



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 107070408 B

(45) 授权公告日 2021.06.15

(21) 申请号 201611019774.4

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2016.11.18

H03B 15/00 (2006.01)

H01L 43/02 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 107070408 A

审查员 李桐

(43) 申请公布日 2017.08.18

(30) 优先权数据

62/257,684 2015.11.19 US

15/067,009 2016.03.10 US

(73) 专利权人 三星电子株式会社

地址 韩国京畿道

(72) 发明人 D.阿帕尔科夫 R.彻普尔斯凯

V.尼基丁

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 金拟黎

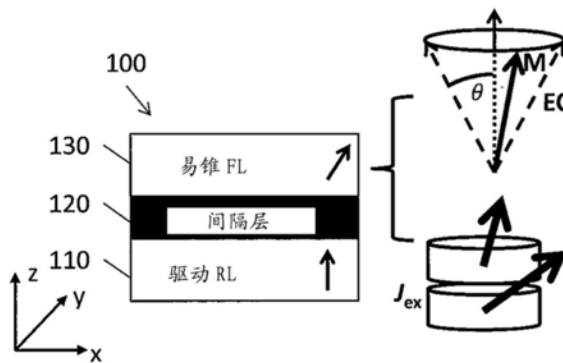
权利要求书2页 说明书10页 附图10页

(54) 发明名称

自旋扭矩振荡器、包括其的电子设备和其制造方法

(57) 摘要

本发明涉及自旋扭矩振荡器、包括其的电子设备和其制造方法。自旋扭矩振荡器包括：具有固定磁化的驱动参比层；非磁性隔离层；和呈现易锥磁各向异性的具有可变磁化的自由层，所述非磁性隔离层在所述参比层和所述自由层之间，所述自由层的磁各向异性能量具有沿着轴的局部最大值、在与该轴所成的角度处的局部最小值、和不同于所述局部最大值的全局最大值，所述角度大于0度，其中所述自旋扭矩振荡器配置为使得所述自由层的可变磁化围绕所述轴旋进。



1. 自旋扭矩振荡器,包括:  
具有固定磁化的驱动参比层;  
非磁性隔离层;和  
呈现易锥磁各向异性的具有可变磁化的自由层,  
所述非磁性隔离层在所述参比层和所述自由层之间,所述自由层的磁各向异性能量具有沿着轴的局部最大值、在与该轴所成的角度处的局部最小值、和不同于所述局部最大值的全局最大值,所述角度大于0度,  
其中所述自旋扭矩振荡器配置为使得所述自由层的可变磁化围绕所述轴旋进,  
所述自旋扭矩振荡器进一步包括:  
具有固定磁化的读出层;以及  
在所述读出层和所述自由层之间的第二非磁性隔离层,  
其中所述读出层的固定磁化的分量沿着垂直于所述轴的方向延伸,所述自由层在所述读出层和所述驱动参比层之间。
2. 根据权利要求1的自旋扭矩振荡器,其中所述自旋扭矩振荡器配置为使得可变磁化的旋进频率与流过该自旋扭矩振荡器的电流的幅度成正比。
3. 根据权利要求2的自旋扭矩振荡器,其中所述旋进频率在1MHz-50GHz的范围内。
4. 根据权利要求2的自旋扭矩振荡器,其中可变磁化的旋进角度与电流的幅度成比例。
5. 根据权利要求1的自旋扭矩振荡器,进一步包括:  
底部触头;和  
顶部触头,  
其中所述驱动参比层、所述非磁性隔离层、所述自由层、所述第二非磁性隔离层、和所述读出层在所述底部触头和所述顶部触头之间。
6. 根据权利要求5的自旋扭矩振荡器,进一步包括配置为提供电流通过所述自旋扭矩振荡器的电流源,  
其中所述底部触头和所述顶部触头之间的电阻根据提供给所述自旋扭矩振荡器的电流变化。
7. 根据权利要求6的自旋扭矩振荡器,其中所述底部触头和所述顶部触头之间的电阻对于电流线性地变化。
8. 根据权利要求5的自旋扭矩振荡器,进一步包括在所述顶部触头和所述读出层之间的补偿参比层,该补偿参比层具有在与所述读出层的固定磁化相反的方向上的固定磁化。
9. 根据权利要求8的自旋扭矩振荡器,进一步包括在所述补偿参比层上的反铁磁性层。
10. 根据权利要求1的自旋扭矩振荡器,其中对于可变磁化围绕所述轴旋进无需外部施加的磁场。
11. 根据权利要求1的自旋扭矩振荡器,其中所述非磁性隔离层包括选自MgO、AlO和TiO的至少一种材料。
12. 根据权利要求1的自旋扭矩振荡器,其中所述自由层包括选自Fe、Ni和Co的至少一种材料。
13. 根据权利要求12的自旋扭矩振荡器,其中所述自由层还包括选自W、Mg、B、Ta、Cs、Zr、Pt、Pd、Tb和/或Ru的至少一种材料。

14. 根据权利要求1的自旋扭矩振荡器,其中所述自由层包括CoFeNiX,其中X为选自Re、Ir、Bi和W的至少一种材料。

15. 根据权利要求1的自旋扭矩振荡器,其中所述自由层包括CoFeNiX,其中X为选自I、Te、Os、Pt和Pb的至少一种材料。

16. 根据权利要求1的自旋扭矩振荡器,其中易锥磁各向异性的能量密度为:

$$E(\theta) = K_1 \sin^2(\theta) + \beta K_1 \sin^2(2\theta)$$

其中 $|\beta|$ 大于或等于0.25, $\theta$ 为与垂直轴所成的角度,和 $K_1$ 是取决于用于形成自由层的材料的特性的参数。

17. 电子设备,包括:

根据权利要求1-16任一项的自旋扭矩振荡器;

配置为向所述自旋扭矩振荡器提供电流的电流源,和

配置为测量所述自旋扭矩振荡器的电阻的读出电路。

18. 制造根据权利要求1-16任一项的自旋扭矩振荡器的方法,包括:

提供驱动参比层;

在所述驱动参比层上提供非磁性隔离层;

在所述非磁性隔离层上提供具有易锥各向异性的自由层;以及

提供第二非磁性隔离层和读出参比层。

## 自旋扭矩振荡器、包括其的电子设备和其制造方法

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求于2015年11月19日在美国专利商标局提交的美国临时专利申请 No. 62/257,684 的优先权和权益,其全部公开内容引入本文中作为参考。

### 技术领域

[0003] 本发明的实施方式的方面涉及使用自旋扭矩(力矩)振荡器或自旋转移(转换,传输)振荡器的设备。

### 背景技术

[0004] 自旋扭矩振荡器(还称为自旋转移振荡器或自旋转移纳米振荡器)是磁性多层设备,其通常包括两个传导磁性层:具有固定磁化(磁化强度)的参比层(或被钉扎层或极化器层)、和具有响应于电流产生的自旋扭矩而自由旋转(例如涡旋旋进或斯格米子(skyrmion)旋进)的磁化(磁化强度)的自由层(例如各向同性自由层)。

[0005] 例如,图1示出了对比如磁性隧穿(隧道)结(MTJ)1。对比如MTJ 1典型地存在于底部触头2上,并且可包括常规的驱动参比层10、常规的隧穿阻挡(势垒)层20、常规的自由层30(例如各向同性自由层或具有平行于或垂直于x-y平面的各向异性)、第二常规的隧穿阻挡层40、常规的读出参比层50、和顶部触头4。

[0006] 底部和顶部触头2和4用于将来自电流源的电流在电流垂直于平面(CPP)方向上、或沿如图1中所示的z轴驱动。磁性隧穿结1还可包括一个或多个种晶层(例如在底部触头和常规驱动参比层10之间)并且可包括反铁磁性(AFM)层。所述一个或多个种晶层可有助于具有所需的晶体结构的随后的层例如AFM层的生长。常规的隧穿阻挡层20和40是非磁性的并且可为例如薄的绝缘体例如MgO。

[0007] 常规的驱动参比层10和常规的自由层30是磁性的。常规的驱动参比层10的磁化12是固定或钉扎在具体的(特定的)方向上的,典型地通过与AFM层的交换偏置相互作用。例如,如图1中所示,常规的驱动参比层10的磁化12是沿垂直于平面的方向固定的(例如沿垂直于x-y平面的z方向对齐的)。尽管被图示成单(单一)层,但常规的驱动参比层10可包括多层。例如,常规的驱动参比层10可为综合的(合成的,synthetic)反铁磁性(SAF)层,其包括通过薄的传导层例如Ru反铁磁性地耦合的磁性层。在这样的SAF中,可使用与Ru的薄层交插的多个磁性层。在另一实施方式中,跨越Ru层的耦合可为铁磁性的。此外,其它形式的对比如MTJ 1可包括通过另外的非磁性阻挡或传导层(未示出)与常规的自由层30分离的另外的被钉扎层(未示出)。

[0008] 常规的自由层30具有可变磁化或磁矩32。尽管被图示成单层,但常规的自由层30也可包括多层。例如,常规的自由层30可为包括通过薄的传导层例如Ru反铁磁性或铁磁性地耦合的磁性层的合成层。

[0009] 常规的读出参比层50具有固定磁化52。固定磁化52在如下方向上:使得其方向和常规的自由层30的可变磁化32的方向之间的角度随着可变磁化32旋转或旋进而变化。这

样,底部触头2和顶部触头4之间的电阻根据常规的自由层30的可变磁化32和常规的读出参比层50的固定磁化52的内积随时间而变化。

[0010] 通常,自旋扭矩振荡器因其小的尺寸、易于使用标准的硅处理来制造、辐射硬度而令人感兴趣,并且振荡频率可基于电流和外部施加的磁场的强度来设置。

[0011] 然而,对比的自旋扭矩振荡器(例如如上所述的)存在许多挑战,包括以下需求:外部施加的磁场是大的(例如在1,000-10,000e的量级),并且调整频率可为困难的,因为这样做需要改变外部施加的磁场。此外,输出功率通常非常低(例如在1-10nW的量级),且对比的振荡器具有高的电流需求(例如在数mA的量级)。

[0012] 在该背景技术部分中公开的上述信息仅用于加强对本发明背景的理解,并因此可包含不构成现有技术的信息。

## 发明内容

[0013] 本发明的实施方式的方面涉及具有呈现易锥(易锥面,easy-cone)各向异性的自由层的自旋扭矩振荡器。本发明的实施方式提供具有较高的输出功率、较小的外部施加磁场需求和振荡频率更易于控制(例如调制)的自旋扭矩振荡器。

[0014] 根据本发明的一项实施方式,自旋扭矩振荡器包括:具有固定磁化的驱动参比层;非磁性隔离层;和呈现易锥磁各向异性的具有可变磁化的自由层,所述非磁性隔离层在所述参比层和所述自由层之间,所述自由层的磁各向异性能量具有沿着轴的局部最大值、在与该轴所成的角度处的局部最小值、和不同于所述局部最大值的全局最大值,所述角度大于0度,其中所述自旋扭矩振荡器配置为使得所述自由层的可变磁化围绕所述轴旋进。

[0015] 自旋扭矩振荡器可配置为使得可变磁化的旋进频率与流过自旋扭矩振荡器的电流的幅度成正比。

[0016] 旋进频率可在1MHz至50GHz的范围。

[0017] 可变磁化的旋进角度可与电流的幅度成比例。

[0018] 自旋扭矩振荡器可进一步包括:具有固定磁化的读出层;以及在所述读出层和所述自由层之间的第二非磁性隔离层,其中所述读出层的固定磁化的分量(一个分量)沿垂直于所述轴的方向延伸,所述自由层在所述读出层和所述驱动参比层之间。

[0019] 自旋扭矩振荡器可进一步包括:底部触头和顶部触头,其中所述驱动参比层、所述非磁性隔离层、所述自由层、所述第二非磁性隔离层、和所述读出层在所述底部触头和所述顶部触头之间。

[0020] 自旋扭矩振荡器可进一步包括配置为提供电流通过所述自旋扭矩振荡器的电流源,其中所述底部触头和所述顶部触头之间的电阻根据提供给所述自旋扭矩振荡器的电流变化。

[0021] 所述底部触头和所述顶部触头之间的电阻可对于电流基本上线性地变化。

[0022] 自旋扭矩振荡器可进一步包括在所述顶部触头和所述读出层之间的补偿参比层,所述补偿参比层具有在所述读出层的固定磁化相反的方向上的固定磁化。

[0023] 自旋扭矩振荡器可进一步包括在所述补偿参比层上的反铁磁性层。

[0024] 对于可变磁化围绕所述轴旋进可无需外部施加的磁场。

[0025] 非磁性隔离层可包括至少一种选自MgO、AlO( $Al_2O_3$ )和TiO( $TiO_2$ )的材料。

- [0026] 自由层可包括至少一种选自Fe、Ni和Co的材料。
- [0027] 自由层可进一步包括至少一种选自W、Mg、B、Ta、Cs、Zr、Pt、Pd、Tb和/或Ru的材料。
- [0028] 自由层可包括CoFeNiX,其中X为至少一种选自Re、Ir、Bi和W的材料。
- [0029] 自由层可包括CoFeNiX,其中X为至少一种选自I、Te、Os、Pt和Pb的材料。
- [0030] 易锥磁各向异性的能量密度可为:
- [0031]  $E(\theta) = K_1 \sin^2(\theta) + \beta K_1 \sin^2(2\theta)$
- [0032] 其中 $|\beta|$ 大于或等于0.25。
- [0033] 根据本发明的一项实施方式,电子设备包括自旋扭矩振荡器、配置为提供电流通过所述自旋扭矩振荡器的电流源、以及配置为测量所述自旋扭矩振荡器的电阻的读出电路,所述自旋扭矩振荡器包括:具有固定磁化的驱动参比层;非磁性隔离层;和呈现易锥磁各向异性的具有可变磁化的自由层,所述非磁性隔离层在所述参比层和所述自由层之间,所述自由层的磁各向异性能量具有沿着轴的局部最大值、在与该轴所成的角度处的局部最小值、和不同于所述局部最大值的全局最大值,所述角度大于0度,其中所述自旋扭矩振荡器配置为使得所述自由层的可变磁化围绕所述轴旋进。
- [0034] 可变磁化的旋进频率可与电流的幅度成正比。
- [0035] 根据本发明的一项实施方式,制造自旋扭矩振荡器的方法包括:提供驱动参比层;在所述驱动参比层上提供非磁性隔离层;和在所述非磁性隔离层上提供具有易锥各向异性的自由层。

#### 附图说明

- [0036] 专利或申请文件包含至少一个着色的附图。具有彩色附图的该专利或专利申请公开的副本在请求并支付必要的费用时由专利局提供。附图与说明书一起示出本发明的示例实施方案,并且与说明书一起用于解释本发明的原理。
- [0037] 图1示出对比的磁性隧穿结(MTJ)。
- [0038] 图2示出在根据本发明的一项实施方式的具有易锥自由层的磁性设备例如自旋扭矩振荡器中使用的磁性结的一项实施方式。
- [0039] 图3示出对于根据本发明的一项实施方式的具有易锥各向异性的自由层的磁各向异性能量密度。
- [0040] 图4为示出描述磁各向异性材料的磁各向异性能量密度的方程的各分量的图。
- [0041] 图5示出根据本发明的一项实施方式的具有易锥各向异性的自由层。
- [0042] 图6示出对于具有易锥各向异性的自由层的磁性层的多种磁交换相互作用常数 $J_{ex}$ 与材料的参数 $K_1$ 的组合的总能量相对于角度。
- [0043] 图7示出根据本发明的一项实施方式的由于交换相互作用的具有易锥各向异性的自由层的磁化。
- [0044] 图8示出根据本发明的一项实施方式的自旋扭矩振荡器的旋进频率和电流之间的关系。
- [0045] 图9为示出在多种电流水平和对于不同的参数 $\beta$ 的值的根据本发明的一项实施方式的易锥各向异性自由层的易锥的角度的图。
- [0046] 图10为进一步包括读出参比层的根据本发明的一项实施方式的自旋扭矩振荡器

的示意图。

[0047] 图11为进一步包括读出参比层和补偿参比层的根据本发明的一项实施方式的自旋扭矩振荡器的示意图。

[0048] 图12为示出根据本发明的一项实施方式的用于制造自旋扭矩振荡器的方法的流程图。

### 具体实施方式

[0049] 下文中,将参照附图更详细地描述示例实施方式,其中相同的附图标记始终表示相同的元件。然而,本发明可以多种不同的形式体现,并且不应被解释为仅限于本文中所示的实施方式。相反,这些实施方式作为实例提供,使得本公开内容将是彻底的且完整的,并且将本发明的方面和特征充分地传达给本领域技术人员。因此,为了本发明的方面和特征的完整理解,可未描述对本领域普通技术人员来说不是必须的工艺、元件和技术。除非另有说明,否则在附图和所撰写的说明书中相同的附图标记始终表示相同的元件,因此其描述将不重复。在附图中,为清楚起见,可放大元件、层、和区域的相对尺寸。

[0050] 将理解,当一个元件或层被称为“在”另外的元件或层“上”、“连接至”或“耦合至”另外的元件或层时,它可直接在所述另外的元件或层上、直接连接至或耦合至所述另外元件或层,或者可存在一个或多个中间元件或层。此外,还将理解,当一个元件或层被称为“在”两个元件或层“之间”时,它可为在所述两个元件或层之间的唯一的元件或层,或者还可存在一个或多个中间元件或层。

[0051] 描述用于提供磁性结的方法和系统以及利用该磁性结的自旋扭矩振荡器。示例性实施方式提供用于提供在磁性设备中可用的磁性结的方法和系统。磁性结包括驱动参比层、非磁性隔离层和自由层。所述非磁性隔离层在所述驱动参比层和所述自由层之间。所述自由层具有易锥磁各向异性。

[0052] 在具有特定组件的具体的磁性结和自旋扭矩振荡器的环境中对示例性实施方式进行描述。本领域普通技术人员将容易地认识到,本发明与以下是相容的:具有并非与本发明不相容的其它和/或另外的组件和/或其它特征的磁性结和自旋扭矩振荡器的使用。还在自旋转移现象、磁各向异性和其它物理现象的当前理解的环境中对方法和系统进行描述。因此,本领域普通技术人员将容易地认识到,方法和系统的行为(性能)的理论解释是基于自旋转移、磁各向异性和其它物理现象的该当前理解作出的。然而,本文中所述的方法和系统不依赖于具体的物理解释。本领域普通技术人员还将容易地认识到,在具有对衬底的具体关系的结构的环境中对方法和系统进行描述。然而,本领域普通技术人员将容易地认识到,方法和系统与其它结构是相容的。另外,在一些层(其为综合的和/或简单的)的环境中对方法和系统进行描述。然而,本领域普通技术人员将容易地认识到,所述层可具有其它结构。此外,在具有具体层的磁性结和/或子结构的环境中对方法和系统进行描述。然而,本领域普通技术人员将容易地认识到,也可使用具有与该方法和系统并非不相容的另外的层和/或不同的层的磁性结和/或子结构。而且,一些组件被描述为磁性的、铁磁性的、和亚铁磁性的。如本文所使用的,术语磁性可包括铁磁性、亚铁磁性或类似构造。因此,如本文所使用的,术语“磁性”或“铁磁性”包括,但不限于,铁磁体和亚铁磁体。还在单一磁性结和子结构的环境中对方法和系统进行描述。然而,本领域普通技术人员将容易地认识到,该方法和

系统与具有多个磁性结和使用多个子结构的自旋扭矩振荡器(例如,并行布置以增加它们的组合输出功率的自旋扭矩振荡器的阵列)的使用是相容的。此外,如本文所使用的,“平面内”是基本上在磁性结的层的一个或多个的平面内或与其平行。相反,“垂直”对应于基本上垂直于磁性结的层的一个或多个的方向。

[0053] 返回参照图1,当在外部施加磁场( $H_{ap}$ ) (例如沿z方向施加)的存在下经过底部触头2和顶部触头4通过电流源对磁性隧穿结1施加电流(I)时,常规的驱动参比层10使电流I极化(例如,过滤施加的电流的电子,使得离开常规的驱动参比层10的电子的大部分将它们的自旋与常规的驱动参比层10的固定磁化12对齐)。当极化的电荷到达常规的自由层30时,自旋极化的电子将扭矩施加至自由层磁矩32,由此改变自由层磁矩32的方向并导致其围绕z轴旋进,其中自由层磁矩32可具有与z轴成角度倾斜的方向。自由层磁矩32的运动在其旋进时由于所施加的扭矩而部分地取决于外部施加的磁场 $H_{ap}$ 的强度和电流I的幅度。此外,自由层的磁矩和外部施加的磁场 $H_{ap}$ 之间的角度基于电流I的幅度变化。当电流为0时,自由层磁矩被推动至或保持在(例如通过外部施加的磁场 $H_{ap}$ )其中角度为 $0^\circ$ 的静态,并且当电流小时该角度可非常小。当电流增大时,该角度增大,且在非常大的电流下,自由层磁矩可被推动至不稳定的静态(例如其中角度为 $180^\circ$ )。由于输出信号的幅度(例如在磁性隧穿结1的电阻方面的变化)基于自由层磁矩32的方向和读出参比层磁矩的内积而变化,从而当上述角度小时,所述内积小,由此导致小的(例如低功率的)输出信号。

[0054] 图2示出在根据本发明的一项实施方式的具有易锥自由层的磁性设备例如自旋扭矩振荡器中使用的磁性结100的实施方式。为清楚起见,图2不是按比例。磁性结100包括驱动参比层(RL) 110、非磁性隔离层120、和具有易锥各向异性的自由层(FL) 130(或易锥自由层)。驱动参比层110也可称为被钉扎层。在一些实施方式中,磁性结还包括任选的钉扎层(例如,接触驱动参比层110的),其可用于固定驱动参比层110的磁化。在一些实施方式中,任选的钉扎层可为反铁磁性层(AFM)层或多层,其通过交换偏置相互作用来钉扎驱动参比层110的磁化。然而,在其它实施方式中,可省略任选的钉扎层104或可使用另外的结构。此外,磁性结100可包括其它和/或另外的层例如任选的种晶层、任选的覆盖层、和/或顶部和底部触头层。

[0055] 驱动参比层110是磁性的并因此可包括Ni、Fe和Co的一种或多种、或其合金。尽管被示为单层,但驱动参比层110可包括多层。例如,驱动参比层110可为综合的反铁磁体(SAF),其包括通过薄层例如Ru反铁磁性或铁磁性耦合的磁性层。在这样的SAF中,可使用与Ru或其它材料的薄层交插的多个磁性层。驱动参比层110也可为其它多层。自由层可具有超过平面外退磁能的垂直各向异性能量。在所示的实施方式中,易锥的对称轴基本上是由自由层130的平面的法线。在另外的实施方式中,自由层中的垂直各向异性可小于平面外退磁能。在这样的情况中,易锥的对称轴基本上在自由层的平面内。

[0056] 在一些实施方式中,非磁性隔离层120是绝缘体,例如隧穿阻挡物。在这样的实施方式中,非磁性隔离层120可包括晶体MgO,其可提高磁性结的隧穿磁阻(TMR)。在其它实施方式中,非磁性隔离层120可包括其它氧化物例如AlO或TiO。在其它实施方式中,非磁性隔离层120可为导体,例如Cu。在替代的实施方式中,非磁性隔离层120可具有其它结构,例如包括在绝缘基体中的传导通道的颗粒层。

[0057] 自由层130是磁性的且从而可包括Fe、Ni和/或Co的至少一种。自由层130被示为单



层。在其它实施方式中,下文更详细地描述,自由层130可包括其它层。此外,自由层130具有易锥磁各向异性。在图2中,易锥各向异性由磁化M示出。由于易锥各向异性,自由层130的总磁化具有在与垂直于磁性结100的层的平面的方向(在图2中z轴)所成的角度 $\theta$ 处的稳定状态。该角度小于与z轴所成的九十度。因此,自由层磁化的一个分量平行于该平面(例如在x-y平面中存在分量),且另一分量垂直于该平面(例如在z轴中)。在图2中所示的实施方式中,易锥的对称轴沿着z方向。然而,在其它实施方式中,易锥的对称轴可在另外的方向上,例如沿着平面内x或y方向。

[0058] 图3为示出对于根据本发明的一项实施方式的具有易锥各向异性的自由层的磁各向异性能量密度的旋转图,其中从平面内的任意点到原点的距离为 $\theta$ 。参照图2和3,对于易锥各向异性,磁各向异性能量密度145具有在或接近磁性结100的平面的法线处的局部最大值。在所示的实施方式中,所述局部最大值在或接近与z轴的零度处。在一些实施方式中,所述局部最大值为至少十倍于 $k_b T$ ,其中 $k_b$ 为玻尔兹曼常数以及T为磁性结的运行(操作)温度。在其它实施方式中,所述局部最大值为至少二十倍于 $k_b T$ 。此外,磁各向异性能量密度145具有在与所述局部最大值成一角度处的局部最小值。磁各向异性能量密度145还具有不同于所述局部最大值的全局最大值(例如全局最大值在0度的角度处以外的位置)。自由层130的磁化是沿着所述局部最小值稳定的并且对应于图2中所标记的角度 $\theta$ 。因此,如通过图3中的磁化M和磁各向异性能量密度145可看出的,自由层磁化在围绕z轴的一角度 $\theta$ 处是稳定的。这些稳定状态形成围绕磁性结100的层的平面的法线的锥。因此,如图2中所见,自由层130磁各向异性被称为易锥各向异性,其中磁化M的稳定状态沿着易锥EC存在。

[0059] 磁性结100的其它性质也可增强。磁性结100的热稳定性和对称性可不会受到不利影响。在与z轴成0度处的磁各向异性能量密度145中的局部最大值的幅度可为二十倍于 $k_b T$ 或更大。在一些实施方式中,所述局部最大值为至少六十倍于 $k_b T$ 。除在0度处的局部最大值之外,存在全局最大值,分开系统的两个基态。该全局最大值位于与易轴成约90度处。该全局最大值为至少60或80 $k_b T$ 。该幅度的全局最大值可足以确保磁性结100的热稳定性。

[0060] 对于自由层的易锥各向异性可以多种方式来实现。在本发明的一项实施方式中,自由层的易锥各向异性通过磁晶各向异性来实现。自由层的磁各向异性能量密度E作为与垂直轴所成的角度 $\theta$ 的函数可由以下描述:

$$[0061] \quad E(\theta) = K_1 \sin^2(\theta) + K_2 \sin^4(\theta) \quad (1)$$

[0062] 其中 $K_1$ 和 $K_2$ 是取决于用于形成自由层的材料的特性的参数,以及其中:

$$[0063] \quad -2K_2 < K_1 < 0 \quad (2)$$

[0064] 在本发明的一些实施方式中,具有易锥各向异性的自由层130可包括具有大的相应 $K_2$ 参数的材料。例如,在一些实施方式中,钴铁镍化合物( $\text{CoFeNiX}$ )作用于具有易锥各向异性的自由层130的材料,其中X为Re、Ir、Bi和W之一。在本发明的其它实施方式中,其它钴铁镍化合物( $\text{CoFeNiX}$ )可作用于具有易锥各向异性的自由层130的材料,其中X为I、Te、Os、Pt和Pb之一。如本文所使用的术语,钴铁镍化合物( $\text{CoFeNiX}$ )是指包括铁、钴、镍、和另外的元素(X)的化合物。在本发明的一些实施方式中,化合物是 $\text{Co}_a\text{Fe}_b\text{Ni}_c\text{X}_d$ ,其中 $a+b+c+d=1$ 以及其中 $0.4 \leq b \leq 0.9$ 。在本发明的一些实施方式中,化合物是 $\text{Co}_a\text{Fe}_b\text{Ni}_c\text{X}_d$ ,其中 $a+b+c+d=1$ 以及其中 $0.5 \leq b \leq 0.7$ 。

[0065] 替代地,易锥各向异性的磁各向异性能量密度E作为 $\theta$ 的函数可由以下完全等效的

表达式来描述:

$$[0066] \quad E(\theta) = K_1 \sin^2(\theta) + \beta K_1 \sin^2(2\theta) \quad (3)$$

[0067] 图4为示出描述磁各向异性材料的磁各向异性能量密度的方程的各分量的图。具体地,图4示出方程(3)的各分量( $K_1 \sin^2(\theta)$ 和 $\beta K_1 \sin^2(2\theta)$ )及它们之和( $K_1 \sin^2(\theta) + \beta K_1 \sin^2(2\theta)$ )。

[0068] 在本发明的另外的实施方式中,自由层的易锥各向异性可通过交换各向异性实现,其由于作为面内或垂直的双层耦合的两种铁磁性材料的相互作用产生。

[0069] 图5示出具有易锥各向异性的自由层130'的实施方式。为清楚起见,图5不是按比例。自由层130'包括多层,具体地,示出了由相互作用控制层136(或非磁性交换相互作用控制层)分开的磁性层134和138。在所示的实施方式中,一个磁性层138具有负的垂直各向异性 $H_k$ 。因此,通过本身,该层的磁化将留在膜的平面内。在一些实施方式中,层138可包括部分的垂直各向异性的作用。该作用降低使该层沿着z方向的磁化饱和所需的磁场。在一些实施方式中,部分的垂直各向异性为至少 $4\pi M_s$ 的百分之二十且小于 $4\pi M_s$ 的百分之九十。其它磁性层134具有高的垂直各向异性 $H_k$ 。在一些实施方式中,高的垂直各向异性的幅度取决于磁性结的大小。例如,对于具有在一百纳米的量级的直径的较大的磁性结100',大的 $H_k$ 可为大于一千奥斯特(1kOe)。相反,对于具有在十纳米的量级的直径的较小的磁性结100', $H_k$ 可为大于五千奥斯特(5kOe)。层134和138是铁磁性的并因此包括Fe、Co和Ni的一种或多种。其它材料(包括但不限于W、Mg、C、B、Ta、Cs、Zr、Pt、Pd、Tb、和/或Ru)也可包括在层134和138中。注意,对于层134和138可使用相同或不同的材料。可调整所使用的材料和/或层134和138的厚度的组合、以及相互作用控制层136,使得在层134和138中产生所需的各向异性。

[0070] 在该实施方式中的自由层130'还包括相互作用控制层136。相互作用控制层可用于管理磁性层134和138之间的磁性相互作用、例如交换相互作用。相互作用控制层136是非磁性的或弱磁性的。例如,Fe、Co、Ni、Ta、Cr、Mg、MgO、Ti、W、Ir、Rh和/或Ru或这些材料的合金可用于相互作用控制层136。相互作用控制层136的厚度也可变化。在一些实施方式中,相互作用控制层136为至少0.1nm且不超过1.5nm。例如,如果使用Ru,则相互作用控制层136可为至少0.3nm且不超过1.3nm。如果使用Ta,则相互作用控制层136可为至少0.1nm且不超过1.0nm。

[0071] 相互作用控制层136的作用参照图6可见,其示出对于磁性层134和138的多种磁交换相互作用常数 $J_{ex}$ 与材料的参数 $K_1$ 的组的总能量相对于角度。为简便起见,图6中的曲线200以二维描绘,因为磁性结100'可(但不必)围绕x轴对称。参照图5和6,曲线202示出对于层134和138之间的非常低的交换耦合 $J_{ex}$ 的磁各向异性能量密度相对于角度。曲线204示出对于层134和138之间的中等的交换耦合 $J_{ex}$ 的磁各向异性能量密度相对于角度。在所示的实施方式中,交换耦合 $J_{ex}$ 在 $1.5 \times 10^{-4} \text{J/m}^2$ 的量级。通常,交换耦合 $J_{ex}$ 在 $0.5 \times 10^{-4} \text{J/m}^2$ - $20 \times 10^{-4} \text{J/m}^2$ 的量级。曲线206示出对于层134和138之间的高的交换耦合 $J_{ex}$ 的磁各向异性能量密度相对于角度。如在曲线202和206中可看出的,对于低和高交换耦合,不存在对于易锥各向异性的由最小值(在图6中标记为 $\Phi$ )包围的局部最大值。然而,对于中等的交换耦合,磁各向异性能量密度接近与表面的法线成零度具有局部最大值,由此导致自由层130'的易锥各向异性。

[0072] 自由层130'的磁化参见图7可见,其示出对于具有易锥各向异性的自由层130'的

磁化的一项实施方式。参照图5、6和7，负的垂直各向异性层134具有磁化133。如果在磁性层134和138之间不存在相互作用，则磁化133位于平面内。然而，由于层134和138之间的交换相互作用，磁化133在与z轴（磁性结100'的平面的法线）成角度 $\theta$ 处。高的垂直各向异性层138具有磁化135。磁化135在不具有负的垂直各向异性的层134的情况下可沿着z轴存在。然而，由于交换相互作用，磁化135在与z轴成角度 $\alpha$ 处。自由层130'的总磁化由磁化137给出，其位于与z轴成角度 $\Phi$ 处。该角度 $\Phi$ 对应于曲线204中的局部最小值。

[0073] 易锥各向异性的作用可以数学的方式来理解。自由层130'的每单位面积的磁各向异性能量可作为与特定方向所成的角度的函数由以下给出：

$$[0074] \quad E(\theta, \alpha) = -H_{K,184} * M_{184} * t_{184} * \cos^2(\theta) - H_{K,188} * M_{188} * t_{188} * \cos^2(\alpha) + \sigma \cos(\theta - \alpha)$$

[0075] 其中 $H_{K,134}$ 是对于层134的有效垂直各向异性磁场； $M_{134}$ 是层134的磁化； $t_{134}$ 是层134的厚度； $H_{K,138}$ 是对于层138的有效垂直各向异性磁场； $M_{138}$ 是层138的饱和磁化， $t_{138}$ 是层138的厚度，以及 $\sigma$ 是面积（区域）交换能量密度。最终的结果是自由层的磁化137在与z轴所成的角度 $\Phi$ 中是稳定的，如图7中所示。由此，自由层130'呈现易锥各向异性。

[0076] 当与具有不呈现易锥各向异性的自由层的对比如的自旋扭矩振荡器比较时，具有呈现易锥各向异性的自由层130的自旋扭矩振荡器具有改善的设备的旋进特性。具体地，自由层的易锥各向异性使得根据本发明实施方式的自旋扭矩振荡器能够以低的输出功率（例如，显著低于几mA）运行而无需外部磁场，因为易锥各向异性实现稳定的场的旋进。此外，根据本发明实施方式的自旋扭矩振荡器具有高的输出功率，并且通过控制电流（例如通过控制电流源）可在宽的范围内控制振荡频率。

[0077] 根据本发明的一项实施方式的磁性结100，旋进频率 $f$ 作为 $\theta$ 的函数由以下给出：

$$[0078] \quad f(\theta) = f_0 \cos(\theta) [1 - 4\beta + 8\beta \cos^2(\theta)] = \frac{\eta \hbar}{4e\alpha} J_c \quad (4)$$

[0079] 其中 $f_0$ 是没有任何高阶（较高级，higher-order）各向异性（ $\beta=0$ ）的情况下的振荡频率， $\beta$ 是来自方程（3）的参数， $\eta$ 是STT效率、与MTJ的极化有关， $\hbar$ 是普朗克常数， $e$ 是电子的电荷， $\alpha$ 是磁阻尼，以及 $J_c$ 是施加通过磁性结100的电流的幅度。

[0080] 重新整理以上以求出 $J_c$ ：

$$[0081] \quad J_c = \frac{4e\alpha}{A\eta\hbar} E_b \cos(\theta) [1 - 4\beta + 8\beta \cos^2(\theta)] \quad (5)$$

[0082] 其中 $A$ 是MTJ的横截面积以及 $E_b$ 是热稳定因数。

[0083] 如从以上方程（4）和（5）所见，旋进频率 $f$ 与施加的电流 $J_c$ 成线性比例（例如成正比），如图8中所示。根据本发明的实施方式的自旋扭矩振荡器的运行频率范围受材料的各向异性 $H_k$ 限制，并且在各实施方式中，可在兆赫（MHz）（例如，1兆赫）至约10千兆赫（GHz）的范围内变化。在具有较高的K1、K2值的一些实施方式中，所述频率可超出10GHz且可最高达50GHz。

[0084] 图9为示出对于不同的 $\beta$ 值在不同的电流水平下的易锥的角度 $\theta$ 的图（返回参照方程（3）、（4）和（5））。（ $\beta=0$ ，对应于单轴情况，其中不存在围绕z轴的局部最小值。）如在图9中所示，在一项实施方式中，当 $|\beta|=0.25$ 时，旋进角度 $\theta$ 随电流的增加而增加，并且当 $|\beta|$ 大于0.25（例如 $|\beta|=0.30$ ）时，旋进则在非零的角度（例如0.1弧度，如图9中所示）处立即开始，其中 $\theta_0$ 是图9中 $J_c$ 为0.0的角度。

$$[0085] \quad \theta_0 = \frac{1}{2} \arccos \left( -\frac{1}{4\beta} \right)$$

[0086] 此外,如图9中所见,当 $\beta$ 大于约0.25时,振荡的初始幅度是大的(例如 $\theta$ 是大的),即使对于相对小的电流 $J_c$ ,并且所述幅度随电流增加,由于自由层130的易锥各向异性。因此,非常小的电流足以产生可检测的旋进,由此降低输入功率的需求。在一项实施方式中,电流密度在1-5mA/cm<sup>2</sup>的范围内。此外,本发明的实施方式不要求存在大的外部磁场,由此当在设备中使用进一步降低功耗。

[0087] 大的初始旋进角度还对应于根据本发明的实施方式的自旋扭矩振荡器的输出功率的增加。

[0088] 图10是进一步包括读出参比层的根据本发明的一项实施方式的自旋扭矩振荡器的示意图。图10中所示的磁性结100'的结构基本上类似于图2中所示的设备100的结构。这样,在本文中不重复基本上类似的组件的描述。磁性结100'进一步包括具有固定磁化152的读出参比层150,其中固定磁化的分量沿垂直于具有易锥各向异性的自由层130的磁化132(或磁矩)围绕其旋进的轴的方向延伸(例如,读出参比层150具有在沿x-y平面的方向上的磁化,在图11示出的示例实施方式中,在+x方向上)。这样,自由层130的磁化132的旋进可通过测量磁性结100'的电阻的读出电路检测(例如,当自由层的磁化132与读出层的磁化152对齐时电阻较低,和当它们在相反的方向上时电阻较高)。读出电路可包括配置为向电感器(感应器)的第一端提供电流的电流源,电感器的第二端耦合至结点。所述结点可被耦合至包括磁性结100'的自旋扭矩振荡器的顶部触头,并且所述结点还可连接至电容器的第一电极。自旋扭矩振荡器的底部触头可接地。电容器的第二电极可耦合至电阻性负载的第一端,且该电阻性负载的第二端可接地。电感器和电容器的组合可称为偏置T形接头(bias tee)。当自旋扭矩振荡器的电阻改变时,输送至负载的功率改变,由此容许自旋扭矩振荡器的振荡的读出。第二非磁性隔离层140(例如MgO)可在易锥自由层和读出参比层150之间。

[0089] 图11为进一步包括补偿参比层的根据本发明的一项实施方式的自旋扭矩振荡器的示意图。磁性结100''进一步包括补偿参比层160,其具有在与读出参比层150的磁化相反的方向上的固定磁化162以抵偿读出参比层150的磁化的不期望的作用。例如,如图11中所示,读出参比层150具有在+x方向上指示的磁化152,且补偿参比层160具有在-x方向上指示的磁化162。磁性结100''可进一步包括在补偿参比层上的反铁磁性层170以钉扎补偿参比层160的磁化方向。

[0090] 图12为示出根据本发明的一项实施方式的用于制造自旋扭矩振荡器的方法的流程图。一些操作可省略或组合。在磁性结100的环境中描述方法300。然而,方法300可用在其它磁性结例如结100'和100''上。此外,方法300可并入自旋扭矩振荡器的制造中。因此,方法300可用于制造自旋扭矩振荡器或包括自旋扭矩振荡器的更大的设备(例如处理器)。方法300可在提供一个或多个种晶层和任选的钉扎层后开始。

[0091] 通过操作302提供驱动参比层110。操作302可包括以驱动参比层110的所需厚度沉积所需的材料。此外,操作302可包括提供综合的反铁磁体(SAF)。通过操作304提供非磁性隔离层120。操作304可包括沉积所需的非磁性材料,包括但不限于晶体MgO。另外,在操作304中可沉积所需的材料厚度。

[0092] 在操作306中提供具有易锥各向异性的自由层130。在一些实施方式中,操作306可

通过沉积多层例如自由层130'、130"、200和/或200'来完成。然后,通过操作308完成制造。例如,可提供覆盖层。在其它实施方式中,可提供第二非磁性隔离层140、读出参比层150和另外的任选的补偿参比层160以及任选的钉扎层170。在其中磁性结的层作为堆叠体沉积、然后限定的一些实施方式中,操作308可包括限定磁性结100、实施退火、或以其它方式完成磁性结100的制造。此外,如果将磁性结100并入自旋扭矩振荡器中,操作308可包括提供触头、偏置结构和自旋扭矩振荡器的其它部分。由此形成磁性结100、100'和/或100"。因此,可实现磁性结的益处。

[0093] 这样,本发明的实施方式的方面提供自旋扭矩振荡器,其以低的输入功率且在不使用大的外部施加磁场的情况下运行,且其提供高的输出功率。这样,本发明的实施方式相对于现有的自旋扭矩振荡器提供改进,所述现有的自旋扭矩振荡器通常需要大的外部施加磁场和高的驱动电流,且通常具有低的输出功率。本发明的实施方式可用在利用振荡器的多种电子设备和半导体设备中,例如提供VLSI中的局部芯片钟(local chip clock)和提供用于调制和解调通讯信号的振荡器。

[0094] 虽然已结合一些示例性实施方式对本发明进行了描述,但将理解本发明不限于公开的实施方式,而是相反,意在覆盖包括在所附权利要求及其等同物的精神和范围内的各种变型和等同布置。

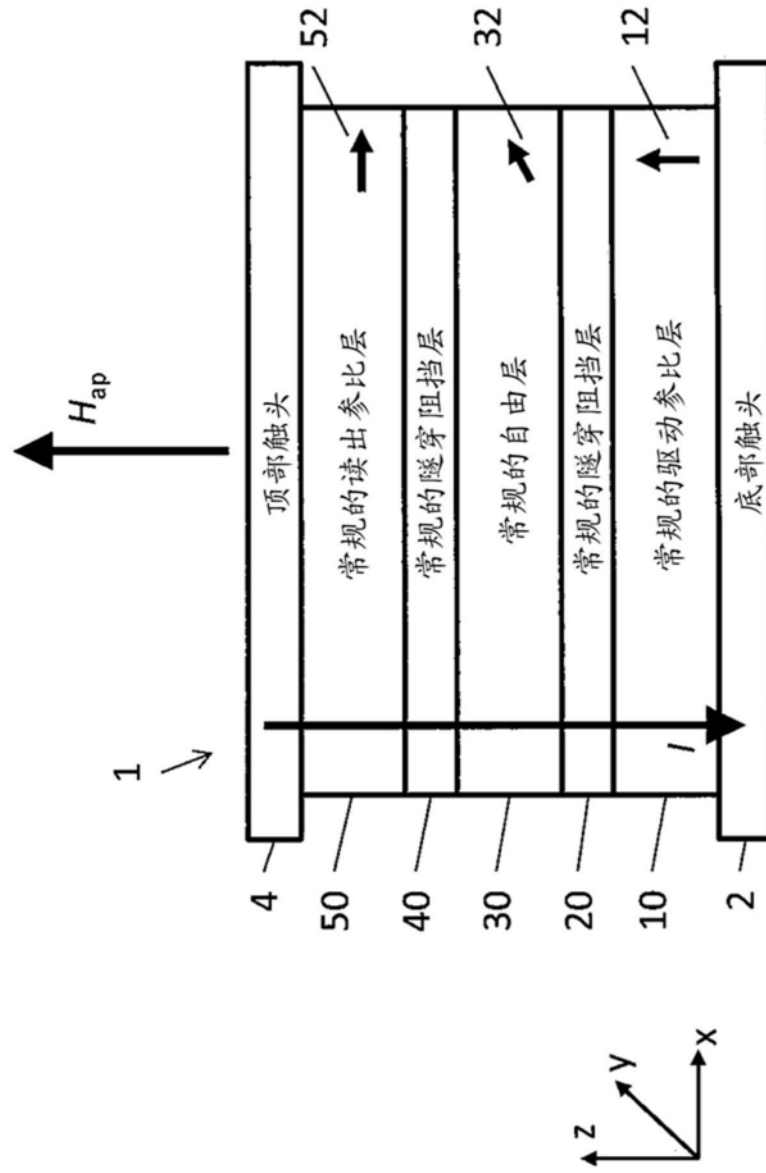


图1

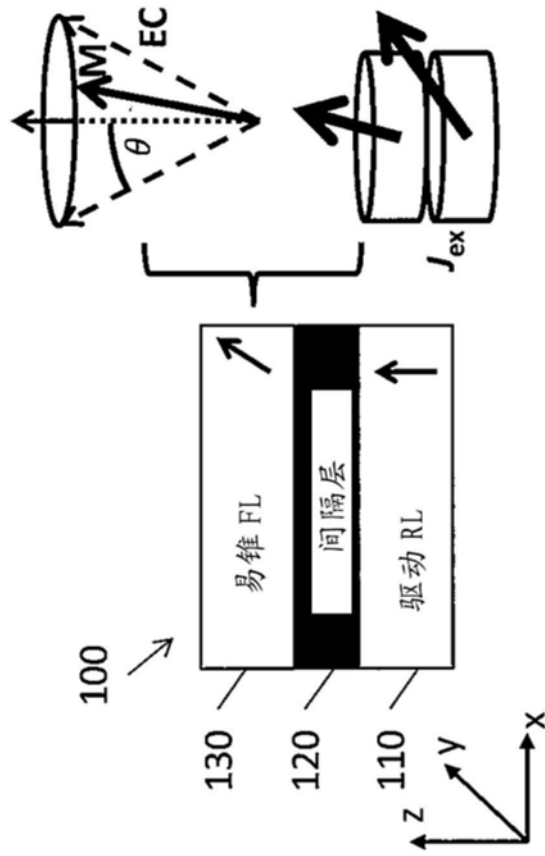


图2

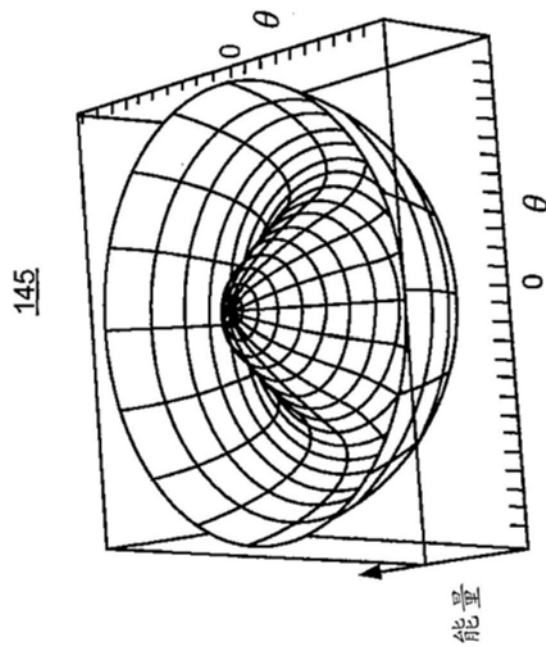


图3

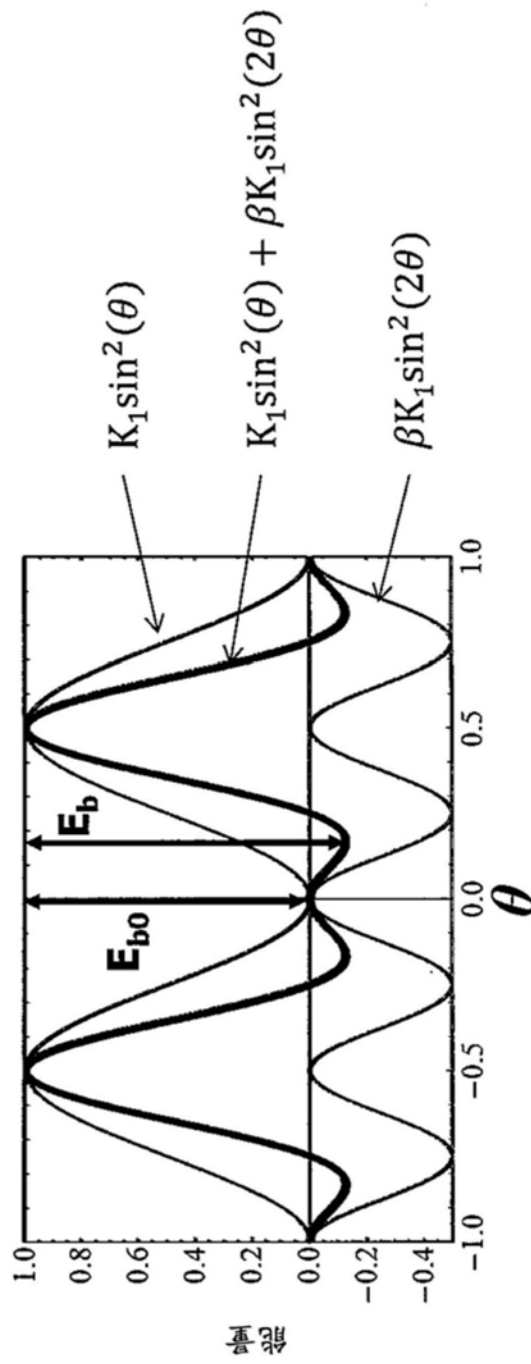


图4



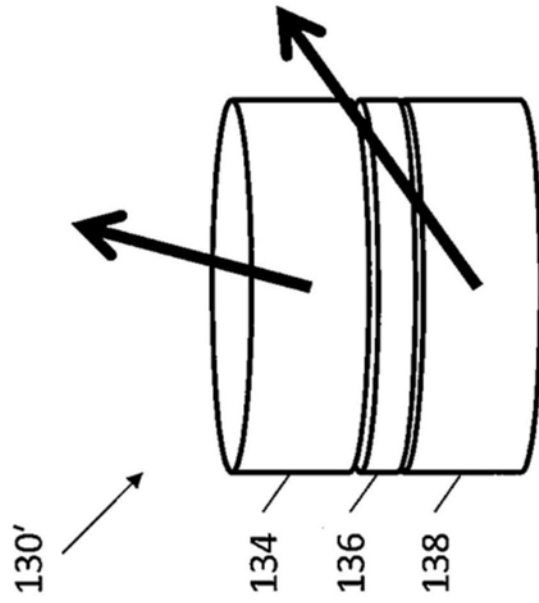


图5

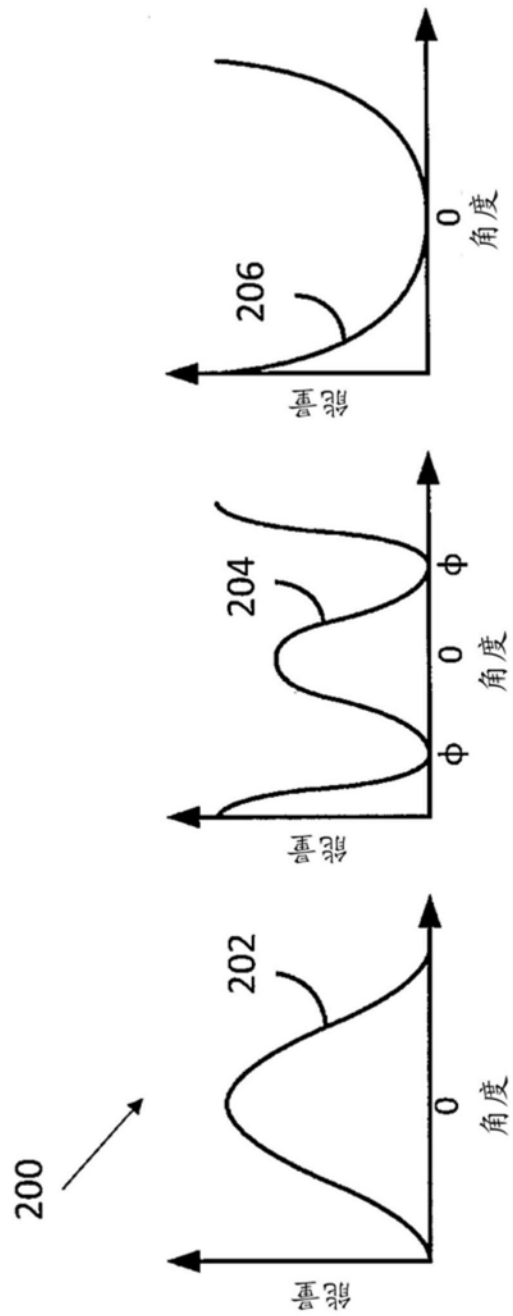


图6

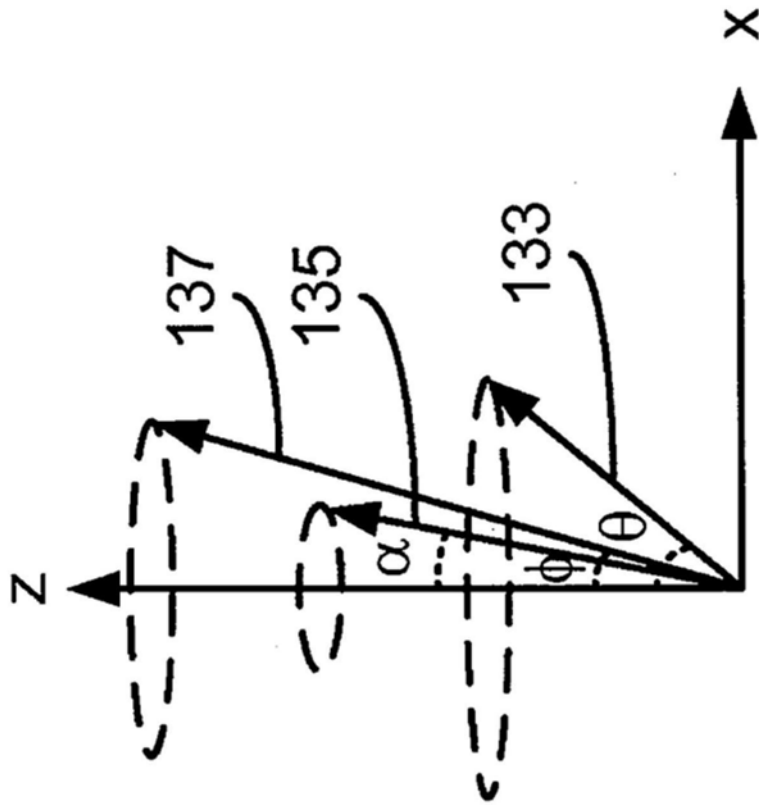


图7

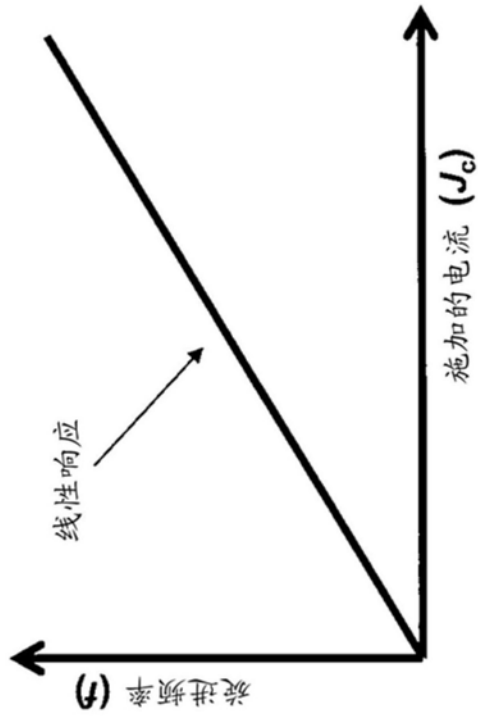


图8

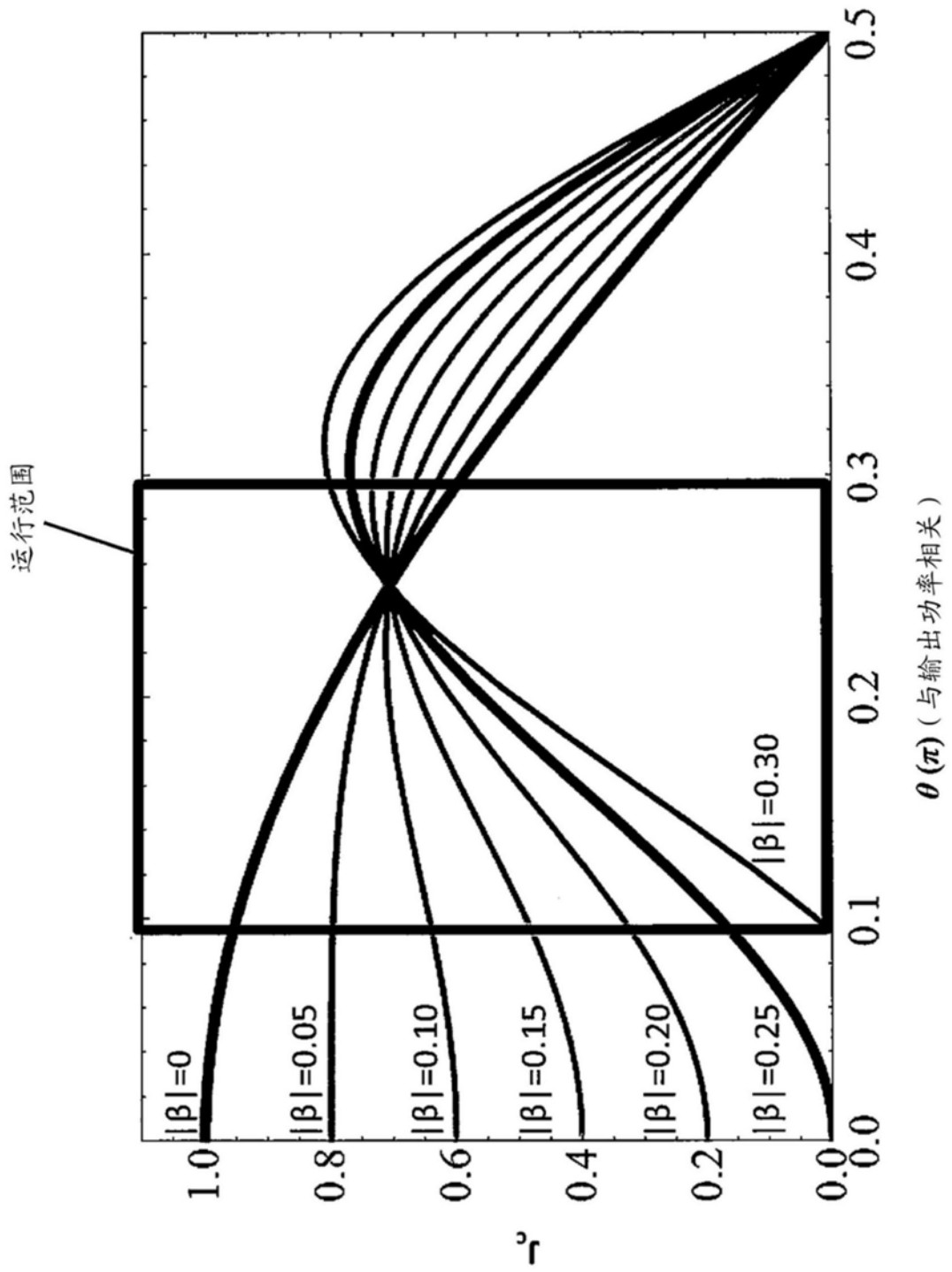


图9

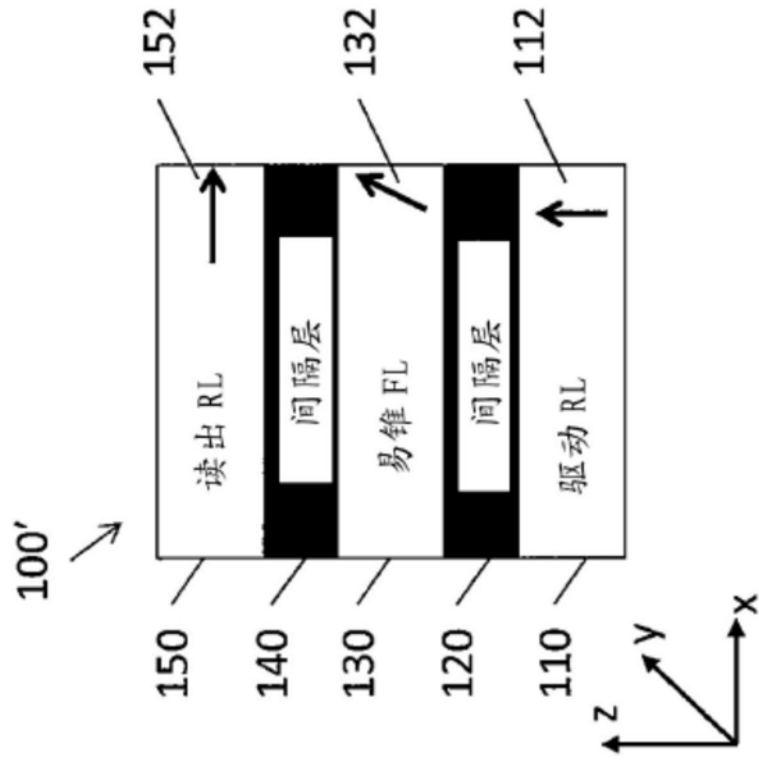


图10

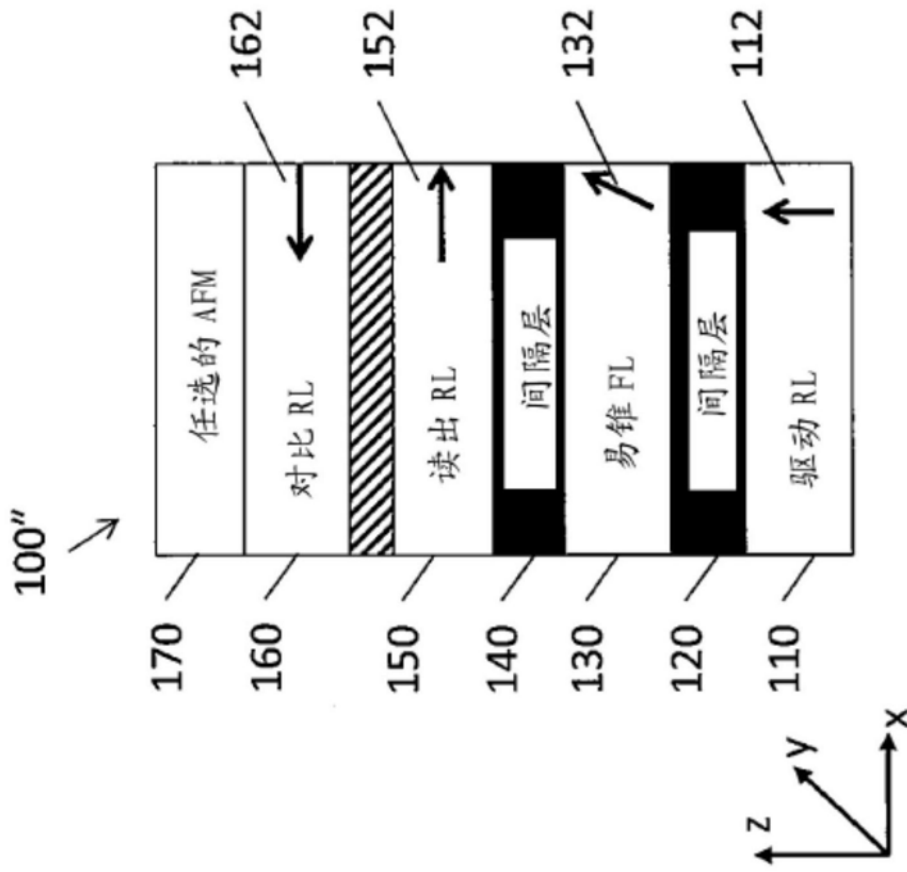


图11

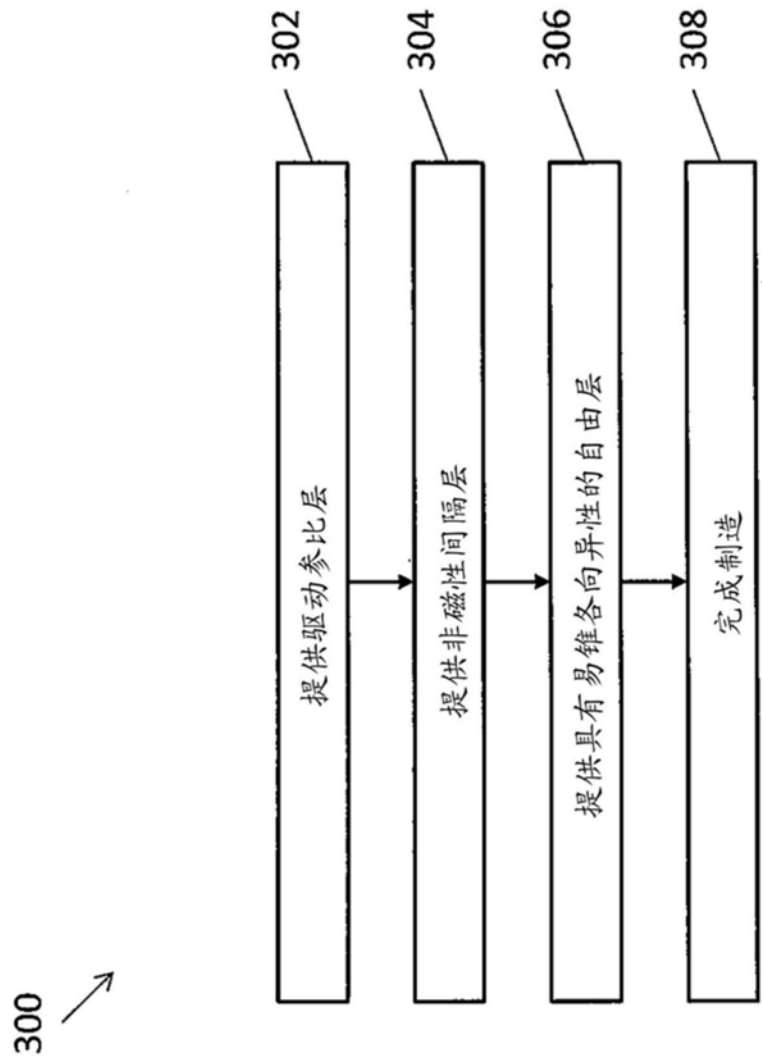


图12