

# 2:17 型结构 Gd-Fe-Co-Ga 化合物的结构与磁性<sup>\*</sup>

张立刚

(武汉冶金科技大学基础科学系, 武汉 430081)

张绍英 张宏伟

(中国科学院物理研究所和凝聚态物理中心磁学国家重点实验室, 北京 100080)

(1997 年 3 月 31 日收到)

用电弧熔炼的方法制备了  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  ( $0 \leq x \leq 1.0$ ) 和  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  ( $0 \leq y \leq 8$ ) 化合物, 通过 X 射线衍射和磁性测量手段研究了它们的结构和磁性. 实验结果表明它们都是 2:17 型结构的单相化合物.  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  的单胞体积  $V$  随 Co 含量的增加单调下降, 而居里温度  $T_C$  单调上升, 1.5 K 下的饱和磁化强度  $M_s$  随 Co 含量的增加开始时略有增大, 在  $x=0.2$  时出现极大值, 然后单调下降; 对  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  的样品, 随 Ga 含量的增加单胞体积增加, 居里温度和饱和磁化强度单调下降. 用 Co 替代 Fe, 或用 Ga 替代 Fe 和 Co 都能导致 Fe 或 Co 次晶格出现室温单轴各向异性, 这可能与 Ga 原子的择优占位有关.

PACC: 7530

## 1 引 言

具有  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  或  $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$  型结构的二元  $R$  (稀土)-Fe 金属间化合物, 由于居里温度低且不具有室温单轴各向异性而不能制成永磁体. 然而采用气固相反应<sup>[1]</sup>或快速淬火<sup>[2]</sup>等方法, 使 N, C 等原子进入  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  晶胞的间隙位置, 引起单胞体积的膨胀, 能有效地提高居里温度, 也能使 Sm 化合物具有室温单轴各向异性. 许多研究表明, 不仅间隙原子添加对  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  化合物的磁性产生重要影响, 而且通过 3d 元素 Co<sup>[3-5]</sup> 或者 Ga, Al 等非磁性原子<sup>[6-13]</sup> 的适量替代, 也能使  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  的居里温度提高, 或导致其各向异性的改变. 在非磁性原子替代的  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  化合物中, Ga 的替代对磁性的影响尤为显著, 例如,  $\text{Gd}_2\text{Fe}_{14}\text{Ga}_3$  化合物的居里温度比  $\text{Gd}_2\text{Fe}_{17}$  的居里温度高约 200 K, 而且 Ga 的替代使  $\text{Gd}_2\text{Fe}_{17}$  的磁晶各向异性在室温下由易面转变为易轴<sup>[10]</sup>. 最近的研究还发现, 在  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  化合物中, Ga 对 Fe 的替代不仅能导致稀土次晶格磁晶各向异性的改变, 也能使 Fe 次晶格出现单轴各向异性<sup>[9]</sup>. 不久前, Cheng<sup>[10]</sup> 和 Liang<sup>[14]</sup> 等人分别研究了  $\text{Gd}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$  和  $\text{Gd}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ga}_x$  化合物的结构与磁性, 表明 Ga 的替代对 Fe 基和 Co 基化合物磁性的影响有明显的差别. 为了

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助的课题.

进一步探讨 Ga 替代对 Fe 次晶格和 Co 次晶格磁性,尤其是磁晶各向异性的影响,我们详细研究了 2:17 型结构的 Gd-Fe-Co-Ga 化合物的结构与磁性,本文报道对这些化合物的研究结果.

## 2 实 验

采用电弧熔炼制备了  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  ( $x=0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0$ ) 和  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  ( $y=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ ) 化合物,原料纯度至少为 99.9%. 熔炼样品在高纯氩保护下进行,每个合金锭熔炼 4 次,以保证其均匀性. 用 X 射线衍射分析了样品的晶体结构,并结合热磁测量检验了样品的单相性. 用振动样品磁强计测量了磁化强度与温度的关系,以确定样品的居里温度,测量磁场为 0.1 T;用提拉样品磁强计测量了样品在 1.5 K 下的磁化曲线,磁场强度为 0—6.5 T;采用趋近饱和定律拟合出 1.5 K 时的饱和磁化强度. 为了研究磁晶各向异性,将样品磨成粉末,添加粘合剂,在 1 T 的磁场中取向,然后作取向样品的 X 射线衍射测量,以确定样品的易磁化方向.

## 3 结果与讨论

### 3.1 结构参数

X 射线衍射的实验结果表明,  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  ( $0 \leq x \leq 1.0$ ) 化合物均为  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  结构, Co 对 Fe 的替代不改变其晶体结构;而对于  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  ( $0 \leq y \leq 8$ ) 化合物,  $y \leq 1$  时,样品为  $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$  型和  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  型共存结构,  $2 \leq y \leq 8$  时,样品为  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  型结构. 作为例子,图 1 给出某些样品的 X 射线衍射图. 通过对 X 射线衍射结果的拟合,获得了  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  和  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  化合物的晶格参数  $a$ ,  $c$ , 单胞体积  $V$  以及晶格参数的比值  $c/a$ , 数值分别列于表 1.

在  $\text{Gd}_2\text{Fe}_{15}\text{Ga}_2$  化合物中,用 Co 替代 Fe 导致单胞体积单调下降,如图 2(a) 所示,类似的结果也在其他 Co 替代 Fe 的化合物中观察到<sup>[3,4]</sup>. 由表 1 可见,当  $x$  从 0 增加到 1 时,  $c/a = 1.462 \pm 0.005$ , 近似与 Co 含量的变化无关,表明 Co 的替代导致单胞体积减小是各向同性的. 在  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17}$  化合物中,用 Ga 替代 Fe 和 Co,使单胞体积近似线性增加,  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_9\text{Ga}_8$  化合物的单胞体积比相应的  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17}$  化合物的单胞体积增加了约 6.3%,如图 2(b) 所示.  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  的  $c/a$  随 Ga 含量的增加略有下降,这可能与 Ga 原子的择优替代有关<sup>[7]</sup>.

### 3.2 居里温度和磁化强度

图 3 给出  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  和  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  化合物的磁化强度  $M$  与温度  $T$  的关系. 从这些实验曲线获得的居里温度  $T_C$  与 Co 或 Ga 含量的关系分别示于图 4(a) 和 (b). 为了比较,图 4(b) 还给出  $\text{Gd}_2\text{Fe}_{17-y}\text{Ga}_y$ <sup>[10]</sup> 和  $\text{Gd}_2\text{Co}_{17-y}\text{Ga}_y$ <sup>[14]</sup> 的  $T_C$  与 Ga

含量的关系. 一般而言, 稀土 R 和过渡金属 T 所形成化合物的居里温度主要是由 T-T 和

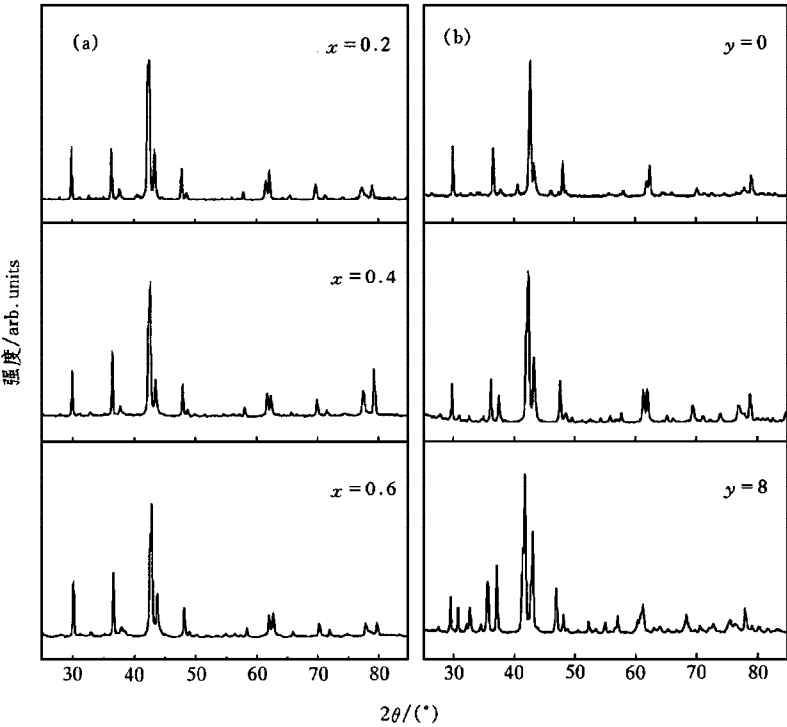


图 1  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  ( $x = 0.2, 0.4, 0.6$ ) (a) 和  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  ( $y = 0, 4, 8$ ) (b) 化合物的室温 X 射线衍射图

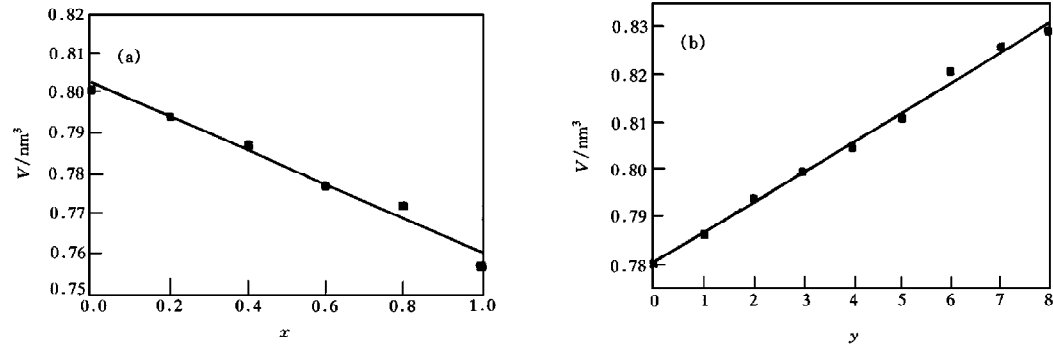


图 2  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  化合物的单胞体积  $V$  与 Co 含量  $x$  的关系(a)和  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  化合物的单胞体积  $V$  与 Ga 含量  $y$  的关系(b)

R-T 间的交换作用决定的, R-R 交换作用较弱, 往往可以忽略. 比较 T-T 和 R-T 间的交换作用, T-T 交换作用对居里温度起决定作用. 对  $\text{R}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$  化合物的研究表明<sup>[8]</sup>,

R-Fe 交换作用常数  $J_{R-Fe}$  几乎不随 Ga 含量的增加而变化,其数值大致为  $J_{Fe-Fe}$  的五分之一到六分之一,因此,对 2:17 型结构的 Gd-Fe-Co-Ga 化合物而言,  $T_C$  主要由 Fe-Fe, Fe-Co 和 Co-Co 交换作用决定.

表 1  $Gd_2(Fe_{1-x}Co_x)_{15}Ga_2$  和  $Gd_2(Fe_{0.8}Co_{0.2})_{17-y}Ga_y$  化合物的  
晶格常数  $a, c$ , 单胞体积  $V$ , 居里温度  $T_C$  和饱和磁化强度  $M_s$

| 化合物                               | $a/\text{nm}$ | $c/\text{nm}$ | $V/\text{nm}^3$ | $c/a$ | $T_C/\text{K}$ | $M_s/\text{Am}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ | $\mu_B/(\mu_B/\text{f.u.})$ |
|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-------|----------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| $Gd_2Fe_{15}Ga_2$                 | 0.8593        | 1.2523        | 0.8008          | 1.457 | 578            | 69.2                                 | 16.1                        |
| $Gd_2(Fe_{0.8}Co_{0.2})_{15}Ga_2$ | 0.8549        | 1.2543        | 0.7939          | 1.467 | 749            | 73.1                                 | 17.1                        |
| $Gd_2(Fe_{0.6}Co_{0.4})_{15}Ga_2$ | 0.8538        | 1.2467        | 0.7870          | 1.460 | 861            | 64.8                                 | 15.2                        |
| $Gd_2(Fe_{0.4}Co_{0.6})_{15}Ga_2$ | 0.8497        | 1.2420        | 0.7770          | 1.462 | 899            | 54.9                                 | 13.0                        |
| $Gd_2(Fe_{0.2}Co_{0.8})_{15}Ga_2$ | 0.8470        | 1.2423        | 0.7720          | 1.467 | 922            | 42.7                                 | 10.7                        |
| $Gd_2Co_{15}Ga_2$                 | 0.8434        | 1.2286        | 0.7568          | 1.457 | 932            | 29.7                                 | 7.1                         |
| $Gd_2(Fe_{0.8}Co_{0.2})_{17}$     | 0.8480        | 1.2525        | 0.7801          | 1.500 | 776            | 100.2                                | 22.9                        |
| $Gd_2(Fe_{0.8}Co_{0.2})_{16}Ga$   | 0.8517        | 1.2513        | 0.7860          | 1.469 | 765            | 86.1                                 | 19.9                        |
| $Gd_2(Fe_{0.8}Co_{0.2})_{15}Ga_2$ | 0.8549        | 1.2543        | 0.7940          | 1.467 | 749            | 73.1                                 | 17.0                        |
| $Gd_2(Fe_{0.8}Co_{0.2})_{14}Ga_3$ | 0.8584        | 1.2525        | 0.7993          | 1.459 | 723            | 57.7                                 | 13.6                        |
| $Gd_2(Fe_{0.8}Co_{0.2})_{13}Ga_4$ | 0.8605        | 1.2553        | 0.8050          | 1.459 | 687            | 48.7                                 | 11.6                        |
| $Gd_2(Fe_{0.8}Co_{0.2})_{12}Ga_5$ | 0.8626        | 1.2583        | 0.8110          | 1.459 | 637            | 39.3                                 | 9.4                         |
| $Gd_2(Fe_{0.8}Co_{0.2})_{11}Ga_6$ | 0.8664        | 1.2619        | 0.8210          | 1.456 | 565            | 27.9                                 | 6.8                         |
| $Gd_2(Fe_{0.8}Co_{0.2})_{10}Ga_7$ | 0.8676        | 1.2602        | 0.8257          | 1.453 | 496            | 18.7                                 | 4.6                         |
| $Gd_2(Fe_{0.8}Co_{0.2})_9Ga_8$    | 0.8711        | 1.2613        | 0.8289          | 1.448 | 427            | 14.2                                 | 3.5                         |

从图 4(a)可见,  $Gd_2(Fe_{1-x}Co_x)_{15}Ga_2$  化合物的居里温度随 Co 含量的增加而单调上升,当  $x$  小于 0.4 时,  $T_C$  上升较快,然后随  $x$  的增加逐渐趋于平缓,  $T_C$  随 Co 含量的增加可能与 Fe-Co 和 Co-Co 原子间的交换作用大于 Fe-Fe 交换作用有关.按照 Kouvel<sup>[15]</sup> 的唯象模型,如果假定 Gd-T 交换作用相对较小,  $Gd_2(Fe_{1-x}Co_x)_{15}Ga_2$  化合物的居里温度可近似表示为

$$T_C = [T_{Fe-Fe}(1-x) + T_{Co-Co}x] + \{[T_{Fe-Fe}(1-x) - T_{Co-Co}x]^2 + T_{Fe-Co}^2(1-x)x\}^{1/2} \quad (1)$$

由此可计算出  $T_{Fe-Fe}=584.8\text{ K}$ ,  $T_{Fe-Co}=1016.5\text{ K}$  和  $T_{Co-Co}=920.1\text{ K}$ . 从图 4(b)可以看出,  $Gd_2(Fe_{0.8}Co_{0.2})_{17-y}Ga_y$  化合物的居里温度  $T_C$  随 Ga 含量的增加而单调下降,这是由于 Ga 的替代,导致 T-T 交换作用减弱,并使铁磁性原子减少所致.在  $Gd_2Fe_{17-y}Ga_y$  化合物中<sup>[10]</sup>,当  $y\leq 3$  时,  $T_C$  随  $y$  的增加而上升,这是由于 Ga 的替代使 Fe-Fe 原子间的距离增大,引起 Fe-Fe 交换作用增加,从而导致  $T_C$  上升,而  $Gd_2Co_{17-y}Ga_y$  化合物中<sup>[14]</sup>, Co-Co 原子间距增大,引起 Co-Co 交换作用的显著减小,导致  $T_C$  下降.从图 4(b)可以推出,在  $Gd_2(Fe_{0.8}Co_{0.2})_{17-y}Ga_y$  化合物中, Ga 的替代对 Co-Co 交换作用的影响明显大于对 Fe-Fe 交换作用的影响,其综合效果导致了  $T_C$  的单调下降.

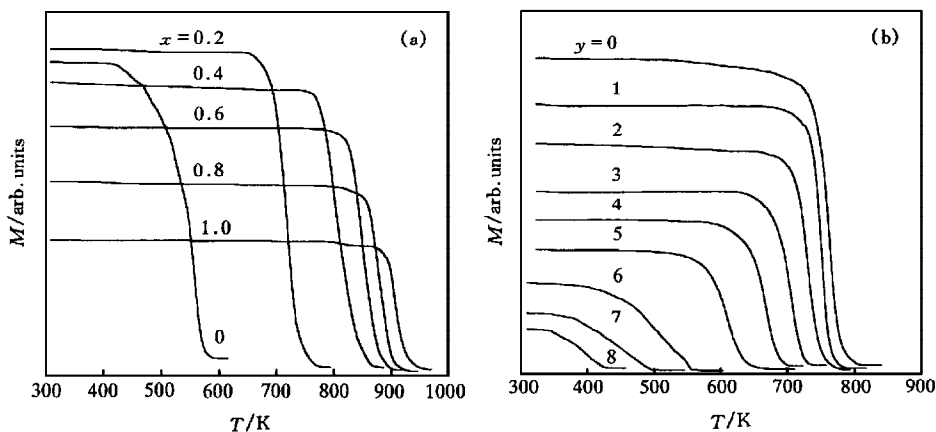


图3  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  (a) 和  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  (b) 化合物的磁化强度  $M$  与温度  $T$  的关系

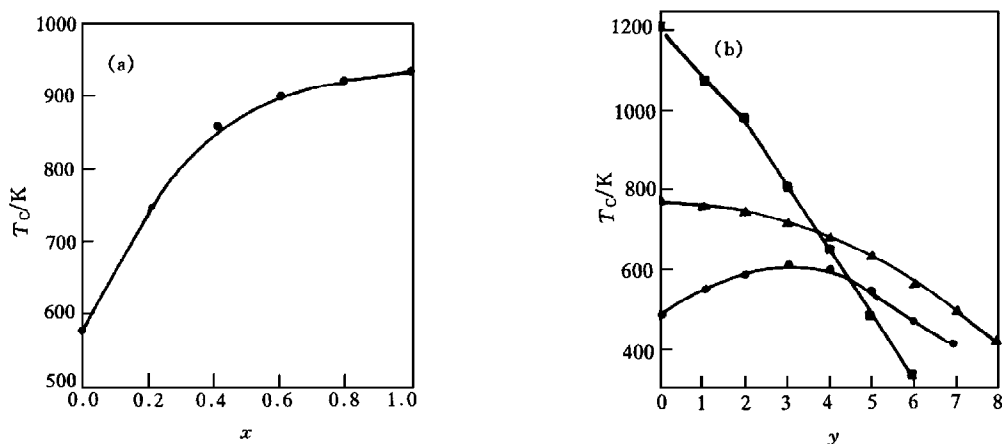


图4  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  化合物的居里温度  $T_C$  与 Co 含量  $x$  的关系 (a) 和  $\text{Gd}_2\text{Fe}_{17-y}\text{Ga}_y$ <sup>[10]</sup>,  $\text{Gd}_2\text{Co}_{17-y}\text{Ga}_y$ <sup>[14]</sup>,  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  化合物居里温度  $T_C$  与 Ga 含量  $y$  的关系 (b) ■ 为  $\text{Gd}_2\text{Co}_{17-y}\text{Ga}_y$ ; ● 为  $\text{Gd}_2\text{Fe}_{17-y}\text{Ga}_y$ ; ▲ 为  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$

图 5(a) 和 (b) 分别给出  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  和  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  化合物在 1.5 K 时的磁化曲线. 由图 5 可见, Co 的替代导致了高场磁化率变小, 样品易于饱和, 而 Ga 的替代使样品的高场磁化率明显增大, 即使在  $H=6.5$  T 磁场下, 样品远未饱和. 用趋近饱和定律拟合了样品的磁化曲线, 由此得到 1.5 K 下的饱和磁化强度, 并计算出每个分子的饱和磁矩  $\mu_s$  (见表 1).  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  和  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  化合物的饱和磁矩  $\mu_s$  与 Co 或 Ga 含量的关系分别示于图 6(a) 和 (b). 由图 6(a) 可见, 用 Co 替代 Fe, 当  $x \leq 0.2$  时,  $\mu_s$  略有上升, 然后随 Co 含量的增加而单调下降. 由于 Gd 原子磁矩和 Fe 或 Co 原子磁矩是反平行耦合, 对  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  化合物, 分子磁矩  $\mu_s$  可表示为

$$\mu_s = 15 \mu_{\text{Fe-Co}} - 2 \mu_{\text{Gd}}, \quad (2)$$

其中  $\mu_{\text{Gd}}$  为 Gd 原子的平均磁矩,  $\mu_{\text{Fe-Co}}$  为 Fe 和 Co 原子的平均磁矩. 由于 Gd-T 化合物中

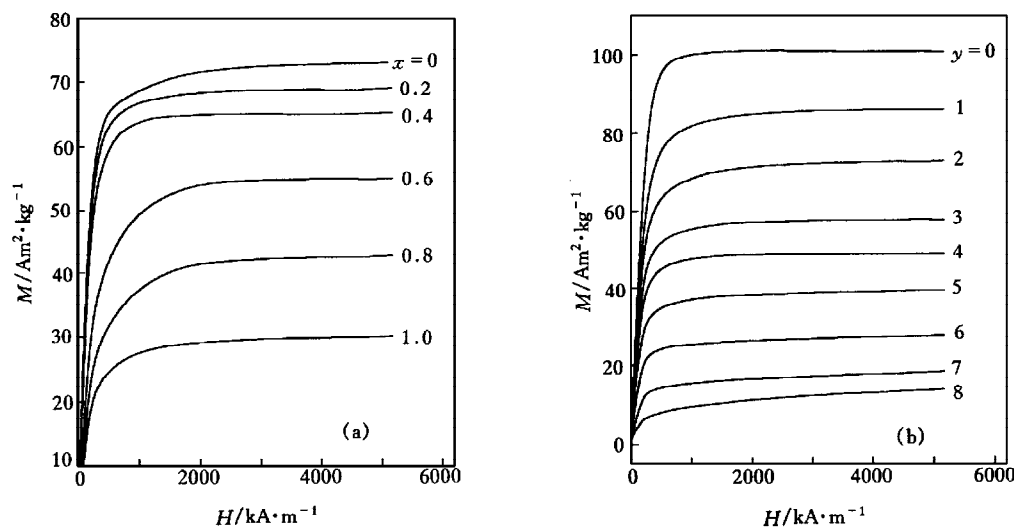


图 5  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$ (a) 和  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$ (b) 化合物在 1.5 K 时的磁化曲线

存在共线磁结构, 并且 4f 电子局域在原子核附近的内层轨道, 并受到外层电子的屏蔽, 周围环境影响较小, 因此 Gd-T 化合物中 Gd 原子磁矩与自由离子情况基本相同. 这样假定  $\mu_{\text{Gd}}$  等于  $\text{Gd}^{3+}$  离子磁矩的理论值, 即  $\mu_{\text{Gd}} = 7 \mu_{\text{B}}$ , 从 (2) 式可得每个 Fe-Co 原子的平均磁矩  $\mu_{\text{Fe-Co}}$  与 Co 含量的关系, 如图 7 所示.  $\mu_{\text{Fe-Co}}$  与 Co 含量的关系可表示为

$$\mu_{\text{Fe-Co}} = \mu_{\text{Fe}}(1-x) + \mu_{\text{Co}}x, \quad (3)$$

其中  $\mu_{\text{Fe}}$  和  $\mu_{\text{Co}}$  分别为每个 Fe 和 Co 原子的平均磁矩. 当  $x=1.0$  时, Co 原子的平均磁矩

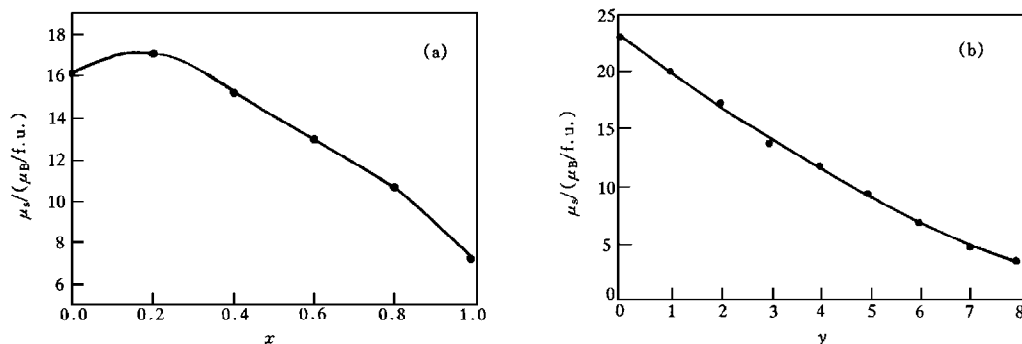


图 6  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  化合物的饱和磁矩  $\mu_s$  与 Co 含量的关系(a) 和  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  化合物的饱和磁矩  $\mu_s$  与 Ga 含量的关系(b)

$\mu_{\text{Co}} = 1.41 \mu_{\text{B}}$ , 低于纯 Co 原子的磁矩约  $0.3 \mu_{\text{B}}$ , 其原因可能与非磁性原子 Ga 的替代有

关,这与  $\text{Dy}_2\text{Co}_{15}\text{Ga}_2$  [16] 中  $\mu_{\text{Co}} = 1.42 \mu_{\text{B}}$  的结果相符合. 在晶态  $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x$  合金中,极化中子衍射的研究结果表明,  $\mu_{\text{Co}}$  不随 Co 含量的增加而改变,基本保持一个常数,而  $\mu_{\text{Fe}}$  随 Co 含量的增加而增加 [17]. 对  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  化合物,如果假定  $\mu_{\text{Co}} = 1.4 \mu_{\text{B}}$ ,且不随 Co 含量的变化而变化,由 (3) 式得到每个 Fe 原子的平均磁矩  $\mu_{\text{Fe}}$  从  $x=0$  时的  $2.01 \mu_{\text{B}}$  增加到  $x=0.8$  时的  $2.65 \mu_{\text{B}}$  (如图 7 所示),与晶态  $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x$  合金的  $\mu_{\text{Fe}}$  随 Co 含量的变化相似 [17]. 由图 6 (b) 可以看出,  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  化合物的饱和磁矩  $\mu_{\text{s}}$  随 Ga 含量的增加近似线性下降,每一个 Ga 原子的替代导致约  $2.4 \mu_{\text{B}}/\text{f.u.}$  的减少,与其他 Ga 替代的  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  化合物中  $\mu_{\text{s}}$  的减少大致相符,这不仅是由于 Ga 稀释作用的结果,而且也与 Ga 替代导致 Fe 和 Co 原子磁矩的下降有关.

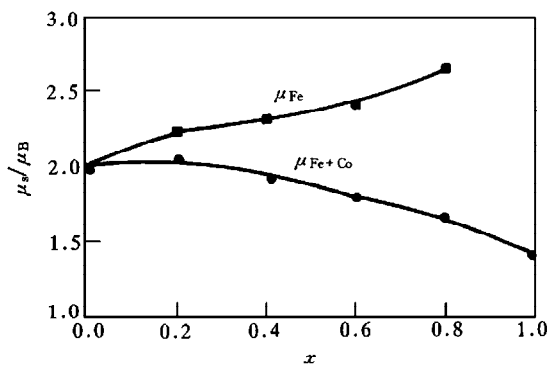


图 7  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  化合物的 Fe 原子平均磁矩  $\mu_{\text{Fe}}$  和 Fe-Co 原子平均磁矩  $\mu_{\text{Fe+Co}}$  与 Co 含量  $x$  的关系曲线

$\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  化合物中  $\mu_{\text{s}}$  的减少大致相符,这不仅是由于 Ga 稀释作用的结果,而且也与 Ga 替代导致 Fe 和 Co 原子磁矩的下降有关.

### 3.3 磁晶各向异性

$\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  和  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  化合物粉末取向样品的 X 射线衍射测量表明,当 Co 含量  $x \leq 0.4$  时,样品的易磁化方向均为易面的,而当  $x \geq 0.5$  时,样品的易磁化方向沿  $c$  轴, Ga 替代的样品在  $y=6$  和 7 之间,易磁化方向由易面转变为易  $c$  轴. 作为例子,图 8 给出某些粉末取向样品的 X 射线衍射图,样品的取向方向与 X 射线衍射平面垂直.

由图 8 可见,当取向样品的  $(00l)$  峰显著增强,其余峰消失,这说明样品的易磁化方向沿  $c$  轴,反之,当  $(h k 0)$  峰显著增强,其余峰消失,样品的易磁化方向垂直  $c$  轴. 根据单离子模型,2:17 型化合物中稀土次晶格的磁晶各向异性主要由二阶项决定,稀土离子的 Stevens 二阶因子  $\alpha_j$  和二级晶场系数  $A_{20}$  的乘积可定性判断稀土离子对磁晶各向异性的贡献. 但稀土 Gd 离子的  $\alpha_j = 0$ ,可以不考虑 Gd 对磁晶各向异性的贡献,因此, Gd 化合物的磁晶各向异性主要由 T 次晶格决定. 对  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  和  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  化合物的磁晶各向异性,则主要来自于 T 次晶格中 Fe 和 Co 的贡献,其大小与它们在晶格中的占位密切相关. 在二元  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  化合物中,Fe 次晶格是易面各向异性的,然而,用 Ga 替代 Fe 能导致 Fe 次晶格出现室温单轴各向异性 [9],这与 Ga 原子的择优占位有关.  $\text{Gd}_2\text{Co}_{17}$  也是易面各向异性的,但少量 Ga 的替代能使其易面各向异性转变为单轴各向异性 [14],这也与 Ga 原子对 Co 原子位的择优替代有关.  $\text{Y}_2\text{Co}_{17-x}\text{Al}_x$  化合物的核磁共振研究已表明 [18], Co 次晶格的 4 个晶位中,18f 是易轴的,其余 3 个 (18h, 9d, 6c) 是易面的,因此,  $\text{Gd}_2(\text{Fe, Co})_{17}$  化合物的单轴各向异性可能是由于 Ga 择优替代了易面各向异性的 Co 次晶格的晶位所致. 由图 8 和文献 [10, 14] 的结果可以看出,在 2:17 型  $\text{Gd}_2(\text{Fe, Co})_{17}$

化合物中, Ga 替代 Co 比替代 Fe 更易导致 T 次晶格出现室温单轴各向异性.

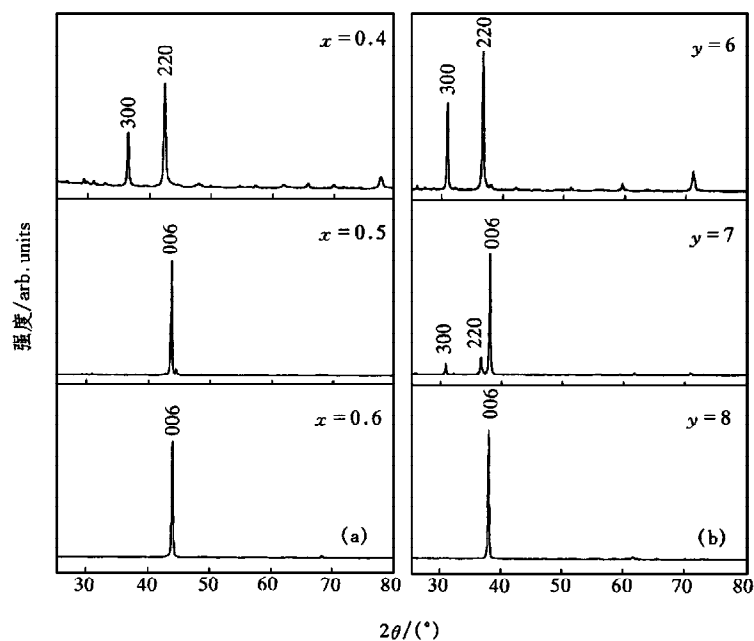


图 8  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  ( $x = 0.4, 0.5, 0.6$ ) (a) 和  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  ( $y = 6, 7, 8$ ) (b) 化合物的粉末取向样品的 X 射线衍射图

- [1] J. M. D. Coey and H. Sun, *J. Magn. Magn. Mater.*, **87**(1990), L251.
- [2] B. G. Shen, L. S. Kong and L. Cao, *Solid State Commun.*, **83**(1992), 753.
- [3] N. Ohkubo and K. Kanematsu, *J. Appl. Phys.*, **79**(1996), 5449.
- [4] F. Weitzer, H. Klesnar, K. Hiebl *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **67**(1990), 2544.
- [5] R. S. Perkins and H. Nagel, *Physica*, **80B**(1975), 143.
- [6] B. G. Shen, F. W. Wang, L. S. Kong *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter*, **5**(1993), L685.
- [7] Z. Hu, W. B. Yelon, S. Mishra *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **76**(1994), 443.
- [8] J. L. Wang, R. W. Zhao, N. Tang *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **76**(1994), 6740.
- [9] B. G. Shen, Z. H. Cheng, B. Liang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **67**(1995), 1621.
- [10] Z. H. Cheng, B. G. Shen, B. Liang *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **78**(1995), 1385.
- [11] G. J. Long, G. K. Marasinghe, S. Mishra *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **76**(1994), 5383.
- [12] Z. Wang and R. A. Dunlap, *J. Phys.: Condens. Matter*, **5**(1993), 2407.
- [13] F. Weigzer, K. Hiebl and P. Rogl, *J. Appl. Phys.*, **65**(1989), 4963.
- [14] B. Liang, B. G. Shen, F. W. Wang *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **82**(1997), 3452.
- [15] J. S. Kouvel, *Magnetism and Metallurgy*, Vol. 2, eds. A. E. Berkowitz and E. Kneller (Academie, New York, 1969), p. 523.
- [16] S. Y. Zhang, B. G. Shen, B. Liang, Z. H. Cheng, J. X. Zhang, H. W. Zhang, J. G. Zhao and W. S. Zhan, *J. Alloys and Compounds*, in press.
- [17] M. F. Colluis and J. B. Forsyth, *Phil. Mag.*, **8**(1963), 401.
- [18] K. Inomata, *Phys. Rev.*, **B23**(1981), 2076.

# STRUCTURAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF Gd-Fe-Co-Ga COMPOUNDS WITH 2:17 TYPE STRUCTURE

ZHANG LI-GANG

(*Department of Basic Science, University of Metallurgy Science and Technology of Wuhan, Wuhan 430081*)

ZHANG SHAO-YING ZHANG HONG-WEI

(*State Key Laboratory of Magnetism, Institute of Physics and Center for Condensed Matter Physics,  
Academia Sinica, Beijing 100080*)

(Received 31 March 1997)

## ABSTRACT

The compounds of  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  ( $0 \leq x \leq 1.0$ ) and  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$  ( $0 \leq y \leq 8$ ) were prepared by arc-melting. Their structure and magnetic properties have been studied by means of X-ray diffraction and magnetic measurements. Experimental results show that single-phase compounds with the 2:17-type structure were obtained for all samples. It was found that the unit cell volume of  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{15}\text{Ga}_2$  compounds decreases, while the Curie temperature  $T_C$  increases monotonously with increasing Co concentration. The saturation magnetization  $M_s$  at 1.5 K first increases with increasing  $x$ , then decreases, showing a value of maximum at  $x = 0.2$ . For  $\text{Gd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{17-y}\text{Ga}_y$ , the unit cell volume increases, the Curie temperature and the saturation magnetization at 1.5 K decrease monotonously with increasing Ga content. The substitution of Co or Ga for Fe in  $\text{Gd}_2\text{Fe}_{17}$  compounds results in a change of magnetocrystalline anisotropy of Fe or Co sublattice from easy plane to easy  $c$ -axis at room temperature. This is likely related to the preferential site occupancy of Ga atom.

PACC: 7530