(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 119365785 A
(43)申请公布日 2025.01.24

(21)申请号 202380044522.9

(22)申请日 2023.04.04

(30)优先权数据
22305459.4 2022.04.05 EP

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2024.12.02

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2023/058767 2023.04.04

(87)PCT国际申请的公布数据
WO2023/194346 EN 2023.10.12

(71)申请人 原子能和能源替代品委员会
地址 法国巴黎
申请人 法国国家科学研究中心
格勒诺布尔-阿尔卑斯大学

(72)发明人 阿尔瓦罗·帕洛米诺
伯纳德·迪埃尼 里卡多·索萨
伊奥恩-路西安·普雷杰贝阿努

(74)专利代理机构 北京中博世达专利商标代理有限公司 11274
专利代理师 魏敏

(51)Int.Cl.
G01R 33/12(2006.01)

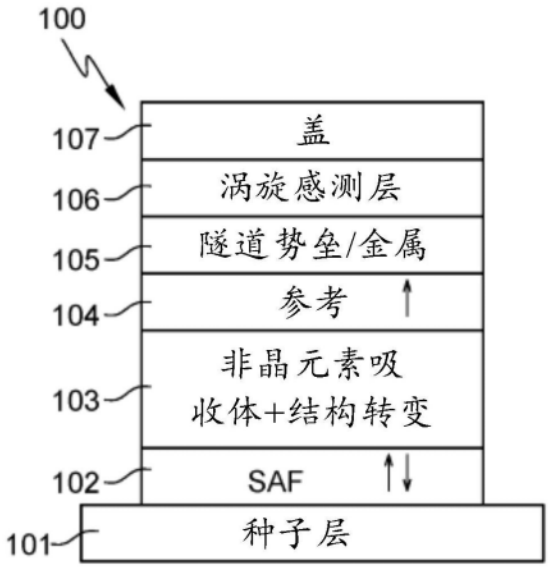
权利要求书2页 说明书14页 附图10页

(54)发明名称

对面外的磁场敏感的磁阻传感器

(57)摘要

本发明的目的是对面外施加的磁场敏感的磁阻传感器(100),该磁阻传感器(100)包括:-感测层(106);-参考层(104),该参考层(104)具有固定磁化,所述固定磁化的方向垂直于所述参考层的平面;-非磁性间隔层(105),该非磁性间隔层(105)将所述感测层(106)与所述参考层(104)隔开;所述感测层(106)在不存在所施加磁场的情况下自发地具有磁化涡旋结构,涡核直径在存在垂直于所述参考层(104)的平面的所施加磁场的情况下变化。



CN 119365785 A

1.一种对面外施加的磁场敏感的磁阻传感器(100、200、300),包括:

-感测层(106、206、306);

-参考层(104、204、304),所述参考层(104、204、304)具有固定磁化,所述固定磁化的方向垂直于所述参考层的平面;

-非磁性间隔层(105、205、305),所述非磁性间隔层(105、205、305)将所述感测层(106、206、306)与所述参考层(104、204、304)隔开;

所述感测层(106、206、306)在不存在所施加磁场的情况下具有磁化涡旋结构,涡核直径在存在垂直于所述参考层(104、204、304)的平面的所施加磁场的情况下变化。

2.根据权利要求1所述的磁阻传感器,其特征在于,所述感测层是用被定义为所述感测层的厚度除以所述感测层的面内特性尺寸的纵横比来选择的,所述纵横比被包括在0.2与2之间。

3.根据权利要求2所述的磁阻传感器,其特征在于,所述纵横比被包括在0.2与1之间。

4.根据前述权利要求中任一项所述的磁阻传感器,其特征在于,所述非磁性间隔层是隧道势垒层或金属间隔。

5.根据前述权利要求中任一项所述的磁阻传感器,其特征在于,所述参考层磁耦合到具有垂直各向异性的合成反铁磁层。

6.根据前述权利要求中任一项所述的磁阻传感器,其特征在于,所述非磁性间隔层是隧道势垒层,并且所述感测层包括由基于铁、钴和非晶元素的合金制成的第一层,所述第一层与所述隧道势垒层接触。

7.根据权利要求6所述的磁阻传感器,其特征在于,所述感测层包括至少另一层材料,所述材料适合于:吸收存在于所述第一层中的所述非晶元素的至少一部分,以及确保所述感测层中包括的各层之间的结构转变。

8.根据权利要求7所述的磁阻传感器,其特征在于,适合于吸收所述非晶元素的至少一部分的所述材料选自以下材料:钽、钼、钨、或铪或它们的混合物。

9.根据前述权利要求中任一项所述的磁阻传感器,其特征在于,所述感测层包括一个或多个氧化物层的叠层。

10.根据前述权利要求中任一项所述的磁阻传感器,其特征在于,所述磁阻传感器包括避免涡核磁化方向切换的一个或多个层的布置。

11.根据前述权利要求中任一项所述的磁阻传感器,其特征在于,所述参考层磁耦合到由具有垂直各向异性的硬质材料制成的层。

12.根据前述权利要求中任一项所述的磁阻传感器,其特征在于,所述磁阻传感器包括反铁磁层,所述反铁磁层引起所述感测层上的垂直交换偏置,所述反铁磁层磁耦合到所述感测层。

13.根据权利要求12所述的磁阻传感器,其特征在于,所述磁阻传感器包括所述感测层与所述反铁磁层之间的非磁性间隔层,所述感测层与所述反铁磁层之间的所述非磁性间隔层引起所述感测层磁化上的垂直交换偏置,以便调节交换偏置耦合强度。

14.根据前述权利要求中任一项所述的磁阻传感器,其特征在于,所述涡旋感测层的几何形状和尺寸被选择为使得所述感测层的涡旋结构在至少+200mT或-200mT的待感测的所施加磁场的范围内不会被湮灭。

15.一种感测设备,其特征在于,所述感测设备包括多个根据前述权利要求中任一项所述的磁阻传感器,多个所述磁阻传感器以串联和/或并联方式电耦合。

16.根据权利要求15所述的感测设备,所述感测设备包括四个根据权利要求1至14中任一项所述的磁阻传感器,四个所述磁阻传感器根据惠斯通电桥结构来布置,并且被配置为使得位于电桥的两个相对分支的两个传感器的所述参考层沿第一面外方向被磁化,而位于电桥的另外两个分支的两个磁阻的所述参考层沿相反的面外方向被磁化。

对面外的磁场敏感的磁阻传感器

技术领域

[0001] 本发明属于自旋电子学领域,并且涉及一种对磁场的面外(out-of-plane)分量敏感的磁阻传感器。为了便于描述,磁场的面外分量将被称为面外磁场或垂直于平面的磁场。

背景技术

[0002] 自旋电子磁场传感器广泛应用于汽车应用、工业应用或生物医学应用。(P.P.Freitas,R.Ferreira and S.Cardoso,2016,"Spintronic Sensors,"in Proceedings of the IEEE,vol.104,no.10,pp.1894-1918(P.P.Freitas、R.Ferreira和S.Cardoso于2016年发表在《电气与电子工程师协会会报》第104卷第10期、第1894-1918页的"自旋电子传感器"))。

[0003] 与诸如霍尔传感器、探测线圈、巨磁阻传感器、超导量子干涉仪(SQUID)或磁通门等其它替代物相比,这些类型的磁阻传感器因其高灵敏度、紧凑大小、低功耗、与互补金属氧化物半导体(CMOS)集成的兼容性以及低成本的组合而展现出多项优势。

[0004] 自旋电子传感器将磁场变化转换为在直流(dc)或交流(ac)偏置电流下的电压变化或电阻变化。这种电阻变化是基于自旋阀(spin-valve,SV)中的巨磁阻(giant magnetoresistance,GMR)效应或磁隧道结(magnetic tunnel junction,MTJ)中的隧道磁阻(tunnel magnetoresistance,TMR)的。这两种磁阻结构都显现出它们的电阻随固定磁化的参考层(reference layer,RL)与感测层(sensing layer,SL)磁化之间的相对取向而变化。

[0005] 众所周知,基于涡旋(vortex)的磁阻传感器会表现出高饱和场,这构成对于具有大动态范围的应用来说有吸引力的特征(Suess,D.,Bachleitner-Hofmann,A.,Satz,A.et al.,2018,"Topologically protected vortex structures for low-noise magnetic sensors with high linear range".Nat Electron 1,362-370(Suess,D.,Bachleitner-Hofmann,A.,Satz,A.等人于2018年在《自然电子1》的第362-370页发表的"用于具有高线性范围的低噪声磁传感器的拓扑保护的涡旋结构"))。

[0006] 对于诸如速度传感器或电流传感器等某些应用,较大的线性范围是重要的特征,因为这降低了偏置磁体在传感器上产生的场的幅度所需的精度。然而,这也伴随着传感器灵敏度的降低。

[0007] 涡旋结构的稳定性起因于系统总能量的最小化,该总能量包括由于涡旋结构的不均匀性而产生的交换能、来自偶极相互作用(dipolar interaction)的静磁能、磁晶各向异性能以及塞曼能量(Zeeman energy)(在施加了外部场的情况下)。对于某些几何形状,纳米级圆柱体的基能态倾向于涡旋结构(configuration),正如理论所预测的那样(Metlov,K.L.and Lee Y.,2008,"Map of metastable states for thin circular magnetic nanocylinders."Appl.Phys.Lett.92,112506(2008)(Metlov,K.L.和Lee Y.Map,2008,"用于薄圆形磁性纳米圆柱体的亚稳态图",《应用物理快报》92,112506(2008)))。在这样的几何形状下,静磁能的功率超过交换能,使得形成与磁矩的实现面内磁通闭合的面内(in-

plane)卷曲相对应的、具有面外磁化涡核(vortex core)的涡旋结构,以降低原本由圆柱体中心处的磁奇点产生的交换能成本。在现有技术传感器中使用的通常情况下,圆柱体的厚度远小于其直径。在这种情况下,涡核的直径由定义为$l_{ex}=\sqrt{\frac{A}{\frac{1}{2}\mu_0 M_S^2}}$的交换长度给出。对于诸如坡莫合金($Ni_{80}Fe_{20}$)、钴、铁等常用材料,该长度通常在5纳米(nm)的量级。因此,涡核的面积是圆盘(disk)面积的很小一部分。例如,对于直径为1微米的圆盘,核面积与圆盘面积之比在$(5/1000)^2=2.5\ 10^{-5}$的量级。

[0008] 现有技术的基于涡旋的传感器对磁场的面内分量敏感。在整个本说明书中,“面内”意味着平行于传感器的堆叠层的平面,而“面外”或“垂直于面”意味着沿该平面的法线。图1示出了这种现有技术传感器的磁堆叠结构1。

[0009] 磁堆叠1依次包括:

[0010] -种子层2;

[0011] -钉扎合成反铁磁结构3;

[0012] -间隔(spacer)4,当传感器是磁性隧道结时,该间隔可以是隧道势垒(barrier),或者当传感器是金属自旋阀时,该间隔可以是非磁性金属间隔;

[0013] -感测层5,该感测层在没有所施加磁场的情况下自发地处于磁涡旋结构中;

[0014] -盖层6。

[0015] 钉扎合成反铁磁结构3依次包括:

[0016] -反铁磁层(antiferromagnetic,AF)7,该反铁磁层通常基于铱锰(IrMn)合金或铂锰(PtMn)合金(例如,$Ir_{20}Mn_{80}$或$Pt_{50}Mn_{50}$);

[0017] -铁磁层(ferromagnetic,FM)8;

[0018] -间隔层9,该间隔层在两个相邻磁性层之间提供反铁磁层间耦合(所谓的RKKY耦合),该间隔层例如由钌(Ru)制成;

[0019] -参考层10。

[0020] 该参考层10是合成反铁磁体(Synthetic Antiferromagnet,“SAF”)的一部分。SAF包括由金属间隔9隔开、反铁磁地耦合的两个层8和10。这两个层8和10分别被认为是参考(或偏振器)层10和钉扎层8。SAF与反铁磁钉扎层7相关联,该反铁磁钉扎层向SAF的与其接触的磁钉扎层8提供交换偏置。然后,在该反铁磁钉扎层7上方生长SAF。所述钉扎合成反铁磁结构(AF/SAF)的形式(AF/FM/Ru/参考)通常用作钉扎参考电极,其中层FM 8是诸如钴或主要基于铁(Fe)、钴(Co)、镍(Ni)的合金等铁磁材料。当传感器是具有将参考层与感测层隔开的非磁性金属间隔的金属自旋阀时,整个堆叠通常具有面心立方(face centered cubic)(fcc(111)结构(texture))。当传感器是磁隧道结时,参考层与感测层之间的间隔就是氧化物隧道势垒,该氧化物隧道势垒最常见于由氧化镁(MgO)体心立方(bcc)(001)结构制成。在这种情况下,为了在三重对称fcc(111)AF/SAF结构上生长四重对称bcc(001)氧化物隧道势垒,参考层10通常由复合三层组成,该复合三层依次包括:

[0021] -Co层或钴铁(CoFe)层,该Co层或CoFe层与Ru或铱(Ir)的间隔层9接触,引起反平行的RKKY(Ruderman-Kittel-Kasuya-Yoshida)耦合;

[0022] -纳米晶层或非晶层,该纳米晶层或非晶层由诸如钽(Ta)、钨(W)、钼(Mo)或铪(Hf)等材料制成,该纳米晶层或非晶层能够确保fcc结构与bcc结构之间的结构转变,同时从相

邻层吸收非晶元素(例如,硼(B))并提供层间铁磁耦合,

[0023] -非晶钴铁硼(CoFeB)合金,该非晶CoFeB合金与隧道势垒4接触。这种非晶CoFeB层在以250摄氏度(℃)以上的温度退火期间会结晶成与该隧道势垒相同的晶体结构,从而产生本领域技术人员所熟知的大隧道磁阻值(TMR)。

[0024] 合成反铁磁(SAF)结构允许减少由该硬质参考堆叠对感测层施加的杂散场(stray field),并为参考层提供更大的磁稳定性。铁磁参考层具有面内磁化,并与反铁磁材料的层交换耦合。如本领域技术人员所熟知的,通过以下方式来将SAF的与反铁磁层7相邻的铁磁材料层8钉扎到面内方向:在该特定方向上的外部施加的磁场下对堆叠进行退火并使其从反铁磁层的阻挡温度之上冷却下来,以使铁磁层磁化在该期望方向上饱和。

[0025] 在对面内场敏感的基于涡旋的传感器中,在受涡旋湮灭场限制的一定范围的场中,由于与待感测的面内场的方向垂直的方向上的横向涡核运动,观察到电阻随场的变化几乎是线性的。目前最先进的在感测层中具有涡旋结构的磁阻传感器因其线性R(H)特性和涡旋结构的稳定性而具有吸引力。

[0026] 图2描绘了现有技术涡旋传感器的运行机制。图2显示了涡旋感测层的沿x轴(即,钉扎参考层的磁化的方向)的、随待感测的场而变化的磁响应,该场沿钉扎参考层的磁化的x方向被施加在该层的平面中。在零施加场(C点)处,平衡状态(equilibrium state)是这样的涡旋结构:该涡旋结构具有被定位在圆盘的中心的核(假设没有来自参考堆叠的杂散场)。在给定的非零面内场H(B点)下,涡旋磁化通过涡核在垂直于所施加场方向的方向上横向移动而沿场方向极化。在图2中,场是沿x方向施加的,使得涡核在y方向上移动了距离Δd,该距离是由于塞曼能量、交换能与静磁能之间的平衡而产生的。场越大,涡核移动得越多。这产生了线性M(H)特性和R(H)特性,直到称为湮灭场(Ha)的特定特性场,在该湮灭场中涡旋结构完全湮灭、并且形成单畴微磁结构(A)。在从饱和返回的过程中,涡旋在被称为成核场(H_n)的特性磁场中再次形成。

[0027] 这种已知的基于涡旋的传感器的一个特殊优点是与单畴椭圆传感器的线性范围(5毫特斯拉(mT))相比的更大的线性范围(40mT),这表示感测范围增加了八倍,但是灵敏度降低了相同的倍数,这由如Suess,D.,Bachleitner-Hofmann,A.,Satz,A.等人于2018年在《自然电子1》第362-370页发表的“用于具有高线性范围的低噪声磁传感器的拓扑保护的涡旋结构”进行了报道述说。

[0028] 这种类型的传感器的缺点是其噪声。这种噪声是由于涡核在其横向运动中因各向异性的局部波动而被陷获(trap)所产生的。由于氧化物隧道势垒与感测层之间的界面处的界面各向异性的空间变化,这种情况尤其可能发生在磁隧道结中。事实上,众所周知,这种各向异性对诸如局部氧浓度或局部硼浓度等参数非常敏感。由于在现有技术涡旋传感器中,涡核的面积很小(通常直径为5nm),因此即使对于几纳米量级的小缺陷(例如晶界),陷获也可能是非常起作用的。这可能会引起等效的巴克豪森噪声(Barkhausen noise),该巴克豪森噪声已知在磁畴壁(domain wall)传播中但此处用于涡核传播。该噪声会影响这种类型的传感器的信噪比。

[0029] 另外,这些传感器对平行于参考层磁化的钉扎方向(即,面内方向)的场的分量敏感。因此,在磁场的测量的方向上存在限制。

[0030] 在此背景下,本发明的目的是提供一种基于涡旋的磁阻传感器,该磁阻传感器能

够测量场的面外分量并且呈现改进的信噪比。

发明内容

[0031] 为此,本发明提出了一种对面外施加的磁场敏感的磁阻传感器,该磁阻传感器包括:

[0032] -感测层;

[0033] -参考层,该参考层具有固定磁化,所述固定磁化的方向垂直于所述参考层的平面;

[0034] -非磁性间隔层,该非磁性间隔层将所述感测层与所述参考层隔开;

[0035] 所述感测层在不存在施加磁场的情况下具有磁化涡旋结构,涡核直径在存在垂直于所述感测层的平面的施加磁场的情况下变化。

[0036] 由于本发明,对以垂直于感测层的平面为取向的磁场进行感测是可能的,其中感测层处于涡旋微磁结构中。传感器原理是基于面外磁化涡核在待感测的面外场的影响下的膨胀或收缩的。通过在包括面外磁化参考层的磁隧道结或自旋阀中实现这样的感测层,涡核的这种膨胀/收缩会产生磁阻信号,该磁阻信号可以用于测量待感测的施加场的幅度。与现有技术的基于涡旋的传感器相比,所获得的磁阻传感器显示出更大的线性范围和改进的信噪比。

[0037] 根据本发明的传感器表现出电阻随待感测的面外场的幅度的几乎线性变化。然而,这种线性变化不像现有技术传感器中那样与涡核的横向运动相关联,而是与涡核在面外施加的磁场下的膨胀/收缩有关。由于涡核的大得多的大小、以及该核的中心不会在场感测期间横向移动的事实,这些传感器的噪声大大降低,从而产生与现有技术涡旋传感器相比更高的信噪比。

[0038] 在本发明中,如我们将在说明书中进一步看到的,感测层的厚度除以传感器的横向尺寸之比有利地比现有技术涡旋传感器中的大得多。这使得涡核比现有技术涡旋传感器中的涡核宽得多,在现有技术涡旋传感器中,涡核的直径由交换长度给出。

[0039] 根据本发明的传感器还可以呈现以下特性中的一个或多个特性,这些特性是单独地考虑的或根据所有技术上可能的组合来考虑的:

[0040] -本发明的磁阻传感器包括在大致垂直于各层的平面的方向上施加流过传感器的电流的装置;

[0041] -感测层是用被定义为感测层的厚度除以感测层的面内特性尺寸的纵横比来选择的,该纵横比被包括在0.2与2之间,并且有利地,该纵横比被包括在0.2与1之间;当本发明的传感器具有带圆形横截面的圆柱形状时,感测层面内特性尺寸是其直径。然而,本发明适用于允许稳定感测层的涡旋结构的任何类型的形状。这对于正方形、具有圆角的正方形、可能具有圆角的略呈矩形的形状(长边不超过短边的两倍)、具有中等椭圆度的椭圆形(长轴与短轴之间的比不超过2)、或可稳定涡旋状态的任何其它形状来说也是如此。对于所有这些形状,感测层纵横比由其厚度与最短面内尺寸之比来定义。如果感测层具有圆盘形状,则该特性尺寸是其直径。如果该感测层是正方形或接近正方形,则该特性尺寸是该正方形边的长度。如果该感测层是矩形,则该特性尺寸是该矩形的短边。对于椭圆来说,该特性尺寸是该椭圆的短轴。

[0042] -非磁性间隔层是隧道势垒层或金属间隔;

[0043] -参考层磁耦合到具有垂直各向异性的合成反铁磁层;

[0044] -非磁性间隔层是隧道势垒层,并且感测层包括由基于铁、钴和非晶元素的合金制成的第一层,所述第一层与隧道势垒层接触;

[0045] -感测层包括至少另一层材料,该材料适合于:吸收存在于第一层中的非晶元素的至少一部分,以及确保感测层中包括的各层之间的结构转变;

[0046] -适合于吸收非晶元素的至少一部分的材料选自以下材料:钽、钼、钨、或铪或它们的混合物;

[0047] -感测层包括一个或多个叠层氧化物层;

[0048] -本发明的磁阻传感器包括避免涡核磁化方向切换的一个或多个层的布置;

[0049] -参考层磁耦合到由具有垂直各向异性的硬质材料制成的层;

[0050] -本发明的磁阻传感器包括反铁磁层,该反铁磁层引起感测层上的垂直交换偏置,所述反铁磁层磁耦合到感测层;

[0051] -本发明的磁阻传感器包括感测层与反铁磁层之间的非磁性间隔层,该非磁性间隔层引起感测层磁化上的垂直交换偏置,以便调节交换偏置耦合强度;

[0052] -涡旋感测层的几何形状和尺寸被选择为使得感测层的涡旋结构在至少+200mT或-200mT的待感测的施加磁场的范围内不会被湮灭。

[0053] 本发明的目的还在于一种感测设备,该感测设备包括多个根据本发明的磁阻传感器,该多个磁阻传感器以串联和/或并联方式电耦合。

[0054] 所述感测设备可以包括四个根据本发明的磁阻传感器,四个磁阻传感器根据惠斯通电桥(Wheatstone bridge)结构来布置,并且被配置为使得位于电桥的两个相对分支的两个传感器的所述参考层沿第一面外方向被磁化,而位于电桥的另外两个分支的两个磁阻的所述参考层沿相反的面外方向被磁化。

[0055] 本发明的其它特性和优点将参考附图,从以下出于指示而绝非限制的目的而给出的描述中清楚地显现出来,在各附图中:

[0056] -图1示出了根据现有技术的涡旋传感器;

[0057] -图2示出了图1中的现有技术涡旋传感器的运行机制;

[0058] -图3示意性地示出了根据本发明的传感器的第一实施例;

[0059] -图4示出了图3中的涡旋传感器的运行机制;

[0060] -图5显示了图3中的传感器的堆叠的详细实施例;

[0061] -图6示出了图5中的传感器的电阻随垂直于磁堆叠的平面施加的外部磁场而变化的相关性;

[0062] -图7a显示了通过微磁模拟对直径为60nm、厚度为60nm且磁饱和为0.8豪安/米(MA/m)的磁性元件执行的磁化反转的横截面图;

[0063] -图7b显示了在图7a中施加的相同外部场下的最上层表层的Mz分量的二维(2D)视图;

[0064] -图7c显示了在y=0处的最上层表层的Mz分量的一维(1D)视图;

[0065] -图8显示了对于不同直径D的感测层,磁化Mz随所施加的面外磁场Hz而演变(evolution);

[0066] -图9显示了具有不同直径的不同纳米图案传感器的电学结果;

[0067] -图10显示了对厚度为60nm且直径为60nm的圆柱体的反转的微磁模拟,其中对于不同饱和磁化强度值,$A_{ex}=13\times10^{-12}$焦/米^2(J/m^2)且$\alpha=0.01$;

[0068] -图11显示了具有相似直径的两个传感器的电阻随所施加的面外磁场的演变,一个传感器使用镍铁(NiFe)材料(Ms=0.756MA/m)作为感测层材料,并且另一个传感器使用Co材料(Ms=1.44MA/m)作为感测层材料;

[0069] -图12a和b分别显示了:

[0070] o现有技术涡旋传感器的磁涡核在各层的平面中的外部施加场下,在存在界面缺陷的情况下的位移期间所遵循的路径的示意表示及其随后的磁化响应;以及

[0071] o本发明的涡旋传感器的磁涡核在垂直于各层的平面的外部施加场下,在存在界面缺陷的情况下所遵循的膨胀的示意表示及其随后的磁化响应;

[0072] -图13a显示了由于涡核极性变化而在传感器中观察到的实验磁滞行为;

[0073] -图13b显示了本发明的传感器中的非磁滞行为,该非磁滞行为归因于来自非完全补偿的SAF结构的杂散场的存在,该非完全补偿的SAF结构在特定方向上稳定涡核极性;

[0074] -图14a和b分别显示了本发明的磁阻传感器的示意表示和详细表示,该磁阻传感器具有在垂直于多层的平面的方向上磁化的未补偿磁参考层;

[0075] -图15分别显示了本发明的磁阻传感器的示意表示和详细表示,该磁阻传感器具有在垂直于各层的平面的方向上磁化的经补偿磁参考层和顶部交换偏置层;

[0076] -图16显示了本发明的处于惠斯通电桥结构中的感测设备,该感测设备包括四个本发明的基本磁阻传感器。

具体实施方式

[0077] 图3示意性地示出了根据本发明的传感器100的第一实施例。

[0078] 所述传感器100是磁堆叠,该磁堆叠依次包括:

[0079] -种子层101;

[0080] -合成反铁磁结构102;

[0081] -结构破坏层103;

[0082] -参考层104;

[0083] -间隔105,当传感器是磁性隧道结时,该间隔可以是隧道势垒,或者当传感器是金属自旋阀时,该间隔可以是非磁性金属间隔;

[0084] -感测层106,该感测层在没有施加磁场的情况下自发地处于磁涡旋结构中;

[0085] -盖层107。

[0086] 以上磁堆叠具有柱体的形式,该柱体的截面有利地具有圆形形式。

[0087] 如上所述,感测层106具有磁化涡旋结构。此外,感测层106表现出如下纵横比(即,厚度除以面内特性尺寸(此处是直径)):在0.2与2之间,并且有利地,在0.2与1之间。与现有技术涡旋传感器相比,该传感器中的感测层的纵横比更接近于1。因此,涡旋在这里比现有技术面内敏感传感器中的涡旋更多地被限制在狭窄的圆柱体内。出乎意料的是,由于这种限制,涡核变得比现有技术涡旋传感器中的涡核大得多。此外,如我们参考图4将看到的,当向设备施加面外场时,涡核直径剧烈变化,在现有技术涡旋传感器中不是这样的情况。

[0088] 参考层104具有垂直于参考层104的平面的固定单畴磁化。如图3所示,参考层RL最常与合成反铁磁体(“SAF”)102一起使用。然而,本发明不一定需要SAF。

[0089] 涡旋结构中的感测层106是磁阻元件的一部分。磁阻元件可以是隧道结或巨磁阻金属堆叠。在这两种情况下,该元件包括顶部电极和底部电极,使得电流可以在大致垂直于各层的平面的方向上流经设备。如本领域技术人员所熟知的,在磁隧道结和在全金属巨磁阻堆叠中,对各层的性质的要求是不同的。事实上,在隧道结中,堆叠中存在不同的晶体结构(靠近隧道势垒的体心(bcc)以及堆叠底部和顶部的面心立方(fcc));而在巨磁阻堆叠中,该结构可以在整个堆叠中保持fcc。

[0090] 与该现有技术相比,参考图4描述了图3中的传感器100的运行机制。

[0091] 与现有技术中对面内场敏感的基于旋涡的传感器不同,传感器100旨在感测面外场。从物理角度来看,本发明的传感器100不依赖于在施加面内场时涡核的横向面内移动,而是依赖于感测层106的涡核在面外场Hz(即,沿z轴,Oxy平面是传感器的不同层的平面)下的膨胀/收缩。

[0092] 在图4的传递曲线中描绘了感测层106的沿z轴的磁化响应Mz随所施加磁场的面外分量Hz的变化,该传递曲线显示了感测层106的磁化强度Mz随所施加磁场Hz的z轴分量的变化。至于现有技术磁阻传感器,所述传递曲线显示了:线性响应区和沿其上升分支和下降分支这两者的两个特性场;湮灭场Ha,在该湮灭场中涡核扩展到整个感测层区域,使得微磁结构变为在面外方向上几乎饱和的单畴;以及成核场Hn,当场从饱和下降时,涡旋在该成核场再次形成。

[0093] 如前所述,在现有技术涡旋传感器中,感测层直径通常很大,在一微米或几微米的量级,至少比感测层的厚度大一个数量级。因此,涡核非常狭小,该涡核具有由交换长度给出的几纳米的直径。在另一方面,有利的是,根据本发明,在直径较小的圆柱体中,当直径变得更接近膜厚度时,涡核直径变得更宽。如果在与涡核磁化平行的面外方向上施加场,则核直径倾向于增加:由状态B相比于未施加场的状态C示出了这种情况。在状态B中,假设涡核的磁化方向沿z轴向下(即,涡核的磁化的z分量为负),则分量Hz平行于涡核磁化且与涡核磁化在同一方向上(Mz为负),并且涡核直径的直径与其在没有施加场的状态A下的值相比增大。相反,如果与核磁化反平行地施加场,则核的直径会减小。还需要注意的是,有利的是,本发明的传感器应该在其线性响应范围内使用;换句话说,优选地,不应该在湮灭场Ha之上使用所施加场,在该湮灭场处,如图4的状态A所示,涡核扩展到整个感测层区域。我们将在后面的描述中回到这个问题上,以展示如何避免这种湮灭并将传感器保持在其线性响应中。

[0094] 如果该感测层106在包括面外磁化参考层104的自旋阀或磁隧道结中实现,则感测层106的涡核直径的这些变化在由正涡旋湮灭场和负涡旋湮灭场限定的场范围内产生电阻变化。基于所述电阻变化,可以得到所施加磁场的对应面外分量的值。

[0095] 图5示出了本发明的涡旋传感器的第一可能实施例,其中感测层被插入到磁隧道结中,该磁隧道结的参考层在面外方向上被磁化。

[0096] 如果该设备是磁隧道结,则隧道势垒105是氧化物层或氮化物层,例如氧化镁(MgO)、氧化铝(AlOx)、氧化钛(TiOx)或氮化铝(AlN)、氮化钛(TiN),但优选地是已知提供较大TMR信号的MgO。为了用MgO获得较大TMR(较大TMR通常意味着TMR高于80%,优选地高于

140％,优选地高于200％),MgO层和夹在MgO层之间的两个磁电极必须具有具备(100)结构的晶体bcc结构。如本领域技术人员所熟知的,这可以通过使用铁钴硼(FeCoB)层作为磁电极来实现,所述FeCoB层在沉积时是非晶的,但是可以在通常处于250℃至400℃范围中的温度下退火时以bcc结构重结晶。

[0097] 为了发生这种重结晶,必须将基于铁钴(FeCo)的合金中所包含的B元素或更一般的非晶元素从该合金中排出。为此,紧邻基于FeCo的层在其与MgO层界面相对的界面上沉积了能够吸收这种非晶元素的材料的薄层。这种非晶元素吸收层例如可以由Ta、W、Mo或Hf制成。

[0098] 考虑到以上因素,涡旋感测层106首先可以包括与MgO势垒105接触的基于FeCoB的薄层。在该层中,B是非晶元素。B可以用诸如锆(Zr)或铌(Nb)等其它非晶元素替代。该第一层通常具有在1.5nm至5nm范围内的厚度。然后,该FeCoB与几埃(angstrom)厚的薄层接触,该薄层能够在对结构进行退火时吸收非晶元素。该层可以例如由W、Mo、Ta制成。感测层106还包括优选地由诸如坡莫合金NiFe(成分接近于Ni80Fe20)等软磁材料、或者诸如Co90Fe10或FeCoB合金等软FeCo层制成的磁性层,以便当该层的微磁结构在待感测的场的影响下变化时将该层的磁滞最小化。该感测层106还可以是包括几个这种层的多层。感测层106还可以包括诸如W、Mo、Ta等非磁性金属的薄叠层(厚度在0.1nm至0.5nm的量级),目的是吸收任何非晶元素或破坏晶粒生长以降低感测层的顶部粗糙度。如果该设备是磁隧道结,则这些叠层也可以由诸如MgO、氧化钽(TaOx)、AlOx、TiOx等氧化物材料制成,目的是在感测层中引起某种界面垂直各向异性,从而允许略微减小感测层的厚度。然后,应该将电阻与这些氧化物叠层的面积的乘积(RA)调整为比提供隧道磁阻信号的主势垒的RA更低的值。这将避免由于引入这些氧化物叠层所引起的电阻增加而过度削弱磁阻信号。

[0099] 如已经解释的,该感测层的总厚度是有利地用在0.2与2之间的纵横比(厚度除以横向尺寸(此处是圆形感测层的直径))来选择的,使得其微磁平衡结构是具有显著大于交换长度的核直径的涡旋状态,优选地,该核直径至少是交换长度的两倍(即,对于诸如坡莫合金或Co90Fe10等材料,该核直径至少为10nm)。感测层的尺寸的示例是60nm量级的厚度,以将涡旋形成稳定在直径范围在50nm与200nm之间(例如60nm)的零场。

[0100] 微磁模拟可以用来计算满足涡核直径至少是交换长度两倍的涡核结构的条件的厚度范围。

[0101] 关于参考层104,其磁化被固定在垂直于磁性层的堆叠的方向上。由于测量到的磁阻变化依赖于涡旋感测层106的垂直磁化Mz的变化,因此需要参考层104的这种垂直结构。如果该堆叠是基于MgO的磁隧道结,则该参考层104优选地由与MgO势垒105接触的FeCoB合金制成。通过存在于FeCoB/MgO界面处的界面各向异性以及通过与诸如(Co/铂(Pt))多层等面外磁化多层的交换式耦合,该参考层104的磁化在面外保持固定。诸如Co/X(其中X是钯(Pd)、Ni或Ir)等其它多层被本领域技术人员所熟知用于提供较大的垂直磁各向异性(Perpendicular Magnetic Anisotropy,PMA)值。诸如CoPt有序合金、CoPd有序合金或FePt有序合金或FePd有序合金等合金或者诸如TbCo、TbFe等一些稀土过渡合金也可以提供强PMA。这种PMA多层或合金本身可以是合成反铁磁SAF层102的一部分,该合成反铁磁SAF层由两个反铁磁耦合的多层组成,所述多层例如为由通常为Ru或Ir的非磁性间隔隔开的(Co/Pt)多层,该非磁性间隔的厚度被调整以在两个相邻多层之间提供较强的反铁磁耦合(对于

Ru间隔,通常为0.8nm)。这种类型的布置是本领域技术人员所熟知的。还众所周知的是,这种SAF结构可以包含多于两个反铁磁耦合的多层,以进一步降低SAF和参考层施加在感测层上的净杂散场。由于这些PMA多层具有fcc结构,而FeCoB在退火后为bcc,因此必须在FeCoB层与PMA多层之间再次引入例如由Ta、Mo或W制成的薄结构转变层103。该层103还旨在在退火时从FeCoB合金吸收非晶元素。换句话说,在与势垒105接触的、FeCoB形成的参考层104与SAF 102的其余部分之间引入了结构破坏层103,以确保在最终设备中必须为体心立方(具有4重对称的bcc)的FeCoB层与SAF的其余部分之间的结构转变,该SAF的其余部分通常具有具备(111结构)和3重对称的fcc结构。

[0102] 此外,SAF层102生长在种子层101上以促成(111)结构。种子层101可以是Ta/Pt形式的多层。种子层101中使用的材料也可用于盖层107。

[0103] 图6示出了这样的实验结果:所述实验结果显示了传感器的电阻随垂直于图5所示的传感器的磁堆叠的平面施加的外部磁场而变化的相关性。图6显示了可获得的高达大于200mT的线性范围,这比已报道的针对面内场传感而开发的现有技术涡旋传感器的线性范围(40mT或80mT)要大得多。

[0104] 图7a显示了如图5中所定性地描述的在面外场下的感测层磁化的演变的横截面图。图7a中所表示的微磁结构是通过使用微磁模拟MuMax3软件进行微磁模拟获得的。模拟是在厚度为60nm且直径为60nm的圆柱体上执行的,该圆柱体具有如下感测层参数:

[0105] -饱和磁化强度:$M_{sat}=800\times10^{3}$安/米(A/m),

[0106] -交换刚度:$A_{ex}=13\times10^{-12}J/m^{2}$。

[0107] 图7b表示反转过程期间的顶层磁化的二维x-y视图。模拟中的网格具有1nm的单元大小。在H=0特斯拉(T)处,涡核是稳定的,此处具有沿向下方向磁化的核。通过增加场(见0.125T和0.25T处的快照),负磁化核逐渐收缩,并且伴随地,面内卷曲磁化单元变得越来越朝向面外所施加场方向极化。最后,涡旋被湮灭,并且在H=0.5T以上或H=-0.5T以下观察到单畴。

[0108] 图7c中表示了沿圆柱形感测层的直径的最上层表层(1nm单元)的沿垂直方向的磁化饱和值Mz的变化情况。

[0109] 如图8的微磁模拟所示,可以通过改变感测层直径来控制特性成核场和湮灭场,所述微磁模拟显示了对于使用与图5中相同的材料参数的不同直径D(D分别等于40nm、60nm、80nm和100nm)的感测层,磁化强度Mz随所施加的面外磁场Hz的演变。图8显示了对于直径为40nm的元件,两个单畴状态之间的反转是突然的,因为形状各向异性(感测层的厚度大于感测层的直径)有利于沿磁性元件的最长尺寸(此处是其厚度)的单畴状态。然而,对于直径为60nm或更大的情况,观察到涡旋形成,并且涡旋在外部场下稳定的线性区域随着感测元件直径的增大而扩大。鉴于前面所述,根据本发明的传感器的感测层的直径(即,特性长度)因此大于或等于感测层的厚度。可以看出,增加感测层的直径允许增加响应的线性部分的范围,同时减小响应的线性部分的斜率。这种直径依赖性允许仅通过增加传感器的直径来创建具有较大线性范围的传感器设备。此外,可以在图8中进一步看到,在Mz对Hz的响应中存在磁滞,所述磁滞表现为被恒定磁化差分隔开的两个平行的线性响应。有利的是,根据本发明的传感器将被用于这两个平行的线性响应中的一者或另一者。我们将在后面的说明书中看到,对于根据本发明的单个传感器,如何避免从一个线性部分切换到另一个线性部分。

[0110] 图8中报告的模拟得到了图9中绘制的实验结果的证实,所述实验结果显示了具有不同直径的不同纳米图案传感器的电学结果。图9显示了传感器随所施加磁场的分量Hz而变化的电阻。不同的曲线证实了具有较小电阻(对应于较大直径)的设备的模拟所预测的较大线性范围。在室温下通过直流(D.C.)磁控溅射沉积的传感器的多层堆叠成分如图5所示:

[0111] Ta3/Pt30/4×[Co0.5/Pt0.25]/Co0.5/Ru0.9/3×[Co0.5/Pt0.25]/Co0.5/Ta0.2/FeCoB1.1/MgO1.25/FeCoB1.4/Ta0.2/NiFe58/Ta1/Pt3。

[0112] 随后在300℃下将样品退火10分钟。从最大电阻结到最小电阻结(意味着从较小直径到较大直径),图9中用灰点表示的湮灭场逐渐从53mT增加到178mT。

[0113] 还可以通过改变感测层的饱和磁化强度Ms来控制特性成核场和湮灭场。图10显示了对厚度为60nm且直径为60nm的圆柱体的反转的微磁模拟,其中对于不同饱和磁化强度(Ms)值,$A_{ex}=13\times10^{-12}J/m^2$且α=0.01。观察到,与涡旋稳定区相对应的线性范围也可以通过修改感测材料的饱和磁化强度来调节。增加感测层的饱和磁化强度Ms允许(通过降低线性部分的斜率)增加响应的线性部分的范围。

[0114] 对于具有与图5中提出的实施例类似的电学直径(分别为52nm和58nm)的传感器,当比较两个传感器设备(一个传感器设备使用NiFe材料(Ms=0.756MA/m)作为感测层材料,并且另一个传感器设备使用Co材料(Ms=1.44MA/m)作为感测层材料)时,如图11中所观察到的,实验证实了线性范围随Ms的增加而增加。对于感测层由钴制成的情况,可以在不湮灭涡旋状态的情况下实现高达大于200mT的非常大的场。

[0115] 与现有技术涡旋传感器相比,根据本发明的涡旋传感器的另一个优点是其减小的磁滞。事实上,在对面内场敏感的现有技术涡旋传感器中,在涡旋感测层与隧道势垒之间的界面处随机分布的缺陷的存在改变了涡核位移路径,因为涡核会被随机陷获到与这种缺陷相关联的能量阱(energy well)中。这种效应在现有技术涡旋传感器中尤其明显,因为涡核非常狭小(交换长度约5nm),使得涡核很容易被这种小缺陷陷获。在磁隧道结中,这些缺陷可以归因于氧浓度或硼浓度在MgO/FeCoB界面上的空间变化,或者归因于堆叠中存在的第三种元素(例如Ta、锰(Mn)、W或Mo)向MgO界面的扩散。这些缺陷可以引起各向异性能量的局部变化,该局部变化然后充当涡核的陷获中心。图12a显示了包括缺陷30的现有技术感测层的平面视图。当涡核31在第一位移方向32上移动时,该涡核被陷获到在位移路径中遇到的缺陷30中(然后从该缺陷中解除陷获)。类似地,在第二位移方向33上移动的涡核31被陷获到在位移路径中遇到的缺陷30中(并从该缺陷中解除陷获)。根据涡核成核时的位置,涡核31在沿第一位移方向32移动时可以被陷获到与沿第二位移方向33移动时不同的缺陷30中以及从与沿第二位移方向33移动时不同的缺陷30中解除陷获。由于这种陷获到不同的缺陷中/从不同的缺陷中解除陷获,涡核31可以在第一位移方向和第二位移方向上遵循不同的路径。在这种现有技术传感器中,涡核在第一位移方向和第二位移方向上遵循不同的路径导致涡核的磁化的磁化分布不同,并且因此,磁传感器在外部所施加的面内磁场H的每个值处的电阻不同。

[0116] 由于这种陷获,(Mx与Hx的)传递曲线可能会根据所遵循的路径而有所不同,从而导致传感器在外部场的每个值处的电阻不同,如S.Dounia、C.Baraduc和B.Dieny在2020年的第19315026.5号欧洲专利所示。

[0117] 相比之下,根据本发明的传感器对这种缺陷及其陷获的存在的敏感度要低得多。

事实上,涡核在本发明的传感器中并不横向移动:涡核只是在设备的外部部分中的卷曲磁化在待感测的面外场的影响下被可逆地拉出面外或回到面内方向时才膨胀或收缩。因此,如图12b中示意性地描绘的,本发明的传感器在磁场下的涡旋变形比现有技术涡旋传感器中的更可逆。这使得本发明的传感器中的噪声显著降低。

[0118] 在本发明的传感器的实施例中,参考层和相关联的SAF层可以被补偿,这意味着它们不施加场或仅施加非常小的场(即,相对于反转涡核极性所需的场可忽略的场)。在这种情况下,本发明的传感器的可能缺点可能是,当在与涡核极性相反的方向上施加大于湮灭场的磁场时,涡核极性会变化。涡旋极性的这种变化会产生如图8中已经观察到的且如图13a所示的不期望的磁滞。如果传感器始终在相同的场极性(以黑色表示的小环)下运行,则永远不会出现这种磁滞。然而,如果涡核极性改变,则两个状态(A,B)在零场处的电阻之间可能会出现一定差异(ΔR)。如果经历整个周期(0.04T至-0.04T),就可以清楚地观察到这种电阻差异(ΔR)。如果从大于湮灭场的正场(H>+Ha)开始并将场减小到零,则涡核表现出正极性(A,涡核向上)。相比之下,如果从绝对值大于湮灭场的负场开始并将场减小到零(见图13a中的灰线),则涡旋极性被反转(B,涡核向下)。这使得在零施加场处观察到电阻差异ΔR。

[0119] 这个问题可以通过限制传感器暴露的场的范围来避免。场值应该保持在涡旋湮灭场以下。然而,在这种情况下,如果传感器意外地暴露在过大的场中,则仍然存在涡核极性意外切换的风险。

[0120] 为了更好地规避涡核极性意外切换的该问题,提出了第二实施例,其中参考层耦合到相关联的PMA多层或SAF层,所述参考层和所述PMA多层(或分别是所述参考层和所述SAF层)是未补偿的。因此,这些层在感测层磁化上产生面外杂散场。由于该面外杂散场,涡旋总是以相同的极性重新成核,而与饱和场方向(正或负)无关。这产生了如图13b所示的最佳响应。值得注意的是,这种杂散场只转化为对于相反场的湮灭场的微弱不对称,这可以通过感测层的较大体积来解释。

[0121] 在图14a中示意性地示出了具有未补偿的参考层和PMA多层的这种传感器200,并且在图14b中示出了更多细节。

[0122] 所述传感器200是磁堆叠,该磁堆叠依次包括:

[0123] -种子层201;

[0124] -具有垂直磁各向异性PMA材料的多层202;

[0125] -结构破坏层203;

[0126] -参考层204;

[0127] -间隔205,当传感器是磁性隧道结时,该间隔可以是隧道势垒,或者当传感器是金属自旋阀时,该间隔可以是非磁性金属间隔;

[0128] -感测层206,该感测层在没有所施加磁场的情况下自发地处于磁涡旋结构中;

[0129] -盖层207。

[0130] 除了PMA多层202之外,其它层201、203、204、205、206和207可以与图3和图5中的传感器所示的各层相同。

[0131] 如上所述,在这种情况下,参考层不必像图3和图5中那样耦合到SAF层。而是,参考层204耦合到单个高PMA材料202。这种高PMA材料可以由Co/Pt或Co/X重复制成,其中X表示

已知提供较大PMA值的Pd、Ni或Ir。诸如CoPt有序合金、CoPd有序合金或FePt有序合金或FePd有序合金等合金或者诸如TbCo、TbFe等一些稀土过渡合金也可以提供强PMA。可以调整(Co/Pt)多层中的重复次数或合金的厚度,以提供足够的杂散场,使得涡旋始终以相同的极性成核,但不会太高,使得在传感器上施加正场或负场时,响应保持对称。对于(Pt/Co)多层,可以有利地在PMA多层中使用在1至6之间的重复次数n。

[0132] 旨在稳定涡核极性的另一可能实施例包括将感测层耦合到反铁磁层,以向涡核提供面外交换偏置。在图15a中示意性地示出了这种传感器300,并且在图15b中示出了更多细节。

[0133] 所述传感器300是磁堆叠,该磁堆叠依次包括:

[0134] -种子层301;

[0135] -SAF层302;

[0136] -结构破坏层303;

[0137] -参考层304;

[0138] -间隔305,当传感器是磁性隧道结时,该间隔可以是隧道势垒,或者当传感器是金属自旋阀时,该间隔可以是非磁性金属间隔;

[0139] -感测层306,该感测层在没有所施加磁场的情况下自发地处于磁涡旋结构中;

[0140] -交换偏置层308;

[0141] -盖层307。

[0142] 除了增加的交换偏置层308之外,其它层301、302、303、304、305、306和307可以与图3和图5中的传感器所示的相应层101、102、103、104、105、106和107相同。

[0143] 交换偏置层308位于涡旋感测层306上方并与该涡旋感测层接触。位于感测层的与隧道势垒相对的界面处的、由例如IrMn合金或铂锰(PtMn)合金等反铁磁材料(AF)制成的所述交换偏置层308可以用于此目的。在铁磁感测层306与AF层308之间的界面处出现单向磁各向异性,这是由这两层之间的交换耦合引起的。为了提供交换偏置,堆叠必须在反铁磁层阻挡温度以上退火,并在场方向垂直于各层的平面的磁场中冷却下来。如本领域技术人员所熟知的,可以通过在感测层306与反铁磁层308之间的界面处插入诸如铜(Cu)、W、Mo或Ta等非磁性元素的薄层(未示出)来调整交换偏置的强度。图15中的传感器的主要优点是,单个涡旋极性稳定不是由来自参考层的杂散场(参考层的杂散场因其随结尺寸的变化性,在实践中可能难以控制)引起的,而是仅由与感测层接触生长的反铁磁层之间的交换引起的。这种AF层的使用在自旋电子传感器中相当常见,因为传统传感器的参考层通常通过与这种AF结构的交换偏置而被钉扎在各层的平面上。

[0144] 图16显示了感测设备D的实施例。D包括惠斯通电桥布置,该惠斯通电桥布置具有四个磁阻传感器R1、R2、R3和R4,每个传感器是根据本发明的传感器。

[0145] 惠斯通电桥结构中的感测设备D包括四个本发明的基本传感器R1、R2、R3和R4,这些传感器被配置为使得R1和R4的参考层和感测层中的涡核磁化以第一面外方向为取向,而R2和R3的参考层和感测层中的涡核磁化以相反的面外方向为取向。

[0146] 传感器R1和R4各自具有与传感器R2和R3相比相反的响应。换句话说,R1和R4(位于相对分支上的传感器)具有相同的响应,并且它们的参考层和感测层中的涡核磁化以第一面外方向为取向,而R2和R3也具有相同的响应,并且它们的参考层和感测层中的涡核磁化

以相反的面外方向为取向。

[0147] 在触点C1与C2之间提供感测电流，$I_{入}$表示到电桥中的流入电流，并且$I_{出}$表示流出电流。在这种惠斯通电桥结构D中，基本传感器被配置为使得在待感测的所施加磁场下，这些基本传感器中位于相对分支上的两个基本传感器(此处是R1和R4)的电阻增加(分别减小)，而另外两个传感器(在该示例中是R2和R3)的电阻减小(分别增加)。有利地，这使得能够测量两个触点C3与C4之间的电势差V输出，该电势差与待感测的外部面外磁场直接相关。

[0148] 根据图16的实施例，从具有相同的各层的堆叠(即，在具有相同技术以及相同几何形状和材料的相同晶圆(wafer)上实现)的四个传感器R1、R2、R3、R4开始是可能的。为了配置这些基本传感器以便获得传感器R1和R4的组与传感器R2和R3的组的相反响应，一种可能性是使用焦耳加热与施加外部磁场的组合影响。优选地，选择具有相对较高(通常在100Ω.μm^2以上)的电阻面积乘积(RA)的磁隧道结。这允许降低传感器的功耗并增加隧道磁阻幅度。此外，参考层被选择为具有未补偿的参考层，使得来自参考层的杂散场足够大，以保持涡核磁化始终与参考层磁化平行。然后，为了初始化惠斯通电桥结构，首先施加面外场，该面外场足够大以使所有层的磁化在第一面外方向(例如向上)上完全饱和。然后，在触点C1与C3之间以及在触点C4与C2之间发送电流，以便在传感器R1和R4中产生焦耳加热。这种通常将结的温度升高80℃至200℃的焦耳加热会降低参考层的矫顽场(coercive field)以及这两个传感器R1和R4中的涡核磁化的矫顽场。当结被加热时，施加方向与初始饱和场的第一方向相反的场，其中幅度足够大以切换传感器R1和R4中的参考层磁化和涡核磁化，但足够低以不切换保持在待机温度的传感器R2和R3的磁化。找到这样的中间场幅度是可能的，因为这种类型的传感器中的矫顽场随温度而变化。作为该初始化过程的结果，被包括在电桥中的四个磁传感器将最终形成如图16所示的磁性结构。R2和R3中的参考层磁化仍在向上方向上，而R1和R4中的参考层磁化则在向下方向上，并且所有结中的感测层的涡核磁化均与其相应的参考层磁化平行。然后，在施加待感测的场下，其磁化与所施加场平行的传感器的涡核会变宽，而其磁化与所施加场反平行的传感器的涡核会收缩。对于前者的结，这将使得所述结的电阻减小，而对于后者，这将使得电阻增加。因此，惠斯通电桥的不平衡将随所施加场而显著变化，从而产生传感器输出信号V输出。

[0149] 在替代实施例中，传感器R1、R2、R3、R4可以由以串联或并联方式连接的几个单独的传感器形成。在这种情况下，构成电阻Ri(i从1到4)中的一个电阻的所有单独的传感器将通过仅在向上方向或向下方向上施加饱和场而被相同地配置。

[0150] 当然，根据本发明的传感器不限于刚刚参考附图、出于指示而绝非限制的目的而描述的各实施例。

[0151] 在所有以上所公开的实施例中，根据本发明的传感器是“底部”结构，这意味着感测层在隧道势垒上方并且参考层在隧道势垒下方。然而，本发明当然不限于“底部”结构；本发明的传感器可以替代地处于“顶部”结构。这意味着堆叠可以以底部钉扎结构或顶部钉扎结构生长，即，感测层可以在隧道结的上方或下方，而参考层相应地在隧道势垒的下方或上方。由于传感器中的感测层优选地相当厚，因此将其生长在隧道势垒上方以便不会为隧道势垒的生长产生较大的粗糙度可能是有利的。

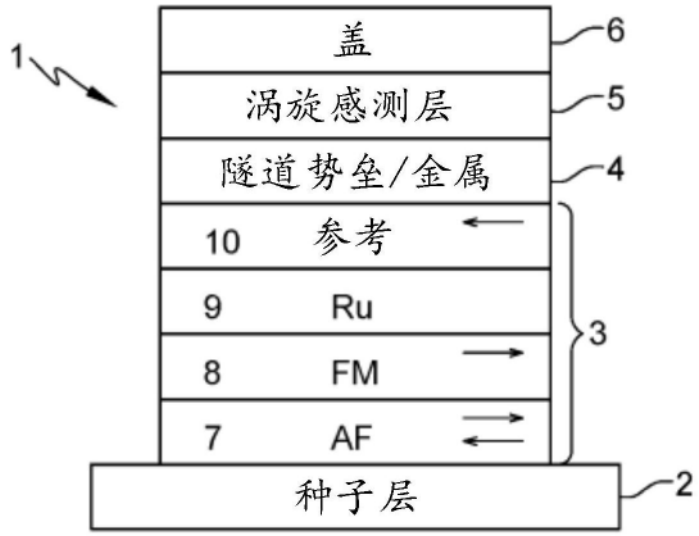
[0152] 此外，尽管根据本发明的传感器的详细实施例是针对基于磁隧道结的传感器进行的，但是本领域技术人员知道，上述实施例也可以适用于基于巨磁阻的全金属磁阻传感器

的情况。在这种情况下,隧道势垒将被诸如Cu等非磁性金属间隔所取代。从材料角度来看,这些金属堆叠是更容易的,因为所有涉及的材料都可以具有fcc结构,因此需要考虑的材料问题比磁隧道结中的要少,在磁隧道结中,堆叠的某些部分是fcc而其它部分是bcc。

[0153] 此外,已经公开了假设本发明的传感器具有带圆形横截面的圆柱形,从而通过感测层的直径和厚度来表征感测层尺寸的详细实施例。然而,本发明将适用于允许稳定感测层的涡旋结构的任何类型的形状。这对于正方形、具有圆角的正方形、可能具有圆角的略呈矩形的形状(长边不超过短边的两倍)、具有中等椭圆度的椭圆形(长轴与短轴之间的比不超过2)、或可稳定涡旋状态的任何其它形状来说也是如此。对于所有这些形状,感测层纵横比由其厚度与最短面内尺寸之比来定义。如果感测层具有圆盘形状,则该特性尺寸是其直径。如果该感测层是正方形或接近正方形,则该特性尺寸是该正方形边的长度。如果该感测层是矩形,则该特性尺寸是该矩形的短边。对于椭圆来说,该特性尺寸是短轴。

[0154] 这些设备可以使用与现有技术TMR传感器非常相似的制造过程来制造。该过程涉及以下步骤:通过物理气相沉积来沉积所有层,通过反应或离子束蚀刻来蚀刻感测层,以及通过离子束蚀刻来蚀刻其它层。在此过程中,众所周知,磁性材料的离子束蚀刻通常会产生锥形柱体(特别是在目前的情况下),其中高纵横比的柱体被蚀刻。这种锥形形状的存在是可接受的,并且不会阻碍传感器的工作原理。

[0155] 此外,如本领域技术人员所熟知的,多个本发明的传感器可以以串联和/或并联方式连接,以提高整个传感器的信噪比。


1
盖
6
涡旋感测层
5
隧道势垒/金属
4
10 参考
9 Ru
8 FM
7 AF
3
种子层
2

现有技术

图1

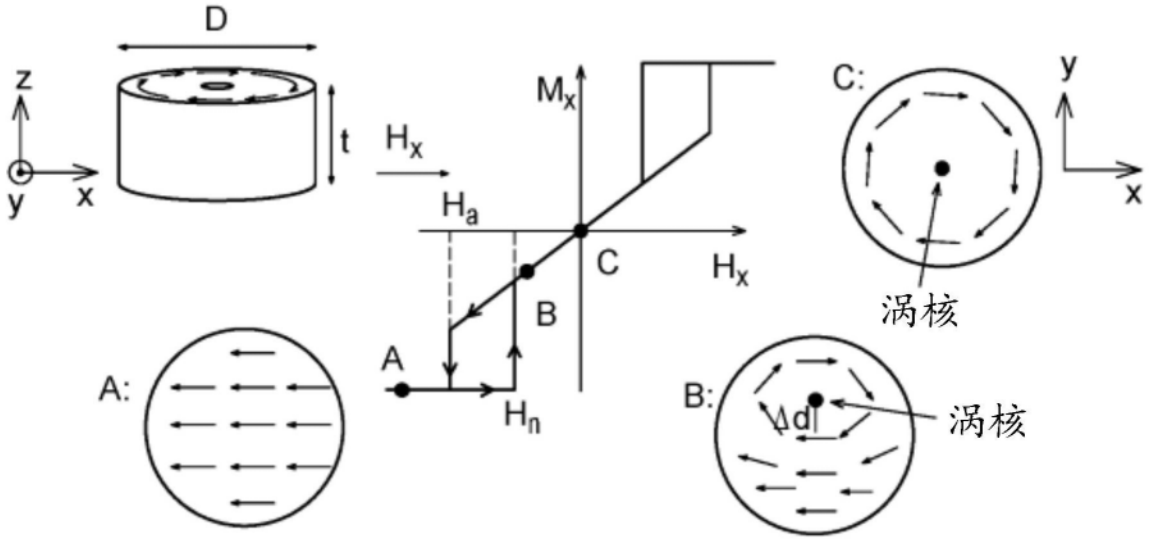

D
z
y
x
t
H_x
M_x
H_a
C
H_x
B
A
H_n
A:
C:
y
x
涡核
B:
涡核

图2

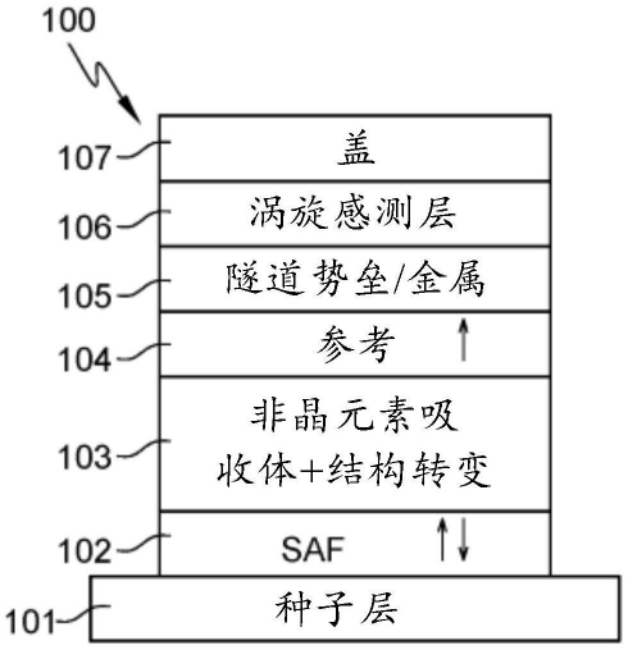

100
107
盖
106
涡旋感测层
105
隧道势垒/金属
104
参考
103
非晶元素吸
收体+结构转变
102
SAF
101
种子层

图3

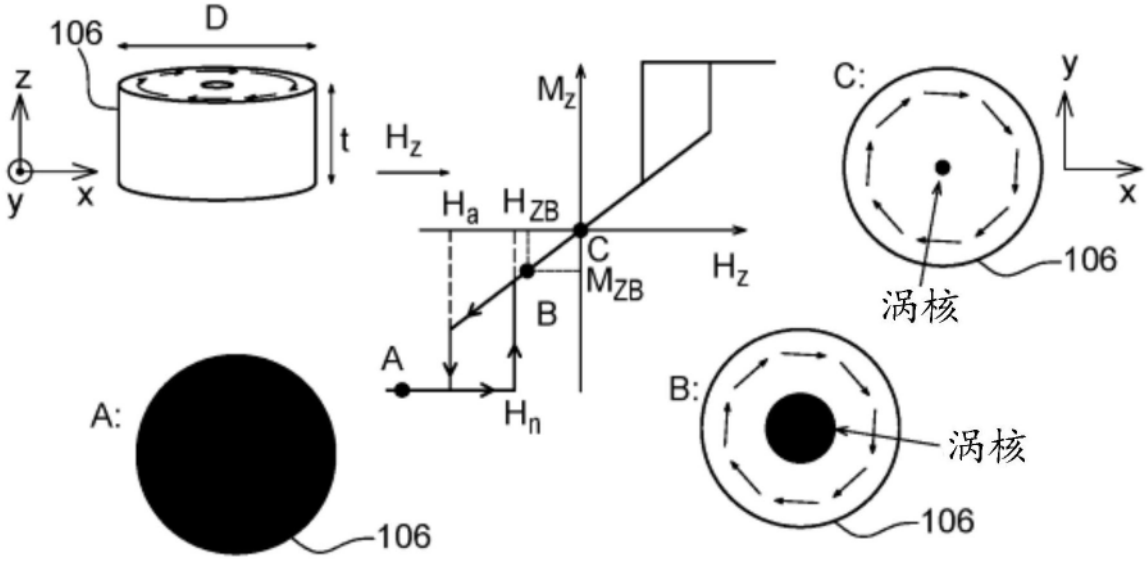

106
D
z
y
x
t
H_z
M_z
H_a
H_{ZB}
C
M_{ZB}
B
A
H_n
H_z
A:
106
C:
y
x
106
涡核
B:
涡核
106

图4

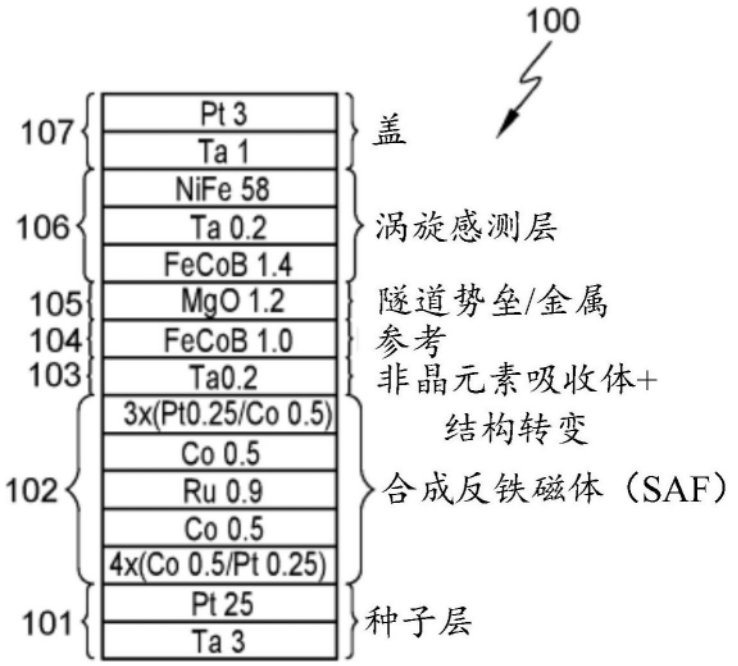

100
107
Pt 3
Ta 1
盖
NiFe 58
106
Ta 0.2
FeCoB 1.4
涡旋感测层
105
MgO 1.2
隧道势垒/金属
104
FeCoB 1.0
参考
103
Ta0.2
非晶元素吸收体+
结构转变
3x(Pt0.25/Co 0.5)
Co 0.5
102
Ru 0.9
Co 0.5
4x(Co 0.5/Pt 0.25)
合成反铁磁体（SAF）
101
Pt 25
Ta 3
种子层

图5

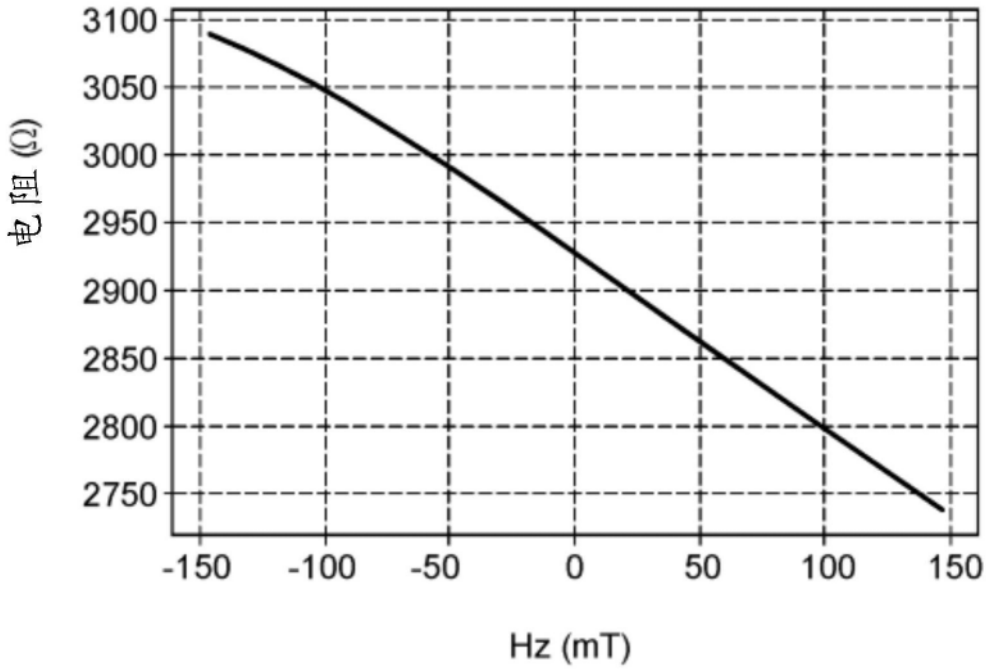

3100
3050
3000
2950
2900
2850
2800
2750
电阻 (Ω)
-150
-100
-50
0
50
100
150
Hz (mT)

图6

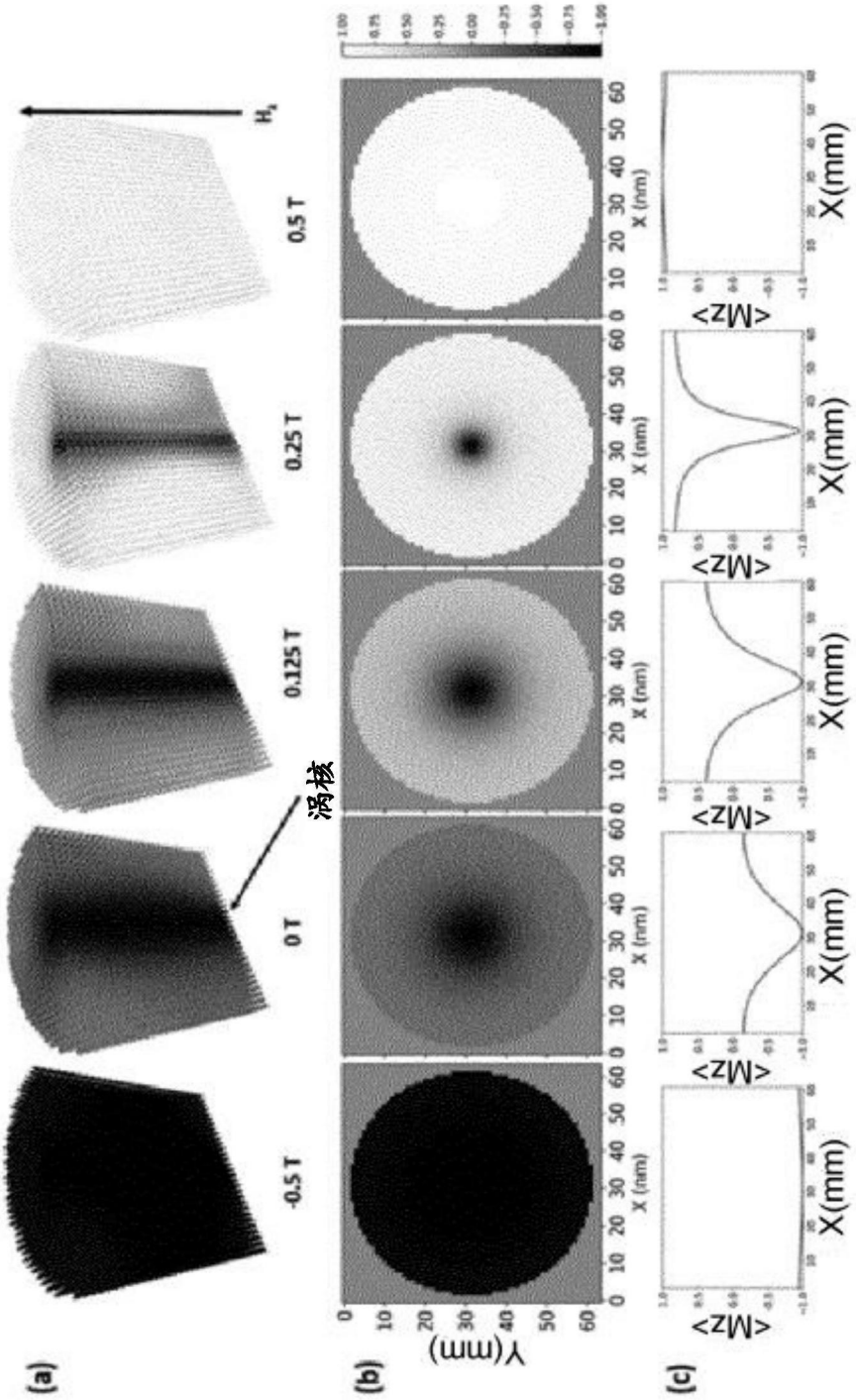


图7

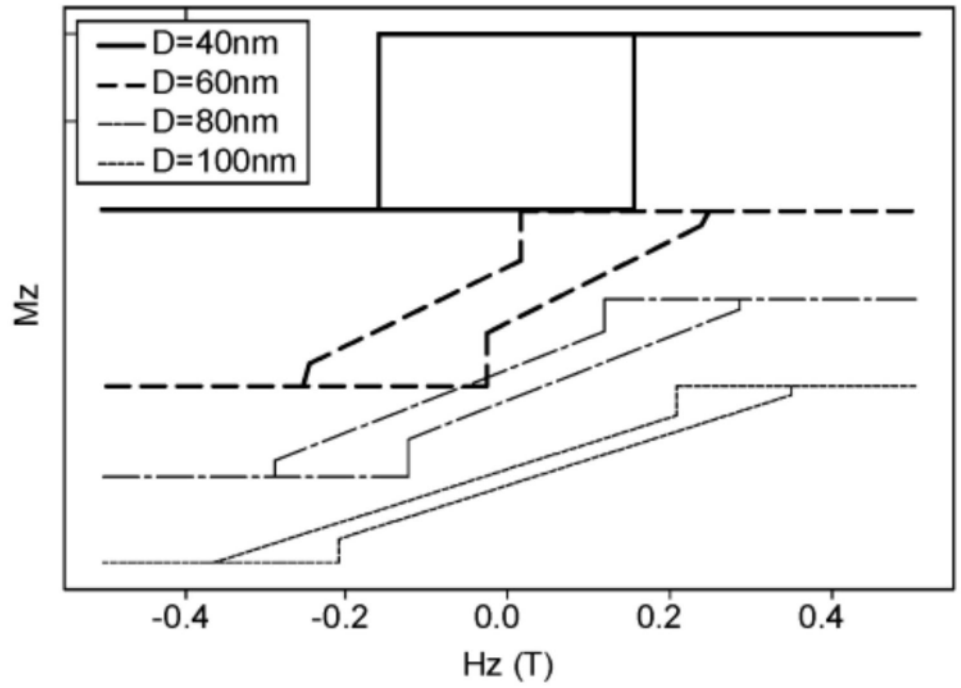

D=40nm
D=60nm
D=80nm
D=100nm
Mz
-0.4
-0.2
0.0
0.2
0.4
Hz (T)

图8

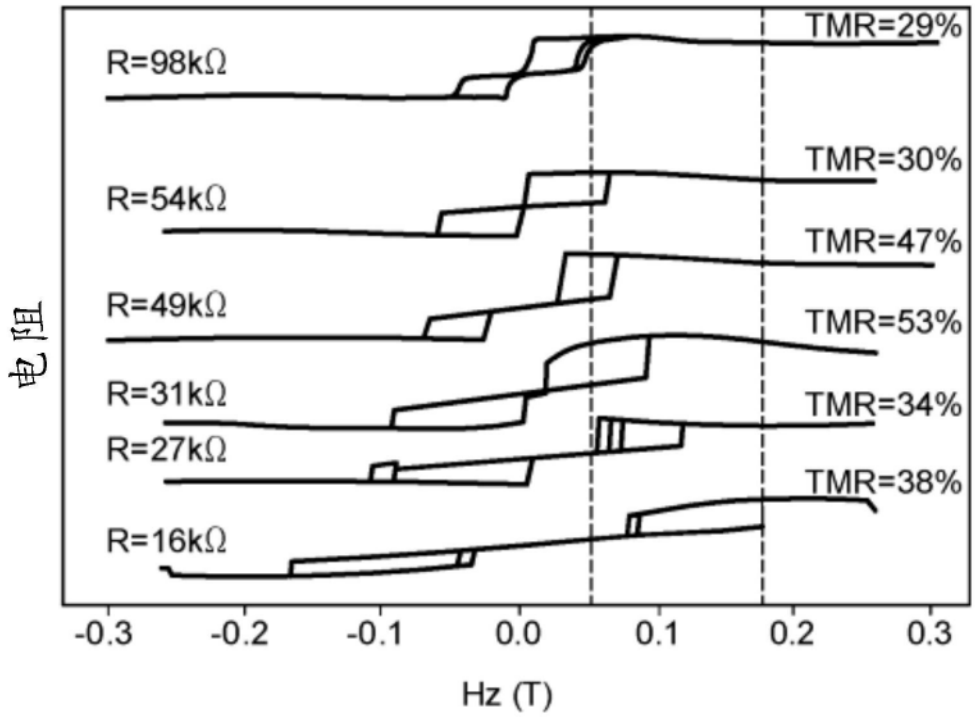

TMR=29%
R=98kΩ
TMR=30%
R=54kΩ
TMR=47%
R=49kΩ
TMR=53%
R=31kΩ
TMR=34%
R=27kΩ
TMR=38%
R=16kΩ
电阻
-0.3
-0.2
-0.1
0.0
0.1
0.2
0.3
Hz (T)

图9

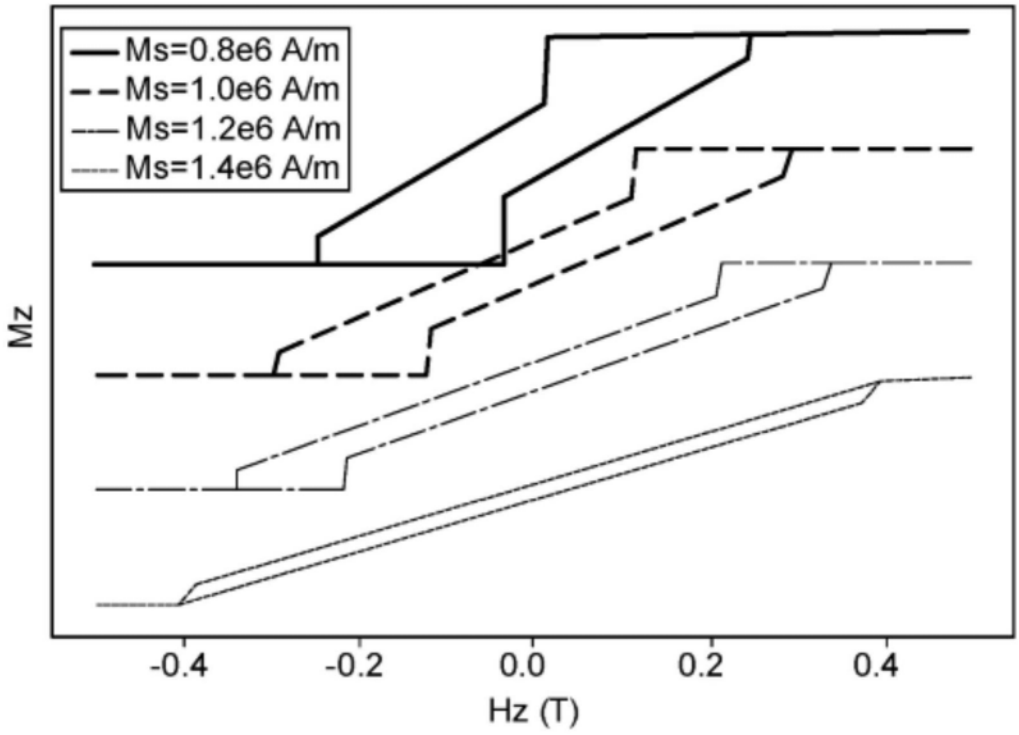

Ms=0.8e6 A/m
Ms=1.0e6 A/m
Ms=1.2e6 A/m
Ms=1.4e6 A/m
Mz
-0.4
-0.2
0.0
0.2
0.4
Hz (T)

图10

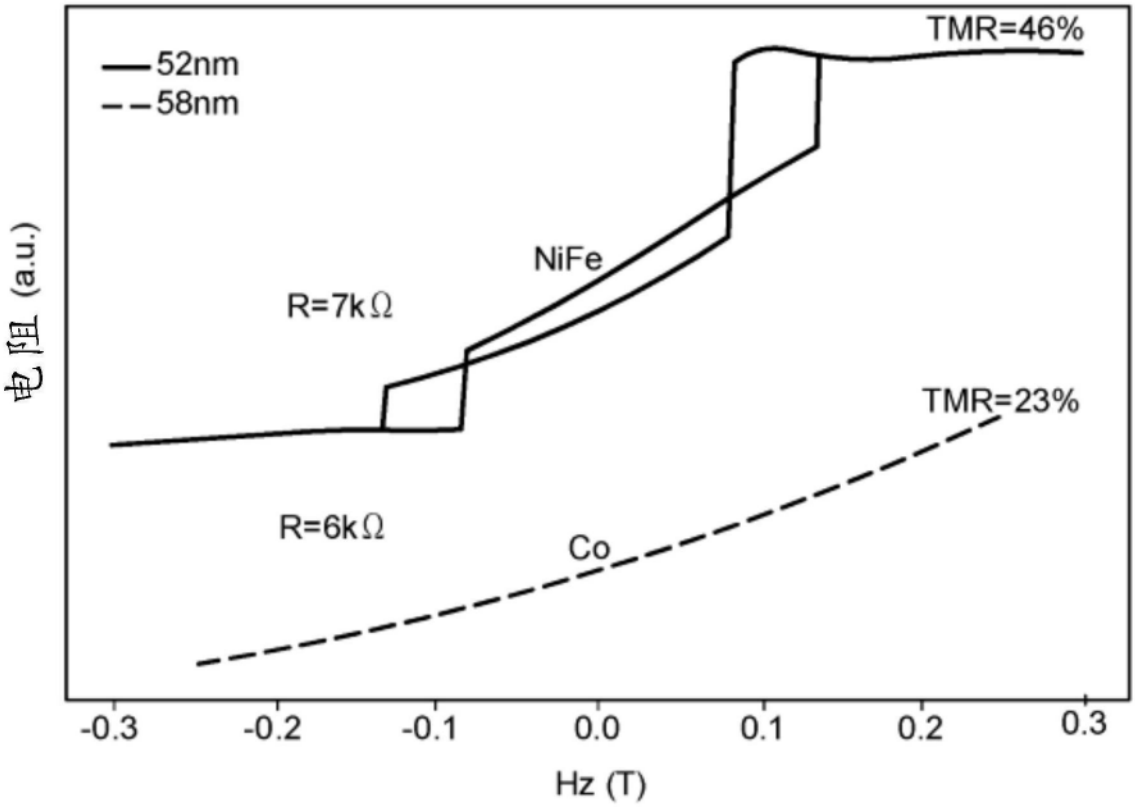

52nm
58nm
TMR=46%
NiFe
R=7kΩ
TMR=23%
R=6kΩ
Co
电阻 (a.u.)
-0.3
-0.2
-0.1
0.0
0.1
0.2
0.3
Hz (T)

图11

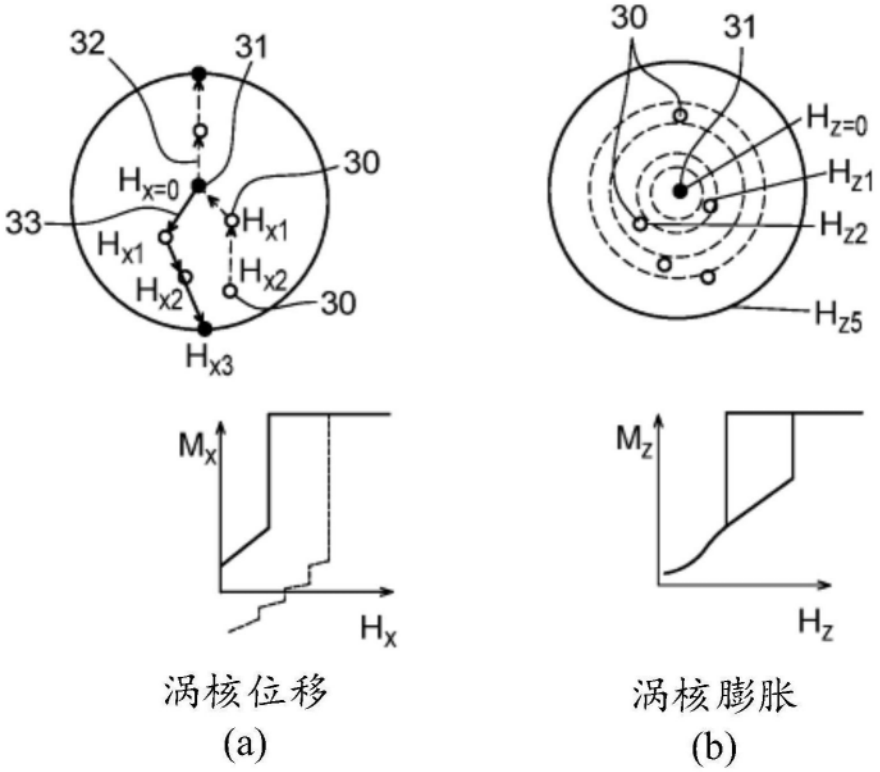

32
31
30
33
$H_{x=0}$
H_{x1}
H_{x1}
H_{x2}
H_{x2}
30
H_{x3}
M_x
H_x
涡核位移
(a)
30
31
$H_{z=0}$
H_{z1}
H_{z2}
H_{z5}
M_z
H_z
涡核膨胀
(b)

图12

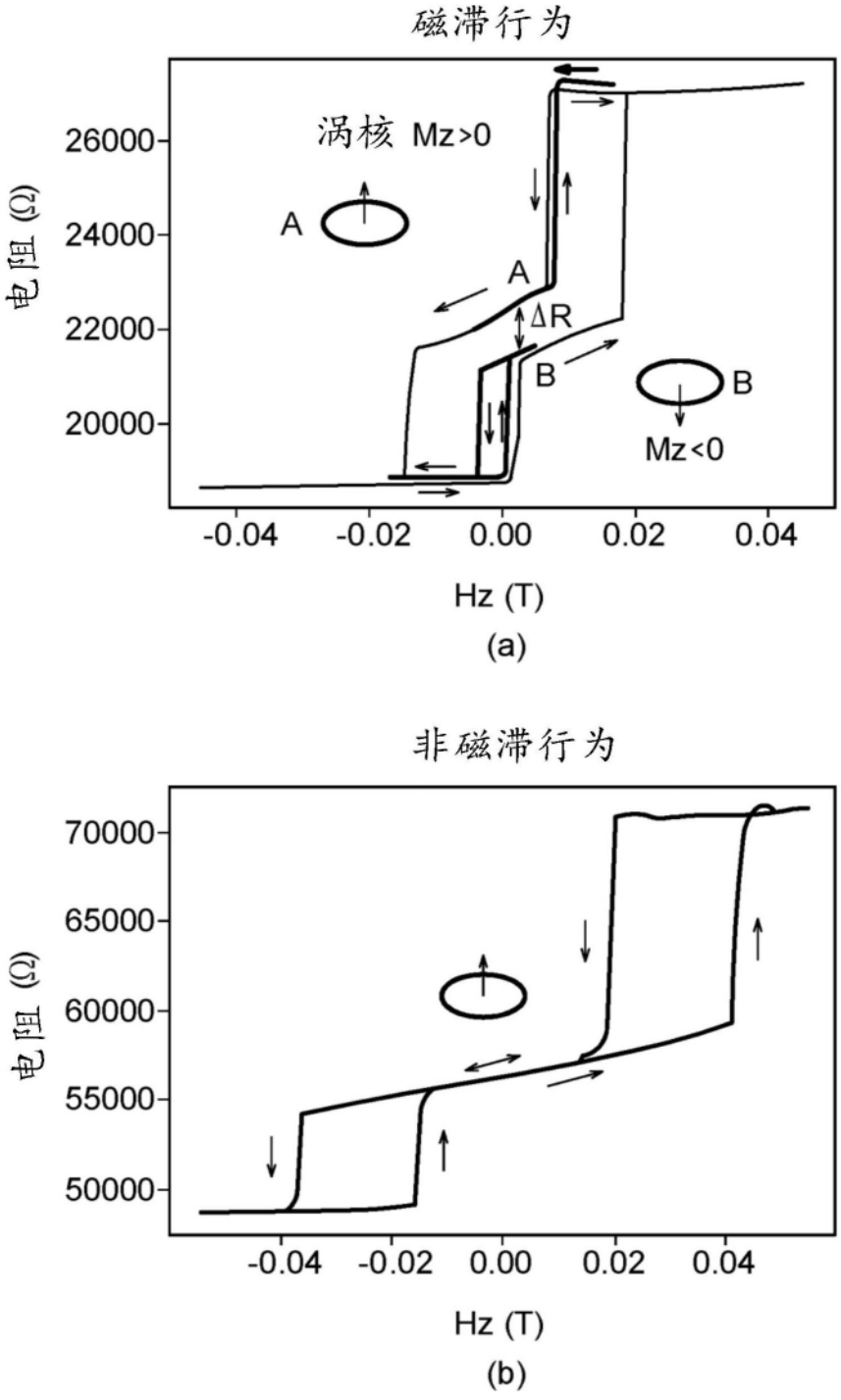

磁滞行为
涡核 Mz>0
A
A
ΔR
B
B
Mz<0
26000
24000
22000
20000
电阻 (Ω)
-0.04
-0.02
0.00
0.02
0.04
Hz (T)
(a)
非磁滞行为
70000
65000
60000
55000
50000
电阻 (Ω)
-0.04
-0.02
0.00
0.02
0.04
Hz (T)
(b)

图13

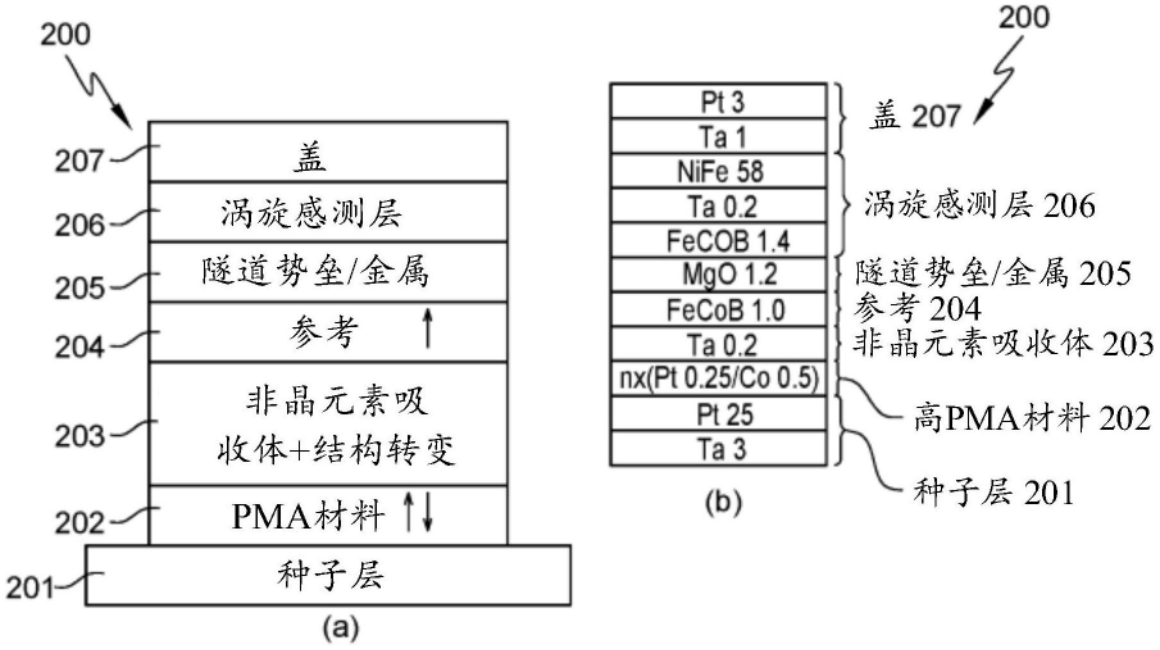

200
207
盖
206
涡旋感测层
205
隧道势垒/金属
204
参考
203
非晶元素吸收体+结构转变
202
PMA材料
201
种子层
(a)
200
Pt 3
Ta 1
NiFe 58
Ta 0.2
FeCOB 1.4
MgO 1.2
FeCoB 1.0
Ta 0.2
nx(Pt 0.25/Co 0.5)
Pt 25
Ta 3
盖 207
涡旋感测层 206
隧道势垒/金属 205
参考 204
非晶元素吸收体 203
高PMA材料 202
种子层 201
(b)

图14

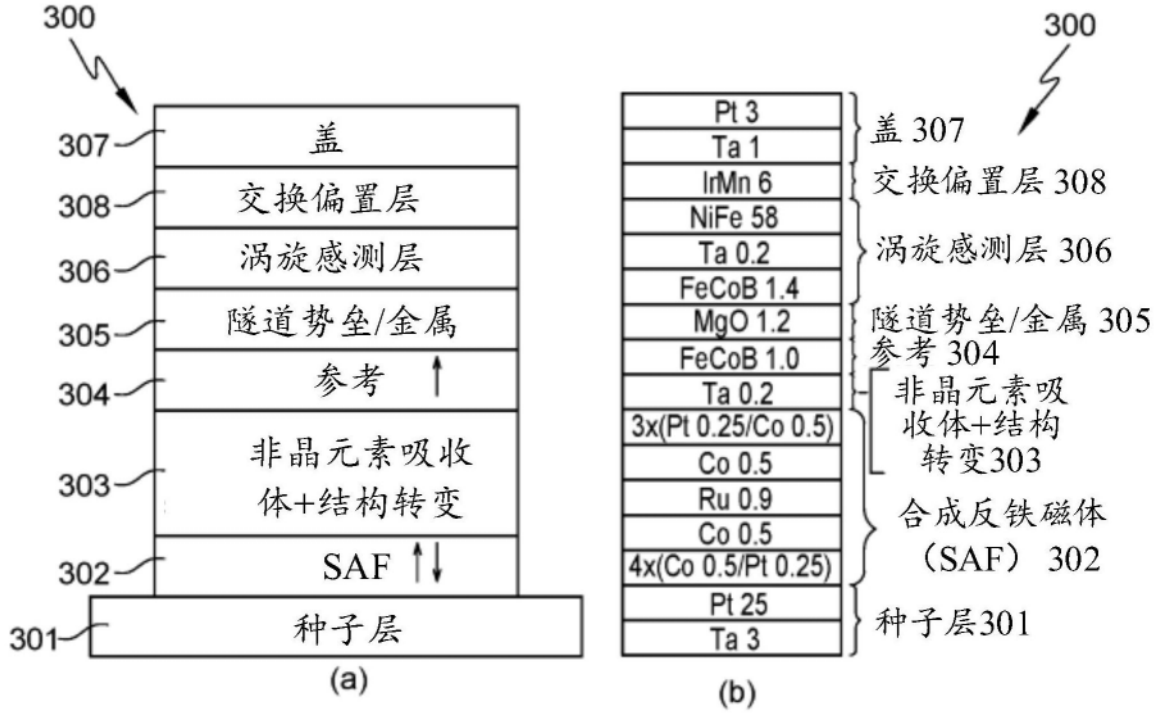

300
307
盖
308
交换偏置层
306
涡旋感测层
305
隧道势垒/金属
304
参考
303
非晶元素吸收体+结构转变
302
SAF
301
种子层
(a)
300
Pt 3
Ta 1
IrMn 6
NiFe 58
Ta 0.2
FeCoB 1.4
MgO 1.2
FeCoB 1.0
Ta 0.2
3x(Pt 0.25/Co 0.5)
Co 0.5
Ru 0.9
Co 0.5
4x(Co 0.5/Pt 0.25)
Pt 25
Ta 3
盖 307
交换偏置层 308
涡旋感测层 306
隧道势垒/金属 305
参考 304
非晶元素吸收体+结构转变303
合成反铁磁体（SAF） 302
种子层301
(b)

图15

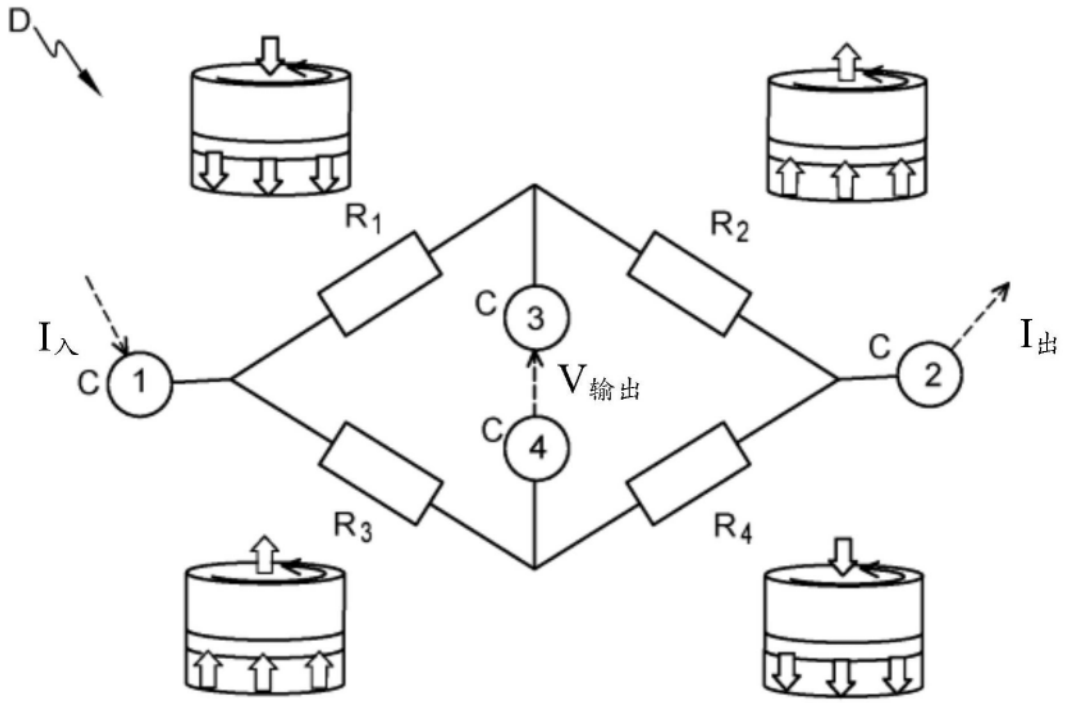


图16