



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103299370 B

(45) 授权公告日 2016. 01. 20

(21) 申请号 201180063255. 7

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2011. 11. 16

G11C 11/15(2006. 01)

(30) 优先权数据

61/414, 724 2010. 11. 17 US

13/041, 104 2011. 03. 04 US

(56) 对比文件

US 2009/0296462 A1, 2009. 12. 03,

US 2009/0296462 A1, 2009. 12. 03,

US 2008/0151614 A1, 2008. 06. 26,

US 2008/0112094 A1, 2008. 05. 15,

US 2010/0014346 A1, 2010. 01. 21,

EP 2249350 A1, 2010. 11. 10,

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2013. 06. 28

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2011/061077 2011. 11. 16

审查员 石爽

(87) PCT国际申请的公布数据

W02012/068309 EN 2012. 05. 24

(73) 专利权人 纽约大学

地址 美国纽约

(72) 发明人 A·肯特 D·比多 刘焕龙

(74) 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专

利商标事务所 11038

代理人 蒋世迅

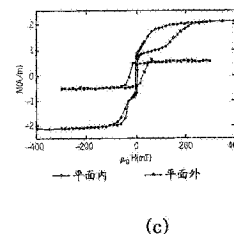
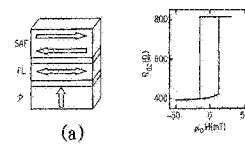
权利要求书2页 说明书8页 附图8页

(54) 发明名称

双极性自旋转移切换

(57) 摘要

双极性自旋转移切换。正交自旋转移磁性随机存取存储器(OST-MRAM)利用垂直于自由层磁化的自旋极化层实现大自旋转移转矩和超快速能量有效切换。包含垂直磁化自旋极化层和磁性隧道结的OST-MRAM装置展现优于现有技术装置的改进的性能,该OST-MRAM装置由平面内磁化自由层和合成反铁磁基准层构成。切换是双极性的,对正极性脉冲和负极性脉冲都发生符合旋进反转机制,并且要求小于450fJ的能量,而且对于500ps持续时间的0.7V幅值脉冲,在室温下,可以可靠观察到这种切换。



1. 一种磁性装置,包括:

极化层,被垂直于自由磁性层磁化,其中,该极化层包括降低极化层的自旋极化的 Co/Ni 多层或 Co/Pt 多层;

该自由磁性层形成第一电极并且通过第一非磁性金属层与磁化的极化层分离,该自由磁性层具有磁化矢量,该磁化矢量至少具有第一稳定状态和第二稳定状态;

基准层,该基准层形成第二电极并且通过第二非磁性层与该自由磁性层分离;

其中利用施加具有正极性或者负极性以及选择的幅值和持续时间的单极性电流脉冲通过该磁性装置设置磁化矢量,从所述第一稳定状态到所述第二稳定状态或者从所述第二稳定状态到所述第一稳定状态双极性切换该磁化矢量。

2. 根据权利要求 1 所述的磁性装置,其中与极化层和平面内磁化形式的基准层相关的自旋转移转矩能被如下描述:

$$\frac{d\hat{m}}{dt} = -\gamma\mu_0\hat{m} \times \vec{H}_{\text{eff}} + \alpha\hat{m} \times \frac{d\hat{m}}{dt} + \gamma a_j \hat{m} \times (\hat{m} \times \hat{m}_P) - \beta\gamma a_j \hat{m} \times (\hat{m} \times \hat{m}_R)$$

其中 \hat{m} 表示自由层磁化的磁化方向, a_j 是与单极性电流脉冲的电流和单极性电流脉冲的自旋极化成比例的项,该等式右侧的第三项是来自极化层的自旋转移转矩 (\hat{m}_P),并且该等式右侧的第四项是来自平面内磁化形式的基准层的自旋转移转矩 (\hat{m}_R),以及 β 表示这些自旋转移转矩的幅值的比值。

3. 根据权利要求 2 所述的磁性装置,其中 $\beta > 1$ 提供电流脉冲幅值的范围,其中该磁性装置的切换,对于第一电流极性,是从平行到逆平行,而对于第二电流极性,是从逆平行到平行。

4. 根据权利要求 2 所述的磁性装置,其中对于两种极性,该自由磁性层的磁化矢量的切换是旋进的和双极性的。

5. 根据权利要求 2 所述的磁性装置,其中小于或者约等于 1 的 β 提供减小的直接电流切换误差和旋进快速切换中的至少之一。

6. 根据权利要求 2 所述的磁性装置,其中对于小于或者约等于 1 的 β ,磁化方向变成旋进的,从而对于较高的电流幅值,提供较高的旋进频率。

7. 根据权利要求 2 所述的磁性装置,其中 β 是从约 1 或者大于 1 的组中选择的,并且脉冲极性和电流脉冲幅值控制自由磁性层的最终磁化状态并且与电流脉冲持续时间无关。

8. 根据权利要求 7 所述的磁性装置,其中通过选择用于基准层和与其相邻的磁性隧道结层的匹配材料,提高基准层的自旋极化。

9. 根据权利要求 1 所述的磁性装置,其中该多层是从 Co/Pd 上的 Co/Ni、Co/Pt 上的 CoNi 的组中选择的。

10. 根据权利要求 9 所述的磁性装置,其中能够改变 Co/Ni 的厚度,从而控制自旋极化。

11. 根据权利要求 7 所述的磁性装置,其中通过进一步包含布置于极化层与自由磁性层之间的非磁性层,降低来自极化层的自旋极化,从而控制来自极化层的载流子的自旋极化。

12. 根据权利要求 11 所述的磁性装置,其中该非磁性层包括具有受控缺陷的 Cu,从而降低自旋极化。

13. 根据权利要求 11 所述的磁性装置,其中该非磁性层能够具有变化的层厚度,从而

降低从极化层入射到自由磁性层的自旋极化。

14. 一种用于控制每个具有多个基元的存储器阵列的方法,该方法包括:

确定存储器阵列中的基元的初始状态,其中该存储器阵列包括具有垂直于自由磁性层的固定磁化矢量的极化层和具有可变磁化矢量的自由磁性层,其中,该极化层包括降低极化层的自旋极化的 Co/Ni 多层或 Co/Pt 多层,该可变磁化矢量至少具有第一稳定状态和第二稳定状态;

确定是否该初始状态是与对应于要写到该基元的信息的写状态相同;

如果该初始状态不同于该写状态,则施加正极性或者负极性以及所选的幅值和持续时间的单极性电流脉冲通过磁性装置,双极性切换该可变磁化矢量到写状态。

15. 一种存储器阵列,包括:

至少一个位基元,包含:

磁性装置,具有:

极化层,具有垂直于自由磁性层的固定磁化矢量,其中,该极化层包括降低极化层的自旋极化的 Co/Ni 多层或 Co/Pt 多层;

自由磁性层,具有至少具有第一稳定状态和第二稳定状态的可变磁化矢量;

非磁性层,分离具有固定磁化矢量的磁性层与自由磁性层;

其中利用施加具有正极性或者负极性以及足够大幅值和持续时间的单极性电流脉冲通过磁性装置设置可变磁化矢量,从所述第一稳定状态到第二稳定状态或者从所述第二稳定状态到所述第一稳定状态双极性切换该磁化矢量,以及

至少一个晶体管,用于电流控制和读出,其中对该至少一个位基元施加电压,激活该位基元。

双极性自旋转移切换

[0001] 交叉参考相关专利申请

[0002] 本申请要求 2010 年 11 月 17 日提交的美国临时专利申请 No. 61/414, 724 号的优先权, 并且是 2011 年 3 月 4 日提交的美国专利申请 No. 13/041, 104 的部分继续申请, 部分继续申请是 2009 年 6 月 24 日提交的美国专利申请 No. 12/490, 588 的分案申请, 该分案申请是 2007 年 10 月 31 日提交的美国专利申请 No. 11/932, 745 的部分继续申请, 该部分继续申请是 2006 年 8 月 1 日提交的美国专利申请 No. 11/498, 303 的部分继续申请, 该部分继续申请是 2005 年 10 月 13 日提交、2006 年 11 月 14 日许可的并且在 2007 年 1 月 30 日被作为美国专利 No. 7, 170, 778 公布的美国专利申请 No. 11/250, 791 的部分继续申请, 该部分继续申请是 2003 年 8 月 19 日提交的、2005 年 9 月 12 日许可的并且于 2005 年 12 月 27 日作为美国专利 No. 6, 980, 469 公布的美国专利申请 No. 10/643, 762 的继续申请, 在此通过引用包括所有这些专利申请的全部内容。

技术领域

[0003] 本发明一般地涉及一种诸如用于存储器和信息处理的磁性装置。更具体地说, 本发明描述了一种提供双极性自旋转移切换的自旋转移转矩磁性随机存取存储器 (STT-MRAM)。

背景技术

[0004] 利用自旋极化电子流的磁性装置是磁性存储器和信息处理应用的兴趣点。这种装置通常包含至少两个由诸如金属或者绝缘体的非磁性材料分离的铁磁电极。电极的厚度通常在 1nm 至 50nm 之间。如果该非磁性材料是金属, 则这种类型的装置被称为巨磁阻或者自旋阀装置。该装置的电阻取决于磁性电极的相对磁化取向, 诸如是否它们是平行取向还是逆平行取向(即, 磁化位于平行线上但沿相反方向指向)。一个电极通常使其磁化被钉扎, 即, 它具有比另一个电极 50 高的矫顽性, 并且需要较大磁场或者自旋极化电流用于改变其磁化方向。第二层被称为自由电极, 并且可以相对于前者改变其磁化取向。能够以第二层的取向存储信息。例如, 层的逆平行对齐能够表示“1”或者“0”, 而平行对齐能够表示“0”或者“1”。对于这两种状态, 装置电阻不同, 因此, 装置电阻能够被用于区别“1”与“0”。这种装置的重要特征是它是非易失性存储器, 因为与磁性硬驱动器一样, 当电源断开时, 该装置保持甚至几十纳米的信息。磁体电极的横向尺寸可以是亚微米级的, 并且对于热波动, 磁化方向仍稳定。

[0005] 在传统的磁性随机存取存储器 (MRAM) 设计中, 利用磁场切换自由电极的磁化方向。利用磁性电极附近的载流线产生这些磁场。该线的截面必须小, 因为存储器装置包括 MRAM 基元 (cell) 的致密阵列。由于来自这些线的磁场产生大范围磁场(磁场仅以离开线的中心的距离成反比衰减), 在阵列的单元 (element) 之间将产生串扰, 并且一个装置将承受来自其他装置的磁场。该串扰将限制存储器的密度和 / 或者导致存储操作发生错误。此外, 在电极位置, 这种线产生的磁场被限制到 0.1 特斯拉, 这样导致装置操作速度降低。重

要的是,传统存储器设计还采用概率(随机)处理或者波动场来起切换事件,该切换事件本来就慢速,并且不可靠(例如,请参见 R. H. Koch 等人, Phys. Rev. Lett. 84. 5419(2000))。

[0006] 在美国专利 No. 5, 695, 864 和几个其他公开中(例如, J. Slonckewski, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 159, LI(1996)), John Slonckewski 描述了一种机制,根据这种机制,自旋极化电流能够被用于直接改变磁性电极的磁化取向。在所建议的机制中,流动的电子的自旋角动量直接与磁区的背景磁化相互作用。运动的电子将其一部分自旋角动量转移到背景磁化,并且在该区域内对磁化产生转矩。该转矩能够改变该区域的磁化方向并且切换其磁化方向。此外,这种相互作用是局部的,因为它仅作用于电流流过的区域。然而,所建议的机制纯粹是理论上的。

[0007] 自旋转移转矩磁性随机存取存储器(STT-MRAM)装置像普通存储器一样有极大的希望。STT-MRAM 是非易失性的、具有小基元尺寸、高耐久性,并且可以与静态 RAM (SRAM) 的速度匹配。普通的共线磁化 STT-MRAM 装置的缺点是它们通常具有长的平均切换时间和宽的切换时间分布。这与自旋转移转矩仅当层磁化不对齐时才是非零的事实相关。因此,自旋转移切换要求可切换磁性(自由)层例如因为热波动而初始不对齐。取决于热波动导致具有可能有几纳秒的不可预知的潜伏延迟的无条理的 reversal)。

[0008] 自旋转移转矩磁性随机存取存储器(STT-MRAM)装置利用电流或者电压脉冲改变单元的磁性状态,以便写信息。在迄今公知的 STT-MRAM 装置中,装置操作需要正极性和负极性两者的电压/电流脉冲。例如,写“1”需要正极性脉冲,而写“0”需要负极性脉冲。(当然,哪个磁性状态表示“1”和哪个磁性状态表示“0”的定义是任意的)在该装置中,该磁性单元通常具有磁化取向或者“向左”或者“向右”、平行于或者逆平行于基准层的磁化的两种可能的状态。这两种磁性状态具有不同的电阻,能够被用于以电方式读出信息。

[0009] 利用当前的互补金属氧化物半导体(CMOS)技术,需要电路来控制送到 STT-MRAM 基元的信号。现有的 STT-MRAM 装置需要双极性源,并且利用一种极性将位基元(bit cell)设定到一个状态,而利用另一种极性将其设定到另一个状态,即单极性。就是说,需要该源能够提供两种极性,因为每种极性只能或者写“0”或者写“1”。尽管利用单极性电压/电流源能够进行读,但是写信息需要双极性源。

发明内容

[0010] 鉴于与采用自旋转移转矩的装置的传统设计相关的局限性,本发明的目的是提供一种提供改进的磁性存储器或者磁性信息处理装置的结构和方法。

[0011] 本发明的另一个目的是生产要求简化外部驱动电路的磁性装置。

[0012] 本发明的另一个目的是生产在操作速度方面有优势的磁性装置。

[0013] 本发明的另一个目的是生产在可靠性方面有优势的磁性装置。

[0014] 本发明的另一个目的是生产消耗较少功率的磁性装置。

[0015] 利用采用磁性层的装置和方法实现本发明的这些以及其他目的,在该磁性层中,层磁化方向不沿着同一个轴。例如,在一个实施例中,两个磁性区域具有正交的磁化。

[0016] 本发明的又一个方面提供了一种不需要特定脉冲极性的磁性装置。该磁性装置至少具有第一稳定状态和第二稳定状态。施加适当幅值和持续时间的脉冲将使磁性装置从其任意当前状态切换到其他状态,即,从第一状态切换到第二状态,或者从第二状态切换到第

一状态。因此,脉冲源仅需要是单极性的,并且位基元是双极性的,因为其能够接收两种极性的脉冲。

附图说明

[0017] 根据下面对本发明的说明性实施例所做的详细描述和附图,本发明的上述以及其他特征更加容易明白,在所有附图中,同样的参考编号指相同的单元,其中:

[0018] 图 1 (a) 示出 OST-MRAM 层堆栈,图 1 (b) 是装置电阻与平面内磁场的曲线图,示出 107% 磁阻(MR),以及自由层在 12mT 从平行(P) 状态切换到逆平行(AP) 状态,而在 -16mT 从 AP 状态切换到 P 状态;图 1 (c) 是该层堆栈的磁化的装置振动样品磁力测定(VSM) 测量值的曲线图,其中虚线曲线示出在平面内施加磁场的情况下自由层和(合成反铁磁性)(SAF) 自由层的切换,而方块线红色曲线示出垂直于该平面的磁场情况下的极化层的特性,示出了 50mT 的高剩磁和高矫顽磁场;

[0019] 图 2 是旋进切换(precessional switching) 的例子,并且示出用于产生磁化旋进(precession) 的脉冲;

[0020] 图 3 是在施加 10mT 磁场的情况下,对于 3 个不同脉冲幅值,从 P 状态切换到 AP 状态的作为脉冲持续时间函数的切换概率的曲线图,对于小于 500ps 持续时间的脉冲,可以实现 100% 的切换概率;

[0021] 图 4 (a) 和 4 (b) 是在 700ps 的固定脉冲持续时间的情况下作为脉冲幅值函数的切换概率的曲线图,其中图 4 (a) 是从 P 状态切换到 AP 状态,而图 4 (b) 是从 AP 状态到 P 状态,其中该切换是双极性的,对正脉冲极性和负脉冲极性两者发生;

[0022] 图 5 是直接切换的例子,并且示出位基元切换情况下的电压轨迹。

[0023] 图 6 (a) — 6 (f) 示出从 P 切换到 AP 的作为脉冲幅值函数的统计概率,脉冲幅值越大,产生越短的切换开始时间和越短的用于切换的时间;

[0024] 图 7 (a) — 7 (c) 示出 50nm×115nm 椭圆形位基元的典型装置特性;电阻是作为施加的平面内磁场的函数被测量的;图 7 (a) 示出导致基准层和自由层切换的施加的磁场,图 7 (b) 示出导致仅基准层切换的施加的磁场,以及图 7 (c) 示出导致仅自由层切换的施加的磁场;

[0025] 图 8 (a) — 8 (c) 示出对于条件($\beta=1, a_j=+0.025$), 该磁化切换是旋进的,在时间 0 从 P 状态开始;该磁化的 3 个分量示出是 m_x 、 m_y 和 m_z ;

[0026] 图 9 (a) — 9 (c) 示出对于条件($\beta=1, a_j=-0.025$), 该磁化切换是旋进的,其示出正极性脉冲和负极性脉冲都导致旋进的磁化反转,具有稍许不同的旋进速率(或者频率);

[0027] 图 10 (a) — 10 (c) 示出对于条件($\beta=5, a_j=+0.008$), 从 P 到 AP 的磁化切换是直接的(即,没有旋进);

[0028] 图 11 (a) — 11 (c) 示出对于条件($\beta=5, a_j=-0.008$), 没有从 P 状态的切换;仅正脉冲(图 10 (a) — 图 10 (c)) 导致从 P 状态到 AP 状态的磁化切换;

[0029] 图 12 (a) — 12 (c) 示出对于条件($\beta=5, a_j=-0.006$, 即, 负脉冲极性), 有从 AP 状态到 P 状态的直接磁化切换;以及

[0030] 图 13 (a) — 13 (c) 示出对于条件($\beta=5, a_j=+0.006$, 即, 正脉冲极性), 没有从 AP 状态到 P 状态的切换,对于负脉冲极性(图 12 (a) — 12 (c)), 仅发生从 AP 状态到 P 状

态的切换。

具体实施方式

[0031] 本发明涉及一种正交自旋转移 MRAM (OST-MRAM) 装置和方法。OST-MRAM 采用垂直于自由层磁化的自旋极化层来实现大初始自旋转移转矩。这种几何结构比共线磁化 STT-MRAM 装置具有显著优点,因为它消除了纳秒级的潜伏延迟(incubation delay),并且减小了切换的随机本性。其还有使写时间低于 50ps 的潜力。图 1 (a)示出 STT-MRAM 的一个实施例。垂直磁化的极化器(P)通过非磁性金属与自由磁性层(FL)分离。该自由层形成 MTJ 的一个电极。另一个电极,即,基准层,由 SAF 自由层构成。

[0032] 在 OST-MRAM 中,利用基准磁性层读出磁性状态。将该层的磁化设定到与自由层的磁化共线,并且存储器状态对应于与基准层磁化平行(P)或者逆平行(AP)的自由层磁化。以前的采用平面外磁化自旋极化器的 OST-MRAM 装置是与平面内磁化自旋阀组合。在快速切换被看到的同时,获得的读出信号小;有小于~5%的磁阻(MR)。该装置阻抗也是小的,为~5Ω。

[0033] 本发明的一个实施例涉及基于组合了快速切换和大(>100%)MR 的 OST-MRAM 装置的磁性隧道结(magnetic tunnel junction (MTJ)),快速切换和大(>100%)MR 对于应用都是至关重要的。该装置的阻抗是~1kΩ,因此,与互补金属氧化物半导体(CMOS)场效应晶体管(FET)存储器控制电路兼容。写功能使基元的状态切换,而非设定该状态。此外,切换是双极性的,对于正极性脉冲和负极性脉冲发生,符合旋进反转机制。

[0034] 在一个实施例中,本发明提供了能够实现自旋转移装置操作的“转换(toggle)”模式的设备和方法。脉冲源可以是单极性的,因为位基元不根据脉冲的极性设定状态,即,它是双极性的。相反,任何一种极性的足够大幅值的脉冲都将“转换”装置的磁性状态,“1”→“0”和“0”→“1”。因此,(足够长时间和幅值的)脉冲将改变装置或者位基元的磁性状态,而与原始磁性状态无关。这样,在一个实施例中,在这种“转换”模式的操作下写信息可以要求读该装置或者位基元的初始状态,并且根据要被写的信息,或者施加或者不施加电流/电压脉冲。即,如果装置或者位基元已经处于要求的状态,则不施加脉冲。

[0035] 作为该实施例的例子,图 2 示出位基元切换事件的实验时间分辨的电压迹线。-0.62V 的电压脉冲从曲线图中的时间 t 开始施加约 2ns。该装置是 50nm×115nm 的椭圆形位基元,并且具有约 2kΩ 的阻抗。信号电平 1 的水平虚线迹线对应于逆平行状态(AP)。信号电平 0 的水平虚线迹线示出当位基元是处于平行(P)状态时的响应。(P 和 AP 指层堆栈中自由层相对于基准层磁化的磁化方向)。在约 1.1ns,该装置从 P 状态切换到 AP 状态。然后,该装置以约 3GHz 的频率旋进。该装置的最终状态(P 或者 AP)取决于脉冲持续时间。

[0036] STT-MRAM 的双极性转换的使用允许外部驱动电路被简化,因为利用一种极性的电源能够完成所有装置操作(即,读和写)。此外,可以相信,采用本发明的装置很可能操作更快,因为小于 500ps 的脉冲将转换该装置的磁性状态。仅需要一种极性的额外好处是降低功率消耗。这部分地是因为,不需要在不同电平之间切换对装置供给的电压。在当前 MRAM-CMOS 设计中,通常一个晶体管与每个 MRAM 位基元相关,并且为了写信息需要改变该晶体管上的源极电压和漏极电压。根据本发明的一个实施例,源极电压或者漏极电压可以保持在固定电平。使源极电压或者漏极电压保持在固定电平降低了装置操作所需的功率,

因为在电源电压的极性每次改变时,都需要能量。在一个实施例中,在室温下热稳定的自由磁极层中,切换需要小于 450fJ 的能量。

[0037] 如上所述,所述 OST-MRAM 装置的一个特征是切换是双极性的,即,根据本发明的位基元利用任何一种电压脉冲极性都可以在状态之间切换。然而,可以存在用于触发切换的脉冲的阈值。这些阈值可以根据脉冲而不同,例如,根据脉冲极性或者根据装置初始状态,即, P 或者 AP 而不同。下面将关于图 4 (a) 和 4 (b) 中的例子进一步描述该特征。

[0038] 两种极性的概率分布的这种不对称性与普通的共线自由层/隧道壁垒/SAF 型 STT 装置中看到的特性不同。在这些装置中,仅对电压脉冲的一种极性,或者通过热导致回跳 (thermally induced backhopping), 发生切换。如上所述,在 OST-MRAM 装置中,对两种极性发生切换。这种双极性切换过程表示转矩由垂直极化器发出。对于共线装置,我们希望根据自旋转移转矩模型,仅对于正极性脉冲实现 P → P 切换。对于本发明的一个实施例,与负极性脉冲相比,正极性脉冲导致较低切换概率(图 4(a))。如果切换过程包括该结的简单加热,而不是在此描述的 OST-MRAM 装置中的自旋转移转矩切换,则预期能观察到对称切换概率分布和切换概率对脉冲幅值的单调依从关系,这不是在图 4 (a) 和 4 (b) 中看到的情况。

[0039] 作为该实施例的例子,图 5 示出位基元切换事件的实验时间分辨的电压迹线。在该曲线图中的时间 0 开始施加 0.7V 的电压脉冲约 2ns。该装置是 $60 \times 180\text{nm}^2$ 六边形形状,并且具有约 $1\text{k}\Omega$ 的阻抗。虚线迹线“a”示出当位基元处于平行状态(P)时的响应。线迹线“b”示出当位基元处于逆平行(AP)状态时的响应。(P 和 AP 指层堆栈中的自由层相对于基准层磁化的磁化方向。)线迹线“c”示出该脉冲开始后约 1.2ns 时装置从 P 切换到 AP 的事件。线迹线“d”示出为了去除与噪声相关的高频分量而滤波后的相同数据。如图 5 所示,定义开始时间和切换时间。

[0040] 自由层磁化绕着其去磁化场的旋转将产生是脉冲幅值或者持续时间的非单调函数的切换概率,因为如果脉冲在自由层磁化完成整圈旋转(即, 2π 旋转)之后结束,则切换概率将降低。由于来自极化和基准层的边缘场(fringe field), 旋进频率也可以是脉冲极性的函数。此外,通过增加相对于另一个自由层状态有利于一个自由层状态的转矩,来自基准层的自旋转矩破坏反转的对称性。

[0041] 因此,根据本发明原理的装置可以采用仅一种极性的电压/电流脉冲写“0”和“1”两种状态。初始处于“1”状态的装置能够被切换到“0”状态,并且利用同一个极性脉冲,原始处于态“0”状的装置能够被切换到“1”状态。此外,尽管这些操作所需的脉冲幅值不同(请参见图 4 (a)和 4 (b)),但是利用该方面有助于装置操作。例如,如果阈值不同,则脉冲幅值可以唯一地确定装置最终状态。在一个实施例中,正极性脉冲和负极性脉冲的阈值之间的差值足够大,以致不需要读步骤。例如,如果与正脉冲相比,负脉冲需要低得多的幅值和或者脉冲持续时间来实现从 P 切换到 AP 的 100% 概率,反之亦然,正脉冲要求低得多的幅值或者脉冲持续时间来实现从 AP 到 P 切换的 100% 概率,可以利用这些幅值实现要求的功能。如果从 AP 到 P 切换所需的正脉冲低于从 P 到 AP 切换所需的阈值,对于负脉冲亦然,则装置不需要在写之前读位基元。例如,如果要求将位基元写到 P 状态,则对该装置施加足够的(高于切换到 P 的 100% 阈值而低于切换到 AP 的阈值)正脉冲。如果位基元处于 P,则正脉冲足以切换到 P。然而,如果位基元已经处于 P,则正脉冲不足以(即,低于阈值)切换到

AP。

[0042] 下面的非限制性例子示出本发明的各种属性。

[0043] 例子 1

[0044] 利用 Singulus TIMARIS PVD 模块, OST-MRAM 层堆栈生长于 150mm 氧化硅晶片上。装置层结构示于图 1 (a) 中。极化器由交替耦接到 Co/Ni 多层的 Co/Pd 多层构成。由于 Co 在 Ni 中的强自旋散射非对称性和垂直磁性各向异性 (PMA), Co/Ni 多层具有高自旋极化。为了增强层矫顽和剩磁, 该层被耦接到因为 Pd 的强自旋轨道散射而具有非常大 PMA 但是自旋极化较小的 Co/Pd。极化器通过 10nm 的 Cu 与作为 MTJ 的电极之一的平面内磁化 CoFeB 自由层分离。MTJ 结构是 $3\text{CoFeB}|0.8\text{MgO}|2.3\text{Co}_{0.4}\text{Fe}_{0.4}\text{B}_{0.2}|0.6\text{Ru}|2\text{Co}_{0.4}\text{Fe}_{0.3}\text{PtMn}$ (每种成份左侧的数量表示以 nm 为单位的层厚)。在 300°C 下在磁场下对圆片退火 2 小时, 然后, 利用振动样品磁力测定 (VSM) 测量值、铁磁谐振频谱 (FMR) 测量值和平面内电流隧道 (CIPT) 测量值, 特性化该圆片。图 1 (c) 示出平面内和垂直该平面施加的磁场的薄膜磁化的 VSM 测量值。自由层非常软, 而基准层具有约 50mT 的矫顽场; 来自反铁磁 PtMn 的交替偏置是 100mT。垂直极化器具有 50mT 的矫顽场。

[0045] 利用 e 射束和光刻, 晶片被图形化, 以便产生 OST-MRAM 装置。利用离子铣削通过自由层蚀刻辅助 100nm 结构。对于矩形、椭圆形和六边形型式, 装置尺寸从 40nm×80nm 至 80nm×240nm 变化。约 100 个结 (junction) 被研究。在一个 60nm×180nm 六边形形状装置上获得的结果, 下面将做更详细说明。尽管在此未说明, 但是对这种类型的其他装置获得了类似的结果。

[0046] 通过施加小电压 ($V_{ac}=30\text{mV}$) 并且测量电流, 测量样品电阻。装置的 MR 主要由能够是平行 (PA) 或者逆平行 (AP) 的自由层 (3CoFeB) 与基准层 (2.3CoFeB) 的相对取向确定。图 1 (b) 示出自由层的小磁滞回路。图形化的自由层在室温下具有 14mT 的矫顽场, 并且该装置具有 107% MR。该回路中心位于约 -2mT, 因为有来自合成反铁磁 (SAF) 基准层耦合的小剩磁双极耦合。

[0047] 为了测量电流导致的切换概率, 施加可变幅值、持续时间和极性的脉冲。利用施加的磁场将样品设定于双稳态区域内 (请参见图 1 (b)), 然后, 利用提供高达 2V 幅值、50ps 的最短脉冲持续时间的脉冲发生器, 施加电压脉冲。通过在施加脉冲之前和之后, 利用小直流电压测量电阻, 我们能够确定装置状态。由于自由层非常稳定, 而无需任何施加的电压 (请参见下面的讨论), 所以可以认为在施加电压脉冲期间发生切换事件 (即, 对在没有脉冲的情况下自由层磁化会反转的点的自由层磁化动态)。在该建立中, 限定正电压对应于从层堆栈的底部流到顶部的电子, 即, 从极化器流到自由层和基准层的电子。

[0048] 观察到的幅值和脉冲持续时间两者影响切换事件的概率。图 3 示出对于 -0.5、-0.6 和 -0.7V 的 3 个不同脉冲幅值, 在 10mT 的施加磁场中, 作为脉冲持续时间函数的从 P 状态到 AP 状态的切换概率。脉冲幅值越高, 则导致以越短的脉冲持续时间切换。可以观察到利用持续时间小于 500ps 的脉冲, 根据本发明的装置能够以 100% 的概率切换。100% 概率切换所需的能量小于 450fJ。由于对于短至 500ps 的脉冲观察到 100% 切换概率, 所以可以相信, 不存在像在传统共线或者接近共线磁化装置中所观察到的几纳秒的潜伏延迟。因此, 本发明的切换过程提供既快速又可预测的结果。

[0049] 为了确定该反转的能量的壁垒, 以不同的场扫描速率测量样品的矫顽场。然后, 由

如下关系式确定能量壁垒：

$$[0050] \quad r = r_0 \exp \left[\xi_0 \left(1 - \frac{H_{app}}{H_c} \right)^\beta \right], \quad (1)$$

[0051] 其中 $\xi_0 = U_0/kT$, 是在 $T=300K$ 的情况下, 高于热能量的零施加场能量壁垒。假定 $\beta = 2$, 在 $\mu_0 H_{app} = 0.01T$ 的情况下, 我们获得 $\xi = 40$ 的能量壁垒, 表示该层在室温下非常热稳定。

[0052] 如上所述, 所描述的 OST-MRAM 装置的一个特征是切换是双极性的, 即, 根据本发明的位基元利用任何一种电压脉冲极性都可以在状态之间切换。对于上面描述的例子, 图 4 (a) 示出在 700ps 的脉冲持续时间的情况下, 对于 (a) $P \rightarrow AP$ 切换, 切换概率与脉冲幅值的关系, 而图 4 (b) 示出在 700ps 的脉冲持续时间的情况下, $AP \rightarrow P$ 的切换。尽管 OST-MRAM 装置是双极性的, 但是在图 4 (a) 中可以看出, 负极性脉冲比正极性脉冲导致更高的切换概率。对于 $AP \rightarrow P$, 相反情况在图 4 (b) 中被发现。在这两种情况下, 施加接近矫顽场的磁场都导致切换的较低电压脉冲阈值。此外, 切换概率是脉冲幅值的非单调函数。看, 所观察到的数据定性符合由垂直极化器驱动的旋进反转。

[0053] 例子 2

[0054] 通过考虑到与垂直极化器和基准层相关的自旋转移转矩, 优选实施例中的装置和方法的磁化动态 (magnetization dynamics) 能够对第一近似被建模如下：

$$[0055] \quad \frac{d\hat{m}}{dt} = -\gamma\mu_0\hat{m} \times \vec{H}_{eff} + \alpha\hat{m} \times \frac{d\hat{m}}{dt} + \gamma a_J \hat{m} \times (\hat{m} \times \hat{m}_P) - \beta\gamma a_J \hat{m} \times (\hat{m} \times \hat{m}_R) \quad (2)$$

[0056] 其中 m 表示自由层的磁化方向 (它是沿自由层磁化方向的单位矢量)。 α 是自由层的阻尼参数。前因子 a_J 取决于电流密度 J 、电流密度 J 的自旋极化 P 、以及自由层与钉扎磁化层之间的夹角的余弦 $\cos(\theta)$, 使得 $a_J = hJg(P, \cos(\theta)) / (eMt)$ 。 h 是缩减的普朗克常数, g 是自旋极化 P 和 $\cos(\theta)$ 的函数, M 是自由层的磁化密度, e 是电子的电荷, 以及 t 是自由层的厚度。最后两项是从垂直极化器 (m_P) 和平面内磁性基准层 (m_R) 的自旋转移。 β (贝塔) 表示这两个转矩的幅值的比值。

[0057] 分析该等式表明比值 β (贝塔) 在控制磁化动态方面是重要的。较大的 β (大于 1) 将产生电流脉冲幅值的一个范围, 在该范围内, 对于一种电流极性, 该切换是直接从 P 到 AP , 而对于另一种电流极性, 该切换是直接从 AP 到 P 。对于较高的电流幅值, 该切换是旋进的 (从 AP 到 P 再到 AP 的转换并继续, 如图 2 中实验所示)。因此, 在这种情况下, 切换是双极性的, 对两种电流极性发生。装置阻抗约为 $2 - 4k\Omega$, 如图 7 (a) - 7 (c) 所示。

[0058] 对于小 β (小于或者约等于 1 的 β), 在其中发生直接切换的电流脉冲幅值的范围减小。小 β 的运动变成旋进的 (从 AP 到 P 再到 AP 的转换并继续, 如图 2 中实验所示, 如图 2 中的实验所示)。当磁化运动是旋进时, 较高电流幅值通常导致较高的旋进频率。

[0059] 极化器的存在 (在所有上述情况下) 缩短了设定位基元状态所需的时间 (请参见图 6 (a) - 6 (f)), 改善了装置性能、既缩短切换时间又降低切换所需电流 (或者电压) 幅值。根据上面的等式 (2) 描述的模型计算切换动态表明在 OST-MRAM 堆栈中能够发现的特征类型。在平面内各向异性场 (沿着 x) 为 $0.05T$ 、阻尼 ($\alpha = 0.01$)、磁化密度为 $\mu M_s = 0.5T$ 以及基准层在 $+x$ 方向上磁化的情况下, 对薄膜纳米磁体确定性能。

[0060] 例子 3

[0061] 在某些实施例中,在可靠写中,脉冲持续时间不重要。在这种情况下,对于存储器操作,优选地,脉冲持续时间不是关键变量,即,精确脉冲持续时间不会确定位基元最终状态;仅脉冲极性,即,正极性或者负极性,是重要的。在这种情况下,该装置设置有约等于或者大于 1 的 β 。这可以以许多方式实现:

[0062] 通过选择用于磁性隧道结和基准层的材料能够提高来自基准层的自旋极化。例如,与 MgO 接触的 CoFeB 具有大的自旋极化。与 MgO 接触的坡莫合金(NiFe)具有较低的自旋极化。

[0063] 能够降低来自极化层的自旋极化。例如,这可以以许多方式实现,而不受限制:

[0064] a. 选择极化层的组成材料:Co/Ni 多层具有大自旋极化。然而,Co/Pd 或者 Co/Pt 具有非常低的自旋极化。复合极化层能够具有可调极化。例如,Co/Ni 的厚度可以改变(从约 0.5 到 5nm)的 Co/Pd 或者 Co/Pt 上 Co/Ni 的多层是用于控制来自极化层的电流自旋极化的装置,其中 Co/Ni 是很接近自由磁性层的层。还应当将具有自旋轨道耦合的诸如 Pt 或者 Pd 的薄层布置于靠近自由磁性层的极化层的表面上。这还可以用于降低电流自旋极化。

[0065] b. 作为一种选择,能够改变极化器与自由层之间的非磁性层,以控制来自极化层的载流子(carrier)的自旋极化(并因此控制参数 β)。如果该层具有短自旋扩散长度,则极化被降低。在 Cu 中包含缺陷能够降低其自旋极化(例如,Cu 中的 Ni 或者其他元素)。该 Cu 还可以是具有诸如 Zn 或者 Ge 的另一种元素的合金。有许多可能的材料组合能够降低来自极化层的自旋极化。

[0066] 为了快速低能量切换,优选地不将 β 升高到远大于 10,因为来自垂直极化器的转矩设定切换时间并因此设定切换装置所需要的能量(如上所述)。

[0067] 对于最快速的写操作: β 优选地不小于 1,并且脉冲定时需要是个非常好地控制的变量。切换是双极性的,并且对于装置写操作,仅需要单极性电压源,这样潜在地简化了驱动电路。

[0068] 分析如上所述的模型(请参见例 1 部分的第 2 段)还表明用于切换的阈值电压和电流能够通过许多方式降低。首先,可以降低自由层磁化密度或者自由层厚度。然而,这还预期降低位基元稳定性。因此,不能使磁化密度或者自由层厚度任意小。其次,自由层可以具有垂直磁性各向异性的分量。该各向异性不足以本身自行使磁化重新定向到垂直于层面,但是仍然能够有效降低切换电流和电压。在与 MgO 接触的薄(0.5 至 3nm 厚)CoFeB 层中看到这种垂直各向异性。切换速度和自由层旋进频率取决于自由层垂直各向异性。较大的垂直各向异性导致较低频率的旋进,降低了切换速度。第三,为了减小切换电流和电压,可以降低自由层的阻尼参数。可以利用这种方式以及其他方式降低切换电压和电流阈值。

[0069] 为了说明和描述,上面描述了本发明的实施例。不是穷举地说明,也无意使本发明局限于所公开的具体型式,并且根据上述教导的修改和变型是可能的,也可以根据本发明的实践获得修改和变型。为了解释本发明的原理及其实际应用选择并且描述实施例,以使本技术领域内的技术人员能够在各种实施例中应用本发明,并且进行各种修改,并且适应预期的特定应用。

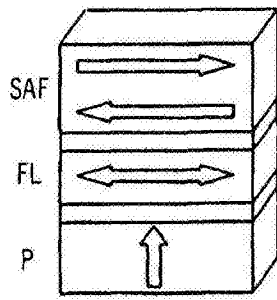


图 1(a)

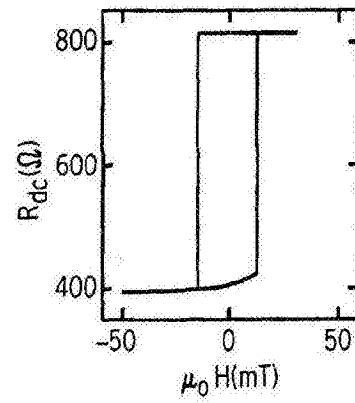


图 1(b)

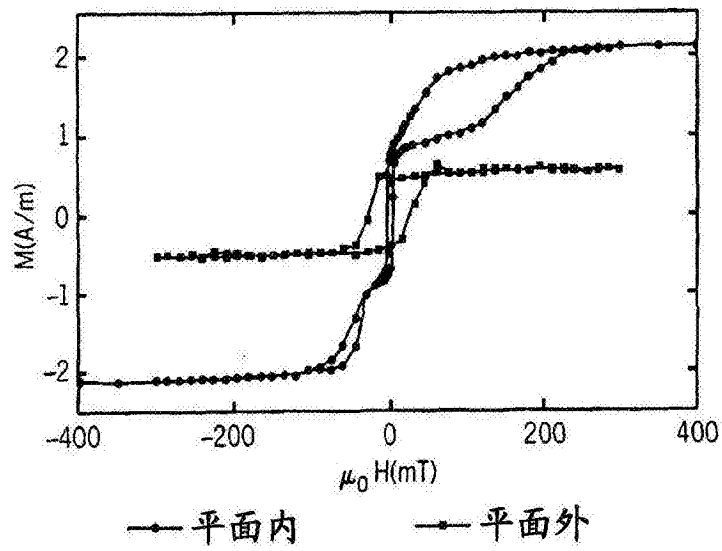


图 1(c)

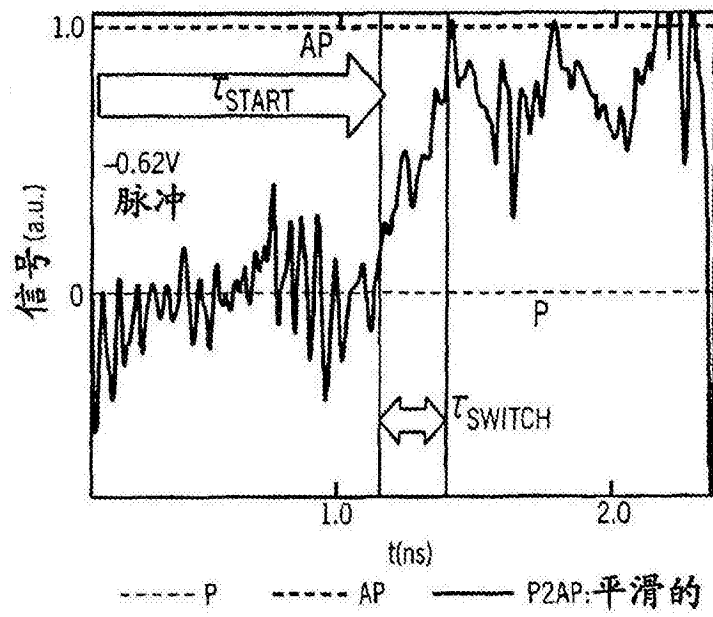


图 2

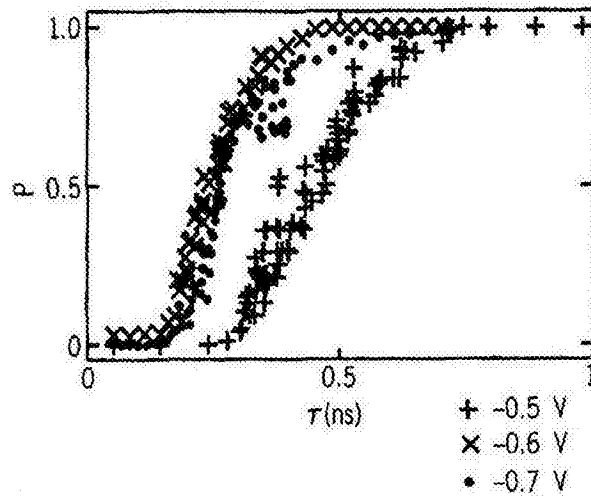


图 3

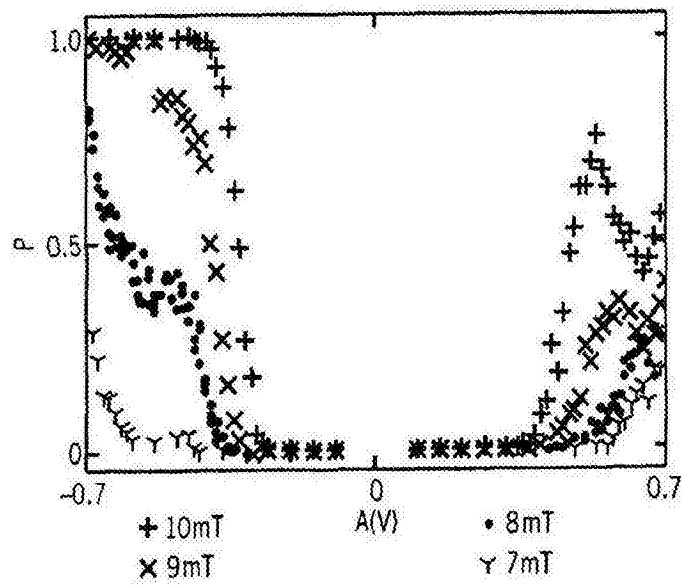


图 4(a)

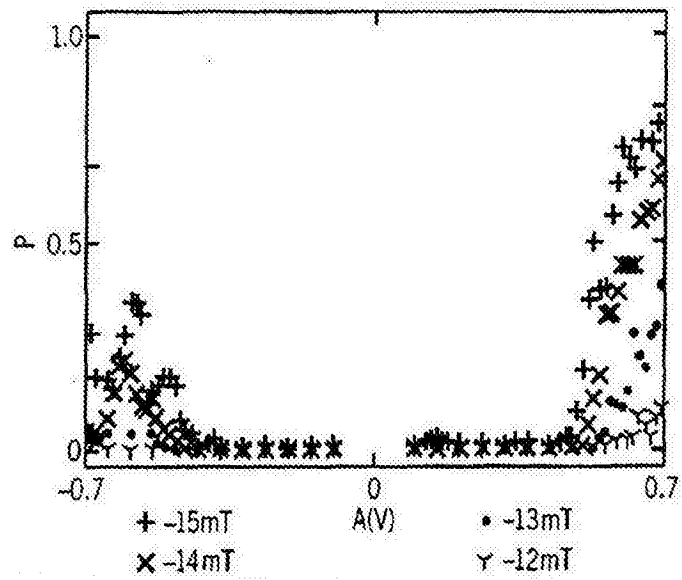


图 4(b)

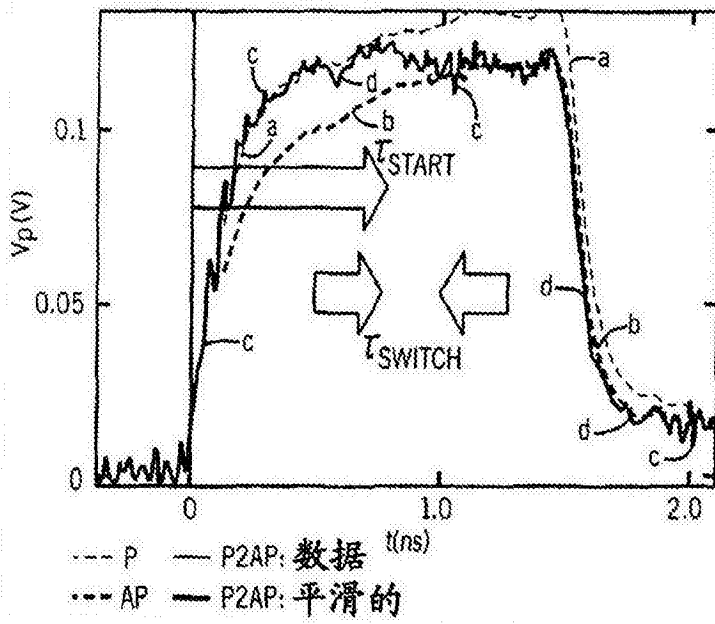


图 5

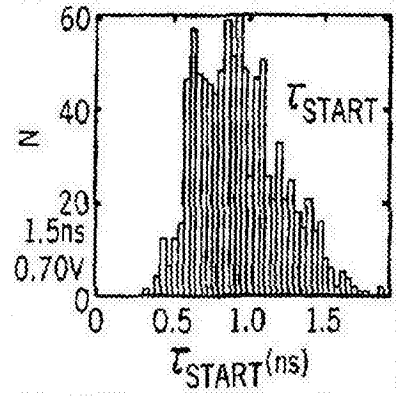


图 6(a)

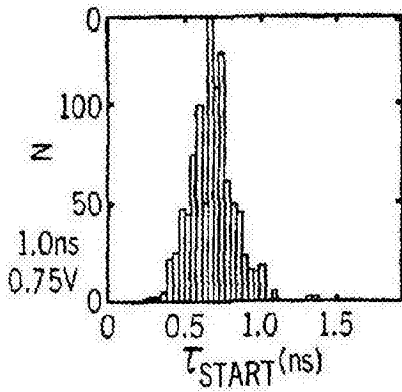


图 6(b)

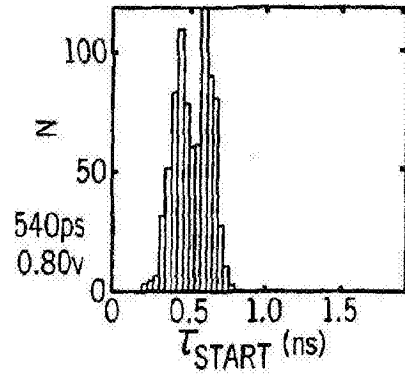


图 6(c)

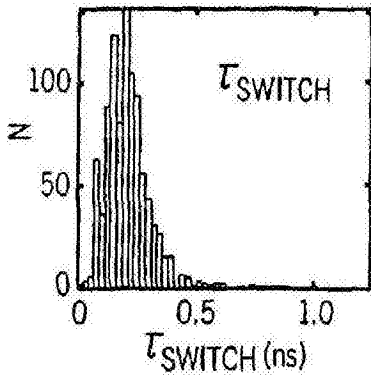


图 6(d)

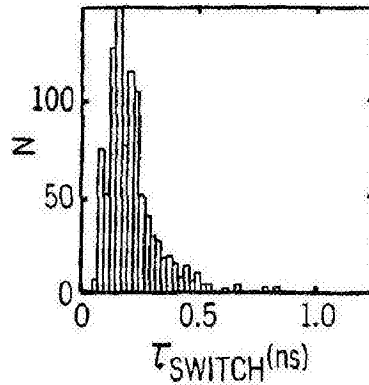


图 6(e)

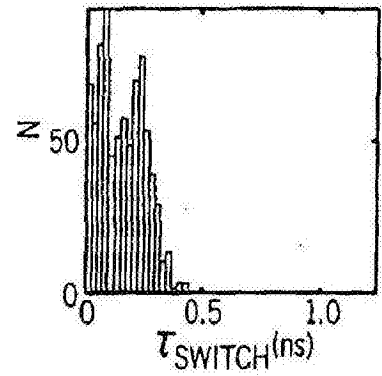


图 6(f)

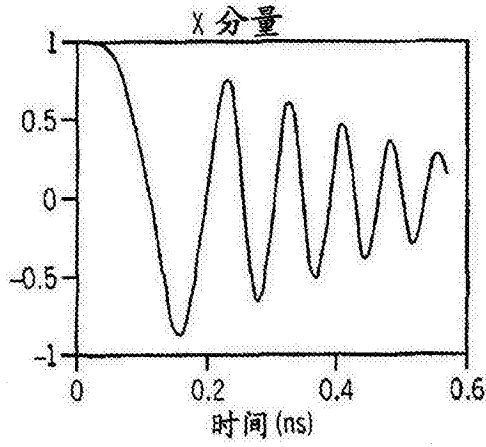


图 8(a)

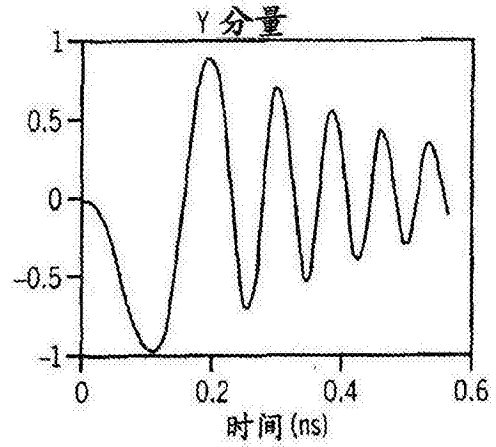


图 8(b)

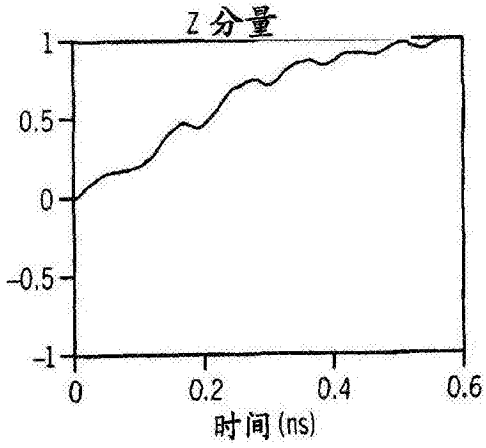


图 8(c)

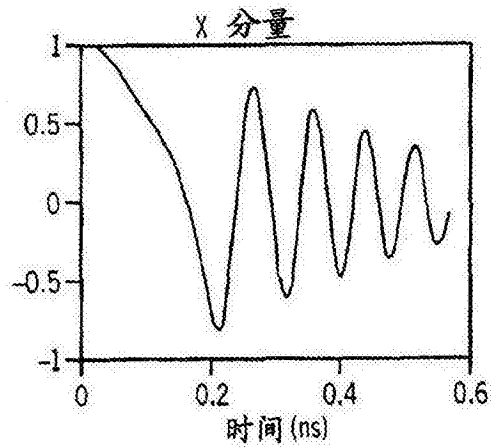


图 9(a)

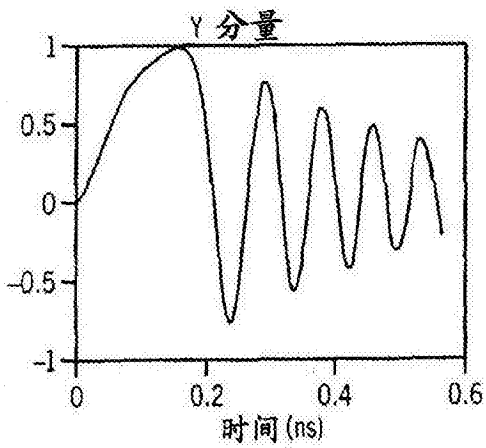


图 9(b)

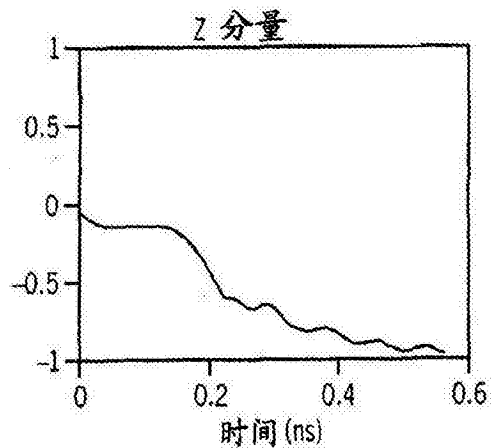


图 9(c)

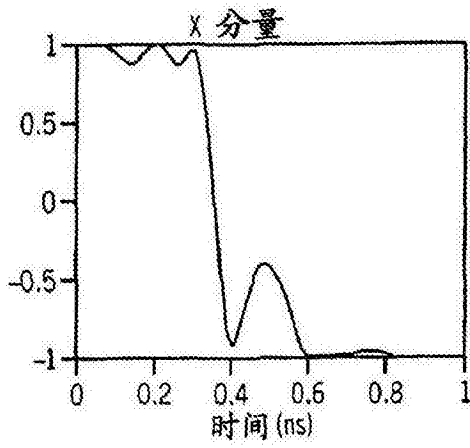


图 10(a)

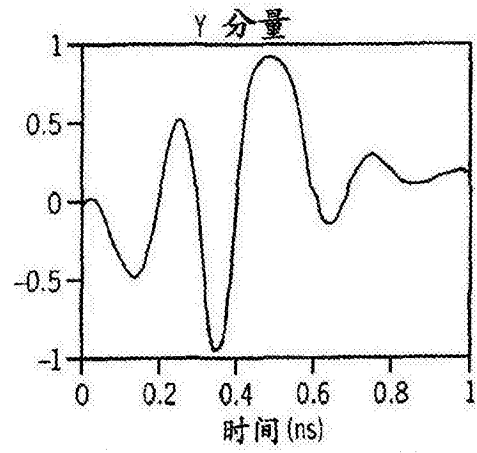


图 10(b)

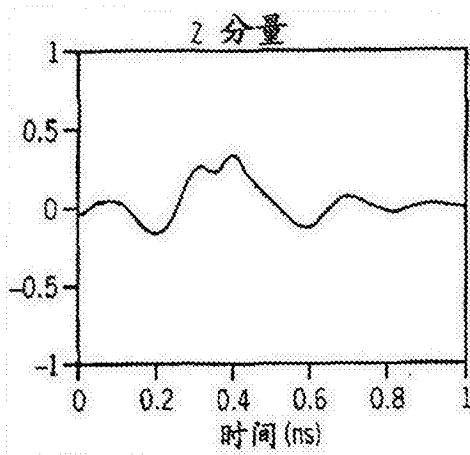


图 10(c)

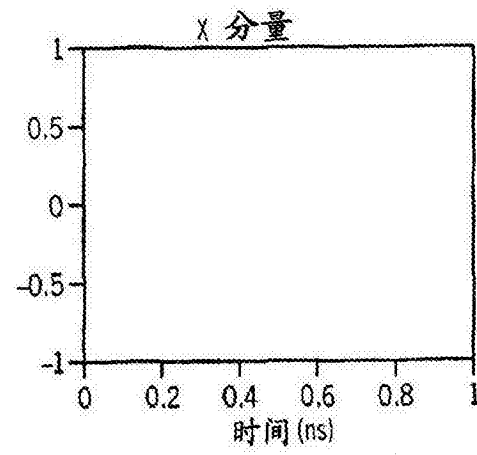


图 11(a)

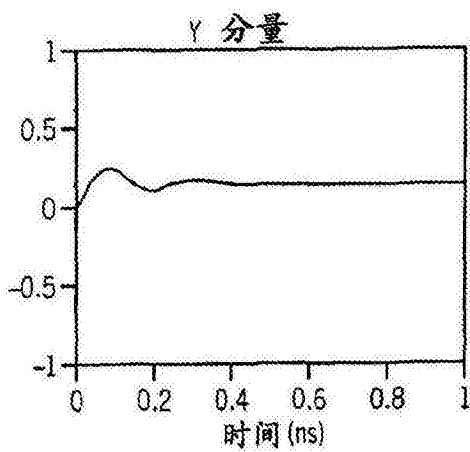


图 11(b)

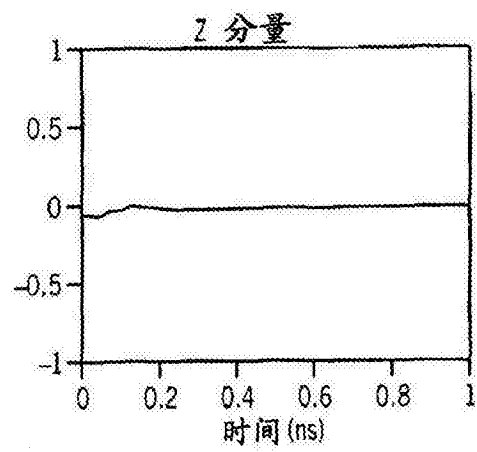


图 11(c)

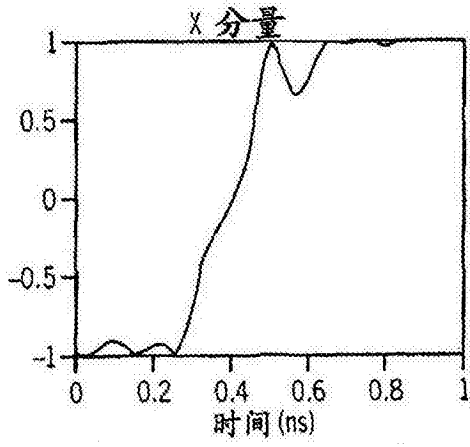


图 12(a)

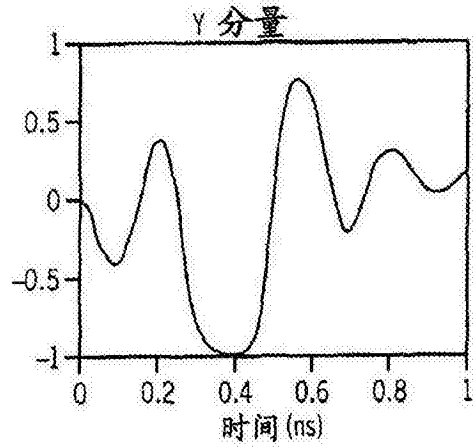


图 12(b)

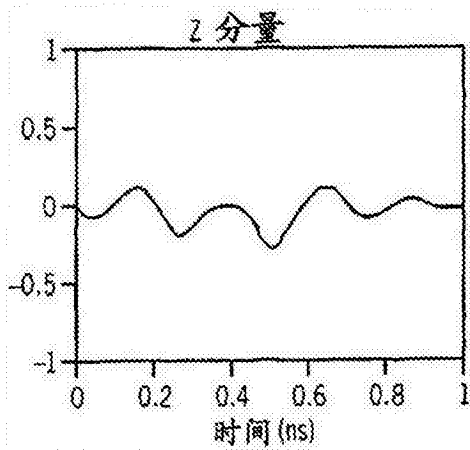


图 12(c)

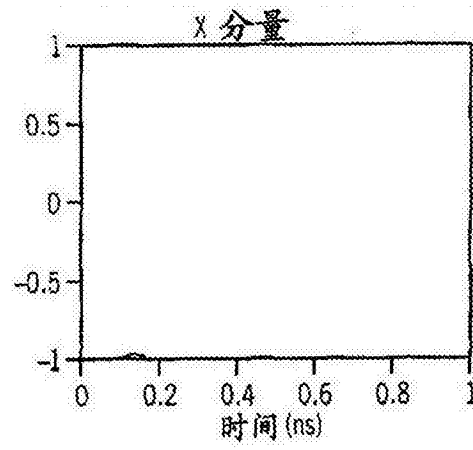


图 13(a)

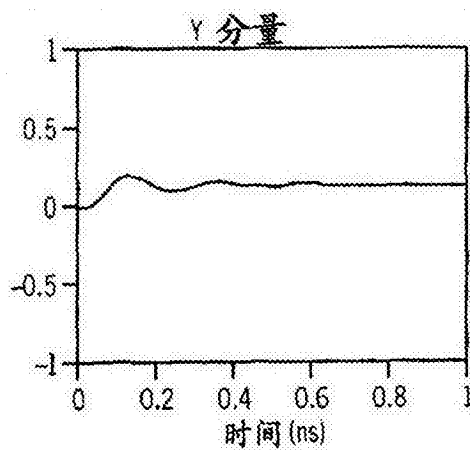


图 13(b)

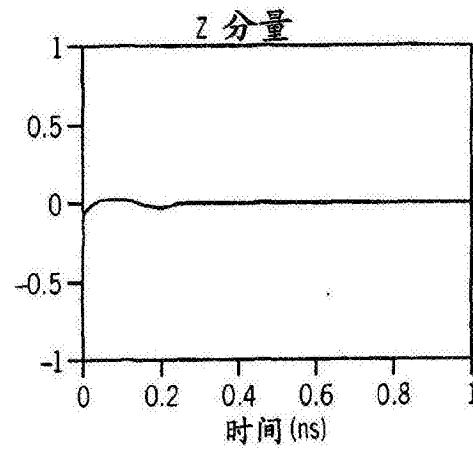


图 13(c)