

Se 掺杂量对 n 型 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 微结构及热电性能的影响

张骐昊, 徐磊磊, 王连军, 江 莞

(东华大学 纤维材料改性国家重点实验室, 上海 201620)

摘 要: 通过水热法合成不同 Se 掺杂量的 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 0.45$) 纳米粉体, 采用放电等离子烧结技术, 制备出致密度较高的块体材料。通过 X 射线衍射、扫描电镜、透射电镜等测试手段对材料的微结构进行了表征, 并重点研究了含有不同 Se 掺杂量块体材料的显微结构和热电性能。结果表明: Se 元素的掺杂使得粉体 XRD 特征衍射峰向高角度偏移, 并且衍射峰出现宽化, 晶粒尺寸变小。随着 Se 掺杂量的增加, 块体材料的电导率先增大后减小; Se 元素的掺杂有效地降低了材料的热导率, 并提高了材料的 Seebeck 系数。研究结果表明: 在整个测试温度区间, 所有经过 Se 掺杂的样品 ZT 值都高于未掺杂样品。当 Se 掺杂量为 0.3 时, 样品具有最大的 ZT 值, 平均约为 0.51, 并在 475 K 时达到最大值 0.57, 相比未经 Se 掺杂的 Bi_2Te_3 提高了 159%。

关 键 词: 碲化铋; 硒掺杂; 水热合成; 放电等离子体烧结; 热电性能

中图分类号: TN304 文献标识码: A

Effects of Different Amount of Se-doping on Microstructures and Thermoelectric Properties of n-type $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$

ZHANG Qi-Hao, XU Lei-Lei, WANG Lian-Jun, JIANG Wan

(State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: A hydrothermal method combined with a subsequent spark plasma sintering technique was successfully utilized to synthesize selenium (Se) doped bismuth telluride ($\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$) ($0 \leq x \leq 0.45$). The influence of Se-doping on the composition and morphology of n-type $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ was studied by X-ray diffraction, scanning electron microscope and transmission electron microscope. Thermoelectric properties of the as-prepared bulk $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ nanocomposites were investigated in detail. Results showed that the grain became finer by the Se-doping. With increasing Se doping content, the electrical conductivity of bulk $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ increased firstly and then decreased. Se-doping effectively reduced the thermal conductivity and improved the Seebeck coefficient to some extent. Consequently, a maximum ZT value of 0.57 was obtained from bulk $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ at 475 K, which was increased by 159% as compared with pure bulk Bi_2Te_3 .

Key words: bismuth telluride; Se-doping; hydrothermal synthesis; spark plasma sintering; thermoelectric properties

近年来, 随着能源危机和环境污染的日益严重, 开发绿色清洁能源、探索余热废热回收利用技术

引起了各国的高度重视。热电材料作为一种有效地实现热能和电能直接转化的新型功能材料, 在热电

收稿日期: 2014-02-27; 收到修改稿日期: 2014-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(51374078); 上海市科学技术委员会(13JC1400100, 12QH1400100)

National Natural Science Foundation of China (51374078); Shanghai Committee of Science and Technology (13JC1400100, 12QH1400100)

作者简介: 张骐昊 (1988-), 男, 硕士研究生. E-mail: zqh378@163.com

通讯作者: 王连军, 教授. E-mail: wanglj@dhu.edu.cn

制冷和温差发电领域具有广泛的应用前景^[1]。材料的热电性能取决于热电优值 ZT 值, ($ZT = \alpha^2 \sigma T / \kappa$, 其中 α 是 Seebeck 系数, σ 是电导率, T 是绝对温度, κ 是热导率), ZT 值越大, 则材料的热电转换效率越高^[2]。 Bi_2Te_3 及其固溶体合金是研究最早的也是最成熟的热电材料之一, 是目前室温下热电性能最好的材料, 已广泛应用于半导体制冷元件^[3]。但是由于 Bi_2Te_3 的 ZT 值不够高, 因而没有得到大规模应用。如何进一步提高 Bi_2Te_3 的热电性能, 实现其商业化, 是当前急需解决的问题。

从材料的组成来讲, 形成固溶体合金是提高材料热电性能的有效途径^[4-6]。该方法是在材料的晶体结构中引入适当的短程无序而不改变晶格的长程有序。这种点缺陷不会对波长相对较长的载流子产生较强的散射, 可以在保持迁移率不发生明显变化的条件下降低材料的热导率, 从而优化材料的热电优值。另外, 材料的热电性能强烈依赖于费米能级, 而费米能级的高低主要由载流子浓度决定。掺杂适当元素, 可以有效调节载流子浓度, 进而优化材料的热电性能。

硫族(Te、Se)^[7-10] 和氮族(Bi、Sb)^[11-13] 等元素是掺杂的首选, 大多数报道采用球磨和热压相结合的传统方法进行掺杂, 但是其制备时间长, 成本高。本工作采用水热法合成了不同 Se 掺杂量的 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 纳米粉体, 然后利用放电等离子体烧结(SPS)技术, 制备出结构致密的合金块体。利用合金化和纳米化的协同作用进一步降低材料热导率, 提高热电性能。主要研究了不同 Se 掺杂量对 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 粉体、块体相结构、微观形貌和热电性能的影响, 确定了最佳的 Se 元素掺杂量。

1 实验方法

1.1 样品制备

以 Te 粉(99.9999%)、Se 粉(99%)、 BiCl_3 (分析纯)

为原料, 按照 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ ($x=0.1, 0.15, 0.3, 0.45$) 的化学计量比精确称取原料。将原料在烧杯中混合均匀, 以去离子水为溶剂, NaOH 为 pH 调节剂, NaBH_4 为还原剂, EDTA 为包覆剂, 超声振荡 1 h 后转移至 WDF 型高压反应釜中, 在 200℃ 下保温 8 h, 冷却至室温后, 对所得到的混合溶液进行抽滤, 并反复用去离子水 and 无水乙醇清洗, 最后在 60℃ 下真空干燥 6 h, 得到黑色合金粉末。用 Dr Sinter-SPS 725 放电等离子烧结炉对粉体进行烧结: 石墨模具内径为 10 mm; 采用两步加压, 即初始加压 30 MPa, 升温速率为 50~100 °C/min; 最终保温压力为 80 MPa, 保温温度为 350℃, 保温时间为 6 min。

1.2 样品表征

通过日本 Rigaku D/Max-2550 PC 型 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 仪对样品进行物相分析。用日本 S-4800 型场发射扫描电子显微镜 (Field emission scanning electron microscope, FESEM)、2100F 型透射电子显微镜 (Transmission electron microscope, TEM) 观察粉体和块体样品的微观形态。用日本 ULVAC-RIKO, ZEM-3 型热电测试装置同时测量块体样品的电导率和 Seebeck 系数。利用 Archimedes 排水法原理测得块体材料的密度(ρ); 采用德国 Netzsch LFA427 型热导仪, 应用激光脉冲技术在 Ar 气氛中测定样品热扩散系数(λ); 利用耐驰差示扫描量热仪 (DSC204F1) 测量材料的热容(C_p), 由公式 $\kappa = \lambda C_p \rho$ 计算得到材料的热导率。

2 结果与讨论

2.1 不同 Se 掺杂量的 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 纳米粉体的分析

图 1 为不同 Se 掺杂量的 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 纳米粉体的 XRD 图谱。从图 1(a) 中可以看出, 与单相 Bi_2Te_3 的衍射峰相对比, 所有化合物均具有斜方六面体晶体结构(空间群 R3m), 没有杂峰出现。一些衍射峰为

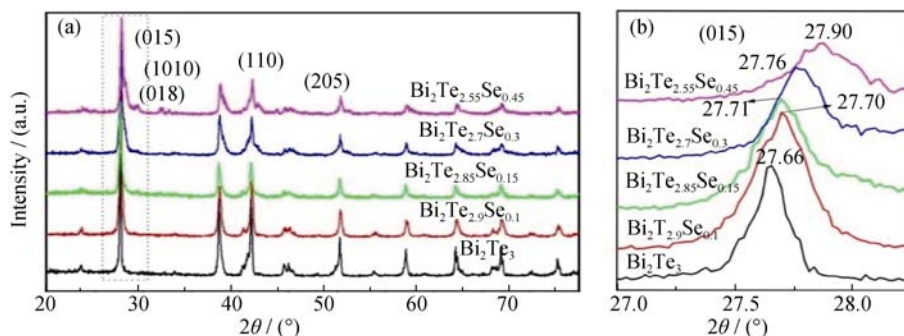


图 1 不同 Se 掺杂量的 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 纳米粉体的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ nanopowders being doped with different Se-doping contents

接近的两个峰的交叠, 特别是三强峰尤为明显, 这与文献[14]报道一致。由此判断, 合成粉体由结构相似且成份相近的两相组成, 其中一相接近 Bi_2Te_3 , 另一相接近于 Bi_2Se_3 。随着 Se 含量的增加, $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 的特征峰强度减弱。合成粉体的(015)特征峰(图 1(b))随 x 值的增大向高角度偏移, 由 Bi_2Te_3 的 27.66° 转变为 $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.55}\text{Se}_{0.45}$ 的 27.90° , 并且衍射峰也更宽化, 表明晶粒尺寸变小。

图 2 为不同 Se 掺杂量的 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 纳米粉体的电镜照片, 从图中可以看出, 粉体分散性较好, 没有明显的团聚现象。合成粉体为细小的、具有不规则形状的纳米颗粒。从图 2(a~c)可以看出, 不规则状粉体颗粒尺寸从 80 nm 减小到 50 nm, 这表明随着掺入半径较小的 Se 元素, 合金粉体尺寸变小, 这与 XRD 分析结果相一致。图 2(d)为 $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.55}\text{Se}_{0.45}$ 粉体高倍透射电镜照片, 图中晶粒的晶面间距为 0.319、0.217 nm 分别对应于 $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.55}\text{Se}_{0.45}$ 化合物斜方六面体结构的(015)和(110)点阵面, 相比 Bi_2Te_3 单相, 其晶面间距有所减小。

2.2 不同 Se 掺杂量的 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 块体的断面形貌

图 3 是采用 SPS 烧结制备的块体 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 样品的断口形貌。从图 3 中可以看出, 经过 SPS 烧结, $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 主要呈片状结构, 并也含有少量不规则状晶粒, 没有明显的择优取向, 并且可以看到所有样品微观结构都呈大晶粒中间穿插着一些小晶粒形貌, 属于典型的微纳多尺度结构。由于一些微小的

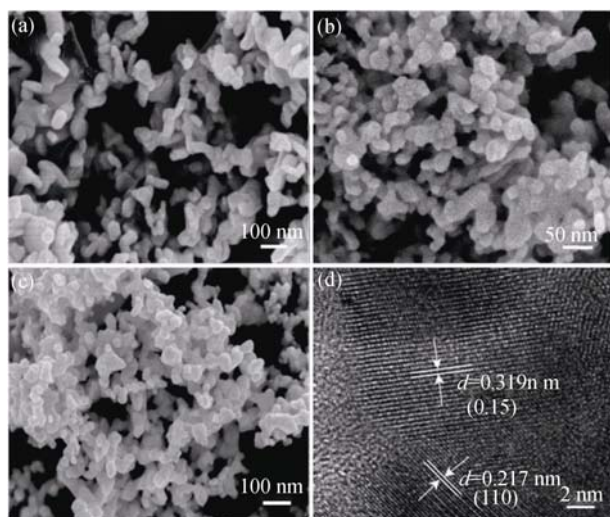


图 2 不同 Se 掺杂量的 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 纳米粉体的场发射扫描电镜和透射电镜照片

Fig. 2 FE-SEM and HRTEM images of $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ nanopowder being doped with different Se contents
SEM images of (a) $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.9}\text{Se}_{0.1}$, (b) $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ and (c) $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.55}\text{Se}_{0.45}$,
HRTEM image of (d) $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.55}\text{Se}_{0.45}$ nanopowder

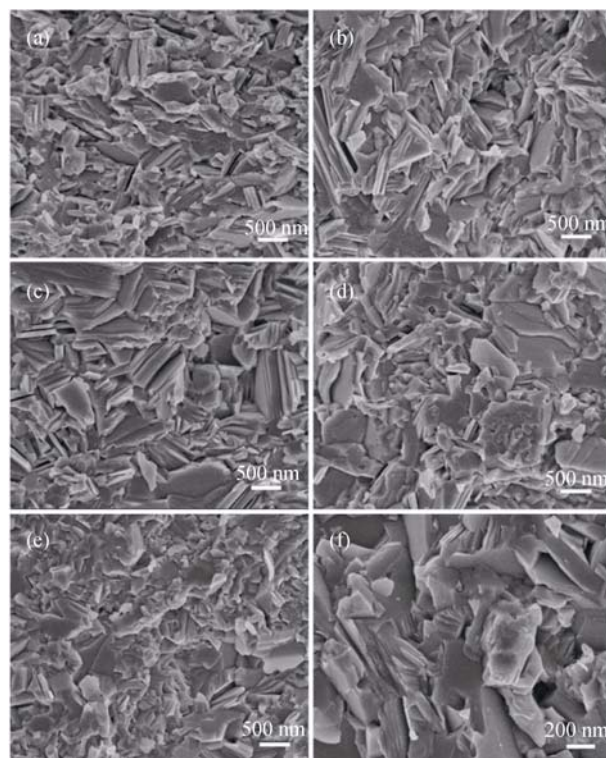


图 3 不同 Se 掺杂量的 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 块体的断面形貌

Fig. 3 Fractured surfaces' morphologies of bulk $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ being doped with different Se contents

(a) Bi_2Te_3 ; (b) $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.9}\text{Se}_{0.1}$; (c) $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.85}\text{Se}_{0.15}$; (d) $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$; (e) and (f) $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.55}\text{Se}_{0.45}$

晶粒填充到大晶粒的空隙之间, 提高了块体样品的致密度, 所有样品的相对密度均在 98.9% 以上(表 1)。由于 $\text{Te}^{(1)}\text{-Te}^{(1)}$ 原子之间以较弱的范德华力相结合, 断口呈现出“台阶式”的解理, 表现为脆性的穿晶断裂^[15]。另外, $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 纳米粉体在 SPS 烧结过程中晶粒长大, 由 50~100 nm 大小的晶粒长大为平均尺寸约 0.5~1 μm 晶粒。随着 Se 元素掺杂量的增加, 晶粒内的解理程度下降。从图 3(a~e)可以看出, SPS 烧结后样品颗粒尺寸先增大后减小, 选取 $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.55}\text{Se}_{0.45}$ 某一区域放大(图 3f), 可见样品晶粒尺寸较小, 平均约为 400 nm, 呈现晶粒交叉排列的层状结构。

2.3 不同 Se 掺杂量的 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 块体的热电性能

图 4 是不同 Se 掺杂量的 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 块体的电导率随温度的变化关系, 从图中可以看出, 所有 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 样品的电导率都随温度的升高而降低, 呈现出金属导电特性($d\sigma/dT < 0$)。随着 Se 含量的增加, 电导率波动较大, $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.9}\text{Se}_{0.1}$ 样品的电导率最大。室温下, 最大电导率为 $1.17 \times 10^5 \text{ S/m}$, 该值相比 Bi_2Te_3 块体室温下的 $0.433 \times 10^5 \text{ S/m}$ 提升了 1.7 倍。而 $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.55}\text{Se}_{0.45}$ 样品的电导率最低, 其电导率在室温下低至 $0.35 \times 10^5 \text{ S/m}$, 这与文献报道的 Bi_2Te_3

表 1 不同 Se 掺杂量的 Bi₂Te_{3-x}Se_x 块体密度及相对密度

Tables 1 Densities and relative densities of Bi₂Te_{3-x}Se_x bulk samples being doped with different Se contents

Sample	Bi ₂ Te ₃	Bi ₂ Te _{2.9} Se _{0.1}	Bi ₂ Te _{2.85} Se _{0.15}	Bi ₂ Te _{2.7} Se _{0.3}	Bi ₂ Te _{2.55} Se _{0.45}
Density/(g · cm ⁻³)	7.820	7.755	7.760	7.753	7.759
Relative density	99.52%	98.92%	98.98%	99.02%	99.16%

基体电导率随 Se 掺杂量增加而降低的趋势相似^[16]。这是由于样品电导率的变化主要取决于载流子浓度和载流子迁移率的改变。一方面, Se 的掺杂会增加载流子浓度, 导致电导率增大; 但另一方面, 随着 Se 的掺杂量增加, 块体样品晶粒逐渐变小, 这会在材料内部引入更多的晶界, 而增加载流子的散射, 减弱载流子迁移率, 导致样品的电导率降低^[7]。

图 5 是不同 Se 掺杂量的 Bi₂Te_{3-x}Se_x 块体的 Seebeck 系数随温度的变化关系, 由图可知: 所有样品的 Seebeck 系数都为负值, 表明样品均为 n 型半导体, 载流子为电子。当 $x=0.45$ 时, 块体样品的 Seebeck 系数明显增加, 在 350 K 时取得最大值

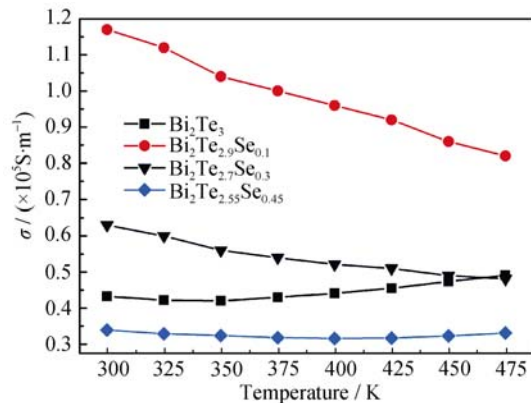


图 4 不同 Se 掺杂量的 Bi₂Te_{3-x}Se_x 块体的电导率随温度的变化关系

Fig. 4 Temperature dependence of electrical conductivity for Bi₂Te_{3-x}Se_x bulk samples being doped with different Se contents

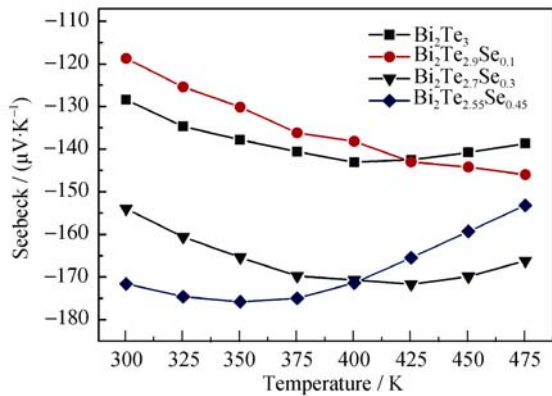


图 5 不同 Se 掺杂量的 Bi₂Te_{3-x}Se_x 块体的 Seebeck 系数随温度的变化关系

Fig. 5 Temperature dependence of Seebeck coefficient for Bi₂Te_{3-x}Se_x bulk samples being doped with different Se contents

(-175 μV/K)。同时这一数值也高于之前文献报道的 Bi₂Te_{2.55}Se_{0.45} 在该温度下的 Seebeck 系数^[16]。然而 Bi₂Te_{2.9}Se_{0.1} 的 Seebeck 系数平均值却比纯 Bi₂Te₃ 的低, 与其高电导率关系恰好相反, 这也符合 Seebeck 系数 α 与电导率 σ 成反比的关系。另外, 所有样品 Seebeck 系数均随测试温度的升高先增加后减小, 与文献[14, 16]报道相符。这是由于随着温度升高, 没有电离完全的掺杂离子逐渐电离, 离化杂质浓度提高, 离化杂质散射因子变大, 导致 Seebeck 系数也相应增大; 但 Se 掺杂为浅能级掺杂, 当测量温度升高到一定程度时, 杂质能级即可电离为导带电子和价带空穴, 成为本征半导体^[17]。随着测量温度升高而进入本征导电区以后, 样品中同时存在电子和空穴两种载流子, 如果继续升高测量温度便会出现 Seebeck 系数随温度升高而减小的结果。图 5 中 Seebeck 系数的转折即表明本征载流子的数量激增, 在高温端由本征导电引起 Seebeck 系数减小的现象在 400 K 以上表现得尤为明显。

图 6 是不同 Se 掺杂量的 Bi₂Te_{3-x}Se_x 块体的热导率、晶格热导率随温度的变化关系。材料热导率(K)主要由载流子热导率(K_C)和晶格热导率(K_L)两部分组成, 即 $K = K_C + K_L$ 。根据 Wiedemann-Frantz 定律, 载流子热导率与温度和载流子浓度成正比, 即 $K_C = LT\sigma$ 。而对于强简并半导体, L 通常取 $2.45 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[14]。从图 6(a)中可以看出: 随着 Se 元素掺杂量的增大, 样品的热导率逐渐减小, 从单相 Bi₂Te₃ 的热导率平均值 1.4 W/(m·K)逐步降到 Bi₂Te_{2.55}Se_{0.45} 的 1.0 W/(m·K)。当 $x=0.45$ 时, 总热导率在 325 K 时达到最小值 0.9 W/(m·K)。热导率的显著降低是因为 Se 掺杂引起的合金散射不仅降低了样品的载流子迁移率, 并且增大了对声子的散射作用, 进而显著地降低了样品的晶格热导率, 如图 6(b)所示。另外, 对于固溶体合金材料, 由于点缺陷的引入大大增加了对高频短波声子的散射, 高频声子对热导率的贡献明显减小。此时, 材料的晶格热导率主要来自低频声子的贡献, 晶界散射作用相对增加而变得重要, 从而减小了声子平均自由程和导热系数^[2]。

根据实验测得的电导率、Seebeck 系数以及热导率, 由公式 $ZT = \alpha^2 \sigma T / \kappa$ 计算样品在测试温度范围内热电优值。从图 7 中可以看到, 样品的 ZT 值总体上随温度升高先增大后减小。在整个温度区间,

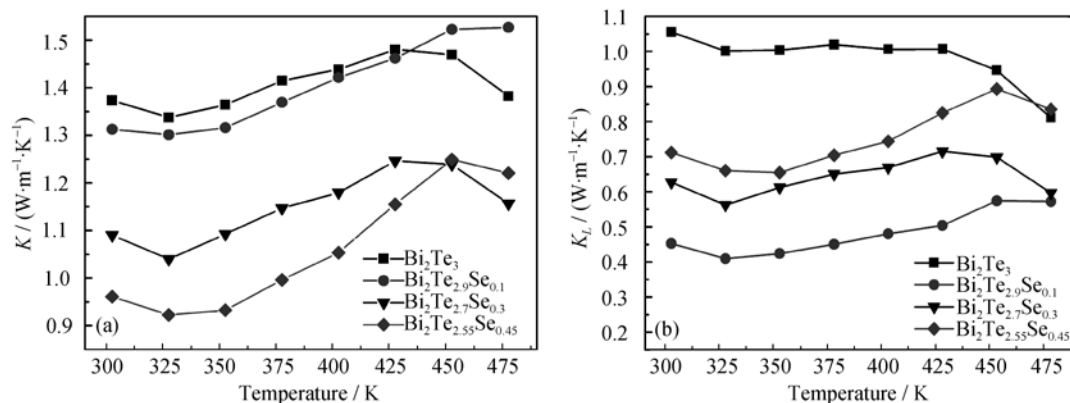


图 6 不同 Se 掺杂量的 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 块体(a)热导率和(b)晶格热导率随温度的变化关系

Fig. 6 Temperature dependence of (a) thermal conductivity and (b) lattice thermal conductivity for $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ bulk samples being doped with different Se contents

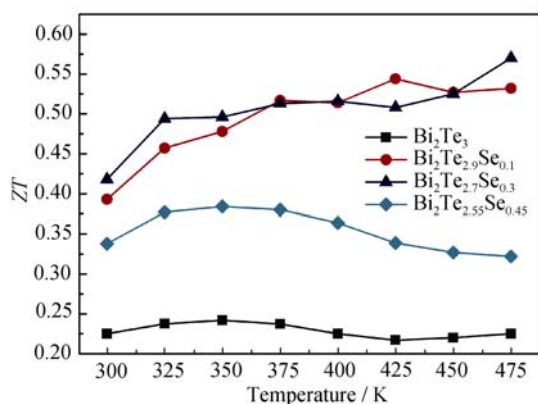


图 7 不同 Se 掺杂量的 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 块体的 ZT 值随温度的变化关系

Fig. 7 Temperature dependence of ZT for $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ bulk samples being doped with different Se contents

掺 Se 后块体的 ZT 值明显高于单相 Bi_2Te_3 样品, 随着 Se 掺杂量的增加, 样品的 ZT 值表现为先增大后减小。当掺杂量 $x=0.3$ 时, 样品具有最大的 ZT 值, 平均约为 0.51, 并在 475 K 时达到最大值 0.57。

3 结论

采用水热法合成不同 Se 掺杂量的 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 纳米粉体, 采用放电等离子烧结技术, 制备出较高致密度的块体材料。通过研究不同 Se 掺杂量对 $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 微结构及热电性能的影响, 得出以下结论:

- 1) 随着 Se 掺杂量的增大, 粉体 XRD 特征峰向高角度偏移, 并且衍射峰出现宽化, 结合 SEM 和 TEM 表明晶粒尺寸逐渐变小; 块体样品具有较高的致密度, 所有样品的相对密度均在 98.9% 以上; 断面呈现出“台阶式”的解理, 表现为脆性的穿晶断裂;
- 2) 随着 Se 掺杂量的增大, 样品的电导率先增

大后减小; Se 元素的掺杂有效地降低了块体 Bi_2Te_3 基体的热导率, 并在一定程度上提高了材料的 Seebeck 系数; 在整个测试温度区间, 所有经过 Se 掺杂的样品 ZT 值都高于未掺杂样品; 当 Se 掺杂量 x 为 0.3 时, 样品具有最大的 ZT 值, 平均约为 0.51, 并在 475 K 时具有最大值 0.57, 相比未经 Se 掺杂的 Bi_2Te_3 提高了 159%。

参考文献:

- [1] NOLAS G S, SHARP J, GOLDSMID H J. Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments. Springer: New York, 2001: 17–29.
- [2] POUDEL B, HAO Q, MA Y, *et al.* High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys. *Science*, 2008, **320**: 634–638.
- [3] HOU XIAN-HUA, HU SHE-JUN, RU QIANG, *et al.* Current status and development of Bi_2Te_3 -based thermoelectric materials. *Materials Review*, 2007, **21(7)**: 111–118.
- [4] CHEN G, DRESSELHAUS M S, FLEURIAL J P, *et al.* Recent developments in thermoelectric materials. *International Material Reviews*, 2003, **48(1)**: 45–66.
- [5] MINNICH A J, DRESSELHAUS M S, REN Z F, *et al.* Bulk nanostructured thermoelectric materials: current research and future prospects. *Energy Environ Sci*, 2009, **2**: 466–479.
- [6] SOOTSMAN J R, CHUNG D Y, KANATZIDIS M G. New and old concepts in thermoelectric materials. *Angew. Chem. Int. Ed*, 2009, **48**: 8616–8639.
- [7] XIAO Y, POUDEL B, MA Y, *et al.* Experimental studies on anisotropic thermoelectric properties and structures of n-type $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$. *Nano Letters*, 2010, **10(9)**: 3373–3378.
- [8] ZHANG Y C, WANG H, KRAEMER S, *et al.* Surfactant-free synthesis of Bi_2Te_3 -Te micro-nano heterostructure with enhanced

- thermoelectric figure of merit. *ACS Nano*, 2011, **4**: 3158–3165.
- [9] 樊希安. (Bi, Sb)₂(Te, Se)₃ 系热电材料的制备及性能优化研究. 武汉: 华中科技大学博士学位论文, 2007.
- [10] LI D, QIN X Y, LIU Y F, *et al.* Improved thermoelectric properties for solution grown Bi₂Te_{3-x}Se_x nanoplatelet composites. *RSC Adv.*, 2013, **3**: 2632–2638.
- [11] MA Y, CHEN G, REN Z F, *et al.* Enhanced thermoelectric figure-of-merit in p-Type nanostructured bismuth antimony tellurium alloys made from elemental chunks. *Nano Lett.*, 2008, **8**: 2580–2584.
- [12] CAO Y Q, ZHAO X B, ZHANG X B, *et al.* Syntheses and thermoelectric properties of Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ bulk nanocomposites with laminated nanostructure. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**: 143106–1–3.
- [13] XIE W, TANG X, TRITT T M, *et al.* High thermoelectric performance BiSbTe alloy with unique low-dimensional structure. *J. Appl. Phys.*, 2009, **105**: 113713–113718.
- [14] NI HUA-LIANG, ZHU TIE-JUN, ZHAO XIN-BING. Thermoelectric properties of hydrothermal synthesized Bi-Te-Se alloys. *Journal of Functional Materials*, 2006, **10(37)**: 1561–1563.
- [15] LV QIANG, CHENG YING, WANG JING-JU, *et al.* Preparation of Bi₂Te₃-based p-type pseudoternary thermoelectric materials by the hot-press method and their properties. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2008, **36(5)**: 683–688.
- [16] LI D, QIN X Y, DOU Y C, *et al.* Thermoelectric properties of hydrothermally synthesized Bi₂Te_{3-x}Se_x nanocrystals. *Scripta Materialia*, 2012, **67**: 161–164.
- [17] JIANG J, CHEN L D, BAI S Q, *et al.* Fabrication and thermoelectric performance of textured n-type Bi₂(Te, Se)₃ by spark plasma sintering. *Material Science Engineering B*, 2005, **117(3)**: 334–338.

勘 误

《无机材料学报》2014 年第 10 期第 1100 页图 1 错误, 现更正为下图。(李勇, 徐协文, 杨现锋, 等. Fe 高温浸渗法制备防静电 3Y-TZP 陶瓷及其性能研究. 无机材料学报, 2014, **29(10)**: 1099-1104.)

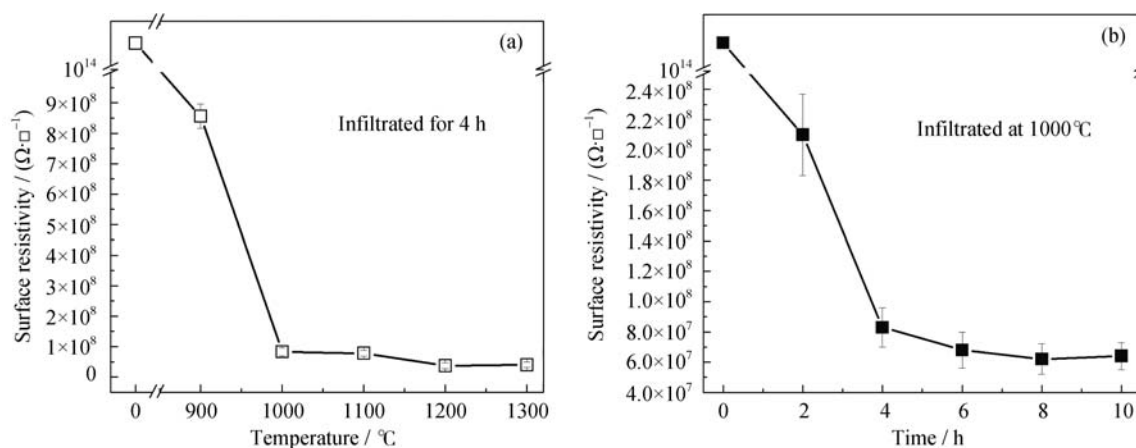


图 1 浸渗温度(a)与浸渗时间(b)对 3Y-TZP 陶瓷表面电阻率的影响

Fig. 1 Effect of infiltration temperature (a) and infiltration time (b) on surface resistivity of 3Y-TZP ceramics