

## 磁控溅射法制备 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{B}$ 多层薄膜及其热电性能研究\*

杜鑫<sup>1,2</sup>, 苗蕾<sup>1,3†</sup>, 刘呈燕<sup>1,3</sup>, 王潇漾<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 桂林电子科技大学, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 本文通过磁控溅射法制备了一种独特的 SiGe/B 五层结构薄膜材料, 每层结构包含 60 nm 的  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}$  层和 0.55 nm 的 B 层。实验考察了薄膜材料的热电性能, 结果表明: B 掺杂的溅射时间最佳为 30 s; 当退火温度为 650°C 时, 薄膜的致密性最好, 且在此温度下具有较高的 Seebeck 系数, 最大值为  $6.75 \times 10^{-4}$  V/K, 电阻率最小值为  $1.6 \times 10^{-5}$   $\Omega\cdot\text{m}$ , 其功率因子最大值为 0.026 W/(m·K<sup>2</sup>)。

**关键词:** 热电材料; 硅锗薄膜; 纳米结构; 热电性能

中图分类号: TK6

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2016.05.002

## Thermoelectric Property of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{B}$ Multilayer Thin Film Prepared by Magnetron Sputtering

DU Xin<sup>1,2</sup>, MIAO Lei<sup>1,3</sup>, LIU Cheng-yan<sup>1,3</sup>, WANG Xiao-yang<sup>1,3</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Guilin University of Electronic Technology, Guangxi Guilin 541004, China)

**Abstract:** Unique structure (SiGe/B) based multilayer film prepared by magnetron sputtering was designed with purposes of improving electrical conductivity and Seebeck coefficient, and reducing thermal conductivity. The multilayer film contains 5 periods and each of them consisted of a 60-nm-thick  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}$  layer and a 0.55-nm-thick B layer. Its thermoelectric performance was investigated and results showed that the best doping time of B was 30 s. When the annealing temperature was 650°C, the optimized film showed greatly enhanced Seebeck coefficient up to  $6.75 \times 10^{-4}$  V/K with decreased electrical resistivity of  $1.6 \times 10^{-5}$   $\Omega\cdot\text{m}$ , and the maximum power factor was 0.026 W/m·K<sup>2</sup>.

**Key words:** thermoelectric material; SiGe thin film; nanostructure; thermoelectric performance

### 0 引言

由于日益严重的环境污染和能源危机, 开发绿色、环保以及高效的新型能源利用技术越来越得到科学家的关注<sup>[1]</sup>。热电转换可以以一种环境友好的方式来利用废热<sup>[2]</sup>。热电性能通常由无量纲值  $ZT$  来反映, 其公式为:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa} \quad (1)$$

其中,  $S$ 、 $\sigma$ 、 $\kappa$  和  $T$  分别代表塞贝克 (Seebeck) 系数、电导率、热导率和绝对温度。

由于硅锗热电材料在 700 K 以上的高温区间具备优良的热电性能, 所以从二十世纪七十年代开始逐渐成为热电领域的研究热点。硅锗热电材料具有高的 Seebeck 系数和高的电导率, 所以具有较高的功率因子。但是由于其具有较高的热导率, 所以  $ZT$  值通常不高。近些年来, 随着纳米技术的发展, 硅锗热电材料在理论和性能方面都有较大的进步, 尤其是热导率获得较大降低。例如, PAUL 团队利用金属有机化学气相沉积 (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD) 和等离子体增强化学气相沉积 (plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)

\* 收稿日期: 2016-05-02 修订日期: 2016-07-27

基金项目: 国家自然科学基金 (51572049, 51562005); 广东省科技计划项目 (2013B050800006); 中国科学院 BIC 对外合作项目 (182344KYSB20130006)

† 通信作者: 苗蕾, E-mail: miaolei@guet.edu.cn

技术制备了高性能硅锗超晶格热电材料<sup>[3-5]</sup>, 其功率因子最大可以达到  $6 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}^2)$ , 热导率最小值达到  $4.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ <sup>[4]</sup>; JOSHI 团队<sup>[6]</sup>制备的 P 型 SiGe 纳米复合材料在 1 173 ~ 1 223 K 之间  $ZT$  值有一个峰值, 约为 0.95, 这比热电发生器上的样品提高了近 90%, 也比以前的最高值高了近 50%<sup>[7]</sup>, 同样方法得到的 N 型样品的  $ZT$  值在 1 173 K 时为 1.3<sup>[8]</sup>。除此之外, 其他结构的薄膜材料的热电性能研究也取得了很大的进展, 例如自组装硅锗量子点的多界面性降低热导率以及一个量子点实现多叠层结构而大幅降低热导率<sup>[9-11]</sup>。

目前来看, 通过提高功率因子、降低热导率是改善硅锗多层薄膜热电性能的有效方法。虽然 MOCVD 法和 PECVD 法都适用于制备超晶格纳米结构, 但其进一步应用受到了高成本、低产量等缺点的制约。而磁控溅射法的高性价比及可应用于大规模生产的优点使其成为制备高性能的硅锗热电薄膜的一种有效的方法。另外, B 掺杂的 SiGe 热电材料能有效减小热导率, 同时增大 Seebeck 系数并细微地减小电导率<sup>[12]</sup>。据我们所知  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  多层薄膜热电性能的相关研究很少被报道, 所以我们的研究提供了一种提高硅锗材料热电性能的有效途径。

本文采取磁控溅射法制备  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{B}$  多层薄膜, 并系统地分析 B 层厚度、退火温度等对电导率和 Seebeck 系数等热电性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料及仪器

#### 1.1.1 实验材料

本文  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{B}$  多层薄膜采用磁控溅射法制备。Si 靶 (99.99%)、Ge 靶 (99.99%) 和 B 靶 (99.99%) 均购自上海硕颂电子科技有限公司; 丙酮 (99.99%)、无水乙醇 ( $\geq 99.7\%$ ) 均购自阿拉丁试剂有限公司; 去离子水为自制。

#### 1.1.2 实验仪器

MPS-2000-HC3 型磁控溅射装置, ULVAC 公司 (日本); MILA-5000 型红外快速退火炉, ULVAC 公司 (日本); SB-5200-DTD 型超声清洗机, 宁波新芝生物有限公司; DZF-6010 型真空干燥箱, 予华仪器科技有限公司。

### 1.2 薄膜制备

先将硅片 (具有一层二氧化硅保护层) 衬底切割成  $2.2 \text{ cm} \times 2.2 \text{ cm}$ , 然后将其先后放在丙酮、无

水乙醇和去离子水中超声清洗 20 min, 并循环 3 个周期。完成清洗后, 用吹风机吹干, 并迅速放进样室。在镀膜室中, 本底真空为  $4.2 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 。将衬底推送入镀膜室启辉, 启辉后, 调节气压到实验需要值, 经过 10 min 左右的洗靶后, 打开靶材, 以  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}/\text{B}$  为一个周期开始溅射。

为了优化薄膜的膜厚, 首先制备了一个周期的薄膜, Si 靶、Ge 靶和 B 靶的溅射功率分别为 100 W、60 W 和 85 W, Si 和 Ge 共溅射的时间为 6 min, B 的溅射时间分别控制为 30 s、60 s、90 s 和 120 s, 膜层结构如图 1 所示。

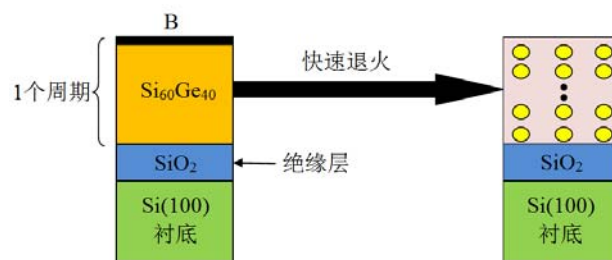


图 1 单个周期的薄膜膜层结构

Fig. 1 The film image for 1-period structure

多层薄膜包含 5 个周期  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}/\text{B}$ , Si 靶、Ge 靶和 B 靶的溅射功率分别为 100 W、60 W 和 85 W, Si 和 Ge 共溅射的时间为 6 min, B 的溅射时间控制为 30 s, 膜层结构如图 2 所示。

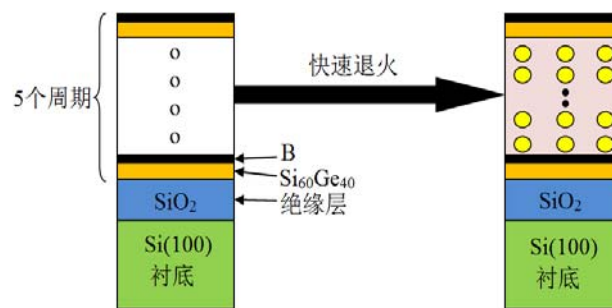


图 2 5 个周期的薄膜膜层结构

Fig. 2 The film image for 5-period structure

溅射完成后, 在 Ar 气氛中进行快速退火, 退火温度分别控制为  $600^\circ\text{C}$ 、 $650^\circ\text{C}$ 、 $700^\circ\text{C}$  和  $750^\circ\text{C}$ , 退火时间设置为 3 min。

通过 SEM 断面测量出的膜厚以及本实验中各个靶材的溅射时间, 计算出 Si 靶、Ge 靶和 B 靶的溅射率, 见表 1。

表1 Si靶、Ge靶和B靶的溅射率

Table 1 Sputtering rate of Si, Ge and B targets

Parameter	Sputtering rate / (nm/min)
Si	3.1
Ge	5.2
B	1.1

### 1.3 样品表征

X射线衍射光谱采用荷兰帕纳科 X'Pert Pro MPD型X射线衍射仪进行表征,测试采用的射线源为  $\text{CuK}\alpha$ ,其波长为  $0.154\text{ nm}$ ,测试步长为  $0.0083^\circ$ ,扫描角度为  $5^\circ \sim 80^\circ$ 。Raman光谱采用法国 HORIBA JY 仪器公司的 LabRAM-HR800 型激光共聚焦拉曼光谱仪表征,在室温下采用  $532\text{ nm}$  波长的光源。SEM 图谱采用日本 Hitachi 公司的 S-4800 型冷场发射扫描电镜表征,工作电压为  $2\text{ kV}$ ,电流为  $10\ \mu\text{A}$ 。

热电性能采用日本 ULVAC-RIKO 公司的 ZEM-3 型热电性能测试系统进行测试,测量温度为  $50^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ ,以  $50^\circ\text{C}$  的温差递增。

迁移率 ( $\mu_{\text{h}}$ ) 和载流子浓度 ( $n$ ) 采用 Lakeshore-8404 型霍尔测试系统进行测试。测试时,样品切成  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。测试电流为  $1 \sim 20\text{ mA}$ ,测试的系统误差小于  $10\%$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 B层厚度对 $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}/\text{B}$ 单层薄膜结构与性能的影响

图3是在B靶不同溅射时间下的  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}/\text{B}$  单层薄膜的 XRD 衍射图。从图中可以看到在  $27.5^\circ$  附近出现了一个强峰,对应  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}$  (111) 衍射;在  $45.5^\circ$  附近出现了  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}$  (220) 衍射,在  $54.0^\circ$  附近出现了  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}$  (311) 衍射。与纯 Si 的衍射峰相比,  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}$  的衍射峰全部向左偏移,这说明  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}$  的衍射峰发生了非对称性宽化。而在所有衍射峰中,  $27.5^\circ$  附近的峰强度最高,峰形最好,这说明  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}$  有沿 (111) 方向生长的择优生长趋势。Si 在 (111)、(220)、(311) 方向上的  $2\theta$  分别为  $28.6^\circ$ 、 $47.2^\circ$  和  $56.2^\circ$ ,而 Ge 在 (111)、(220)、(311) 方向上的  $2\theta$  分别为  $27.5^\circ$ 、 $45.8^\circ$  和  $54.1^\circ$ ,两者很接近,不容易区分,所以  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}$  的衍射峰都是 Si 和 Ge 的混合峰。另外,图中没有出现 B 的衍射峰,这说明 B 是以非晶化状态存在。

图4是在B靶不同溅射时间下的  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}/\text{B}$  单层薄膜的 Raman 图。从图中可以看到,在  $280\text{ cm}^{-1}$  处有一个强峰,对应 Ge—Ge 键;在  $394\text{ cm}^{-1}$  处有一个较弱的峰,对应 Ge—Si 键;在  $454\text{ cm}^{-1}$  处对应的是 Si—Si 键,但是峰很弱。Ge—Ge 键从块体材料的  $300\text{ cm}^{-1}$  处迁移到  $280\text{ cm}^{-1}$  处,这可能是由于 Si 进入 Ge 晶格,导致 Ge 晶格变小出现拉应力而发生红移<sup>[13]</sup>。同理,在 Ge—Si 处,出现了蓝移以及低频的非对称性宽化。

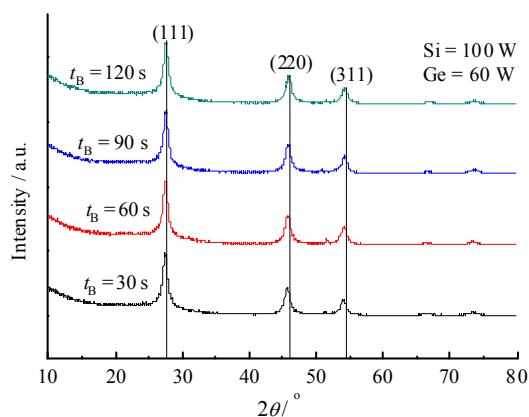
图3 B靶不同溅射时间下的  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}/\text{B}$  单层薄膜的 XRD 衍射图

Fig. 3 XRD pattern of sample with different sputtering time of B target

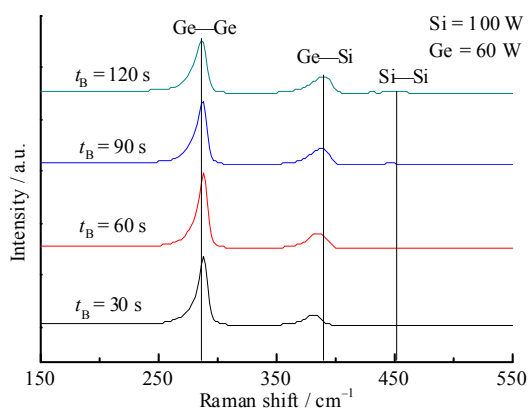
图4 B靶不同溅射时间下的  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}/\text{B}$  单层薄膜的 Raman 图

Fig. 4 Raman spectra of sample with different sputtering time of B target

图5是B靶在不同溅射时间下的  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}/\text{B}$  单层薄膜的热电性能。从图中可以看到,随着测试温度的升高,电阻率都呈现明显的下降趋势,并且在  $300^\circ\text{C}$  时达到最小值  $0.5 \times 10^{-5}\ \Omega\cdot\text{m}$ 。随着B靶溅射时间的增加,Seebeck系数呈现出先下降后上升的趋势,并且在  $t_{\text{B}} = 30\text{ s}$ 、测试温度为  $200^\circ\text{C}$  时有最大值,

为  $1.1 \times 10^{-3} \text{ V/K}$ 。功率因子在  $t_B = 90 \text{ s}$ 、测试温度为  $200^\circ\text{C}$  时达到最大值  $0.126 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}^2)$ ，但  $t_B = 30 \text{ s}$

时的最大值也有  $0.09 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}^2)$ ，两者相差不大，所以综合考虑选择 B 靶的溅射时间为  $30 \text{ s}$ 。

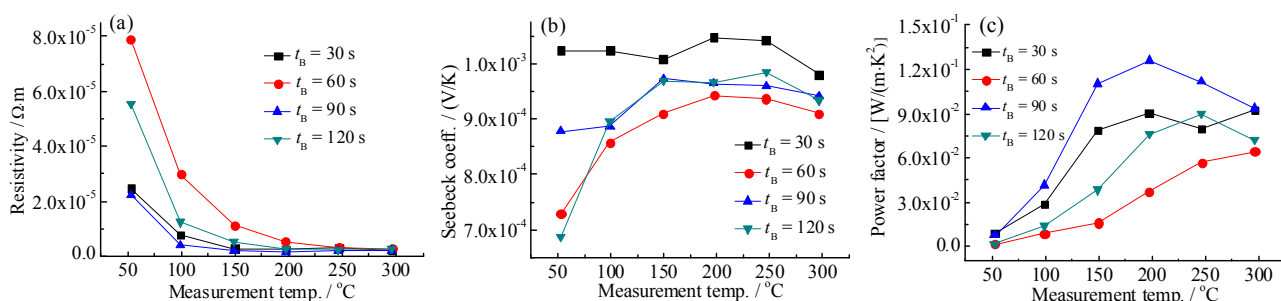


图 5 B 靶不同溅射时间下的  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}/\text{B}$  单层薄膜的电阻率 (a)、Seebeck 系数 (b) 和功率因子 (c) 趋势图

Fig. 5 The resistivity, Seebeck coefficient and power factor of samples with different sputtering time of B target

## 2.2 退火温度对 $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}/\text{B}$ 五层薄膜结构与性能的影响

图 6 是退火温度为  $650^\circ\text{C}$ 、 $700^\circ\text{C}$ 、 $750^\circ\text{C}$  下的 SEM 形貌图。从图中可以看出退火温度为  $650^\circ\text{C}$  时，粒径尺寸最均匀，样品薄膜表面的致密性最好。这个结果表明，退火温度太低时，多层膜间的结合不

够牢固，致密性较差；而退火温度太高，则增加了界面互混的概率，容易产生新的位错，从而产生新的晶格缺陷，降低了膜层的质量<sup>[14]</sup>。图 7 是退火温度为  $650^\circ\text{C}$  和  $750^\circ\text{C}$  下的 SEM 断面图。在图中可以清晰地看到  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}/\text{B}$  薄膜的结构，这说明通过磁控溅射法确实成功地制备了  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}/\text{B}$  薄膜。

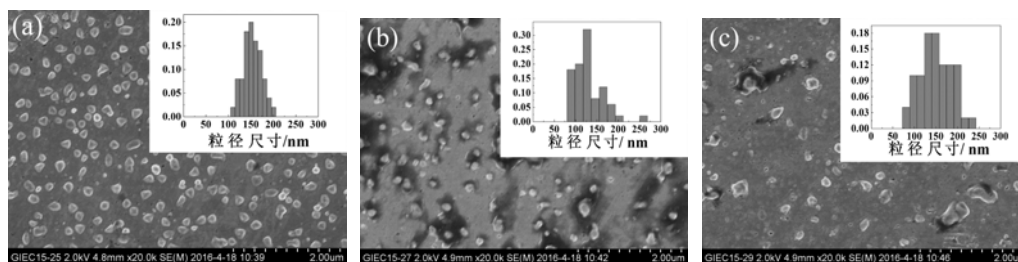


图 6 不同退火温度下样品的 SEM 形貌图: (a)  $650^\circ\text{C}$ ; (b)  $700^\circ\text{C}$ ; (c)  $750^\circ\text{C}$

Fig. 6 SEM surface views of samples with different annealing temperatures: (a)  $650^\circ\text{C}$ ; (b)  $700^\circ\text{C}$ ; (c)  $750^\circ\text{C}$

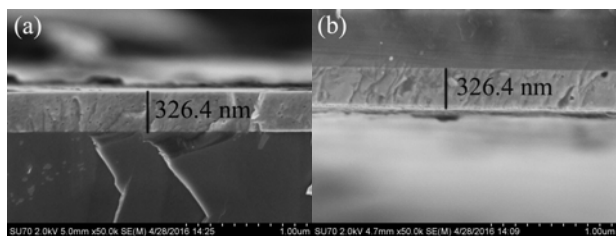


图 7 不同退火温度下样品的 SEM 断面: (a)  $650^\circ\text{C}$ ; (b)  $750^\circ\text{C}$

Fig. 7 SEM sectional views of samples with different annealing temperatures: (a)  $650^\circ\text{C}$ ; (b)  $750^\circ\text{C}$

图 8 是不同退火温度下的  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}/\text{B}$  五层薄膜的热电性能。从图中可以看到，当退火温度低于  $750^\circ\text{C}$  时，Seebeck 系数随着退火温度的升高而减小，并且在测试温度为  $50^\circ\text{C}$  时达到最大值，为  $6.75 \times 10^{-4} \text{ V/K}$ 。

另一方面，当测试温度小于  $250^\circ\text{C}$  时，电阻率呈现明显的上升趋势，最小值为  $1.05 \times 10^{-5} \Omega\cdot\text{m}$ ，

比 p-Si 的电阻率 ( $0.5 \times 10^{-2} \Omega\cdot\text{m}$ ) 小了三个数量级。这是因为在这个阶段，随着温度的升高，杂质已经全部电离，本征激发尚不显著，载流子基本上不随温度变化，晶格振动上升为主要矛盾，迁移率随温度升高而降低，所以电阻率增大。当测试温度继续上升时，本征激发很快增加，大量本征载流子的产生远远超过迁移率减小对电阻率的影响，这时，本征激发成为矛盾的主要方面，电阻率随温度的升高而急剧下降。

根据谢勒公式，计算得到  $650^\circ\text{C}$ 、 $700^\circ\text{C}$ 、 $750^\circ\text{C}$  下的晶粒尺寸分别为  $18.5 \text{ nm}$ 、 $16.7 \text{ nm}$  和  $16.7 \text{ nm}$ ，这说明薄膜的结晶性随着退火温度的升高而下降，与 Seebeck 系数等的变化规律相吻合。

与 PAUL 课题组<sup>[3]</sup>公布的超晶格数据相比较，

Seebeck 系数有明显的提高, 但是电导率略有下降, 导致了功率因子的增大,  $650^\circ\text{C}$  退火温度下的最大值

达到了  $0.026 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}^2)$ 。较好的热电性能可能是由于量子点的局域化作用造成的。

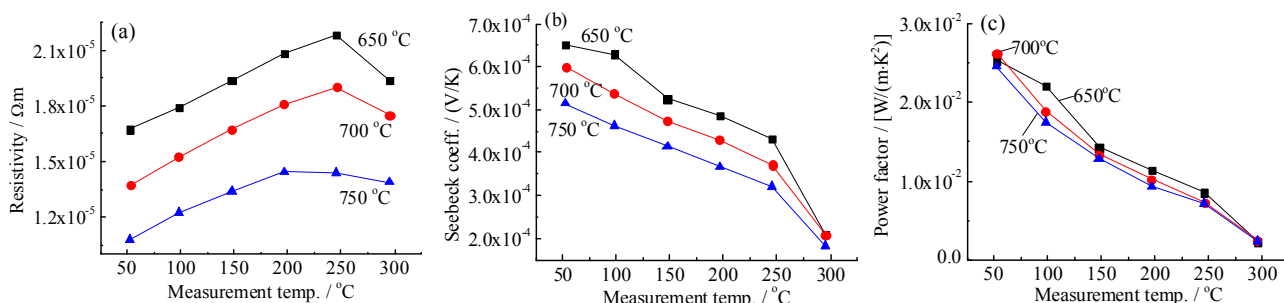


图8 不同退火温度下  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}/\text{B}$  五层薄膜的电阻率 (a)、Seebeck 系数 (b) 和功率因子 (c)

Fig. 8 The resistivity, Seebeck coefficient and power factor of samples with different annealing temperatures

表 2 所示为不同退火温度下的迁移率和载流子浓度。从表中可以看出, 随着退火温度的升高, 载流子浓度升高, 迁移率降低。这一趋势与 Seebeck 系数变化的趋势相符合。

表 2 不同退火温度下样品的迁移率 ( $\mu_{\text{H}}$ ) 和载流子浓度 ( $n$ )  
Table 2 The Hall mobility ( $\mu_{\text{H}}$ ) and the carrier concentration ( $n$ ) of samples annealed at different temperatures

$T_{\text{ani}} / ^\circ\text{C}$	$\mu_{\text{H}} / (\text{m}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$n / \text{m}^{-3}$
650	$1.25 \times 10^{-3}$	$1.18 \times 10^{26}$
700	$6.90 \times 10^{-4}$	$1.95 \times 10^{26}$
750	$2.03 \times 10^{-4}$	$5.12 \times 10^{26}$

当薄膜厚度超过 100 nm 时, 薄膜的功率因子趋于稳定, 单层膜与多层膜的数值差距不大<sup>[15-16]</sup>。但是本文中单层膜的功率因子要大于多层膜, 这可能是由于单层膜的膜厚太薄, 使得衬底对样品的热电性能产生了影响。

### 3 结 论

本文通过磁控溅射法制备了一种独特的  $\text{SiGe}/\text{B}$  五层结构, 每层结构包括 60 nm 的  $\text{Si}_{60}\text{Ge}_{40}$  层和 0.55 nm 的 B 层。实验结果表明: B 掺杂的溅射时间最佳为 30 s; 退火温度为  $650^\circ\text{C}$  时, 薄膜的致密性最好, 且在此温度下具有较高的 Seebeck 系数, 最大值达到了  $6.75 \times 10^{-4} \text{ V}/\text{K}$ , 电阻率最小值达到了  $1.6 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ , 其功率因子最大值为  $0.026 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}^2)$ 。

### 参考文献:

[1] WHEELER T, VON BRAUN J. Climate change impacts on global food security[J]. Science, 2013, 341(6145): 508-513. DOI: 10.1126/science.1239402.

[2] RIFFAT S B, MA X L. Thermoelectrics: a review of present and potential applications[J]. Applied thermal engineering, 2003, 23(8): 913-935. DOI: 10.1016/S1359-4311(03)00012-7.

[3] CECCHI S, ETZELSTORFER T, MÜLLER E, et al. Ge/SiGe superlattices for thermoelectric devices grown by low-energy plasma-enhanced chemical vapor deposition[J]. Journal of electronic materials, 2013, 42(7): 2030-2034. DOI: 10.1007/s11664-013-2511-5.

[4] LLIN L F, SAMARELLI A, CECCHI S, et al. The cross-plane thermoelectric properties of p-Ge/ $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$  superlattices[J]. Applied physics letters, 2013, 103(14): 143507. DOI: 10.1063/1.4824100.

[5] SAMARELLI A, LLIN L F, CECCHI S, et al. The thermoelectric properties of Ge/SiGe modulation doped superlattices[J]. Journal of applied physics, 2013, 113(23): 233704. DOI: 10.1063/1.4811228.

[6] JOSHI G, LEE H, LAN Y, et al. Enhanced thermoelectric figure-of-merit in nanostructured p-type silicon germanium bulk alloys[J]. Nano letters, 2008, 8(12): 4670-4674. DOI: 10.1021/nl8026795.

[7] VINING C B, LASKOW W, HANSON J O, et al. Thermoelectric properties of pressure-sintered  $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$  thermoelectric alloys[J]. Journal of applied physics, 1991, 69(8): 4333-4340. DOI: 10.1063/1.348408.

[8] WANG X W, LEE H, LAN Y C, et al. Enhanced thermoelectric figure of merit in nanostructured n-type silicon germanium bulk alloy[J]. Applied physics letters, 2008, 93(19): 193121. DOI: 10.1063/1.3027060.

[9] STOIB B, LANGMANN T, PETERMANN N, et al. Morphology, thermoelectric properties and wet-chemical doping of laser-sintered germanium nanoparticles[J]. Physics status solid (A), 2013, 210(1): 153-160. DOI: 10.1002/pssa.201228392.

[10] STOIB B, LANGMANN T, MATICH S, et al. Laser-sintered thin films of doped SiGe nanoparticles[J]. Applied physics letters, 2012, 100(23): 231907. DOI: 10.1063/1.4726041.

[11] CHANG H T, WANG C C, HSU J C, et al. High quality multifold Ge/Si/Ge composite quantum dots for thermoelectric materials[J]. Applied physics letters, 2013, 102(10): 101902. DOI: 10.1063/1.4794943.

[12] DRESSELHAUS M S, CHEN G, TANG M Y, et al. New directions for low-dimensional thermoelectric materials[J]. Advanced materials, 2007, 19(8): 1043-1053. DOI: 10.1002/adma.200600527.

- [13] NIKA D L, COCEMASOV A I, CRISMARI D V, et al. Thermal conductivity inhibition in phonon engineered core-shell cross-section modulated Si/Ge nanowires[J]. Applied physics letters, 2013, 102(21): 213109. DOI: 10.1063/1.4807389.
- [14] 王艳. 磁控溅射 SiGe 薄膜的制备工艺及性能研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2011.
- [15] MATOBA A, SASAKI K. Room temperature thermoelectric properties of epitaxially grown Si-Ge thin films on SOI substrates[J]. Materials transactions, 2010, 51(4): 767-770. DOI: 10.2320/matertrans.M2009318.
- [16] MATOBA A, WATASE H, KITAI M, et al. Investigation of thermoelectric properties of Si/Ge multilayer with ultra-heavily B doping[J]. Materials transactions, 2008, 49(8): 1723-1727. DOI: 10.2320/matertrans.E-MRA2008813.

#### 作者简介:

杜 鑫 (1991-), 男, 硕士, 主要从事 SiGe 热电薄膜的研究。

苗 蕾 (1972-), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 中国科学院“百人计划”引进国外杰出人才、兼日本精细陶瓷研究中心材料技术研究所客座研究员, 现主要从事热电转换材料和节能方面的研究与开发工作。