



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101345079 B

(45) 授权公告日 2012. 09. 05

(21) 申请号 200810128787. 4

(22) 申请日 2008. 03. 19

(30) 优先权数据

07112497. 8 2007. 07. 13 EP

(73) 专利权人 株式会社日立制作所

地址 日本东京

专利权人 巴黎第十一大学

国家科研中心

(72) 发明人 J·旺德利奇 C·查普特

T·琼格沃斯 J·泽门

B·加拉格尔 T·德沃尔德

(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 秦晨

(51) Int. Cl.

G11C 11/16(2006. 01)

H01F 13/00(2006. 01)

H01L 27/22(2006. 01)

H01L 43/08(2006. 01)

(56) 对比文件

EP 1705665 A1, 2006. 09. 27, 权利要求 1 — 3、说明书第 25 — 90 段、附图 2, 5, 15.

EP 1705665 A1, 2006. 09. 27, 权利要求 1 — 3、说明书第 25 — 90 段、附图 2, 5, 15.

CN 1855531 A, 2006. 11. 01, 全文.

US 2005106810 A1, 2005. 05. 19, 说明书第 25 — 36, 附图 2, 36.

US 2006118842 A1, 2006. 06. 08, 全文.

EP 1548702 A1, 2006. 06. 29, 全文.

US 6483741 B1, 2002. 11. 19, 全文.

JP 2005123488 A, 2005. 05. 12, 全文.

US 20060133137 A1, 2006. 06. 22, 说明书第 47 — 89 段.

审查员 徐波

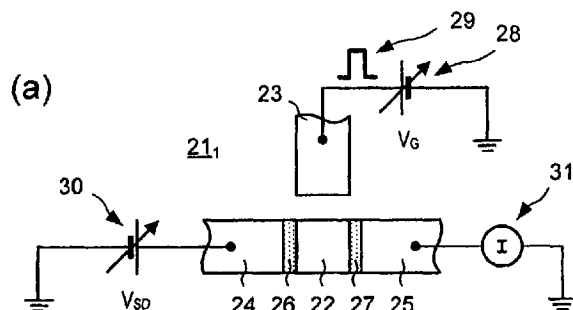
权利要求书 2 页 说明书 18 页 附图 18 页

(54) 发明名称

磁电阻器件

(57) 摘要

一种操作磁电阻器件的方法, 一种设备以及一种磁电阻器件。所述器件包括: 铁磁区, 被配置为表现磁各向异性以及使得其磁化能够在至少第一和第二方向之间进行转变, 以及电容性连接到该铁磁区的栅。所述方法包括向铁磁区施加电场脉冲, 从而使得磁各向异性的方向发生变化, 以便在第一和第二方向之间转变磁化。



1. 一种操作磁电阻器件的方法,该器件包括:铁磁区,被配置为表现磁各向异性以及使得其磁化能够在至少第一和第二方向之间进行转变;以及栅,其中所述栅仅通过对所述铁磁区的电容性耦合引起磁各向异性的方向的变化,该方法包括:

使用所述栅向所述铁磁区施加电场脉冲,从而改变所述铁磁区中的电荷载流子分布并且由此引起磁各向异性的方向发生变化,以便在第一和第二方向之间转变磁化,其中电场脉冲持续时间为 t ,该持续时间是 $t_{precess}$ 的四分之一的倍数, $t_{precess}$ 为:

$$t_{precess} = \frac{1}{\frac{\gamma}{2\pi} B_A}$$

其中 γ 是回转磁常数, $\gamma = g\mu_B/\hbar$ ($2.2 \times 10^{15} \text{mA}^{-1}\text{s}^{-1}$),且 B_A 是铁磁半导体的磁各向异性场,从而电场脉冲触发第一和第二方向之间的磁化的进动转变。

2. 根据权利要求 1 的方法,包括:

专门地向铁磁区施加电场脉冲,从而使得铁磁区的磁化在第一和第二方向之间转变。

3. 根据权利要求 1 的方法,包括:

配置铁磁区的磁化以在第一和第二方向之间进行转变而不施加磁场脉冲。

4. 根据权利要求 1 的方法,其中该器件进一步包括相邻于铁磁区延伸的用于产生磁场脉冲的导电路径,该方法进一步包括:

向铁磁区施加磁场脉冲,同时施加电场脉冲以增强有效的磁场方向的变化,该有效的磁场包括各向异性场以及施加的磁场,从而在第一和第二方向之间转变磁化。

5. 根据权利要求 4 的方法,包括:

在施加磁场脉冲的前沿之前施加电场脉冲的前沿。

6. 根据权利要求 1 的方法,其中该器件进一步包括另一个铁磁区,其具有比所述铁磁区更高的矫顽力,并且通过隧道势垒层与所述铁磁区隔开,该方法包括:

向所述另一个铁磁区施加电场脉冲,其中电场脉冲持续时间为 t ,该持续时间是 $t_{precess}$ 的四分之一的倍数, $t_{precess}$ 为:

$$t_{precess} = \frac{1}{\frac{\gamma}{2\pi} B_A}$$

其中 γ 是回转磁常数, $\gamma = g\mu_B/\hbar$ ($2.2 \times 10^{15} \text{mA}^{-1}\text{s}^{-1}$),且 B_A 是铁磁半导体的磁各向异性场,以及

同时地或当磁化仍然经历进动时,施加通过所述铁磁区和所述另一个铁磁区的自旋转移电流脉冲和/或磁场脉冲从而在第一和第二方向之间转变磁化。

7. 根据权利要求 6 的方法,包括:

在施加自旋转移电流脉冲和/或磁场脉冲的前沿之前施加电场脉冲的前沿。

8. 根据权利要求 1 的方法,其中所述铁磁区包括具有非均匀应变分布的铁磁半导体,并且该方法包括:

施加具有足够幅度的电场脉冲以相对于所述非均匀应变分布改变电荷载流子的分布。

9. 根据权利要求 8 的方法,其中所述非均匀应变分布包括压应变区和张应变区。

10. 根据权利要求 1-9 中任一项的方法,其中所述电场脉冲具有在 0 和 5ns 之间的持续时间 t 。

11. 根据权利要求 1 的方法,进一步包括:

独立于施加电场脉冲,向所述铁磁区施加磁场,从而帮助所述铁磁区在第一和第二方向之间的磁化转变。

12. 一种设备,包括:

磁电阻器件,包括铁磁区,其被配置为表现磁各向异性以及使得其磁化能够在至少第一和第二方向之间进行转变;以及

电路,被配置为根据前述权利要求中的任一项来操作该器件。

磁电阻器件

技术领域

[0001] 本发明涉及一种磁电阻器件。

背景技术

[0002] 磁随机存取存储器 (MRAM) 具有一些优于其它类型的非易失性存储器 (例如闪存) 的优点。例如, MRAM 通常耗费较少的功率并且能更快地读写数据。MRAM 同样可望替代一些类型的易失性存储器, 例如动态随机存取存储器 (DRAM)。

[0003] 传统的 MRAM 单元典型地包括磁电阻元件, 其具有由非磁性层隔开的一对铁磁层。其中一个铁磁层具有相对低的矫顽性, 而另一个具有相对高的矫顽性。该低矫顽性层和高矫顽性层通常分别被称作“自由”层和“受钉扎”层。

[0004] 为了在单元里存储数据, 施加调整自由层的磁化方向的外部磁场。在该磁场被移去后, 磁化的方向被保留。

[0005] 为了从单元里读出数据, 通过元件驱动电流。如果各层的磁化反平行 (AP) 地设置, 那么元件的磁电阻相对较高, 而如果各层的磁化平行 (P) 地设置, 那么元件的磁电阻相对较低。因此, 单元的状态能够通过测量元件的磁电阻来确定。

[0006] 通过使电流流经靠近元件延伸的至少一根导线而产生外部磁场。然而, 这样的布置产生了问题, 即单元的尺寸减小了, 转变 (switch) 自由层所需的磁场增加了并且功率消耗也增加了。

[0007] 施加外部磁场的一种替代方式是使用自旋转移转变 (spin transfer switching), 如 J. C. Slonczewski 在“Current-driven Excitation of Magnetic Multilayers”, p. 9353, Phys. Rev. B, vol. 54 (1996) 中所提出的那样, 并且参考 W. C. Jeong 等人的“Highly scalable MRAM using field assisted current induced switching”, p. 184, 2005 Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers。

[0008] 在自旋转移转变中, 通过和层界面垂直的磁性元件驱动电流。这使得通过流经受钉扎层的电子 (当电流从自由层被驱动到受钉扎层时), 或者通过从受钉扎层分散的电子 (当电流从受钉扎层被驱动到自由层时), 自旋极化的电子被注入到自由层中。当自旋极化的电子被注入自由层中时, 它们和自由层相互作用并且将它们的一部分自旋角动量传递给自由层的磁矩。如果自旋极化的电流足够大, 那么这将导致自由层的磁化发生转变。

[0009] 然而, 自旋转移转变的一个缺点是需要高电流密度 (例如 10^8 Acm^{-2} 数量级) 以触发反转处理。

[0010] 在施加转变电流脉冲之前, 通过施加直流预充电流可以减少电流, 如 T. Devolder 等人在“Precharging strategy to accelerate spin-transfer switching below the nanosecond”, Applied Physics Letters, volume 86, p. 062505 (2005) 中所描述的那样。尽管转变电流脉冲的功率消耗减少了, 但是总的功率消耗 (即包括预充电流的功率消耗) 仍然相当大。

[0011] 然而, 通过紧接在施加转变电流脉冲之前或在施加转变电流脉冲的同时, 沿着自

由层的难磁化轴 (magnetic hard axis) 施加一短的 (例如 < 5ns) 的外部磁场脉冲, 可以减少电流, 从而产生进动转变 (precessional switching), 如 K. Ito 等人在 “Micromagnetic simulation of spin transfer torque switching combined with precessional motion from a hard axis magnetic field”, Applied Physics Letters, vol. 89, p. 252509 (2006) 中所描述的那样。

[0012] 尽管这种技术能够显著地减少自旋传递电流, 但它包括通过使电流流经导线来施加一个外部磁场。这限制了电位的可量测性以及减少功率消耗。

发明内容

[0013] 本发明寻求改进这个问题。

[0014] 根据本发明的第一方面, 提供了一种操作磁电阻器件的方法, 该器件包括: 铁磁区, 被配置为表现磁各向异性以及使得其磁化能够在至少第一和第二方向之间进行转变; 以及电容性耦合到该铁磁区的栅, 该方法包括: 向铁磁区施加电场脉冲, 从而使得磁各向异性的方向发生变化, 以便在第一和第二方向之间转变磁化。因此, 比起具有用于产生磁场脉冲的导线的器件来, 帮助进动的磁化转变能够使用较少的功率来触发。

[0015] 该方法可以包括专门地向铁磁区施加电场脉冲, 从而使得铁磁区的磁化在第一和第二方向之间转变。该方法可以包括配置铁磁区的磁化以在第一和第二方向之间进行转变而不施加磁场脉冲。仅仅使用电场脉冲以使得铁磁区的磁化在第一和第二方向之间转变或者不使用磁场脉冲来帮助转变有助于最小化功率消耗。

[0016] 该器件可以进一步包括相邻于铁磁区延伸的用于产生磁场脉冲的导电路径, 该方法进一步包括: 向铁磁区施加磁场脉冲, 同时施加电场脉冲以增强有效的磁场方向的变化, 该有效的磁场包括在电场脉冲和所施加的磁场脉冲期间的各向异性场, 从而在第一和第二方向之间转变磁化。该方法可以包括在施加磁场脉冲的前沿之前施加电场脉冲的前沿。

[0017] 该器件可以进一步包括另一个铁磁区, 其具有比铁磁层更高的矫顽力并且通过隧道势垒层从铁磁层隔开, 该方法进一步包括: 当施加电场脉冲时, 施加流经铁磁区的自旋转移电流脉冲, 从而在第一和第二方向之间转变磁化。

[0018] 该方法可以进一步包括在施加自旋转移电流脉冲的前沿之前施加电场脉冲的前沿。铁磁区可以包括具有非均匀应变分布的铁磁半导体, 并且该方法包括: 施加具有足够大小的电场脉冲以相对于非均匀应变分布改变电荷载流子 (carrier) 的分布。

[0019] 该非均匀应变分布包括压应变区域以及张应变区域。铁磁半导体可以包括 (Ga, Mn)As。

[0020] 该方法可以包括施加持续时间为 t 的电场脉冲, 持续时间是 t_{precess} 的四分之一的倍数, t_{precess} 为:

$$[0021] \quad t_{\text{precess}} = 1/f_{\text{precess}} = \frac{1}{\frac{\gamma}{2\pi} B_A}$$

[0022] 其中 γ 是回转磁常数, $\gamma = g\mu_B/\hbar$ ($2.2 \times 10^{15} \text{ mA}^{-1} \text{ s}^{-1}$), 以及 B_A 是铁磁半导体的各向异性磁场。该方法可以包括施加具有在 0 和 5ns 之间的持续时间 t 的脉冲。

[0023] 该方法可以进一步包括独立于施加电场脉冲, 向铁磁区施加磁场, 从而帮助铁磁区在第一和第二方向之间的磁化转变。

[0024] 该方法可以包括向铁磁区施加应力,并且当施加应力时,施加电场脉冲。

[0025] 根据本发明的第二方面,提供了操作磁电阻器件的方法,该器件包括铁磁区,其被配置为表现磁各向异性以及使得其磁化能够在至少第一和第二方向之间进行转变,该方法包括:向铁磁区施加应力脉冲,从而导致磁各向异性的方向发生变化以便在第一和第二方向之间转变磁化。因此,与具有用于产生磁场脉冲的导线的器件相比,进动的或帮助进动的磁化转变能够使用较少的功率触发。

[0026] 该器件可以包括机械耦合到铁磁区的压电区,并且其中施加应力脉冲包括在压电区上施加电压脉冲。

[0027] 该方法可以包括向铁磁区施加电场脉冲,同时向铁磁区施加应力脉冲。

[0028] 根据本发明的第三方面,提供了包括磁电阻器件的设备,该磁电阻器件包括铁磁区,其被配置为表现磁各向异性以及使得其磁化能够在至少第一和第二方向之间进行转变;该设备还包括电路,被配置为根据所述方法操作该器件。

[0029] 根据本发明的第四方面,提供了一种磁电阻器件,该磁电阻器件包括铁磁区,被配置为表现磁各向异性以及使得其磁化能够在至少第一和第二方向之间进行转变;响应于第一电子输入向铁磁区施加应力的部件;以及响应于第二电子输入向铁磁区施加电场的部件。

[0030] 施加应力的部件可以包括耦合到铁磁区的压电区,并且施加电场的部件可以包括至少一个栅电极。

附图说明

[0031] 现在将参考附图,通过示例来描述本发明的实施例,在附图中:

[0032] 图 1 示出了根据本发明,施加电场脉冲给铁磁元件以使得磁各向异性的方向改变并且转变磁化;

[0033] 图 2(a) 是其中由于光刻导致的应变松弛而使得磁各向异性的方向发生改变的器件以及没有应变改变的范德堡器件的扫描电子显微照片;

[0034] 图 2(b) 是图 2(a) 所示的器件的放大图;

[0035] 图 2(c) 是由其制造图 2(a) 所示的器件和范德堡器件的层结构的剖面图;

[0036] 图 3(a) 示出了在具有固定磁场大小 ($B = 4T$) (角度从 $[110]$ 轴测得) 的旋转磁场中,图 2(a) 中所示出的器件的 $[1\bar{1}0]$ 朝向臂和 $[110]$ 朝向臂在 $4.2^\circ K$ 的纵向的各向异性磁电阻图;

[0037] 图 3(b) 示出了在具有固定磁场大小 ($B = 4T$) (角度从 $[110]$ 轴测得) 的旋转磁场中,图 2(a) 中所示的器件以及图 2(a) 中所示出的范德堡器件的 $[1\bar{1}0]$ 和 $[110]$ 臂在 $4.2^\circ K$ 的横向的磁电阻图;

[0038] 图 3(c) 示出了与图 2(a) 中所示的器件相类似但是在不同角度的变化的磁场中具有更宽的和更长的通道的器件的 $[110]$ 朝向臂在 $4.2^\circ K$ 的纵向的各向异性磁电阻图;

[0039] 图 3(d) 示出了在固定角度变化磁场中,图 2(a) 中所示的器件的 $[110]$ 朝向臂在 $4.2^\circ K$ 的纵向的各向异性磁电阻图;

[0040] 图 4(a) 示出了图 2(a) 中所示的范德堡器件在 $4.2^\circ K$ 的横向阻抗测量图;

[0041] 图 4(b) 示出了图 2(a) 中所示的器件在 $4.2^\circ K$ 的横向阻抗测量图;

- [0042] 图 5(a) 示出了图 2(a) 中所示的器件的横截面沿 [001] 轴应变的数字模拟值的二维图；
- [0043] 图 5(b) 示出了图 2(a) 中所示的器件的横截面沿 [110] 轴应变的数字模拟值图；
- [0044] 图 5(c) 示出了图 2(a) 所示的器件通过 [001] 平面一个不同的切口的应变的模拟值图；
- [0045] 图 5(d) 示出了图 2(a) 所示的器件通过 [110] 平面一个不同的切口的应变模拟值图；
- [0046] 图 6(a) 示出了与图 2(a) 所示的器件类似的器件的以及图 2(a) 所示的器件的 [110] 和 $[1\bar{1}0]$ 朝向臂的易轴方向；
- [0047] 图 6(b) 示出了在不同的应变下以及沿着不同的方向, 作为平面内磁化角度函数的理论磁晶能量值图；
- [0048] 图 7 示出了在压应变下, 对于两个不同的载流子浓度, 在 [001] 方向 GaAs 上生长的 $\text{Ga}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{As}$ 的磁晶能量剖面轮廓；
- [0049] 图 8(a), 8(b) 和 8(c) 是根据本发明的第一, 第二和第三器件的示意图, 其中铁磁元件中的磁各向异性的方向可以变化；
- [0050] 图 9 是图 8(a) 所示的第一器件的透视图；
- [0051] 图 10(a) 是图 9(a) 所示器件的相对于栅极电压以及平面内平行于电流的磁场的通道电导图；
- [0052] 图 10(b) 示出了图 9 所示的器件的库仑阻塞振荡；
- [0053] 图 10(c) 示出了图 9 所示的器件的相对于栅极电压的临界重定向磁场的图；
- [0054] 图 11(a) 是图 8(b) 所示的第二器件的平面图；
- [0055] 图 11(b) 是图 8(b) 所示的第二器件沿着线 A-A' 的横截面图；
- [0056] 图 12 示出了图 8(a) 和 8(b) 所示的器件的读写周期；
- [0057] 图 13(a), 13(b) 和 13(c) 示出了在不同阶段图 8(a) 所示的第一器件的制造；
- [0058] 图 14(a) 是图 8(c) 所示的第三器件的透视图；
- [0059] 图 14(b) 是第三器件沿着线 B-B' 的横截面图；
- [0060] 图 15 示出了图 8(c) 所示的器件的读写周期；
- [0061] 图 16(a) 是根据本发明的另一器件的平面图, 其中铁磁元件中的磁各向异性的方向可以变化；
- [0062] 图 16(b) 是图 16(a) 所示的器件沿着线 C-C' 的纵向横截面图；
- [0063] 图 16(c) 是图 16(a) 所示的器件沿着线 D-D' 的横向横截面图；
- [0064] 图 17 示出了用于制造图 15 所示的器件的层结构；
- [0065] 图 18 是图 16(a) 所示器件的修改版本的横向横截面视图；
- [0066] 图 19(a) 示意性地示出了对于铁磁半导体的变化的载流子分布；
- [0067] 图 19(b) 示出了磁各向异性的重定向；
- [0068] 图 20(a) 是根据本发明的第四器件的平面图, 其中在铁磁元件中的磁各向异性的方向可以变化；
- [0069] 图 20(b) 是图 20(a) 所示的器件沿着线 E-E' 的横截面图；
- [0070] 图 21(a) 是根据本发明的第五器件的平面图, 其中在铁磁元件中的磁各向异性的

方向可以变化；

[0071] 图 21(b) 是图 21(a) 所示的器件沿着线 F-F' 的横截面图；

[0072] 图 22 示出了图 21(a) 示出的器件的读写周期；

[0073] 图 23 示出了具有 6 个剩余磁化方向的铁磁元件；

[0074] 图 24 示出了根据本发明在图 23 所示的剩余磁化方向之间进行转变；以及

[0075] 图 25(a) 和图 25(b) 示出了根据本发明将电场脉冲施加给图 23 所示的铁磁元件以使得磁各向异性的方向发生改变以及转变磁化。

具体实施方式

[0076] 电场脉冲导致的磁化反转

[0077] 参照图 1, 示出了根据本发明的磁电阻器件的铁磁元件 1。铁磁元件 1 被假定为具有均质分布的磁化, 尽管不需要必定是这样。

[0078] 铁磁元件 1 表示出了定义易磁化轴 2 的磁各向异性。磁各向异性可能由于元件和 / 或晶体结构的形状等而产生。例如, 元件 1 可以是细长的, 因此易磁化轴 2 可以沿纵轴取向。

[0079] 元件 1 的磁化 3 沿着易磁化轴 2 取向。

[0080] 外部磁场 5 可被选择性地施加以支持进动转变, 并且依赖于方向, 以稳定磁化 3 的重定向。例如, 外部磁场 5 可以被全面施加给铁磁元件的一个阵列 (铁磁元件 1 是其中一个)。例如使用永磁铁, 外部磁场 5 可以沿着难轴固定以促进或帮助进动转变。

[0081] 如图 1 所示, 外部磁场 5 反平行于沿易轴 2 的初始磁化取向, 以稳定磁化 3 的重定向。然而, 外部磁场 5 不必要沿着易轴 2 取向, 并且可以以其它角度定向, 包括对于图 1 示出的配置被设置为与易轴 2 垂直的难轴。外部磁场 5 可以是可变的, 并且可以通过使电流通过导电轨 (conductive track) (未示出) 来产生。

[0082] 各向异性磁场和可选的外部磁场 5 导致了有效磁场 6, 即:

$$[0083] \quad \vec{B}_{eff} = \vec{B}_A + \vec{B}_{ext} \quad (1)$$

[0084] 其中 \vec{B}_{eff} 是对磁化 3 起作用的有效磁场 6, \vec{B}_A 是各向异性场以及 \vec{B}_{ext} 是外部磁场 5 (用向量符号表示)。

[0085] 如将要被解释的, 电场脉冲 7 可以被施加, 例如垂直于层的平面, 以暂时改变在铁磁元件 1 中的磁各向异性并触发磁化 3 的进动重定向。

[0086] 在电场脉冲 7 被施加之前, 换句话说, 在 $t < 0$ 且 $V = V_0$ (例如 $V_0 = 0$) 时, 其中 t 是时间, V 是施加给栅 (未示出) 的偏压, 磁化 3 (由 \vec{M} 表示) 以有效磁场 6 的方向 (这里指定为和正 x 轴方向平行) 定向。在一些实施例中, 一个以上的栅 (未示出) 可以使用。

[0087] 然后施加电场脉冲 7, 其使得磁各向异性发生变化, 由此使磁化 3 被旋转并且开始绕着修正的有效场进动 (processing)。

[0088] 因此, 在脉冲 7 的开始, 即在 $t = 0$ 和 $V = V_0$ 时, 各向异性场 2 变化使得有效磁场 6 旋转, 即, $\vec{B}_{eff}^+(V_0) \rightarrow \vec{B}_{eff}^-(V_c)$, 并且磁化 3 开始绕着有效磁场 6 的轴, 即绕着 $\vec{B}_{eff}^-(V_c)$ 的衰减进动。

[0089] 一旦磁化 3 进行了半进动,那么电场 7 可以被关掉。然后磁化 3 开始沿着易轴 2 而稳定(反平行)。

[0090] 因此,在脉冲 7 的结尾,当 $t = \Delta t_{180^\circ}$ 并且 $V = V_c$ 时,各向异性场和有效磁场 6 获得了负的 x 分量,如图 1c 所示。

[0091] 在脉冲 7 结束后不久,当 $t = \Delta t_{180^\circ} + \delta$ (其中 $\delta > 0$) 并且 $V_c = V_0$ 时,各向异性场 2 反转并且和它的初始方向,即 $\vec{B}_{eff}(V_c) \rightarrow \vec{B}_{eff}(V_0)$ 反平行地取向(平行于 -x 方向),并且磁化 3 继续绕着有效磁场 6 的轴,即绕着 $\vec{B}_{eff}(V_0)$ 的衰减进动。

[0092] 当 $t \gg \Delta t_{180^\circ}$ 并且 $V_c = V_0$ 时,磁化 3 达到平衡并且沿着有效磁场取向,其是平行的(-x)方向,即, $\vec{B}_{eff}(V_0)$ 。

[0093] 磁化反转可以通过考虑磁化 3 的方向决定的能量来理解。例如,对于 V_0 ,沿着 x 轴的易轴 2 对应于通过势垒分开的两个能量最小量。如果磁化 3 沿着难轴取向,则势垒的高度对应于能量的增加。

[0094] 磁化反转,即将磁化以 180° 重定向,能够被用于隧道效应磁电阻(TMR)器件,巨磁电阻(GMR)器件以及其它类似类型的读取器件,其中在转变层和固定参照层之间的相对方向确定器件的阻抗。

[0095] 如果栅极电压脉冲 7 导致了新的易轴,其从初始的易轴 4 旋转超过 45° 并且一直到 90° ,那么磁化反转可以在不使用辅助的磁场的情况下实现。

[0096] 这可以在高载流子密度的 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ 中得到实现(例如,当 $x > 0.03$),例如通过在元件 1 中从它处于张应变状态、磁各向异性被定向于和层的平面垂直的位置,到它处于压应变状态、磁各向异性定向于层的平面中的位置进行空间地变化应变。易轴的旋转也能通过改变在应变配置中的载流子密度来实现。

[0097] 在低掺杂 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ 中,其中 $x < 0.02$,磁各向异性的变化可以表示为相反的形式。例如,在元件压应变的位置,磁各向异性可以被定向为垂直于平面,并且在元件为张应变的位置,磁各向异性被定向在平面中。

[0098] 依赖于系统的特定的磁各向异性,完全的磁化反转不是必需的,换句话说,磁化不需要以 180° 重定向。如果对于较长的脉冲长度(例如,半进动脉冲)易轴旋转小于或等于 22.5° 的角,或者对于较短的脉冲长度(例如四分之一进动脉冲)以高达 90° 的更大的角进行旋转,例如 90° 的磁化重定向可以在表示出立方磁各向异性的元件中实现。这种情况将会发生,例如我们在具有非常小的应变变化的 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ 中所看到的那样,该应变变化由 $\sim 0.01\%$ 量级的晶格常数的变化产生。在这种情况下,各向异性磁电阻效应,例如,各向异性磁电阻(AMR),隧道效应各向异性磁电阻(TAMR)或者库仑阻塞各向异性磁电阻(CBAMR)也能被用于读出磁化方向。

[0099] 对于(Ga, Mn)As 器件里的磁晶各向异性的局部控制

[0100] 图 2(a) 和 2(b) 示出了器件 8,其中使用由光刻限定的沟槽 9 所产生的应变松弛来调整和控制磁晶各向异性。磁晶各向异性由自旋轨道耦合导致。

[0101] 为了帮助表征器件 8 中的块体 GaMnAs 的磁各向异性和应变松弛效应,在邻近器件 8 的晶片 11 中限定范德堡器件 10。

[0102] 器件 8 为霍耳条的形式,具有通道 11,其在平面视图里是“L”形的,并且包括沿着

[110] 和 $[1\bar{1}0]$ 方向正交取向的第一和第二臂 $11_1, 11_2$ 。该臂具有 $1\mu\text{m}$ 的（横向）宽度 w 以及 $20\mu\text{m}$ 的（纵向）长度 l 。

[0103] 特别参照图 2(c)，器件 8 在具有层结构 12 的晶片 10 中形成，该层结构包括 $\text{Ga}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{As}$ 外延生长层 13（或者“外延层”），其具有在 GaAs 衬底 14 上沿着 [001] 晶轴生长的 25nm 厚度。通道 11 使用电子束光刻和反应离子束蚀刻来确定。沟槽 9 具有 200nm 的（横向）宽度 w 以及 70nm 的深度 d 。

[0104] 参照图 3(a) 至图 3(d)，示出了具有和器件 8 相同配置的另一个器件（未示出）的电子特性和器件 8 的电子特性。该另一器件（未示出）与器件 8 在霍耳条的尺寸上不同。在该另一器件（未示出）中，臂（未示出）为 $4\mu\text{m}$ 宽和 $80\mu\text{m}$ 长。在图 2(a) 和图 2(b) 示出的器件 8 中，臂 $11_1, 11_2$ 为 $1\mu\text{m}$ 宽和 $20\mu\text{m}$ 长。

[0105] 这些器件 8 示出了平面内的磁晶各向异性并且具有大约为 50mT 的饱和磁化强度 M_s 。这是由于应变松弛效应产生的，而不是由于形状各向异性产生的。例如，器件 8 的形状各向异性场小于 1mT ，其是低于磁晶各向异性场的大小的一个量级。因此，易轴不是被形状各向异性所限定的，而是磁晶各向异性限定的。

[0106] 使用反常霍耳数据的 Arrot 图估计 100°K 的居里温度 (T_c)。从高场霍耳测量中，估计 $5 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 的空穴密度。在这种掺杂中，在 GaAs 衬底 15 上生长的 $\text{Ga}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{As}$ 外延层 13 中的压应变产生了强磁晶各向异性，其促使磁化向量和磁外延层 13 的平面平行取向。

[0107] 在单独的微条 (microbar) 器件 8 中的磁化方向通过测量平面内的旋转磁场（未示出）的各向异性磁电阻 (AMR) 的纵向和横向分量来进行局部监视。

[0108] 图 3(a) 和 3(b) 示出了饱和磁场的磁化旋转图，其示出了平面内的 AMR 近似于下面的形式：

[0109]

$$\Delta\rho_L = A\cos(2\varphi) \quad (2a)$$

[0110]

$$\Delta\rho_T = A\sin(2\varphi) \quad (2b)$$

[0111] 其中 ρ_L 是纵向阻抗系数， ρ_T 是横向阻抗系数， A 是常数（不仅仅针对于每一个霍耳条，也针对范德堡器件 10），并且 φ 是磁化和电流之间的角度。

[0112] $\Delta\rho_{L,T} = \rho_{L,T} - \overline{\rho_{L,T}}$ ，其中 $\overline{\rho_{L,T}}$ 是所有角度的平均值。

[0113] 图 3(c) 和图 3(d) 示出了外部磁场扫描的磁电阻图，其中从 $[1\bar{1}0]$ 轴测量的场角 θ 是常数。

[0114] 如图所示，磁电阻强烈依赖于 θ 的值并且是磁化旋转的结果。在较高的场，磁电阻变成纯粹的各向同性，即，不同角度 θ 的阻抗之间的差异独立于外部的场的大小。这个属性以及和低的场各向异性磁电阻相比小得多的各向同性磁电阻的大小，使得在图 3a 和 3b 所示的高的场测量被用于确定低场阻抗的变化和磁化方向的变化之间的一一对应关系。如果两个阻抗分量同时被测量，图 3a 和 3b 示出的在纵向和横向 AMR 轨道之间的 45° 相位偏移可以被用于确定磁化角的变化。

[0115] 固定的 θ 磁电阻测量能被首先用于确定在单独微条中的局部磁各向异性。对应于易轴方向的 θ 的值具有最小的磁电阻。对于不对应易轴方向的 θ 的值，磁化在较低的场经历（部分地）持续的旋转，导致不同的方向，并且因此导致在磁饱和和剩磁时的不同的

被测阻抗。使用这项技术,易轴方向能被确定在 $\pm 1^\circ$ 以内。

[0116] 在图 4(a) 和 4(b) 中示出对磁各向异性引入应变的空间变化的效果。

[0117] 在使用范得堡器件 10(图 2a) 测量的块体材料 (bulk material) 中,磁化角 30° 对应于易轴,而 7° 和 55° 显著地难一些。然而,在图 2a 所示的器件 8 中, 7° 是在 $[1\bar{1}0]$ 条中的易轴而 55° 是在 $[110]$ 条上的易轴。

[0118] 表 1 在下面列出了在标记为“A”的另一个器件(未示出)、标记为“B”的器件 8 以及在块体材料,即范德堡器件 10 中找到的易轴:

[0119] 表 1

[0120]

样本	块体	A $[1\bar{1}0]$	A $[110]$	B $[1\bar{1}0]$	A $[110]$
易轴角度	$\pm 30^\circ$	$\pm 15^\circ$	$\pm 36^\circ$	$+7^\circ, -8^\circ$	$+55^\circ, -63^\circ$

[0121] 块体材料具有由下层的锌结构产生的立方各向异性,加上由作为 (Ga, Mn)As 外延层 13 产生的附加的单轴 $[1\bar{1}0]$ 各向异性。这导致从 $[100]$ 和 $[010]$ 立方棱边朝向 $[1\bar{1}0]$ 方向倾斜 15° 的两个易轴。

[0122] 在微器件中,即另一个器件(未示出)和器件 8,易轴从块体材料占有的角度朝向 $11_1, 11_2$ 臂进行内部旋转。当臂 $11_1, 11_2$ 的宽度减少时,旋转程度增加。

[0123] 在磁晶各向异性中的局部变化可以通过下面的方式来理解。

[0124] 再次参照图 2(a),生长在 GaAs 衬底 15 上的 $\text{Ga}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{As}$ 外延层 13 在 (001) 平面内压应变,具有应变参数的典型值:

$$[0125] \quad f \equiv \frac{(\alpha_{\text{GaMnAs}} - \alpha_{\text{GaAs}})}{\alpha_{\text{GaAs}}} \quad (3)$$

[0126] 其中 α_{GaAs} 和 α_{GaMnAs} 分别是完全松弛的 GaAs 以及 (Ga, Mn)As 的立方体的晶格参数。使用上面的公式 (3) 以及 α_{GaAs} 和 α_{GaMnAs} 的值, $f \approx 0.2-0.3$ 。

[0127] 随着 (Ga, Mn)As 材料沿着条 11 在沟槽 9 中被去除,晶格能在横向方向松弛并且相应的延长可以被粗略地估计为 $ft/w \sim 0.01$,其中 t 为 (Ga, Mn)As 膜的厚度,在这种情况下为 25nm,以及 w 为条宽。

[0128] 在定量水平上,在微条中的晶格松弛的强度能够使用用于实际样本几何学的数值弹性理论模拟来获得。对于包括 $\text{Ga}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{As}$ 外延层 13 的整个晶片,考虑弹性常数的 GaAs 值。

[0129] 参照图 5,示出了器件 11(图 2(a)) 的 $[1-10]$ 条 11_2 的晶格松弛强度的数值模拟。

[0130] 图 5(a) 示出了沿着生长方向 $[001]$ 轴的相对于整个松弛的立方 GaAs 的晶格参数的应变分量,即:

$$[0131] \quad e_{[001]} \equiv (a_{[001]} - a_{\text{GaAs}}) / a_{\text{GaAs}} \quad (4)$$

[0132] 由于应变分量对于 f 线性比例缩放,因而 $e_{[001]}/f$ 能被绘出。

[0133] 图 5(a) 至图 5(d) 示出了生长导致的晶格匹配应变。因为 (Ga, Mn)As 晶格的平面内压缩,因此弹性介质通过在生长方向扩展晶格参数而作出反应,和 α_{GaAs} 相比,即 $e_{[001]}/f > 1$ 。

[0134] 在外延层 13 的平面内,晶格能够仅仅在垂直于微条方向的方向上松弛。再次关于 GaAs 而计算出的相应的应变分量,在图 5(b) 中对于器件 11 的整个横截面绘出,在图 5(c) 和 5(d) 中,沿着通过 [001]-[110] 平面的不同的横截面绘出。而在条的中心,平面内松弛相对较弱,即,晶格参数保持类似于 GaAs 衬底 15,晶格在靠近条 11 的边缘强烈地松弛。在 (Ga,Mn)As 条的整个横截面进行平均,发现相对的平面内的晶格松弛为百分之几百,即与通过 ft/w 表达式估计的相同的量级。下面描述的微观磁晶能量计算确定这些表面上的小晶格畸变能够说明被观察到的在强自旋轨道耦合 (Ga, Mn)As 中的易轴旋转。

[0135] 依赖于整个能量的磁化角度的微观计算,基于将 GaAs 晶核价带 (host valence band) 的六带 $k \cdot p$ 描述和耦合到局部 $Mn_{Ga}d^5$ 力矩的动力学交换模型结合起来。该理论非常适用于对在价带顶部中的自旋轨道耦合现象的描述,如在常见的 GaAs 晶核 (host) 中的那样,通过 As 子晶格的 p - 轨道,支配价带的谱组成以及相关的对称性。 $k \cdot p$ 模型也提供了直接的手段来说明在 (Ga, Mn)As 带结构上的晶格应变的效应。在上面的宏观模拟中,我们假定在 (Ga, Mn)As 中的弹性常数具有和在 GaAs 中的相同的值。这个理论,其没有使用可调整的自由参数,解释了所观察到的在生长于压和张应变下的类似 (Ga, Mn)As 外延层中的平面内和平面外易磁化方向的变化,并且提供了相应的 AMR 效应的符号和大小的一致性的计算。

[0136] 对于微条的磁晶能量模型,可以假定对应于在宏观模拟中获得的 $e_{[001]}$ 平均值的 (Ga, Mn)As 层中的均一应变。微观计算的输入参数值是和完全松弛的立方 (Ga, Mn)As 晶格相关的应变分量,在 [100]-[010]-[001] (x - y - z) 坐标系统中,其通过下式被给出:

$$[0137] \quad e_{ij} = \begin{pmatrix} e_{xx} & e_{xy} & 0 \\ e_{yx} & e_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & e_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{[110]}/2 - f & \pm e_{[110]}/2 & 0 \\ \pm e_{[110]}/2 & e_{[110]}/2 - f & 0 \\ 0 & 0 & e_{[001]}/2 - f \end{pmatrix} \quad (5)$$

[0138] 其中 \pm 分别相应于 $[1\bar{1}0]$ 条和 $[110]$ 条。

[0139] 图 6(a) 示出了其它“L”形器件 15 和 L' 形器件 8 的 $[1\bar{1}0]$ 和 $[110]$ 条中的易轴方向。箭头 16 表示图案导致的晶格松弛的方向和强度。

[0140] 在图 6(b) 中,计算出的磁晶能量作为平面内磁化角的一个函数被绘出,其中 $f = 0.3$, e_{xy} 的范围从 0 (没有平面内晶格松弛) 到对于 $[1\bar{1}0]$ 条 ($e_{xy} > 0$) 和 $[110]$ 条 ($e_{xy} < 0$) 的预期的典型值。特别地,对于零剪切应变 (黑线),对于与沿着 $[110]$ 轴的晶格延伸对应的 $e_{xy} = 0.004, \dots, 0.02\%$, 以及对于与沿着 $[1\bar{1}0]$ 轴的晶格延伸对应的 $e_{xy} = -0.004, \dots, -0.02\%$, 能量被绘制成平面内磁化角度的函数。易磁化轴位于 $e_{xy} = 0, 0.02\%$ 和 -0.02% 。破坏微观磁晶能量轮廓的 $[1\bar{1}0]$ - $[110]$ 对称性的晶格变形,通过沿着 $[110]$ 条 $[110]$ 轴 (底部菱形) 以及沿着 $[110]$ 条 $[110]$ 轴 (右部菱形) 延伸的菱形的单位晶胞示出。

[0141] 与实验一致, $e_{xy} = 0$ 的在 $[100]$ 和 $[010]$ 的最小值,对于沿着 $[110]$ 方向的晶格扩展 ($e_{xy} > 0$), 朝 $[1\bar{1}0]$ 方向移动, 并且对于沿着 $[1\bar{1}0]$ 方向的晶格扩展 ($e_{xy} < 0$), 朝 $[110]$ 方向移动。在两个条中的实验的易轴旋转之间的不对称性归因于 $[110]$ 单轴分量已经存在于块体材料中,其微观起源未知,但是能通过固有的 (不是由微图案形成导致的) 应变 $e_{xy}^{bulk} \sim +0.01\%$ 来建模。

[0142] 刚刚描述的器件使用通过对条纹的微图案形成而导致的共有的应变松弛,该条纹

来自具有平面内磁各向异性、并在压应变下生长的 GaMnAs。另一方面,从张应变的具有垂直磁各向异性的 GaMnAs 形成图案的配线,通过减少它们的晶格常数进行松弛。在这种情况下,和张应变的 GaMnAs 块体层相比,形成微图形减弱了垂直的磁各向异性。

[0143] 铁磁金属还展示了对于局部应变的磁晶各向异性的灵敏依赖性。平衡晶格的任何畸变都改变了局部各向异性。在超薄膜中,应变通过在表面上的生长导致。因此,和 GaMnAs 类似,在 GaAs [001] 衬底上外延生长的钴 (Co) 或者铁 (Fe) 的超薄层表现了块体的立方磁各向异性以及源于界面的单轴贡献。

[0144] 由于电荷载流子密度变化而引起的磁各向异性

[0145] 图 7 示出了对于 $8 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 的第一载流子密度 p , 以及 $6 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 的第二载流子密度 p , 在 $e_0 = -0.2\%$ 的压应变下, 沿着 $[1\bar{1}0]$ 的晶格变形 (扩展) $e_{xy} = -0.02\%$, 生长在 GaAs [001] 上的横向应变的 $\text{Ga}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{As}$ 的磁晶能量的轮廓图。第一和第二箭头 17, 18 分别表示了第一和第二载流子密度的易轴方向。

[0146] 如在图 7 中所示, 载流子密度的变化产生应变的 GaMnAs 的磁各向异性的变化。尽管改变在高掺杂的 ($\sim 10^{20}-10^{21} \text{cm}^{-3}$) 块体半导体中的载流子密度可能因为较短的屏蔽长度而难以实现, 但是显著的载流子密度的变化可以在充分地 (电学地) 隔离的纳米结构中实现。

[0147] 与上面那些在图 6(b) 中所示的相类似的理论计算表示了载流子密度上的磁各向异性的灵敏的依赖性。如图 7 所示, 在载流子浓度上 $\sim 25\%$ 的减少, 从 $\sim [1\bar{1}0]$ 至 $[110]$ 的结晶方向改变了易轴大约 90° 。

[0148] 现在将描述本发明的进一步的实施例, 其实现了电场导致的磁各向异性的变化。其包括在应变的铁磁半导体中改变电荷载流子密度, 在不均一应变的铁磁半导体系统中偏移最大载流子浓度的中心, 以及通过给铁磁层附加压电层或者通过采用铁磁材料自身的 (例如可能在 GaMnAs (其具有和传统掺杂 GaAs 类似的压电特性) 中的) 压电特性来改变铁磁层中的应变。

[0149] 进一步的磁电阻器件

[0150] 现在将描述根据本发明的磁电阻器件的进一步的实施例。

[0151] 首先, 将描述磁电阻器件, 其中电场脉冲的施加导致在铁磁区中的电荷载流子密度的变化, 其接着导致了磁各向异性的变化, 这使得磁化开始进动。

[0152] 参照图 8(a) 和 8(b), 示出了第一和第二磁电阻器件 $21_1, 21_2$ 。第二器件 21_2 是第一器件 21_1 的变型。

[0153] 每一个器件 $21_1, 21_2$ 包括在应变下的铁磁区 22 (这里也称作铁磁“岛”)。在这些例子中, 铁磁区 22 包括铁磁半导体, 例如 (Ga, Mn)As。然而, 也可以使用不同的铁磁半导体。

[0154] 通过使用电容性耦合到铁磁区 22 的栅 23 施加短电场脉冲可以改变或者有助于改变铁磁区 22 的磁化方向。施加电场脉冲导致了在铁磁区 22 中的电荷载流子密度的变化, 其接着导致了磁各向异性的变化, 这使得磁化开始进动。铁磁区 22 可以足够的小, 使得其表现在一个给定的操作温度例如 4.2°K 下的充电效应。例如, 铁磁区 22 可以具有 1 或 10nm 的量级的尺寸 (层厚度和横向直径)。然而, 铁磁区 22 可以更大一点, 例如具有 100nm, $1 \mu \text{m}$ 或更高量级的尺寸。

[0155] 铁磁岛 22 布置于第一和第二引线 24, 25 之间, 并且通过相应的隧道势垒 26、27 弱

耦合到引线 24, 25。在一些实施例中, 可以存在超过一个的铁磁材料的岛, 例如排列成链。

[0156] 使用向栅 23 施加电压脉冲 29 的脉冲产生器 28 来触发磁化的重定向。

[0157] 定向的方向能通过不同的方式来测量。

[0158] 例如, 在第一器件 21_1 中, 磁化方向可以通过使用电压源 30 和电流检测器 31 测量隧道各向异性电阻 (TAMR) 来确定。如果第一和 / 或第二引线 24、25 是铁磁的, 那么磁化方向能够通过使用电压源 30 和电流检测器 31 测量隧道磁电阻 (TMR) 来确定。在任一情形中, 测量包括施加电压以驱动电流并测量电流。

[0159] 在第二器件 21_2 中, 磁化方向能够通过使用电压源 30 和电流检测器 31 测量 TMR 来确定。然而, 在第一引线 24 和第三引线 32 之间施加偏压并且在第一引线 24 和第三引线 32 之间测量电流, 该第三引线连接到受钉扎的铁磁区 33, 该铁磁区 33 通过隧道势垒 34 与铁磁岛 22 分离。将认识到可以使用不同的测量配置。

[0160] 参照图 9, 更详细地示出了第一器件 21_1 。

[0161] 第一器件 21_1 具有伸长的导电通道 36, 栅 23 配置在通道 36 侧, 即具有侧栅配置形式。通道 36 和侧栅 23 通过沟槽分离形成在 (Ga, Mn)As 的图案层 37 中。AlAs 的层 38 将通道 36 和侧栅 23 与 GaAs 衬底 39 电隔离。通道 36 包括布置在更宽的部分之间的窄缩 (constriction) 40, 所述更宽的部分提供引线 24、25 向窄缩 40。

[0162] (Ga, Mn)As 层 37 包括 2% 的 Mn, 即, $\text{Ga}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{As}$, 尽管因为表面氧化而导致有效厚度可以大约为 3nm, 但其具有 5nm 的厚度,。窄缩 40 有 30nm 宽以及 30nm 长。通道 36 有 $2\mu\text{m}$ 宽。通道 36 和栅 23 分开大约 30nm。

[0163] 在窄缩 40 的区域中, 因为无序而产生的潜在的波动产生了至少一个导电岛 22 以及至少一对隧道势垒 26、27, 该隧道势垒将岛 22 弱耦合到引线 24, 25 和 / 或邻近的岛 22。

[0164] 参照图 10(a) 至 10(c), 将描述第一器件 22_1 的特性。

[0165] 图 10(a) 是道电导相对于栅电压和平面内平行于电流的磁场的灰度级图。虚线 41 强调临界的重定向场 B_c , 其依赖于栅偏压。该临界重定向场 B_c 从 $V_g = -1\text{V}$ 时的大约 40mT 减少到 $V_g = +1\text{V}$ 时的少于 20mT。

[0166] 假定一个盘形的岛 22, 使用充电能量的实验获取值能够评估大约 10nm 的有效盘直径。因此, 大约 40 个锰的受体出现在岛 22 上。如果对应于载流子密度大约 40% 的减少 V_g 从 -1V 变化到 +1V, 则观察到大约 16 个库仑 (Coulomb) 振荡。临界重定向场 B_c 从 $V_g = -1\text{V}$ 时的大约 50mT 下降到 $V_g = +1\text{V}$ 时的少于 20mT。

[0167] 图 10(b) 是库仑阻塞振荡图, 其中 $B_0 = 0$ 时, 岛 22 保持磁化 M_0 ; 以及在 $B_0 = -100\text{mT}$, 岛 22 在 $V_g = -1$ 和 1V 的栅电压范围内保持饱和磁化 M_1 。在中间场 $B_0 = -35\text{mT}$ 的电导测量显示了在大约 -0.5V 的临界栅电压下从 M_0 到 M_1 的转变。

[0168] 图 10(c) 是示出临界重定向场 B_c 在 $V_g = -1\text{V}$ 和 $V_g = +1\text{V}$ 之间相对于栅偏压 V_g 的依赖性的图。其表示幅值 $V_g \geq 2.5\text{V}$ 的栅电压脉冲能够在 $B_0 = 0$ 时触发磁场转变。能认识到, 如果使用不同的器件结构和 / 或材料, 那么类似的图可以获得并且用于求出触发磁场转变所需的偏压。

[0169] 如图 11(a) 和 11(b) 所示的, 第二器件 21_2 是第一器件 21_1 的变型。

[0170] 器件 21_2 可以如下形成: 在 (Ga, Mn)As 层 (未示出) 之前的 GaAs 衬底 39 上生长 AlAs 层 38', 对 (Ga, Mn)As 形成图案以形成包括受钉扎层 32 和单块形式的第三电极 33 的

下层的电极结构 42,接着在已形成图案的衬底上生长另一层 AlAs 43 和另一层 (Ga,Mn)As,并且对另一层 (Ga,Mn)As 形成图案以形成通道 37' 和栅 23。

[0171] 位于上面的电极结构可以代替下层的电极结构而被使用。例如,形成电极的 AlAs 层和 (Ga,Mn)As 层可以在通道和栅已经形成并且形成图案以形成包括受钉扎层和第三电极的电极结构之后再进行生长。可替代的,薄的栅电介质,例如 Si_xN_y , 以及铁磁材料,例如 Co 可以被淀积并使用剥离或干法刻蚀来形成图案。

[0172] 参照图 12,示出了第一和第二器件 21_1 和 21_2 的读写周期。

[0173] 如将要在随后以更详细地解释的那样,器件 $21_1, 21_2$ 能够表现出 4 种状态 M_1, M_2, M_3, M_4 。然而,器件 $21_1, 21_2$ 能够表现出更少的状态,例如仅仅是反平行的两种状态,或者是更多的状态,例如通过利用平面内双轴各向异性以及垂直单轴各向异性的 6 个状态。此外,即使器件 $21_1, 21_2$ 能够表现例如 4 种状态 M_1, M_2, M_3, M_4 ,但是仍然依赖于例如源极和 / 或漏区域是否是铁磁的,所有的状态是否能分辨,或者可替代的,一些状态是否是不能分辨的。

[0174] 在下面,两种类型的写脉冲将被描述,其造成了铁磁岛 22 的磁化 44,对于一种类型的脉冲(所谓的“ t_{180} ”脉冲),用于在两种状态间转变,而另一种类型的脉冲(所谓的“ t_{90} ”脉冲),用于在四个状态中的两个“相邻的”状态间进行转变。

[0175] 注意,图 12 所示的磁化 44 的图没有表示磁化能量,但是仅仅表示了不同的状态。在一些实施例中,它们可以表示 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 的角度相关性。

[0176] 在下面,所谓的“来回切换(toggle)”转变被描述,由此反复地施加“ t_{180} ”脉冲 29 使得磁化 44 在两个状态之间“来回切换”,例如表示“0”和“1”的 M_1 和 M_3 。然而,“ t_{90} ”脉冲 29 反复地使得磁化 45 累渐地(progressively)从一个状态“旋转”到一个相邻的状态。

[0177] 为了将数据写到器件 $21_1, 21_2$,例如,通过在“0”和“1”状态之间进行转变或者反之,电压脉冲 29 被施加给栅 23。

[0178] 脉冲 29 具有持续时间 t_{180} ,其是进动周期 t_{precess} 的一半。进动周期 t_{precess} 通过下式给出:

$$[0179] \quad t_{\text{precess}} = 1/f_{\text{precess}} = \frac{1}{\frac{\gamma}{2\pi} B_A}$$

[0180] 其中 γ 是回转磁常数, $\gamma = g\mu_B/\hbar$ ($2.2 \times 10^{15} \text{ mA}^{-1} \text{ s}^{-1}$), B_A 是各向异性磁场并且可以包括例如在样本、晶粒、畴壁或其它类型的边界由磁化的散度所产生的去磁场,并且导致形状各向异性。在这个例子中, t_{precess} 大约 1ns。 t_{precess} 的值可以典型地处于 100ps 到 10ns (对于 100mT 到 1mT 的 B_a) 的范围。

[0181] 电压脉冲的大小 $|V_G|$ 具有 1 或 10V 的量级。

[0182] 如先前所解释的,能够施加外部磁场以帮助稳定磁化或促进进动。该外部磁场可以通过永磁铁(未示出)或者通过导电导轨(未示出)来提供,并且优选地具有和各向异性场相同量级但是更小的量级,例如 1 至 100mT 的量级。

[0183] 在一些实施例中,通过将磁化 44 定向在特定的方向,外部磁场和 / 或自旋转移转矩电流可以被用于写特定的状态(与在状态之间的来回切换相对)。在这里,这被称为“直接写”。

[0184] 在磁电阻器件受钉扎和自由铁磁层被绝缘层分隔的实施例中,通过施加电场脉冲以及同时或随后施加自旋转移转矩(STT)电流脉冲,可以实现磁化的重定向。对于“随后”,

我们是说在一定时间周期之内,即在电场脉冲施加之后,磁化仍然进行着进动并且还没有衰减。典型地,该时间周期在 0 和 5ns 之间。

[0185] 为了从器件 21_1 、 21_2 读出数据,偏压脉冲 45 施加在器件 21_1 、 21_2 的源极 24 和漏极 25 之间并且测量电流 31_i 。电流的大小依赖于器件的隧道各向异性磁电阻 (TAMR) 和 / 或隧道磁电阻 (TMR),而其又依赖于铁磁区 22 的表示为“0”和“1”状态的磁化 44 的方向。

[0186] 如先前所解释的,通过测量例如 AMR, TAMR 以及 CBAMR 的各向异性的磁电阻效应,或者通过测量在引线 32 和基准(例如地)之间的由沿着垂直平面的易磁化轴的各状态的反常霍尔效应引起的横向霍尔电压,两个以上状态的方向可以被确定。

[0187] 参照图 13a、13b 和 13c,第一器件 21_1 的制造将被描述。

[0188] 参照图 13a,通过低温分子束外延 (LT-MBE),并参见 R. P. Campion, K. W. Edmonds, L. X. Zhao, K. Y. Wang, C. T. Foxon, B. L. Gallagher 以及 C. R. Staddon 的“High-quality GaMnAs films grown with arsenic dimers”, Journal of Crystal Growth, 第 247 卷,第 42 页 (2003),器件 21_1 在 GaAs 衬底 39 上的 AlAs 38 缓冲层上从沿着 [001] 晶轴生长的超薄 (5nm) 的 $\text{Ga}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{As}$ 外延层 37 制造。

[0189] 因为 GaMnAs 层对于在光学光刻中使用的碱性显影剂的高反应性,霍尔条 14 使用电子束光刻来定义,该电子束光刻使用聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 抗蚀剂,该抗蚀剂在 25°C 以 1 : 3 的甲基异丙酮 / 异丙醇混合物使用超声进行显影。

[0190] 通过使用 1 μm 厚的抗蚀剂(未示出)以及 $\sim 250\text{nm}$ 的电子流直径进行剥离,形成分别具有 20nm 和 60nm 厚度的热蒸发,高电子对比 Cr/Au 记录标记(未示出)的图案。在蒸发之前,在 10% 的 HCl 溶液中 30s 的浸渍被使用,以帮助金属的粘附而不过度损坏 GaMnAs。

[0191] 一个 $\sim 200\text{nm}$ 厚的抗蚀剂层(未示出)被施加到 $\text{Ga}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{As}$ 外延层 37 的表面 S 上。使用具有 $\sim 15\text{nm}$ 流直径和 $\sim 5\text{pA}$ 电流的电子束(未示出)并通过在记录标记附近在芯片上聚焦,定义精细的特征。通过在 $\sim 1\text{nA}$ 的 $\sim 250\text{nm}$ 的束,在相同的抗蚀剂上定义不太重要的区域(未示出)。高分辨率区域被配置得尽可能地小,以最小化写时间和图案漂移。

[0192] 参照图 13(b),抗蚀剂被显影以留下已形成图案的抗蚀剂层 M,作为刻蚀掩模。

[0193] 参照图 13(c),反应离子刻蚀 (RIE) 被用于沟槽隔离。希望和 GaMnAs 的高传导性比较起来,任何 RIE 相关的传导性消弱最小。在 RIE 室(未示出)中的压力为 20mTorr,并具有 SiCl_4 和 Ar 的 20sccm 流以提供所需的适合于去除 GaAs 和锰的物理和化学刻蚀反应的混和。以 100W 的 10-15s 的典型刻蚀产生具有 20-30nm 深度的沟槽 T,安全地通过 GaMnAs 层。

[0194] Cr/Au (20nm/300nm) 结合垫被热蒸发,之前在 HCl 溶液中粘附浸渍。结合垫形成了对于 GaMnAs 层的低阻抗的电触点并且不需要单独的欧姆接触金属化 (ohmic metallisation)。

[0195] 在这个例子里,器件被配置在沿着 [110] 方向取向的霍尔条布局里,其具有 2 μm 宽的通道以及三对在窄缩的任意一侧间隔 10 μm 的具有 500nm 宽度的霍尔传感器端子。然而,其它的配置也能使用。

[0196] 修改在上文中描述的制造处理以制造第二器件 21_2 。

[0197] 具有更厚的例如 25nm 厚的 GaMnAs 层的不同的初始层被使用。该层结构使用电子束光刻及 RIE 来形成图案,以便形成下层的电极结构 44(图 11(a))。接着,另一个 AlAs 层

(具有 3nm 的厚度)和 GaMnAs 层如前所述的通过 LT-MBE 生长。形成该结构的图案,以便使用与第一器件 21_1 类似的方式定义通道。

[0198] 可以采用技术来最小化形成下层电极结构 44(图 11(a))的图案以及生长 AlAs 和 GaMnAs 层之间的污染。例如,下层电极结构 44(图 11(a))可以紧接在初始层结构的生长之后,马上使用离子束抛光(ion-beam milling)来形成图案,接着生长另外的层,而不破坏真空。

[0199] 参照图 8(c),示出了第三磁电阻器件 21_3 。

[0200] 第三磁电阻器件 21_3 是具有位于第一和第二引线 24,25 之间的铁磁区 22 的两端子器件,该器件通过隧道势垒 26 弱耦合到引线 24 之一以及通过可调的势垒 35 弱耦合到另一引线 25,该势垒 35 由半导体铁磁区 22 以及引线 25 形成的耗尽区来提供。

[0201] 在这个例子中,铁磁区 22 包括例如 Ga(Mn,As)的 p 型的半导体,并且引线 25 包括例如掺杂 Si 的 GaAs 的 n 型半导体,因此可调的势垒 35 是一个反向偏压的 p-n 结。然而,引线可以是金属的,因此可调的势垒 35 可以是肖特基势垒。

[0202] 特别参照图 14(a)和 14(b),更详细地示出了第三器件 21_3 。

[0203] 器件 21_3 包括从衬底 48 直立起来的柱 47。柱 47 包括:GaAs 的层 25,其掺杂到 $1-10 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 量级的浓度,并且该层 25 具有(未蚀刻的)200nm 的厚度;p 型 $\text{Ga}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{As}$ 层 22,其具有大约为 5nm 的厚度;AlAs 层 26,其具有 25nm 的厚度;以及具有大约为 10nm 厚度的 Au 层。

[0204] 器件从在 GaAs 衬底(未示出)上生长的层结构(未示出)制造,该层结构依次包括 200nm 厚的 n 型 GaAs 层(未示出),5nm 厚的 $\text{Ga}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{As}$ 层,以及 25nm 厚的 AlAs 层。 $\text{Ga}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{As}$ 通过低温分子束外延(LT-MBE)而生长。

[0205] 电子束光刻以及热蒸发被用于在层结构(未示出)的表面上定义金(Au)垫,该垫具有 10nm 量级的厚度,并且 SiCl_4/Ar RIE 被用于定义柱 47。

[0206] 为了接触柱 47 的顶部,柱可以使用例如聚酰亚胺并且沉积金接触垫来平滑。

[0207] 非磁欧姆接触被用于接触衬底。

[0208] 参照图 14,示出了第三器件 21_3 的读写周期。

[0209] 类似于先前描述的第一和第二器件 $21_1, 21_2$,第三器件 21_3 能够表现出四种状态 M_1, M_2, M_3, M_4 。

[0210] 第三器件 21_3 的不同之处在于电压脉冲 29 的极性确定它是写还是读脉冲。

[0211] 为了将数据写到器件 21_3 上,负电压脉冲 29 被施加给与和另一个引线 25 相关的固定隧道势垒临近的引线 24,以便于反转偏压 p-n 结 35 并且增加耗尽区的宽度以增加耗尽,以及改变在铁磁区 22 中的载流子密度或载流子密度分布,从而导致进动。如先前所解释的,脉冲的持续时间可以用来在两个状态之间或两个以上的状态之间进行转变,换句话说使用 t_{90} 和 t_{180} 脉冲。

[0212] 为了读出数据,正偏压脉冲 30 被施加到与和另一个引线 25 相关的固定隧道势垒临近的引线 24,并且测量依赖于电流 46, i 的磁化方向。

[0213] 现在将参照图 16(a)、16(b)和 16(c),描述磁电阻器件 51,其中电场脉冲的施加造成在不均一应变铁磁半导体中的最大载流子浓度的移动,其又造成磁各向异性的改变并且因此启动了磁化的进动。

[0214] 器件 51 包括霍耳条 52,其通常是细长的,具有大约为 $1\ \mu\text{m}$ 的宽度 w 以及大约为 $20\ \mu\text{m}$ 的长度 l 。霍耳条 52 具有第一和第二端引线 53、54 和成对配置在条 52 的相对侧的第一、第二、第三和第四侧引线 55、56、57、58。霍耳条 52 夹在下层和上层电极 59、60 之间,在下文中分别称为“底部”和“顶部”电极。

[0215] 如图所示,脉冲发生器 61 被用于在顶部和底部电极 59、60 之间施加电压脉冲 62。电流源 63 被用于通过霍耳条 52,在第一和第二端引线 53、54 之间施加读取电流 i_{read} 。第一和第二电压计 64、65 测量在第一和第二侧引线 55、56 之间的偏压以及在第二和第四侧引线 56、58 之间的偏压,以分别确定纵向和横向的各向异性磁电阻 (AMR)。在第二和第三侧引线 56、57 之间测量的偏压也能被用于测量反常霍耳效应 (AHE) 阻抗。

[0216] AMR 测量能被用于分辨两个状态,其中在 $V_G = V_0$ (例如 $V_0 = 0$) 时表示为双轴平面内各向异性的铁磁层中,磁化以小于 180° (例如 90°) 的角度进行旋转。

[0217] AHE 测量能被用于分辨在 $V_G = V_0$ 时具有垂直各向异性的系统中的上下状态。

[0218] 特别参照图 16(b) 和 16(c),霍耳条 52 形成在铟镓砷化物 ($\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{As}$) 衬底 66 上,其作为底部电极 59。霍耳条 52 包括位于 InGaAs 衬底 66 上的由 AlAs 形成的基部势垒层 67,分级 InGaMnAs 形成的非均一应变铁磁层 68 以及 AlAs 形成的顶部势垒层 69。顶部栅电极 60 由 Al 形成。

[0219] 在铁磁层 68 中的晶格常数可控制地变化以在层 68 内产生非均一应变。 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}$ 的晶格常数比 $\text{Ga}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{As}$ 的晶格常数要大,因此在 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}$ 上随后生长的 $\text{Ga}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{As}$ 是张应变。进一步地,铟再次被引入以形成 InGaMnAs 。铟的浓度增加直到 InGaMnAs 的晶格常数变得比 InGaAs 衬底的晶格常数要大以获得压应变。

[0220] 器件 51 从晶片 70 制造,该器件包括铟镓砷化物 ($\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$) 衬底 66' ($y = 5\%$),具有 $\sim 20\text{nm}$ 厚度的铝砷化物 (AlAs) 层 67',铟镓锰砷化物 ($\text{In}_z\text{Ga}_{1-x-z}\text{Mn}_x\text{As}$) 分级层 68',其包括 GaMnAs 68₁' 的基层并具有 $\sim 10\text{nm}$ 的厚度。

[0221] 参照图 17, $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ 层 68₁' 在 AlAs 层 67' 的顶部在张应变下外延生长,其又在 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 衬底 66' 上生长。在这个例子中,锰的浓度为 5% ,即 $x = 0.05$,铟的浓度从 $z = 0$ 增加到 10% 。

[0222] $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 衬底 66' 的更宽的晶格常数被传送给引入张应变的 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ 层 68₁'。在 $\text{In}_z\text{Ga}_{1-x-z}\text{Mn}_x\text{As}$ 68' 的进一步的生长中,铟被引入以通过形成四元合金 InGaMnAs 来进一步增加晶格常数。铟浓度 $[\text{In}]$ 随着从层 68₁ 的基底 71 的距离 d 的增加而增加。

[0223] 可以使用不同的应变分布图。例如,代替在铁磁层 68 中应变从更接近于衬底的拉伸变化为进一步远离衬底的压缩,应变可以从压缩变化为拉伸。这可以通过从具有代替了 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 衬底的镓砷化物 (GaAs) 衬底的晶片来制造器件,并通过引入代替铟 (In) 的磷 (P) 以形成镓锰磷砷化物 ($\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{P}_z\text{As}_{1-z}$) 分级层来实现。晶格常数随着磷浓度的增加而降低。

[0224] 参照图 18,应变也能通过改变铁磁层 68 的形状来改变。例如,可以使铁磁层 68 的宽度在层 68 具有宽度 w_1 的基底 71 处较窄,并使得在具有宽度 $w_2 > w_1$ 的进一步远离基底 71 处较宽。因此,与层 68 的较厚的上部部分相比,晶格在层 68 的较薄的下部部分更为松弛。铁磁区 68 可以均匀掺杂。

[0225] 参照图 19(a) 和 19(b),通过在两个栅 59、60 之间施加栅脉冲 62,产生电场 72,其

移动电荷载流子 73 (这里仅示出了空穴,即多数载流子) 并且改变在下部张应变的区域 74 和在上部压应变的区域 75 中的载流子浓度。特别是,脉冲将载流子 73 从下部张应变的区域 74 带到上部压应变的区域 75,以增加在上部压应变的区域 75 中的电荷载流子密度。

[0226] 下面的表 2 标识了对于应变和载流子浓度的磁各向异性的方向:

[0227] 表 2

[0228]

	张应变	压应变
高载流子浓度	平面外	平面内
低载流子浓度	平面内	平面外

[0229] 磁层 68 的磁各向异性 76 从垂直于层 68 的平面 (即,沿着轴 78) 的第一方向 77₁ 变化到沿着层 68 平面 (例如沿着轴 79) 定向的第二方向 77₂。因此,有效的各向异性场 B_A 旋转 90°。这导致了磁化 80 开始进动并且对于 $\pi/2$ 脉冲以 90 度角重定向。

[0230] 如随后将更详细地解释的那样,施加另一个相同的脉冲 62 导致有效的各向异性场 B_A 再次旋转 90°,因此磁化继续进动另一个 90°。因此,有效的各向异性场 B_A 再一次沿着平面外轴 77 定向,但是磁化朝向第三方向 77₃,其反平行于第一方向 77₁。尽管这样,第一和第三状态 (即,当磁化 80 以第一和第三方向 77₁、77₃ 取向时) 的磁电阻是相同的。如先前所解释的,这是因为,只有当它们不共线时,AMR 测量才能够分辨出初始和最后的磁化状态。AHE 测量能够分辨出垂直于平面的两个相反的磁化方向。TMR 测量能够分辨出相对于固定参考层的平行和反平行的方向。

[0231] 读写周期类似于在先前描述的图 12 中示出的那样。然而,在读周期中,替代施加源-漏偏压以及测量电流,通过器件驱动电流并且测量在引线 55、56、57、58 之间产生的电势差。

[0232] 器件 51 通过使用类似于先前描述的制造第一器件 21₁ 的技术的技术来制造。例如,层结构案以与先前所述类似的方式生长并且使用电子束光刻和 RIE 来形成图案。

[0233] 现在将参照图 20(a) 和 20(b) 描述第四磁电阻器件 81,其中应变脉冲的施加导致磁各向异性的变化并且因此开始磁化的进动。

[0234] 器件 81 包括配置在压电层 83 上的堆叠的层结构 82,其具有第一和第二接触引线 84、85。第一和第二触点 86、87 被用于提供与层结构 82 的电接触。

[0235] 堆叠的层结构 82 具有大约为 1 μm 的宽度 W 以及大约为 1 μm 的长度 L。

[0236] 如图所示,脉冲发生器 88 被用于在压电接触引线 86、87 之间施加电压脉冲 89。电压源 90 被用于在触点 86、87 之间施加偏压,电流计 91 被用于测量通过堆叠的层结构 82 的电流。

[0237] 特别参照图 20(b),堆叠的层结构 82 在镓砷化物 (GaAs) 衬底 92 上形成,该衬底通过胶 93 被配置在压电应激源 (stressor) 83 上。压电应激源由锆钛酸铅 (PZT) 形成。

[0238] 堆叠的层结构 82 包括具有 (非铁磁性的) n⁺-GaAs 的底部接触层 94;含有 Ga_{0.98}Mn_{0.02}As、具有相对低矫顽力、并且厚度为 5nm 的铁磁层 95 (也就是“自由层”);含有铝砷化物 (AlAs)、具有 25nm 厚度的隧道势垒层 96;含有 Ga_{0.98}Mn_{0.02}As、具有相对高矫顽力、并

且厚度为 50nm 的的铁磁层 97(也就是“受钉扎”层)以及含有(非铁磁性的)金的顶部接触层 98。

[0239] 可以使用其它的配置和其它的材料。例如,压电应激源 83 可以和衬底 92 整体形成。例如, GaAs 沿 [110] 轴是压电的。

[0240] 能认识到第四器件 81 的铁磁层不需要是半导体,而可以是金属的并且可以包括,例如像 Fe、Ni、Co 的铁磁金属或者金属合金 FePt、CoPt、CoPd 或者其它合适的过渡金属/贵金属合金的材料。

[0241] 读写周期类似于在先前描述的图 13 中示出的那样。

[0242] 可以不必使用堆叠的层结构。作为替代,可以使用例如类似于图 9 所示的“平面内”传输结构。例如,图 9 所示的结构可以配置在压电应激源 83 上。

[0243] 现在将参照图 21(a) 和 21(b) 描述第五磁电阻器件 101,其中应变和电脉冲的施加导致磁各向异性的变化并且因此开始磁化的进动。

[0244] 器件 101 包括十字形台面 102,其限定铁磁材料的通道 103,通道 103 在这种情况下是在 GaAs 层 104 中嵌入的 $\text{Ga}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{As}$ 的 δ 掺杂层,并且由衬底 105 支撑。第一、第二、第三和第四触点 106、107、108、109 提供与通道 103 的末端的接触,并且表面顶部栅 110 被用于控制磁各向异性。衬底 104 被配置在压电层 111 上,该压电层 111 具有第一和第二出触点 112、113,其被用于在压电层 111 内产生电场向铁磁通道 103 预加应力。

[0245] 通道 103 的每一个臂具有大约 $2\mu\text{m}$ 的宽度以及大约为 $20\mu\text{m}$ 的长度。

[0246] 如图所示,第一脉冲发生器 114 被用于在压电接触引线 112、113 之间施加电压脉冲 115 以向通道 103 预加应力。第二脉冲发生器 116 被用于向表面栅 110 电压脉冲 117 以导致磁各向异性的进动。

[0247] 电压源 118 被用于在第一和第二触点 106、107 之间施加偏压 119,并且电流计 120 被用于测量在第三和第四触点 108、109 之间流动的电流 121。

[0248] 特别参照图 20(b),衬底 104 通过胶层 122 被配置在压电层 111 上。

[0249] 读写周期类似于在先前描述的图 12 中示出的那样。然而,如在图 22 中所示出的那样,电压脉冲 115 在 t_{180} 或 t_{90} 脉冲期间被施加。

[0250] 在上述实施例中,向器件写入数据和从器件读出数据基于将器件视为它仅仅具有两个状态并且因此每个器件仅存储一位信息。然而,利用双轴平面内各向异性以及单轴垂直平面各向异性,使用脉冲和反相(inverted)脉冲的两种类型的组合,可以获得 6 种剩余的磁化方向,从而进行 2 位以上的编码(即, $\ln 6/\ln 2 \approx 2.6$, 对应于 6 种不同的状态)。

[0251] 参照图 23,铁磁层 22、68、95、103 表示出了 6 种剩余的磁化方向 131、132、133、134、135、136。

[0252] 铁磁层 22、68、95、103 能在两种状态下被操作,即双轴平面内磁各向异性状态和垂直各向异性状态,在双轴平面内磁各向异性状态中,相对于零直流偏压偏移(即 $V_G = V_0$),施加两种类型的偏压脉冲;在垂直各向异性状态中,施加反向偏压脉冲,即相对于非零直流偏压偏移(即 $V_G = V_C$)施加偏压脉冲。

[0253] 在 $V_G = V_0$ 时,被具有不同脉冲长度的快速栅电压脉冲所触发的进动转变,在层平面内沿着两个双轴易轴在四个剩余的状态 131、132、133、134 之间旋转磁化向量。

[0254] 参照图 24,一方面,相邻的磁化方向 131、132、133、134 可以使用造成 90° 旋转的

栅脉冲 29、62、91 从第一、第二、第三和第四磁化方向 131、132、133、134 中的另一个获得。这种类型的脉冲这里被称作为“ p^{90° 脉冲”或“ t_{90} 脉冲”。

[0255] 另一方面,相邻的磁化方向 131、132、133、134 可以使用造成 270° 旋转的栅脉冲(未示出)从第一、第二、第三和第四磁化方向 131、132、133、134 中的另一个获得。这些脉冲在下文中被称作为“ p^{270° 脉冲”或“ t_{270} 脉冲”。

[0256] 第一、第二、第三和第四磁化方向 131、132、133、134 也可以使用造成 180° 旋转的栅脉冲 138 从共线的方向 131、132、133、134 中获得,这些脉冲在下文中被称作为“ p^{180° 脉冲”或“ t_{180} 脉冲”。因此,第一磁化方向 131 可以使用 p^{180° 脉冲 138 从第三磁化方向 133 获得。

[0257] 通过采用损耗衰减的“绝热的”磁化重定向,获得在双轴平面内以及单轴垂直平面的各向异性状态之间的变化。例如,在栅偏压已经从 V_0 变化到 V_c 后,磁化向量 M 开始绕着更改后的各向异性磁场 $B_A(V_c)$ 进动,并且损耗衰减导致磁化向量朝向更改后的各向异性磁场 $B_A(V_c)$ 盘旋。磁化向量 M 最终(在热波动内)以对应于更改后的各向异性的易轴之一取向。

[0258] 状态的变化通过栅偏压步进变化 139、140 来获得,其在下文中分别被称作“ $p^{\text{衰减}}$ 脉冲”或“反相的 $p^{\text{衰减}}$ 脉冲”。

[0259] 第五和第六磁化方向 135、136 能够通过使用造成 180° 旋转的栅脉冲 141 而获得。然而,脉冲 141 反相于 p^{180° 脉冲 108,并且在下文中被称作为“反相的 p^{180° 脉冲”。

[0260] 参照图 25(a) 和 25(b),示出了施加 p^{90° 脉冲 137 以及反相的 p^{180° 脉冲 141 的效果。

[0261] 图 25(a) 说明了 $V_c = V_0$ 时的在双轴平面内各向异性状态中的进动 90° 转变。如图所示,磁各向异性在 $V_c = V_0$ 时在栅电压脉冲 137 期间,从平面内变化到垂直于平面并且在磁化向量 M 已经完成了 90° 的旋转后变回到 V_0 。

[0262] 图 25(b) 示出了在垂直于平面各向异性状态中反相脉冲触发了 180° 翻转。

[0263] AHE 测量能够分辨出沿着垂直于平面方向的两种单轴磁化状态,AMR 的横向和纵向测量能够明确地分辨出在平面内的 4 种双轴的磁化状态。

[0264] 将认识到,对上文中所述的实施例可以作出许多修改。例如,铁磁层可以具有不同的厚度,例如在 5 和 20nm 之间。器件可以基于电子或空穴转移来操作。可以使用掩蔽层来保护 GaMnAs 层。磁电阻器件能够具有多层结构,例如磁隧道结或者自旋阀。

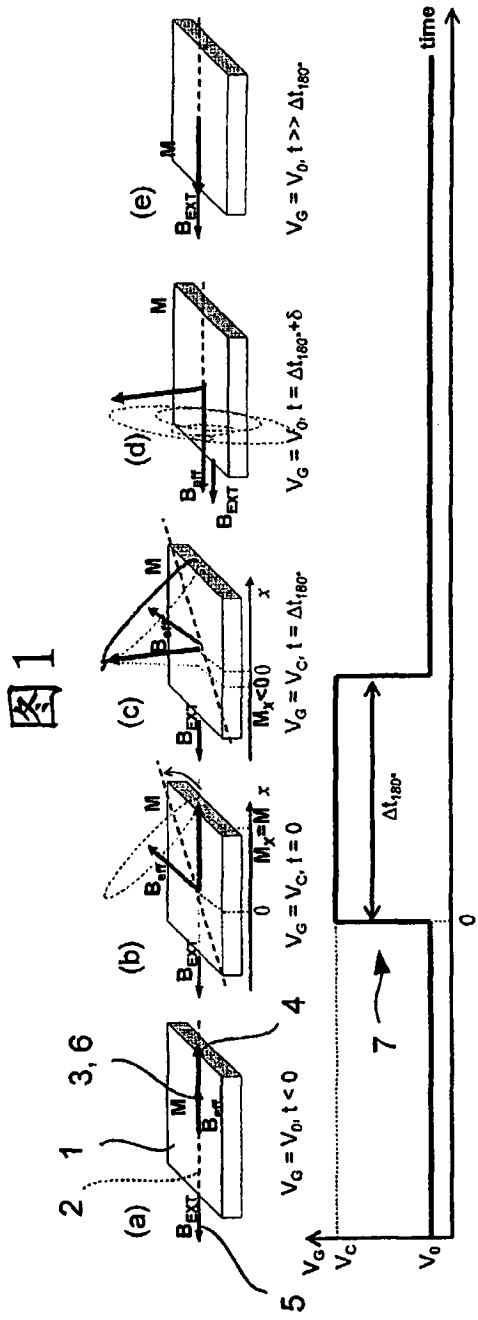
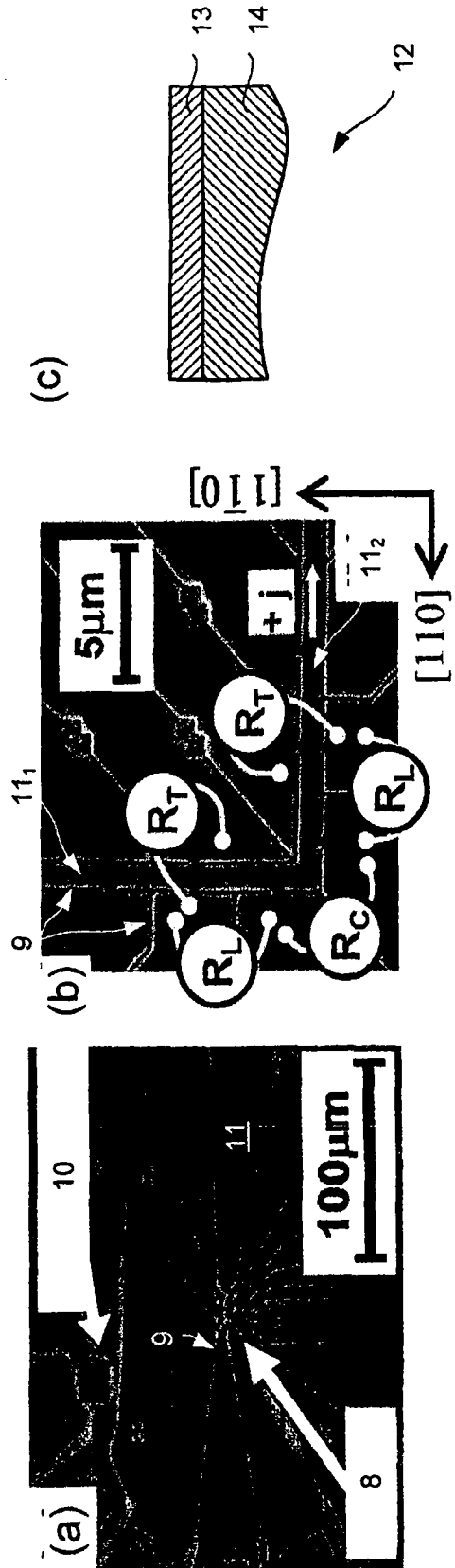


图 2



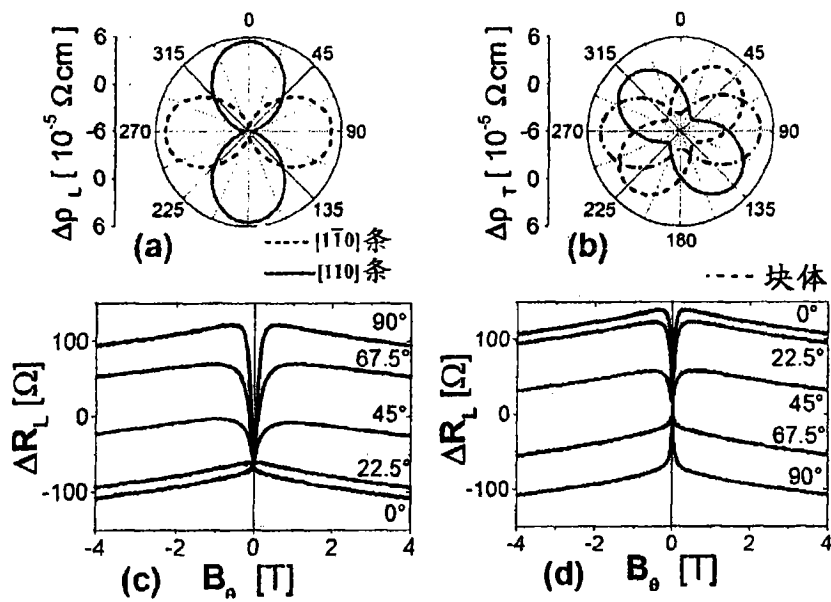


图 3

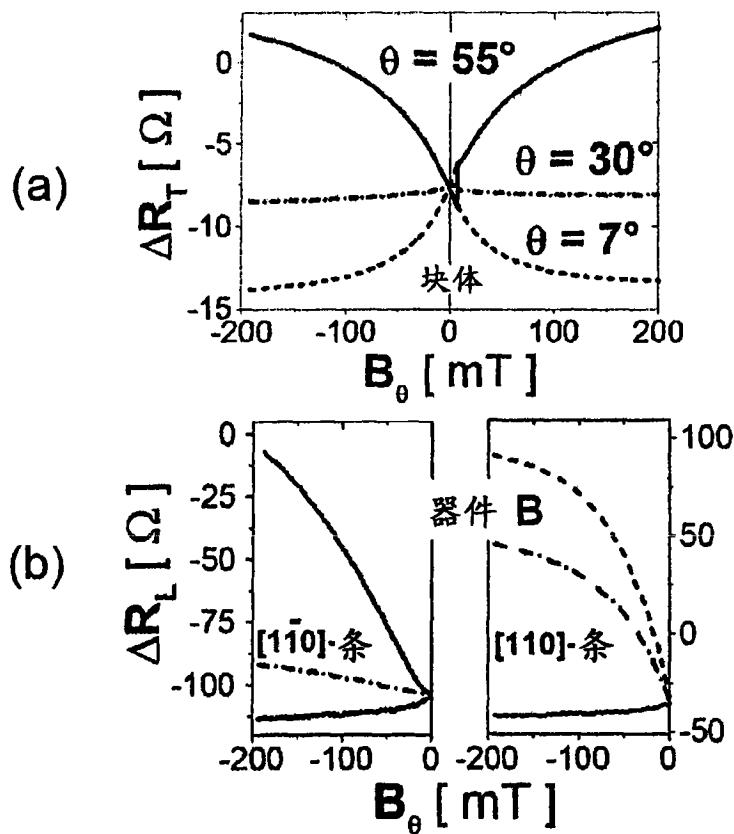


图 4

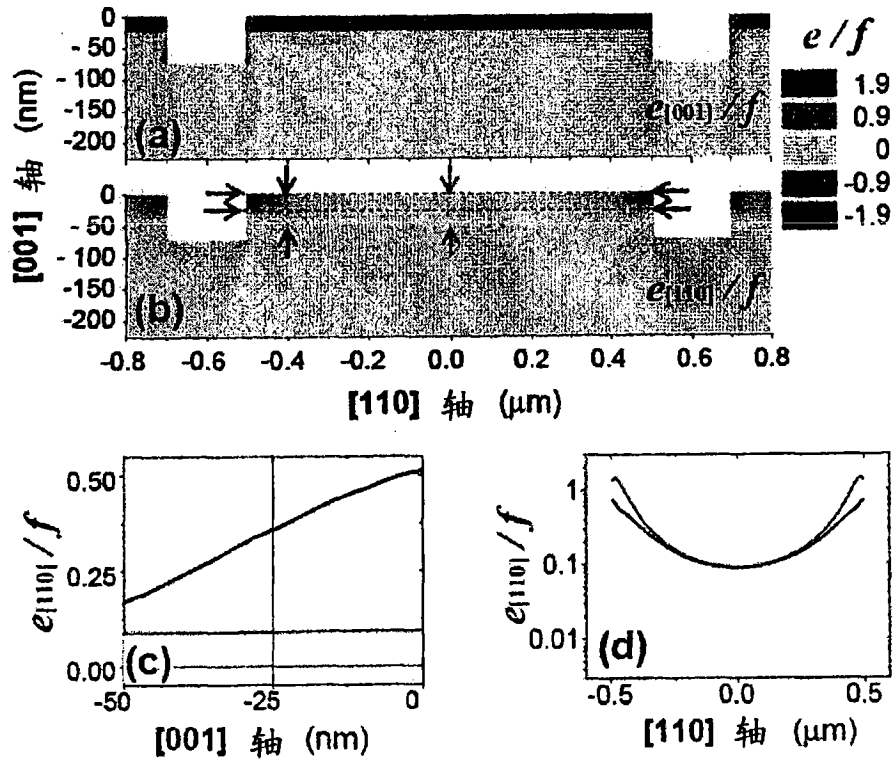


图 5

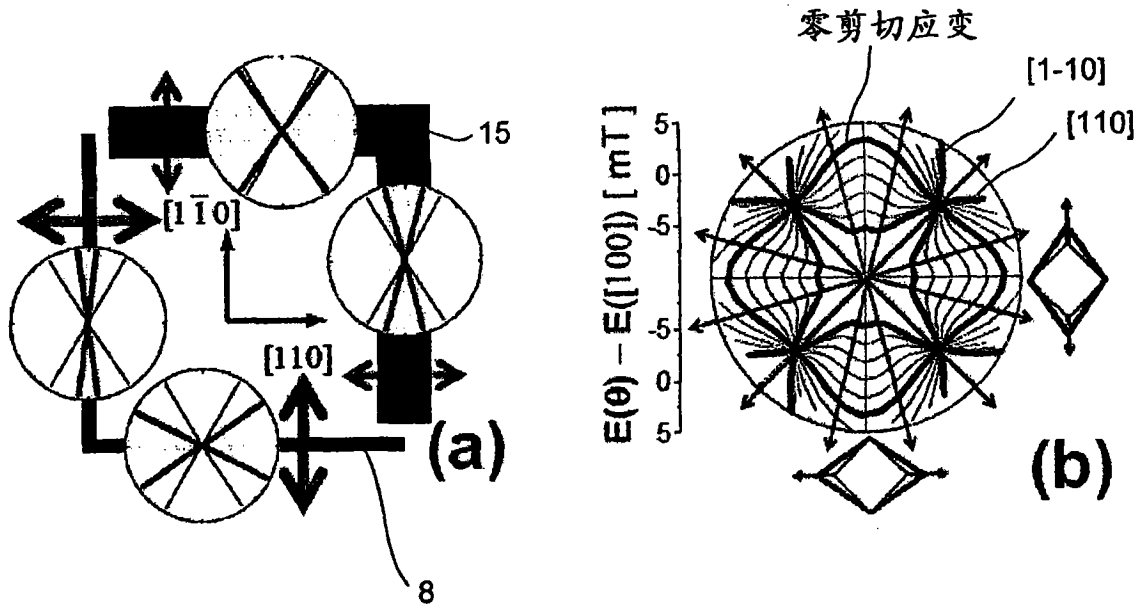


图 6

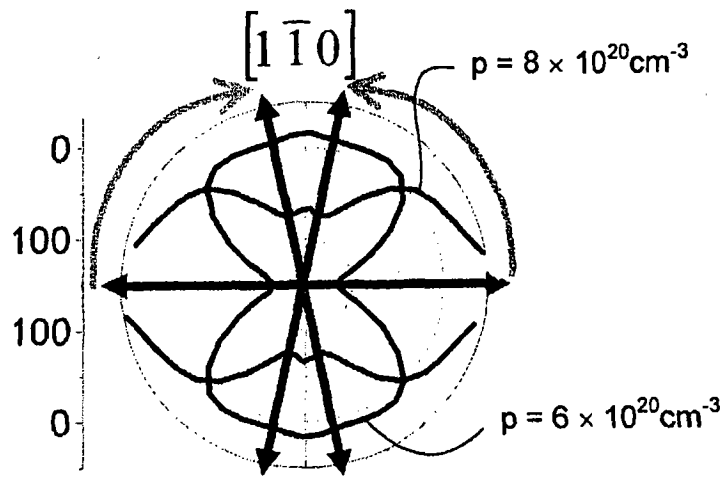


图 7

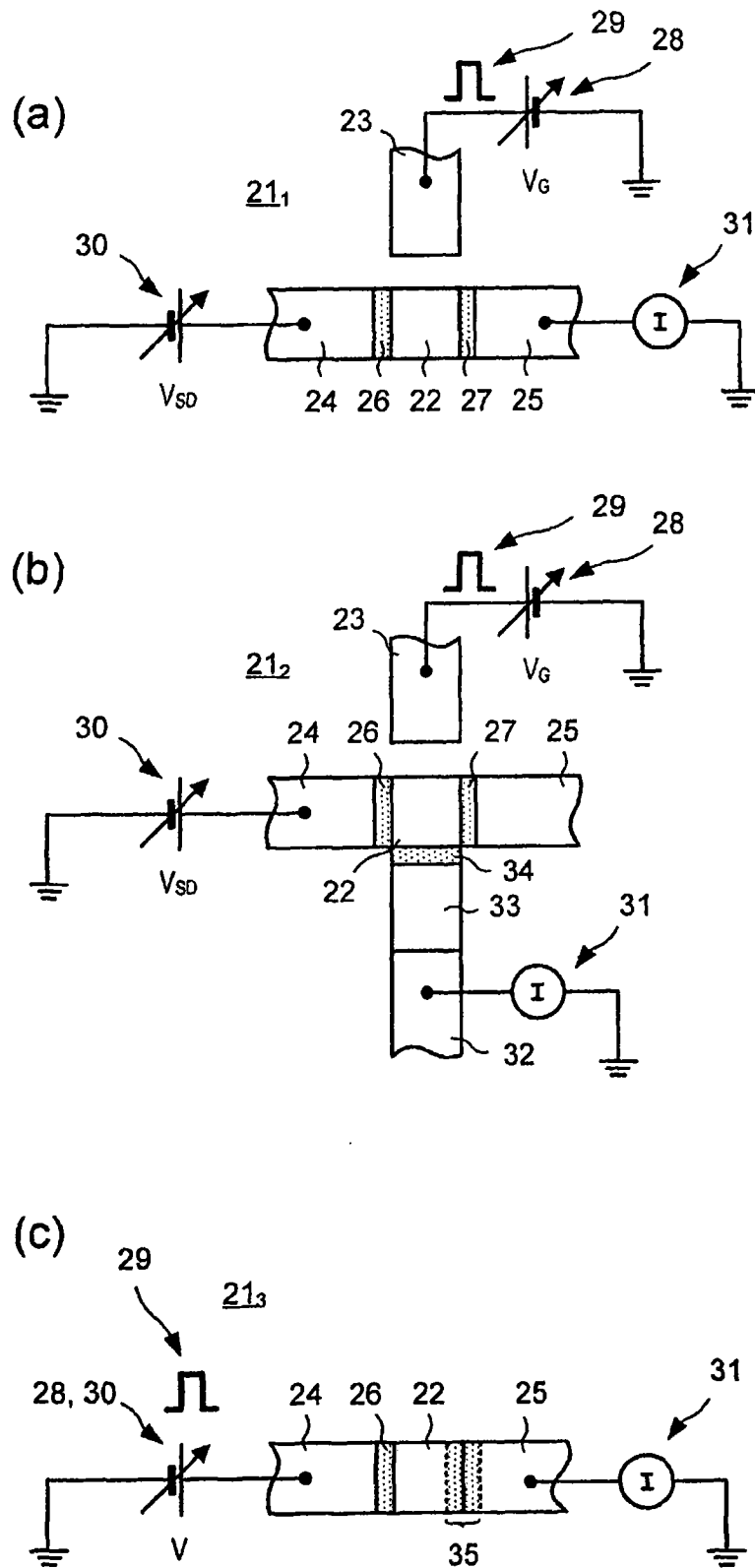


图 8

图9

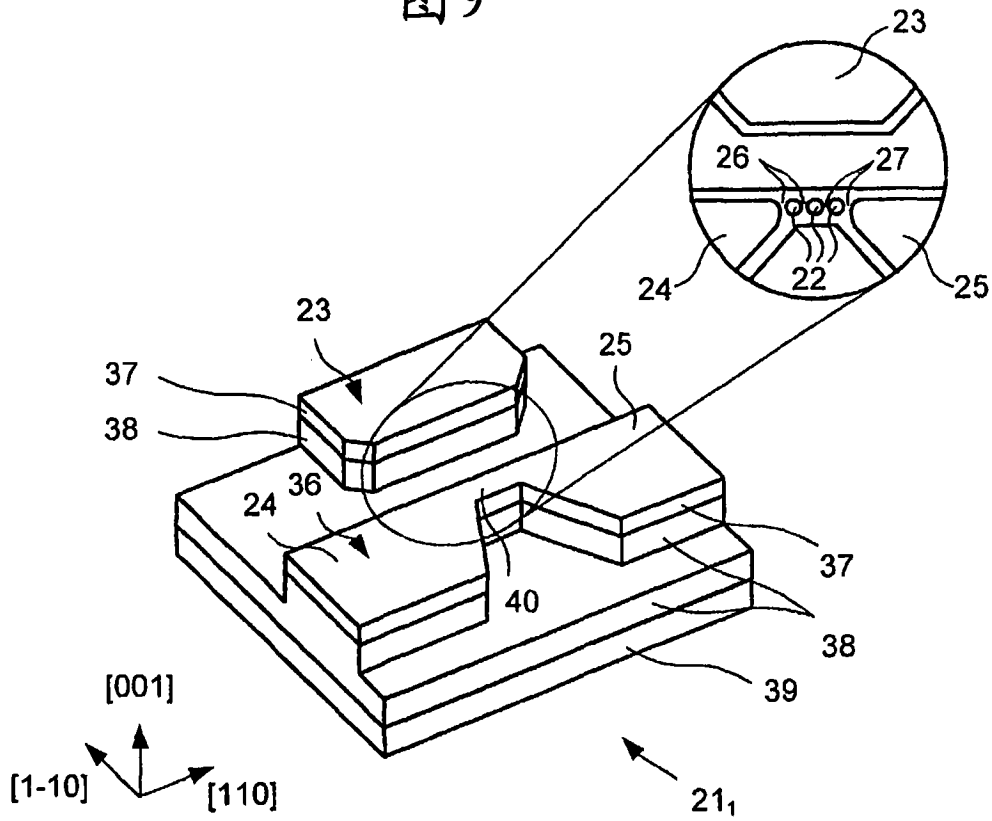
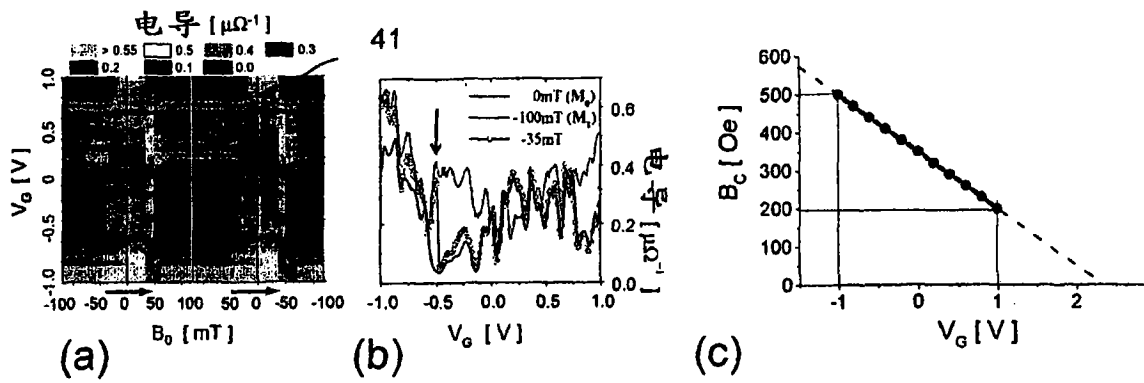


图10



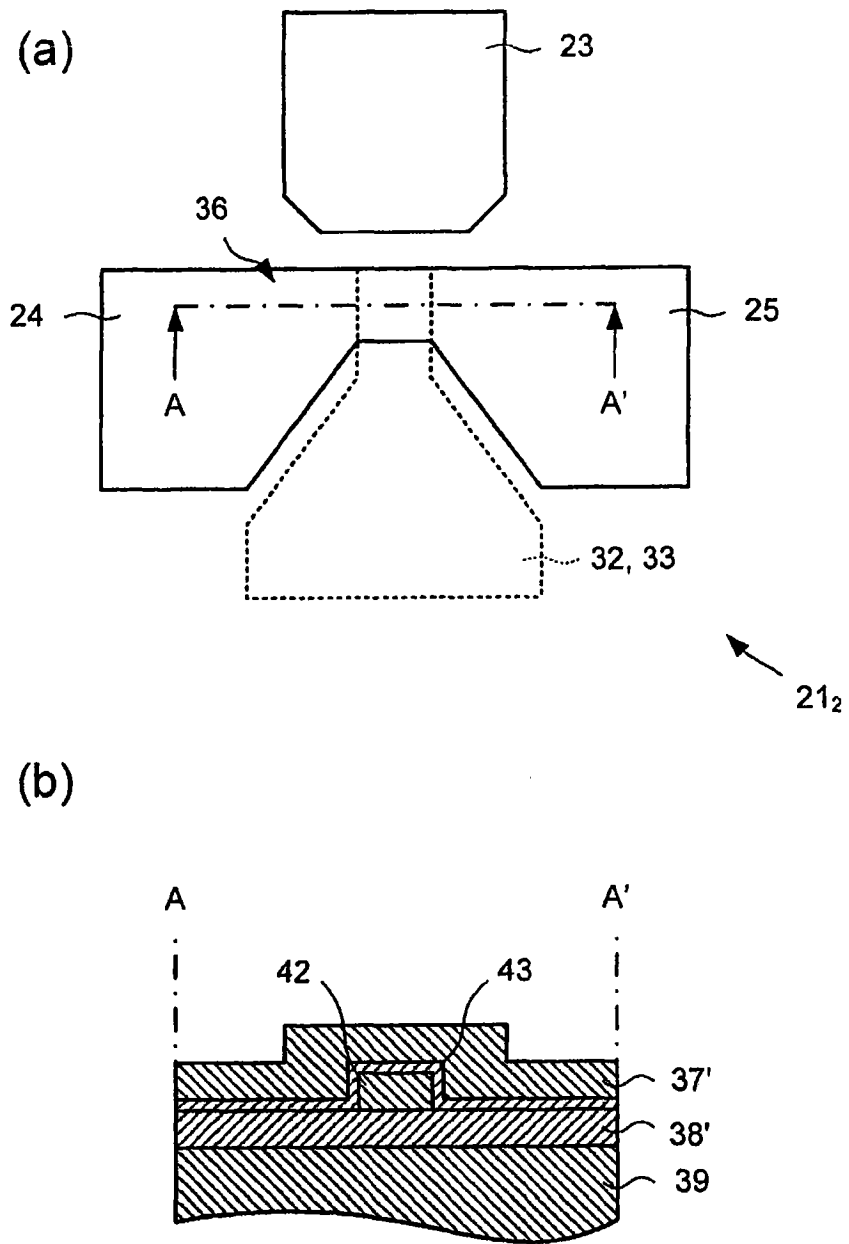


图 11

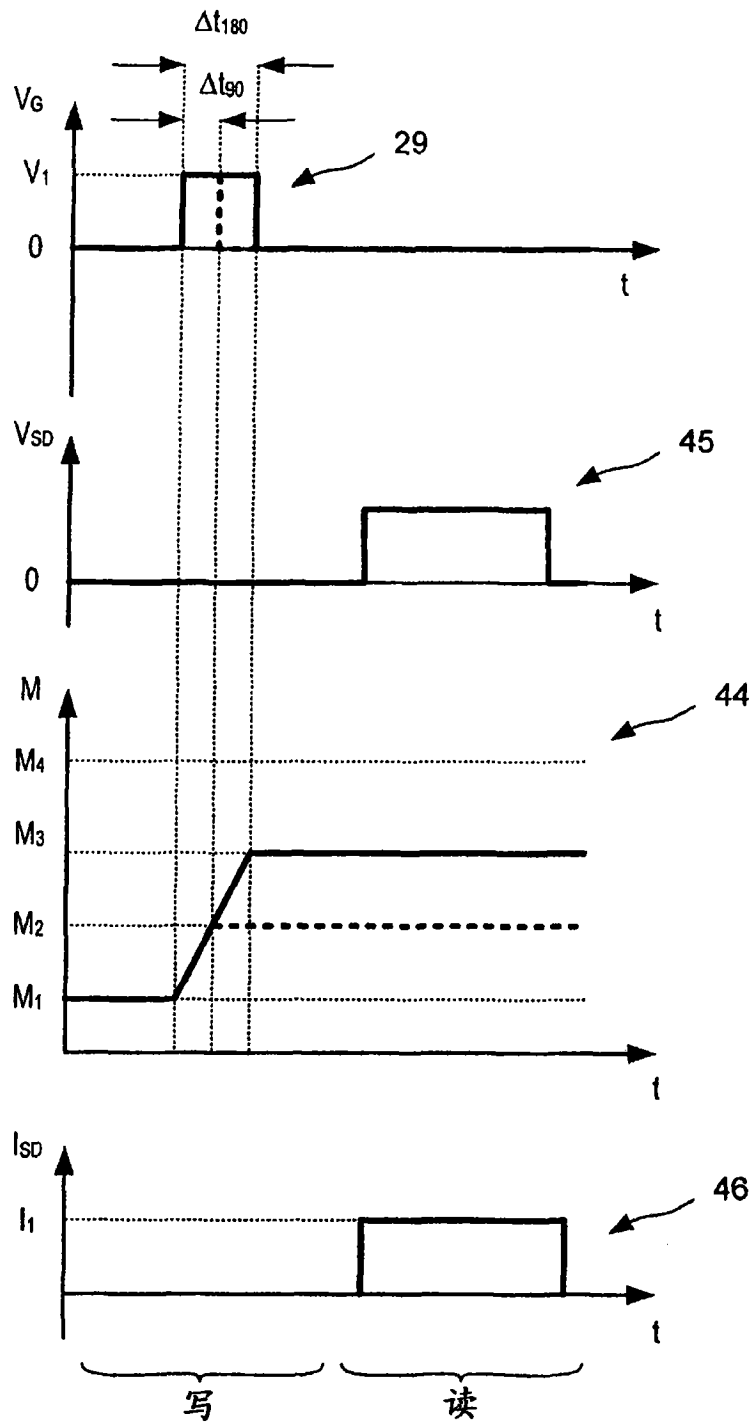


图 12

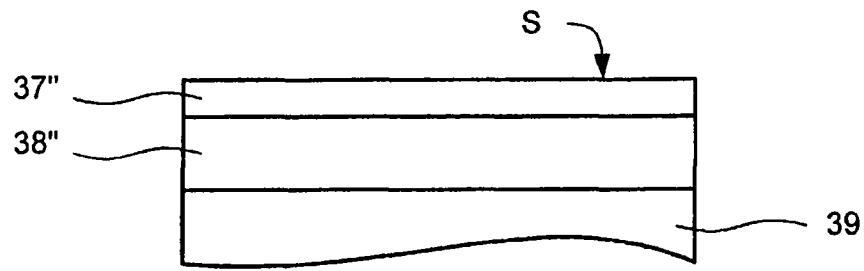


图 13a

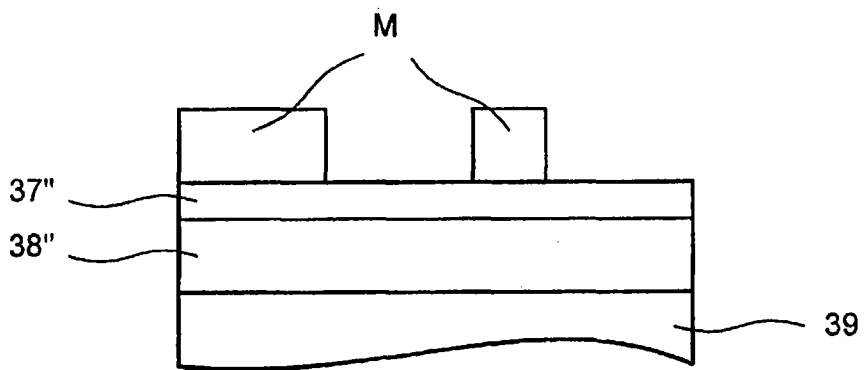


图 13b

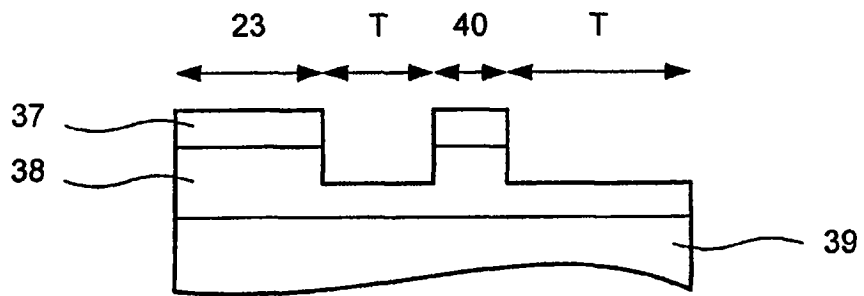


图 13c

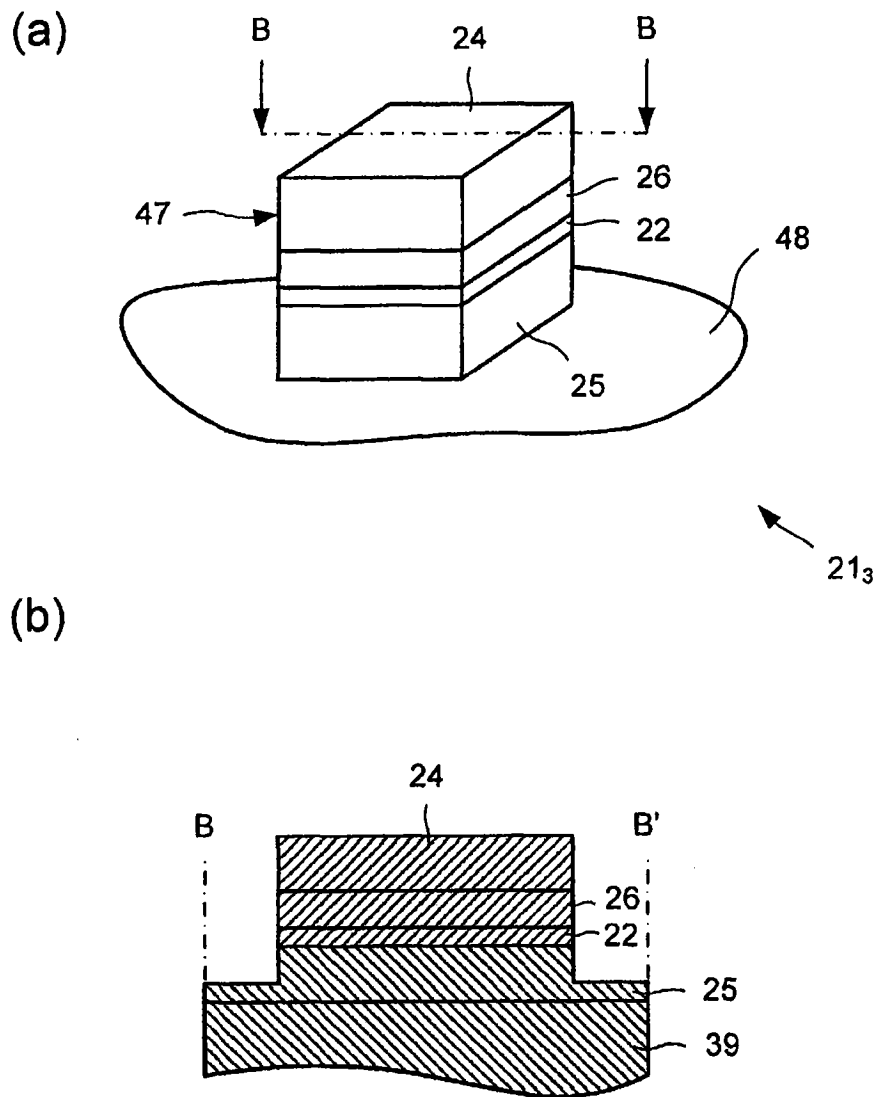


图 14

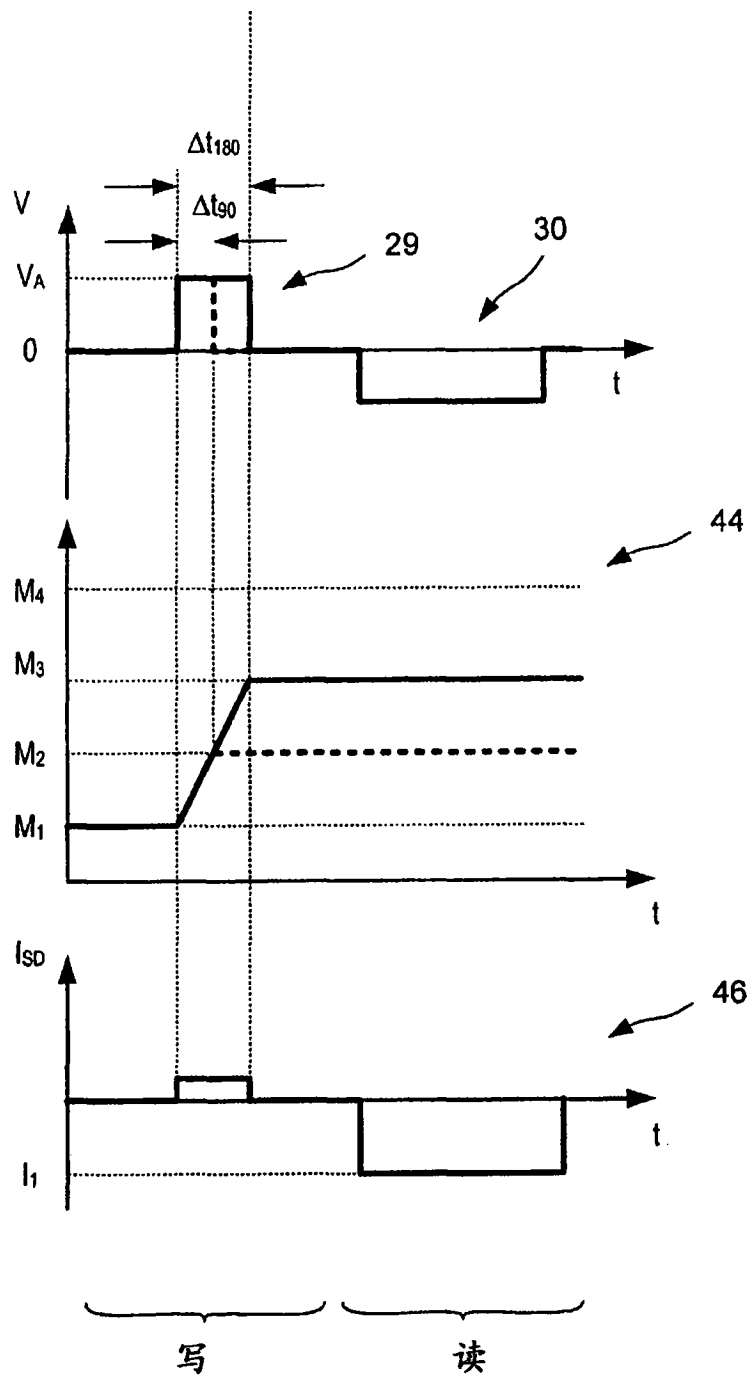


图 15

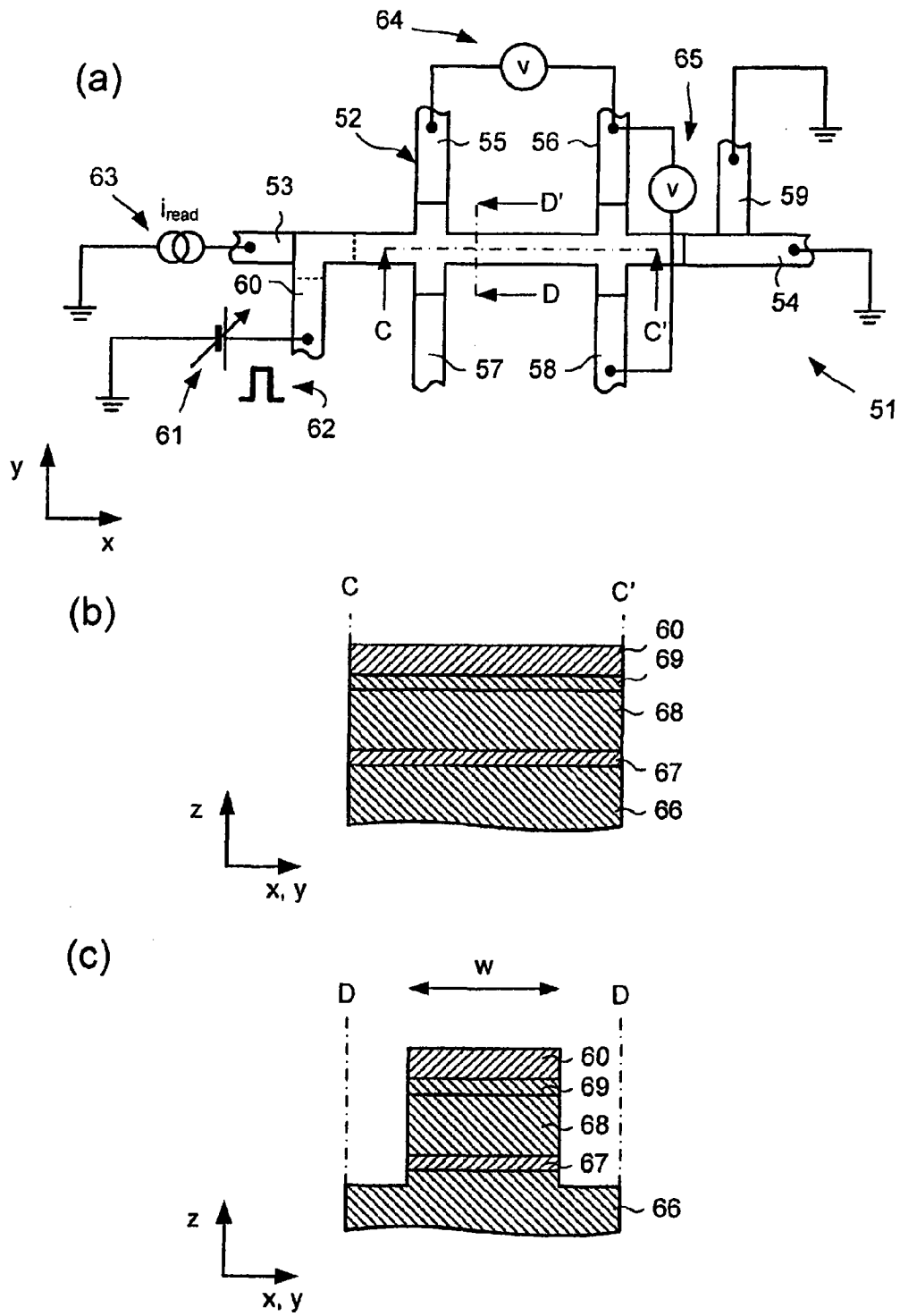


图 16

图 17

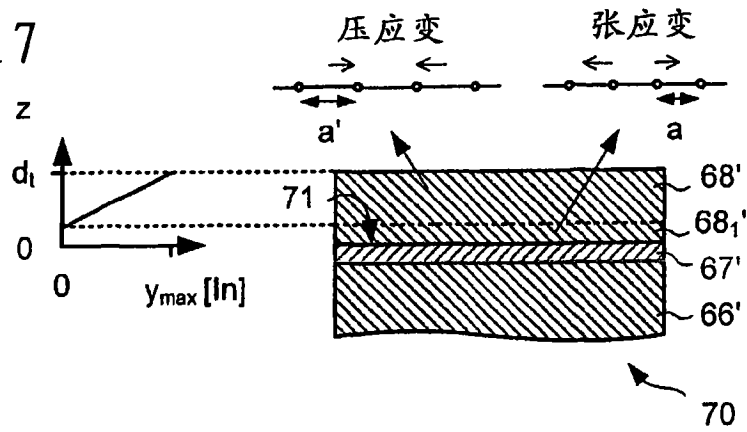


图 18

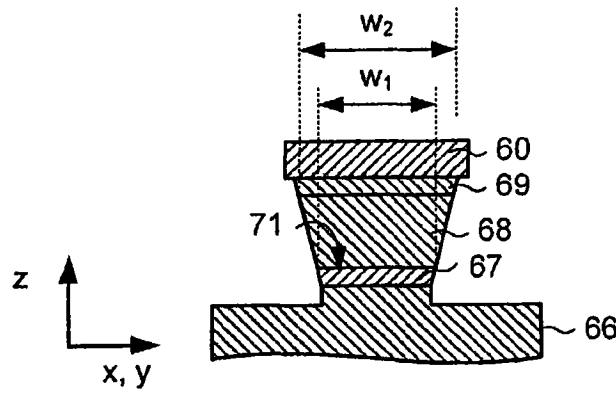
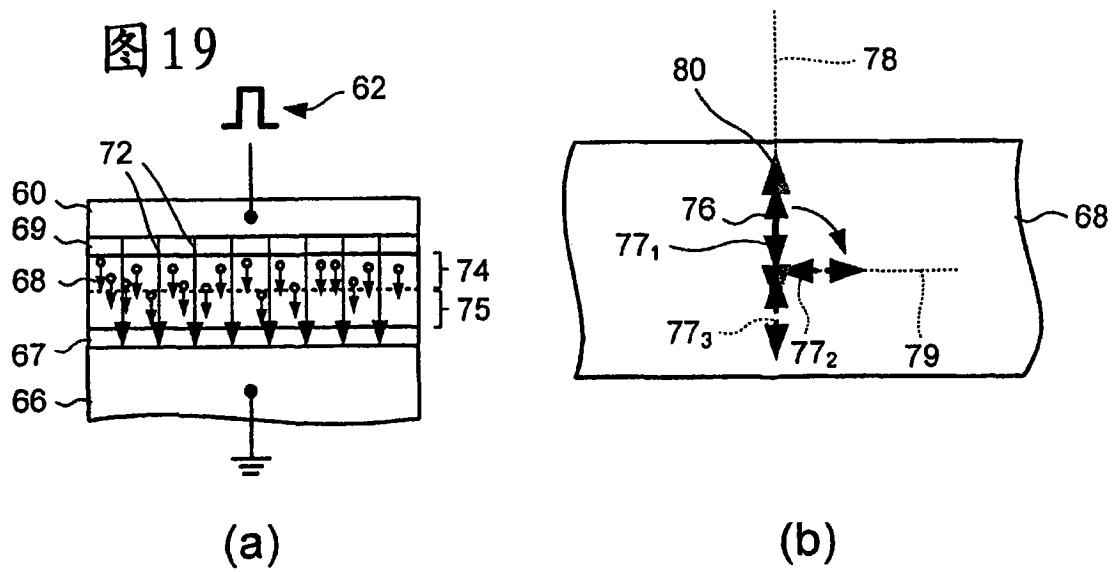


图 19



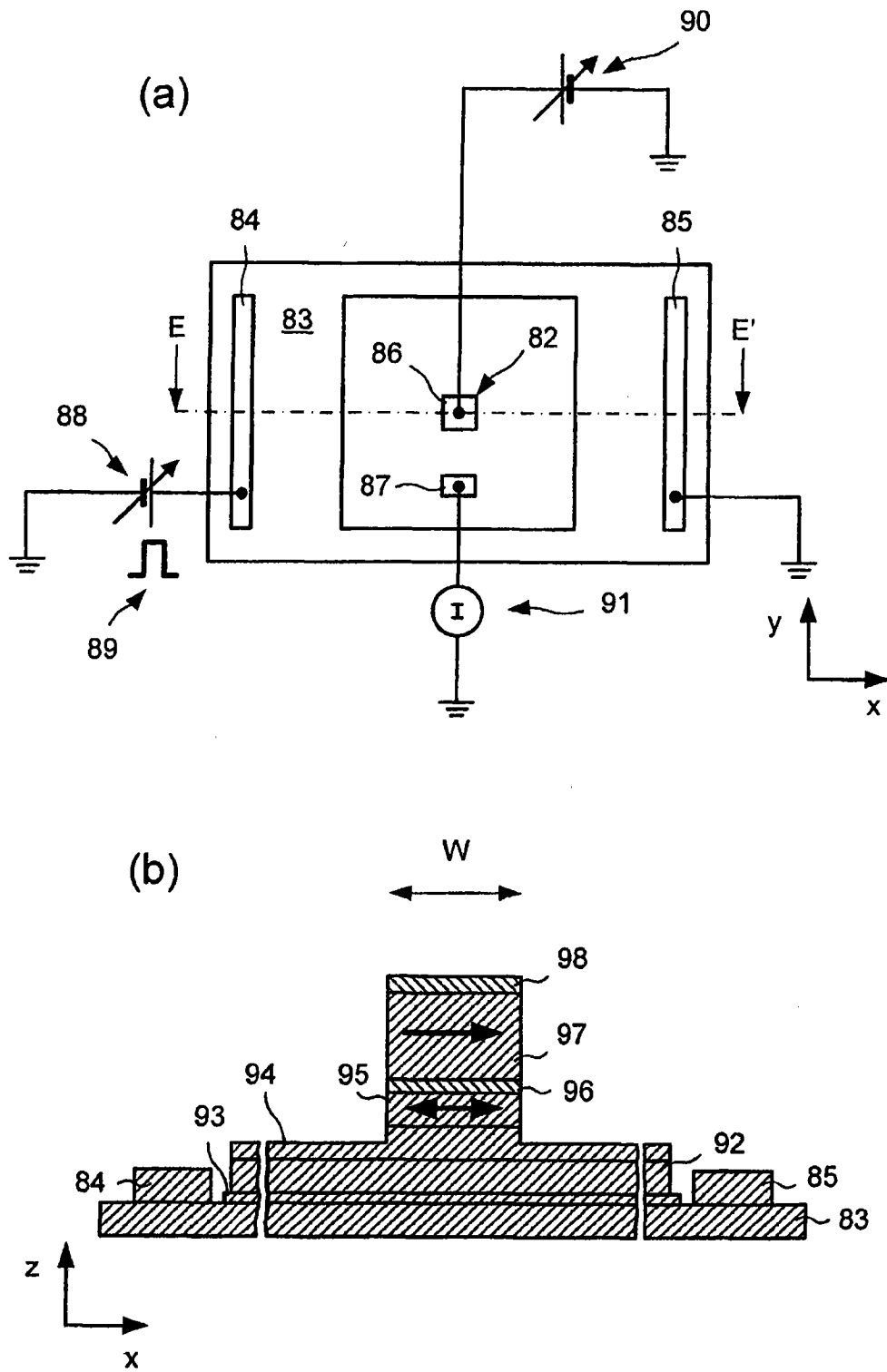


图 20

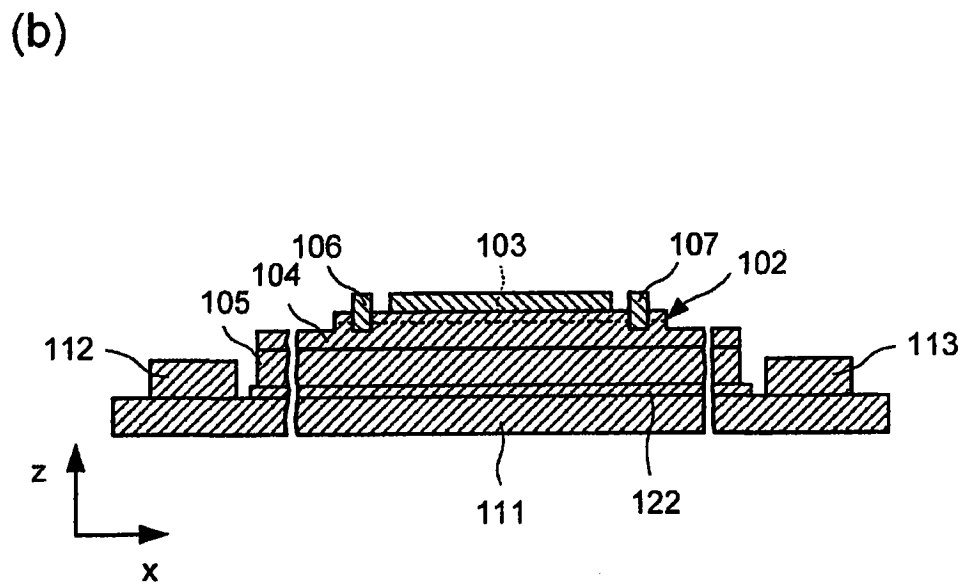
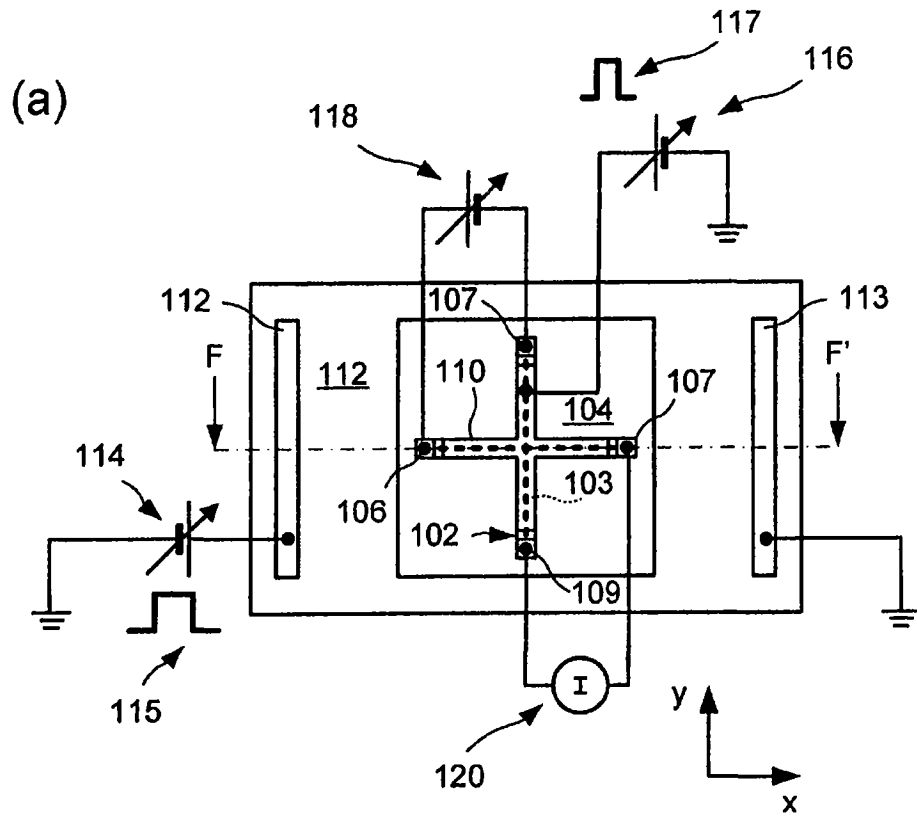


图 21

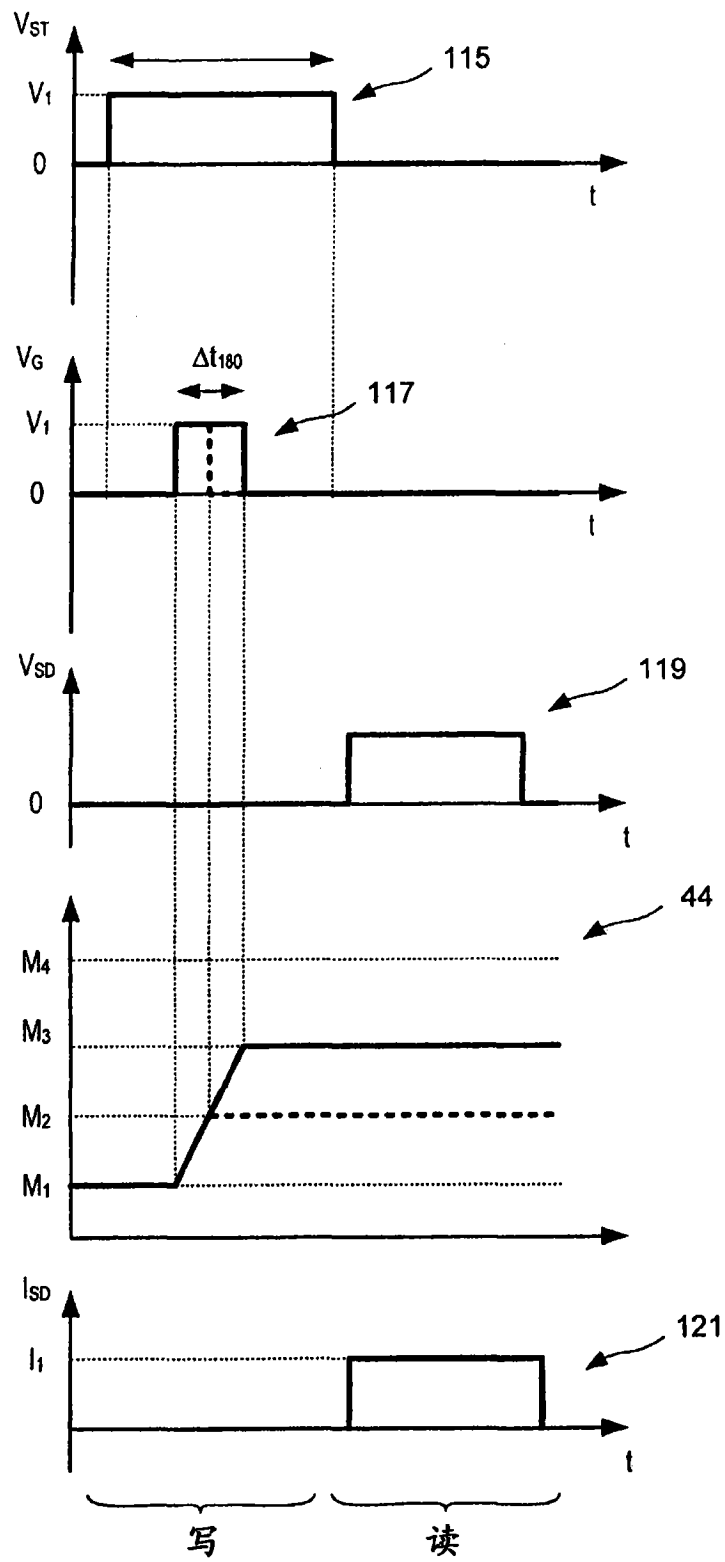


图 22

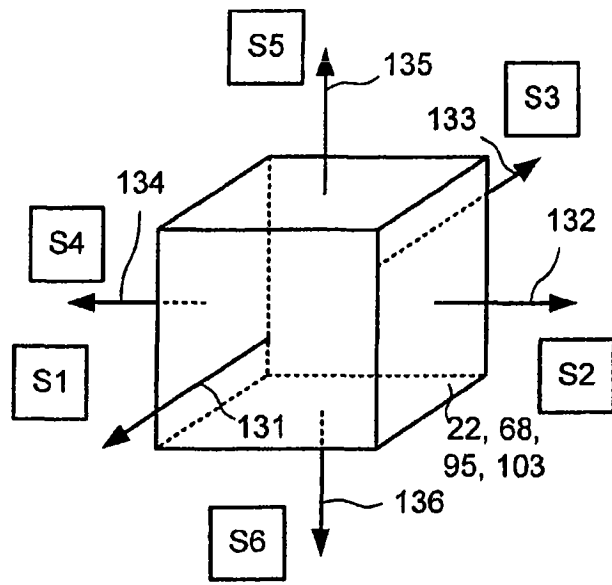


图 23

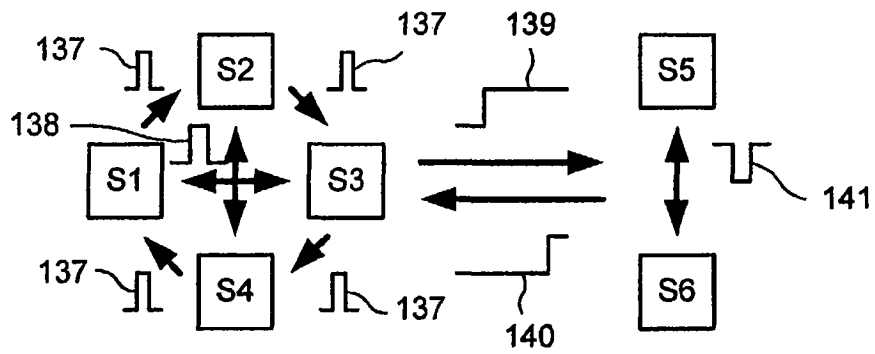


图 24

图 25

