



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102385872 B

(45) 授权公告日 2016.03.30

(21) 申请号 201110275981.7

US 2007292720 A1, 2007.12.20,

(22) 申请日 2011.07.29

CN 1967665 A, 2007.05.23,

(30) 优先权数据

审查员 姚宗妮

12/847,745 2010.07.30 US

(73) 专利权人 希捷科技有限公司

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 T·P·诺兰 H·J·里齐特

(74) 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司
31100

代理人 姬利永

(51) Int. Cl.

G11B 5/667(2006.01)

(56) 对比文件

US 2009324973 A1, 2009.12.31,

US 2007072011 A1, 2007.03.29,

CN 101312050 A, 2008.11.26,

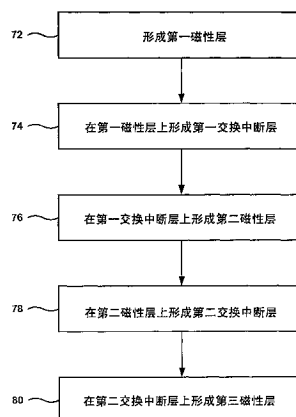
权利要求书1页 说明书11页 附图8页

(54) 发明名称

包括具有凸状磁各向异性轮廓的垂直磁记录层的装置

(57) 摘要

本发明为包括具有凸状磁各向异性轮廓的垂直磁记录层的装置。一种装置可以包括第一磁性层、第一磁性层上形成的第一交换中断层、第一交换中断层上形成的第二磁性层、第二磁性层上形成的第二交换中断层、第二交换中断层上形成的第三磁性层。第一磁性层具有第一磁各向异性性能 H_{k1} , 第二磁性层具有第二磁各向异性性能 H_{k2} , 第三磁性层具有第三磁各向异性性能 H_{k3} 。在某些实施例中, $H_{k1}-H_{k2}$ 小于 $H_{k2}-H_{k3}$ 。在某些实施例中, 该装置是垂直磁记录介质。



1. 一种包括具有凸状磁各向异性场梯度的垂直磁记录层的装置,包括:
第一磁性层,具有第一磁各向异性场 H_{k1} ;
在第一磁性层上形成的第一交换中断层;
在第一交换中断层上形成的第二磁性层,其中所述第二磁性层具有第二磁各向异性场 H_{k2} ;
在所述第二磁性层上形成的第二交换中断层;以及
在所述第二交换中断层上形成的第三磁性层,其中第三磁性层具有第三磁各向异性场 H_{k3} ,其中 $H_{k1}-H_{k2}$ 小于 $H_{k2}-H_{k3}$;
其中第一到第三磁性层包括相应的磁各向异性场,使得第一到第三磁性层具有凸状磁各向异性场梯度;以及
在第三磁性层上形成的连续颗粒状合成层,其中所述连续颗粒状合成层和第三磁性层包括交换耦合合成结构,所述交换耦合合成结构被配置成在所述交换耦合合成结构之下的第一和第二磁性层上施加具有厚度加权平均磁各向异性场 H_{k34} 的交换耦合合成效应,并且其中,所述连续颗粒状合成层包括具有比第三磁性层的 Pt 含量 Pt_3 更大的 Pt 含量 Pt_4 的层。
2. 如权利要求 1 所述的装置,其特征在于,第一比值 H_{k2}/H_{k1} 大于第二比值 H_{k3}/H_{k2} 。
3. 如权利要求 1 所述的装置,其特征在于,所述第一磁性层包括在约 18at. % 到约 22at. % 之间的 Pt 含量 Pt_1 ,所述第二磁性层包括在约 14at. % 到约 18at. % 之间的 Pt 含量 Pt_2 ,所述第三磁性层包括小于约 14at. % 的 Pt 含量 Pt_3 ,其中 Pt_1-Pt_2 小于 Pt_2-Pt_3 。
4. 如权利要求 1 所述的装置,其特征在于,所述连续颗粒状合成 (CGC) 层具有层磁各向异性场 H_{k4} 。
5. 如权利要求 1 所述的装置,其特征在于,所述第一磁性层、所述第二磁性层以及所述第三磁性层中的至少一个包括 Co 合金、Co 合金和 Pt 合金的交替层或者 Co 合金和 Pd 合金的交替层中的至少一个。

包括具有凸状磁各向异性轮廓的垂直磁记录层的装置

附图说明

[0001] 图 1 是硬盘驱动器的示意图。

[0002] 图 2 是磁各向异性相对于距磁记录层的硬性层的距离的曲线图示例,其中磁记录层包括连续渐变(graded)成分。

[0003] 图 3 是图示包括记录层的记录介质堆栈示例的示意性框图,其中记录层包括第一磁性层、第一交换中断层、第二磁性层、第二交换中断层以及第三磁性层。

[0004] 图 4A-E 是根据本公开的磁各向异性相对于用于多个记录层的磁性层的示例性曲线图。

[0005] 图 5 是图示磁记录层示例的示意性方框图,其中磁记录层包括 n 个磁性层交替 $n-1$ 个交换中断层。

[0006] 图 6 是图示磁记录层形成技术示例的流程图。

[0007] 图 7A 和 7B 分别是针对根据本公开构建的磁记录层示例的变换矫顽力轮廓图以及能垒矫顽力降低图。

[0008] 图 8A 和 8B 分别是针对根据本公开构建的磁记录层示例的变换矫顽力轮廓图以及能垒矫顽力降低图。

[0009] 图 9A 和 9B 分别是针对根据本公开构建的磁记录层示例的变换矫顽力轮廓图以及能垒矫顽力降低图。

[0010] 图 10A 和 10B 分别是针对根据本公开构建的磁记录层示例的变换矫顽力轮廓图以及能垒矫顽力降低图。

具体实施方式

[0011] 图 1 图示根据本公开的一个方面包括磁记录介质的磁盘驱动器 10 的示例。盘驱动器 10 包括基座 12 和顶盖 14, 视图中的被部分切除。基座 12 与顶盖 14 相组合, 形成盘驱动器 10 的外壳 16。盘驱动器 10 还包括一个或多个可旋转的磁记录介质 18。磁记录介质 18 附连到主轴 24, 该主轴 24 相对于中心轴旋转介质 18。磁记录和读取头 22 与磁记录介质 18 相邻。致动臂 20 承载与磁记录介质 18 通信的磁记录和读取头 22。

[0012] 磁记录介质 18 将信息存储为磁记录层中被磁定向的比特。磁读/写头 22 包括产生足以磁化磁记录介质 18 中磁记录层离散畴的磁场的记录(写入)头。磁记录层中的畴的这些图案表示数据比特, 磁取向的改变表示“1”。包括大约两倍比特长度的固定磁化的区域表示“0”。磁记录和读取头 22 还包括能够检测磁记录层离散磁畴的磁场的读取头。

[0013] 垂直磁记录介质是具有在磁记录层中的垂直磁各向异性场(H_k)以及沿基本垂直于磁记录层表面的方向形成的磁化的磁记录介质 18。垂直磁记录介质可以用在磁记录系统中。垂直磁记录介质可以采用包括多晶 CoCr 或 CoPt 的氧化物的磁记录层制成。多晶磁记录层中富含 Co 的区域呈铁磁性, 同时富含 Cr 或其氧化物的区域形成多晶磁记录层中的附近晶界并且呈非磁性。邻近的铁磁性晶粒之间的横向磁交换耦合被晶粒之间非磁性区域所削弱。

[0014] 磁数据存储设备（例如盘驱动器 10）的进步主要在于提高设备的存储容量，即提高磁记录介质 18 的面记录密度（以每平方英寸的千兆比特（Gb/in²）表示）。平均晶粒直径较小的磁存储介质 18 可以允许磁记录介质的面记录密度增大。

[0015] 高密度垂直磁记录介质可以受益于磁记录层中若干磁属性的平衡，包括用于热稳定性的高磁各向异性、用于磁记录头对记录层可写性的低变换场、磁晶粒之间足够低的横向磁交换耦合以保持磁晶粒或簇之间较小的相关长度、磁晶粒之间足够高的横向磁交换耦合以保持窄的变换场分布（SFD）、以及晶粒之间磁属性的充分均匀性以保持热稳定性且使 SFD 最小化。

[0016] 随着面记录密度持续的增大，平均直径较小的磁晶粒可以用于将所记录比特中的磁晶粒数保持在相似值。然而，随着平均晶粒直径的降低，磁记录介质的磁稳定性变得越发值得关注。

[0017] 由于磁各向异性能，磁晶粒保持其磁化取向，其中磁各向异性能与晶粒体积（ $K_u V$ ，其中 K_u 是单位体积的磁各向异性能， V 是体积）成比例。磁各向异性能与热能波动相竞争，这可能会随机地重新定向晶粒的磁化。热能波动取决于磁记录层的温度（ $K_b T$ ，其中 K_b 是玻尔兹曼常数， T 是温度）。磁各向异性能与热能的比（ $K_u V/kT$ ）之比称为能垒，它作为一种晶粒磁稳定性的度量并且与各个晶粒的体积成比例。因此，对于具有相同的单位体积磁各向异性能 K_u 的晶粒，晶粒尺寸（晶粒体积）降低可以提高面密度，但是降低了热稳定性。虽然 K_u 是用于单位体积的磁各向异性能的标签，下文中为了简明，将 K_u 称为磁各向异性能。

[0018] 克服由于平均晶粒尺寸降低导致的热稳定性降低的一种方法是增大磁晶粒的平均各向异性场 H_k 。（ $H_k = 2K_u/M_s$ ，其中 M_s 是材料的饱和磁化。）磁各向异性场较高的磁晶粒通常具有较高的磁各向异性能 K_u ，因而比磁各向异性场较低的相似尺寸的晶粒更具热稳定性。然而，晶粒平均磁各向异性场的增大也可能导致用于改变晶粒磁化取向的磁场增大，因而用于记录数据的磁场变大。

[0019] 本文所述是用于磁记录层的交换耦合合成（ECC）结构，这可以方便数据写入到磁记录层同时将磁记录层的热稳定性（即，能垒）保持在可接受的值或者该值之上。在某些实施例中，此处所述的 ECC 结构与其它磁记录层相比既方便数据写入到磁记录层，又增大了记录层的热稳定性。

[0020] 已经提出了某些 ECC 结构，其中磁记录层由连续渐变材料构成（例如，磁记录层的成分基本连续地改变，并且不会分为分开的子层）。在这种连续渐变 ECC 结构中，进一步提出了可以对成分梯度进行选择，从而使磁记录层的磁各向异性相对于与最高各向异性部分的距离的平方成比例地降低（ $H_k \propto 1/x^2$ ，其中 x 是与最高各向异性部分的距离）。换句话说，已经提出磁记录层的磁各向异性在磁记录层的高各向异性部分或其附近降低得较快，而随着与高各向异性部分距离的增大而降低得较慢。如图 2 中所示，这导致磁记录层中磁各向异性相对于位置的曲线呈凹状。在已经提出的 $H_k \propto 1/x^2$ 磁各向异性梯度的示例中，磁记录层中最高各向异性部分热稳定，无需记录层剩余各向异性较低的部分的贡献。

[0021] 图 1 中所示的磁记录介质 18 包括根据本公开的 ECC 记录层结构。根据本公开的 ECC 记录层一个实施例的示意性方框图如图 3 所示。图 3 中所示的磁记录介质 18 包括基底 32、软衬层（SUL）34、第一夹层 36、第二夹层 38、垂直记录层 40 和保护覆层 54。

[0022] 基底 32 包括适于在磁记录介质中使用的任意材料，包括例如 Al、镀 NiP 的 Al、玻

璃或陶瓷玻璃。

[0023] 尽管在图 2 中未示出,然而在某些实施例中,可以在基底 32 的顶部之上直接设置附加的衬层。附加的衬层可以是无定形的,并且提供与基底的粘附以及低表面粗糙度。

[0024] 软衬层 (SUL) 34 形成在基底 32 上 (或者如果存在的话,形成在附加的衬层上)。SUL 34 可以是具有足够饱和磁化 (M_s) 和低磁各向异性场 (H_k) 的任何软磁材料。例如, SUL 34 可以是无定形软磁材料,例如 Ni、Co、Fe;含铁的合金,例如 NiFe (坡莫合金)、FeSiAl 或 FeSiAlN;含 Co 的合金,例如 CoZr、CoZrCr 或 CoZrNb;或者含 CoFe 的合金,例如 CoFeZrNb、CoFe、FeCoB 或 FeCoC。

[0025] 第一夹层 36 和第二夹层 38 可以用于建立引发第一磁性层 42 的 HCP (0002) 生长的 HCP (六角密堆积) 晶态取向,其中磁易轴 (magnetic easy axis) 与薄膜表面垂直。

[0026] 保护覆层 54,例如类金刚石的碳,可以形成在垂直记录层 40 上。在其它示例中,保护覆层 54 可以包括例如无定形碳层,该层进一步包括氢或氮。尽管在图 3 中未示出,然而在某些示例中,也可以在保护覆层 54 上形成润滑层。

[0027] 垂直记录层 40 可以形成在第二夹层 38 上,它可以包括第一磁性层、第一交换中断层 44、第二磁性层 46、第二交换中断层 48、第三磁性层 50,以及可选地包括 CGC 层 52。第一磁性层 42 具有第一磁各向异性场 H_{k1} ,第二磁性层 46 具有第二磁各向异性场 H_{k2} ,第三磁性层 50 具有第三磁各向异性场 H_{k3} 。第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 的磁各向异性分别定向在与记录层 40 的平面基本垂直的方向上。(例如,第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 的磁易轴分别与记录层 40 的平面基本垂直)。第一交换中断层 44 可以用于调节第一磁性层 42 和第二磁性层 46 之间的垂直交换耦合,第二交换中断层 48 可以用于调节第二磁性层 46 和第三磁性层 50 之间的垂直交换耦合。在某些示例中,磁记录层 40 可以包括附加交换中断层以及磁性层 (例如, n 个磁性层以及多达 $n-1$ 个交换中断层)。

[0028] 第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 的每一个呈颗粒状,包括通过非磁性材料与相邻的磁晶粒基本分开的磁晶粒。在某些实施例中,第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 中的至少一个可以包括 Co 合金,例如结合了 Cr、Ni、Pt、Ta、B、Nb、O、Ti、Si、Mo、Cu、Ag、Ge 或 Fe 中至少一个的 Co。在某些实施例中,第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 中的至少一个可以包括例如 Fe-Pt 合金或 Sm-Co 合金。在某些实施例中,第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 中的至少一个可以包括 Co 合金和 Pt 合金的交替薄层以及 Co 合金和 Pd 合金的交替薄层。在某些实施例中,第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 的至少一个中分隔晶粒的非磁性材料可以包括氧化物,例如分隔磁晶粒的 SiO_2 、 TiO_2 、CoO、 Cr_2O_3 、 Ta_2O_5 。在其它实施例中,第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 的至少一个中分隔晶粒的非磁性材料可以包括 Cr、B、C 或另一非铁磁性元素。

[0029] 在某些示例中,第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 中的至少一个可以包括 Co-Pt 合金。一种控制层 42、46、50 的磁各向异性场的方法是控制各个层的 Pt 含量。例如, Pt 含量较高的磁性层可以具有比 Pt 含量较低的磁性层更高的磁各向异性场。在某些示例中,高磁各向异性场的层可以包括多于大约 18at. % 的 Pt。根据本公开的某些示例, H_k 梯度由第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 的 Pt 含量所定义。换句话说,在

某些示例中, $Pt_1 - Pt_2 < Pt_2 - Pt_3$, 其中 Pt_1 是第一磁性层 42 的 Pt 含量, Pt_2 是第二磁性层 46 的 Pt 含量, Pt_3 是第三磁性层 50 的 Pt 含量。在一个实施例中, Pt_1 在约 18at. % 到约 22at. % 之间, Pt_2 在约 14at. % 到约 18at. % 之间, Pt_3 小于约 14at. %, 且 $Pt_1 - Pt_2 < Pt_2 - Pt_3$ 。

[0030] 第一交换中断层 44 和第二交换中断层 48 每个都包括饱和磁化 (M_s) 相对较低的材料。例如, 第一交换中断层 44 和第二交换中断层 48 中的至少一个可以包括 Co_xRu_{1-x} 合金。如另一示例, 第一交换中断层 44 和第二交换中断层 48 中的至少一个包括 Ru 或主要由 Ru 组成。此处所用的“主要由……组成”可以是指层由指定的材料组成, 但是也可以包括随指定材料沉积的杂质, 或者从相邻层扩散到该层的其它元素或材料。在第一交换中断层 44 或第二交换中断层 48 包括 Co_xRu_{1-x} 合金的示例中, 中断层 44 或 48 的厚度低于大约 3nm。在第一交换中断层 44 或第二交换中断层 48 主要由 Ru 组成的示例中, 中断层 44 或 48 可以更薄, 例如低于约 3Å。

[0031] 除了 Ru 或 Co_xRu_{1-x} 合金以外, 第一交换中断层 44 和 / 或第二交换中断层 48 可任选地包括非磁性氧化物, 例如 SiO_2 、 TiO_2 、 CoO_2 、 Cr_2O_3 、 Ta_2O_5 。非磁性氧化物可以用于方便后续将颗粒状第二磁性层 44 沉积在第一交换中断层 44 上或者将颗粒状第三磁性层 50 沉积在第二交换中断层 48 上。在某些实施例中, 第一交换中断层 44 和第二交换中断层 48 可以包括基本相似的成分, 同时在其它实施例中, 第一交换中断层 44 和第二交换中断层 48 可以包括不同的成分。

[0032] 磁记录层 40 可任选地还包括 CGC 层 52。CGC 层 52 包括例如 CoCrPtB 合金。在某些实施例中, CoCrPtB 合金可以掺入金属或稀土元素, 例如 Ru、W 或 Nb。在某些实施例中, CGC 层 52 包括少量的氧化物, 例如 SiO_x 、 TiO_x 、 TaO_x 、 WO_x 、 NbO_x 、 CrO_x 、 CoO_x 。在其它实施例中, CGC 层 52 也可以不包括氧化物 (即, 不包括任何氧化物)。

[0033] 可以选择第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 的特定成分, 从而向各个层 42、46、50 的每一个提供预定的磁各向异性场 H_k 。特别地, 可以选择第一磁性层 42 的成分从而提供第一磁各向异性场 H_{k1} , 选择第二磁性层 46 的成分从而提供第二磁各向异性场 H_{k2} , 选择第三磁性层 50 的成分从而提供第三磁各向异性场 H_{k3} 。在某些实施例中, 最硬磁性层 (在某些实施方式中可以是第一磁性层 42) 的磁各向异性场可以限制到约 30kOe (例如, 当由 Co 合金形成时)。因此, 当磁记录层 40 的平均晶粒尺寸足够小时, 最硬磁性层可能不够稳定。为了克服此问题, 第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 的平均各向异性相对较高, 从而这三个磁性层 42、46、50 中的至少二个对磁记录层 40 的磁化方向的热稳定性有贡献。

[0034] 一种用于对第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 实现相对较高的平均磁各向异性场同时仍然能够获得 ECC 结构所提供的益处的方式是选择第一、第二和第三磁性层 42、46、50 的成分, 使得 H_{k1} 和 H_{k2} 之间的差 (即, $H_{k1} - H_{k2}$) 小于 H_{k2} 和 H_{k3} 之间的差 (即, $H_{k2} - H_{k3}$)。换句话说, 磁记录层 40 中的各个层 42、46、50 的磁各向异性降低得更慢, 或者在与第一磁性层 42 附近甚至会增加, 并且随着距第一磁性层 42 距离的增大而降低得更快。磁记录层 40 中磁各向异性场的这种分布可被称为凸状磁各向异性场分布。凸状磁各向异性场分布可以提供磁记录层 40 的磁取向热稳定性以及磁记录层 40 的可写性。在某些示例中, 凸状磁各向异性场分布可以导致更大比例的磁记录层 40 由磁各向异性场相对较高的材料形成。

[0035] H_{k1} 、 H_{k2} 和 H_{k3} 的具体值取决于,例如用于向磁记录层 40 写入数据的记录头、各个层 42、46、50 中各个晶粒的尺寸、其它两层的相应磁各向异性场、相应层的厚度、相应层的饱和磁化等等。在某些实施例中,各个层 42、46、50 的 H_k 值的范围可能分别受到每一层 42、46、50 的 K_uV 磁各向异性性能贡献的影响。例如, K_uV 值较低的第一磁性层 42 比 K_uV 值较高的第一磁性层 42 更易于写入(即,允许应用较低的磁场以改变 K_uV 值较低的层 42 中晶粒的磁化取向)。因此, K_uV 值较低的第一磁性层 42 可以允许应用 H_{k2} 值较低的第二磁性层 46 和 H_{k3} 值较低的第三磁性层 50 来驱动 ECC 辅助写入过程。然而,较低的 K_uV 值可以使用来自第二磁性层 46 和第三磁性层 50 的较大的磁各向异性性能贡献,从而总体上保持垂直记录层 40 的热稳定性。对于包括给定 H_k 值的层,例如第二磁性层 46, K_uV 各向异性性能贡献受到改变材料的饱和磁化 M_s 的影响, $K_uV = 2H_kV/M_s$ 。除此之外或作为替代,有效体积 V 可以通过改变磁性层内的晶粒之间的横向磁交换而改变,这可以改变有效磁簇(在基本相似条件下改变磁取向的晶粒簇)尺寸。

[0036] 为了简化, H_{k1} 、 H_{k2} 和 H_{k3} 可以采用的值范围可以分别定义,但是当彼此结合定义时更易于理解, H_{k1} 和 H_{k2} 以及 H_{k2} 和 H_{k3} 之间的差是一种定义预定磁记录层结构的方式。单独考虑的话,无需参考其它层的 H_k 值,在某些实施例中, H_{k1} 可以在约 16kOe 到 24kOe 之间。在其它实施例中, H_{k1} 可以大于约 24kOe 或小于 16kOe。 H_{k1} 值的某些示例包括约 20kOe 或约 24kOe。

[0037] 在某些实施例中, H_{k2} 可以在约 12kOe 到约 24kOe 之间,而在其它实施例中, H_{k2} 可以大于 24kOe 或小于 12kOe。 H_{k2} 值的某些示例包括约 12kOe 到约 15kOe 之间,约 16kOe,约 19kOe 或约 24kOe。

[0038] 在某些实施例中, H_{k3} 可以小于约 15kOe,而在其它实施例中, H_{k3} 可以大于 15kOe。 H_{k3} 值的某些示例包括约 3kOe 到约 9kOe 之间,约 9kOe,约 6kOe 或约 1kOe。

[0039] 结合考虑的话,在某些实施例中, H_{k1} 可以在约 16kOe 到约 24kOe 之间, H_{k2} 可以在约 12kOe 到约 24kOe 之间, H_{k3} 可以小于 H_{k2} ,从而 H_{k1} 、 H_{k2} 和 H_{k3} 的值满足 $H_{k1}-H_{k2} < H_{k2}-H_{k3}$ 的关系。在某些实施例中, H_{k1} 在约 20kOe 到约 22kOe 之间, H_{k2} 在约 17kOe 到约 20kOe 之间, H_{k3} 在约 9kOe 到约 14kOe 之间。在另一实施例中,层 1 中 Pt 的浓度约 18-22at%,层 2 中 Pt 的浓度约 14-18at%,层 3 中 Pt 的浓度低于约 14at%, H_{k2} 约 17-20kOe, H_{k3} 约 9-14kOe。

[0040] 在某些实施例中, H_{k1} 、 H_{k2} 和 H_{k3} 之间的关系还由 H_{k2} 和 H_{k1} 之间的比值和 / 或 H_{k3} 和 H_{k2} 之间的比值所定义。例如, H_{k2}/H_{k1} 比值可以大于 H_{k3}/H_{k2} 比值。在某些实施例中, H_{k2}/H_{k1} 可以大于约 0.6, H_{k3}/H_{k2} 可以小于约 0.6。在某些实施例中, H_{k2}/H_{k1} 可以大于约 0.7, H_{k3}/H_{k2} 可以小于约 0.7。在某些实施例中, H_{k2}/H_{k1} 可以大于约 0.9, H_{k3}/H_{k2} 可以小于约 0.9。在某些实施例中, H_{k2}/H_{k1} 可以大于约 1.0, H_{k3}/H_{k2} 可以小于约 1.0。在某一实施例中, H_{k2}/H_{k1} 可以约为 1.2。

[0041] 在某些实施例中,不管 H_{k2}/H_{k1} 的值, H_{k3}/H_{k2} 可以小于约 0.6。在某些实施例中, H_{k3}/H_{k2} 可以小于约 0.1。

[0042] 第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 的饱和磁化可以相同,也可以不同。在某些实施例中,第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 的每一层的饱和磁化 M_s 可以在约 350emu/cm³到约 700emu/cm³之间。在某些示例中,第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 中至少一个的饱和磁化可以在约 450emu/cm³到约 700emu/cm³之

间。例如,第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 中至少一个的饱和磁化可以在约 $550\text{emu}/\text{cm}^3$ 。

[0043] 第一磁性层 42 的厚度可以在约 5nm 到约 10nm 之间。第二磁性层 46 的厚度可以在约 3nm 到约 7nm 之间。第三磁性层 50 的厚度可以小于约 10nm。如上所述,各个磁性层 42、46、50 中每一层的厚度可以对各个层 42、46、50 的 H_k 值和 / 或 M_s 值的选择产生影响。在一个实施例中,第二磁性层 46 的厚度可以小于约 4nm, H_{k1}/H_{k2} 大于约 0.8 且 H_{k2}/H_{k3} 小于约 0.8。

[0044] 图 4A-4E 是图示第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 的磁各向异性场配置示例的视图。图 4A-4E 图示磁记录层 40 配置的示例,其中可以选择第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50 的成分,从而使得差 $H_{k1}-H_{k2}$ 小于差 $H_{k2}-H_{k3}$ 。如上所述, H_{k1} 、 H_{k2} 和 H_{k3} 之间的关系还可以由第一比值 H_{k2}/H_{k1} 和 / 或第二比值 H_{k3}/H_{k2} 定义。

[0045] 例如,图 4A 图示磁记录层 40,其中 $H_{k1}-H_{k2}$ 小于 $H_{k2}-H_{k3}$ 。此外, H_{k2}/H_{k1} 可以大于约 0.6,在某些实施例中,可以大于约 0.9。图 4A 所示的磁记录层 40 配置的比值 H_{k3}/H_{k2} 可以小于约 0.6,并且可以小于 0.1。例如, H_{k1} 可以在约 16kOe 到约 24kOe 之间, H_{k2} 可以在约 12kOe 到约 24kOe 之间, H_{k3} 可以小于约 15kOe。在一个实施例中, H_{k1} 为约 20kOe, H_{k2} 为约 16kOe, H_{k3} 为约 9kOe。在另一实施例中, H_{k1} 为约 20kOe, H_{k2} 为约 19kOe, H_{k3} 为约 6kOe。在再一实施例中, H_{k1} 为约 24kOe, H_{k2} 为约 16kOe, H_{k3} 为约 1kOe。

[0046] 作为另一示例,图 4B 图示磁记录层 40,其中 $H_{k1}-H_{k2}$ 小于 $H_{k2}-H_{k3}$ 。此外, $H_{k1}-H_{k2}$ 小于 0, H_{k2}/H_{k1} 大于约 1.0,例如约为 1.2。在图 4B 所示的实施例中,比值 H_{k3}/H_{k2} 可以小于约 0.6,在某些实施例中,可以小于约 0.1。在一个实施例中, H_{k1} 为约 20kOe, H_{k2} 为约 24kOe, H_{k3} 为约 1kOe。

[0047] 图 4C-4E 图示磁记录层 40 包括在第三磁性层 50 上形成的 CGC 层 52 的实施例。在 CGC 层 52 直接形成在第三磁性层 50 上的实施例中,CGC 层 52 和第三磁性层 50 可以为了第三磁性层 50 和 CGC 层 52 在第二磁性层 46 和第一磁性层 42 上的 ECC 作用而充当单个合成层。换句话说,厚度-加权平均磁各向异性场 H_{k34} 可以由 H_{k3} 的厚度-加权平均以及 CGC 层 52 的磁各向异性场 H_{k4} 来近似。对于磁各向异性 $K_u V$ 的贡献,合成层(第三磁性层 50 和 CGC 层 52)可以被一起考虑,合成层 $K_u V$ 的计算可以基于第三磁性层 50 和 CGC 层 52 的组合厚度和磁矩。包括第三磁性层 50 和 CGC 层 52 的合成层可以对第二磁性层 46 和第一磁性层 42 产生 ECC 作用,这与包括磁各向异性场 H_{k34} 的单层基本相似。与 H_k 相同但横向交换耦合较低的层相比,CGC 层 52 内的晶粒之间的横向交换耦合可以降低用于变换 CGC 层 52 内晶粒的磁化取向而施加的磁场。因此,在某些实施例中,有效的 H_{k34} 可以低于 H_{k3} 和 H_{k4} 的厚度-加权平均。因此,在某些实施例中,当定义凸状磁各向异性渐变时,仅仅考虑 H_{k3} 而不考虑 H_{k4} 。

[0048] 在某些实施例中,如图 4C 和 4D 所示,CGC 层 52 可以包括小于 H_{k3} 或基本等于 H_{k3} 的磁各向异性场 H_{k4} 。在某些实施例中,如图 4C 中所示,CGC 层 52 和第三磁性层 50 的磁各向异性场之差 $H_{k4}-H_{k3}$ 可以大于差 $H_{k3}-H_{k2}$ 。换句话说,凸状磁各向异性场梯度可以延伸到 CGC 层 52。

[0049] 在其它实施例中,如图 4D 所示, $H_{k4}-H_{k3}$ 可以不大于差 $H_{k3}-H_{k2}$ 。在该实施例中,凸状磁各向异性场梯度可以不延伸到 CGC 层 52,而是可以基本延伸穿过第一磁性层 42、第二磁

性层 46 和第三磁性层 50。

[0050] 在其它实施例中,如图 4E 所示,CGC 层 52 包括大于 H_{k3} 的磁各向异性场 H_{k4} 。与 $H_{k4}-H_{k3}$ 不大于差 $H_{k3}-H_{k2}$ 的实施例相比,当 H_{k4} 大于 H_{k3} 时,凸状磁各向异性场梯度可以不延伸到 CGC 层 52,而是可以基本延伸穿过第一磁性层 42、第二磁性层 46 和第三磁性层 50。

[0051] 尽管上述实施例涉及包括三个磁性层以及可任选的 CGC 层的磁记录层,但是在某些实施例中,磁记录层可以包括多于三个磁性层。通常地,包括凸状磁各向异性梯度的磁记录层的概念可以扩展到任意数量的磁性层。例如,如图 5A 所示,磁记录层 60 可以包括 $(2n-1)$ 层,包括 n 个磁性层交替 $n-1$ 个交换中断层,其中 n 是大于等于 3 的整数。除此之外或作为替代,磁记录层 61 可以包括磁性层 n 上形成的 CGC 层 71,如图 5B 所示。特别地,图 5A 图示了第一磁性层 62,该层 62 可以是颗粒状磁性层,具有导致磁各向异性场相对较高的成分。第一磁性层 62 的磁各向异性场沿基本与记录层 60 的平面垂直的方向定向(例如,第一磁性层 62 的晶粒磁易轴基本与记录层 60 的平面垂直)。第一磁性层 62 包括 Co 合金,例如 Co 与 Cr、Ni、Pt、Ta、B、Nb、O、Ti、Si、Mo、Cu、Ag、Ge 或 Fe 中的至少一个组合。在某些实施例中,第一磁性层 62 可以包括例如 Fe-Pt 合金或 Sm-Co 合金。在某些实施例中,第一磁性层 62 可以包括 Co 合金和 Pt 合金或 Pd 合金的交替薄层。在某些实施例中,分隔第一磁性层 62 的非磁性材料可以包括分隔磁晶粒的氧化物,例如 SiO_2 、 TiO_2 、CoO、 Cr_2O_3 、 Ta_2O_5 。在其它实施例中,分隔第一磁性层 62 中晶粒的非磁性材料可以包括 Cr、B、C 或其它非铁磁性元素。

[0052] 第一交换中断层 64 形成在第一磁性层 62 上。第一交换中断层 64 包括 Co_xRu_{1-x} 合金。作为另一示例,第一交换中断层 64 可以包括 Ru 或主要由 Ru 组成。在第一交换中断层包括 Co_xRu_{1-x} 合金的示例中,中断层 64 的厚度低于约 3nm。在第一交换中断层 64 主要由 Ru 组成的示例中,中断层 64 可以更薄,例如小于约 3Å。

[0053] 第二磁性层 66 形成在第一交换中断层 64 上,并且可以是颗粒状磁性层,具有导致磁各向异性场相对较高的成分。如上所述,第二磁性层 66 的磁各向异性小于或基本等于或大于第一磁性层 62 的磁各向异性。第二磁性层 66 的磁各向异性沿基本与记录层 60 的平面垂直的方向定向(例如,第二磁性层 66 中晶粒的易轴可以与记录层 60 的平面基本垂直)。第二磁化层 66 可以包括 Co 合金,例如 Co 与 Cr、Ni、Pt、Ta、B、Nb、O、Ti、Si、Mo、Cu、Ag、Ge 或 Fe 中至少一个组合。在某些实施例中,第二磁性层 66 可以包括例如 Fe-Pt 合金或 Sm-Co 合金。在某些实施例中,第二磁性层 66 可以包括 Co 合金和 Pt 合金或 Pd 合金的交替薄层。在某些实施例中,分隔第二磁性层 66 的非磁性材料可以包括分隔磁晶粒的氧化物,例如 SiO_2 、 TiO_2 、CoO、 Cr_2O_3 、 Ta_2O_5 。在其它实施例中,分隔第二磁性层 66 中晶粒的非磁性材料可以包括 Cr、B、C 或其它非铁磁性元素。

[0054] 磁记录层 60 包括任何数量的交替形式的磁性层和交换中断层。每个后续的磁性层可以具有被选择成使磁记录层 60 在其多个磁性层之间包括凸状磁各向异性场梯度的成分。换句话说,可以选择各个磁性层的成分,从而 $H_{k(n-2)}-H_{k(n-1)}$ 小于 $H_{k(n-1)}-H_{k(n)}$, 其中 H_{ki} 是层 i 的磁各向异性场。例如,可以选择第一磁性层 62、第二磁性层 66 和第三磁性层(未示出)的成分,从而 $H_{k1}-H_{k2}$ 小于 $H_{k2}-H_{k3}$ 。交换中断层 $n-168$ 形成在磁性层 $(n-1)$ (未示出)上。交换中断层 $n-168$ 可以包括钌或钌合金,并且具有与第一交换中断层 64 相似或者与第一交换中断层 64 不同的成分。在某些实施例中,交换中断层 $n-168$ 可以主要由钌组成或者包括钌,

而在其它实施例中,交换中断层 n-168 可以包括钌合金,例如 $\text{Co}_x\text{Ru}_{1-x}$ 。除了 Ru 或 $\text{Co}_x\text{Ru}_{1-x}$ 合金以外,交换中断层 n-168 可任选地包括非磁性氧化物,例如 SiO_2 、 TiO_2 、 CoO 、 Cr_2O_3 、 Ta_2O_5 。

[0055] 磁性层 n 70 形成在交换中断层 n-168 上,并且在某些实施例中,可以是颗粒状磁性层,其磁各向异性相对较低,例如小于记录层 60 中任何其它磁性层的磁各向异性。磁性层 n 的磁各向异性场沿与记录层 60 的平面基本垂直的方向定向。磁性层 n 70 可以包括例如 Co 合金、Fe-Pt 合金、Sm-Co 合金,也可以包括或不包括非磁性氧化物,例如上述 SiO_2 、 TiO_2 、 CoO 、 Cr_2O_3 或 Ta_2O_5 。磁性层 n 70 的成分可以不同于第一磁性层 62 和 / 或第二磁性层 66 的成分,从而磁性层 n 70 的磁各向异性场与磁记录层 60 中的其它磁性层的磁各向异性场一起导致凸状磁场梯度。例如,磁性层 n 70 可以包括与第一磁性层 62 和 / 或第二磁性层 66 相似的成分,但是比例不同。

[0056] 在某些实施例中,CGC 层 71 (图 5B 所示) 可以与上述参考图 3 所述的 CGC 层 52 相似。

[0057] 一种形成垂直磁记录层的方法在图 6 中示出。该方法可以形成具有磁各向异性场 H_{k1} 的第一磁性层 (72),在第一磁性层上形成第一交换中断层 (74),在第一交换中断层上形成第二磁性层 (76)。第二磁性层具有第二磁各向异性场 H_{k2} 。在某些实施例中,该方法还包括在第二磁性层上形成第二交换中断层 (78),在第二交换中断层上形成第三磁性层 (80)。第三磁性层具有第三磁各向异性场 H_{k3} 。在某些实施例中, $H_{k1}-H_{k2}$ 小于 $H_{k2}-H_{k3}$ 。

[0058] 尽管上述磁记录层包括与磁性层交替的中断层,但是在某些实施例中,磁记录层也可以不包括每一对相邻磁性层之间的中断层。例如,磁记录层可以包括第二磁性层 46 和第三磁性层 50 (图 3),这两层彼此直接相邻地形成,无需介入其间的第二中断层 48。这一概念可以扩展到其它磁性层对,例如第一磁性层 42 和第二磁性层 46。另外,在包括多于三个磁性层的实施例 (例如,例如参考图 5 所述的实施例) 中,磁记录层 60 可以包括多达 $2n-1$ 层,其中包括 n 个磁性层以及多达 $n-1$ 个中断层。在上述实施例中,某些相邻磁性层对包括介入的中断层,其它相邻磁性层对不包括介入的中断层。

[0059] 尽管上述公开主要涉及包括磁记录介质的装置,但是本文所述的磁性层结构也可以用于其它应用。例如,本文所述的磁性层结构可以用于磁传感器或磁阻随机存取存储器 (MRAM)。

[0060] 示例

[0061] 以下示例是本公开的实施例的说明,但是并不限制本公开的范围。这些示例基于应用理想化磁性层的理论计算。磁性层各自具有相同的 M_s 和 H_{ex} 值。示例中的磁记录层不包括 CGC 层。在以下示例中,参数如下定义。等式 1 定义层 i 的有效磁厚度 Δ_i 。

$$[0062] \quad \Delta_i = \frac{M_{si}\delta_i}{M_{s1}\delta_1}$$

[0063] 等式 1

[0064] 其中 M_{si} 是层 i 的饱和磁化, δ_i 是层 i 的厚度, M_{s1} 是层 1 (即,第一磁性层) 的饱和磁化, δ_1 是层 1 的厚度。

[0065] 等式 2 定义层 i 的有效各向异性 k_i 。

$$[0066] \quad k_i = \frac{M_{si}H_{Ai}\delta_i}{M_{s1}H_{A1}\delta_1} = \Delta_i \frac{H_{Ai}}{H_{A1}}$$

[0067] 等式 2

[0068] 其中 M_{si} 是层 i 的饱和磁化, H_{Ai} 是层 i 的磁矫顽力, δ_i 是层 i 的厚度, M_{s1} 是层 1 的饱和磁化, H_{A1} 是层 1 的磁矫顽力, δ_1 是层 1 的厚度。

[0069] 等式 3 定义层 i 和层 j 之间的有效耦合 X_{ij} :

$$[0070] \quad X_{ij} = \frac{2J_{ij}}{K_1\delta_1}$$

[0071] 等式 3

[0072] 其中 J_{ij} 是层 i 和层 j 之间的量子机械耦合, K_1 是层 1 的磁各向异性性能, δ_1 是层 1 的厚度。

[0073] 对于以下示例,某些参数设为固定。例如, $\Delta_2 = \Delta_3 = 0.5 \Delta_1$ 。换句话说,层 2 和 3 的有效厚度设定为相等,其中的每一个是层 1 有效厚度的一半。

[0074] 在以下估计示例 1-3 中,对各个相干转换三层磁记录层做比较,其中三个磁性层的磁各向异性为 H_{A1} 、 $H_{A2} = 0.75H_{A1}$, $H_{A3} = 0.5H_{A1}$ 。磁各向异性分布导致为 $0.8125H_{A1}$ 的平均磁各向异性 $\langle H_A \rangle$ 。然而,在示例中, $\langle H_A \rangle$ 保持恒定, κ_2 值可以选择,其设定 κ_3 值。 X_{12} 和 X_{23} 是自由参数。

[0075] 示例 1

[0076] 图 7A 和 7B 图示磁性层 1 的磁各向异性值 H_{A1} 为 20kOe、磁性层 2 的磁各向异性值 H_{A2} 为 16kOe、磁性层 3 的磁各向异性值 H_{A3} 为 9kOe 的示例。这种磁各向异性分布是根据本公开的凸状磁各向异性梯度。 $H_{A1} - H_{A2}$ 为 4kOe, 小于 $H_{A2} - H_{A3}$, $H_{A2} - H_{A3}$ 为 7kOe。另外, H_{A2}/H_{A1} 为 0.8, 大于 H_{A3}/H_{A2} (0.5625)。在示例 1 中, $\Delta_2 = \Delta_3 = 0.5$, $\kappa_2 = 0.4$, $\kappa_3 = 0.225$ 。

[0077] 示例 1 的磁取向变换性能与相干地变换的参考三层磁记录层相比较,例如,其中三个磁性层是耦合的,充当单个磁性层,其有效各向异性被计算为各个层的各向异性的有效厚度-加权平均。第一磁性层的各向异性 $H_{A1} = 20kOe$, 相对有效厚度为 1; 第二磁性层的各向异性 $H_{A2} = 0.8H_{A1} = 16kOe$, 相对有效厚度为 0.5; 第三磁性层的各向异性 $H_{A3} = 0.45H_{A1} = 9kOe$, 相对有效厚度为 0.5。该磁各向异性分布导致有效厚度-加权平均磁各向异性 $\langle H_A \rangle$ 为 $0.8125H_{A1} = 16.25kOe$, 并且能垒改变 $\Delta E / \Delta E_1$ 为 1.625。能垒改变表示与仅包括第一磁性层的磁记录层相比,第二和第三磁性层对磁记录层热稳定性的作用。

[0078] 将示例 1 的磁取向变换性能与参考相干变换磁记录层相比较,在基本等于参考磁记录层能垒 (1.625) 的能垒处发现最小归一化 H_{sw} 值 (磁记录层的有效矫顽力; 等于磁记录层的取向变换时所施加的磁场, 由第一磁性层的矫顽力进行归一化)。参照图 7A 和 7B, 圆圈 82 的近似坐标为 $X_{12} = 0.45$, $X_{23} = 0.45$ 。转向图 7A, 在 $X_{12} = 0.45$, $X_{23} = 0.45$ 处归一化 H_{sw} 值为约 0.73, 如圆圈 84 所示。与参考膜的归一化 H_{sw} 值 0.8125 相比较, 示例 1 的磁各向异性梯度使归一化 H_{sw} 值下降约 11%。换句话说, 包括经选择以提供凸状磁各向异性梯度的三个磁性层的磁记录层与包括经选择以提供线性磁各向异性梯度的三个磁性层的磁记录层相比可以更易于变换且热稳定性可与之比拟。

[0079] 示例 2

[0080] 图 8A 和 8B 图示磁性层 1 的磁各向异性值 H_{A1} 为 20kOe、磁性层 2 的磁各向异性值 H_{A2} 为 19kOe、磁性层 3 的磁各向异性值 H_{A3} 为 6kOe 的示例。该磁各向异性分布是根据本公开的凸状磁各向异性梯度。 $H_{A1} - H_{A2}$ 为 1kOe, 小于 $H_{A2} - H_{A3}$, $H_{A2} - H_{A3}$ 为 13kOe。另外, H_{A2}/H_{A1} 为

0.95, 大于 H_{A3}/H_{A2} (0.3158)。在示例 2 中, $\Delta_2 = \Delta_3 = 0.5$, $\kappa_2 = 0.475$, $\kappa_3 = 0.15$ 。

[0081] 示例 2 的磁取向变换性能与相干地变换的参考三层磁记录层相比较, 例如, 其中三个磁性层是耦合的, 充当单个磁性层, 其有效各向异性被计算为各个层的各向异性有效厚度 - 加权平均。第一磁性层的各向异性 $H_{A1} = 20\text{kOe}$, 相对有效厚度为 1; 第二磁性层的各向异性 $H_{A2} = 0.95H_{A1} = 19\text{kOe}$, 相对有效厚度为 0.5; 第三磁性层的各向异性 $H_{A3} = 0.3H_{A1} = 6\text{kOe}$, 相对有效厚度为 0.5。该磁各向异性分布导致平均磁各向异性 $\langle H_A \rangle$ 为 $0.8125H_{A1} = 16.25\text{kOe}$, 能垒改变 $\Delta E / \Delta E_1$ 为 1.625。能垒改变表示与仅包括第一磁性层的磁记录层相比, 第二和第三磁性层对磁记录层热稳定性的作用。

[0082] 将示例 2 的磁取向变换性能与参考相干变换的磁记录层相比较, 在基本等于参考磁记录层能垒 (1.625) 的能垒处发现最小归一化 H_{sw} 值。参照图 8A 和 8B, 圆圈 86 的近似坐标为 $X_{12} = 0.45$, $X_{23} = 0.45$ 。转到图 8A, 在 $X_{12} = 0.45$, $X_{23} = 0.45$ 处归一化 H_{sw} 值为约 0.68, 如圆圈 88 所示。与参考膜的归一化 H_{sw} 值 0.8125 相比, 示例 2 的磁各向异性梯度使归一化 H_{sw} 值下降约 20%。此外, 包括经选择以提供凸状磁各向异性梯度的三个磁性层的磁记录层与包括经选择以提供线性磁各向异性梯度的三个磁性层的磁记录层相比更易于变换且热稳定性可与之比拟。

[0083] 示例 3

[0084] 图 9A 和 9B 图示磁性层 1 的磁各向异性值 H_{A1} 为 20kOe 、磁性层 2 的磁各向异性值 H_{A2} 为 24kOe 、磁性层 3 的磁各向异性值 H_{A3} 为 1kOe 的示例。该磁各向异性分布是根据本公开的凸状磁各向异性梯度。 $H_{A1} - H_{A2}$ 为 -4kOe , 小于 $H_{A2} - H_{A3}$, $H_{A2} - H_{A3}$ 为 23kOe 。另外, H_{A2}/H_{A1} 为 1.2, 大于 H_{A3}/H_{A2} (0.0417)。在示例 3 中, $\Delta_2 = \Delta_3 = 0.5$, $\kappa_2 = 0.6$, $\kappa_3 = 0.025$ 。

[0085] 示例 3 的磁取向变换性能与相干地变换的参考三层磁记录层相比较, 例如, 其中三层磁性层是耦合的, 充当单个磁性层, 其有效各向异性被计算为各个层的各向异性有效厚度 - 加权平均。第一磁性层的各向异性 $H_{A1} = 20\text{kOe}$, 相对有效厚度为 1; 第二磁性层的各向异性 $H_{A2} = 1.2H_{A1} = 24\text{kOe}$, 相对有效厚度为 0.5; 第三磁性层的各向异性 $H_{A3} = 0.05H_{A1} = 1\text{kOe}$, 相对有效厚度为 0.5。该磁各向异性分布导致平均磁各向异性 $\langle H_A \rangle$ 为 $0.8125H_{A1} = 16.25\text{kOe}$, 能垒改变 $\Delta E / \Delta E_1$ 为 1.625。能垒改变表示与仅包括第一磁性层的磁记录层相比, 第二和第三磁性层对磁记录层热稳定性的作用。

[0086] 将示例 3 的磁取向变换性能与参考相干变换磁记录层相比较, 在基本等于参考磁记录层能垒 (1.625) 的能垒处发现最小归一化 H_{sw} 值 (磁记录层的有效矫顽力; 等于使磁记录层取向变换所施加的磁场, 由第一磁性层的各向异性归一化)。参照图 9A 和 9B, 圆圈 90 的近似坐标为 $X_{12} = 0.45$, $X_{23} = 0.45$ 。转到图 9A, 在 $X_{12} = 0.45$, $X_{23} = 0.45$ 处归一化 H_{sw} 值为约 0.55, 如圆圈 92 所示。与参考膜的归一化 H_{sw} 值 0.8125 相比较, 示例 3 的磁各向异性梯度使归一化 H_{sw} 值下降约 48%。这证明包括经选择以提供凸状磁各向异性梯度的三层磁性层的磁记录层与包括经选择以提供线性磁各向异性梯度的三个磁性层的磁记录层相比更易于变换, 且热稳定性可与之比拟。

[0087] 示例 4

[0088] 图 10A 和 10B 图示磁性层 1 的磁各向异性值 H_{A1} 为 24kOe 、磁性层 2 的磁各向异性值 H_{A2} 为 16kOe 、磁性层 3 的磁各向异性值 H_{A3} 为 1kOe 的示例。该磁各向异性分布是根据本公开的凸状磁各向异性梯度。 $H_{A1} - H_{A2}$ 为 4kOe , 小于 $H_{A2} - H_{A3}$, $H_{A2} - H_{A3}$ 为 15kOe 。另外, H_{A2}/H_{A1} 为

0.667, 大于 H_{A3}/H_{A2} (0.0625)。在示例 4 中, $\Delta_2 = \Delta_3 = 0.5$, $\kappa_2 = 1/3$, $\kappa_3 = 1/48$ 。

[0089] 示例 4 的磁取向变换性能与相干地变换的参考三层磁记录层相比较, 例如, 其中三个磁性层是耦合的, 充当单个磁性层, 其有效各向异性被计算为各个层的各向异性有效厚度 - 加权平均。第一磁性层的各向异性 $H_{A1} = 24\text{kOe}$, 相对有效厚度为 1; 第二磁性层的各向异性 $H_{A2} = (2/3)H_{A1} = 16\text{kOe}$, 相对有效厚度为 0.5; 第三磁性层的各向异性 $H_{A3} = (1/24)H_{A1} = 1\text{kOe}$, 相对有效厚度为 0.5。该磁各向异性分布导致平均磁各向异性 $\langle H_A \rangle$ 为 $0.677H_{A1} = 16.25\text{kOe}$, 能垒改变 $\Delta E / \Delta E_1$ 为 1.354。能垒改变表示与仅包括第一磁性层的磁记录层相比, 第二和第三磁性层对磁记录层热稳定性的作用。

[0090] 将示例 4 的磁取向变换性能与参考相干变换磁记录层相比较, 在基本等于参考磁记录层能垒 (1.354) 的能垒处发现最小归一化 H_{sw} 值。参照图 10A 和 10B, 圆圈 94 的近似坐标为 $X_{12} = 0.35$, $X_{23} = 0.4$ 。转到图 10A, 在 $X_{12} = 0.35$, $X_{23} = 0.4$ 处归一化 H_{sw} 值为约 0.42, 如圆圈 96 所示。与参考膜的归一化 H_{sw} 值 0.677 相比, 示例 4 的磁各向异性梯度使归一化 H_{sw} 值下降约 61%。这证明包括经选择以提供凸状磁各向异性梯度的三个磁性层的磁记录层与包括经选择以提供线性磁各向异性梯度的三个磁性层的磁记录层相比更易于变换, 且热稳定性可与之比拟。

[0091] 已经说明了本公开的各种实施例。上述实施方式及其它实施方式在所附权利要求书的范围内。

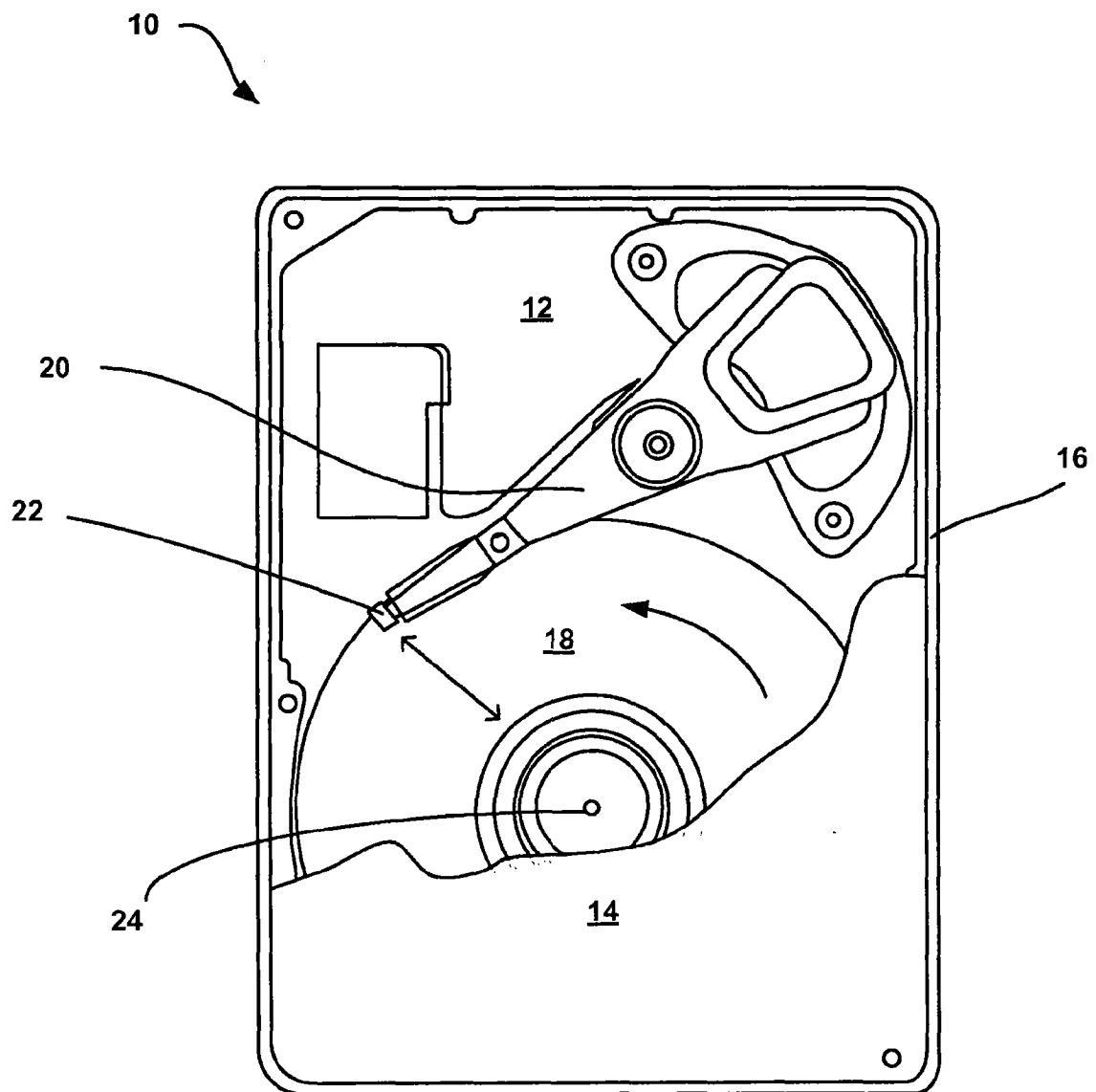


图 1

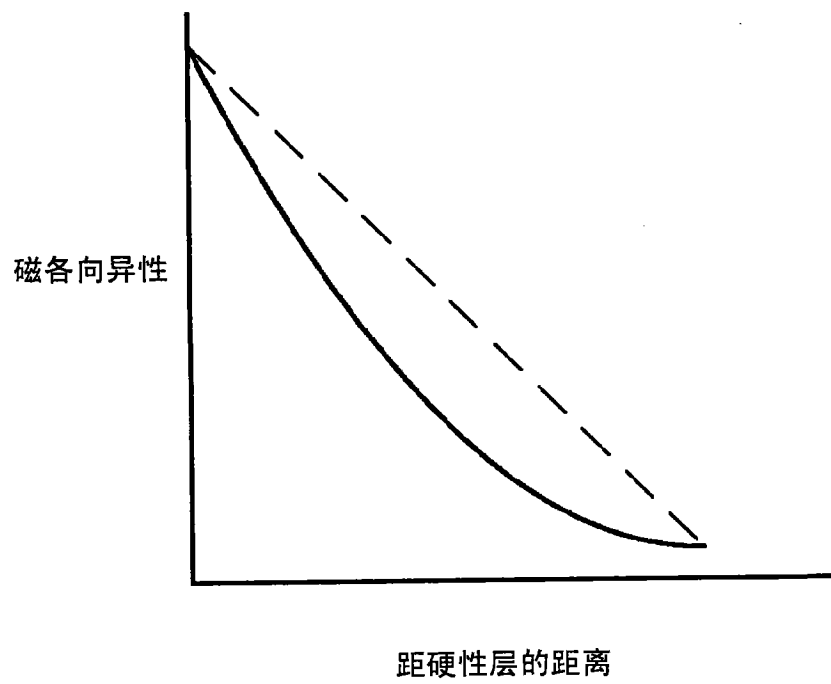


图 2

30

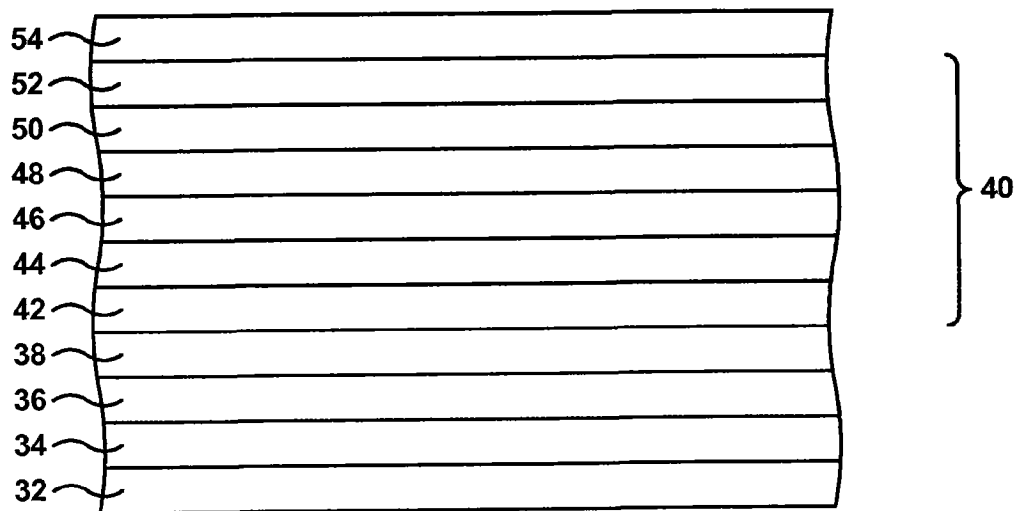


图 3

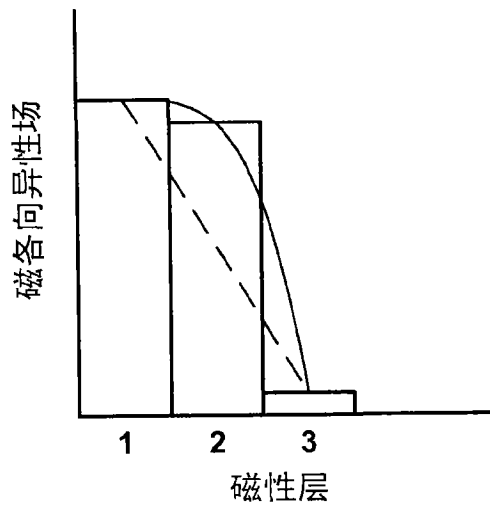


图 4A

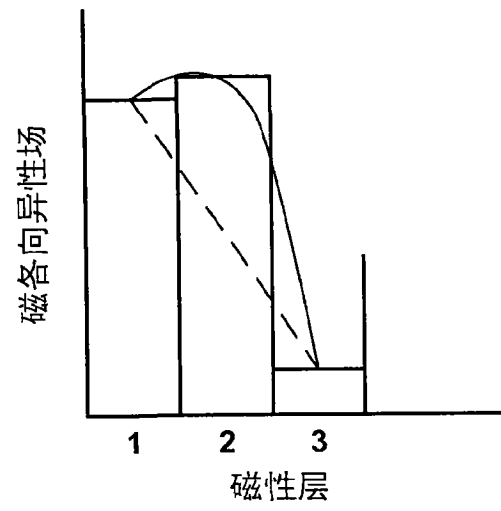


图 4B

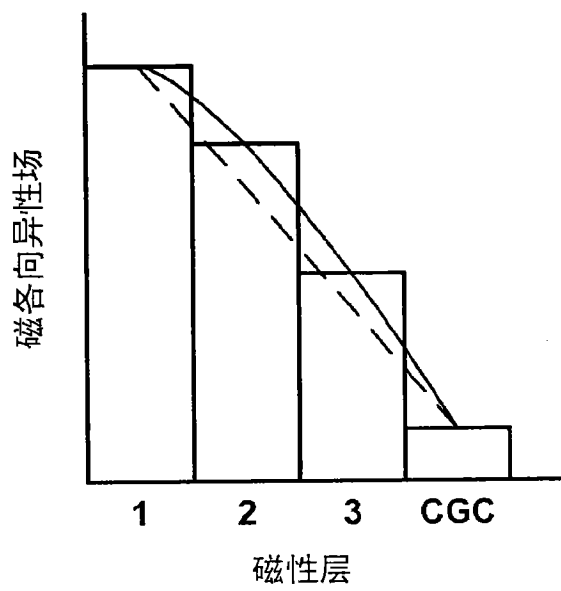


图 4C

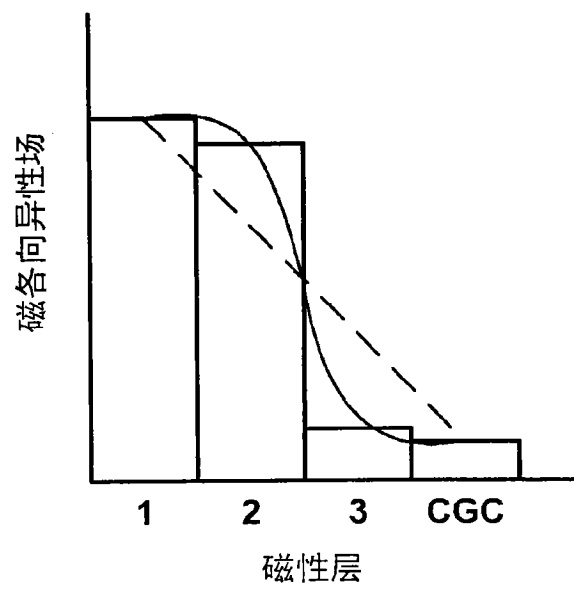


图 4D

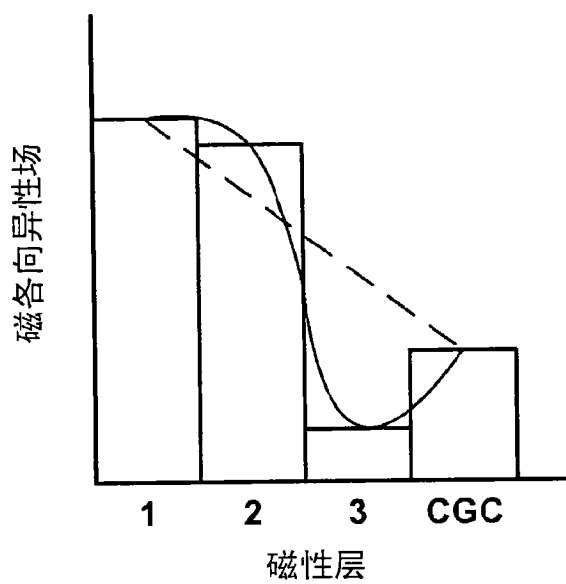


图 4E

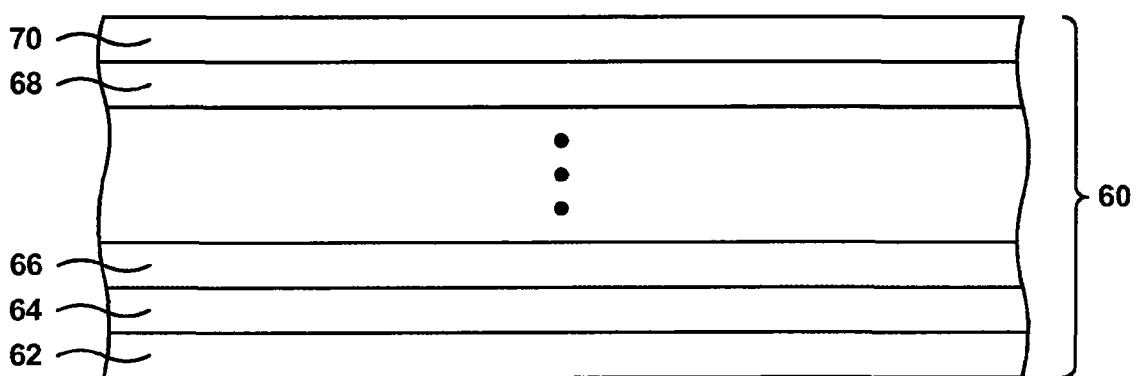


图 5A

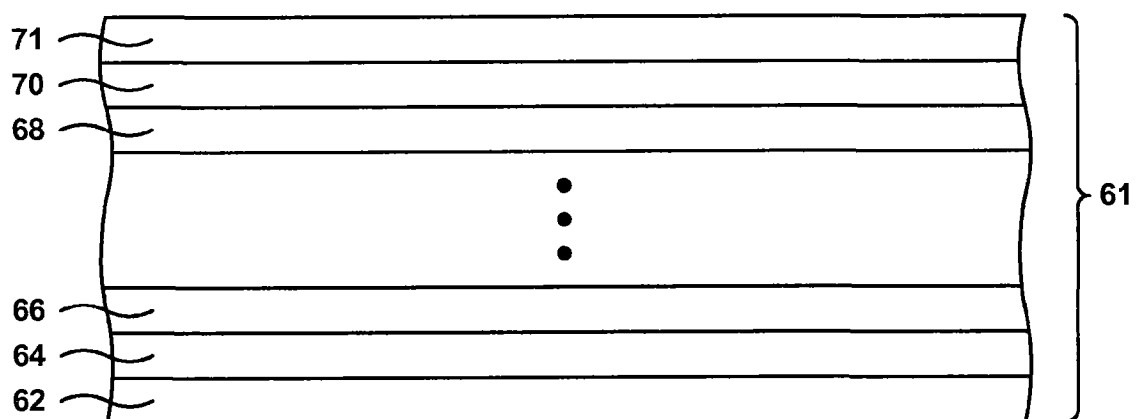


图 5B

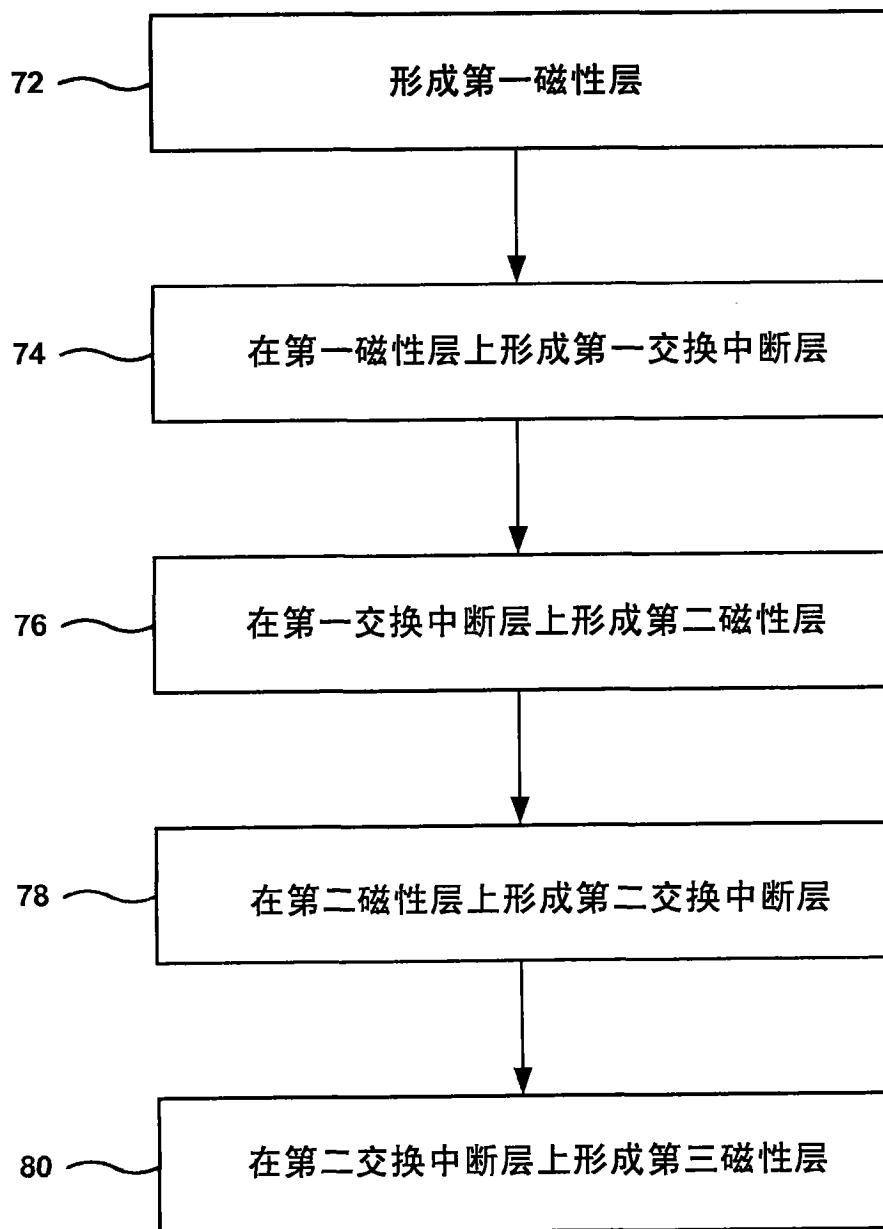


图 6

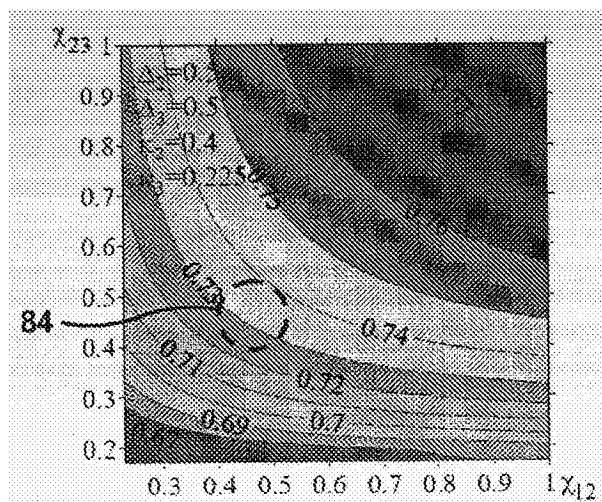


图 7A

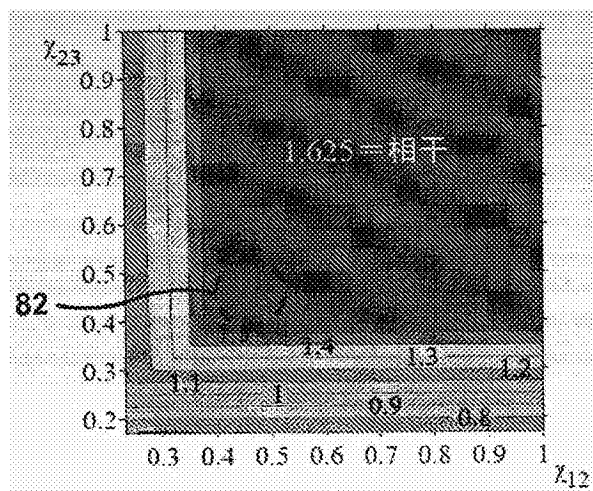


图 7B

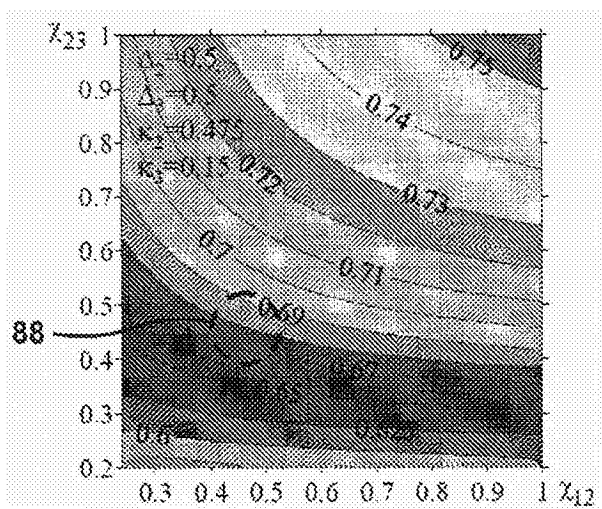


图 8A

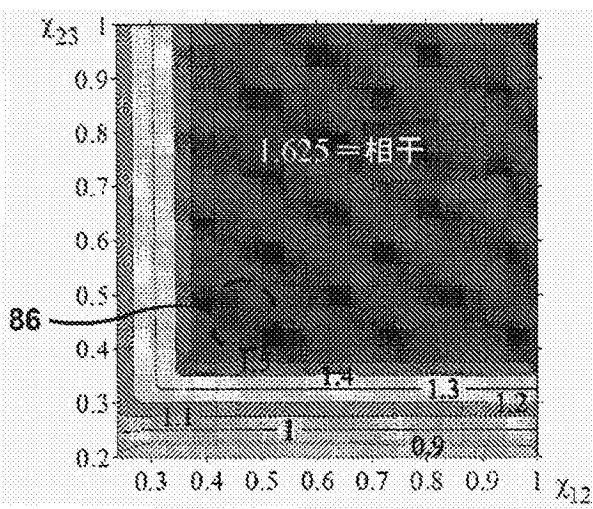


图 8B

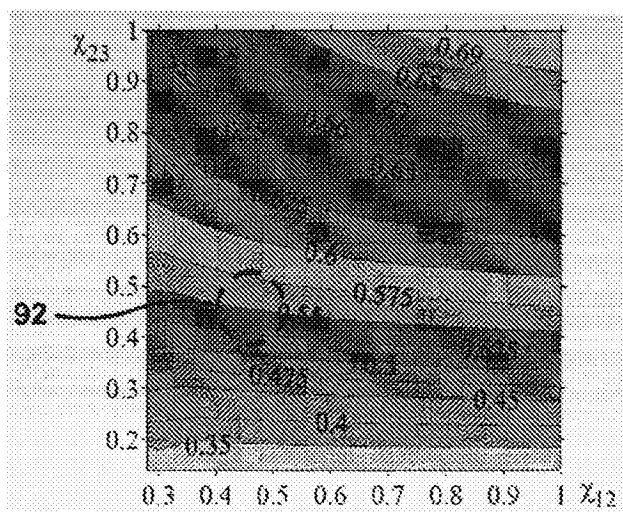


图 9A

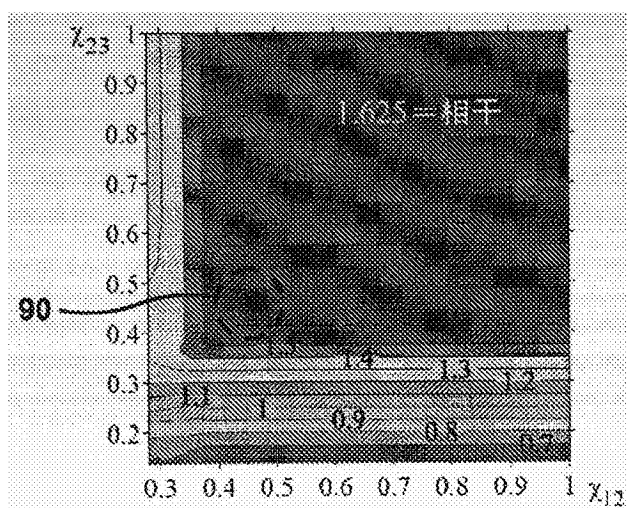


图 9B

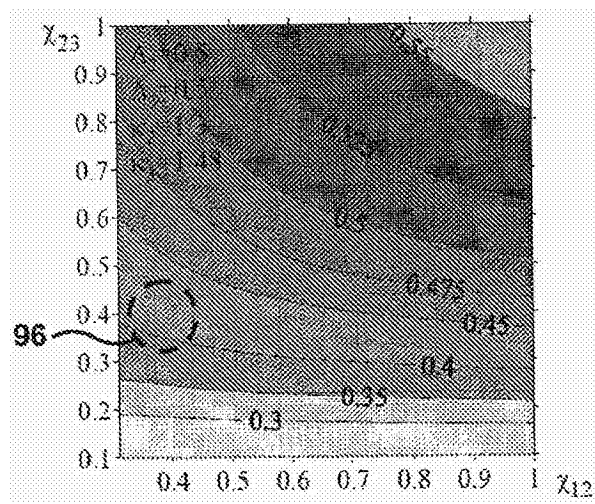


图 10A

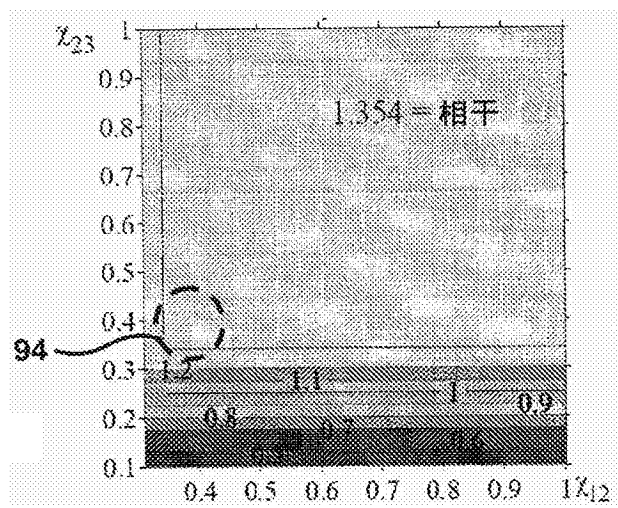


图 10B