Co 原子浓度对 Co-Mn-Si 薄膜各向异性磁电阻及半金属性的影响

杨辅军^{①②}, 康泽威^②, 姚军^②, 李继辉^②, 肖君^{①②}, 陈晓琴^{①②*}

① 湖北大学有机化工新材料湖北省协同创新中心, 武汉 430062;

② 湖北大学物理与电子科学学院, 武汉 430062

* E-mail: chxq@hubu.edu.cn

收稿日期: 2014-07-31; 接受日期: 2014-10-17

国家自然科学基金(批准号: 11274101)和日本学术振兴会海外研究员项目(编号: P09295)资助

摘要 向原子比为 2:1:1 的 Co-Mn-Si 合金薄膜中掺杂 Co 原子, 试图发现 Co-Mn-Si 合金薄膜半金属性的变化规律. 通过制备系列不同成分 Co-Mn-Si 合金薄膜, 并测试薄膜的各向异性磁电阻比. 结果发现制备的 $\text{Co}_{50}\text{MnSi}$ 薄膜具有良好的 B2 结构, 杂质及缺陷数量少(剩余电阻比大), 各向异性磁电阻比为负值, 从而具有良好的半金属属性. 随着 Co 原子浓度的增加, Co-Mn-Si 薄膜 B2 结构取向度降低, 剩余电阻比减小, 各向异性磁电阻比增大, 其半金属属性随 Co 原子浓度的增加被逐渐破坏.

关键词

半金属

哈斯勒合金

各向异性磁电阻

1 引言

“半金属”(half-metal)材料是磁电子学领域备受关注的一类新型磁性功能材料. 根据理论计算, 在费米面处它的一个自旋方向(通常为自旋向上)电子的子能带呈现出金属性, 另一自旋方向(通常为自旋向下)电子的子能带呈现绝缘或半导体特性^[1]. 在电子的输运过程中, 这种材料的所有传导电子的自旋方向都是相同的, 即传导电子是百分之百自旋极化的, 从而能够显著增强自旋相关的各种输运性能. 因而, “半金属”材料在磁电子器件, 以及自旋注入半导体等自旋电子学领域有着广阔的应用前景. 目前, 为了揭示一种材料是否具有半金属性, 实验上通常采用制作电流垂直于膜面的巨磁电阻(CPP-GMR)^[2], 磁隧道结(MTJs)^[3], 自旋阀(non-local spin-valve)^[4]等纳米

结构的器件或者制作点接触的安德鲁反射(point contact Andreev reflection)样品^[5]. 但是, 它们的制备过程不可避免地涉及到复杂且难以控制的微纳加工手段.

各向异性磁电阻是一种常见的磁电阻效应, 其起源于在磁场方向上电子从传导的 s 态到局域的 d 态的 s - d 散射. Campbell 等人^[6]和 Malozemoff^[7]认为各向异性磁电阻归功于电子从 s 态到自旋向上的 d 态($d\uparrow$)和自旋向下的 d 态($d\downarrow$)的 s - d 散射. 然而, 他们并没有考虑到自旋向上的 s 态($s\uparrow$)和自旋向下的 s 态($s\downarrow$)会得到不同的 s - d 散射. 最近, Kokado 等人^[8]在充分考虑了自旋向上的 s 态($s\uparrow$)和自旋向下的 s 态($s\downarrow$)的基础上, 系统的研究了半金属材料的各向异性磁电阻. 各向异性磁电阻比通常定义为 $\Delta\rho/\rho = (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})/\rho_{\perp}$, 其中 $\rho_{\parallel}(\rho_{\perp})$ 分别代表当电流流向平行

引用格式: 杨辅军, 康泽威, 姚军, 等. Co 原子浓度对 Co-Mn-Si 薄膜各向异性磁电阻及半金属性的影响. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 389–395
Yang F J, Kang Z W, Yao J, et al. The influence of Co concentration on the anisotropic magnetoresistance and half-metallicity in epitaxial Co-Mn-Si Heusler films (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 389–395, doi: 10.1360/N092014-00270

(垂直)于磁场方向时测试得到的电阻率. 结果他们发现当 s - d 散射是以 $s \uparrow \rightarrow d \downarrow$ 或者 $s \downarrow \rightarrow d \uparrow$ 为主时, 各向异性磁电阻比呈正值($\rho_{||} > \rho_{\perp}$); 如果 s - d 散射是以 $s \uparrow \rightarrow d \uparrow$ 或者 $s \downarrow \rightarrow d \downarrow$ 为主时, 各向异性磁电阻比呈负值($\rho_{||} < \rho_{\perp}$). 由于半金属在费米面上只存在一个方向(自旋向上或自旋向下)的态密度, 所以半金属中的 s - d 散射为 $s \uparrow \rightarrow d \uparrow$ 或者 $s \downarrow \rightarrow d \downarrow$, 从而半金属的各向异性磁电阻比一定是负值. 这似乎为判断材料的半金属性提供了一个新的有效途径, 也掀起了测量疑似半金属材料的各向异性磁电阻的热潮^[9~12].

在前期工作中, 本研究组与 Kokado, Takanashi 等人合作, 曾经测量了 $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Si}$ 薄膜的各向异性磁电阻^[9]. 相对于其他只在低温下才表现出“半金属”特性的半金属材料, 如 CrO_2 ^[13], Fe_3O_4 ^[14], $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ ^[15]等, 完全 Heusler 合金 Co_2MnSi 具有相对较高的居里温度(985 K)^[16], 因而有可能成为在室温下有应用前景的一类新型“半金属”材料. 日本北海道大学 Ishikawa 等人^[17]通过改变 Co-Mn-Si 薄膜中 Mn 原子成分, 研究了 Co-Mn-Si/MgO/Co-Mn-Si 隧道结隧道磁电阻的变化. 德国马普研究所 Hülsen 等人^[18]通过理论计算, 得出 Co-Mn-Si 薄膜中 Mn 原子成分适度过量对 Co-Mn-Si 薄膜的半金属性影响很小的结论. 然而, 目前改变 Co-Mn-Si 薄膜中的 Co 原子成分, 探究薄膜组成成分对其各向异性磁电阻的影响还鲜有报道.

本文中制备了 Co 占不同比例的 Co-Mn-Si 薄膜, 以研究 Co 原子浓度变化对各向异性磁电阻的影响. 同时也研究了 Co 含量改变引起的 Co-Mn-Si 薄膜结构、电阻率和磁性的变化. 通过讨论各向异性磁电阻变化与 Co-Mn-Si 薄膜半金属性之间的关系, 进一步验证了 Co:Mn:Si 接近 2:1:1 的 Co_2MnSi 薄膜的半金属属性.

2 实验

本文采用超高真空磁控溅射系统($P_{\text{base}} < 1 \times 10^{-7}$ Pa)在(001)取向的 MgO 基片上沉积了厚度为 50 nm 的 Co-Mn-Si 薄膜. Co-Mn-Si 薄膜制备过程中, 通过调节 $\text{Co}_{1.75}\text{Mn}_{1.12}\text{Si}_{1.13}$ 和 Co 靶材上溅射功率, 采用共溅射的办法, 使各靶材保持恒定的总沉积速率, 从而有效地控制薄膜中 Co 原子的浓度. 然后将 Co-Mn-Si 薄膜在真空($P_{\text{base}} \sim 1 \times 10^{-7}$ Pa)中 500°C 退火 30 min^[19]. 利用

电子探针质谱分析仪(EPMA)检测了 Co-Mn-Si 薄膜中 Co, Mn, Si 原子的浓度, 如表 1 所示, 结果发现薄膜实际浓度与预期设计的原子浓度没有大的偏差.

利用 X 射线衍射仪(XRD)和振动样品磁强计(VSM)研究了薄膜的结构和磁性能. 随后将 1 cm×1 cm 薄膜样品固定在一个石英棒上, 将样品置于 TE102 微波谐振腔中微波磁场最大处, 微波场频率固定为 $f=9.7$ GHz. 通过测角器改变直流磁场与薄膜表面之间的夹角角度, 在室温下测量了薄膜的磁性阻尼常数(α). 随后, 通过光刻和 Ar 离子刻蚀系统把 Co-Mn-Si 薄膜刻蚀成条状的图形, 刻蚀过程通过二次离子质谱分析仪(SIMS)来监控. 最后, 用 Quantum Design 公司生产的物性测量系统(PPMS)在温度 10~300 K 的范围内测量了 Co-Mn-Si 薄膜电阻率及各向异性磁电阻.

3 结果与讨论

图 1(a)是不同 Co 浓度 Co-Mn-Si 薄膜 500°C 退火 30 min 后的 XRD 图谱. 从图中可以看出, 除了 MgO 衬底的衍射峰, 在所有样品中只观察到(001)取向的衍射峰, 说明薄膜实现了(001)取向上的外延生长. 而属于 Co-Mn-Si 薄膜 B2 结构的特征(002)衍射峰被明显地观察到了, 这表明所有 Co-Mn-Si 薄膜都获得了较好的 B2 结构. 据报道, 长程有序的 B2 结构取向度可以通过(002)取向的超晶格衍射峰和(004)取向的基本衍射峰的强度比来计算^[20]. 如图 1(b)所示, Co 浓度变化导致(002)/(004)强度比从 0.53 下降到 0.31. 这表明随着 Co-Mn-Si 薄膜中 Co 浓度的增加, 薄膜 B2 结构取向度逐渐下降. 此外, 随着 Co 浓度的增加, (002)和(004)衍射峰的位置向低角度发生了小的偏移. 由于 Co 原子半径比 Mn 和 Si 的原子半径大, 这些结果初步估计是由于在 Co-Mn-Si 薄膜中 Co 原子占据 Mn 和 Si 的位置形成 Co 反位造成的. 随着 Co 浓度的增加, Co-Mn-Si 薄膜的晶格参数逐渐增大, 并

表 1 文中所涉及的具体 Co-Mn-Si 薄膜列表

代表式	设计分子式	设计成分	实际成分
$\text{Co}_{50}\text{MnSi}$	Co_2MnSi	$\text{Co}_{50}\text{Mn}_{25}\text{Si}_{25}$	$\text{Co}_{50.76}\text{Mn}_{23.66}\text{Si}_{25.58}$
$\text{Co}_{52.5}\text{MnSi}$	$\text{Co}_{2.1}\text{Mn}_{0.95}\text{Si}_{0.95}$	$\text{Co}_{52.5}\text{Mn}_{28.75}\text{Si}_{28.75}$	$\text{Co}_{52.68}\text{Mn}_{21.63}\text{Si}_{25.69}$
$\text{Co}_{55}\text{MnSi}$	$\text{Co}_{2.2}\text{Mn}_{0.9}\text{Si}_{0.9}$	$\text{Co}_{55}\text{Mn}_{22.5}\text{Si}_{22.5}$	$\text{Co}_{55.02}\text{Mn}_{20.95}\text{Si}_{24.03}$
$\text{Co}_{60}\text{MnSi}$	$\text{Co}_{2.4}\text{Mn}_{0.8}\text{Si}_{0.8}$	$\text{Co}_{60}\text{Mn}_{20}\text{Si}_{20}$	$\text{Co}_{58.82}\text{Mn}_{18.93}\text{Si}_{22.25}$
$\text{Co}_{65}\text{MnSi}$	$\text{Co}_{2.6}\text{Mn}_{0.7}\text{Si}_{0.7}$	$\text{Co}_{65}\text{Mn}_{17.5}\text{Si}_{17.5}$	$\text{Co}_{62.86}\text{Mn}_{16.93}\text{Si}_{20.21}$
$\text{Co}_{70}\text{MnSi}$	$\text{Co}_{2.8}\text{Mn}_{0.6}\text{Si}_{0.6}$	$\text{Co}_{70}\text{Mn}_{15}\text{Si}_{15}$	$\text{Co}_{66.96}\text{Mn}_{14.81}\text{Si}_{18.23}$

图 1 (a) 500°C 真空退火 30 min 后 Co-Mn-Si 薄膜的 XRD 图谱; (b) Co-Mn-Si 薄膜(002)和(004)衍射峰的强度比随 Co 浓度变化关系图

且形成的 Co 反位数量也逐渐增多, 从而导致衍射峰位置发生偏移、薄膜 B2 结构取向度下降。

图 2(a)是 500°C 真空退火 30 min 后 Co-Mn-Si 薄膜的磁滞回线图; 图 2(b)是退火后 Co-Mn-Si 薄膜饱和磁化强度(M_s)和矫顽力(H_c)随着 Co 原子浓度变化的对应关系图。从图中可以看出, 随着 Co 浓度的增加, Co-Mn-Si 薄膜的饱和磁化强度(M_s)从 864 下降至 812 emu/cm³。理论计算表明^[21,22], A2 结构的存在将会降低 Co₂MnSi 薄膜的饱和磁化强度。此外, Picozzi 等人^[21]也曾经计算了 Co₂MnSi 薄膜和单个 Co 原子, 单个 Mn 原子的磁矩。他们发现, Mn 原子具有最大的磁矩, Co 原子具有较小的正磁矩。基于以上工作, 随着 Co 原子浓度的逐渐增加, 由于 Co 和 Mn 的

比例分别增加和减少, 薄膜 B2 结构取向度逐渐下降, 导致 Co-Mn-Si 薄膜饱和磁化强度逐渐减少。

此外, 随着 Co 原子浓度的逐渐增加, Co-Mn-Si 薄膜矫顽力 H_c 从 4 增加到 70 Oe。这估计是由于 Co-Mn-Si 薄膜中 Co 反位以及原子互换等结构缺陷随着 Co 原子浓度的增大而增加, 而缺陷的增加又对 Co-Mn-Si 薄膜中磁畴壁的磁化反转形成很好的钉扎作用, 进而导致矫顽力的增加。而 Co-Mn-Si 薄膜不论是饱和磁化强度还是矫顽力, 在 Co 原子浓度较高时, 变化更加明显, 这估计是由于 Co-Mn-Si 薄膜中 B2 结构的明显变化引起的(图 1(b))。插图表示外加磁场平行与垂直于膜面时, Co₅₀MnSi 薄膜面内和面外的磁滞回线图, 图中结果清楚的表明样品是

图 2 (a) 500°C 真空退火 30 min 的 Co-Mn-Si 薄膜的面内磁滞回线图, 插图表示磁场平行以及垂直于 Co₅₀MnSi 薄膜表面时的磁滞回线; (b) Co-Mn-Si 薄膜饱和磁化强度(M_s)和矫顽力(H_c)随 Co 浓度变化关系图

面内易磁化的软磁体. 该结果与图 1 的 XRD 图谱相一致, 可以推断出在(001)取向上薄膜具有磁晶各向异性, 在 500°C 真空退火 30 min 后的 Co-Mn-Si 薄膜中存在各向异性磁电阻.

图 3 表示 Co-Mn-Si 薄膜在 500°C 退火 30 min 后电阻率与实际测量温度的变化关系图. 电阻率主要由 2 个因素产生, 电子运动过程中的声子散射和缺陷散射, 而声子散射随着测量温度的降低而减少(0 K 时降为 0). 所以可以看到, 在所有的样品中, Co-Mn-Si 薄膜的电阻率都随着测量温度的降低而降低. 对于晶体结构材料而言, 剩余电阻比(RRR)受杂质以及晶体缺陷数量的影响很大. 所以剩余电阻比的数值大小能够用来粗略的判断 Co-Mn-Si 薄膜样品中的杂质以及晶体缺陷数量^[23,24]. 如图 3 中插图所示, 300 K 时的电阻除以 10 K 时的电阻得到 Co-Mn-Si 薄膜样品的剩余电阻比. 据报道, 单晶 Co_2MnSi 样品的剩余电阻比数值大约为 1.4~1.5^[23]. 而本文制备的 $\text{Co}_{50}\text{MnSi}$ 样品剩余电阻比为 1.73, 这说明本研究组制备得到了纯净的 $\text{Co}_{50}\text{MnSi}$ 样品且样品中的结构缺陷较少. 随着 Co 浓度的增加, RRR 的值从 1.73($\text{Co}_{50}\text{MnSi}$)下降至 1.39($\text{Co}_{70}\text{MnSi}$). 这意味着随着 Co 浓度的增大, Co-Mn-Si 薄膜中的缺陷(以 Co 反位和原子交换为主)逐渐增加.

图 4(a), (b), (c)为不同 Co 原子浓度 Co-Mn-Si 薄膜的各向异性磁电阻随外加磁场方向变化的关系图. 可以看到, $\text{Co}_{60}\text{MnSi}$, $\text{Co}_{65}\text{MnSi}$, $\text{Co}_{70}\text{MnSi}$ 薄膜都呈

图 3 Co-Mn-Si 薄膜在 500°C 退火后电阻率与实际测量温度的变化关系图

插图表示薄膜剩余电阻比(RRR)随薄膜 Co 浓度变化关系图

现负的各向异性磁电阻, 并且随着测量温度从 20 增加到 260 K, 三种 Co 原子浓度 Co-Mn-Si 薄膜的各向异性磁电阻数值均逐渐增大. 图 4(d)为计算得到的不同 Co 原子浓度 Co-Mn-Si 薄膜各向异性磁电阻比值随测量温度的变化关系图. 从图中可以看出, 随着 Co-Mn-Si 薄膜 Co 原子浓度的逐渐增加, 各向异性磁电阻比值逐渐增大.

Co, Mn, Si 原子比为 2:1:1 的 Co-Mn-Si 薄膜具有一个一般通式 Co_2MnSi 和 L_{21} 的晶体结构, 同时也会形成部分有序的 B2 结构(以及化学无序的 A2 结构), 这时 Mn 和 Si(或 Co, Mn 和 Si)是被随机取代的. 理论上^[21,22]和实验上^[2,25]都已经证实, 完全有序的 Co_2MnSi 薄膜是一种半金属性能优良的半金属材料, 具有宽的半金属能隙 $E_G = 0.4\sim 0.6$ eV. 经检测, 本研究组制备的 $\text{Co}_{50}\text{MnSi}$ 薄膜具有高的长程有序 B2 结构, 大的剩余电阻比值(杂质以及晶体缺陷数量少). 随着 Co 原子浓度的逐渐增大直到 $\text{Co}_{70}\text{MnSi}$ 薄膜, Co-Mn-Si 薄膜中的缺陷数量逐渐增大. Picozzi 等人^[21,22]从理论上研究了几种类型的缺陷(Co, Mn 原子互换, Si, Mn 原子互换, Mn 反位, Co 反位等)对半金属 Co_2MnSi 电子结构的影响, 发现 Mn 和 Si 原子位置互换不会改变其半金属性, 但是 Co 反位(Mn 原子位置被 Co 原子代替)会导致 Co_2MnSi 薄膜的半金属能隙减小, 自旋极化率降低. 所以本文制备的 Co-Mn-Si 薄膜的各向异性磁电阻比值随着 Co 原子浓度增加逐渐增大, 半金属性逐渐衰弱. 但是由于 $\text{Co}_{50}\text{MnSi}$ 薄膜具有宽的半金属能隙, $\text{Co}_{70}\text{MnSi}$ 薄膜仍然呈现负的各向异性磁电阻比. 这也从实验上进一步验证了完全有序的 Co, Mn, Si 原子比为 2:1:1 的 Co_2MnSi 薄膜优良的半金属属性.

4 结论

测量疑似半金属材料的各向异性磁电阻, 判断材料的半金属属性是目前国际上的一个研究热点. 本研究组制备了 Co 占不同比例的 Co-Mn-Si 薄膜, 以研究 Co 原子浓度变化对各向异性磁电阻的影响. 结果发现制备的 $\text{Co}_{50}\text{MnSi}$ 薄膜具有良好的 B2 结构, 杂质及缺陷数量少(剩余电阻比大), 呈现负的各向异性磁电阻比. 由于 $\text{Co}_{50}\text{MnSi}$ 薄膜优良的半金属属性(宽的半金属能隙), 虽然 Co-Mn-Si 薄膜中 Co 原子的增加破坏了其半金属属性, $\text{Co}_{70}\text{MnSi}$ 薄膜仍然呈现负

图 4 测量温度为 20, 180, 260 K 时, (a) $\text{Co}_{60}\text{MnSi}$ 薄膜、(b) $\text{Co}_{65}\text{MnSi}$ 薄膜、(c) $\text{Co}_{70}\text{MnSi}$ 薄膜在 500℃ 退火后各向异性磁电阻随外加磁场方向的变化关系图; (d) $\text{Co}_{50}\text{MnSi}$ 薄膜, $\text{Co}_{60}\text{MnSi}$ 薄膜, $\text{Co}_{65}\text{MnSi}$ 薄膜, $\text{Co}_{70}\text{MnSi}$ 薄膜 500℃ 退火后各向异性磁电阻比值随测量温度的变化关系图

的各向异性磁电阻比。通过讨论各向异性磁电阻变化与 Co-Mn-Si 薄膜半金属性之间的关系, 进一步验

证了 Co:Mn:Si 接近 2:1:1 的 Co_2MnSi 薄膜优良的半金属属性。

致谢 感谢(日本)东北大学金属材料研究所高梨弘毅和桜庭裕弥教授对实验的帮助。

参考文献

- 1 Groot R A D, Mueller F M, Engen P G V, et al. New class of materials: Half-metallic ferromagnets. *Phys Rev Lett*, 1983, 50: 2024–2027
- 2 Sakuraba Y, Hattori M, Oogane M, et al. Giant tunneling magnetoresistance in $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{Al-O}/\text{Co}_2\text{MnSi}$ magnetic tunnel junctions. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 192508
- 3 Yuasa S, Nagahama T, Fukushima A, et al. Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal $\text{Fe}/\text{MgO}/\text{Fe}$ magnetic tunnel junctions. *Nat Mater*, 2004, 3: 868–871
- 4 Kimura T, Otani Y. Large spin accumulation in a permalloy/silver lateral spin valve. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 196604
- 5 Soulen R J, Byers J M, Osofsky M S, et al. Measuring the spin polarization of a metal with a superconducting point contact. *Science*, 1998, 282: 85–88
- 6 Campbell I A, Fert A, Jaoul O. The spontaneous resistivity anisotropy in Ni-based alloys. *J Phys C-Solid State Phys*, 1970, 3: S95–S101
- 7 Malozemoff A P. Anisotropic magnetoresistance of amorphous and concentrated polycrystalline iron alloys. *Phys Rev B*, 1985, 32: 6080–6083

- 8 Kokado S, Tsunoda M, Harigaya K, et al. Anisotropic magnetoresistance effects in Fe, Co, Ni, Fe₄N and half-metallic ferromagnet: Systematic analysis. J Phys Soc Jpn, 2012, 81: 024705
- 9 Yang F J, Sakuraba Y, Kokado S, et al. Anisotropic magnetoresistance in Co₂(Fe, Mn)Si Heusler epitaxial films: A fingerprint of half-metallicity. Phys Rev B, 2012, 86: 020409(R)
- 10 Kubota T, Tsunegi S, Oogane M, et al. Half-metallicity and Gilbert damping constant in Co₂Fe_xMn_{1-x}Si Heusler alloys depending on the film composition. Appl Phys Lett, 2009, 94: 122504
- 11 Sakuraba Y, Kokado S, Hirayama Y, et al. Quantitative analysis of anisotropic magnetoresistance in Co₂MnZ and Co₂FeZ epitaxial thin films: A facile way to investigate spin-polarization in half-metallic Heusler compounds. Appl Phys Lett, 2014, 104: 172407
- 12 Tsunoda M, Takahashi H, Kokado S, et al. Anomalous anisotropic magnetoresistance in pseudo-single-crystal γ -Fe₄N films. Appl Phys Exp, 2010, 3: 113003
- 13 Chioncel L, Allmaier H, Arrigoni E, et al. Half-metallic ferromagnetism and spin polarization in CrO₂. Phys Rev B, 2007, 75: 140406(R)
- 14 Favre-Nicolin E, Ranno L. Anisotropic magnetoresistance in manganite films. J Magn Magn Mater, 2004, 1814: 272–276
- 15 Ziese M. Spontaneous resistivity anisotropy and band structure of La_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃ and Fe₃O₄ films. Phys Rev B, 2000, 62: 1044–1050
- 16 Sakuraba Y, Izumi K, Iwase T, et al. Mechanism of large magnetoresistance in Co₂MnSi/Ag/Co₂MnSi devices with current perpendicular to the plane. Phys Rev B, 2010, 82: 094444
- 17 Ishikawa T, Liu H X, Taira T, et al. Influence of film composition in Co₂MnSi electrodes on tunnel magnetoresistance characteristics of Co₂MnSi/MgO/Co₂MnSi magnetic tunnel junctions. Appl Phys Lett, 2009, 95: 232512
- 18 Hülßen B, Scheffler M, Kratzer P. Thermodynamics of the Heusler alloy Co_{2-x}Mn_{1+x}Si: A combined density functional theory and cluster expansion study. Phys Rev B, 2009, 79: 094407
- 19 Yang F J, Chen X Q. The microstructure, electronic and magnetic characterization of highly ordered Co₂MnSi thin films deposited on MgO substrate. Appl Phys Lett, 2013, 102: 252407
- 20 Takamura Y, Nakane R, Sugahara S. Analysis of L₂₁-ordering in full-Heusler Co₂FeSi alloy thin films formed by rapid thermal annealing. J Appl Phys, 2009, 105: 07B109
- 21 Picozzi S, Continenza A, Freeman A J. Co₂MnX (X=Si, Ge, Sn) Heusler compounds: *ab initio* study of their structural, electronic, and magnetic properties at zero and elevated pressure. Phys Rev B, 2002, 66: 094421
- 22 Picozzi S, Continenza A, Freeman A J. Role of structural defects on the half-metallic character of Co₂MnGe and Co₂MnSi Heusler alloys. Phys Rev B, 2004, 69: 094423
- 23 Raphael M P, Ravel B, Huang Q, et al. Presence of antisite disorder and its characterization in the predicted half-metal Co₂MnSi. Phys Rev B, 2002, 66: 104429
- 24 Schneider H, Jakob G, Kallmayer M, et al. Epitaxial film growth and magnetic properties of Co₂FeSi. Phys Rev B, 2006, 74: 174426
- 25 Sakuraba Y, Nakata J, Oogane M, et al. Huge spin-polarization of L₂₁-ordered Co₂MnSi epitaxial Heusler alloy film. J Phys Soc Jpn, 2005, 44: L1100–L1102

The influence of Co concentration on the anisotropic magnetoresistance and half-metallicity in epitaxial Co-Mn-Si Heusler films

YANG FuJun^{1,2}, KANG ZeWei², YAO Jun², LI JiHui², XIAO Jun^{1,2} & CHEN XiaoQin^{1,2}

¹ Hubei Collaborative Innovation Center for Advanced Organic Chemical Materials, Hubei University, Wuhan 430062, China;

² Faculty of Physics and Electronic Science, Hubei University, Wuhan 430062, China

Systematic Co-Mn-Si films have been prepared by changing the Co atomic concentration. Co₅₀MnSi films were found to be good B2 ordering, the small amount of impurities and defects (large RRR value) and negative anisotropic magnetoresistance. With increasing Co concentration, the B2 ordering and RRR value decrease and anisotropic magnetoresistance increases in Co-Mn-Si films. Due to the good half-metallicity of Co₅₀MnSi films (it is reported that $E_G = 0.4\text{--}0.6$ eV), Co₇₀MnSi films still show negative anisotropic magnetoresistance ratio although the increasing of Co concentration will deteriorate the half-metallicity of Co-Mn-Si films.

half-metallicity, Heusler alloy, anisotropic magnetoresistance

doi: 10.1360/N092014-00270