

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G11B 5/66 (2006.01)

G11B 5/673 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200510083319.6

[45] 授权公告日 2009 年 12 月 16 日

[11] 授权公告号 CN 100570715C

[22] 申请日 2005.7.5

[21] 申请号 200510083319.6

[30] 优先权

[32] 2004.7.5 [33] JP [31] 2004-197775

[73] 专利权人 富士电机电子技术株式会社

地址 日本东京

[72] 发明人 竹野入俊司 酒井泰志

[56] 参考文献

JP2003-346315A 2003.12.5

EP0831475A2 1998.3.25

WO2004/040558A1 2004.5.13

审查员 张 玥

[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司

代理人 周承泽

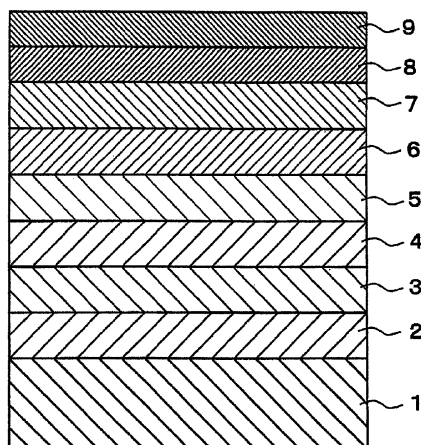
权利要求书 1 页 说明书 17 页 附图 6 页

[54] 发明名称

垂直磁记录介质

[57] 摘要

本发明的目的是提供一种垂直磁记录介质，通过减弱转换场提高易记录性，而不会破坏热稳定性。本发明的垂直磁记录介质中包括第一磁记录层 5 和第二磁记录层 7，其间插入耦合层 6，使两者铁磁耦合。第一和第二磁记录层在 $Hk_1 > Hk_2$ 时满足不等式 $Ku_1 T_1 > Ku_2 T_2$ ，在 $Hk_1 < Hk_2$ 时满足不等式 $Ku_1 T_1 < Ku_2 T_2$ ，其中 Hk_1 和 Hk_2 是各向异性磁场强度， Ku_1 和 Ku_2 是单轴各向异性常数， T_1 和 T_2 分别是第一和第二磁记录层的厚度。磁记录层之间的交换耦合能量优选是至少 5×10^{-3} 尔格/平方厘米。耦合层优选主要由选自 V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Nb, Mo, Ru, Rh, Ta, W, Re 和 Ir 的一种材料构成，厚度不超过 2 纳米。优选至少一个磁记录层具有颗粒结构。



1. 一种垂直磁记录介质，包括非磁性基片，第一磁记录层，直接位于第一磁记录层上的耦合层，和直接位于耦合层上的第二磁记录层，其特征在于：

第一磁记录层和第二磁记录层通过耦合层发生铁磁耦合；

第一磁记录层的易磁化轴和第二磁记录层的易磁化轴大致垂直于非磁性基片平面；和

当 $H_{k1} > H_{k2}$ 时，满足不等式 $K_{u1}T_1 > K_{u2}T_2$ ；当 $H_{k1} < H_{k2}$ 时，满足不等式 $K_{u1}T_1 < K_{u2}T_2$ ，其中 H_{k1} ， K_{u1} 和 T_1 分别是第一磁记录层的各向异性磁场强度，单轴各向异性常数和厚度， H_{k2} ， K_{u2} 和 T_2 分别是第二磁记录层的各向异性磁场强度，单轴各向异性常数和厚度。

2. 如权利要求 1 所述的垂直磁记录介质，其特征在于第一磁记录层和第二磁记录层之间的交换耦合能量至少为 5×10^{-3} 尔格/平方厘米。

3. 如权利要求 1 所述的垂直磁记录介质，其特征在于耦合层由选自 V，Cr，Fe，Co，Ni，Cu，Nb，Mo，Ru，Rh，Ta，W，Re 和 Ir 的一种元素，或者主要包括这些元素中至少一种的合金构成。

4. 如权利要求 1 到 3 中任一项所述的垂直磁记录介质，其特征在于耦合层厚度不超过 2 纳米。

5. 如权利要求 1 到 3 中任一项所述的垂直磁记录介质，其特征在于耦合层的厚度不超过 0.3 纳米。

6. 如权利要求 1 到 3 中任一项所述的垂直磁记录介质，其特征在于第一和第二磁记录层中至少一个层具有颗粒结构，该颗粒结构由非磁性氧化物或非磁性氮化物基体和分散在基体中的磁性晶体颗粒构成。

7. 如权利要求 1 到 3 中任一项所述的垂直磁记录介质，其特征在于在所述第一磁记录层和第二磁记录层中，具有较低各向异性磁场强度 H_k 的磁记录层含有钴和铬，而且该具有较低各向异性磁场强度 H_k 的磁记录层中的铂含量在 0 到 10 原子%的范围内。

8. 如权利要求 7 所述的垂直磁记录介质，其特征在于在所述第一磁记录层和第二磁记录层中，具有较低各向异性磁场强度 H_k 的磁记录层还含有选自 Ta，B，Nb 和 N 的一种元素。

垂直磁记录介质

相关申请交叉引用

本申请基于并要求参考文献中于 2004 年 7 月 5 日提交的日本申请 2004-197775 的优先权。

发明背景

1. 发明领域

本发明涉及安装在各种磁记录设备上的垂直磁记录介质，特别涉及安装在计算机外部存储设备用硬盘驱动器，AV 设备和其他设备上的垂直磁记录介质。

2. 相关领域说明

硬盘驱动器（HDD）的记录密度迅速增加，能够预知将来这种潮流会得以继续。记录密度显著增加的结果是，“热波动”现象的问题引起了人们的注意。热波动现象会导致记录信号保持稳定出问题。在目前常用的纵向磁记录系统中，记录密度越高，导致热波动更明显。为了解决这个问题，开发了垂直磁记录系统，其特征与纵向磁记录系统相反，记录密度增加会导致稳定性略有提高。

要提高磁记录介质中的记录密度，必须促进构成磁记录层的晶粒之间的磁隔绝，并减少磁性反转单元。磁材料的热稳定性（对热波动的承受能力）由 $KuVa$ 表示，该指数是单轴各向异性常数 Ku 和活化体积 Va 的乘积，已知后者与磁性反转单元体积 V 相关。即， $KuVa$ （或 KuV ）降低时，磁记录介质的热稳定性变差。从该指数可知，随着提高记录密度所需磁性反转单元的减少，热稳定性变差。因此，垂直磁记录介质也存在热波动的问题。因此，即使在磁性反转单元减少的情况下，也必须增大 Ku 以保持热稳定性。

同时，已知在 HDD 中进行记录所需的磁场强度大致正比于 Ku 。所以，增大 Ku 以保持热稳定性，会使进行记录所需的磁场强度升高。如果磁场强度的增大很明显，则可能无法进行记录。

随着磁性反转单元的减少，去磁场强度减弱，导致磁记录层的转换场增强。因此，当磁性反转单元减少时，进行记录所需的磁场强度增大。

虽然磁性反转单元减少和 Ku 增大都会导致出现高记录密度，有助于提高

磁记录介质的记录分辨率和热稳定性，但是这两种做法都会降低“磁记录介质上的可记录性”（也被简称为“易记录性”）。

从以上背景技术可知，需要提出一种能提高磁记录介质的热稳定性和读写性能，但不会降低可记录性的方法。

为了解决这个问题，提出了这样一种方法，其中的磁性层被分成两个或多个层，这些层用各种成份沉积而成或在这些分开的磁性层之间插入非磁性的层（参加专利文献 1）。专利文献 1 中公开：通过中断外延生长分开磁记录层，能够降低磁记录介质的介质噪声，同时保持磁性反转单元量以提高热稳定性。但是在厚磁记录层中，记录头和软磁衬层之间的距离增大，而且减少磁性反转单元时转换场增强，导致高密度记录。因此，这种方法必然会导致磁记录介质的易记录性受到严重影响。

专利文献 2 提出的方法是：将用于纵向磁记录介质的反铁磁耦合应用于垂直磁记录介质，降低反磁畴噪声并提高对热波动的承受能力。这已经被公开，但是使用反铁磁耦合的磁记录层会使转换场增强（参见非专利文献 1）。因此严重影响易记录性基本上是无法避免的。

减少磁性反转单元会提高磁记录介质的噪声和 S/N（信噪比）。但是减少磁性反转单元会如上所述降低热稳定性，并且因为去磁化磁场强度的减弱而进一步增强磁记录介质的转换场。通过增加 Ku 和磁记录层的厚度来保持热稳定性还会增强磁记录介质的转换场。虽然一方面减少磁性反转单元对获得高记录密度磁记录介质是很重要的，但是它与磁记录介质易记录性是一种折衷关系。这种情况不利于提高磁记录介质的记录密度。

[专利文献 1] 日本未审查专利申请公开 2003-157516。

[专利文献 2] 日本未审查专利申请公开 H2004-39033。

[非专利文献 1] Erol Girt 等人，IEEE Trans. on Magn.（美国），第 39 页，第 5 期，第 2306-2310 页（2004）。

发明概述

考虑到上述问题，本发明的目的是提供一种能提高易记录性但是不会影响热稳定性的垂直磁记录介质。另一个目的是提供能同时提高记录密度和易于记录的垂直磁记录介质，在噪声，S/N 和其他性能方面都有所提高。

为了达到这些目的，发明人进行了深入研究，通过在磁记录层之间提供合

适的铁磁耦合而解决了上述问题，实现了本发明。

更具体地说，本发明的垂直磁记录介质中包括非磁性基片，第一磁记录层，直接位于第一磁性层上的耦合层，和直接位于耦合层上的第二磁记录层。该第一和第二磁记录层通过耦合层铁磁耦合。第一磁记录层的易磁化轴和第二磁记录层的易磁化轴基本垂直于非磁性基片平面。第一磁记录层的各向异性磁场强度 Hk_1 ，单轴各向异性常数 Ku_1 和厚度 T_1 ，以及第二磁记录层的各向异性磁场强度 Hk_2 ，单轴各向异性常数 Ku_2 和厚度 T_2 满足以下关系。如果 $Hk_1 > Hk_2$ ，则 $Ku_1 T_1 > Ku_2 T_2$ ，而且如果 $Hk_1 < Hk_2$ ，则 $Ku_1 T_1 < Ku_2 T_2$ 。

这些性质能减弱转换场而不影响热稳定性，并提高易记录性。

第一和第二磁记录层之间单位面积的交换耦合能量优选至少是 5×10^{-3} 尔格/平方厘米。

优选的耦合层由选自 V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Nb, Mo, Ru, Rh, Ta, W, Re 和 Ir 的元素或者主要由以上至少一种元素构成的合金组成。耦合层的厚度优选不超过 2 纳米，更优选不超过 0.3 纳米。这些性质能恰当地控制第一和第二磁记录层之间的交换耦合能量。

优选的第一和第二磁记录层中的至少一个层具有颗粒结构，其结构中包括非磁性氧化物或非磁性氮化物基体以及分布于基体中的磁性晶体颗粒。

优选的第一和第二磁记录层中表现出低 Hk 的磁记录层，其中含有钴和铬，铂的含量在 0 到 10 原子% (at%) 的范围内。该呈现低 Hk 磁记录层最好进一步含有选自 Ta, B, Nb 和 N 的至少一种元素。

具有上述结构的垂直磁记录介质，在磁记录层之间提供恰当的铁磁耦合，其磁记录介质的转换场减弱而不会影响热稳定性，同时还能提高噪声，S/N 和其他性能。因此，该垂直磁记录介质能在提高热稳定性的同时提高易记录性，并增加记录密度。

以下参考附图具体描述本发明的部分优选实施例。

附图简要说明

附图 1 是本发明的一种垂直磁记录介质的结构截面图；

附图 2 所示是归一化能垒对交换耦合能量的相关性；

附图 3 所示是归一化矫顽力对交换耦合能量的相关性；

附图 4 是本发明垂直磁记录介质中磁性反转的概念示意图；

附图 5 是本发明垂直磁记录介质中磁滞回线的概念示意图；

附图 6 所示是写修改性能对实施例 1 和对比例 1 垂直磁记录介质中记录电流的相关性。

附图标记说明

- 1 非磁性基片
- 2 软磁衬层
- 3 衬层
- 4 非磁性中间层
- 5 第一磁记录层
- 6 耦合层
- 7 第二磁记录层
- 8 保护层
- 9 液体润滑层

发明具体描述

首先说明本发明的原理。

对于纵向磁记录介质和垂直磁记录介质的研究发现，反铁磁耦合的多层磁记录层能使磁记录介质同时获得热稳定性以及降低噪声或提高 S/N 的性能。但是考虑到位于磁记录层之间的耦合能量受控的铁磁耦合多层磁记录层方面的研究并不充分。因此，发明人进行了具体的理论和实验研究，获得了附图 2 和 3 的关系。

附图 2 所示是关于归一化能垒对两个磁记录层之间交换耦合能量的相关性的研究结果。能垒是热稳定性的指数；数值越大表示对热越稳定。附图 2 中的能垒表示被归一化成两个磁记录层之间的交换耦合能量为零的值。附图 2 中虚线左侧表示两个磁记录层之间的反铁磁耦合状态，而右侧表示铁磁耦合状态。在任一耦合状态中，层之间交换耦合能量的绝对值越大，则表示耦合越强。从附图 2 中可知，在两个磁记录层的抗铁磁耦合和铁磁耦合中，热稳定性随着耦合能量绝对值的增加，即耦合强度的增加，而增加。

附图 3 所示是关于矫顽力（Hc）对磁记录层之间交换耦合能量的相关性的研究结果。附图 3 表示的矫顽力是被归一化成磁记录层之间的交换耦合能量为

零的值。矫顽力越大，则表示在磁记录介质上进行记录所需的磁场越强，即磁记录介质上的易记录性越差。附图3中虚线左侧与附图2相同，表示两个磁记录层之间的反铁磁耦合状态，而右侧表示铁磁耦合状态。从附图3中可知，归一化矫顽力随着反铁磁耦合中耦合能量绝对值的增加而增加，相反在铁磁耦合中，归一化矫顽力随着耦合能量绝对值的增加而减小。

同时考察附图2和3，在两个磁记录层的反铁磁耦合中，交换耦合能量绝对值的增加会提高热稳定性，但是会因为矫顽力的增加而使易记录性变差。相反在铁磁耦合中，交换耦合能量的增加会提高热稳定性，同时也会提高易记录性。因此证明，使用两个铁磁耦合磁记录层能同时提高热稳定性和易记录性。

通过提供每个磁性层单独磁性反转的条件，这个效应会得到加强。

参见附图4和5对磁记录层单独磁性反转的描述。

附图4所示实例中，第一磁记录层5和第二磁记录层7通过耦合层6发生铁磁耦合，磁性反转首先在第二磁记录层中发生。箭头表示每个磁记录层中的磁化方向。

附图5是磁记录介质的磁滞回线（M-H回线）示意图，其中的横坐标表示施加在磁记录介质上的外部磁场强度（H），纵坐标表示磁记录介质的磁化（M）。

在附图5中，磁记录介质被+H方向足够大的（附图5中的右向）磁场所饱和。这时，每个磁记录层的磁化都处于附图4中（A）所示状态。施加-H方向（附图5中的左向）的磁场，第二磁记录层中的反磁性在 H_{c21} 处发生。这时，每个磁记录层的磁化都处于附图4中（B）所示状态。因为磁记录层是铁磁耦合的，所以 H_{c21} 位于-H侧（附图5的左侧）。增强-H方向的磁场，第一磁记录层也会在 H_{c11} 处发生磁性反转。这时，每个磁记录层中的磁化都处于附图4中（C）所示状态。

在第一磁记录层中发生磁性反转时，第二磁记录层已反转其磁性。因此，由于第二磁记录层的磁场作用故很容易在第一磁记录层中发生磁性反转。而且，与第一和第二磁记录层之间没有铁磁耦合的情况相比，磁性反转更容易发生。用 $H_{c\infty}$ 表示没有铁磁耦合情况下的转换场强度，满足附图5中所示不等式 $H_{c\infty} > H_{c11}$ ，这种比较是在绝对值之间进行的。

另一方面，因为磁记录层之间存在铁磁耦合，如附图2中所示，所以能垒很高，热稳定性也很高。对每个磁记录层进行单独和顺序的磁性反转，能更有效地减弱转换场而不会影响热稳定性。

而且,发明人对磁记录层的状态,交换耦合能量,材料,厚度和以及在磁记录层之间控制交换耦合能量的耦合层的其他条件进行了详细实验研究。

以下描述本发明更具体的情况。

附图1是一种本发明垂直磁记录介质实例一个方面的截面图。非磁性基片1上顺序形成了软磁衬层2,底层3,非磁性中间层,第一磁记录层5,耦合层6,第二磁记录层7,保护层8和液体润滑层9。

非磁性基片1可以是普通磁记录介质中使用的基片,由镀NiP的铝合金,加强玻璃,水晶玻璃或类似物构成。当基片加热温度被限定在不超过100℃时,还可以使用由聚碳酸酯或聚烯烃等树脂制成的塑料基片。

优选使用软磁衬层2,通过控制用于磁记录的从磁头产生的磁通量而提高读/写性能。可以省略软磁衬层。软磁衬层可以由FeTaC或Sendust合金(FeSiAl)等晶体合金,或者CoZrNb或CoTaZr等无定型钴合金构成。软磁衬层2的最佳厚度随着记录用磁头的结构和性质而不同。通过与其他层的连续沉积方法形成软磁衬层时,优选其厚度在10到500纳米范围内,与生产率达到平衡。通过电镀方法将软磁衬层沉积在非磁性基片上时,在沉积其他层之前,其厚度可以是几微米厚。

优选用底层3来控制其上所形成层:非磁性中间层4或第一磁记录层5的结晶取向和颗粒尺寸。底层可以由非磁性材料或者软磁材料构成。可以省略衬层。

更优选使用软磁材料,因为衬层起到软磁衬层部分的作用。软磁材料选自包括NiFeAl, NiFeSi, NiFeNb, NiFeB, NiFeNbB, NiFeMo和NiFeCr的Permalloy材料。可以调节Permalloy衬层的厚度,优化磁记录层的磁性和读写性能,优选在3到50纳米的范围内,要在性能和磁记录介质生产率之间获得平衡。

用于底层的非磁性材料选自Ta, Zr, Ni₃Al和类似物。使用非磁性材料作为底层时,从记录磁头软磁衬层所产生的磁场有效集中的观点来看,薄膜是比较好的,其厚度优选在0.2到10纳米范围内。

使用非磁性中间层4能恰当地控制第一磁记录层5中的结晶取向,颗粒尺寸和晶界偏析。可以省略非磁性中间层4。非磁性中间层所用材料可以选自钕和钕基合金以及一种或多种选自C, Cu, W, Mo, Cr, Ir, Pt, Re, Rh, Ta和V的添加剂。非磁性中间层所用材料还可以选自Pt, Ir, Re和Rh。非磁性中间层的厚度应当尽可能薄,以获得高密度记录,只要不损害磁记录层的磁性和读

写性能即可。其厚度优选在 1 到 20 纳米的范围内。

第一磁记录层 5 优选由至少含有钴和铂的铁磁合金构成。要求第一磁记录层的易磁化轴（比如六方紧密堆积结构的 c 轴）垂直于垂直磁记录介质的使用薄膜表面。第一磁记录层 5 可以由 CoPt, CoCrPt, CoCrPtB 或 CoCrPtTa 等合金材料, (Co/Pt)_n 或 (Co/Pd)_n 的多层薄膜, 或者 CoPt-SiO₂, CoCrPtO, CoCrPt-SiO₂, CoCrPt-Al₂O₃, CoPt-AlN 或 CoCrPt-Si₃N₄ 的颗粒材料构成。颗粒结构由非磁性氧化物或非磁性氮化物的基体和分散在基体中的磁性晶体颗粒构成。该颗粒结构能够抑制磁记录层中邻近磁性晶体颗粒之间的磁性相互作用。当第一和第二磁记录层之间存在铁磁耦合时, 耦合被保持在磁记录层之间, 而且颗粒间的磁性相互作用被限制在磁记录层之内。结果是, 能够改善噪声和 S/N 性能。因此, 颗粒结构在第一磁记录层中是特别优选的。

从生产率和高密度记录方面考虑, 第一磁记录层的厚度优选不超过 30 纳米, 更优选不超过 15 纳米, 但是并不限于任何特定范围。

耦合层 6 对于第一磁记录层 5 和第二磁记录层 7 之间的恰当铁磁耦合是必要的。如果两个磁记录层在没有耦合层的情况下被层压在一起, 则这两个层会同时反转磁性, 无法通过单独反转磁性提供增加热稳定性并同时增强转换场的功能。如果层压的磁记录层之间的交换耦合完全消失, 则能垒降低, 如附图 2 中交换耦合能量的零点所示, 因此没有提高热稳定性。因此从在磁记录层之间产生恰当的耦合能量同时保持铁磁耦合方面考虑, 使用耦合层是必要的。磁记录层之间的铁磁耦合必须在垂直磁记录介质工作的室温下是有效的。

可以按照以下方法计算磁记录层之间的交换耦合能量。在附图 5 中, 虚线表示局部磁滞回线。在 +H 方向施加足够大的磁场使磁记录介质饱和之后, 逐渐在 -H 方向施加磁场。磁记录层中在 H_{C21} 处发生磁性反转。在所施加的磁场从 H_{C21} 和 H_{C11} 的中点发生返回的过程中, 磁记录层在 H_{C22} 处再次发生磁性反转。可以根据这些 H_{C11} 和 H_{C22} 利用等式 (1) 和 (2) 计算交换耦合能量 J。在第二磁记录层中首先发生磁性反转时, 等式 (1) 和 (2) 有效。

[等式 1]

$$J = 2Ku_1T_1 \frac{(H_{C11} + H_{C22}) + (Hk_1^{eff} - Hk_2^{eff})}{Hk_1 - Hk_2/k} \quad (1)$$

[等式 2]

$$k = \frac{Ku_2 T_2}{Ku_1 T_1} \quad (2)$$

这里的 Ku_2 , T_2 , Hk_2 和 Hk_2^{eff} 分别表示第二磁记录层的单轴各向异性常数, 厚度, 各向异性磁场强度和考虑了去磁化的各向异性磁场强度, 其中首先在 H_{c21} 处发生磁性反转。 Ku_1 , T_1 , Hk_1 和 Hk_1^{eff} 分别表示第一磁记录层的相同量, 随后在 H_{c11} 处发生磁性反转。满足 $Hk=2Ku/M_s$ 的关系, 其中 M_s 表示饱和磁化。如果第一和第二磁记录层之间的磁性反转顺序发生变化, 则要将 Ku , T , Hk 和 Hk^{eff} 的下标 1 和 2 互换。

在实际的垂直磁记录介质中, 由于去磁化的影响, 磁滞曲线中具有一些斜坡, 很难精确计算去磁化因子。因此, 求得的 J 是估算值。但是, 根据发明人的研究, 不小于 5×10^{-3} 尔格/平方厘米的 J 值对于提高热稳定性和减弱层压所产生的转换场是恰当的。

耦合层 6 所用材料选自 V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Nb, Mo, Ru, Rh, Ta, W, Re 和 Ir, 或者主要由其中的至少一种元素构成的合金。V, Cr 或 Cu 等非磁性材料能够提供铁磁耦合, 并通过调节薄膜厚度而在磁记录层之间提供合适的耦合能量。Fe, Co 或 Ni 等铁磁性材料能通过与非磁性材料形成合金或者调节沉积条件或沉积气氛而提供合适的耦合能量。

钽和铂也能提供铁磁耦合。但是发现钽和铂是不够充分的, 因为各向异性能量在耦合层和磁记录层之间的界面处增加, 而不是增强转换场。

耦合层 6 的厚度优选不超过 2 纳米, 能够在第一和第二磁记录层之间每单位面积上产生至少 5×10^{-3} 尔格/平方厘米的交换耦合能量, 并保持第二磁记录层中优选的结晶取向。根据发明人的研究, 如果耦合层 6 的厚度是 0.3 纳米或以下, 或者在 1.2 到 2 纳米的范围内, 则耦合层 6 所用 Fe, Co 和 Ni 之外的材料能提供合适的铁磁耦合条件。超过 2 纳米的厚度所产生的耦合能量太小, 无法提高热稳定性。对于 Fe, Co 和 Ni 的铁磁材料, 如果厚度超过 2 纳米, 则 Fe, Co 或 Ni 的磁性表现过强, 导致磁记录介质的性能变差。因此, 耦合层 6 的厚度优选不超过 2 纳米。

耦合层 6 的厚度更优选是 0.3 纳米或以下。对于 Fe, Co 和 Ni 之外的耦合层 6 材料, 0.3 纳米厚以下的厚度能将耦合能量控制在较宽范围内, 在构成磁

记录层的晶体颗粒之间确保更好的磁隔绝, 导致降低噪声。对于 Fe, Co 和 Ni, 0.3 纳米或以下的厚度能将 Fe, Co 和 Ni 的磁性影响限制在可以忽略的水平上。

对于第二磁记录层 7, 可以采用与第一磁记录层 5 相同的材料和结构。

第一磁记录层和第二磁记录层满足以下关系。第一磁记录层的单轴各向异性常数 K_{u1} , 厚度 T_1 , 各向异性磁场强度 H_{k1} , 以及第二磁记录层的单轴各向异性常数 K_{u2} , 厚度 T_2 , 各向异性磁场强度 H_{k2} 在 $H_{k1} > H_{k2}$ 的条件下满足不等式 $K_{u1}T_1 > K_{u2}T_2$ 。在 $H_{k1} < H_{k2}$ 的条件下, 第一和第二磁记录层的厚度和材料满足不等式 $K_{u1}T_1 < K_{u2}T_2$ 。

这是因为, 在 $H_{k1} > H_{k2}$ 的条件下, 通过首先在第二磁记录层中发生磁性反转, 能够有效减弱转换场而不会影响热稳定性。接着, 在满足不等式 $K_{u1}T_1 > K_{u2}T_2$ 的情况下, 在第二磁记录层中首先发生磁性反转。因此, H_{k1} , H_{k2} , $K_{u1}T_1$ 和 $K_{u2}T_2$ 之间的相对值是确定的。根据这些关系, 能同时提高热稳定性和减弱转换场。

以下说明如何确定能在第一磁记录层和第二磁记录层之间表现出较低各向异性磁场强度 H_k 的磁记录层组成。为了降低介质噪声并提高 S/N, 合适的做法是降低磁记录层的铂含量。但是铂含量的降低会影响热稳定性。因此, 为了确保传统磁记录层中的热稳定性, 确定铂含量应当是超过 10 原子%的较高值。因为本发明的层压磁记录层能控制层间耦合能量, 因此能确保令人满意的热稳定性, 能够降低铂含量。具体地说, 能够降低表现出最低 H_k 值的磁记录层的铂含量, 该层是首先发生磁性反转的磁记录层。该磁记录层中也可以根本不含铂。发明人的研究进一步发现, 如果含有铂, 则铂含量优选是 10 原子%或以下, 能有效减弱转换场并降低介质噪声和提高 S/N。即, 优选根据以下内容确定磁记录层的组成: 具有第一和第二磁记录层之间较低 H_k 的磁记录层中至少包括钴和铬, 而且如果含有铂的话, 其含量不超过 10 原子%。

磁记录层中更优选含有选自 Ta, B, Nb 和 N 的至少一种元素。这种组成能降低介质噪声, 并更有效地减弱磁记录层的转换场。

更具体地说, 具有第一和第二磁记录层之间较低 H_k 的磁记录层的优选组成是, 比如, 78 原子%Co-22 原子%Cr, 76 原子%Co-18 原子%Cr-6 原子%B, 66 原子%Co-20 原子%Cr-10 原子%Pt-4 原子%B, 75 原子%Co-18 原子%Cr-5 原子%Pt-2 原子%Ta。

磁记录层的结构中包括三个或多个层。每两个磁记录层之间通过耦合层提供铁磁耦合。每个磁记录层中单轴各向异性常数和厚度乘积 K_uT 的顺序按

磁记录层中各向异性磁场强度 H_k 的顺序而确定的。以这种方式对每个磁记录层进行单独磁性反转，具有三个或多个磁记录层的结构也能提高热稳定性并同时减弱转换场。

保护层 8 可以由主要是碳的薄膜构成。还可以使用磁记录介质保护层中常用的其他各种薄膜材料。

液体润滑层 9 可以由全氟聚醚润滑剂组成。还可以使用磁记录介质液体润滑层中常用的其他各种润滑材料。

可以通过磁记录介质领域中常用的各种沉积技术形成被层压在非磁性基片上的层。这些层除了液体润滑层之外，都可以由 DC 磁控管溅射方法，RF 磁控管溅射方法，或真空蒸发方法形成。液体润滑层可以由浸渍方法或旋涂方法形成。

以下参考垂直磁记录介质的具体实例进一步具体说明本发明。当然，本发明并不限于这些实例，可以在本发明原理和范围内进行各种改进。

[实施例 1]

以结构如附图 1 所示的垂直磁记录介质为例，加以描述。

所用非磁性基片 1 是具有平滑表面的化学强化玻璃基片（由 HOYA Corporation 制造的 N-5 玻璃基片）。清洁之后，将基片置于溅射设备中，使用 87 原子%Co-5 原子%Zr-8 原子%Nb 的溅射靶沉积厚度为 200 纳米的 CoZrNb 无定形软磁衬层 2。然后，使用 82 原子%Ni-12 原子%Fe-6 原子 Si 的 Permalloy 溅射靶沉积厚度为 11 纳米的 NiFeSi 底层 3。随后，使用钨溅射靶在 4.0 帕的氩气压力下沉积厚度为 10 纳米的钨非磁性溅射中间层 4。随后使用 90 摩尔%（74 原子%Co-12 原子%Cr-14 原子%Pt）-10 原子%SiO₂的溅射靶在 5.3 帕气压下沉积厚度为 10 纳米并具有颗粒结构的 CoCrPt-SiO₂第一磁记录层 5。然后使用钨溅射靶沉积厚度为 0.2 纳米的钨耦合层 6。随后，使用 90 摩尔%（72 原子%Co-16 原子%Cr-12 原子%Pt）-10 摩尔%SiO₂的溅射靶在 5.3 帕气压下沉积厚度为 6 纳米并具有颗粒结构的 CoCrPt-SiO₂第二磁记录层 7。最后，用碳溅射靶沉积厚度为 7 纳米的碳保护层 8，并从真空室中取出具有层压层的基片。沉积除了钨非磁性中间层和 CoCrPt-SiO₂第一与第二磁记录层以外的层时，氩气压力为 0.67 帕。CoCrPt-SiO₂第一和第二磁记录层是由 RF 磁控管溅射方法形成的；其他层是由 DC 磁控管溅射方法形成的。随后，采用浸渍方法形成厚度为 2 纳米的全氟聚醚液体润滑层 9。由此制得垂直磁记录介质。

(对比例 1)

采用与实施例 1 中所述相同的方法制造对比例 1 的垂直磁记录介质, 区别在于没有沉积钉耦合层 6 和 CoCrPt-SiO₂ 第二磁记录层 7。

按照以下方法测量实施例 1 的 K_{u1} , K_{u2} 和其他性质。所制造的磁记录介质样品中没有 CoZrNb 软磁衬层。样品是只包括位于钉中间层上的第一磁记录层的磁记录介质, 以及只包括位于钉中间层上的第二磁记录层的磁记录介质。用磁扭矩计测得单轴各向异性常数分别是 K_{u1} 等于 4.2×10^{-6} 尔格/立方厘米, K_{u2} 等于 2.5×10^{-6} 尔格/立方厘米。因此, $K_{u1}T_1$ 和 $K_{u2}T_2$ 分别是 4.2×10^{-12} 尔格/平方厘米和 1.5×10^{-12} 尔格/平方厘米。各向异性磁场强度 H_{k1} 和 H_{k2} 分别是 18.7 千奥斯特和 13.2 千奥斯特。因此, 实施例 1 满足 $H_{k1} > H_{k2}$ 和 $K_{u1}T_1 > K_{u2}T_2$ 。

对于上述实施例 1 和对比例 1 的样品, 用 Kerr 作用测量仪器测量磁矫顽力 (H_c), 用读/写测试机测量重写 (O/W), 输出信号, 归一化噪声, 反馈输出信号对噪声的比值 (S/N), D_{50} 和输出信号衰减率。这里的 D_{50} 表示输出为最大值一半时的线性记录密度。对实施例 1 和对比例 1 进行比较。

附图 6 所示是实施例 1 和对比例 1 磁记录介质的 O/W, 与在 336kfc i (千通量变化/英寸) 所记录信号上重写 45kfc i 信号的记录电流相关。表 1 所示为 H_c , 336kfc i 时的磁轨平均输出信号 (TAA), 归一化噪声, S/N 和 28kfc i 时的输出信号衰减率。

附图 6 表示, 对比例 1 中的 O/W 低于实施例 1, 当记录电流增大时, 其增加幅度不超过约 20dB。相反, 实施例 1 能达到 $O/W > 30dB$ 的条件, 这在低记录电流条件下通常是必要的, 并在 50 毫安保持大于 35dB 的 O/W, 50 毫安是本测量所用记录头的标称电流。这个结果证明, 实施例 1 磁记录介质的易记录性非常好。

如表 1 中所示, 实施例 1 的 H_c 比对比例 1 低 2000 奥斯特 (约 30%)。实施例 1 表现出 0.16 尔格/平方厘米的磁性层间交换耦合能量, 并且满足 $H_{k1} > H_{k2}$ 和 $K_{u1}T_1 > K_{u2}T_2$ 。这种情况有助于降低 H_c , 从而提高易记录性。

总的来说, H_c 降低会损害读写性能。但是相反, 实施例 1 能增大输出并减小噪声, 与对比例 1 相比 S/N 提高 2dB。 D_{50} 表示记录分辨率; D_{50} 越大表示较高密度记录的可能性越大。与对比例 1 相比, 实施例 1 的 D_{50} 增加约 8%, 证明该磁记录介质的记录密度有所提高。对于输出信号的衰减速率, 值越小表示热稳定性越高。从表 1 中可知, 实施例 1 和对比例 1 之间信号输出衰减速率的差别

在误差范围之内，可以认为实施例 1 和对比例 1 中输出信号的衰减速率都接近于零。

如上所述，本发明的结构中具有两个铁磁耦合的磁性层，能够提高磁记录介质的易记录性，却不会影响热稳定性。另外，磁记录介质性能的提高包括噪声减小，S/N 提高，而且能增加磁记录介质的记录密度。

[表 1]

项目	实施例 1	对比例 1
Hc (奥斯特)	4710	6770
TAA[336kfc] (mVp-p)	1.82	1.29
归一化噪声[336kfc] ($\mu V_{rms}/mVp-p$)	19.5	22.4
S/N[336kfc] (dB)	25.5	23.5
D ₅₀ (kfc)	371	344
输出信号的衰减速率[28kfc] (%/10)	0.67	0.25

(对比例 2)

按照与实施例 1 相同的方法制造对比例 2 的垂直磁记录介质，区别在于 CoCrPt-SiO₂ 第一磁记录层的厚度是 7 纳米，第二磁记录层的厚度是 12 纳米。第一和第二磁记录层的交换耦合能量，单轴各向异性常数 K_{u1} 和 K_{u2} ，各向异性场强度 H_{k1} 和 H_{k2} 与实施例 1 相同。调节第一磁记录层的厚度和第二磁记录层的厚度，使 $K_{u1}T_1$ 等于 2.9×10^{-12} 尔格/平方厘米， $K_{u2}T_2$ 等于 3.0×10^{-12} 尔格/平方厘米，即 $K_{u2}T_2$ 略大于 $K_{u1}T_1$ 。

按照与上述内容相同的方法在对比例 2 的垂直磁记录介质上测量 Hc, TAA, O/W, 归一化噪声, S/N, D₅₀ 和输出信号衰减速率。表 2 所示为对比例 2 的结果与实施例 1 的比较。

从表 2 中可知，对比例 2 并没有充分降低 Hc，也没有获得足够的 O/W。虽然因为薄膜厚度增加而提高了 TAA，但是对比例 2 磁记录介质在归一化噪声和 S/N 方面的性质要差得多，而在输出信号的衰减速率方面则并非如此。

如上所述，虽然对比例 2 的层结构中具有相同的材料，但是该对比例无法降低 Hc，而且仅仅因为第一磁记录层的 $K_{u1}T_1$ 和第二磁记录层的 $K_{u2}T_2$ 中的差别而导致严重损害读写性能。该结果证明，当 $H_{k1} > H_{k2}$ 时，即实施例 1 和对比例 2 的情况，必须满足不等式 $K_{u1}T_1 > K_{u2}T_2$ ，才能充分减弱转换场，从而获得高读写性能。

[表 2]

项目	实施例 1	对比例 2
Hc (奥斯特)	4710	6540
TAA[336kfc] (mVp-p)	1.82	2.09
O/W (dB)	38.2	21.1
归一化噪声[336kfc] ($\mu V_{rms}/mVp-p$)	19.5	31.4
S/N[336kfc] (dB)	25.5	21.4
D ₅₀ (kfc)	371	350
输出信号的衰减速率[28kfc] (%/10)	0.67	0.15

[实施例 2]

采用不同材料作为磁记录层和耦合层，制造其结构如附图 1 中所示的垂直磁记录介质。

非磁性基片 1 是具有平滑表面的化学强化玻璃基片（由 HOYA Corporation 制造的 N-5 玻璃基片）。清洁之后，将基片置于溅射设备中，用 87 原子%Co-5 原子%Zr-8 原子%Nb 的溅射靶沉积厚度为 200 纳米的 CoZrNb 无定形软磁衬层 2。然后用 82 原子%Ni-12 原子%Fe-6 原子%Si 的 Permalloy 溅射靶沉积厚度为 11 纳米的 NiFeSi 衬层 3。随后在氩气压力为 4.0 帕时用钨溅射靶沉积厚度为 10 纳米的钨非磁性中间层 4。随后在气体压力为 5.3 帕时用 90 摩尔%（72 原子%Co-10 原子%Cr-18 原子%Pt）-10 摩尔%SiO₂ 的溅射靶沉积厚度为 10 纳米的 CoCrPt-SiO₂ 第一磁记录层 5。然后在气体压力为 1 帕时用钴溅射靶沉积厚度为 0.3 纳米的钴耦合层 6。随后，用 70 原子%Co-20 原子%Cr-10 原子%Pt 的溅射靶沉积厚度为 6 纳米的 CoCrPt 第二磁记录层 7。最后用碳溅射靶沉积厚度为 7 纳米的碳保护层 8。然后从真空室中取出具有层压层的基片。沉积除了钨非磁性中间层，CoCrPt-SiO₂ 第一磁记录层，和钴耦合层之外的层时，氩气压力为 0.67 帕。CoCrPt-SiO₂ 第一磁记录层由 RF 磁控管溅射方法形成，其他层由 DC 磁控管溅射方法形成。然后，采用浸渍方法形成厚度为 2 纳米的全氟聚醚液体润滑层 9。由此制得垂直磁记录介质。

(对比例 3)

按照与实施例 2 相同的方法制造对比例 3 的垂直磁记录介质，区别在于没有沉积钴耦合层 6 和 CoCrPt 第二磁记录层 7。

首先按照与实施例 1 中相同的方法测量实施例 2 的 Ku_1 ， Ku_2 和其他性质。实施例 2 的 Ku_1T_1 和 Ku_2T_2 分别是 5.0×10^{-12} 尔格/平方厘米和 1.2×10^{-12} 尔格/平

方厘米，各向异性磁场强度 H_{k1} 和 H_{k2} 分别是 20.0 千奥斯特和 11.1 千奥斯特。所以满足 $H_{k1} > H_{k2}$ 而且 $K_{u1}T_1 > K_{u2}T_2$ 的条件。

按照与实施例 1 相同的方法，测量实施例 2 和对比例 3 垂直磁记录介质的 H_c ， O/W ，归一化噪声， S/N ， D_{50} ，和输出信号的衰减速率。表 3 所示为实施例 2 和对比例 3 磁记录介质的 H_c ，在 336kfc i 所记录信号上重写 45kfc i 信号的 O/W ，336kfc i 的归一化噪声， S/N ， D_{50} ，和 28kfc i 时输出信号的衰减速率。

如表 3 中所示，与对比例 3 相比，实施例 2 的 H_c 降低约 1800 奥斯特（约 25%）。实施例 2 中磁记录层间的交换耦合能量是 0.22 尔格/平方厘米，满足 $H_{k1} > H_{k2}$ 和 $K_{u1}T_1 > K_{u2}T_2$ 。这有助于降低 H_c 。因此，由于 H_c 降低，实施例 2 表现出非常好的 46.5dB O/W ，而对比例 3 为 16.0dB 的低值。与对比例 3 相比，实施例 2 噪声降低， S/N 提高 1.4dB。 D_{50} 也增加约 13%，获得高记录密度。对于输出信号的衰减速率，实施例 2 的值接近于零，而对比例 3 为 4.66%/10 的较大值。因此，实施例 2 的热稳定性也获得显著提高。

如上所述，本发明的结构中具有铁磁耦合的两个磁性层，在磁记录介质的易记录性和热稳定性方面都有所提高。另外，还证明该磁记录介质能降低噪声和提高 S/N ，从而提高磁记录介质的记录密度。

[表 3]

项目	实施例 2	对比例 3
H_c (奥斯特)	5214	6990
O/W (dB)	46.5	16.0
归一化噪声[336kfc i] ($\mu V_{rms}/mV_{p-p}$)	22.8	23.1
S/N [336kfc i] (dB)	24.3	22.9
D_{50} (kfc i)	396	349
输出信号的衰减速率[28kfc i] (%/10)	0.01	4.66

采用不同材料作为磁记录层并且使用不同厚度的耦合层制造具有附图 1 中所示结构的垂直磁记录介质。

[实施例 3]

制造具有附图 1 结构的垂直磁记录介质。

所用非磁性基片 1 是具有平滑表面的化学强化玻璃基片（由 HOYA Corporation 制造的 N-5 玻璃基片）。清洁之后，将基片置于溅射设备中，用 87 原子%Co-5 原子%Zr-8 原子%Nb 的溅射靶沉积厚度为 200 纳米的 CoZrNb 无定

形软磁衬层 2。然后,用 82 原子%Ni-12 原子%Fe-6 原子%Si 的 Permalloy 溅射靶沉积厚度为 11 纳米的 NiFeSi 底层 3。随后,在氩气压力为 4.0 帕时用钨溅射靶沉积厚度为 10 纳米的钨非磁性中间层 4。随后,在气体压力为 5.3 帕时用 90 摩尔% (72 原子%Co-10 原子%Cr-18 原子%Pt) -10 摩尔%SiO₂ 的溅射靶沉积厚度为 9.5 纳米的具有颗粒结构的 CoCrPt-SiO₂ 第一磁记录层 5。然后用钨溅射靶沉积厚度为 1.6 纳米的钨耦合层 6。随后用 61 原子%Co-22 原子%Cr-13 原子%Pt-4 原子%B 的溅射靶沉积厚度为 6.5 纳米的 CoCrPtB 第二磁记录层 7。最后,用碳溅射靶沉积厚度为 7 纳米的碳保护层 8。然后从真空室中取出具有层压层的基片。沉积除了钨非磁性中间层和 CoCrPt-SiO₂ 第一磁记录层之外的层时,氩气压力是 0.67 帕。CoCrPt-SiO₂ 第一磁记录层由 RF 磁控管溅射方法形成,其他层由 DC 磁控管溅射方法形成。随后采用浸渍方法形成厚度为 2 纳米的全氟聚醚液体润滑层 9。由此制得垂直磁记录介质。

[实施例 4]

按照与实施例 3 相同的方法制造垂直磁记录介质,区别在于用钨溅射靶沉积厚度为 0.25 纳米的钨耦合层 6。

[实施例 5]

按照与实施例 3 相同的方法制造垂直磁记录介质,区别在于用钨的溅射靶沉积厚度为 0.25 纳米的钨耦合层 6,然后用 69 原子%Co-22 原子%Cr-5 原子%Pt-4 原子%B 的溅射靶沉积厚度为 6.5 纳米的 CoCrPtB 第二磁记录层 7。

[实施例 6]

按照与实施例 3 相同的方法制造垂直磁记录介质,区别在于用钨的溅射靶沉积厚度为 0.25 纳米的钨耦合层 6,随后用 76 原子%Co-20 原子%Cr-4 原子%B 的溅射靶沉积厚度为 6.5 纳米的 CoCrB 第二磁记录层。

(对比例 4)

按照与实施例 3 相同的方法制造对比例 4 的垂直磁记录介质,区别在于没有沉积钨耦合层 6,也没有沉积 CoCrPtB 第二磁记录层 7。

首先按照与实施例 1 相同的方法测量实施例 3 到 6 的 K_{u1} , K_{u2} 和其他性质。

在实施例 3 到 6 中, $K_u T_1$ 是 4.8×10^{-12} 尔格/平方厘米, H_{k1} 是 20.0 千奥斯特。实施例 3 和 4 的 $K_u T_2$ 是 1.2×10^{-12} 尔格/平方厘米, 实施例 5 是 9.8×10^{-13} 尔格/平方厘米, 实施例 6 是 8.5×10^{-13} 尔格/平方厘米。实施例 3 和 4 的 H_{k2} 是 13.2 千奥斯特, 实施例 5 是 10.1 千奥斯特, 实施例 6 是 8.17 千奥斯特。因此, $H_{k1} > H_{k2}$, $K_u T_1 > K_u T_2$ 。

对实施例 3 到 6 和对比例 4 的垂直磁记录介质进行 H_c , O/W , 归一化噪声, S/N , 和输出信号衰减速率的测量, 并将结果进行比较。所用磁性记录头是记录密度为 150Gb/平方英寸级的。表 4 所示为 H_c , 在 478kfc i 所记录信号上重写 64kfc i 信号的 O/W , 478kfc i 时的归一化噪声, S/N , 和 40kfc i 时的输出信号衰减速率。表 4 中的材料组成用简化形式表示。比如 90 摩尔%(72 原子%Co-10 原子%Cr-18 原子%Pt)-10 摩尔% SiO_2 被简化成 $(Co_{72}Cr_{10}Pt_{18})_{90}(SiO_2)_{10}$ 。

[表 4]

		实施例 3	实施例 4	实施例 5	实施例 6	对比例 4
第一磁记录层	组成	$(Co_{72}Cr_{10}Pt_{18})_{90}(SiO_2)_{10}$				
	厚度(纳米)	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
耦合层	组成	Ru	Ru	Ru	Ru	无
	厚度(纳米)	1.6	0.25	0.25	0.25	无
第二磁记录层	组成	$Co_{61}Cr_{22}Pt_{13}B_4$	$Co_{61}Cr_{22}Pt_{13}B_4$	$Co_{69}Cr_{22}Pt_{5}B_4$	$Co_{76}Cr_{20}B_4$	无
	厚度(纳米)	6.5	6.5	6.5	6.5	无
H_c (奥斯特)		5016	5119	4490	4176	6449
O/W (dB)		38.1	37.4	45.6	46.2	24.7
归一化噪声[478kfc i] ($\mu V_{ms}/mV_{pp}$)		36.8	33.8	29.9	30.3	57.5
S/N [478kfc i](dB)		11.98	12.64	13.59	13.62	7.24
信号衰减速率[40kfc i] (%/10)		0.03	0.03	0.05	0.06	5.73

将对比例 4 与实施例 3 到 6 对比可知, 本发明的铁磁耦合双层磁性层能够降低 H_c , 增加 O/W , 并显著降低信号衰减速率。换言之, 能显著提高介质的易记录性和热稳定性。能够提高磁记录介质在降低噪声和提高 S/N 方面的性能, 有助于提高记录密度。

接着比较实施例 3 和实施例 4 的结果。这两个实施例中磁记录层间交换耦合能量大致都等于 0.24 尔格/平方厘米。同样反映这种结果的是, H_c 和 O/W 在相同水平上。但是对于归一化噪声和 S/N , 实施例 4 的介质表现出比实施例 3 更低的归一化噪声和更高的 S/N 。为了研究这种结果的成因, 要使用透射电子

显微镜观察介质。观察结果表明,实施例3磁记录层中的晶界宽度平均值是1.2纳米,而实施例4的介质是1.5纳米。而且,在实施例3的介质中,观察到部分磁性晶体颗粒之间的距离缩小了约0.5纳米或者更接近。这表明,与实施例3的介质相比,实施例4介质中磁性晶体颗粒的隔绝性有所提高。由此可知,通过钉耦合层实现的铁磁耦合能够减弱转换场,并提高读写性能,同时保持热稳定性。由于磁性晶体颗粒之间隔绝性的提高,能够减小耦合层厚度,从而进一步提高性能。

然后对实施例4的结果和实施例5与6的结果进行以下比较。实施例5和6的归一化噪声和S/N是近似相等的。将它们与实施例4相比,实施例5和6能降低归一化噪声并使S/N提高约1dB。而且能降低Hc并提高O/W。第二磁记录层中的噪声降低可能有助于降低归一化噪声并提高O/W。实施例5和6的磁记录层间交换耦合能量为0.24尔格/平方厘米。这个值与实施例4相等。至于第二磁记录层的 Ku_2T_2 ,实施例4是 1.2×10^{-12} 尔格/平方厘米,实施例5是 9.8×10^{-13} 尔格/平方厘米,实施例6是 8.5×10^{-13} 尔格/平方厘米。即,可以认为实施例5和6中Hc降低和O/W提高的原因是第二磁记录层的 Ku_2T_2 有所降低。如上所述,已经证明通过将低Hk值磁记录层中的铂含量控制在10原子%以内,能够提高介质包括归一化噪声和S/N的读写性能。另外,Hc也有降低,证明易记录性得到提高。

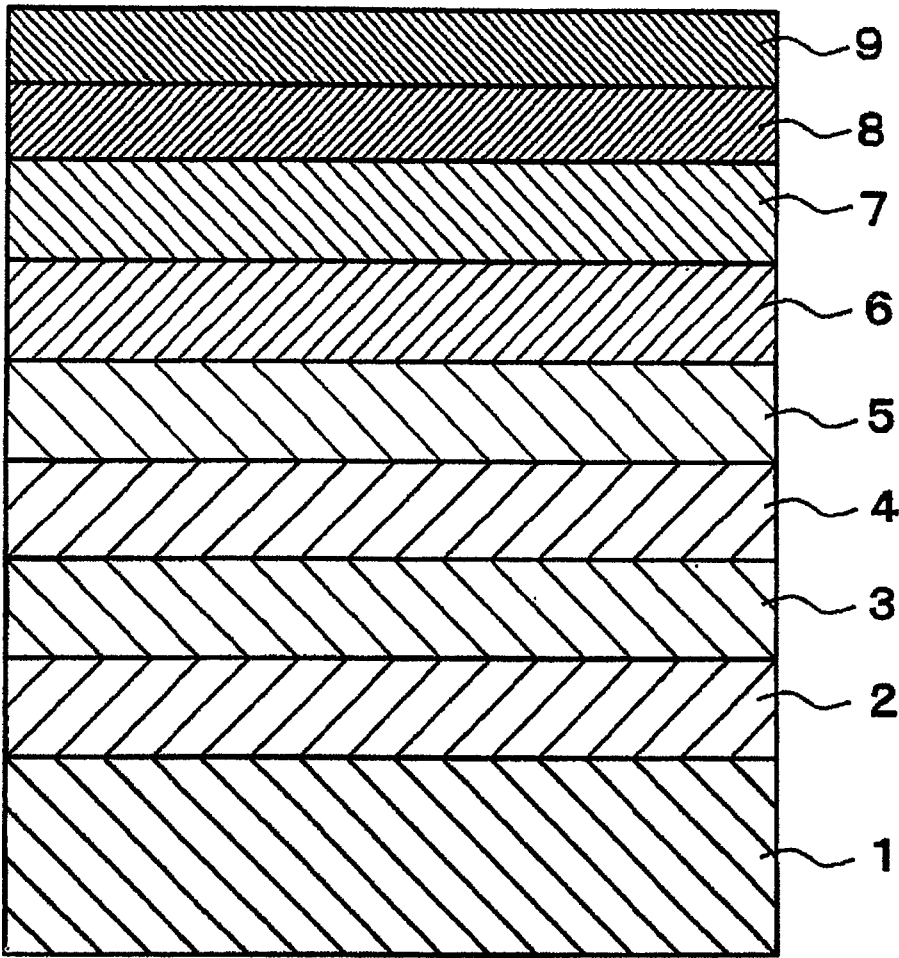


图 1

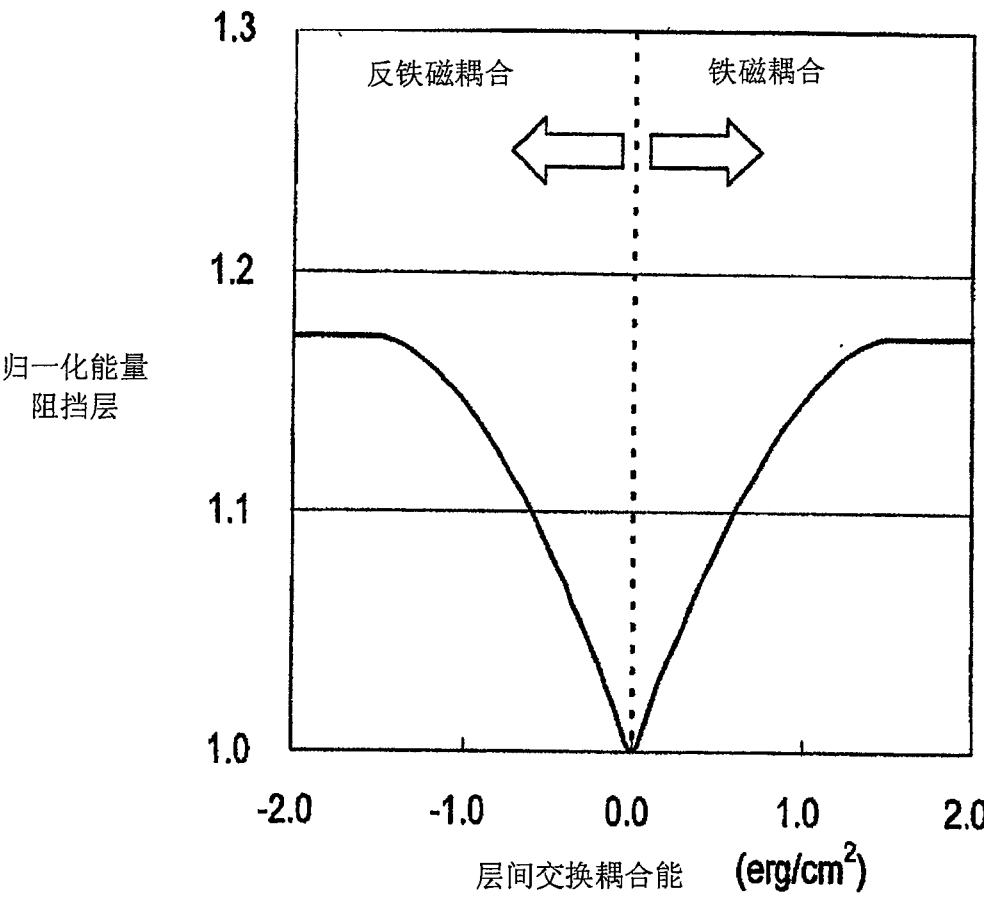


图 2

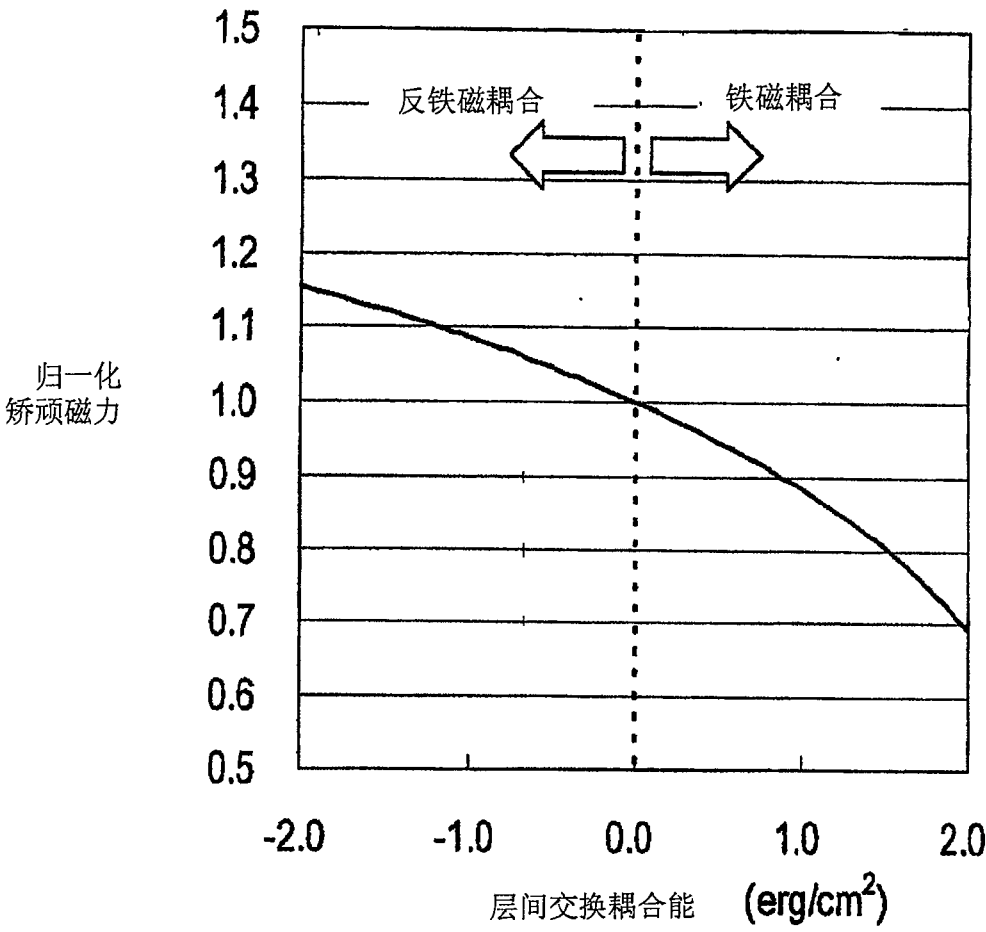


图 3

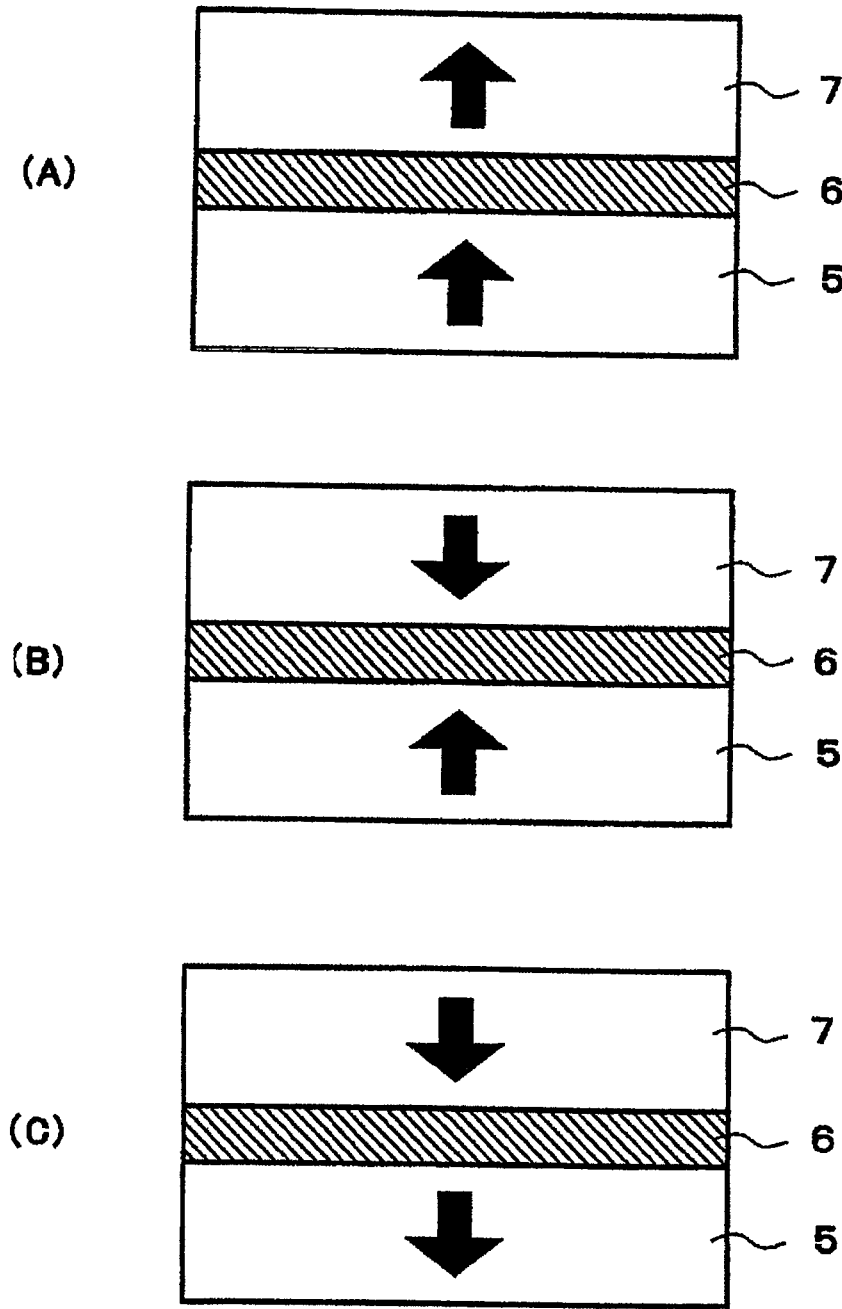


图 4

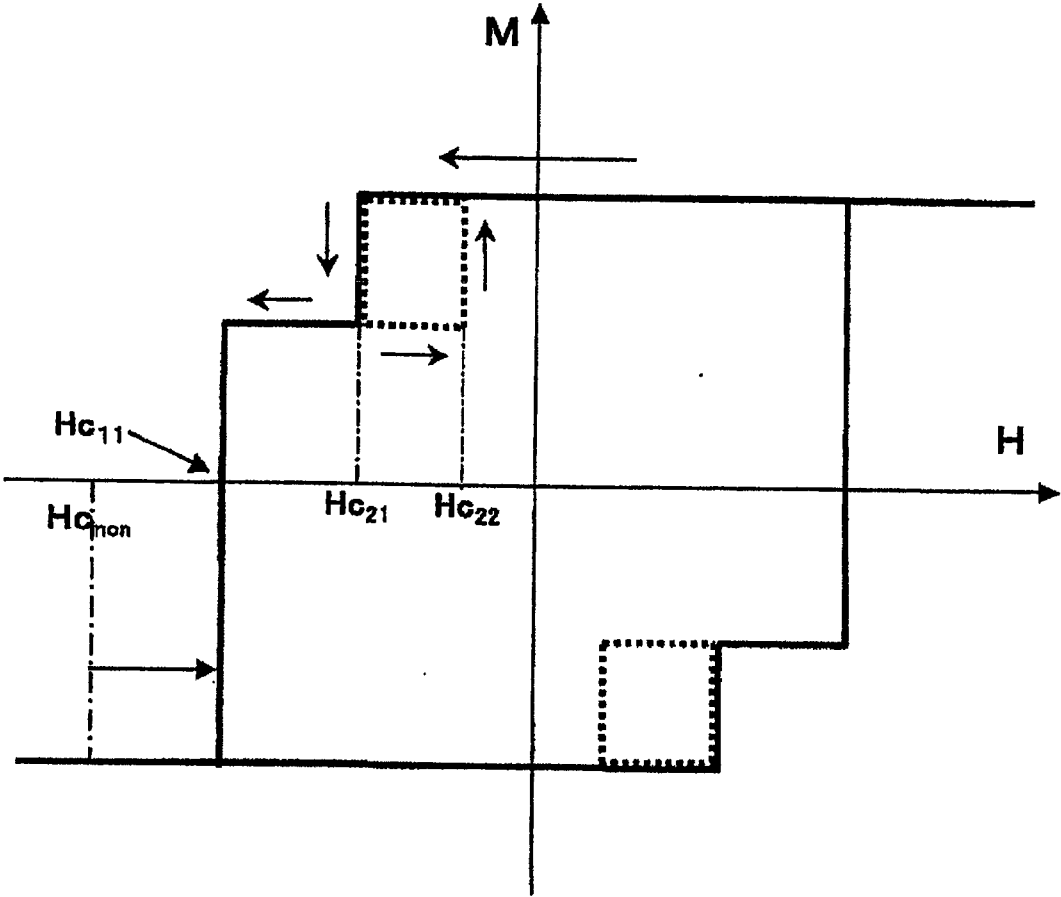


图 5

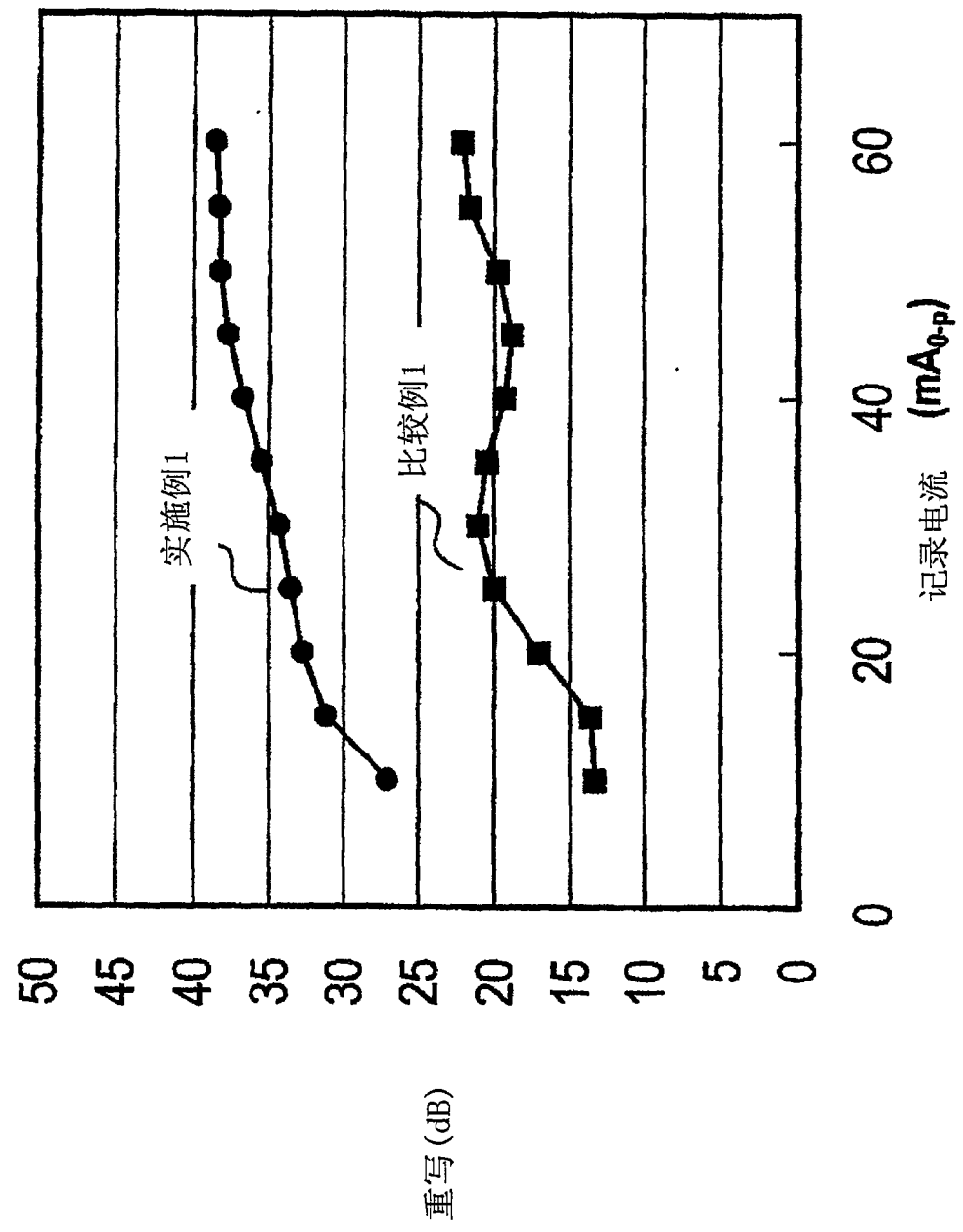


图 6