

非晶态 $\text{Fe}_{86}\text{M}_4\text{Zr}_{10}$ 合金的磁性和电性*

李 志 强

陈 金 昌

中国科学院物理研究所, 北京, 100080 北京师范学院物理系, 北京, 100037

赵 见 高 沈 保 根

中国科学院物理研究所, 北京, 100080

李 德 修

云南大学物理系, 昆明, 650091

1988 年 12 月 24 日收到

本文研究了非晶态 $\text{Fe}_{86}\text{M}_4\text{Zr}_{10}$ ($\text{M} = \text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}, \text{B}, \text{Si}$) 合金的基本磁性和低温电性, 讨论了不同元素 M 的掺杂对 FeZr 合金居里温度和磁矩的影响, 并用相干交换散射模型解释了样品在居里温度附近出现的电阻率极小。

PACC: 7215C; 7530C

一、引 言

非晶态 FeZr 合金系列的电性、磁性已经得到了广泛的研究, 特别使人感兴趣的是该合金中出现的类自旋玻璃现象^[1]、因瓦特性^[2]和异常的电阻率温度关系^[3]等。用不同的过渡族或类金属元素掺杂到 FeZr 合金中, 研究它们对 FeZr 合金各方面性能的改变, 是一个很有意义的工作^[3]。从前人的研究中知道^[4], 在非晶态 $\text{Fe}_{90-x}\text{Zr}_x$ 合金中, 当 Zr 含量在 15at% 时, 居里温度和平均原子磁矩出现了一个峰值, 并在此发生弱铁磁性与强铁磁性的转变。本文用 4at% 的 M 元素加入到 $\text{Fe}_{90}\text{Zr}_{10}$ 合金中取代 Fe, 研究 M 元素(其中有铁磁性元素, 反铁磁性元素, 也有类金属元素)对其磁性和电性的影响。

二、实 验

非晶态 $\text{Fe}_{86}\text{M}_4\text{Zr}_{10}$ ($\text{M} = \text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}, \text{B}, \text{Si}$) 合金是用真空单辊急冷装置在氩气氛中制备的, 薄带厚度为 20—30 μm , 宽为 1—2mm, 用 X 射线衍射检验了样品的非晶状态。

利用 FC-1 型提拉样品磁强计测量了 1.5K 下各样品的磁化曲线和温度从 1.5 到

* 国家自然科学基金和中国科学院磁学开放研究实验室基金资助的课题。

300K 范围内 $H = 450\text{e}$ 的磁化强度 M 与温度 T 的曲线。测量过程用 HP-85 型微机自动控制。磁矩的测量精度为 $3 \times 10^{-4}\text{emu}$ ，温度用碳电阻测量，控温精度为 $\pm 0.1\text{K}$ 。

样品的居里温度由 $M-T$ 曲线得到的。

电阻的测量采用了四端引线法，测量的温度范围为 $4.2-350\text{K}$ ，用金铁-镍铬电偶测温，升温速率约为 1K/min 。整个实验过程都由 Apple-II 型微机自动控制并负责采数和电流倒向，最后结果可用微机存入磁盘供打印机输出。直流电压表的分辨率为 $0.1\mu\text{V}$ 。

三、实验结果

图 1 是 1.5K 下的磁化曲线。我们用 $H = 60\text{kOe}$ 时样品的饱和磁化强度 $\sigma_s(1.5)$ 近似代替 0K 时的自发磁化强度 $\sigma_s(0)$ ，计算出合金的平均原子磁矩，见图 2。含 B 样品的数据取自文献[8]。

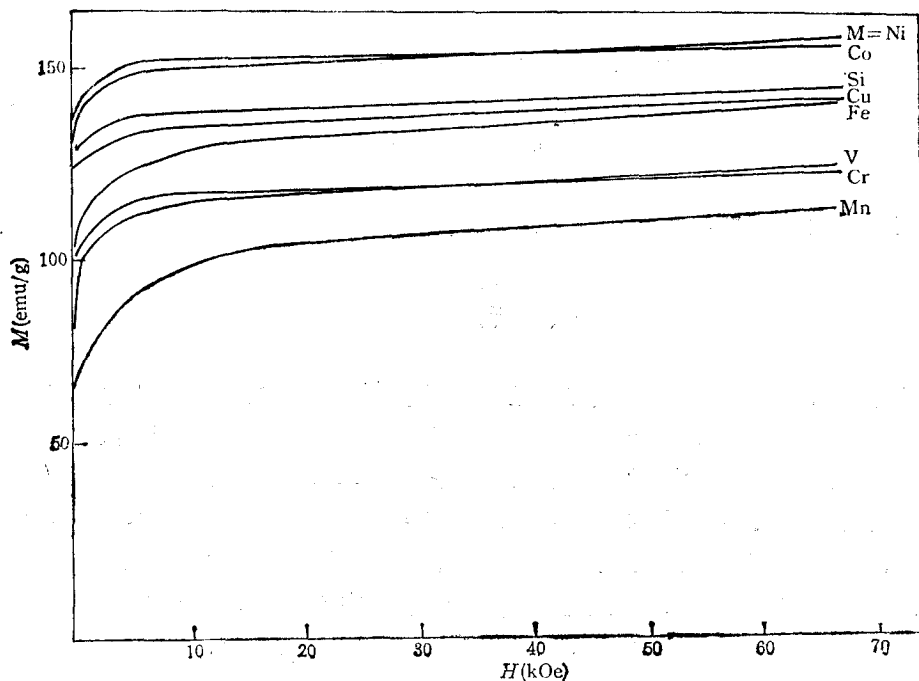


图 1 非晶态 $\text{Fe}_{96}\text{M}_4\text{Zr}_{10}$ 合金的磁化曲线

另外，我们在弱场下的 $M-T$ 曲线上，观察到了 $\text{Fe}_{90}\text{Zr}_{10}$ ， $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_4\text{Zr}_{10}$ 两合金的类自旋玻璃现象(见图 3)。高温端的下降是对应样品的居里温度，低温端的下降是自旋冻结的结果。

由图 2 可见，添加周期表中 Fe 右边的元素使平均磁矩和居里温度明显增加，添加 Fe 左边的元素使平均磁矩下降，但当 $M = \text{V}, \text{Cr}$ 时居里温度上升， $M = \text{Mn}$ 时居里温度下降。

图 4 是非晶态 $\text{Fe}_{96}\text{M}_4\text{Zr}_{10}$ 合金的低温电阻测量结果。实验结果表明，全部样品都明

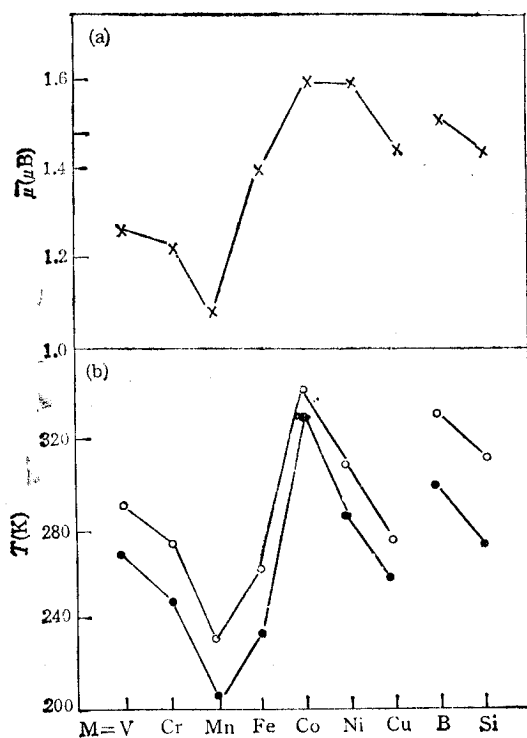


图 2

(a) 是原子磁矩; (b) 是电阻率极小值温度和居里温度。
○ 表示 $T_{\min}$; ● 表示 T_C 。

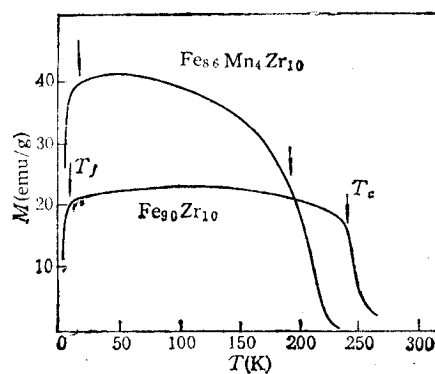
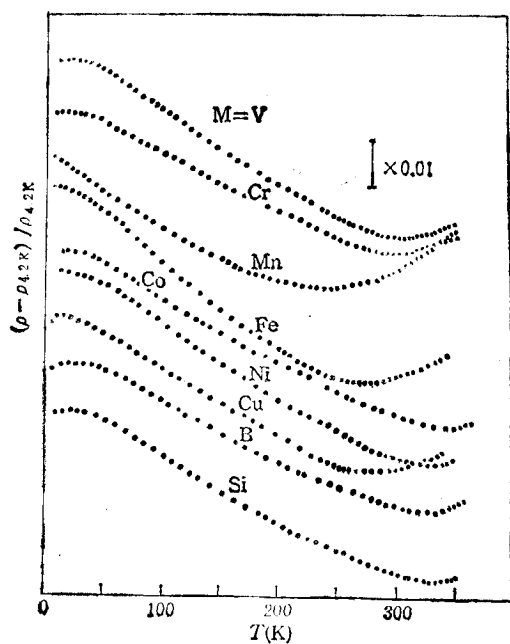
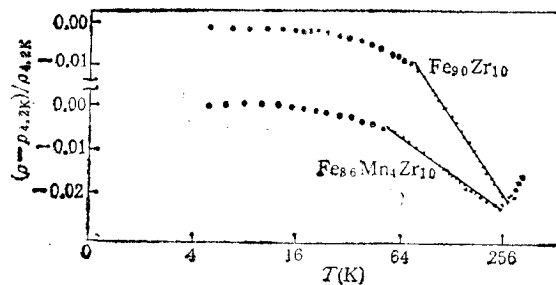


图 3 类自旋玻璃现象

图 4 $\text{Fe}_{86}\text{M}_4\text{Zr}_{10}$ 的低温电阻图 5 电阻率与 $-\ln T$ 关系

显地出现了电阻率与温度关系的极小值,并且这个极小值温度 $T_{\min}$ 随不同 M 的掺杂变化很大,但总是出现在居里温度的附近,见图 2.

经计算机拟合后发现,在 $T < T_{\min}$ 的一段温区内,电阻率与温度呈对数变化

$$\rho \propto -\ln T. \quad (2)$$

图 5 给出了两个示例.

四、讨 论

1. 磁矩

在讨论非晶态 $\text{Fe}_{96}\text{M}_4\text{Zr}_{10}$ 合金的磁性时,主要应考虑如下两种因素:一是元素 M 同 FeZr 合金中 Fe 原子自旋的耦合情况;二是 FeZr 合金中富铁区的反铁磁耦合集团^[4],以及不同元素 M 对这种集团的影响.

V , Cr , Mn 是反铁磁性的元素^[9],在非晶态 Fe 基合金中磁矩有很强的局域性,并同 Fe 原子自旋形成反铁磁耦合,所以,它们取代 Fe 之后会使 FeZr 合金的平均原子磁矩降低,这同 FeB 合金的情况十分相似^[9].

由图 3 得知,当 $M = \text{Mn}$ 时, $\text{Fe}_{96}\text{Mn}_4\text{Zr}_{10}$ 合金出现了明显的类自旋玻璃现象,而 V , Cr 等其他元素的掺杂在本实验的条件下都未出现这种现象,这表明 Mn 元素取代 Fe 之后,增加了 FeZr 合金中反铁磁自旋集团的比例,所以当 $M = \text{Mn}$ 时,合金的 $\bar{\mu}$ 值最小.而 V , Cr 等元素可能对 FeZr 合金中的反铁磁原子团破坏较大,故它们取代 Fe 后,合金的 $\bar{\mu}$ 值较大.

Co , Ni 是铁磁性元素.它们能同 Fe 原子自旋形成平行耦合,同时又对 FeZr 合金中的反铁磁性原子团有较大破坏.它们取代 Fe 后,合金的平均原子磁矩明显增加是可以理解的.

Cu , B , Si 是非磁性元素,取代 Fe 后,减少了合金中反铁磁耦合原子团的比例,所以 $\bar{\mu}$ 值上升.

2. 居里温度

居里温度 T_c 是反映铁磁材料中磁有序相互作用强弱的重要参数,考虑到非晶态局域结构涨落的特点后, T_c 可由下式表达:

$$T_c = \frac{2s(s+1)}{3k_B} \sum_{ij} J(r_{ij}). \quad (3)$$

式中 s 是自旋数, k_B 为玻耳兹曼常数, $J(r_{ij})$ 是交换积分.由(3)式可知,决定 T_c 的因素主要有两种:一是交换相互作用;二是原子近邻配位情况.

当 $M = \text{V}$, Cr , Mn 时, $J_{\text{Fe-M}} < 0$, 同时这些元素的原子半径比 Fe 大,它们取代 Fe 后,使得 $J_{\text{Fe-Fe}}$ 减小,所以 $\text{Fe}_{96}\text{M}_4\text{Zr}_{10}$ 样品的居里温度应比 $\text{Fe}_{96}\text{Zr}_{10}$ 为小.但我们的实验结果表明,当 $M = \text{V}$, Cr 时, $\text{Fe}_{96}\text{M}_4\text{Zr}_{10}$ 合金的 T_c 值反而上升,只有 $\text{Fe}_{96}\text{Mn}_4\text{Zr}_{10}$ 样品的 T_c 值下降,可能还应当考虑元素 M 对 FeZr 合金中反铁磁自旋集团的不同影响.

前面曾提到, $\text{Fe}_{96}\text{Mn}_4\text{Zr}_{10}$ 样品出现了类自旋玻璃现象,表明该合金中的交换各向异性较大.而当 $M = \text{V}$, Cr 时却没有发现类自旋玻璃现象.另外,我们从磁化曲线图 1 的高

场部分线性外推,粗略地得到了各样品的高场磁化率 χ_h , 结果见表 1. 结果表明, V, Cr 的掺杂减小了 $\text{Fe}_{90}\text{Zr}_{10}$ 合金的高场磁化率,这可理解为由于该合金中的反铁磁自旋集团比例减小,所以居里温度上升.

表 1 高场磁化率 $\chi_h \times 10^{-5} \text{emu/gOe}$

M	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
χ_h	6	6	12	10	2	2

总之, V, Cr, Mn 三元素虽然都是反铁磁性的, 但它们对 FeZr 合金的磁矩和居里温度的影响却不相同, 原因还有待进一步研究.

当 $M = \text{Co}, \text{Ni}$ 时, 一方面, $J_{\text{Fe-Co}}, J_{\text{Fe-Ni}}$ 都为正值, 同时它们都会破坏 FeZr 合金中的反铁磁自旋集团, 故 $\text{Fe}_{86}\text{M}_4\text{Zr}_{10}$ 样品的 T_c 值增加. 在 Fe 基非晶态合金中, Fe-Co 之间的交换作用都比 Fe-Fe 之间的交换作用强^[6], 因此, Fe-Co 基非晶态合金总有较高的居里温度.

Cu, B, Si 的离子半径比 Fe 离子小, 它们取代 Fe 后, 可能使 $J_{\text{Fe-Fe}}$ 增大, 同时又破坏 FeZr 合金中的反铁磁集团, 增加了铁磁性自旋耦合的比例, 故 $\text{Fe}_{86}\text{M}_4\text{Zr}_{10}$ 样品的 T_c 值增加.

3. 低温电阻

Shirakawa^[7] 等人报道了 Fe-(Co, Ni)-Zr 合金的电阻率温度关系. 沈保根^[8] 等人也对非晶态 FeBZr 合金的输运性质作了研究, 观察到了居里温度附近的电阻率极小, 并将它归结为自旋的相干交换散射.

在本实验中, 我们用不同性质的元素 M 取代 FeZr 合金中的 Fe, 但电阻率极小始终伴随着居里温度而出现, 这必然与磁有序有密切关系. 利用相干交换散射模型可得^[9]

$$\rho = \rho_M [c_1 + c_2 m(2k_F)] \quad (4)$$

式中 c_1 是常数, 等号右端第 1 项是每个磁性离子独立散射的贡献, 第 2 项 $m(2k_F)$ 与电子波的相干交换散射有关.

在 T_c 温度以上, 由于没有磁有序 $m(2k_F) = 0$, 根据 Ziman 理论^[10], 这时 $\rho \propto T$, 在 T_c 温度以下, 由于磁矩的关联, 可使 $m(2k_F) > 0$, 由(4)式可知, 电阻率上升, 所以两项共同作用的结果, 便在 T_c 附近出现了电阻率的极小值.

由于磁结构从无序到有序的转变具有渗流的性质, 在 $T > T_c$ 时, 仍有一定量的磁有序集团存在, 它们仍能造成相干交换散射, 故 $T_{\min} > T_c$.

在 $T < T_{\min}$ 的一段温区, $\rho \propto -\ln T$ 的实验现象现在还没有较好的理论解释, 可能同局域自旋涨落等散射有关^[8].

感谢杨林源、宁太山、郭慧群在工作中给与的帮助.

[1] Y. Obi, L. C. Wang, R. Motsay, P. G. Onn and M. Nose, *J. Appl. Phys.*, **53**(1982), 2306.

[2] H. Fujimori, K. Nakanishi, H. Hiroyoshi and N. S. Kazama, *J. Appl. Phys.*, **53**(1982), 7792.

[3] 沈保根、詹文山、赵见高、郑晓年, 科学通报, **31**(1986), 218.

- [4] S. Ohuma, K. Shirakawa, M. Nose and T. Masumoto, *IEEE Trans. on Magn.*, **MAG-16** (1980), 1129.
[5] 詹文山、沈保根、赵见高, 物理学报, **34**(1985), 1613.
[6] 郭慧群、沈保根、俞伯良、詹文山、潘孝硕, 金属学报, **20**(1984), B205.
[7] K. Shirakawa, K. Fukamichi, T. Kaneko and T. Masumoto, *J. Phys. F*, **14**(1984), 1491.
[8] 沈保根、詹文山、赵见高、陈金昌, 物理学报, **35**(1986), 841.
[9] R. Asomoza, A. Fert, I. A. Campbell and R. Meyer, *J. Phys. F*, **7**(1977), L327.
[10] J. M. Ziman, *Phil. Mag.*, **6**(1967), 1013.

MAGNETIC AND ELECTRICAL PROPERTIES OF AMORPHOUS $\text{Fe}_{86}\text{M}_4\text{Zr}_{10}$ ALLOYS

LI ZHI-QIANG

Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing, 100080

CHEN JIN-CHANG

Department of Physics, Beijing Teacher's College, Beijing, 100037

ZHAO JIAN-GAO SHEN BAO-GEN

Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing, 100080

LI DE-XIU

Department of Physics, Yunnan University, Kunming, 650091

(Received 24 December 1988)

ABSTRACT

The magnetic and electrical properties of amorphous $\text{Fe}_{86}\text{M}_4\text{Zr}_{10}$ ($\text{M}=\text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}, \text{B}, \text{Si}$) alloys are studied. Effects of M on the average magnetic moment and Curie temperature of these alloys are discussed. Electrical resistivity minimum in the vicinity of T_c is attributed to the coherent exchange scattering.

PACC: 7215C; 7530C