

FeCrZr 非晶合金带的铁磁共振研究

何正明^{1),3)} 卢国荣²⁾ 张道元²⁾ 徐云华³⁾ 金建辉²⁾

1)上海工业大学基础部, 上海 200072

2)中国科学技术大学物理系, 合肥 230026

3)中国科学技术大学结构分析开放研究实验室, 合肥 230026

1992年4月9日收到

研究了 Fe Cr Zr 非晶合金带的铁磁共振(FMR)谱及谱线随 Cr 含量的变化, 以及谱线随温度的变化, 并与 Fe Cr B 系的铁磁共振谱比较, 发现用 Zr 替代 B 的结果, 使非晶带的 FMR 谱中各共振峰的位置和强度发生了明显的变化, 结合 Mössbauer 谱结果, 分析了 Zr 对 Fe 基非晶磁组织的影响.

PACC: 7550K; 7650

一、引言

非晶态 Fe-Zr 合金系中出现的低温下类自旋玻璃现象, 反常的电阻率温度关系和居里温度以下的因瓦特性等等已有不少研究^[1,2]. 这与 Fe Cr B 系非晶材料有相似的结果. 对于 Fe Cr B 系合金中这些现象被认为是与铁磁非晶合金中因结构涨落而引起的结构和磁不均匀性有关^[3,4]. 那么在 Fe Cr Zr 合金中 Zr 究竟起什么作用? 对材料磁结构有何影响? 这是一个很有趣的问题. 本文研究了 $Fe_{90-x}Cr_xZr_{10}$ 系非晶合金带的 FMR 谱, 讨论了谱线随 Cr 含量 x 的变化关系及谱线随温度的变化. 其温度范围从 100—430 K. 用“独立晶粒近似”分析了样品的各共振峰位, 并将 $Fe_{70}Cr_{20}Zr_{10}$ 与 $Fe_{60}Cr_{20}B_{20}$ 两非晶合金带的 FMR 谱进行了对比, 在 Cr 含量相同的情况下, 讨论了 Zr 对磁结构的影响.

二、实验方法

非晶合金带 FeCrZr 和 FeCrB 两系列样品由中国科学院物理研究所用真空急冷快淬法, 在氩气氛中制备, 薄带厚度为 20—30 μm , 宽度为 1—2 mm, 用 X 射线检验其非晶性, 用联邦德国 ER-200 D-SPC 型 ESR 谱仪测定了样品的 FMR 谱及谱线随 Cr 含量 x 的变化和随温度的变化, 温度范围为 100—430 K. 微波频率室温谱为 $f=9.80$ G Hz, 变温谱为 $f=9.50$ G Hz, 信号增益如图中所标出. 用 Mössbauer 谱仪测定两样品无反冲分数之比.

三、实验结果与分析

1. 与 FeCrB 系样品的 FMR 谱对比, FeCrZr 系样品 FMR 谱中峰位的变化和磁矩取向

图1表示 $\text{Fe}_{60}\text{Cr}_{20}\text{B}_{20}$ 和 $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ 两样品室温下的铁磁共振谱。选择这两个样品的原因是因为它们具有相同的 Cr 含量。Cr 元素对 Fe 的替代使材料的比饱和磁矩下降, 居里温度下降。这是因为以 Cr 为主原子团的增加, 其磁矩与 Fe 原子磁矩的反铁磁耦合的结果^[3]。当 Cr 含量相同的情况下, 用 Zr 替代 B 的结果, 较容易讨论 Zr 在材料中的影响。用“独立晶粒近似”^[5]去解释每一个峰位。Fe Cr B 谱中的2峰和 Fe Cr Zr 谱中的2峰均表示以 Cr 为主原子团磁矩的磁共振峰, 共振峰位分别在 1400 和 1800 Oe。这种区别是因为组成样品成分的不同而引起。正如图3所示在 $\text{Fe}_{90-x}\text{Cr}_x\text{Zr}_{10}$ 样品中, 当 $x=2$ 到 $x=16$ 共振场从 1000 Oe 变到 1400 Oe 一样, Zr 对 B 的替代使以 Cr 为主原子团磁矩的共振峰位向高场方向移动。Fe Cr B 谱中的1峰和 Fe Cr Zr 谱中的3峰为 Fe 原子团磁矩的磁共振峰, 共振场分别为 1000 和 3000 Oe 左右, 这就是说由于 Zr 对 B 的替代使 Fe 原子团磁矩的共振场从 1000 Oe 变到 3000 Oe 左右。由磁化强度的运动方程

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{H}_{\text{eff}}, \quad (1)$$

可得到样品磁化强度 M 的自由进动圆频率的解为

$$\omega_r = \gamma \{ [H_e + (N_x - N_z)M_s][H_e + (N_y - N_z)M_s] \}^{1/2}, \quad (2)$$

其中 γ 为旋磁比, H_e 为外加直流磁场, N_x, N_y, N_z 为退磁因子。当 H_e 平行于样品平面, 且 H_e 平行于 z 轴时, 考虑到薄片的形状退磁因子和单轴各向异性等效场所对应的等效退磁因子, 经推导则(2)式可写成下式^[6]:

$$\omega_r = \gamma \left\{ \left[H_e + \frac{2K_u}{\mu_0 M_s} \right] \left[H_e + M_s + \frac{2K_u}{\mu_0 M_s} \right] \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

其中 K_u 为感生各向异性常数。考虑到 3d 过渡金属的轨道矩完全冻结的情况有因子 $g=2$ 。在已知微波频率和共振场的情况下, 易计算出 K_u 的大小。从(3)式可看出, 共振场越小则 K_u 的影响越大。因此可从图1中看出, Fe Cr Zr 的共振场约为 3000 Oe, 此材料的 K_u 趋于零, 而 Fe Cr B 样品相对 Fe Cr Zr 有较大的 K_u 值。即使在 $T > T_c$ 的情况下共振场仍在 1000 Oe 附近, 这说明 Fe Cr B 系样品即使在居里温度以上仍具有很强的诱导磁矩。我们认为这可能是 Fe Cr B 系样品中, 在 $T=T_c$, 或 T 稍大于 T_c 时, 铁原子团在外场的作用下重新取向的结果, 它如磁偶极子在外场下重新取向的情况一样。由于这时样品的 M_s 趋于零, 因此形状各向异性对共振峰位的影响很大。当用 Zr 替代 B 的结果, 改变了上述特

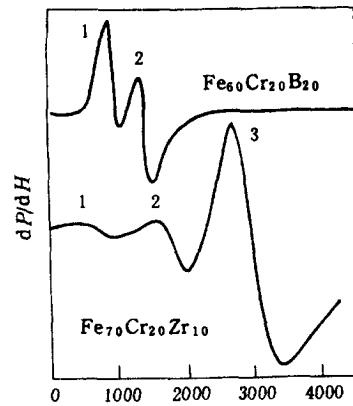


图1 $\text{Fe}_{60}\text{Cr}_{20}\text{B}_{20}$ 和 $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ 两非晶带在室温下的 FMR 谱

性,即使在强的外场下,在低温下或减少Cr的含量,样品的共振峰位变化不大。Fe原子团磁矩难于在外场方向取向。为了进一步验证这一结果,测定了 $\text{Fe}_{60}\text{Cr}_{20}\text{B}_{20}$ 和 $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ 两样品的室温下透射的Mössbauer谱,为了比较无反冲分数,两个样品加工成相同厚度,且测谱的几何条件也完全相同。图2为两样品室温下的Mössbauer谱,呈顺磁峰,这与样品的 T_c 小于室温一致。从谱形可见样品a磁矩的弥散程度大于样品b的。虽然样品a中含Fe量大于样品b中的含Fe量,但样品a与样品b的无反冲分数之比为0.2:1.0。这进一步说明了Zr的掺入有类似掺入稀土元素的作用使Fe原子团磁矩成散反铁磁性的效果一样。这从另一角度证实了Zr的作用大大削弱了Fe-Fe原子对的交换作用,也影响了Fe-Fe次近邻的间接交换作用与文献[4]的结果一致。

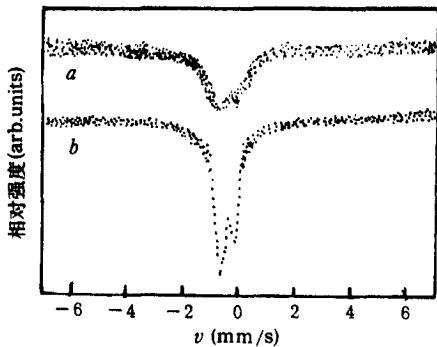


图2 两Fe基非晶带的Mössbauer谱
a为 $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$;样品b为 $\text{Fe}_{60}\text{Cr}_{20}\text{B}_{20}$

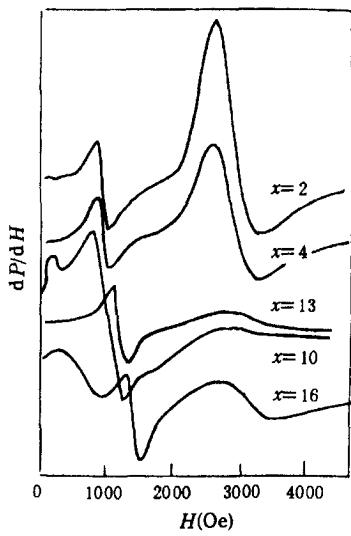


图3 $\text{Fe}_{90-x}\text{Cr}_x\text{Zr}_{10}$ 非晶带在室温下的FMR谱。 $x=2, 4, 10, 13, 16$

2. $\text{Fe}_{90-x}\text{Cr}_x\text{Zr}_{10}$ 共振峰强度随Cr含量x的反常变化

图3表示 Fe-Cr-Zr 非晶合金带的FMR谱随Cr含量x的变化情况。发现当x增加时开始Cr峰强度增加,而Fe峰强度明显下降,这被认为是Fe-Cr原子团磁矩反铁磁耦合,使长程关联作用减弱所致。当Cr含量 $x=10$ 时,反向磁矩达到最大值,同时发现在 $H_e=200$ Oe左右出现了明显的低场峰,再继续增大Cr的含量,即 $x>10$ 时Cr峰的强度反常减小,这时低场峰迭加成馒头峰。这结果与 Fe-Cr-B 系样品完全不同。这是由于Zr的掺入而引起。 $x=10$ 时反向磁矩所引起的极大峰值可以认为是在原来 Fe-Zr 合金中富铁区的Fe-Zr反铁磁耦合集团受到Cr的破坏而重新组成新的耦合集团。如Fe-Fe原子团,Fe-Zr原子团,Fe-Cr原子团,特别是Zr-Cr原子团。而 $x=10$ 正好是Cr的含量与Zr的含量完全相等的配比情况,故造成了反向磁矩的峰值。总之,在 Fe-Cr-Zr 非晶合金中Cr和Zr的含量直接影响到各类磁矩的耦合方式,对材料的磁性影响较大。

3. Fe-Cr-Zr 和 Fe-Cr-B 两样品的FMR谱随温度的变化关系

图4,图5分别表示 Fe-Cr-B 和 Fe-Cr-Zr 两样品的高温谱,其温度范围从287—430 K。

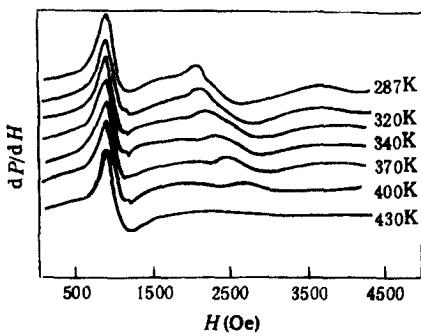


图4 Fe Cr B 非晶带在高温下(278—430 K)的FMR 谱

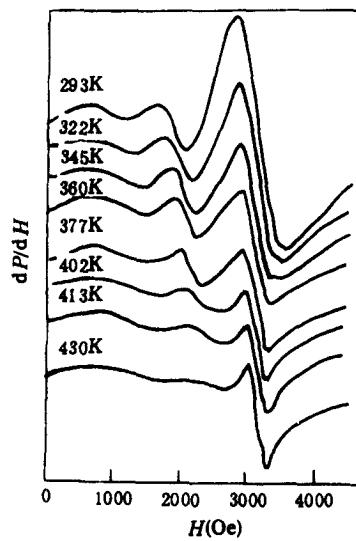


图5 Fe Cr Zr 非晶带在高温下(293—430 K)的FMR 谱

从图中可以看出 Fe Cr Zr 样品中以 Cr 为主要元素的原子团的共振峰随温度的升高而下降,并向高场方向移动,在奈耳温度在 $T=475\text{K}$ 以后消失。这与 Fe Cr B 谱中 Cr 峰的行为一致。但 Fe 峰的变化则不同,在 Fe Cr B 谱中,Fe 峰强度变化不大,且线宽随温度增加^[5],而在 Fe Cr Zr 谱中 Fe 峰开始明显下降,从 $T=402\text{ K}$ 以后有升高的趋势,线宽明显下降。图6表示 Fe Cr Zr 的 FMR 低温谱,温度范围从 100—290K。从谱中可见当温度升高时以 Cr 为主的原子团峰强度反常增大。这与高温段 Cr 峰随 T 增加单调下降形成明显对比。上述这些反常表明,材料中各类原子团磁矩耦合状态随温度变化的结果。在某一温度下部分地重新组合而引起。因此 Zr 的掺入增加了样品中自旋局部涨落现象。

至于出现的低场峰,也是与 Zr 有关。这在 Fe Cr B 系样品的 FMR 谱中没有被发现。低场峰产生的原因还有待进一步分析研究。

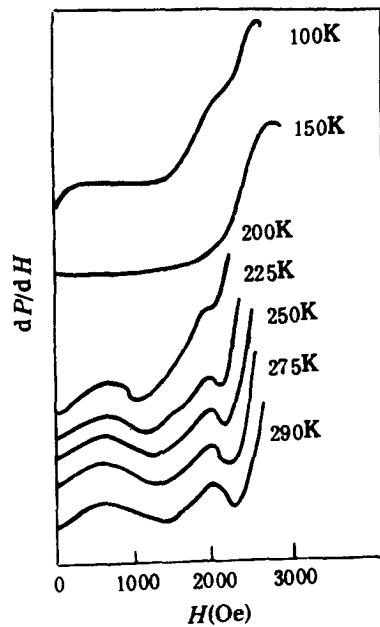


图6 Fe Cr Zr 非晶带在低温下(100—290 K)的FMR 谱

四、结 论

从 Fe Cr Zr 和 Fe Cr B 两系列非晶合金样品的 FMR 谱与 Mössbauer 谱的对比, 得到在 Fe Cr Zr 非晶合金中 Zr 的作用大大减弱了 Fe-Fe 的交换作用, 使 Fe 原子团磁矩呈弥散分布, 无强场下诱导磁矩, 且 Zr 对 B 的替代, 增加了自旋局部涨落现象。在 Fe Cr Zr 系非晶合金中当 Cr 含量与 Zr 含量相等 $x=10$ 时, 反向磁矩出现峰值说明 Cr 和 Zr 的含量对原子磁矩的耦合形式起了重要作用, 从而改变了材料的磁性。

对中国科学院物理研究所沈保根等同志提供样品及对我们的支持表示最衷心的感谢。

- [1] Shen Bao-gen, Xu Rufeng, Zhao Jian-gao and Zhan Wen-shen, *Phys Rev.*, **B43**(1991), 11005.
- [2] 沈保根、詹文山、赵见高, 物理学报, **35**(1986), 841.
- [3] 詹文山、沈保根、郭慧群, 低温物理学报, **5**(1983), 91.
- [4] 詹文山、沈保根、赵见高、郭慧群, 低温物理学报, **7**(1985), 41.
- [5] 何正明、梁任又、侯碧辉、徐云华、卢国荣、罗有泉, 物理学报, **40**(1991), 137.
- [6] 何正明、徐舫、罗有泉、卢国荣, 金属学报, **27**(1991), B91.

FERROMAGNETIC RESONANCE STUDY IN FeCrZr AMORPHOUS ALLOYS

HE ZHENG-MING^{1,3)} LU GUO-RONG²⁾, ZHANG DAO-YUAN²⁾,
XU YUN-HUA³⁾, JIN JIAN-HUI²⁾

1) *Physics Teaching and Research Office, Shanghai University of Technology, Shanghai 200072*

2) *Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*

3) *Laboratory of Structure Analysis, University of Science and Technology of China, Hefei 230026.*

(Received 9 April 1992)

ABSTRACT

The ferromagnetic resonance spectra of FeCrZr amorphous alloys have been studied, and compared with that of FeCrB. It is found that there is a greater change in the resonance spectra of Fe-base amorphous alloys when the material is doped with Zr instead of B. The experimental results are analysed.

PACCS: 7550K;7650