

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.



[12] 发明专利申请公布说明书

H01F 1/14 (2006.01)

C22C 38/00 (2006.01)

H01F 38/28 (2006.01)

[21] 申请号 200580043553.4

[43] 公开日 2007 年 11 月 28 日

[11] 公开号 CN 101080788A

[22] 申请日 2005.12.16

[21] 申请号 200580043553.4

[30] 优先权

[32] 2004.12.17 [33] JP [31] 365957/2004

[86] 国际申请 PCT/JP2005/023181 2005.12.16

[87] 国际公布 WO2006/064920 日 2006.6.22

[85] 进入国家阶段日期 2007.6.18

[71] 申请人 日立金属株式会社

地址 日本东京

[72] 发明人 吉泽克仁 直江昌武

[74] 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司

代理人 李贵亮

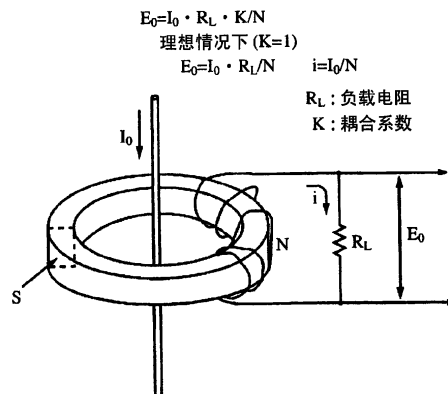
权利要求书 2 页 说明书 15 页 附图 5 页

[54] 发明名称

电流互感器用磁芯、电流互感器及瓦时计

[57] 摘要

一种由合金组成的电流互感器用磁芯，所述合金具有由通式： $Fe_{100-x-a-y-c}M_xCu_aM'_yX'_c$ (原子%) 表示的组成，其中 M 为 Co 及/或 Ni；M' 为从 V、Ti、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta 及 W 中选出的至少一种的元素；X 为 Si 及/或 B；x、a、y 及 c 为分别满足 $10 \leq x \leq 50$ 、 $0.1 \leq a \leq 3$ 、 $1 \leq y \leq 10$ 、 $2 \leq c \leq 30$ 及 $7 \leq y + c \leq 31$ 的数字，合金组织的至少一部分或全部由平均粒径 50nm 以下的晶粒组成。



1. 一种电流互感器用磁芯, 其特征在于, 由合金构成, 该合金具有以原子%计由通式: $\text{Fe}_{100-x-a-y-c}\text{M}_x\text{Cu}_a\text{M}'_y\text{X}'_c$ 表示的组成, 其中, M 为 Co 及/或 Ni, M' 为从 V、Ti、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta 及 W 中选出的至少一种元素, X' 为 Si 及/或 B, x、a、y 及 c 为分别满足 $10 \leq x \leq 50$ 、 $0.1 \leq a \leq 3$ 、 $1 \leq y \leq 10$ 、 $2 \leq c \leq 30$ 及 $7 \leq y+c \leq 31$ 的数字, 该合金组织的至少一部分或全部由平均粒径 50nm 以下的晶粒构成, 在 8000Am^{-1} 中的磁通密度 B_{8000} 为 1.2T 以上, 各向异性磁场 H_k 为 $150 \sim 1500 \text{Am}^{-1}$, 角形比 B_r/B_{8000} 为 5% 以下, 50Hz 及 0.05Am^{-1} 中的交流比初始导磁率 μ_r 为 $800 \sim 7000$ 。

2. 根据权利要求 1 所述的电流互感器用磁芯, 其特征在于, 所述 M 的含量 x 为 $15 \leq x \leq 40$ 。

3. 根据权利要求 1 或 2 所述的电流互感器用磁芯, 其特征在于, B 的含量为 4~12 原子%。

4. 根据权利要求 1~3 中任一项所述的电流互感器用磁芯, 其特征在于, Si 的含量为 0.5~17 原子%。

5. 根据权利要求 1~4 中任一项所述的电流互感器用磁芯, 其特征在于, 所述 M' 的一部分被从 Cr、Mn、Sn、Zn、In、Ag、Au、Sc、铂族元素、Mg、Ca、Sr、Ba、Y、稀土类元素、N、O 以及 S 中选出的至少一种的元素置换。

6. 根据权利要求 1~5 中任一项所述的电流互感器用磁芯, 其特征在于, 由所述 X' 的一部分被从 C、Ge、Ga、Al、Be 及 P 中选出的至少一种的元素置换后的合金构成。

7. 根据权利要求 1~6 中任一项所述的电流互感器用磁芯, 其特征在于, 向磁芯的高度方向施加 40kAm^{-1} 以上的磁场, 同时, 在 $450^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{C}$ 的温度保持 24 小时以下的时间, 然后冷却到室温, 在磁场中进行热处理。

8. 根据权利要求 1~7 中任一项所述的电流互感器用磁芯, 其特征在于, 用于检测半正弦波交流电流。

9. 一种电流互感器, 其特征在于, 具备: 权利要求 1~8 中任一项所

述的电流互感器用磁芯；一次绕组；至少一个的二次检测绕组；与所述二次检测绕组并列连接的负载电阻。

10. 根据权利要求 9 所述的电流互感器，其特征在于，一次绕组为一匝。

11. 根据权利要求 9 或 10 所述的电流互感器，其特征在于，23℃下额定电流范围中的相位差为 5° 以内，相对误差的绝对值在 3% 以内。

12. 一种瓦时计，其特征在于，通过对权利要求 9~11 中任一项所述的电流互感器测得的电流值和当时的电压进行积算处理，而计算出电力。

电流互感器用磁芯、电流互感器及瓦时计

技术领域

本发明涉及一种电流互感器用磁芯，以及使用其的电流互感器及瓦时计，其适于对半正弦波交流电流等的非对称波形的交流电流或直流重叠后的交流电流进行检测。

背景技术

用于测量家庭及工业领域中的电气设备和装置的电力消耗量的瓦时计，有感应式瓦时计和电子式瓦时计。现有的主流是采用转盘的感应式瓦时计，近年来随着电子技术的发展，电子式瓦时计日益得到普及。对应 IEC62053-22 等原有规格的瓦时计，已经不能准确测出半正弦波交流电流等扭曲波形的电流，导致出现不能对电力进行准确测量的问题。因此，欧洲制定出了用于测量扭曲波形（半波整流波形）的瓦时计相关的 IEC62053-21 规格。在欧洲以外的地区，也废止使用现有的不能对扭曲波形进行准确电量测量的转盘式瓦时计，逐渐采用适合 IEC62053-21 规格的、将电流互感器（CT）或霍尔效应器件用于检测电流的瓦时计。在逆变器等工业用途中，电流互感器对扭曲波形的交流电流或直流重叠后的交流电流的检测也发挥出重要的作用。

采用霍尔效应器件的电流传感器，是在磁芯上形成间隙并将霍尔效应器件配置在间隙部中，使被测电流流过的导线贯通于磁芯闭合磁路内，通过用霍尔效应器件检测出与在间隙部产生的电流大致成比例的磁场而进行电流测量。

电流互感器（CT）以较多匝数将二次绕组卷绕在一个闭合磁路磁芯上，通常使一次线（被测电流流经的线路）贯通于闭合磁路内使用。图 8 所示为电流互感器（CT）型电流传感器的构成。磁芯的形状有环形和成组磁芯形，但在环形磁芯上绕组的方式，可以实现小型化并降低磁通泄漏，从而

获得接近理论动作的性能。

在交流的贯通电流 I_0 ，且 $R_L \ll 2\pi f \cdot L_2$ 的条件下，理想的输出电流 i 为 I_0/N (N :二次绕组数)，输出电压 E_0 为 $I_0 \cdot R_L/N$ (R :负载电阻)。实际上，受到磁芯材的损失和磁通泄漏等的影响，输出电压 E_0 要低于理想值。电流互感器的感度相当于 E_0/I_0 ，但实际上该值由一次和二次的耦合系数决定。将耦合系数设为 K 的话，则 $E_0 = I_0 \cdot R_L \cdot K/N$ (K :耦合系数)。

在理想的电流互感器中，耦合系数 K 为 1，但在实际的电流互感器中，由于受到绕组的内部电阻及负载电阻所需的励磁电流、泄露磁通及导磁率的非直线性等的影响，当 R_L 在 $100\ \Omega$ 以下时， K 值为 $0.95\sim 0.99$ 左右。磁路中存在间隙时会导致 K 值下降，因此无间隙的环形磁芯可以实现耦合度最高的理想的电流互感器。截面面积 S 越大，二次绕组数 N 越多，负载电阻 R_L 越小， K 值接近于 1。该 K 值也因贯通电流 I_0 而变化，当 I_0 为 100mA 以下的微小电流时， K 值呈下降趋势。特别是将低导磁率的材料用作磁芯材料时，这种趋势会变大，所以，必须高精度地测量微小电流时，可以使用高导磁率的磁芯材料。

相对误差是各测量点上的理想值和实测值的误差比率，表示电流值的精度，耦合系数特性与相对误差特性相关联。相位差表示波形的精度，表示对于测定原波形的输出波形的相位偏移。电流互感器输出通常成为前进相。这两个特征，对用于积算瓦特计等的电流互感器是非常重要的特性。

在需要测量微小电流的电流互感器中，为了提高耦合系数 K 而减小相对误差和位相差，一般可以采用起始导磁率高的坡莫合金等材料。电流互感器的最大贯通电流 $I_{0\text{max}}$ 为能够确保直线性的最大电流，不仅受到负载电阻和内部电阻的影响，还受到使用的磁芯材料的磁特性的影响。为了能够测量大电流，优选使用饱和磁通密度尽可能高的磁芯材料。

作为用于电流互感器的磁芯材料，已知的有硅钢、坡莫合金、非晶态合金、Fe 基纳米结晶合金材料等。材料便宜且磁通密度高的硅钢钢板，其导磁率低，磁滞大，磁化曲线的直线性也差，因此相对误差和相位差大且发生变动，难以获得高精度的电流互感器。另外因为剩余磁通密度大，难以对半波电流等非对称的电流进行准确的测量。

将 Fe 基非晶态合金用于电流互感器时，存在相对误差和相位差的变

动大的问题。在特表 2002-525863 号专利文献中，公开有一种在磁场中进行了热处理的 Co 基非晶态合金，由于其滞后小且具有直线性的良好磁化曲线，作为对非对称波形的电流进行检测的电流互感器（CT）表现出优良的特性。具有 1500 左右的低导磁率及直线性良好的磁化曲线的 Co 基非晶态合金，被用于所述的对应瓦时计规格 IEC62053-21 的电流测量用电流互感器（CT）。但是，Co 基非晶态合金的饱和磁通密度为 1.2T 以下，尚不够充分，还存在热稳定性差的问题。因此，当大电流被偏置时，电流测量受到制约，导致出现不能实现小型化和稳定性不足的问题，另外，考虑到直流重叠并从磁饱和的观点来看，不太能够提高导磁率，因此出现作为电流互感器的重要特性即相对误差和相位差变大的问题。此外，由于含有大量昂贵的 Co，在成本上也不具有优势。

对应 IEC62053-22 等原有规格的积算瓦特计所使用的电流互感器用磁芯中，一直使用的是导磁率较高的坡莫合金等材料。这种高导磁率材料，虽然可以通过正负对称的电流或电压波形对电量进行测量，但不能从非对称的电流波形或歪曲电流波形（非对称电流波形）对电量进行测量。

由于 Fe 基纳米结晶合金具有高透磁率而显示出优良的软磁特性，因此被用于共模扼流圈、高频变压器、脉冲变压器等的磁芯。Fe 基纳米结晶合金的典型组成有特公平 4-4393 号和特开平 1-242755 号中所述的 Fe-Cu-(Nb, Ti, Zr, Hf, Mo, W, Ta)-Si-B、Fe-Cu-(Nb, Ti, Zr, Hf, Mo, W, Ta)-B 等。这些 Fe 基纳米结晶合金，通常从液相或气相进行急冷制成非晶质金属后，再通过热处理使之微结晶化后制成。已知 Fe 基纳米结晶合金具有与 Fe 系非晶态合金同等程度的饱和磁通密度和低磁歪，表现出优良的软磁特性。特开平 1-235213 号、特开平 5-203679 号及特表 2002-530854 号中，记述有 Fe 基纳米结晶合金适宜用作电流传感器（变流器（电流互感器）），该电流传感器被用于漏电断路器和积算瓦特计等。

然而，现有的将坡莫合金或 Fe 基纳米结晶软磁性合金用作磁芯材料的电流互感器用磁芯，因为使用的是高导磁率材料，尤其是直流被偏置的情况下，会出现因为磁芯的磁饱和导致不能进行充分的电流测量的问题。Fe 基纳米结晶软磁性合金磁芯的饱和磁通密度高且导磁率高，因此适用于漏电断路器等电流互感器，但因为 H_k 小，当用于直流电流被偏置的情况

时,存在磁芯发生磁饱和导致电流测量变难的问题。用于半正弦波电流的电流互感器的情况下,将半正弦波电流的峰值设为 I_{\max} 时, $I_{\max}/2\pi$ 的直流电流发生重叠。因此,特表 2002-530854 号等中所述的现有的 Fe 基纳米结晶软磁性合金,因为其导磁率 12000 以上,变为电流互感器的磁芯被偏置直流磁场的状态,磁芯产生磁饱和。因此,不适宜于这种对称波形的电流测量。

所以,需要提供一种磁性材料,即根据非对称电流波形也能对电量进行准确地测量的磁性材料。另外,还要求即使在重叠了直流电流的情况下,也能够从半正弦波电流波形那样的非对称电流波形,对交流电流进行准确的测量。为了满足这样的要求,需要提供一种电流互感器用磁芯,该电流互感器用磁芯使用的材料的剩余磁通密度低、磁滞小、磁化曲线的直线性优良、还具有不易饱和且较大的各向异性磁场 H_k 。

发明内容

因此,本发明的目的在于,提供一种能够根据非对称的电流波形或扭曲电流波形(非对称电流波形)对电量进行准确测量的电流互感器用磁芯。

本发明的另外的目的在于,提供一种可以实现小型化、具有广泛的电流测量范围和热稳定性、廉价的电流互感器用磁芯。

本发明的其他另外的目的在于,提供使用所述磁芯的电流互感器及瓦时计。

鉴于上述目的,经本发明的发明人员的努力研究,终于发现(a)使 Co 及/或 Ni 的含量增加,组织的至少一部分或全部由平均粒径为 50nm 以下的晶粒构成的 Fe 基纳米结晶合金,在 8000Am^{-1} 中的磁通密度 B_{8000} 为 1.2T 以上,各向异性磁场 H_k 为 $150\sim 1500\text{Am}^{-1}$,角形比 B_r/B_{8000} 为 5% 以下, 50Hz 及 0.05Am^{-1} 的交流比初始导磁率 μ_r 为 $800\sim 7000$; (b) 由该合金构成的电流互感器用磁芯,用于对非对称波形或被偏置了直流电流的电流检测用电流互感器时,显示出优良的特性。

即,本发明的电流互感器用磁芯,其特征在于,由合金组成,所述合金具有由通式: $\text{Fe}_{100-x-a-y-c}\text{M}_x\text{Cu}_a\text{M}'_y\text{X}'_c$ (原子%) 表示的组成(其中 M 为 Co 及/或 Ni, M' 为从 V、Ti、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta 及 W 中选出的至少一

种元素, X' 为 Si 及/或 B, x、a、y 及 c 为分别满足 $10 \leq x \leq 50$ 、 $0.1 \leq a \leq 3$ 、 $1 \leq y \leq 10$ 、 $2 \leq c \leq 30$ 及 $7 \leq y+c \leq 31$ 的数字), 组织的至少一部分或全部由平均粒径 50nm 以下的晶粒构成, 在 8000Am^{-1} 的磁通密度 B_{8000} 为 1.2T 以上, 各向异性磁场 H_k 为 $150 \sim 1500 \text{Am}^{-1}$, 角形比 B_r/B_{8000} 为 5% 以下, $50H_z$ 及 0.05Am^{-1} 中的交流比初始导磁率 μ_r 为 800~7000。

在本发明的电流互感器用磁芯中, M 的含量 x 优选为 $15 \leq x \leq 40$ 。B 的含量优选为 4~12 原子%。Si 的含量优选为 0.5~17 原子%。

在本发明的电流互感器用磁芯中, 也可以用从 Cr、Mn、Sn、Zn、In、Ag、Au、Sc、铂族元素、Mg、Ca、Sr、Ba、Y、稀土类元素、N、O 以及 S 中选出的至少一种的元素置换 M' 的一部分。另外, 也可以用从 C、Ge、Ga、Al、Be 及 P 中选出的至少一种的元素置换 X' 的一部分。

本发明的电流互感器用磁芯, 可以通过向磁芯的高度方向施加 40kAm^{-1} 以上的磁场, 同时, 在 $450^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{C}$ 的温度保持 24 小时以下的时间, 然后冷却到室温, 再在磁场中进行热处理后制备而成。

本发明的电流互感器用磁芯, 优选用于对半正弦波交流电流进行测量。

本发明的电流互感器, 其特征在于, 具备上述的电流互感器用磁芯、一次绕组、至少一个的二次检测绕组、被与上述二次检测绕组并列连接的负载电阻。

在本发明的电流互感器中, 优选为一次绕组为一匝。另外, 优选为 23°C 温度下额定电流范围中的相位差在 5° 以内, 相对误差的绝对值在 3% 以内。

本发明的瓦时计, 其特征在于, 通过对上述电流互感器获得的电流值和当时的电压进行积算处理, 计算出用电量。

本发明的电流互感器用磁芯, 具有低剩余磁通密度、小磁滞、直线性优良的磁化曲线、以及不易饱和且较大的各向异性磁场 H_k , 因此可以提供小型、具有广泛的测量电流范围、热稳定性良好、廉价的电流互感器及瓦时计。即使是半正弦波电流波形这样的非对称电流波形或重叠了直流电流的交流电流, 也可以进行准确的交流电流测量。

附图说明

图 1 是表示用于本发明的电流互感器用磁芯的 $\text{Fe}_{83-x}\text{Co}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_7\text{Si}_1\text{B}_8$ (原子%) 合金在 8000Am^{-1} 中的磁通密度 B_{8000} 的曲线图。

图 2 是表示用于本发明的电流互感器用磁芯的 $\text{Fe}_{83-x}\text{Co}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_7\text{Si}_1\text{B}_8$ (原子%) 合金的角形比 B_r/B_{8000} 的曲线图。

图 3 是表示用于本发明的电流互感器用磁芯的 $\text{Fe}_{83-x}\text{Co}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_7\text{Si}_1\text{B}_8$ (原子%) 合金的保磁力 H_c 的曲线图。

图 4 是表示用于本发明的电流互感器用磁芯的 $\text{Fe}_{83-x}\text{Co}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_7\text{Si}_1\text{B}_8$ (原子%) 合金在 50Hz 及 0.05Am^{-1} 中的交流比初始导磁率 μ_r 的曲线图。

图 5 是表示用于本发明的电流互感器用磁芯的 $\text{Fe}_{83-x}\text{Co}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_7\text{Si}_1\text{B}_8$ (原子%) 合金的各向异性磁场 H_k 的曲线图。

图 6 是表示用于本发明的电流互感器用磁芯的 $\text{Fe}_{83-x}\text{Co}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_7\text{Si}_1\text{B}_8$ (原子%) 合金磁芯与 Co 基非晶态合金磁芯的直流磁滞回线 (B-H Loop) 的曲线图。

图 7 是表示用于本发明的电流互感器用磁芯的 $\text{Fe}_{83-x}\text{Co}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_7\text{Si}_1\text{B}_8$ (原子%) 合金在 50Hz 中的交流比初始导磁率 μ_r 的磁场依存性的曲线图。

图 8 是表示本发明的电流互感器 (CT) 型电流传感器的一例的立体图。

图 9 是表示电流互感器磁芯的磁化困难轴方向的磁滞回线中的各向异性磁场 H_k 的曲线图。

具体实施方式

[1] Fe 基纳米结晶合金

(1) 组成

本发明的电流互感器用磁芯的 Fe 基纳米结晶合金, 具有由通式: $\text{Fe}_{100-x-a-y-c}\text{M}_x\text{Cu}_a\text{M}'_y\text{X}'_c$ (原子%) 表示的组成 (其中 M 为 Co 及/或 Ni, M' 为从 V、Ti、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta 及 W 中选出的至少一种的元素, X' 为 Si 及/或 B, x、a、y 及 c 为分别满足 $10 \leq x \leq 50$ 、 $0.1 \leq a \leq 3$ 、 $1 \leq y \leq 10$ 、 $2 \leq c \leq 30$ 及 $7 \leq y+c \leq 31$ 的数字)。

M 为 Co 及/或 Ni, 增大感应磁各向异性, 改善磁滞回线的直线性, 调整各向异性磁场 H_k , 对半正弦波交流电流等进行检测时, 即使处于直流电

流被偏置的状态，也可以作为电流互感器发挥作用。M 的量 x 为 $10 \leq x \leq 50$ 。当 x 小于 10 原子%时 H_k 小，直流被重叠时磁芯产生饱和，使电流测量变得困难。当 x 超过 50 原子%时 H_k 变得过大，相位差和相对误差的绝对值增加过多。M 的量 x 优选为 $15 \leq x \leq 40$ ，更优的是 $18 \leq x \leq 37$ ，最优的是 $22 \leq x \leq 35$ 。 x 在 10~50 的范围内时，即使重叠直流电流，也可以对电流进行准确的测量，因此可以获得高精度且具有平衡性的电流互感器。

Cu 的量 a 为 $0.1 \leq a \leq 3$ ， a 小于 0.1 原子%时相位差变大， a 超过 3 原子%时材料脆化，使磁芯成行变得困难。因此优选为 Cu 的量 a 为 $0.3 \leq a \leq 2$ 。

M' 为促进非晶态形成的元素。M' 为从 V、Ti、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta 及 W 中选出的至少一种的元素，其量 y 位于 $1 \leq y \leq 10$ 的范围。 y 小于 1 原子%时热处理后不能获得微细的晶粒组织，相位差和相对误差的绝对值变大。当 y 超过 10 原子%时，饱和磁通密度显著下降导致 H_k 减少，直流被偏置的情况下，磁饱和导致电流测量变得困难。M' 的量 y 优选为 $1.5 \leq y \leq 9$ 。

X' 也是促进非晶态形成的元素。X' 为 Si 及/或 B，其量 c 的范围是 $2 \leq c \leq 30$ 。X' 的量 c 小于 2 原子%时，相位差和相对误差的绝对值变大。当 c 超过 30 原子%时，饱和磁通密度显著下降导致 H_k 减少，直流被偏置的情况下，磁饱和导致电流测量变的困难。X' 的量 c 优选为 $5 \leq c \leq 25$ ，更优的是 $7 \leq c \leq 24$ 。

X' 的量 c 和 M' 的量 y 的合计满足 $7 \leq y+c \leq 31$ 的条件。 $y+c$ 小于 7 原子%时，会导致相位差显著增加，超过 31 原子%时饱和磁通密度下降。 $y+c$ 的量优选为 $10 \leq y+c \leq 28$ ，更优的是 $13 \leq y+c \leq 27$ 。

为了获得相位差小的电流互感器用磁芯，优选为 B 的含量为 4~12 原子%，更优的是 B 的含量为 7~10 原子%。另外，Si 的含量为 0.5~17 原子%时，相位差和相对误差的绝对值小，即使对半正弦波交流电流进行测量时偏置直流电流，也能够获得优良的电流测量精度。更优的是 Si 的含量为 0.7~5 原子%。

为了调整合金的耐蚀性、相位差及相对误差，也可以用从 Cr、Mn、Sn、Zn、In、Ag、Au、Sc、铂族元素、Mg、Ca、Sr、Ba、Y、稀土类元

素、N、O 以及 S 中选出的至少一种的元素置换 M' 的一部分。另外，为了调整相位差及相对误差，也可以用从 C、Ge、Ga、Al、Be 及 P 中选出的至少一种的元素置换 X' 的一部分。

(2) 制造方法

本发明的电流互感器用磁芯的制备方法如下：通过单辊法等超急冷法对所述组成的合金熔液进行急冷，一旦制成非晶态合金薄带后，根据需要对该薄带进行槽加工，卷绕成环形后制成卷磁芯，再升温到结晶化温度以上进行热处理，形成平均粒径 50nm 以下的微结晶。优选为热处理前的非晶态合金薄带不含有结晶相，但也可以在一部分中含有结晶相。不含有活性金属时，单辊法等超急冷法可以在大气中进行，但含有活性金属时，需要在 Ar、He 等惰性气体或真空中进行。另外，也可以在含有氮气、一氧化碳或二氧化碳气体的气氛中制造。合金薄带的表面粗度 Ra 越小越好，具体就是优选为 $5\ \mu\text{m}$ 以下，更优为 $2\ \mu\text{m}$ 以下。

根据需要，通过被覆 SiO_2 、 MgO 、 Al_2O_3 等、化成处理、阳极氧化处理等在合金薄带的至少一面上形成绝缘层的话，对包含高频成分的电流感进行测量时，可以获得高精度的测量结果。为了防止空间系数下降，绝缘层的厚度优选为 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下。

卷绕非晶态合金薄带制成卷磁芯后，为了获得性能差别小的磁芯，在氩气、氮气、氦气等惰性气体或真空中进行热处理。在进行热处理中的至少一部分的期间内，向合金施加饱和和所需的充分强度（例如 40kAm^{-1} 以上）的磁场，付与磁各向异性。施加的磁场方向为卷磁芯的高度方向。施加的磁场可以是直流、交流、脉冲磁场的任何一种。在 200°C 温度下，通常施加 20 分钟以上的磁场，且在升温中，保持在一定温度中时，以及冷却中也施加磁场的话，角形比变小，磁滞回线的直线性也得到提高，可以获得相位差和相对误差的绝对值小的电流互感器。与此相对，不适用磁场中热处理的情况下，作为电流互感器的性能显著下降。

热处理时的最高温度在结晶化温度以上，具体为 $450^\circ\text{C}\sim 700^\circ\text{C}$ 。 $^\circ\text{C}$ 温度下 $^\circ\text{C}$ 温度下，在保持在一定温度进行热处理的方式中，从量产性的观点来看，保持时间通常在 24 小时以下，优选为 4 小时以下。热处理时的平均升温速度优选为 $0.1\sim 100^\circ\text{C}/\text{分}$ ，更优为 $0.1\sim 50^\circ\text{C}/\text{分}$ 。另外，平均冷却速

度优选为 $0.1\sim 50^{\circ}\text{C}/\text{分}$ ，更优为 $0.1\sim 10^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 。冷却一直进行到室温为止。通过该热处理，特别是可以获得直线性良好的磁滞回线，制成相位差小且相对误差的绝对值变化小的电流互感器。

热处理并不局限于一次，也可以进行多次。对大磁芯或多个磁芯进行热处理时，优选为或者从结晶化温度附近起低速升温，或者将温度保持在结晶化温度附近，缓慢地进行结晶化。这样可以防止结晶化时磁芯温度过度升高引起的性能劣化。优选为通过电炉进行热处理，但也可以采用向合金通入直流、交流或脉冲电流使合金发热的方法。

为了防止制备的磁芯的性能发生劣化，优选为将其放置在不施加应力的酚醛树脂等的绝缘性盒子中，根据需要，还可以进行树脂浸渍或树脂被覆。通过在装有磁芯的盒子上卷绕检测绕组，制成电流互感器。本发明的电流互感器磁芯，用于检测被重叠了直流的电流时能够发挥出最好的性能，特别适用于对扭曲波形进行测量的对应 IEC62053-21 规格的积算瓦特计用电流互感器。

(3) 结晶构造

用于本发明的电流互感器用磁芯的 Fe 基纳米结晶合金，其至少一部分或全部中具有平均粒径 50nm 以下的晶粒。优选为晶粒的比例占到组织的 30% 以上，较优的是 50% 以上，特优的为 60% 以上。为了获得相位差和相对误差的绝对值小的电流互感器用磁芯，平均粒径优选为 $2\sim 30\text{nm}$ 。

Fe 基纳米结晶合金中的晶粒，主要具有以 FeCo 或 FeNi 为主体的体心立方结构 (bcc)，也可以固溶 Si、B、Al、Ge、Zr 等，也可以含有规则晶格。另外，合金中也可以部分含有包含 Cu 的面心立方 (fcc) 相。优选为不含有化合物相，但略微含有亦可。

合金中存在晶粒以外的相时，该相主要是非晶态相。当非晶态相位于晶粒的周围时，在晶粒生长的抑制下晶粒被微细化，合金的电阻率变高，磁化的磁滞变小，因此电流互感器的相位差得到改善。

(4) 特性

(a) 磁通密度

Fe 基纳米结晶合金的 8000Am^{-1} 中的磁通密度 B_{8000} 必须在 1.2T 以上。 B_{8000} 小于 1.2T 时，不能将各向异性磁场 H_k 增大，在施加大的直流偏置的

用途或测量电流大的情况下，电流互感器不能充分发挥其性能。可以通过调整合金组成，将 B_{8000} 提高到 1.6T 以上，更优的是提高到 1.65T 以上。

(b) 各向异性磁场

各向异性磁场 H_k 是表示磁芯的饱和磁场的物理值，如图 9 所示，相当于磁滞回线的屈曲点中的磁场。本发明的电流互感器用磁芯具有 $150\sim 1500\text{Am}^{-1}$ 的各向异性磁场 H_k 。饱和磁通密度高的同时，具有该范围各向异性磁场 H_k ，可以获得磁滞小，且具有直线性优良的磁滞回线的电流互感器用磁芯。

(c) 角形比

Fe 基纳米结晶合金的角形比 B_r/B_{8000} 必须在 5% 以下。 B_r/B_{8000} 超过 5% 时，电流互感器的相位差和相对误差的绝对值变大，不仅性能发生劣化，测量大电流后的电流检测的特性容易发生变化。通过调整合金组成，可以将 B_r/B_{8000} 降低到 3% 以下，甚至 2.5% 以下。在此， B_r 表示剩余磁通密度， B_{8000} 为施加 8000Am^{-1} 的磁场时的磁通密度。

(d) 交流比初始导磁率

Fe 基纳米结晶合金的 50Hz 及 0.05Am^{-1} 中的交流比初始导磁率 μ_r 为 $800\sim 7000$ 。由具有这样的交流比初始导磁率 μ_r 的 Fe 基纳米结晶合金构成的电流互感器用磁芯，在对半波波形或被偏置了直流的电流进行测量时，可以进行相位差小且相对误差的绝对值小的电流转换。通过调整合金组成，还可以将交流比初始导磁率 μ_r 定为 5000 以下，甚至 4000 以下。

[2] 电流互感器及瓦时计

本发明的电流互感器，具备上述磁芯、一次绕组、至少一个的二次检测绕组、被与二次检测绕组并列连接的负载电阻。一次绕组通常为一匝。本发明的电流互感器，相位差和相对误差的绝对值小，即使在半波波形的电流或直流偏置电流的情况下，也可以容易地进行修正而对电流进行精确的测量。本发明的电流互感器，对应测量的电流规格在检测绕组上安装电阻。特别是本发明的电流互感器，在对半正弦波交流电流进行测量时，可以实现额定电流范围中的相位差为 5° 以下，相对误差的绝对值在 3% 以内的高精度测量。再者，与现有的使用坡莫合金或 Co 基非晶态合金的电流互感器相比，本发明的电流互感器具有优良的温度特性。

由本发明的电流互感器组成的瓦时计，可以对应适用于扭曲波形（半波整流波形）的 IEC62053-21 规格，因此能够对扭曲电流波形进行测量。

以下，通过实施例对本发明进行更详细的说明，但本发明并不局限于此。

实施例 1

通过单辊法对 $\text{Fe}_{83-x}\text{Co}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_7\text{Si}_1\text{B}_8$ （原子%）的合金熔液进行急冷，制成宽 5mm、厚 $21\ \mu\text{m}$ 的非晶态合金薄带。将该非晶态合金薄带卷制成外径为 30mm、内径为 21mm 的环形磁芯。把磁芯插入到氮气气氛的热处理炉中，向与磁芯的磁路垂直的方向（合金薄带的宽度方向，即磁芯的高度方向）施加 280kAm^{-1} 的磁场，同时进行了热处理。热处理方式是进行 $10^\circ\text{C}/\text{分}$ 的升温，在 550°C 温度下保持一个小时，以及进行 $2^\circ\text{C}/\text{分}$ 的冷却。用电子显微镜进行观察，结果发现热处理后的合金组织的 70% 左右由粒径 10nm 左右的体心立方结构的晶粒构成，在结晶相中还发现一部分规则晶格。剩余部分的组织主要为非晶态相。从 X 线衍射图形来看，可见表示体心立方结构相的结晶峰值。

对该 $\text{Fe}_{83-x}\text{Co}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_7\text{Si}_1\text{B}_8$ （原子%）合金的 8000Am^{-1} 中的磁通密度 B_{8000} 、角形比 B_r/B_{8000} 、保磁力 H_c 、 50Hz 及 $0.05\ \text{Am}^{-1}$ 中的交流比初始导磁率 μ_r 、以及各向异性磁场 H_k 进行了测量。其结果如图 1~5 所示。该合金中的 Co 在 3~50 原子% 的范围内时，显示出较高的磁通密度 B_{8000} 。当 Co 在 3~50 原子% 的范围时，角形比 B_r/B_{8000} 低，在 5% 以下。当 Co 在 3~50 原子% 的范围时，保磁力 H_c 较低，但 Co 超过 50 原子% 时，保磁力 H_c 急剧增加。交流比初始导磁率 μ_r 随着 Co 量的增加而减少，当 Co 量为 3 原子% 以上时为 7000 以下；当 Co 量超过 50 原子% 时变为小于 800。各向异性磁场 H_k 随着 Co 量的增加而增加，当 Co 量为 3 原子% 以上时为 150Am^{-1} 以上，当 Co 量为 50 原子% 时为 1500Am^{-1} 。

在 $x=25$ 原子% 的磁芯上卷绕一匝的一次绕组及 2500 匝的二次检测绕组，与二次检测绕组并列连接 $100\ \Omega$ 的负载电阻，制成电流互感器。向一次绕组通入 50Hz 及 30A 的正弦波交流电流，对 23°C 时的相位差和相对误差（用绝对值表示）进行了测量，结果发现 Co 量 x 为 0at% 时的相位差 θ 为 0.5° ，相对误差 RE 为 0.1%。另外，Co 量 x 为 16 原子% 时的相位差

θ 为 1.3° ，相对误差 RE 为 0.2%；Co 量 x 为 25 原子%时的相位差 θ 为 2.5° ，相对误差 RE 为 1.7%；Co 量 x 为 30 原子%时的相位差 θ 为 2.6° ，相对误差 RE 为 1.1%。另外，通过下述标准，对能否测量峰值为 30A 的半正弦波交流电流进行了评价。其结果如表 1 所示。

○：进行了精确的测量。

△：可以进行测量，但不精确。

×：不能进行测量。

[表 1]

Co 量 x (原子%)	0	1	3	16	25	30	40	50	70	80
可否测量	×	×	△	○	○	○	○	○	○	×

由 Co 量 x 为 10~50 的 Fe 基纳米结晶合金组成的本发明的电流互感器磁芯，可以对半正弦波交流电流等直流重叠电流进行检测。另外，所示相位差及相对误差的绝对值为小值，分别为 3° 以下和 2% 以下。

实施例 2

在 Ar 气氛中通过单辊法对表 2 所示组成的合金熔液进行急冷，制成宽 5mm、厚 $21\mu\text{m}$ 的非晶态合金薄带。将该非晶态合金薄带卷制成外径为 30mm、内径为 21mm 的环形磁芯。对各磁芯施加与实施例 1 同样的热处理后，进行磁性测量。在热处理后的合金组织中形成了粒径 50nm 以下的极微细的晶粒。No.33 为比较例的 Fe 基纳米结晶合金的磁芯，No.34 为比较例的 Co 基非晶态金属的磁芯，No.35 为比较例的坡莫合金的磁芯。

与实施例 1 相同，对用各磁芯制成的电流互感器在 23°C 时的额定电流的相位差及相对误差（用绝对值表示）、磁通密度 B_{8000} 、角形比 B_r/B_{8000} 、交流比初始导磁率 μ_r 、以及各向异性磁场 H_k 进行了测量。另外，通过下述标准，对能否测量峰值为 30A 的半正弦波交流电流进行了评价。结果如表 2 所示。

○：能够进行准确的测量。

×：不能进行准确的测量。

[表 2]

No.	組成 (原子%)	B ₈₀₀₀ (T)	B _r /B ₈₀₀₀ (%)	μ _r
1	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Nb ₃ Si ₉ B ₉	1.51	1	2200
2	Fe _{ba1} Co _{15.3} Cu ₁ Nb ₃ Si ₁₀ B ₉	1.47	1	3400
3	Fe _{ba1} Ni _{15.3} Cu ₁ Nb _{2.5} Si ₉ B ₉	1.28	1	1700
4	Fe _{ba1} Co ₁₀ Ni ₁₀ Cu _{0.8} Nb _{2.5} Si ₉ B ₉	1.38	2	1900
5	Fe _{ba1} Co ₂₀ Cu ₁ Nb ₃ Si ₁₃ B ₉ Mn _{0.5}	1.26	1	2700
6	Fe _{ba1} Co ₂₅ Cu _{0.9} Nb _{2.5} Si _{15.5} B ₇ Cr _{0.5}	1.23	1	2400
7	Fe _{ba1} Co ₂₅ Cu ₁ Nb _{2.9} Si _{16.5} B ₇ Sn _{0.1}	1.24	1	2300
8	Fe _{ba1} Co ₂₅ Cu ₁ Nb ₃ Si ₁₅ B _{6.5} Zn _{0.1}	1.27	1	2300
9	Fe _{ba1} Co ₂₅ Cu _{0.6} Nb _{2.6} Si ₈ B ₁₀ In _{0.1}	1.59	1	2400
10	Fe _{ba1} Co ₃₅ Cu ₁ Nb ₃ Si ₉ B ₉ Ag _{0.1}	1.52	1	1800
11	Fe _{ba1} Co ₂₅ Cu _{0.5} Nb ₃ Si ₁₀ B ₉ Au _{0.5}	1.50	1	2200
12	Fe _{ba1} Co ₂₅ Cu ₁ Nb ₃ Si ₉ B ₉ Sc _{0.1}	1.51	1	2400
13	Fe _{ba1} Co ₂₅ Cu ₁ Nb ₃ Si ₉ B ₉ Pt _{0.1}	1.52	1	2300
14	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Nb ₃ Si ₉ B ₉ Pd _{0.1}	1.52	1	2200
15	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Nb ₂ Si ₇ B ₁₂ Ru _{0.1}	1.54	1	2100
16	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Nb ₃ Si ₉ B ₉ Mg _{0.01}	1.53	1	2200
17	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Nb _{2.6} Si ₉ B ₉ Ca _{0.01}	1.53	1	2100
18	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Nb _{2.7} Si ₉ B ₉ Sr _{0.01}	1.52	1	2100
19	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Nb ₃ Si ₉ B ₉ Co _{0.01}	1.51	2	2100
20	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Nb ₃ Si ₉ B ₉ Ge _{0.5}	1.50	1	2100
21	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Nb ₃ Si ₁₀ B ₉ Ga _{0.5}	1.52	1	2200
22	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Nb ₃ Si ₁₀ B ₉ Al ₂	1.49	2	1800
23	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Nb ₇ Si ₂ B ₉ P ₁	1.71	1	1100
24	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Nb ₇ Si ₁ B ₉ Ba _{0.5}	1.72	1	1200
25	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Zr ₇ Si ₁ B ₉ Sm _{0.01}	1.70	2	1100
26	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu _{0.5} Hf ₇ Si ₉ B ₉ Nd _{0.01}	1.71	2	1100
27	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu _{1.5} Ta ₃ Si ₉ B ₉ Be _{0.1}	1.50	1	2200
28	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Mo ₃ Si ₁₀ B ₉	1.48	3	2100
29	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Nb ₃ V ₁ Si ₉ B ₉	1.47	2	2000
30	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ W ₃ Si ₁₀ B ₉	1.46	3	1900
31	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Zr ₇ B ₈	1.76	2	1000
32	Fe _{ba1} Co ₃₀ Cu ₁ Zr ₇ Si ₃ B ₄	1.75	3	1100
33*	Fe _{ba1} Cu ₁ Nb ₃ Si _{15.7} B ₇	1.2	2.6	82000
34*	非晶态 Co _{ba1} Fe _{1.5} Mn ₁ Si ₅ B ₁₇	1.0	1	1500
35*	坡莫合金	0.75	12	36000

注: *比较例

表 2 (续)

No.	H_K (A/m)	相对误差 RE (%)	相位差 θ ($^\circ$)	可否测量
1	590	2.1	2.5	○
2	326	0.1	1.2	○
3	445	1.8	3.2	○
4	628	0.9	1.4	○
5	429	0.8	1.3	○
6	400	1.8	1.7	○
7	410	1.8	2.4	○
8	420	1.7	2.5	○
9	517	0.8	2.3	○
10	612	1.8	3.0	○
11	500	0.9	2.4	○
12	505	0.8	2.2	○
13	505	0.9	2.4	○
14	495	0.9	2.4	○
15	500	1.0	2.5	○
16	500	0.9	2.4	○
17	510	1.0	2.5	○
18	500	1.1	2.5	○
19	498	1.0	2.5	○
20	494	1.0	2.5	○
21	506	0.9	2.3	○
22	486	1.3	2.7	○
23	1150	3.0	3.6	○
24	1100	2.9	3.4	○
25	1160	3.0	3.6	○
26	1180	2.9	3.4	○
27	610	0.9	2.4	○
28	520	1.0	2.4	○
29	550	1.2	2.8	○
30	500	1.2	2.6	○
31	1200	3.0	3.7	○
32	1130	2.9	3.5	○
33*	12.8	0.08	0.4	×
34*	490	3.5	4.5	○
35*	17.8	0.20	0.21	×

注：* 比较例。

从表 2 的数据可知，本发明的电流互感器磁芯的相位差和相对误差的绝对值小，即使在半正弦波交流电流这样的非对称的电流波形的情况下，也可以作为电流互感器使用。与此相对，现有的 Fe 基纳米结晶合金磁芯（No.33）和坡莫合金（No.35），难以对半正弦波交流电流进行准确的测量。另外，现有的 Co 基非晶态合金磁芯（No.34）的相位差和相对误差的绝对值大于本发明的电流互感器磁芯。本发明的电流互感器磁芯可以用于积算瓦特计和工业设备等广泛领域的电流互感器。

实施例 3

通过单辊法对 $\text{Fe}_{53.8}\text{Co}_{25}\text{Cu}_{0.7}\text{Nb}_{2.6}\text{Si}_9\text{B}_9$ (原子%) 的合金熔液进行急冷, 制成宽 5mm、厚 $21\ \mu\text{m}$ 的非晶态合金薄带。将该非晶态合金薄带卷制成外径为 30mm、内径为 21mm 的环形磁芯。

将磁芯插入到氮气气氛的热处理炉中, 进行与实施例 1 相同的热处理。但, 热处理方式为进行 $5^\circ\text{C}/\text{分}$ 的升温, 在 530°C 温度下保持两个小时, 以及进行 $1^\circ\text{C}/\text{分}$ 的冷却。用电子显微镜进行观察, 结果发现热处理后的合金组织的 72% 左右由粒径 10nm 左右的体心立方结构的晶粒构成, 剩余部分的组织主要为非晶态相。从 X 线衍射图形来看, 可见表示体心立方结构相的结晶峰值。

从测量的结果可知, 该 $\text{Fe}_{53.8}\text{Co}_{25}\text{Cu}_{0.7}\text{Nb}_{2.6}\text{Si}_9\text{B}_9$ (原子%) 合金的 8000Am^{-1} 中的磁通密度 B_{8000} 为 1.50T; 角形比 B_r/B_{8000} 为 1%; 保磁力 H_c 为 2.1Am^{-1} ; 50Hz 及 $0.05\ \text{Am}^{-1}$ 中的交流比初始导磁率 μ_r 为 2200; 各向异性磁场 H_k 为 406Am^{-1} 。

图 6 所示为本发明的电流互感器磁芯和现有的 Co 基非晶态磁芯 (实施例 2 中制备的比较例 No.34) 的直流磁滞回线的一例。图 7 所示为本发明的电流互感器磁芯在 50Hz 中的交流比初始导磁率 μ_r 的磁场依存性。与具有同程度的 H_k 的 Co 基非晶态磁芯相比, 本发明的电流互感器磁芯的交流比初始导磁率 μ_r 高, 在 H_k 以下的磁场范围中大致显示出一定的交流比初始导磁率 μ_r 。采用该磁芯的本发明的电流互感器, 即使像半正弦波交流电流那样重叠直流也可以使用, 能够表现出优良的特性。

在这些磁芯上卷绕一匝的一次绕组及 2500 匝的二次检测绕组, 与二次检测绕组并列连接 $100\ \Omega$ 的负载电阻, 制成电流互感器。向一次绕组通入 50Hz 及 30A 的正弦波交流电流, 23°C 时本发明的电流互感器的相位差和相对误差分别是 2.0% 及 2.4° , Co 基非晶态的电流互感器分别为 3.6% 及 4.6° 。

使用本发明的电流互感器制成的瓦时计, 不仅能够对正负对称的正弦波交流电流的电量进行测量, 还能够对半正弦波交流电流的电量进行测量。

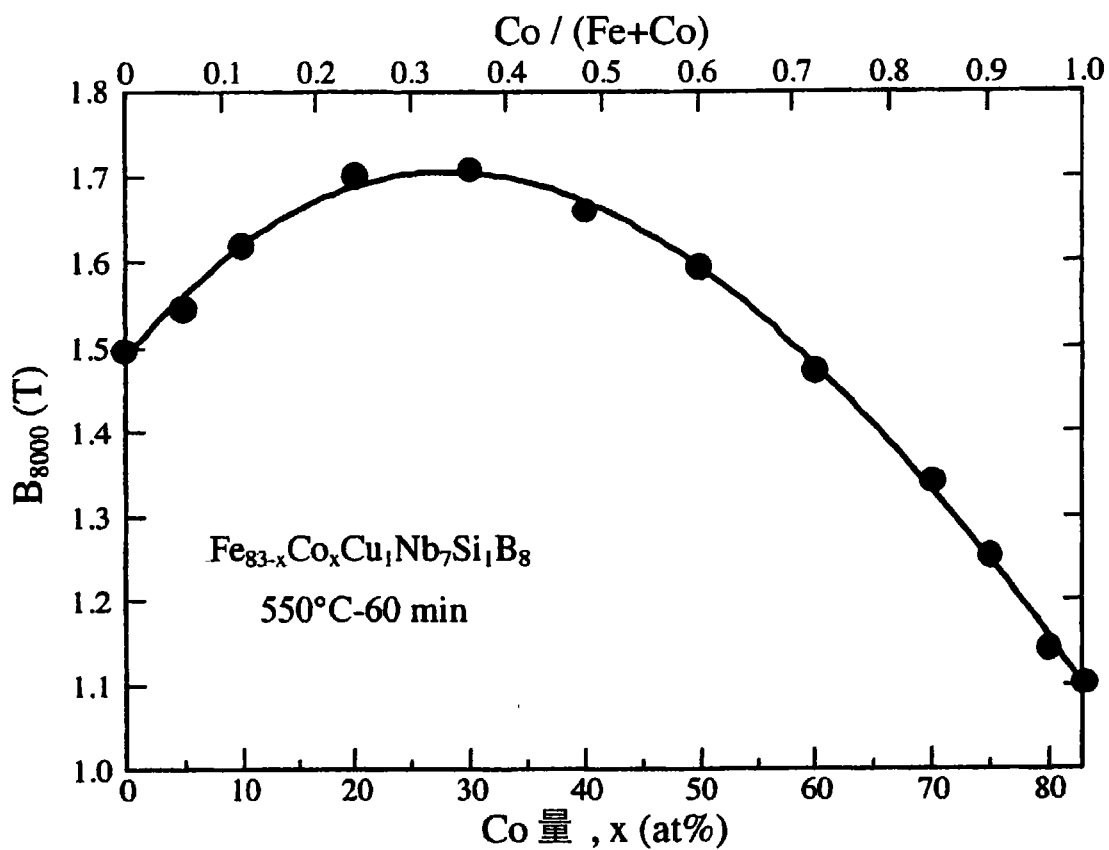


图 1

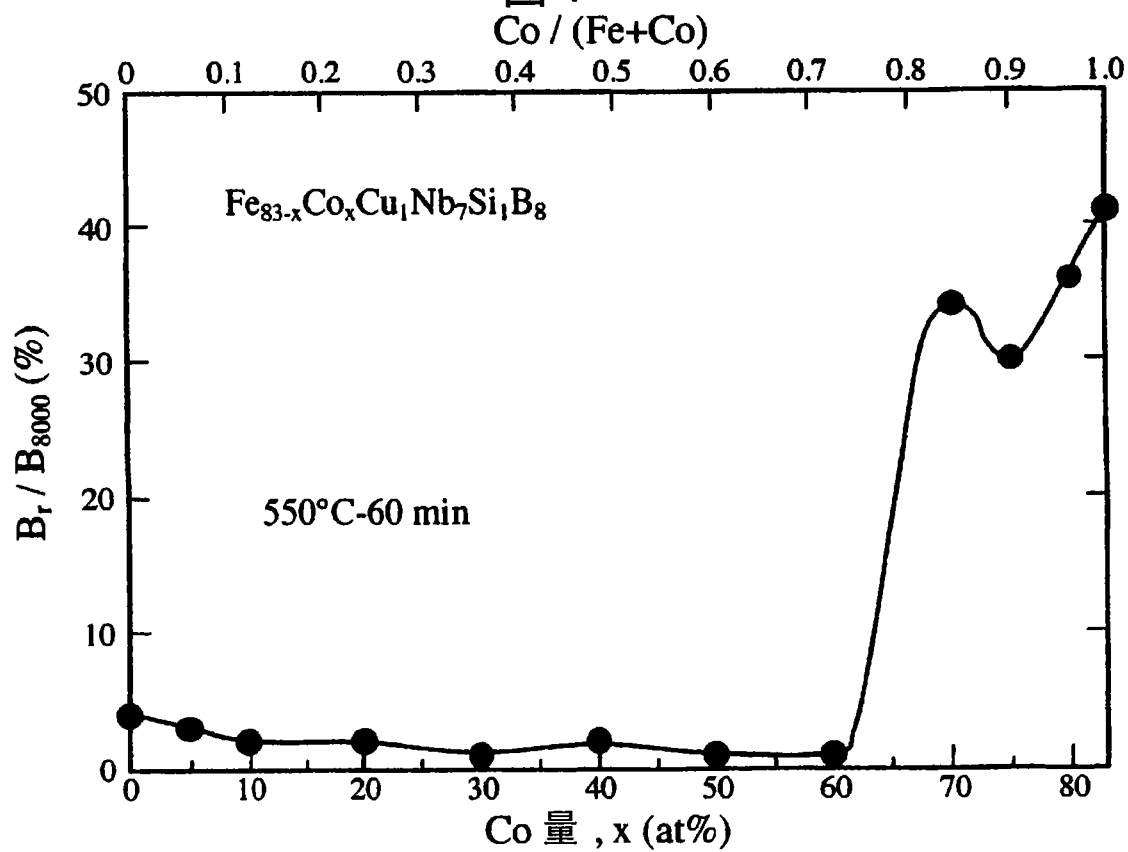


图 2

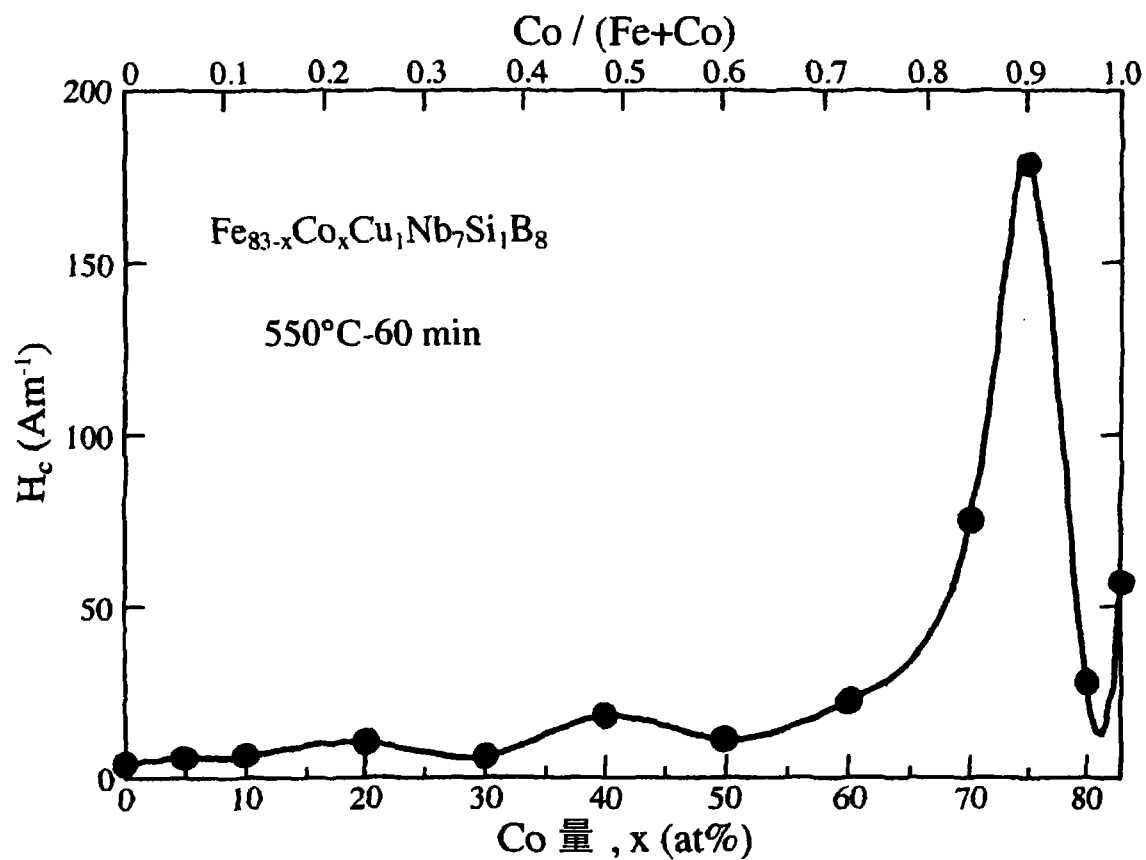


图 3

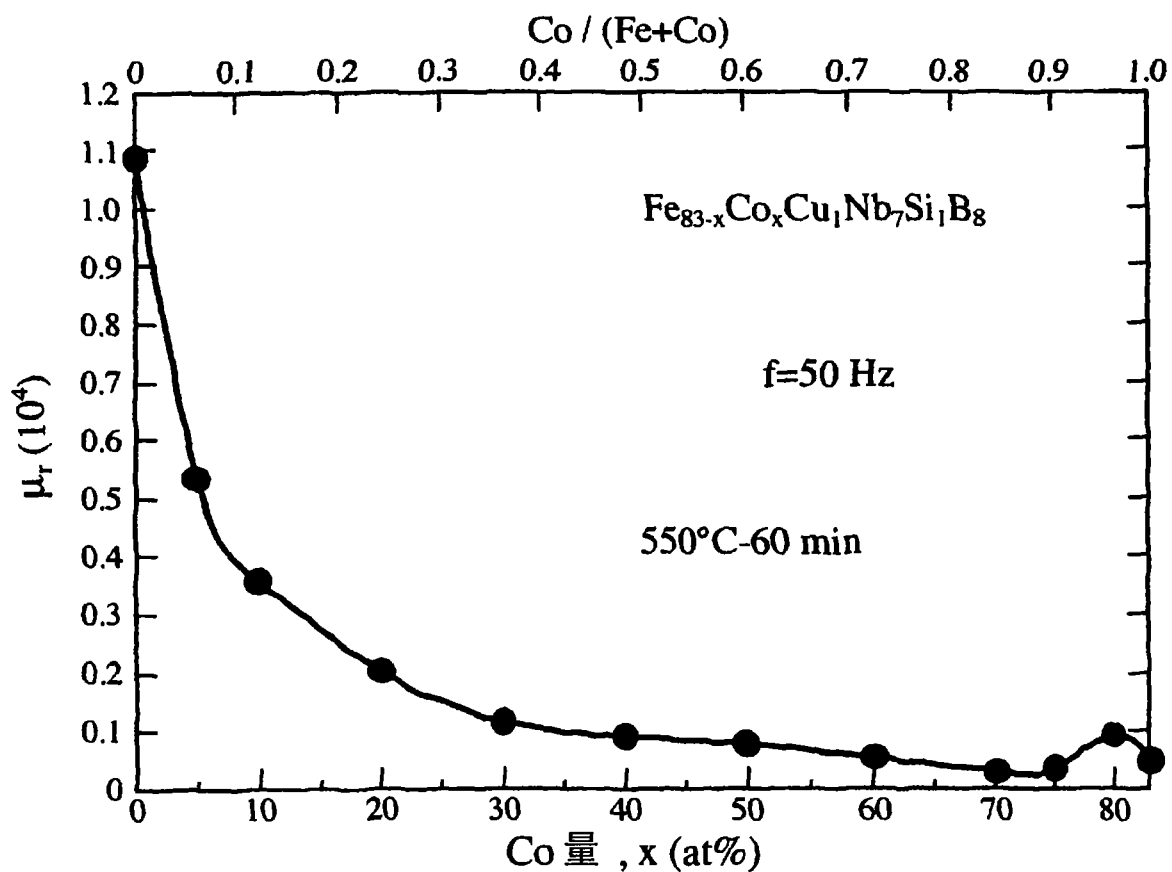


图 4

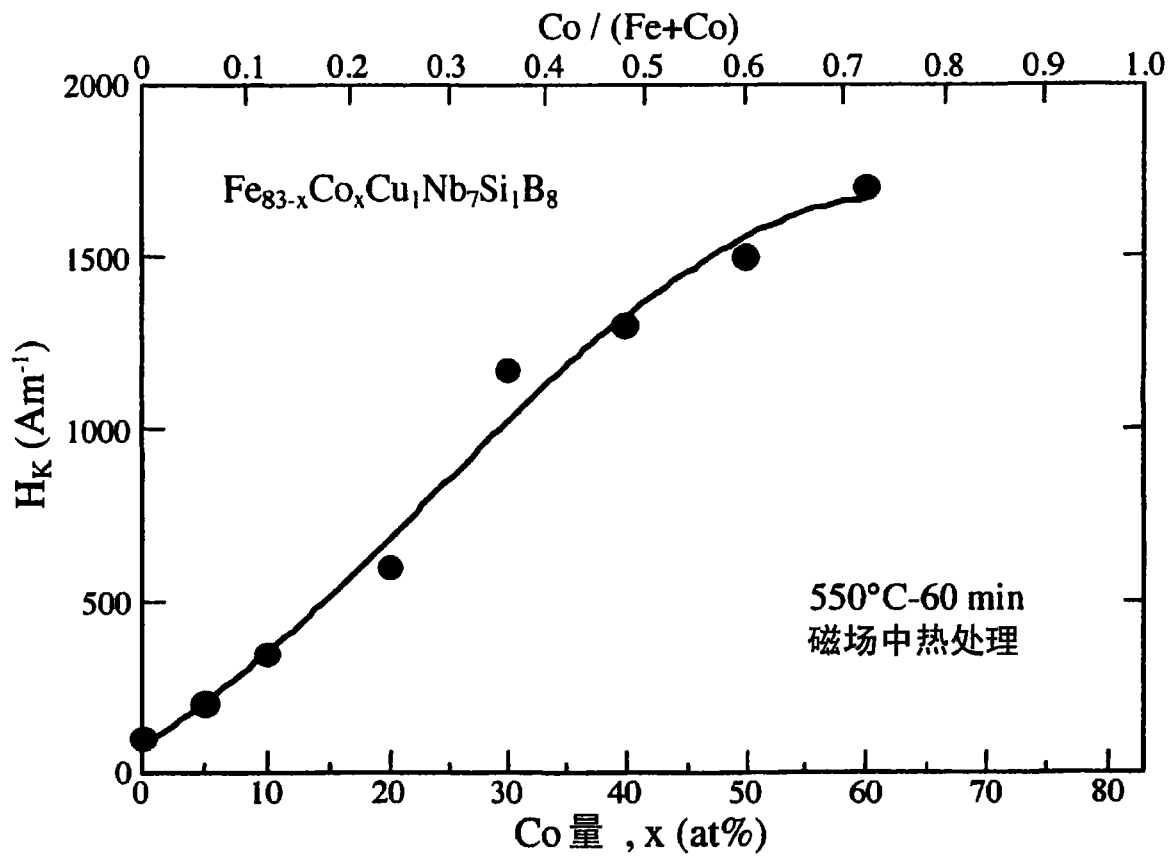


图 5

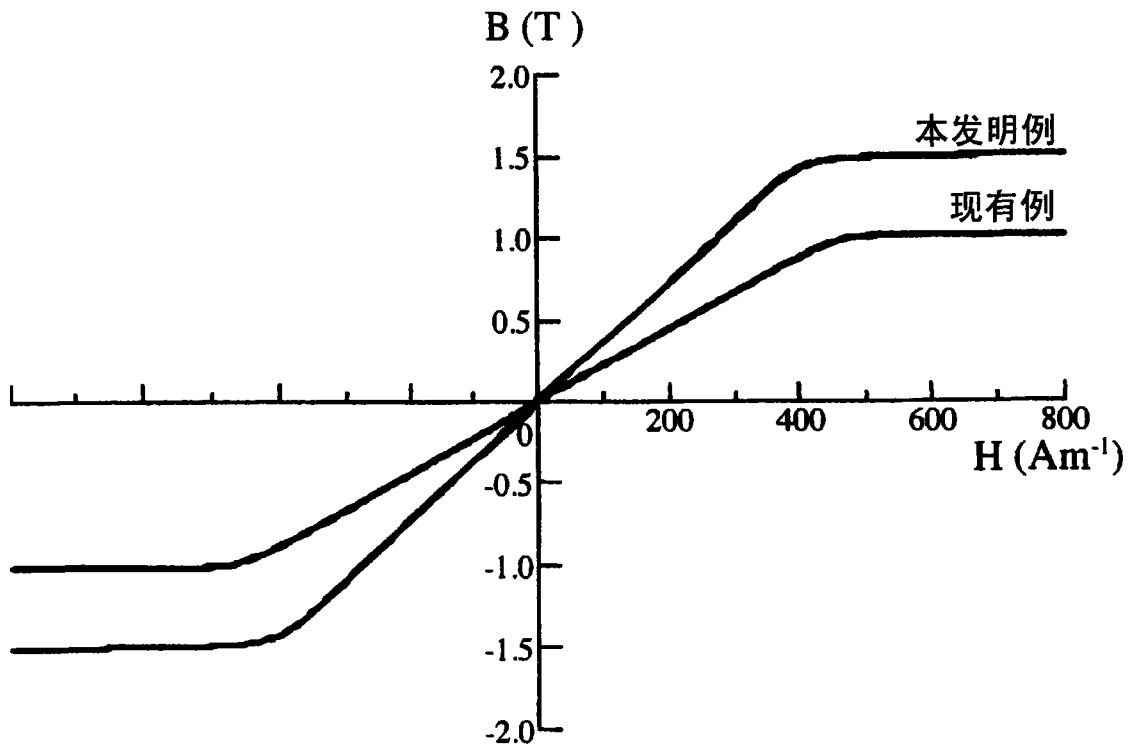


图 6

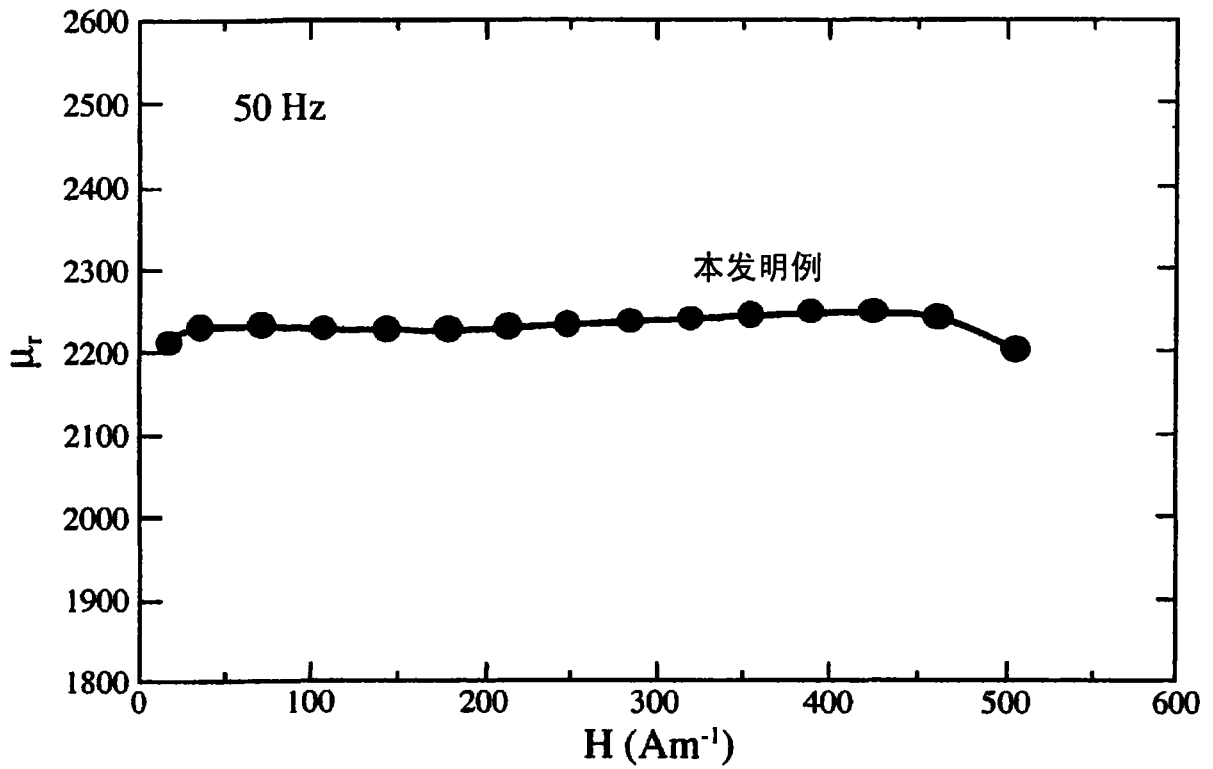


图 7

$$E_0 = I_0 \cdot R_L \cdot K / N$$

理想情况下 (K=1)

$$E_0 = I_0 \cdot R_L / N \quad i = I_0 / N$$

R_L : 负载电阻

K : 耦合系数

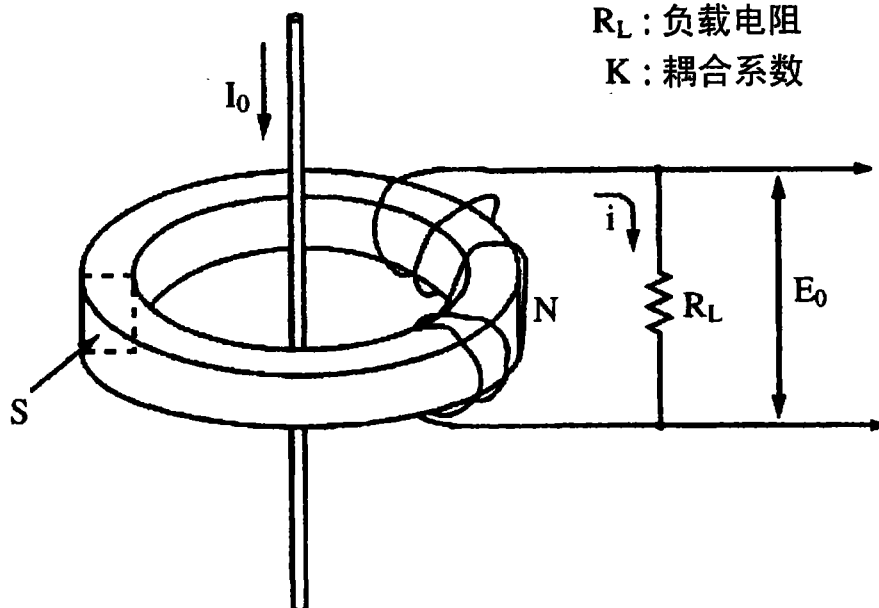


图 8

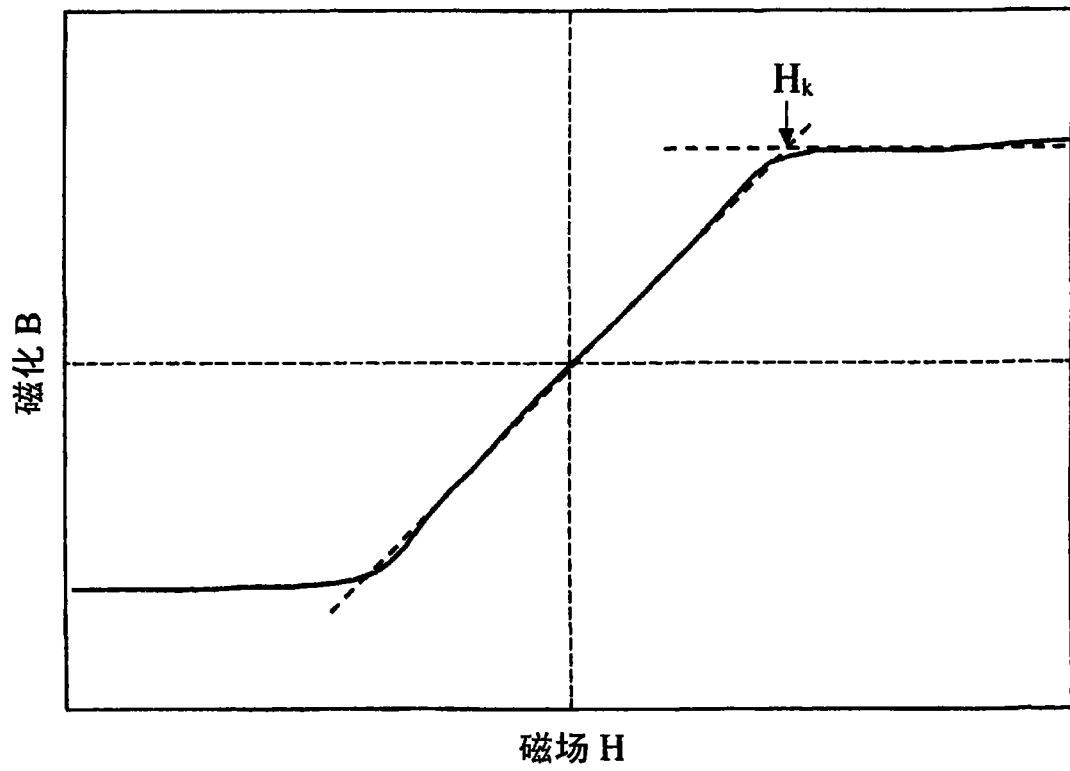


图 9