryoosh Vashae. *Acta Materialia*[J], 2014, 74: 141
- [21] Rowe D M. *CRC Handbook of Thermoelectrics*[M]. New York: CRC Press, 1995: 1
- [22] Li H, Tang X, Zhang Q *et al. Appl Phys Lett*[J], 2009, 94(10): 102 114
- [23] Ma Y, Hao Q, Poudel B *et al. Nano Lett*[J], 2008, 8(8): 2580
- [24] Karunakaran C, Rajeswari V, Gomathisankar P. *Materials Science in Semiconductor Processing*[J], 2011, 14(2): 133
- [25] Jiang Hongyi(姜洪义). *Thesis for Doctoral*(博士论文)[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003: 82
- [26] Bux S K, Yeung M T, Toberer E S *et al. J Mater Chem*[J], 2011, 21(33): 12 259
- [27] Saneyuki Ohno, Alexandra Zevalkink, Yoshiki Takagiwa *et al. J Mater Chem A*[J], 2014, 2(20): 7478

## Fabrication and Thermoelectric Performance of the SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si Nanocomposite

Du Ziliang<sup>1</sup>, Chen Shaoping<sup>1,2</sup>, Wang Yankun<sup>2</sup>, Fan Wenhao<sup>2</sup>, Meng Qingsen<sup>1,2</sup>, Yang Jiangfeng<sup>2</sup>, Cui Jiaolin<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials, Ministry of Education, Taiyuan 030024, China)

(2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(3. Ningbo University of Technology, Ningbo 315016, China)

**Abstract:** SiNWs-Mg<sub>2</sub>Si powder doped with 2at% Bi was prepared by the solution method and consolidation, and the influence of silicon nanowires on the thermoelectric performance of the Bi-doped Mg<sub>2</sub>Si matrix was studied. Results indicate that the electrical conductivity of the materials decreases greatly, the Seebeck coefficient remains roughly the same, and the thermal conductivity declines slightly. With the increase of the SiNWs dosage, the electrical conductivity further decreases, the Seebeck coefficient improves a little, and the thermal conductivity rises. The sample with 0.1 at% SiNWs embedded obtains the highest *ZT* value of 0.5 at 800 K.

**Key words:** thermoelectric properties; SiNWs; magnesium silicide; nanocomposite; SPB

Corresponding author: Chen Shaoping, Ph. D., Associate Professor, Department of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, Tel: 0086-351-6010520, E-mail: sxchenshaoping@163.com