



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104704564 A

(43) 申请公布日 2015. 06. 10

(21) 申请号 201380051532. 1

(22) 申请日 2013. 08. 06

(30) 优先权数据

61/679, 890 2012. 08. 06 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2015. 04. 01

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2013/053874 2013. 08. 06

(87) PCT国际申请的公布数据

W02014/025838 EN 2014. 02. 13

(71) 申请人 康奈尔大学

地址 美国纽约州

(72) 发明人 罗伯特·A·比尔曼

丹尼尔·C·拉尔夫 白奇峰

刘鲁乔

(74) 专利代理机构 北京英赛嘉华知识产权代理

有限责任公司 11204

代理人 王达佐 王艳春

(51) Int. Cl.

G11C 11/16(2006. 01)

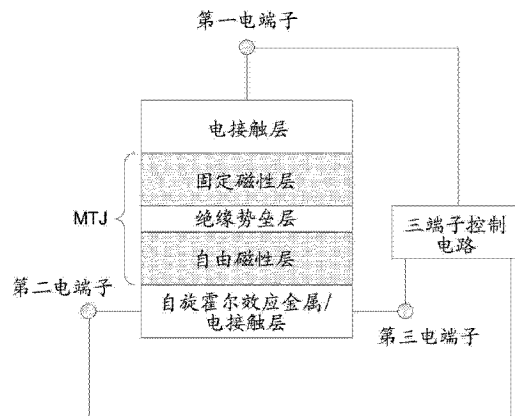
权利要求书6页 说明书18页 附图20页

(54) 发明名称

磁性纳米结构中基于自旋霍尔扭矩效应的电栅控式三端子电路及装置

(57) 摘要

基于自旋转移扭矩 (STT) 效应的三端子磁性电路和装置, 通过使用耦接至自由磁性层的自旋霍尔效应金属层中的充电电流以及将栅电压施加至自由磁性层并通过结合自旋极化电子或带电粒子的注入, 来操控用于包括非易失性存储功能、逻辑功能等各种应用的自由磁性层的磁化。充电电流经由第一电端子和第二电端子施加到自旋霍尔效应金属层, 而栅电压施加在第一电端子和第二电端子中的任一个与第三电端子之间。自旋霍尔效应金属层可与自由磁性层相邻、或与自由磁性层直接接触, 以允许在充电电流下通过自旋霍尔效应生成的自旋极化电流进入自由磁性层中。所公开的三端子磁性电路也可应用于信号振荡电路和其他应用。



1. 一种基于三端子电路配置的磁性隧道结存储装置,包括:

存储单元的阵列,用于存储数据;以及

存储控制电路,耦接至所述存储单元的阵列并且能够操作为读取所述存储单元中的数据或将数据写入所述存储单元中,

其中,每个存储单元包括:

磁性隧道结(MTJ),包括(1)具有固定磁化方向的固定磁性层、(2)具有可变磁化方向的自由磁性层、以及(3)位于所述自由磁性层与所述固定磁性层之间的非磁性结层,其中,所述非磁性结层由薄到足以允许电子在所述自由磁性层与所述固定磁性层之间隧穿的绝缘体材料形成;

自旋霍尔效应金属层,为非磁性的并且包括展示较大自旋霍尔效应的金属,以对引入所述自旋霍尔效应金属层中的充电电流作出反应来产生与所述充电电流垂直的自旋极化电流,所述自旋霍尔效应金属层与所述自由磁性层平行且相邻,以将所述自旋霍尔效应金属层中生成的所述自旋极化电流引入所述自由磁性层中;

第一电端子,从具有所述固定磁性层的一侧与所述磁性隧道结电接触以接收栅电压,所述栅电压改变流过所述磁性隧道结的自旋极化电流的电流阈值以用于切换所述自由磁性层的磁化;以及

第二电端子和第三电端子,在所述自由磁性层的相反两侧上与所述自旋霍尔效应金属层的两个接触位置电接触,以在所述自旋霍尔效应金属层中供给所述充电电流;以及

其中,所述存储控制电路耦接至所述第一电端子、所述第二电端子和所述第三电端子,从而(1)在所述自旋霍尔效应金属层中经由所述第二电端子和所述第三电端子供给所述充电电流、以及(2)横跨所述磁性隧道结供给所述栅电压,以引起不足以切换所述自由磁性层的所述磁化的小电流隧穿横跨所述磁性隧道结,而同时无需因所述充电电流而导致的流过所述自由磁性层的所述自旋极化电流的协作,

其中,所述存储控制电路配置成在写入模式中能够操作为,同时在所述自旋霍尔效应金属层中施加所述充电电流以及横跨所述磁性隧道结施加所述栅电压,从而将所述自由磁性层的所述磁化方向设置成或切换成用于表示存储位的期望方向,以及

其中,所述存储控制电路还配置成在读取模式中能够操作为将读取电压施加到所述第一电端子,从而在不切换所述自由磁性层的所述磁化方向的情况下,在所述第一电端子与所述自旋霍尔效应金属层之间供给隧穿横跨所述磁性隧道结的读取电流,以感测表示所述磁性隧道结中所述存储位的、所述自由磁性层的所述磁化方向。

2. 如权利要求1所述的装置,其中,

所述存储单元布置成行和列,

所述装置包括行自旋霍尔效应金属条,其中,每个行自旋霍尔效应金属条配置成与存储单元行接触而作为用于所述存储单元行中的每个存储单元的自旋霍尔效应金属层,并且每个行自旋霍尔效应金属条还耦接至所述存储控制电路,以携带作为用于所述存储单元行中的每个存储单元的充电电流的行充电电流,以及

所述装置包括列导电条,每个列导电条配置成与分别位于不同的存储单元行中的存储单元列接触,并且还耦接至所述存储控制电路,从而对于所述存储单元列中的每个存储单元施加行栅电压作为所述栅电压、或施加行读取电压作为所述读取电压。

3. 如权利要求 2 所述的装置,其中,

所述存储控制电路包括:

多个第一晶体管,以每个列导电条一个第一晶体管的方式分别耦接至所述列导电条,从而将所述行栅电压或所述行读取电压施加到所述存储单元的所述第一电端子;以及

多个第二晶体管,以每个行自旋霍尔效应金属条一个第二晶体管的方式分别耦接至所述行自旋霍尔效应金属条以连接至所述第二电端子,从而使作为用于相应的存储单元行中的每个存储单元的充电电流的、各个行自旋霍尔效应金属条中的所述行充电电流接通或关断。

4. 如权利要求 3 所述的装置,其中,所述存储控制电路包括:

多个第三晶体管,以每个行自旋霍尔效应金属条一个第三晶体管的方式分别耦接至所述行自旋霍尔效应金属条,从而连接在相应的存储单元行中的存储单元的所述第三电端子与电接地端之间。

5. 如权利要求 4 所述的装置,其中,

所述存储控制电路配置成,在读取选定的存储单元时,(1) 接通所有所述第一晶体管以将所述行读取电压施加到所有的所述存储单元中的所述第一电端子,(2) 关断所有的所述第二晶体管,以及 (3) 接通与所述选定的存储单元接触的、相应的行自旋霍尔效应金属条中的一个第三晶体管而关断其他第三晶体管。

6. 如权利要求 4 所述的装置,其中,

所述存储控制电路配置成,在对选定的存储单元进行写入时,(1) 接通耦接至与所述选定的存储单元接触的列导电条的一个第一晶体管,而关断其他第一晶体管,以将所述行栅电压施加到所述选定的存储单元的所述第一电端子;以及 (2) 接通与所述选定的存储单元接触的一个行自旋霍尔效应金属条中的一个第二晶体管和一个第三晶体管,而关断其他第二晶体管 and 第三晶体管。

7. 如权利要求 1 所述的装置,其中,所述存储控制电路包括:

第一晶体管,耦接至所述第一电端子,并且能够操作为接通或关断施加到所述第一电端子的所述栅电压或所述读取电压;以及

第二晶体管,耦接至所述第二电端子,以接通或关断用于每个存储单元的、所述自旋霍尔效应金属层中的所述充电电流。

8. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,

所述自旋霍尔效应金属层包括钽或钽合金。

9. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,

所述自旋霍尔效应金属层包括钪或钪合金。

10. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,

所述自旋霍尔效应金属层包括铌或铌合金。

11. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,

所述自旋霍尔效应金属层包括铯或铯合金。

12. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,

所述自旋霍尔效应金属层包括铱或铱合金。

13. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,

- 所述自旋霍尔效应金属层包括铈和铈合金。
14. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,  
所述自旋霍尔效应金属层包括铅或铅合金。
15. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,  
所述自旋霍尔效应金属层包括钨金属或钨合金。
16. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,  
所述自旋霍尔效应金属层包括过渡金属或过渡金属合金。
17. 如权利要求 16 所述的装置,其中,  
所述自旋霍尔效应金属层包括  $\text{Cu}_{1-x}\text{Bi}_x$ 、 $\text{Ag}_{1-x}\text{Bi}_x$ 、 $\text{Cu}_{1-x}\text{Ir}_x$ 、 $\text{Ag}_{1-x}\text{Ir}_x$ 、 $\text{Cu}_{1-x}\text{W}_x$ 、 $\text{Ag}_{1-x}\text{W}_x$ 、 $\text{Cu}_{1-x}\text{Ta}_x$ 、或  $\text{Ag}_{1-x}\text{Ta}_x$ 。
18. 如权利要求 16 所述的装置,其中,  
所述自旋霍尔效应金属层包括 Pd、Mo、Ru、Ir、Au、Pt、或 Bi。
19. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,  
所述自旋霍尔效应金属层包括具有 A15 晶体结构的金属间化合物。
20. 如权利要求 19 所述的装置,其中,  
所述具有 A15 晶体结构的金属化合物包括  $\text{Ta}_3\text{Al}$ 、 $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 、 $\text{W}_3\text{Ge}$ 、 $\text{Ir}_3\text{Hf}$ 、 $\text{TaN}$ 、 $\text{WN}$  或  $\text{NbN}$ 。
21. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,  
所述自旋霍尔效应金属层具有小于或等于所述自旋霍尔效应金属层的自旋扩散长度的五倍的厚度。
22. 如权利要求 21 所述的装置,其中,  
所述自旋霍尔效应金属层具有大于所述自旋霍尔效应金属层的自旋弛豫长度的厚度。
23. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,  
所述自旋霍尔效应金属层配置成呈现大于 0.05 的自旋霍尔角。
24. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,  
所述固定磁性层或所述自由磁性层包括 Fe、Co、Ni、或包含 Fe、Co 或 Ni 的合金。
25. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,  
所述固定磁性层或所述自由磁性层包括:包含 Fe、Co 或 Ni 以及非磁性材料的合金。
26. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,  
所述固定磁性层或所述自由磁性层包括两层或更多层。
27. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,  
所述固定磁性层或所述自由磁性层包括两层或更多层,并且每个层包括 (1)Co 和 Ni、(2)Co 和 Pt、或 (3)Co 和 Pd。
28. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,  
用于位于所述磁性自由层与所述固定磁性层之间的所述非磁性结层的所述绝缘体材料配置成,厚到足以获得隧穿通过所述磁性隧道结的低电流,并且薄到足以获得用于写入操作的低栅电压或用于读取操作的低读取电压。
29. 如权利要求 28 所述的装置,其中,  
所述绝缘体材料具有 1nm 与 2nm 之间的厚度。
30. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,

所述固定磁性层和所述自由磁性层中的每个具有与该层平行的磁化方向。

31. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,

所述固定磁性层和所述自由磁性层中的每个具有与该层垂直的磁化方向,以及  
所述装置还包括磁性机构以在所述自由磁性层处并且在与所述自由磁性层平行的场方向上产生磁偏置场。

32. 如权利要求 31 所述的装置,其中,

所述磁性元件包括磁性层,所述磁性层产生所述磁偏置场并且位于所述第一电端子与  
所述自旋霍尔效应金属层之间。

33. 如权利要求 32 所述的装置,其中,

每个存储单元包括与所述固定磁性层接触的非磁性间隔层,以及  
所述磁性层与所述非磁性间隔层接触,并且配置成在所述磁性层中具有磁化方向以在  
所述自由磁性层中产生所述偏置磁场。

34. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,其中,

所述自旋霍尔效应金属层与所述自由磁性层接触。

35. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,包括:

过渡金属层,与所述自由磁性层和所述自旋霍尔效应金属层接触并且位于所述自由磁  
性层与所述自旋霍尔效应金属层之间,以在所述自由磁性层处实现界面各向异性。

36. 如权利要求 35 所述的装置,其中,

所述自由磁性层和所述固定磁性层中的每个具有与该层平行的磁化方向。

37. 如权利要求 35 所述的装置,其中,

所述自由磁性层和所述固定磁性层中的每个具有与该层垂直的磁化方向。

38. 如权利要求 1 或 42 所述的装置,包括:

磁性绝缘体层,与所述自由磁性层和所述自旋霍尔效应金属层接触并且位于所述自由  
磁性层与所述自旋霍尔效应金属层之间,以防止所述自旋霍尔效应金属层内的所述充电电  
流泄漏到所述自由磁性层中并且允许在所施加的电压下进行电子的隧穿。

39. 一种用于操作基于三端子电路配置的磁性存储装置的方法,包括以下步骤:

提供磁性结构,其中,所述磁性结构包括:

自旋霍尔效应金属层,位于衬底上方;

自由磁性层,位于所述衬底上方并与所述自旋霍尔效应金属层相邻;

绝缘间隔层,位于所述衬底上方并与所述自由磁性层的、与所述自旋霍尔效应金属层  
相反的一侧接触;以及

固定磁性层,位于所述衬底上方且位于所述绝缘间隔层的、与所述自由磁性层相对  
的一侧上方;以及

将栅电压施加在与所述固定磁性层接触的第一电端子和所述自旋霍尔效应金属层之  
间,以在不允许所述栅电压单独引起所述自由磁性层的磁化方向的切换的情况下,改变所  
述自由磁性层的垂直磁各向异性;

将横向电流施加在所述自旋霍尔效应金属层中的两个电端子之间,以在不允许所述横  
向电流单独引起所述自由磁性层的所述磁化的切换的情况下,将竖直自旋极化电流感应到  
所述自由磁性层中;以及

使所述栅电压与所述横向电流同步,以利用(1)通过所述横向电流将所述竖直自旋极化电流感应到所述自由磁性层中以及(2)通过所述栅电压改变所述自由磁性层的所述垂直磁各向异性的组合操作,将所述自由磁性层的所述磁化切换成用于表示存储位的存储磁化。

40. 如权利要求 39 所述的方法,包括:

将读取电压栅电压施加在与所述固定磁性层接触的所述第一电端子和所述自旋霍尔效应金属层之间,但不允许所述读取电压单独引起所述自由磁性层的所述存储磁化方向的切换并且不将所述横向电流施加在所述自旋霍尔效应金属层中的所述两个端子之间,从而在读取所述存储位时使读取电流隧穿通过所述绝缘间隔层以用于感测所述固定磁性层与所述自由磁性层之间的电阻。

41. 如权利要求 40 所述的方法,包括以下步骤:

提供存储单元,所述存储单元具有布置成行和列的所述磁性结构;

提供行自旋霍尔效应金属条,每个行自旋霍尔效应金属条配置成与存储单元行接触而作为用于所述存储单元行中的每个存储单元的所述自旋霍尔效应金属层,并且能够操作为供给用于所述存储单元行中的每个存储单元的横向电流;

提供列导电条,每个列导电条配置成与分别位于不同的存储单元行中的存储单元列接触,并且能够操作为施加用于所述存储单元列中的每个存储单元的所述栅电压或所述读取电压;

在读取选定的存储单元时,将行读取电压施加到所有的所述存储单元的所述第一电端子,但不将所述横向电流施加到所述第二晶体管中的任一个,并允许仅所述选定的存储单元具有用于读取所述选定的存储单元的读取电流;以及

在对选定的存储单元进行写入时,将所述栅电压施加到包括所述选定的存储单元的存储单元列中的所述第一电端子、但不将所述栅电压施加到其它存储单元列,并且将所述横向电流供给在与所述选定的存储单元接触的一个行自旋霍尔效应金属条中、但不将所述横向电流供给在其它行自旋霍尔效应金属条中。

42. 一种基于三端子电路配置中的磁性隧道结生成振荡信号的装置,包括:

磁性隧道结(MTJ),包括:(1)固定磁性层,在所述固定磁性层中具有固定的磁化方向;(2)自由磁性层,在所述自由磁性层中具有可变的磁化方向;以及(3)非磁性结层,位于所述自由磁性层与所述固定磁性层之间,所述非磁性结层由薄到足以允许电子在所述自由磁性层与所述固定磁性层之间隧穿的绝缘体材料形成;

自旋霍尔效应金属层,为非磁性的并且包括展示较大自旋霍尔效应的金属,以对引入所述自旋霍尔效应金属层中的充电电流作出反应来产生与所述充电电流垂直的自旋极化电流,所述自旋霍尔效应金属层与所述自由磁性层平行且相邻,以将在所述自旋霍尔效应金属层中生成的所述自旋极化电流引入到所述自由磁性层中;

第一电端子,从具有所述固定磁性层的一侧上与所述磁性隧道结电接触;以及

第二电端子和第三电端子,在所述自由磁性层的相反两侧上与所述自旋霍尔效应金属层的两个接触位置电接触,以在所述自旋霍尔效应金属层中供给所述充电电流;以及

控制电路,耦接至所述第一电端子、所述第二电端子和所述第三电端子,从而(1)在所述自旋霍尔效应金属层中经由所述第二电端子和所述第三电端子供给恒定电流作为所述

充电电流,以使得因通过所述自旋霍尔效应金属层产生的所述自旋极化电流而引起所述自由磁性层的所述磁化的旋进;以及(2)供给横跨所述磁性隧道结经由所述第一电端子而引导的磁性隧道结电流,以使得电流隧穿横跨因所述自由磁性层的所述磁化的所述旋进而振荡的所述磁性隧道结,

其中,所述控制电路配置成调节所述磁性隧道结电流,以控制在隧穿横跨所述磁性隧道结的所述电流中的振荡的振荡频率或振荡幅度。

43. 如权利要求 42 所述的装置,其中,所述控制电路包括:

第一电流源,耦接至所述第二电端子以在所述自旋霍尔效应金属层中供给所述恒定电流;以及

第二电流源,耦接至所述第一电端子以供给所述磁性隧道结电流。

44. 如权利要求 42 所述的装置,其中,

所述固定磁性层和所述自由磁性层中的每个具有与该层垂直的磁化方向,以及所述装置还包括磁性机构以在所述自由磁性层处并且在与所述自由磁性层平行的场方向上产生磁偏置场。

45. 如权利要求 42 所述的装置,其中,

所述磁性元件包括磁性层,所述磁性层产生所述磁偏置场并且位于所述第一电端子与所述自旋霍尔效应金属层之间。

46. 如权利要求 45 所述的装置,其中,

每个存储单元包括与所述固定磁性层接触的非磁性间隔层,以及所述磁性层与所述非磁性间隔层接触,并且配置成在所述磁性层中具有磁化方向以在所述自由磁性层中产生所述偏置磁场。

## 磁性纳米结构中基于自旋霍尔扭矩效应的电栅控式三端子 电路及装置

[0001] 优先权要求和相关专利申请

[0002] 本专利申请要求于 2012 年 8 月 6 日提交的名为“磁性纳米结构中自旋霍尔扭矩效应的电栅控式调制”的第 61/679,890 号美国临时申请的优先权,该美国临时申请的全部内容通过引用作为本专利申请公开的一部分并入本文。

### 技术领域

[0003] 本专利涉及具有磁性材料或基于电子自旋扭矩效应及其应用的结构的电路及装置,包括非易失性磁性存储电路、非易失性磁性逻辑装置和自旋扭矩激励式纳米体振荡器。

### 背景技术

[0004] 电子和其他带电粒子将自旋处理为它们内在粒子属性之一,并且这种自旋与自旋角动量相关联。电子的自旋具有两个不同的自旋态。电流中的电子可通过在两个自旋态中具有相等概率而被去极化。电流中的电子通过使一个自旋态中的电子多于另一自旋态中的电子而被自旋极化。自旋极化电流可通过各种方法(例如,通过使电流通过具有特定磁化的磁性层)操纵自旋数来实现。在各种磁性微观结构中,自旋极化电流可被引入磁性层中以引起自旋极化电子对磁性层的角矩转移,并且这种转移可导致自旋转移扭矩施加到磁性层中的局部磁矩上以及磁性层中磁矩的旋进。在适当条件下,自旋转移扭矩可引起磁性层的磁化方向的翻转或切换。

[0005] 上述的自旋转移扭矩(STT)效应可用于包括 STT 磁性随机存取存储(MRAM)电路和装置的各种应用。例如,如图 1 中所示,STT-MRAM 电路可包括作为由两个或更多薄膜铁磁层或电极形成的磁阻元件的磁性隧道结(MTJ),其中,磁阻元件通常被称为具有可被切换或改变的磁矩的自由磁性层(FL)以及磁矩方向被固定的固定磁性层(PL)。当电偏置电压施加在电极之间时,自由磁性层(FL)和固定磁性层(PL)通过薄到足以允许电子通过量子力学隧穿过渡经过势垒层的绝缘势垒层(例如,MgO 层)来分离。横跨 MTJ 的电阻取决于 PL 层和 FL 层的相对磁性取向。FL 层的磁矩可在 FL 中的两个稳定取向之间切换。横跨 MTJ 的电阻在 PL 层和 FL 层的两个相对磁性取向展现出两个不同的值,两个不同的值可用于表示用于二进制数据存储或者可选地用于二进制逻辑应用的两个二进制状态“1”和“0”。该元件的磁阻用于从存储或逻辑单元读出该二进制信息。

[0006] 在各种 STT-MRAM 和其他电路中,MTJ 是两端子 MTJ 电路,其中,两端子 MTJ 电路引导电流从一个端子通过隧道势垒至另一个端子。图 1 还示出了使两端子控制电路耦接至 MTJ 的两侧上的端子的两端子电路配置。在写入操作中,两端子控制电路将选定电流流动方向上的充分大的写入电流从通过势垒层的一个端子发送至通过势垒层的另一个端子,以设置自由层相对于表示期望二进制状态的基准层的磁性取向。在读取操作中,两端子控制电路使用相同的两个端子通过势垒层发送小于较大写入电流的读取电流,以在 PL 和 FL 层的特定相对磁性取向测量横跨 MTJ 的与存储位相对应的电阻。



## 发明内容

[0007] 本申请中公开的技术和装置提供基于自旋转移扭矩 (STT) 效应的三端子磁性电路和装置, 该三端子磁性电路和装置通过组合自旋极化电子或带电粒子的注入, 通过使用耦接至自由磁性层的自旋霍尔效应金属层中的充电电流以及将栅电压施加至自由磁性层, 来操纵用于各种应用的自由磁性层的磁化, 各种应用包括非易失性存储功能、逻辑功能等。充电电流经由第一电端子和第二电端子施加到自旋霍尔效应金属层, 而栅电压施加在第一电端子和第二电端子中的任一个与第三电端子之间。自旋霍尔效应金属层可与自由磁性层相邻或与自由磁性层直接接触, 以允许在充电电流下通过自旋霍尔效应生成的自旋极化电流进入自由磁性层中。所公开的三端子磁性电路也可应用于信号振荡电路和其他应用。

[0008] 磁性隧道结 (MTJ) 存储单元可构建在用于非易失性磁性存储应用的三端子电路配置中, 并且能够操作成使用自旋霍尔效应金属层中的充电电流以及对于自由磁性层的栅电压的组合操作, 从而在写入操作中实现自由磁性层的磁化切换。MTJ 存储单元的读取可通过横跨 MTJ 施加读取电压来进行。

[0009] 三端子电路配置中的磁性隧道结 (MTJ) 也可用于形成基于自由磁性层中的磁旋进的信号振荡器, 其中, 自由磁性层中的磁旋进是由自旋扭矩而引起的, 而自旋扭矩是由通过自旋霍尔效应金属层中的充电电流感应出的自旋极化电流引起的, 并且感测电流可横跨待通过因自由磁性层中的磁旋进而导致的 MTJ 的电阻振荡来调制的 MTJ 施加, 由此产生了振荡信号。所生成的振荡信号的频率和振幅可用于控制横跨 MTJ 的感测电流。

[0010] 在附图、说明书和权利要求书中将对上述和其他特征、以及示例性实现方式和应用进行更加详细的描述。

## 附图说明

[0011] 图 1 示出了两端子电路配置中磁性隧道结 (MTJ, Magnetic Tunnel Junction) 的示例。

[0012] 图 2A 和图 2B 示出了三端子电路配置中磁性隧道结 (MTJ) 电路的示例, 其中, 三端子电路配置用于将自旋极化电流提供到 MTJ 的自由磁化层中实现自旋霍尔效应金属层。

[0013] 图 3A 和图 3B 示出了用于将自旋极化电流提供到自由磁化层中的自旋霍尔效应金属层的操作, 其中示出了面内充电电流  $J_c$  (或  $J_c$ ) 和面外自旋极化电流  $J_s$  的流动方向以及注入自旋  $\sigma$  的方向。

[0014] 图 4 示出了具有耦接至自旋霍尔效应金属层的电流源和横跨 MTJ 耦接的电压源的两端子 MTJ 电路的示例。

[0015] 图 5A 示出了说明采用用于写入操作的横跨 MTJ 的栅电压和自旋霍尔效应 (SHE) 的两端子 ST-MRAM 装置单元的示意性立体图的示例, 其中, ST-MRAM 单元包括具有面内磁性层的磁性隧道结和具有强 SHE 的非磁性条, 并且非磁性条设置于 STT-MRAM 装置结构的底部上。

[0016] 图 5B 示出了采用用于写入操作的横跨 MTJ 的栅电压和自旋霍尔效应 (SHE) 的两端子 ST-MRAM 装置单元的示意性立体图的另一示例, 其中, 磁性隧道结具有面内磁性层, 并且具有强 SHE 的非磁性条设置于 STT-MRAM 装置结构的顶部上。

[0017] 图 6A 示出了采用用于写入操作的横跨 MTJ 的栅电压和自旋霍尔效应 (SHE) 的三端子 ST-MRAM 装置单元示例,其中,FL 和 PL 的磁矩的平衡位置与膜平面垂直。

[0018] 图 6B 示出了采用用于写入操作的横跨 MTJ 的栅电压和自旋霍尔效应 (SHE) 的三端子 ST-MRAM 装置单元的示例,其中,FL 和 PL 的磁矩的平衡位置与膜平面垂直,并且附加的面内磁化的铁磁材料层设置于 MTJ 堆叠中以产生面内磁偏置场以用于限定自由磁性层的垂直磁化的明确切换方向。这种 MTJ 堆叠中的面内磁化的铁磁材料层(例如,如图所示的第一电端子与自旋霍尔效应金属层之间)排除了分离的磁性机构以在自由磁性层处产生磁偏置场。非磁性间隔层可被提供成与固定磁性层接触,磁性层与非磁性间隔层接触并配置成在磁性层中具有用于在自由磁性层中产生偏置磁场的磁化方向。

[0019] 图 7A 示出了用于展示磁各向异性的电压控制效应 (VCMA) 调制 MTJ 的 FL 的自旋霍尔扭矩切换的能力的示例性三端子 MTJ 装置。

[0020] 图 7B 和图 7C 示出了在三端子 SHE 装置中横跨磁性隧道结端子施加以基本上改变电流  $I_{Ta}$  的偏置电压  $V_{MTJ}$  的操作,其中,电流  $I_{Ta}$  由自旋霍尔层要求以用于影响平行对反平行 (P 对 AP) 切换(图 7A) 或反平行对平行 (AP 对 P) 切换(图 7B),其中,阴影区域指示接通状态 ( $V_{MTJ} = -400\text{mV}$ ) 和关断状态 ( $V_{MTJ} = 0\text{mV}$ ) 将切换概率从 100% 改变至零的电流范围。

[0021] 图 7D 示出了在一系列  $10\mu\text{s}$  脉冲下的栅控式自旋霍尔扭矩切换,其中,  $R_{MTJ}$  为 MTJ 的电阻(数据状态)。为了实现对于高电阻态的栅控式切换,  $V_{MTJ}$  在  $0\text{mV}$  与  $-400\text{mV}$  之间切换,而自旋霍尔电流  $I_{Ta}$  在  $0\text{mA}$  与  $-0.55\text{mA}$  之间切换。为了实现对于低电阻态的栅切换,  $V_{MTJ}$  在  $0\text{mV}$  与  $-400\text{mV}$  之间切换,而自旋霍尔电流  $I_{Ta}$  在  $0\text{mA}$  与  $.35\text{mA}$  之间切换。除非施加有  $V_{MTJ} = -400\text{mV}$  的脉冲,否则不会发生切换。

[0022] 图 8 提供了基于 MTJ 与自旋霍尔效应金属层之间的耦接、通过用于三端子存储单元的阵列的栅控式自旋霍尔扭矩切换来实现的交叉点存储构架的示例,其中,晶体管开关被共享并耦接至磁性隧道结单元的三个端子。

[0023] 图 9A 和图 9B 示出了用于偏置配置的晶体管开关操作状态的示例,其中,偏置配置可在图 8 中的栅控式自旋霍尔扭矩交叉点存储构架中用于写入和读取操作。

[0024] 图 10 示出了可用于在三端子 SHE/VCMA 装置中激励磁振荡并且输出相关联的微波功率以实现自旋扭矩纳米振荡性能的振荡电路的示例。黑色箭头指示三端子 SHE 装置内的电流分布,并且自旋霍尔电流  $I_{Ta}$  和隧道结偏置电流  $I_{MTJ}$  分别来自电流源 1 和电流源 2。

[0025] 图 11 示出了当 MTJ 偏置电流为  $I_{MTJ} = 60\mu\text{A}$  并且自旋霍尔金属 (Ta) 条中的自旋霍尔电流在  $I_{Ta} = -0.8\text{mA}$  与  $+0.8\text{mA}$  之间变化时,由磁性隧道结中的自旋霍尔扭矩激励式 FL 产生的微波谱。为了便于比较,竖直地移位了在不同电流下的谱。功率谱密度 (PSD) 是装置的输出微波功率的测量值。

[0026] 图 12A 示出了如图 10 中示意性指示的 SHE 驱动式自旋扭矩纳米振荡器的综合输出微波功率。红色三角形表示微波功率对比所施加的磁性隧道结电流。蓝色圆形表示由  $I_{MTJ}^2$  和相对应的电流的磁阻归一化的微波功率。

[0027] 图 12B 示出了作为所施加的 MTJ 电流的功能的、图 10 中的 SHE 激励的且 VCMA 调整的自旋扭矩纳米振荡器的中心振荡频率。

[0028] 图 13 示出了具有薄过渡金属层的三端子 MTJ 装置的示例,其中,薄过渡金属层位于自由磁性层与 SHE 金属层之间以用于在自由磁性层中增强垂直磁各向异性。

[0029] 图 14A 和图 14B 示出了具有薄磁性绝缘体层的三端子 MTJ 装置的两个示例,其中,薄磁性绝缘体层位于自由磁性层与 SHE 金属层之间以用于减少自旋霍尔效应金属层中的充电电流泄漏至导电性自由磁性层中。

### 具体实施方式

[0030] 图 2A 示出了具有耦接至 MTJ 结的自由磁性层的自旋霍尔效应 (SHE) 金属层的三端子 MTJ 装置的示例。MTJ 中的层和 SHE 金属层 (例如对材料和尺寸的选择) 配置成在自由磁性层与 SHE 金属层之间提供期望的接口电子耦接,以在注入到 SHE 金属层中的给定充电电流下在 SHE 金属层中生成自旋极化电子或带电粒子的大流动,以及将所生成的自旋极化电子或带电粒子有效注入至 MTJ 的自由磁性层中。自由磁性层或固定磁性层中的每个可为适当磁性材料的单层、或具有两层或更多层的不同材料的复合层。自由磁性层和固定磁性层可导电,而位于自由磁性层与固定磁性层之间的势垒层是电绝缘的并且薄到足以允许电子经由隧穿通过。自旋霍尔效应金属层可与自由磁性层相邻、或者与自由磁性层直接接触,以允许在充电电流下经由自旋霍尔效应生成的自旋极化电流进入自由磁性层。

[0031] 图 2A 中的 MTJ 装置中的三个端子可用于实现两个独立的控制机构,而这在图 1 中的两端子 MTJ 装置中是不可能实现的。如图所示,第一控制机构通过第一端子施加横跨 MTJ 结的栅电压,以使得因所施加的栅电压而引起的自由磁性层处的电场可改变自由磁性层的磁化,包括影响自旋极化电流的阈值的垂直磁化,其中自旋极化电流的阈值可通过来自注入到自由磁性层中的自旋极化电流的自旋扭矩转移来切换自由磁性层的磁化。第二、独立的控制机构在 SHE 金属层的与 MTJ 接触的区域两个相反侧上,使用 SHE 金属层的两个接触位置处的第二电端子和第三电端子,将充电电流供给至 SHE 金属层中以产生基于自旋霍尔效应的自旋极化电子或带电粒子。

[0032] 原则上,MTJ 的层和 SHE 金属层可配置成,允许横跨 MTJ 的栅电压或 SHE 金属层中的充电电流中的任一个单独引起自由磁性层的磁化切换。然而,在本申请中所公开的三端子 MTJ 装置中,横跨 MTJ 的栅电压被控制成小于足以单独引起隧穿通过 MTJ 的势垒层以触发切换的显著电流的阈值电压,并且相似地,SHE 金属层中的充电电流被控制成小于足以单独引起显著量的自旋极化电荷进入自由层以触发切换的阈值充电电流。应注意,本申请中所公开的三端子 MTJ 装置和技术使用横跨 MTJ 的栅电压和 SHE 金属层中的充电电流两者的组合操作来共同地触发自由磁性层中的切换。在图 2A 中,三端子控制电路耦接至第一电端子、第二电端子和第三电端子,以实现上面期望的控制操作。

[0033] 具体地,三端子控制电路操作如下。栅电压施加在与固定磁性层接触的第一电端子与自旋霍尔效应金属层之间,以改变自由磁性层的垂直磁各向异性而不允许栅电压单独引起自由磁性层的磁化方向的切换;以及充电电流被施加在自旋霍尔效应金属层中的两个电端子之间,以再无需切换自由磁性层的磁化的情况下将自旋极化电流感应到自由磁性层中。栅电压的施加和充电电流的施加被同步以切换自由磁性层的磁化。

[0034] 图 2B 示出了通过 MTJ 电路和 SHE 电路实现的、图 2A 中的三端子控制电路的示例。MTJ 电路耦接在第一电端子与第三电端子之间,以在不切换自由磁性层的磁化的情况下,施加期望的横跨 MTJ 的电压。SHE 电路耦接在第二电端子与第三电端子之间,以将充电电流供给在 SHE 金属层中。控制电路进一步耦接至 MTJ 电路和 SHE 电路,以控制 MTJ 电路和 SHE

电路的操作,例如控制横跨 MTJ 的电压振幅或方向、SHE 金属层中的充电电流的电流振幅或方向、以及在用于切换自由磁性层时使电压和充电电流同步。

[0035] 图 2A 和图 2B 以及本申请中的其他部分中公开的三端子 MTJ 装置可被实现为提供难以在两端子 MTJ 装置中实现的电路配置和操作性特征以及在应用中难以实现的某些优点。例如,在自旋霍尔效应金属层的两个接触位置处经由两个电端子施加到自旋霍尔效应金属层的充电电流,用于将自旋极化电流注入到 MTJ 的自由磁性层中,以用于在自由磁性层中实行自旋扭矩转移,排除了如两端子 MTJ 装置中那样、对横跨 MTJ 施加大电流以用于将显著自旋扭矩转移实行到自由磁性层中以切换自由磁性层的磁化的需要。因为存在通过用于存储单元应用的隧道势垒层的电流脉冲影响自由磁性层 (FL) 的磁性再取向的不利方面,所以这可能是有利的。例如,需要隧穿通过 MTJ 结以用于切换操作的高电流脉冲可能导致 MTJ 中的绝缘势垒层的电气完整性的恶化。在两端子 MTJ 装置中,FL 可被设计成减少用于切换操作所需的写入电流脉冲振幅。然而,因为该两端子 MTJ 装置中的读取操作和写入操作经由 MTJ 的相同的两个端子来实行,所以需要为存储单元的快速读取提供足够大信号的电偏置可产生较小但接近用于 MTJ 的切换操作的期望阈值电流的、通过 MTJ 的隧穿电流。在读取操作期间因暂时对读取电流增加少量附加电流的电噪声而导致 MTJ 不经意切换的情况下,该条件可导致“写后读 (write-upon-read)”错误。这种“写后读”错误率随着读取操作期间通过 MTJ 的隧穿电流与用于切换 MTJ 的 STT 阈值电流之间的差异变小而增加。由此,各种两端子 MTJ 装置面临以下冲突,即降低用于切换 MTJ 的隧穿电流的振幅的需要与对于与使用足够大的读取电流在短时间内完成用于读取存储位的 MTJ 电阻的测量相关联的快速读取的需要之间的冲突。不同于两端子 MTJ 装置,本申请中的三端子 MTJ 装置配置成在横跨 MTJ 的电压上提供两个分离且独立的控制,以消除两端子 MTJ 装置中的上述两个难题,并且在仍能够实现快速读取操作、而不经历两端子 MTJ 装置中的“写后读”错误的情况下,可在写入操作期间实现横跨 MTJ 的低隧穿电流。为了在本申请中所公开的三端子 MTJ 装置中实行切换,两个分离的控制被同步,以切换自由磁性层的磁化。

[0036] 对于各种电路中的三端子 MTJ 单元的大型阵列,用于三端子 MTJ 单元的阵列的列驱动电路和行驱动电路可设计成通过共享电路元件来减小整个电路尺寸。正如在下面的示例中更加详细描述的那样,交叉点存储构架可基于栅控式自旋霍尔扭矩切换来实现,以提供三端子 MTJ 单元中晶体管开关的共享,由此改善了使用大型阵列的三端子 MTJ 单元的电路的整体紧凑性。

[0037] 在另一方面,作为用于本申请中所公开的三端子 MTJ 装置的输入/输出端的三个端子的可用性能够用于实现各种逻辑操作。相反,通过仅两个端子可用性,两端子 MTJ 装置趋向于难以(或者在一些情况下是不可行的)建立用于基于自旋扭矩切换操作的各种二进制逻辑应用的电路。

[0038] 在又一方面,本申请中所公开的与自旋转移扭矩结合的三端子 MTJ 可配置成采用磁性配置,以使得自由磁性层具有仅一个稳定的磁性态、但可通过由撞击在自由磁性层上的、稳定自旋极化直流电流生成的抗阻尼扭矩在微波或射频频率处激励成与该平衡态相关的磁旋进。振荡的频率通过经历自由磁性层的总时间平均有效磁场来确定,并且振荡的频率可随着磁旋进的振幅而变化,而磁旋进的振幅取决于偏置电流的振幅。由于自由磁性层的旋进导致的 MTJ 的时变磁阻提供微波输出信号。由此,可在 MTJ 中采用自旋转移扭矩,以产

生自旋扭矩纳米振荡器 (STNO), 其中, 自旋扭矩纳米振荡器具有芯片上通信中的潜在应用以及信号处理应用。在基于两端子 MTJ 装置的 STNO 装置中, 由于 MTJ 的两端子特性, 振荡器的振幅无法与其频率独立地电改变。

[0039] 本申请三端子 MTJ 装置和应用的具体实现和实例提供为如下。

[0040] 在各种重 (高原子序数) 金属 (例如, Pt、Ta、W、Hf 等) 中的巨大自旋霍尔效应提供了用于本申请中新的三端子 MTJ 装置的基础。图 3A 和图 3B 中示出了具有大原子序数的某些金属中的自旋霍尔效应。图 3A 示出了与 MTJ 的自由磁性层直接接触, 以用于接收面内充电电流  $J_c$  (或  $J_e$ ) 和用于将自旋极化电流  $J_s$  产生到自由磁化层中的自旋霍尔效应金属层。示出了面内充电电流  $J_c$  (或  $J_e$ ) 和面外自旋极化电流  $J_s$  的流动方向和注入自旋  $\sigma$  的方向。图 3B 还示出了自旋霍尔效应在充电电流中以相反的方向分离两个自旋态, 其中, 该相反的方向垂直于面内充电电流  $J_c$  (或  $J_e$ )。因此, 通过控制面内充电电流  $J_c$  (或  $J_e$ ) 在 SHE 金属层中的电流方向, 两个自旋态中的一个可被选择作为注入自由磁化层中的自旋极化电流  $J_s$ 。

[0041] 图 3B 还示出了, 通过充电电流  $J_c$  (或  $J_e$ )、注入自旋矩  $\vec{\sigma}$  的方向 (非角矩) 以及充电电流之间的关系:  $\vec{J}_c \propto \theta_{SH} \vec{\sigma} \times \vec{J}_c$  来确定注入自旋在自旋极化电流  $J$  中的取向, 其中,  $\theta_{SH}$  是自旋霍尔角并且是特定于每种材料的参数、并且量化 SHE 在每种材料中的幅度。

[0042] 在自旋霍尔效应中, 由于电子在垂直于电流流动方向的方向上的自旋相关偏转, 流动通过重金属薄膜层的电流创建横向自旋电流。如图 3A 和图 3B 所示, 相反的自旋角动量的电子以相反的方向偏转。在高电阻率  $\beta$  - Ta 的层中, 例如, 自旋霍尔效应在横向自旋电流密度与纵向电流密度的 0.15 一样高时尤为强大。可使用自旋电流以在相邻的磁性膜的磁化上施加扭矩, 并由此使得三端子磁性电路或装置用于反转形成在自旋霍尔层的顶部上的、MTJ 的自由磁性层的磁性取向, 如图 2A 和图 2B 中所示的那样。

[0043] 图 4 示出了包括电压源和电流源的三端子 MTJ 电路的示例, 其中, 电压源耦接在横跨 MTJ 的第一电端子与第三电端子之间, 电流源在第二电端子与第三电端子之间耦接至自旋霍尔效应金属层。在本示例中 FL 层和 PL 层示出为随着面内磁化而与该层的平面平行, 其中, 面内磁化与 SHE 金属层中的面内充电电流  $J_c$  (或  $J_e$ ) 的方向垂直。

[0044] 本申请三端子 MTJ 装置操作为通过同时施加横跨 MTJ 结的栅电压和 SHE 金属层中的充电电流而在自由磁性层中实行磁化的切换。三端子 MTJ 装置的该方面基于电压控制式磁各向异性 (VCMA), 其中, 电场通过改变铁磁 / 氧化物界面处的电子结构而改变铁磁膜的垂直各向异性。VCMA 已示出为实现 MTJ 中 FL 的矫顽磁场的强力调整, 并且通过横跨 MTJ 施加的电压脉冲来指示 FL 的拨动切换。VCMA 的显著方面在于, 其在很小或无电流流动通过 MTJ 时提供影响 FL 的切换的潜在性, 而这能够通过最小化欧姆损失来降低 MRAM 写入操作的能源成本。

[0045] 考虑图 4 中的示例, SHE 金属层中的面内充电电流  $J_c$  被设置成产生与 SHE 金属层中的面内充电电流  $J_c$  垂直的自旋极化  $J_s$ 。当 SHE 金属层在横向方向上显著薄时, 由于通过电子或带电粒子的传播引起的自旋弛豫 (spin relaxation), 自旋极化  $J_s$  在不明显损失注入自旋矩  $\vec{\sigma}$  的情况下注入到自由磁化层中。SHE 金属层中的面内充电电流  $J_c$  的幅度被控制成显著小, 以使得已进入自由磁化层的自旋极化电流  $J_s$  显著小于用于自旋极化电流的阈值

电流,从而产生自由磁性层的磁化的切换。然而,横跨 MTJ 结的栅电压被施加以通过因电压控制式磁各向异性 (VCMA) 而导致改变铁磁 / 氧化物界面处的电子结构,来改变垂直各向异性,从而将用于产生自由磁性层的磁化切换的自旋极化电流所需的阈值电流降低到使已进入自由磁化层的自旋极化电流  $J_s$  等于或高于用于切换 MTJ 的新降低的阈值电流的电平。在同时施加充电电流和栅电压的条件下,自由磁性层的磁化被切换。

[0046] 图 5A 示出了说明采用用于写入操作的横跨 MTJ 的栅电压和自旋霍尔扭矩 (SHE) 的三端子 ST-MRAM 装置单元的示意性立体图的示例,其中,ST-MRAM 单元包括具有面内磁性层的磁性隧道结和具有强 SHE 的非磁性条,并且非磁性条设置于 STT-MRAM 装置结构的底部上。图 5B 示出了采用用于写入操作的横跨 MTJ 的栅电压和自旋霍尔扭矩 (SHE) 的三端子 ST-MRAM 装置单元的另一示例,其中,磁性隧道结具有面内磁性层,并且具有强 SHE 的非磁性条设置于 STT-MRAM 装置结构的顶部上。

[0047] 在 MTJ 的自由层和基准层的磁矩  $\vec{m}_1$  和  $\vec{m}_2$  取向成与膜平面垂直的情况下, SHE 和 VCMA 也可结合以产生 MTJ 中的 FL 的栅控式 SHE 切换。在这种配置中,来自 SHE 的注入自旋  $\vec{\sigma}$  仍然沿着 MTJ 层的平面中的  $+/-x$  轴,而对于  $\vec{m}_1$  的平衡位置沿着与 MTJ 层垂直的  $+/-z$  轴对齐。由此,  $\vec{m}_1$  的方向与  $\vec{\sigma}$  的方向彼此垂直。在这种情况下,可使用有效磁场  $H_{ST}$  对来自自由 SHE 生成的自旋电流的自旋扭矩的效果进行描述。

[0048] 图 6A 示出了采用用于写入操作的横跨 MTJ 的栅电压和自旋霍尔扭矩 (SHE) 的三端子 ST-MRAM 装置单元的示例,其中, FL 和 PL 的磁矩的平衡位置与膜平面垂直。

[0049] 图 6B 示出了采用用于写入操作的横跨 MTJ 的栅电压和自旋霍尔扭矩 (SHE) 的三端子 ST-MRAM 装置单元的示例,其中, FL 和 PL 的磁矩的平衡位置与膜平面垂直,并且附加的面内磁化的铁磁材料层被设置在 MTJ 堆叠中,以产生用于限定自由磁性层的垂直磁化的明确切换方向的面内磁偏置场。

[0050] 上述新的三端子 MTJ 装置配置的实施方式可用于解决目前限制基于各种两端子 MTJ 装置的应用的可靠性挑战,并且也提供了改善的输出信号。该新的三端子 MTJ 装置配置也可提供在 MTJ 装置中使低阻抗切换 (写入) 处理与高阻抗感测 (读取) 处理之间分离的额外优点。更具体地,装置和方法在此处公开了:使自旋霍尔扭矩 (SHE) 与纳米级磁性元件的磁各向异性的电压控制 (VCMA) 结合,以实现磁性隧道结中双稳态磁性元件的磁性取向的电栅控式切换,以及自旋扭矩纳米振荡器 (STNO) 的振荡频率和输出功率的电气调整。这种三端子 MTJ 设计实现了磁性随机存取存储电路和高性能非易失性逻辑电路的更有成效且有效的设计,并且实现了对于提供振荡微波振幅和频率分离且独立控制的 STNO 的新的三端子方案。

[0051] 在实现方案中,适合于所公开的三端子 MTJ 装置的 MTJ 层的材料被选择为形成展现出强电压控制式磁各向异性 (VCMA) 效果的磁性隧道结,其中,磁性隧道结的自由层设置成与非磁性金属条相邻,非磁性金属条可由携带在膜平面中流动的电流的、具有强自旋霍尔扭矩 (SHE) 的材料构成。在一些实现方式中,磁性隧道结由两个铁磁薄膜元件构成,两个铁磁薄膜元件由薄绝缘层 (小于 2.0nm 的厚度) (典型地, MgO 或一些其他绝缘体材料) 分离,薄绝缘层充当可供电子通过量子力学过程隧穿的隧道势垒。可以或可以不由多层的薄膜材料构成的铁磁元件之一 (固定层 (PL)) 具有固定的磁化方向,而可以或可以不由多层

的薄膜材料构成的其他铁磁层（自由层（FL））在足够强的自旋电流或所施加的磁场的帮助下自由旋转。作为自旋电流的流动结果，根据 FL 的磁化是否被对齐为与 PL 的磁化方向或多或少平行或反平行，MTJ 的电阻处于低电阻态（平行）或高电阻态（反平行）。MTJ 被制造成具有 10% 或更多的磁阻变化。

[0052] 绝缘层和相邻的 FL 表面的材料成分也被选择为使得两者之间的电界面产生改变 FL 的垂直磁各向异性的大量界面磁各向异性能量。材料的适当组合包括（但不限于）用于绝缘层以及用于 FL 的界面表面层的 MgO、Co、Fe、具有 Co 和 / 或 Fe 成分的合金。界面电子结构使得通过施加横跨绝缘层的电压偏置而产生的电场能够基本改变界面磁各向异性能量，从而产生 FL 的电压控制的磁各向异性（VCMA）。在一些 MTJ 装置实现方式中， $25 \mu \text{J}/\text{m}^2 (\text{V}/\text{nm})^{-1}$  或更多的每单位磁场的界面磁化能量上的变化可产生磁各向异性中的不必要的变化。

[0053] 在制造三端子 MTJ 时，磁性隧道结被制造成使得其自由层与薄膜条（如自旋霍尔扭矩（SHE）金属层）相邻且良好地电接触以生成自旋极化电流，其中薄膜条由具有高自旋霍尔角（大于 0.05）的材料构成。例如，在实现方式中，这种 SHE 金属层可具有小于或不大于其自旋扩散长度的 5 倍的厚度，从而在与 MTJ 的自由磁性层界面处在所生成的自旋极化电流中以特定的自旋态保持显著的自旋数。在采用横跨 MTJ 的偏置电压以经由 VCMA 效应改变 FL 的磁各向异性和 / 或矫顽场的情况下，经过 SHE 金属薄膜条的电流可根据流过自旋霍尔层的电流方向、经由自旋霍尔效应提供横向自旋电流，或者可选地将其激励成持续的微波振荡，其中，横向自旋电流将在 MTJ FL 上施加足以有效地反转其磁性取向的自旋扭矩。这种组合实现了新的自旋转移扭矩装置功能：栅电压调制的自旋扭矩切换和栅电压调制的自旋扭矩振荡。前者使得用于非易失性数字逻辑应用的能量有效且栅控式切换、以及用于非易失性数字存储应用的更加能量有效且经改善的架构、包括用于实现并不是每个 MTJ 都需要控制晶体管的、具有最大密度的交叉点几何结构的磁性存储电路的简单方案变得可能。后者提供自旋扭矩纳米振荡器的微波振荡振幅和频率的分离且独立的控制。

[0054] 参照图 2A、图 2B、图 4、图 5A、图 5B、图 6A 和图 6B 中的三端子 MTJ 装置示例，三端子 MTJ 装置可配置成包括磁性隧道结（MTJ）和自旋霍尔效应金属层，其中，磁性隧道结（MTJ）包括（1）具有固定磁化方向的固定磁性层、（2）具有可变磁化方向的自由磁性层、以及（3）非磁性结层，该非磁性结层位于自由磁性层与固定磁性层之间并且由薄到足以允许电子在自由磁性层与固定磁性层之间隧穿的绝缘体材料形成，并且自旋霍尔效应金属层为非磁性的并且包括展示大自旋霍尔效应，以反应于引入自旋霍尔效应金属层中的充电电流而产生与充电电流垂直的自旋极化电流，自旋霍尔效应金属层与自由磁性层平行且与自由磁性层接触，以将在自旋霍尔效应金属层中生成的自旋极化电流引入自由磁性层中。三端子 MTJ 装置还包括第一电端子、第二电端子和第三电端子，其中，第一电端子在具有固定磁性层的一侧与 MTJ 电接触以接收改变横跨 MTJ 流动的电流阈值的栅电压，用于切换自由磁性层的极化的自旋极化电流，第二电端子和第三电端子在自由磁性层的两个相反侧上与自旋霍尔效应金属层的两个接触位置电接触，以在自旋霍尔效应金属层中供给充电电流。控制电路耦接至第一电端子、第二电端子和第三电端子，从而（1）经由第二电端子和第三电端子在自旋霍尔效应金属层中供给充电电流、以及（2）提供引起横跨 MTJ 的小电流隧穿的、横跨 MTJ 的栅电压，其中，横跨 MTJ 的小电流隧穿在没有由充电电流引起的横跨自由磁性层流动

的自旋极化电流协作时,不足以切换自由磁性层的磁化。

[0055] 对于存储器应用,三端子 MTJ 装置中的控制电路可具体配置成:在写入模式中能够操作以同时施加自旋霍尔效应金属层中的充电电流和横跨 MTJ 的栅电压,从而将自由磁性层的磁化方向设置或切换成用于表示存储位的期望方向,并且在读取模式中,控制电路能够操作成将读取电压施加到第一电端子,以在第一电端子与自旋霍尔效应金属层之间供给隧穿横跨 MTJ 的读取电流而不切换自由磁性层的磁化方向,从而感测表示 MTJ 中的存储位的自由磁性层的磁化方向。

[0056] 参照图 5A 和图 5B, SHE 被采用作为写入机构,并且磁性隧道结 (MTJ) 被采用为在由 SHE 所生成的自旋电流而施加自旋扭矩过程中,施加用于调制自由层 (FL) 的磁性取向的栅电压、以及感测可偏置自由层相对于固定基准层 (RL) 的磁性取向。MTJ 可为具有总体处于亚微米或纳米范围的横向尺寸的柱状磁性装置。具有磁矩的自由铁磁层由具有小至中型矫顽场的软铁磁材料制成。具有磁矩的固定铁磁层由具有大型矫顽场的软或硬铁磁材料制成、或者被附加的反铁磁层固定。用于自由磁性层和固定磁性层的典型的厚度范围为小于一纳米至数十纳米。FL 和 PL 由晶体绝缘间隔层分离,晶体绝缘间隔层具有小于 2nm 的厚度,并且例如为 MgO 或掺硼 MgO (Mg (B) O) 或用于生成与显著影响 FL 的整个磁各向异性的铁磁自由层的表面接触的每单位面积的界面磁各向异性能量密度的任何其他晶体或无定形绝缘层。这种磁各向异性能量密度基本上可由横跨绝缘体 - FL 界面所施加的电场来改变。用于磁性层的合适材料的示例可包括 (但不限于) Fe、Co、Ni、这些元素的合金 (例如,  $Ni_{1-x}Fe_x$ )、这些元素与非磁性材料的合金 (例如,  $Fe_{1-x}Pt_x$  和  $Co_xFe_yB_{1-(x+y)}$ )、以及由这些材料制成的铁磁多层 (例如,  $(Co/Ni)_n$ 、 $(Co/Pt)_n$  和  $(Co/Pd)_n$ , 其中, n 表示多层的重复数量)。用于 MTJ 结构的材料被选择为,使得在铁磁自由层的接触绝缘层的表面与随着 (施加在绝缘体的一侧上的铁磁基准层与绝缘体的另一侧上的自由层之间) 的电压显著变化的表面之间存在每单位面积接触的大量界面磁各向异性能量密度。变量为在绝缘体 - 自由层界面处改变电场的所施加电压的强度,并因此改变由 FL 经历的界面磁各向异性。

[0057] 与磁性隧道结的 FL 接触的是由展现强自旋霍尔扭矩 (SHE) 的各种材料中的一种制成的非磁性薄膜条。用于该层的合适材料包括高电阻率 Ta ( $\beta$  - Ta)、W ( $\beta$  - W)、Hf 和 Ir 层。用于 SHE 层的其他合适材料包括 (但不限于) Pt、Pd、Nb、Mo、Ru、Re、Os、Ir、Au、Tl、Pb、Bi 以及基于过渡金属的合金 (例如,  $Cu_{1-x}Bi_x$ 、 $Ag_{1-x}Bi_x$ 、 $Cu_{1-x}Ir_x$ 、 $Ag_{1-x}Ir_x$ 、 $Cu_{1-x}W_x$ 、 $Ag_{1-x}W_x$ 、 $Cu_{1-x}Ta_x$ 、 $Ag_{1-x}Ta_x$ 、 $Hf_xIr_y$ )、结合具有高原子序数的一个或多个元素的高电阻率金属间化合物 (例如, 诸如  $Ta_3Al$ 、 $Nb_3Sn$ 、 $W_3Ge$ 、 $Ir_3Hf$  的具有 A15 晶体结构的化合物、以及诸如 TaN、WN 和 NbN 的其他化合物)。非磁性 SHE 条图案化成纳米级或者微米级宽度,并且具有小于或近似等于其自旋扩散长度的五倍的厚度。

[0058] 在图 5A 和图 5B 中的示例中,三个端子形成电连接至装置。一个端子位于柱上、接近 MTJ 的 PL,而其他两个端子为非磁性条的两端部。写入电流施加在非磁性条上的两个端子之间,而偏置电压施加在柱上的端子与非磁性条上的两个端子中的任一个之间,以影响 FL 磁化的切换的加栅、或者可替代地调制自旋扭矩纳米振荡实现方式中的振荡频率。为了读取用于逻辑栅极或存储装置实现方式的装置的二进制态,偏置电流施加在柱上的端子与非磁性条上的两个端子中的任一个之间。

[0059] 在图 5A 和图 5B 中,MTJ 的 FL 可如图 5A 中所示位于柱的底部处、或者如图 5B 中所



示位于柱的顶部上。在任一种情况下,具有强 SHE 的非磁性条均一直与 FL 相邻。当 FL 位于底部时,非磁性条也处于装置的底部、衬底的旁边。当 FL 位于顶部上时,FL 放置在隧道势垒的衬底侧上,FL 在隧道势垒上方,并且非磁性条位于装置的顶部上。

[0060] 当 FL 和 RL 在三端子 MTJ 装置中的平面中被极化、并且 FL 和 RL 的面内磁化方向与上文中提及的电流方向垂直时(即,沿着  $\pm x$  轴方向), $m_1$  与来自 SHE 的注入自旋  $\vec{\sigma}$  共线(平行或反平行)。在这种情况下,来自 SHE 的注入自旋充当根据自旋取向可具有任一符号(即,正阻尼或负阻尼)的有效磁性阻尼。根据这种配置,SHE 感应的切换以与传统的自旋扭矩感应相同的方式工作。传统的自旋扭矩切换采用由非磁性间隔层分离的一对铁磁层,其中一个铁磁层为固定极化层,而另一个铁磁层为磁矩取向可通过来自极化电流的自旋扭矩的转移而切换的自由层。一个区别在于,自旋霍尔效应装置中的自旋电流是使用非磁性材料而非铁磁极化层生成的。当  $\vec{m}_1$  与  $\vec{\sigma}$  平行时,自旋电流将使当前的磁化取向更加稳定,并且将不会引起切换。与此不同地,当  $\vec{m}_1$  与  $\vec{\sigma}$  反平行时,如果自旋电流足够大,则 FL 的磁化将被切换。因此,具有相反符号的电流将具有相反方向的自旋注入 FL 中,那些相反的取向将导致 FL 磁化的不同的优选取向,由此,可通过确定流经 SHE 生成层的电流的方向来实现可逆确定性切换。

[0061] 通过自旋霍尔效应施加的自旋扭矩与电压控制式磁各向异性 (VCMA) 效应的这种组合的结果为,在没有热波动的情况下,流过横向自旋霍尔层以引起面内极化的磁性自由层通过自旋霍尔效应的自旋扭矩切换所需的临界或阈值电流密度取决于自由层的有效垂直退磁化场  $H_{demag}^{eff}$ ,

[0062]

$$|J_{c0}| \approx \frac{2eM_S t_{free} \alpha}{\hbar \theta_{SH}} (H_c + 0.5H_{demag}^{eff}) \quad (1)$$

[0063] VCMA 效应  $H_{demag}^{eff}$  的结果是可变的,为横跨 MTJ 施加的电压  $V_{MTJ}$  的函数:

$$H_{demag}^{eff} = 4\pi M_S - 2K_u(V_{MTJ})/M_S \quad (2)$$

[0065] 此处, $e$  为电子电荷, $M_S$  为 CoFeB 自由层的饱和磁化, $t_{free}$  ( $t_{自由层}$ ) 为其厚度并且  $\alpha$  为吉尔伯特阻尼 (Gilbert damping) 值, $H_c$  为面内磁各向异性场,并且  $K_u(V_{MTJ})$  为自由层的电压相关的垂直各向异性能量系数。由此,由等式 (1) 和等式 (2) 所示,流过 SHE 层以影响 MTJ 的 FL 切换所需的临界电流密度可通过将栅电压施加到 MTJ 来调制。在本发明人的装置的实现方式中,实现了  $d(H_{demag}^{eff})/dV_{MTJ} = 730 \pm 90 \text{ Oe/V}$ , 其与每单位电场的退磁能量中的变化相对应  $|d(K_u t)/dE| = [M_S t_{free} t_{MgO}/2] d(H_{demag}^{eff})/dV = 70 \mu\text{J/m}^2 (\text{V/nm})^{-1}$ 。用于调制通过所施加电场的磁各向异性的低于  $70 \mu\text{J/m}^2 (\text{V/nm})^{-1}$  的 1/3 的值以及高于其的值均在本发明中是有效的。

[0066] 对于本发明的数字逻辑和栅控存储器的实施方式,VCMA 必需能够改变对于通过自旋霍尔层施加的电流的给定电平充分介于 0% 与 100% 之间的、MTJ 自由层的 SHE 自旋扭矩切换的概率。对于长脉冲长度(例如,大于 10ns)并且在室温以上时,FL 的热激励可显

著有助于其反转。如果 FL 在平面中被磁化,则热激励能量的能量势垒  $E$  需要克服直接与自由层的面内矫顽场  $H_c$  相关的量级。因为  $H_c$  可取决于 FL 的面外磁各向异性,这意味着栅电压可经由其在零波动临界电流密度  $|J_{c0}|$  和激励势垒  $E$  这两者上的效果来调制自旋霍尔扭矩切换电流。然而,对于大部分应用,将在热激励提供很小帮助的短持续时间(例如,小于 10ns 或 20ns)内通过自旋霍尔电流脉冲来驱动切换,虽然这导致了关于  $|J_{c0}|$  的切换电流密度的概率分布。因此,在这种短脉冲体制中,栅电压可通过其单独对  $|J_{c0}|$  的影响来有效地调制切换电流密度。例如,自由层的有效垂直磁各向异性的优化值为  $H_{demag}^{eff} \approx 1 \text{ kOe}$ , 而  $d(H_{demag}^{eff})/dV_{MTJ} \approx 700 \text{ Oe/V}$  已经确立为在例如 CoFeB/MgO/CoFeB 磁性隧道结中 VCMA 效应的典型值。并且,  $H_c$  可被容易地调节,以使得其大到足以保持自由层的热稳定性,但是  $H_c$  远小于垂直退磁化场  $H_{demag}^{eff}$ 。使用典型的参数值  $M_s = 1100 \text{ emu/cm}^3$ 、 $t_{free} = 1.5 \text{ nm}$ 、 $\alpha = 0.021$ 、以及  $\theta_{sh} = 0.15$ (等式(2)),得出对于  $V_{MTJ} = 500 \text{ mV}$ ,  $|J_{c0}| = 9.6 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ , 以及对于  $V_{MTJ} = -500 \text{ mV}$ ,  $|J_{c0}| = 4.5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 。  $|J_{c0}|$  中的两倍变量大于用于自旋扭矩装置中的切换电流密度的热分布的典型宽度,以使得  $J_{c0}$  上的电压控制的各向异性的效果足以在优化的自旋霍尔自旋扭矩装置中实现 FL 的短脉冲( $\leq 20$  纳秒)自旋霍尔扭矩切换的全调制。

[0067] 使用作为 SHE 金属层的 6nm 厚且  $1 \mu\text{m}$  宽的 Ta 条、以及 Ta SHE 金属层的顶部上的  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}(1.5)/\text{MgO}(1.2)/\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}(4)$  的 MTJ 堆叠(厚度为纳米级)制造了试样三端子 MTJ 装置(图 7A)。MTJ 堆叠成型为具有与 Ta SHE 条垂直的长轴的、 $100 \times 350 \text{ nm}^2$  的大致椭圆形截面。对试样 MTJ 装置进行测试以证明 VCMA 效应通过使用长、脉冲体制( $\sim 10 \mu\text{s}$ )调制 MTJ 的 FL 的自旋霍尔扭矩切换的能力。图 7B 和图 7C 中使用  $V_{MTJ} = 0$  和  $-400 \text{ mV}$  示出了测试结果。对于 P 对 AP(图 7B)和 AP 对 P(图 7C)切换而言,存在对于  $V_{MTJ} = -400 \text{ mV}$  的切换概率为 100% 并且对于  $V_{MTJ} = 0$  切换概率为 0% 的电流振幅的窗口,以使得  $V_{MTJ}$  有效地栅控切换处理。这在图 7D 中直接示出;电压  $V_{MTJ} = -400 \text{ mV}$  将装置置于接通状态以用于通过来自 Ta 的自旋霍尔扭矩进行切换,而  $V_{MTJ} = 0$  关断切换。图 7D 还证明了三端子装置如何通过将自旋霍尔扭矩切换与 VCMA 效应进行组合来实现功能性逻辑操作。更复杂的逻辑功能可通过组合多于一个的自旋霍尔扭矩/VCMA 装置来获得。

[0068] 为了实现足以有效切换面内或面外磁化的磁性自由层的大自旋霍尔效应,需要使用由具有高原子序数的一个或多个金属原子元素构成的薄膜材料,其中一个传导电子与金属离子之间存在强自旋轨道相互作用。对于所公开的三端子 MTJ 装置合适的材料包括高原子序数( $Z$ )金属元素 Ta、W、Hf 和 Ir,其中,在适当的原子结构形式中,所有 Ta、W、Hf 和 Ir 都具有大于 0.08 的自旋霍尔角、并且在一些情况下大于 0.25。也可使用这些元素的合金和金属间化合物以及这些元素与其他高原子序数元素的组合。然而,具有高原子序数的金属层不在本发明中的自旋电流源中并且不足以有效使用作为本发明中的自旋电流源。在各种实现方式中,材料选择为具有特定电子属性和最佳晶体结构,包括与相邻铁磁层的属性和结构的相关性,其中,在相邻铁磁层上通过自旋霍尔效应在第一层中生成的自旋电流影响第二、铁磁层的磁性铁环或激励。

[0069] 首先,自旋霍尔金属的电子属性可配置成,使得在通过纵向电子流密度生成横向

自旋电流密度时存在高效率,其中,转换效率通过使用已知为自旋霍尔角的量来进行量化,自旋霍尔角限定为横向自旋传导性对比纵向电子传导性的比率,或者等同地,自旋霍尔角限定为所生成的横向自旋电流密度对比所施加的纵向电流密度的比率。当采用晶体金属并且在自旋霍尔效应是内在的且源自传导电子与固定离子型晶格结构之间的自旋轨道相互作用的情况下,金属的导电率应是低的,以使得自旋霍尔角或横向自旋电流的生成效率较高,其中,传导电子与固定离子型晶格结构之间的自旋轨道相互作用随后确定材料的横向自旋传导率。在自旋霍尔效应不是内在的但通过由杂质和晶体缺陷而导致的传导电子的自旋相关散射来确定的实例(其也可用于本发明)中,自旋相关散射必需通过杂质或缺陷的选择而相对于电子的任何非自旋相关散射是强壮的。

[0070] 其次,期望自旋霍尔金属内的自旋弛豫长度为短的,例如,小于或等于 1nm、上至约 5nm。为了最佳转换效率,自旋霍尔层的厚度不小于约一个自旋弛豫长度且不大于自旋弛豫长度的约五倍。影响相邻磁性层的磁性切换或激励所需的电流直接与自旋霍尔层的厚度乘以材料的自旋霍尔角成比例。因此,为了最小化所需的切换电流,具有高自旋霍尔角的薄自旋霍尔层以及短的自旋扩散长度是最佳的。

[0071] 第三,自旋霍尔材料的电子结构和相邻铁磁材料的电子结构选择为,如果电子的磁矩对齐为与铁磁层的磁化取向平行、或者在一些情况下反平行但通常为平行,则使得来自自旋霍尔层的传导电子能够轻易横跨界面进入铁磁层中,以及如果电子的磁矩相对于铁磁层磁化的磁矩相反取向,则使得来自自旋霍尔层的传导电子具有经过进入铁磁层中的低概率。在晶体自旋霍尔材料和晶体铁磁层的情况下,两种材料的电子带结构必需使得,电子从自旋霍尔材料横跨界面传输至铁磁层的多数电子子带结构或少数电子子带结构中在一种情况下的概率比其他情况下的概率大得多。Ta 的  $\beta$  形式的带结构通常为具有四方晶体对称性,Ta 的  $\beta$  形式的带结构与典型铁磁材料(例如,也满足这种要求的 FeCo 和 NiFe 合金)的带结构之间存在着显著区别。这也存在于 W 的  $\beta$  形式的情况中,而 W 的  $\beta$  形式通常为具有 A15 晶体对称性。对于可在多个晶体形式中发现的、包括六方密堆积(hcp)和面心立方(fcc)的形式的 Hf 而言,相对于铁磁层的组成和晶体形式的选择,晶体形式的选择对于获得与高自旋扭矩效率的组合至关重要。

[0072] 第四,在来自自旋霍尔层的入射自旋电流激励铁磁层的取向并随后通过施加反阻尼自旋扭矩而反转铁磁层的取向的实现方式中,也要求在这种激励处理的过程中,从经磁处理的铁磁材料注入自旋返回至自旋霍尔材料的过程中被最小化。这种注入已知为自旋泵浦,并且通常认为是取决于每单位面积横跨界面的电子传输的概率,其中,传输概率取决于电子相对于铁磁的磁化方向取向的自旋取向。高自旋泵浦率抑制铁磁的磁性激励,并因此导致较强入射自旋电流密度影响磁性切换的不期望的要求。这种自旋泵浦处理一般由已知为界面自旋混合传导性的参数来表征。对于最佳性能,这种自旋混合传导性应最小化,最好是低于在铁磁材料与高原子序数的自旋霍尔材料的大多数传统组合中发现的自旋混合传导性。例如,如 CoFe(或 CoFeB)与  $\alpha$ -W 组合那样,Co-Pt 组合具有高自旋混合传导性,也就是说,W 为标准 bcc 晶体形式。然而,与铁磁层(例如,CoFe、CoFeB 和 NiFe 合金)组合的  $\beta$ -Ta 和  $\beta$ -W 这两者均展现出低自旋混合传导性,这使得这些组合对于本发明的反阻尼切换实施方式是有效的。

[0073] 适合于实现三端子 MTJ 装置的自旋霍尔材料可选择或设计成,具有强自旋轨道相

相互作用（具有高自旋霍尔角以及相关的高自旋电流密度生成效率）以及用于自旋极化电子或其他带电离子从 SHE 金属层至 FL 的有效注入的短自旋弛豫长度（例如，大约 1 至 5nm）。另外，两种材料的界面电子结构配置成使得入射自旋电流在铁磁材料上施加高效的自旋扭矩，这取决于界面的自旋相关电子传输概率中的巨大差异。在一些实现方式中，三端子 MTJ 装置可配置成利用铁磁材料的抗阻尼激励以影响界面电子属性的切换，使得界面的自旋泵浦效率相当低、或者等同地使自旋混合传导相当低。

[0074] 此外，在一些实现方式中，用于三端子 MTJ 装置的绝缘间隔层可具有例如从小于 1nm 至大于 2nm 范围的厚度。绝缘间隔层可由多晶型 MgO 或者混合的氧化物（例如，可变组分的  $Mg_xB_yO_z$ ）、或者（产生用于在位于绝缘层的相反两侧上的铁磁基准层与铁磁自由层之间流动的电流的高隧穿磁阻并且还产生与大量影响薄 FL 的整体磁各向异性的铁磁自由层（FL）的表面接触的、每单位面积的界面磁各向异性能量密度的）任何其他晶体或无定形绝缘层构成，其中，这种磁各向异性能量密度可基本通过横跨绝缘体-FL 界面施加的电场来改变。

[0075] 用于磁性自由层的材料的一些示例可包括（但不限于）Fe、Co、Ni、这些元素的合金（例如， $Fe_{1-x}Co_x$ 、 $Ni_{1-x}Fe_x$ ）、这些元素与非磁性材料的合金（例如， $Fe_{1-x}Pt_x$ 和  $Co_xFe_yB_{1-(x+y)}$ ）以及由那些材料制成的铁磁多层（例如， $(Co/Ni)_n$ 、 $(Co/Pt)_n$ 和  $(Co/Pd)_n$ ），其中，n 表示多层的重复数量）。这种材料会展示出在铁磁自由层的与绝缘层接触的表面之间的每单位面积接触的大量界面磁各向异性能量密度。这种界面各向异性可随着可施加在绝缘体的一侧上的铁磁基准层与绝缘体的另一侧上的自由层之间的电压而显著变化。所施加的电压的强度变化改变了绝缘体-自由层界面处的电场，并因此改变 FL 经历的界面磁各向异性。

[0076] 在电栅控的切换操作过程中流动通过磁性隧道结的绝缘层的电流可通过对绝缘体材料及厚度的选择而在宽范围上变化。绝缘层的隧穿电阻随着其厚度以指数形式变化，典型地对于 0.2 至 0.3nm 的厚度以约一个量级的幅度增加，正如在 MTJ 中的 MgO 绝缘层的情况下那样。由此，通过使用相对厚度  $>1.5$ nm 的 MgO 层，例如，在栅控的自旋霍尔切换操作过程中，流过绝缘层的隧穿电流由于电压偏置而可能是相当低的。这可将切换操作的栅极部件所需的能量降低至横跨在这种情况下充当电容器的隧道势垒对电压进行充电所需的电平。执行栅控响应所需的电压不会随着绝缘层厚度而线性变化，以使得更厚的势垒不需要成比例地更高的栅电压以执行栅控响应。由此，在一些应用中，绝缘体的厚度典型地应保持为  $\leq 2$ nm。

[0077] 可替代地，如果绝缘层制成为薄的（1nm 的量级），则当施加电压偏置以调制自由层的界面各向异性时流动通过绝缘层的电流可能是大量的。根据 FL 相对于 RF 的相对取向，并且根据电压偏置的极性并因此根据隧穿电子流动的方向，这种电流将在 FL 上施加自旋扭矩，这将通过也施加至经过相邻的自旋霍尔金属层的电流而辅助或阻碍 FL 的自旋扭矩切换。在设计用于最佳切换性能并且还用于在没有栅控切换脉冲的情况下实现最大热稳定性的装置时，这能够添加额外的灵活性。绝缘体厚度应厚到足以使得，当在读取操作过程中为读取 MTJ 的磁阻状态而需要施加的偏置电压因隧道结所施加的自旋扭矩而不足以单独影响自由层的切换时，无需由流过自旋霍尔金属层的偏置电流所生成的任何自旋扭矩的辅助，使得电流流动。

[0078] 除了提供用于高性能非易失性逻辑电路的新的、基础元件以外，本申请的三端子

MTJ设计的实施方式实现了用于高性能磁性存储逻辑技术的经改善的电路架构。例如,可采用自旋霍尔扭矩/VCMA装置在图8中示意性示出的最大密度的交叉点几何结构中产生非易失性磁性随机存取存储电路。对于使用传统的通过两端子MTJ的自旋扭矩切换而成功地实现交叉点而言,主要挑战在于,电流经由潜行路径流动的问题,而这在写入处理过程中导致了意外的切换事件以及增加的功耗,并且在读取过程中导致灵敏性降低。在图8中所示的电路中,在写入操作过程中,通过将栅电压从上方施加到MTJ并同时还在下方施加穿过SHE微条的电流以生成自旋霍尔扭矩,可对每个存储单元单独编址。

[0079] 图8中的装置包括三端子MTJ存储单元的行和列。提供了自旋霍尔效应金属条的行,并且每个行自旋霍尔效应金属条配置成与存储单元的行接触而作为用于该存储单元的行中每个存储单元的自旋霍尔效应金属层,并且每个行自旋霍尔效应金属条还耦接至存储控制电路,以携带行充电电流作为用于该存储单元行中的每个存储单元的充电电流。图8中的装置还包括导电条的列,并且每个列导电条配置成与分别位于存储单元的不同行中的存储单元列接触,并且每个列导电条还耦接至存储控制电路,以施加行栅电压作为用于该存储单元的列中的每个存储单元的栅电压、或施加行读取电压作为用于该存储单元的列中的每个存储单元的读取电压。存储控制电路包括第一晶体管和第二晶体管,其中,第一晶体管以每个列导电条一个第一晶体管的方式分别耦接至列导电条,从而将行栅电压或行读取电压施加到存储单元的第一电端子,第二晶体管以每个行自旋霍尔效应金属条一个第二晶体管的方式分别耦接至行自旋霍尔效应金属条,以连接至所述第二电端子,从而使作为用于相应的存储单元行中的每个存储单元的充电电流的、各个行自旋霍尔效应金属条中的行充电电流接通或关断。在一些实现方式中,第三电端子接地。在图8中的示例中,这种接地通过第三晶体管来控制,其中,第三晶体管以每个行自旋霍尔效应金属条一个第三晶体管的方式分别耦接至行自旋霍尔效应金属条,从而连接在相应的存储单元行中的存储单元的所述第三电端子与电接地端之间。

[0080] 图9A和图9B示出了在写入和读取操作过程中图8的第一晶体管、第二晶体管和第三晶体管的操作的示例。更具体地,如用于写入操作的图9A中所示,位于选定列处的第一晶体管以及位于选定行的两个端部处的一对第二晶体管和第三晶体管被设置成处于接通,而所有其他晶体管被设置成处于关断。根据MTJ期望的最终状态, $V_{\text{switch}}$  ( $V_{\text{切换}}$ ) 被选择为正或负。信息随后被写入到用于写入操作的选定的MTJ中。具有高阻抗的MTJ可被利用成,使得隧道结的阻抗 ( $R_{\text{MTJ}}$ ) 远大于SHE条的电阻 ( $R_{\text{ra}}$ )。该条件有效地阻断了用于写入电流的所有可能的潜行路径。对于图9B中所示的读取操作,可采用平行读取机制以有效地改善潜行电流的影响。用于所有列的第二晶体管和位于选定行的右端部处的第三晶体管被设置成处于接通。所有其他晶体管被设置成处于关断。因此,所有列线被设置为相同的读取电平 +V。通过测量在列线中流动的电流,以平行的方式从同一行上的所有MTJ读取信息。

[0081] 如图8、图9A和图9B中的示例所示的交叉点架构的整体优点在于,一些两端子自旋扭矩MRAM电路要求每个位至少一个晶体管,而对于本申请三端子MTJ电路的交叉点几何结构可制造成为在阵列中每N位仅一个晶体管,从而显著地提升了存储密度,并且减少了在MTJ与用于提供写入信号并执行存储数据的读出的半导体(CMOS)电路元件之间的界面处的复杂性。

[0082] 参照MTJ的磁性层与MTJ层垂直的图6A和图6B,来自通过SHE生成的自旋电流的

自旋扭矩的效果可使用有效磁场  $H_{ST}$  来描述。由注入的自旋电流生成的每单位磁矩的自旋扭矩可写为：

[0083]

$$\tau_{ST} = \frac{\hbar}{2eM_s t} J_s \hat{\sigma} \times \hat{m},$$

[0084] 其中,  $\hbar$ 、 $e$ 、 $M_s$  和  $t$  分别表示普朗克常数、电子电荷、FL 的饱和磁化、以及 FL 的厚度, 并且  $J_s$  为从 SHE 注入 FL 中的自旋电流。与此同时, 通过磁场生成的扭矩通常可写为： $\vec{\tau} = -\hat{m} \times \vec{H}$ 。通过对两个扭矩的形式进行比较, 通过 SHE 感应的有效磁场具有以下形式：

[0085]

$$\vec{H}_{ST} = -\frac{\hbar}{2eM_s t} J_s \hat{\sigma} \times \hat{m}.$$

[0086] 因此, 根据注入自旋的方向,  $\vec{H}_{ST}$  与  $\vec{m}_1$  垂直并且指示顺时针或逆时针。如果  $J_s$  大到足以使得  $|\vec{H}_{ST}| > 0.5H_m^{eff}$ , 则  $\vec{H}_{ST}$  将感应出  $\vec{m}_1$  的连续旋转, 其中,  $H_m^0$  为磁性膜可提供的最大各向异性场。在  $\vec{H}_{ST}$  的影响下,  $\vec{m}_1$  将被连续切换、而无需确定性的最终状态。为了实现确定性切换, 需要引入外部面内磁场  $\vec{H}_{ext}$ , 外部面内磁场  $\vec{H}_{ext}$  可轻易地通过放置在附近的磁性层的磁偶极场来提供。外部场可通过使用各种配置的装置中的一个或多个磁性元件来生成。在图 6B 中, 应用 +y 方向上的外部场作为示例。使用  $m_z$  来表示  $\vec{m}_1$  的 z 分量, 可看出, 因为  $\vec{H}_{ST}$  和  $\vec{H}_{ext}$  可彼此平衡, 所以具有  $m_z > 0$  的状态将变成稳定状态, 而因为  $\vec{H}_{ST}$  和  $\vec{H}_{ext}$  以相同方向作用、由此引起  $\vec{m}_1$  继续旋转, 因此  $m_z < 0$  状态仍为不稳定的。因此, 在以 +y 方向施加场的情况下, 以 -x 方向注入的自旋可将  $\vec{m}_1$  切换成  $m_z > 0$  状态。通过反转写入电流方向, 来自 SHE 的自旋将沿着 +x 方向注入, 由此使得  $\vec{m}_1$  被切换成  $m_z < 0$  状态。通过使用从 SHE 注入的自旋, 实现了可逆的确定性切换。

[0087] 影响 FL 的确定性切换所需的经过 SHE 层的电流与用于 FL 和 RL 与平面垂直地极化的情况的 FL 的有效垂直磁各向异性场  $H_{demag}^{eff}$  线性地成比例。如果  $H_{demag}^{eff}$  被调整成例如可通过 FL 材料的选择而轻易实现的  $\sim 10000e$  或更小, 则其厚度和 SHE 切换电流的粗心热退火的强栅控可通过 SHE/VCMA 容易地获得, 其中, SHE/VCMA 并入具有  $d(H_{demag}^{eff})/dV_{MTJ} \approx 700$  Oe/V 量级的 VCMA, 正如实验证明的那样 (参见图 7C)。

[0088] 用于组合自旋霍尔扭矩与 VCMA 的本申请三端子 MTJ 装置设计的另一种应用是采用这些效应来实现自旋扭矩纳米振荡器 (STNO) 的频率和振幅的新的独立控制。基于三端子电路配置中的磁性隧道结来生成振荡信号的这种装置可配置成包括磁性隧道结 (MTJ), 其中, 磁性隧道结 (MTJ) 包括 (1) 固定磁性层, 在固定磁性层中具有固定磁化方向; (2) 自由磁性层, 具有位于自由磁性层中并且可变的磁化方向; 以及 (3) 非磁性结层, 该非磁性结层位于自由磁性层与固定磁性层之间并且由薄到足以允许电子在自由磁性层与固定磁性

层之间隧穿的绝缘体材料形成。自旋霍尔效应金属层被提供为非磁性的,并且包括展示大自旋霍尔效应以反应于引入自旋霍尔效应金属层中的充电电流而产生与充电电流垂直的自旋极化电流的金属。自旋霍尔效应金属层与自由磁性层平行且与自由磁性层接触,以将在自旋霍尔效应金属层中生成的自旋极化电流引入自由磁性层中。该装置包括第一电端子、第二电端子和第三电端子,其中,第一电端子在具有固定磁性层的一侧与 MTJ 接触,第二电端子和第三电端子在自由磁性层的两个相反侧上与自旋霍尔效应金属层的两个接触位置电接触,以在自旋霍尔效应金属层中供给充电电流。该装置中的振荡器控制电路耦接至第一电端子、第二电端子和第三电端子,从而 (1) 经由第二电端子和第三电端子在自旋霍尔效应金属层中供给恒定电流作为充电电流,以使得因通过自旋霍尔效应金属层产生的自旋极化电流而引起自由磁性层的磁化的旋进;以及 (2) 供给横跨 MTJ 经由第一电端子而引导的 MTJ 结电流,以使得电流隧穿横跨因自由磁性层的磁化的旋进而振荡的 MTJ。该控制电路配置成调节 MTJ 结电流,以控制在隧穿横跨 MTJ 的电流中的振荡的振荡频率或振幅。

[0089] 图 10 示出了用于激励和检测 SHE 装置中的磁动态的振荡器电路的示例。可采用具有公共接地端的两个直流电流源来分开施加经过 SHE 条的电流和经过 MTJ 的电流。经过 SHE 条的电流  $I_{\text{SHE}}$  通过 SHE 将自旋电流注入 MTJ 的磁性自由层中,并且激励其中的磁动态,而 MTJ 偏置电流  $I_{\text{MTJ}}$  将从 TMR 产生的 MTJ 电阻  $R_{\text{rf}}$  的振荡转换成振荡电压  $V_{\text{rf}} = I_{\text{MTJ}} R_{\text{rf}}$ , 振荡电压  $V_{\text{rf}} = I_{\text{MTJ}} R_{\text{rf}}$  随后可耦接至微波条 - 线或天线。

[0090] 相比较而言,传统的两端子 MTJ STNO 装置需要使用相同的两个端子来携带相同的电流作为 (1) 驱动电流以激励动态、以及 (2) 感测电流以提供输出功率。图 10 中的三端子 SHE/VCMA 装置使用分别用于这些功能的两个分离的电流来提供更好的技术控制和操作优点。

[0091] 图 11 示出了通过在  $I_{\text{SHE}}$  保持恒定期间用于不同的  $I_{\text{MTJ}}$  的原型 SHE/VCMA STNO 获得的微波谱。不同于用于传统 STNO 的情况,因为感测电流对磁动态很少影响或没有影响,所以输出功率  $P$  随着如图 12A 中所示的  $I_{\text{MTJ}}^2$  成比例,其中,在图 12A 中示出了三端子 STNO 原型的整合功率  $P$  (三角形) 以及其归一化功率 (圆形) 与  $I_{\text{MTJ}}$  的比较,其中,  $T(I_{\text{MTJ}})$  为 MTJ 的偏置相关的归一化 TMR 值。归一化功率通过偏置大致恒定。

[0092] 如图 12B 中所示,该三端子 STNO 的行为的重要方面在于,振荡器频率随着  $I_{\text{MTJ}}$  在正方向上增加而存在相当显著的蓝色移位。这与通过横跨 MgO 隧道势垒的电场变化而感应的垂直磁各向异性变化定量地相关,其中,横跨 MgO 隧道势垒的电场随着  $I_{\text{MTJ}}$  的变化而变化。由此,如在图 12A 和图 12B 中展示的那样,与电压控制磁各向异性组合的 SHE 的三端子 STNO 的实施方式实现了磁动态以及自旋扭矩纳米振荡器的输出电功率的独立控制,因此提供了输出微波信号的振幅变化以及频率的更好且更通用的调整。

[0093] 在实现基于两个独立控制机制的三端子 MTJ 装置时,期望如等式 (1) 和等式 (2) 中所指示的产生自由层的足够大的有效垂直退磁化场  $H_{\text{demag}}^{\text{eff}}$ , 从而影响用于切换自由磁性层的磁化的临界或阈值自旋极化电流。可为 MTJ 装置选择各种材料组合,包括以期望结晶相的适当过渡金属元素。用于实现自由层的足够大的有效垂直退磁化场  $H_{\text{demag}}^{\text{eff}}$  的一个技术为在自由磁性层与 SHE 金属层之间提供薄的过渡金属层,正如图 13 中的 MTJ 示例中所示的那样。

[0094] 在图 13 中,与自由磁性层和 SHE 金属层的材料配置相关地选择薄的过渡金属层的材料和厚度,以使薄的过渡金属层与自由磁性层之间的界面连接能够产生强界面各向异性,由此对自由层的垂直退磁化场  $H_{demag}^{eff}$  产生贡献,并增强三端子 MTJ 装置的电压控制的磁各向异性 (VCMA) 效应。这种薄的过渡金属层可能不会展现出显著的 SHE,并且设置在自由磁性层与 SHE 金属层之间作为一种机制,以设计基于 SHE 和 VCMA 效应的双重控制的有效的三端子 MTJ。薄的过渡金属层与 SHE 金属层的组合结构可被视为复合 SHE 金属层。作为具体示例,基于具有 FeCoB 的面内自由磁性层的三端子 MTJ 装置制造成包括作为 SHE 金属层的  $\beta$  W 层 (4nm) 层以及作为薄的过渡金属层的 Hf 层 (1nm)。MTJ 装置所进行的测量示出了强大的 SHE 和 VCMA 效应。此外,位于自由磁性层与图 13 中的 SHE 金属层之间的薄的过渡金属层可用于增强 MTJ 装置的 FL 层的垂直各向异性,其中,FL 层和 PL 层具有如图 6A 和图 6B 所示的垂直的磁化方向。

[0095] 在上述三端子 MTJ 示例的至少一些中,由于与 SHE 金属层或图 13 中的薄的过渡金属层直接接触的自由层导电,所以 SHE 金属层与 MTJ 的自由磁性层之间的界面导电。这种配置产生分流路径,以使得通过第二端子和第三端子供给到 SHE 金属层中的充电电流泄漏到分流路径中。这种泄漏使得保持在 SHE 金属层中的实际充电电流减少,而这种减少又不期望地减少了通过 SHE 效应生成的自旋极化电流。对于使用具有高电阻率的 SHE 金属层的三端子 MTJ 装置,这种不期望的充电电流的泄漏可能是显著的。为了确保自旋极化电流在 SHE 金属层中的有效生成,薄的磁性绝缘体层可插入 MTJ 堆叠与 SHE 金属层之间,以防止或降低 SHE 金属层中的充电电流至 MTJ 堆叠的泄漏。因为感测电流需要经过用于各种电路操作(包括上述的 MTJ 存储单元的读取操作和振荡信号在上述 STNO 电路中的生成)的 MTJ 堆叠,所以薄的磁性绝缘体层的厚度小到足以允许电子的隧穿。这种薄的磁性绝缘体层为降低了通过自旋霍尔效应生成的、来自 SHE 金属层的自旋极化电流上的松弛效应的磁性层。这种薄的磁性绝缘体层可为铁磁或亚铁磁性绝缘体层。各种磁性绝缘体材料可用作薄的磁性绝缘体层,例如,YIG(Yttrium Iron Garnet ;钇铁石榴石)等。

[0096] 图 14A 和图 14B 示出了实现上述薄的磁性绝缘体层的三端子 MTJ 装置的两个示例。在图 14A 中,薄的磁性绝缘体层放置在自由磁性层与 SHE 金属层之间。在图 14B 中,薄的磁性绝缘体层放置在图 13 中的薄的过渡金属层与 SHE 金属层之间。在这两个示例中,薄的磁性绝缘体层减少了 SHE 金属层中的充电电流至 MTJ 堆叠的泄漏,并且增强了进入 MTJ 堆叠的自旋极化电流的生成。

[0097] 虽然本专利以及附件包含许多细节,但是这些细节不应被解释为限制任何发明的范围或者任何发明要求保护的的范围,而是特征的描述可特定于特定发明的特定实施方式。在本专利以及附件中所描述的分离的实施方式上下文中的某些特征也可以组合的方式实现或以单个实施方式实现。相反地,在单个实施方式的上下文中描述的各种特征也可分离地、或者以任何合适的子组合方式实现在多个实施方式中。此外,虽然特征可能在上文描述为以特定组合的方式行动并且甚至是最初要求为如此,但是在一些情况下来自所要求的组合的一个或多个特征可从组合中切除,并且所要求的组合可针对子组合或子组合的变型。

[0098] 相似地,虽然在附图中以特定顺序描绘了操作,但是这不应被理解为要求这种操作以所示的特定顺序或连续的顺序来执行,或者不应被理解为执行所有示出的操作来实现期望的结果。此外,在本专利以及附件中所描述的实施方式中的各种系统部件不应被理解



为在所有实施方式中要求这种分离。

[0099] 仅对一些实施方案和示例进行了描述,并且可基于在本专利及附件中描述和示出的内容进行其他实施方案、改进和变型。

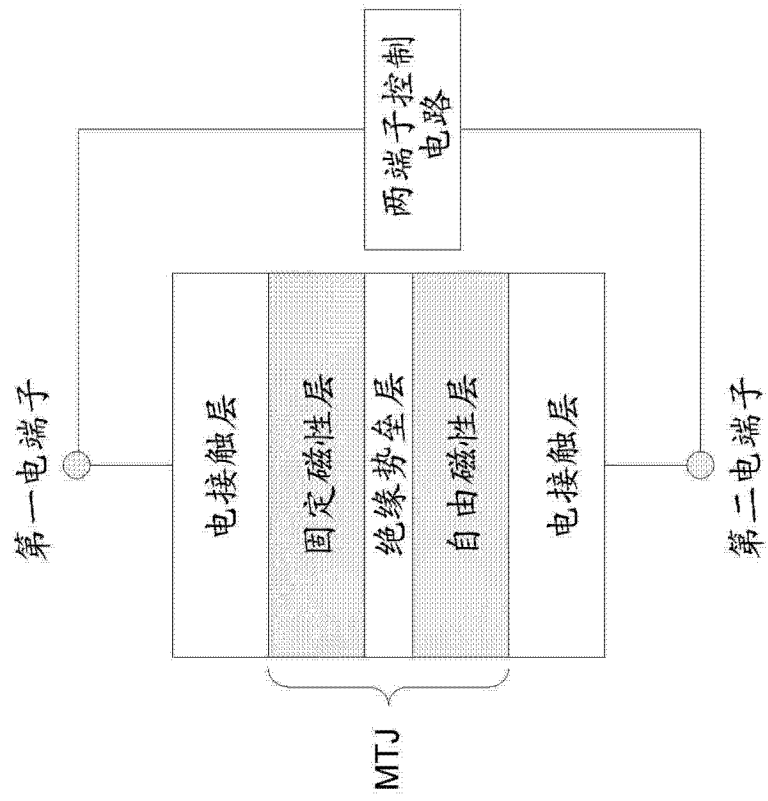


图 1

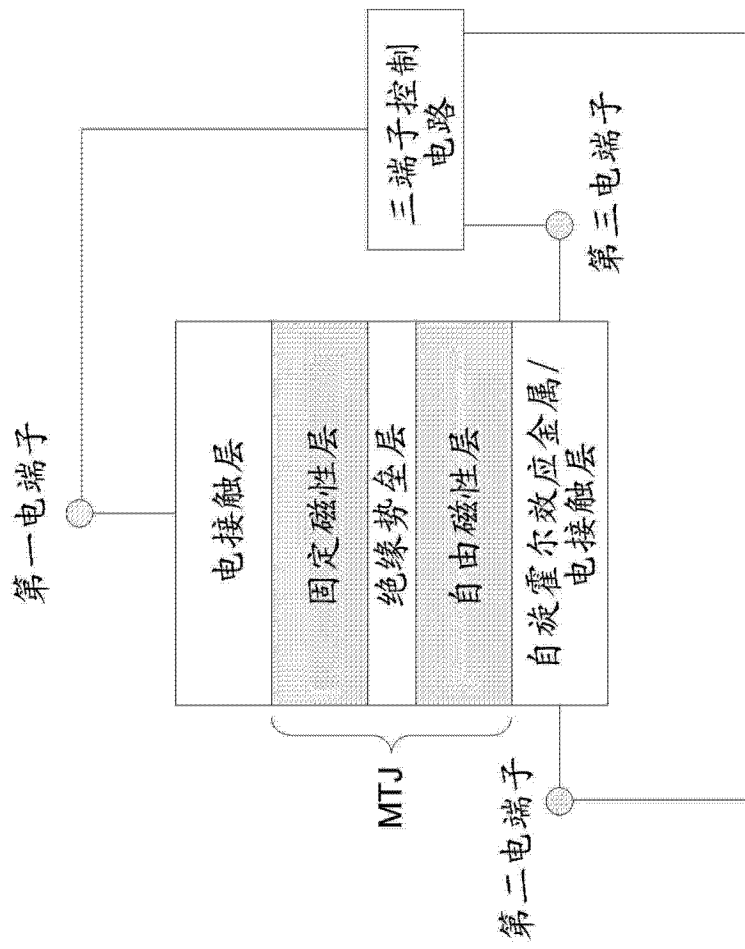


图 2A

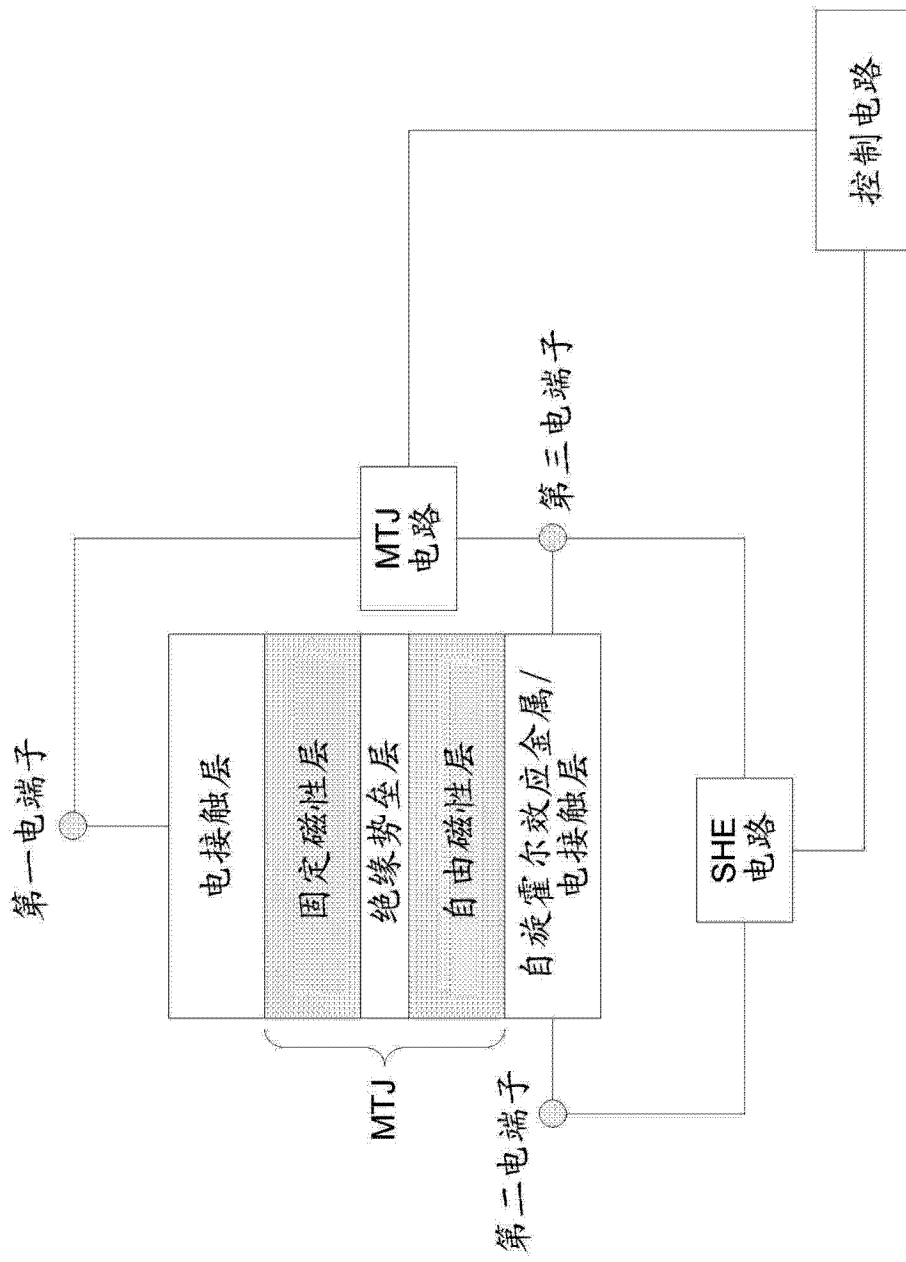


图 2B

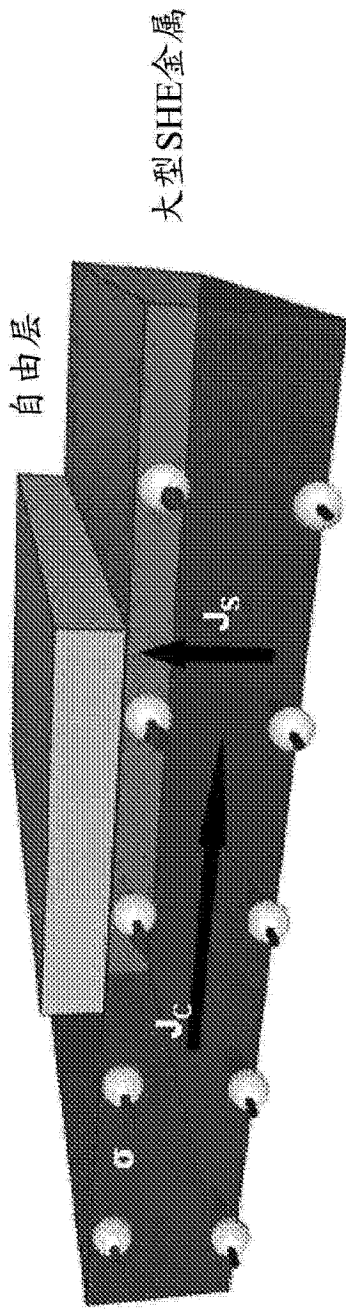


图 3A

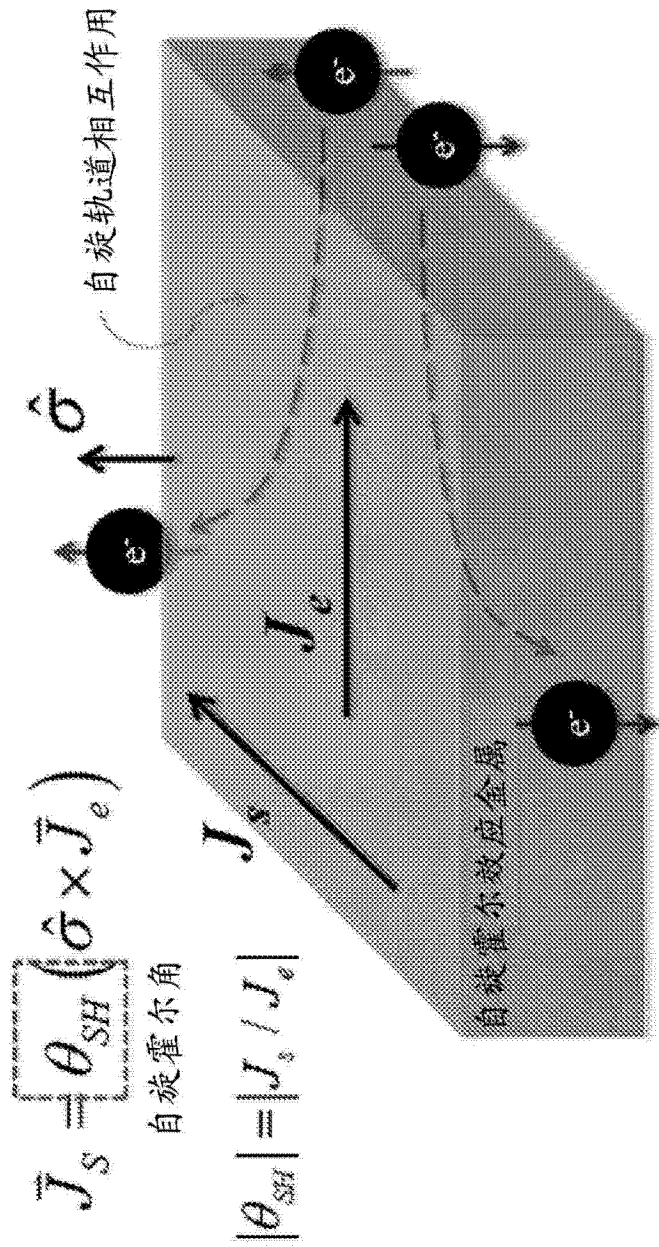


图 3B

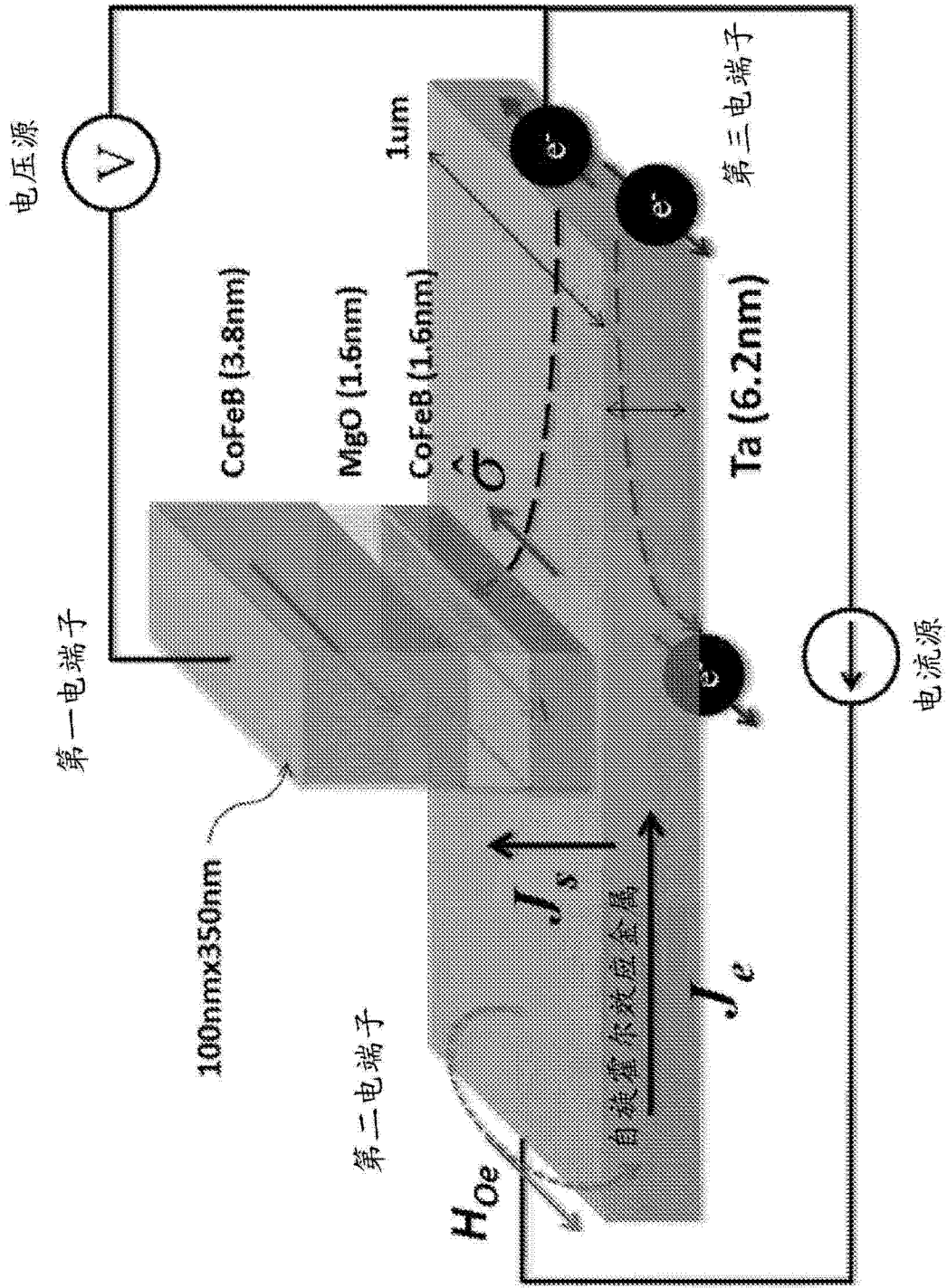


图 4

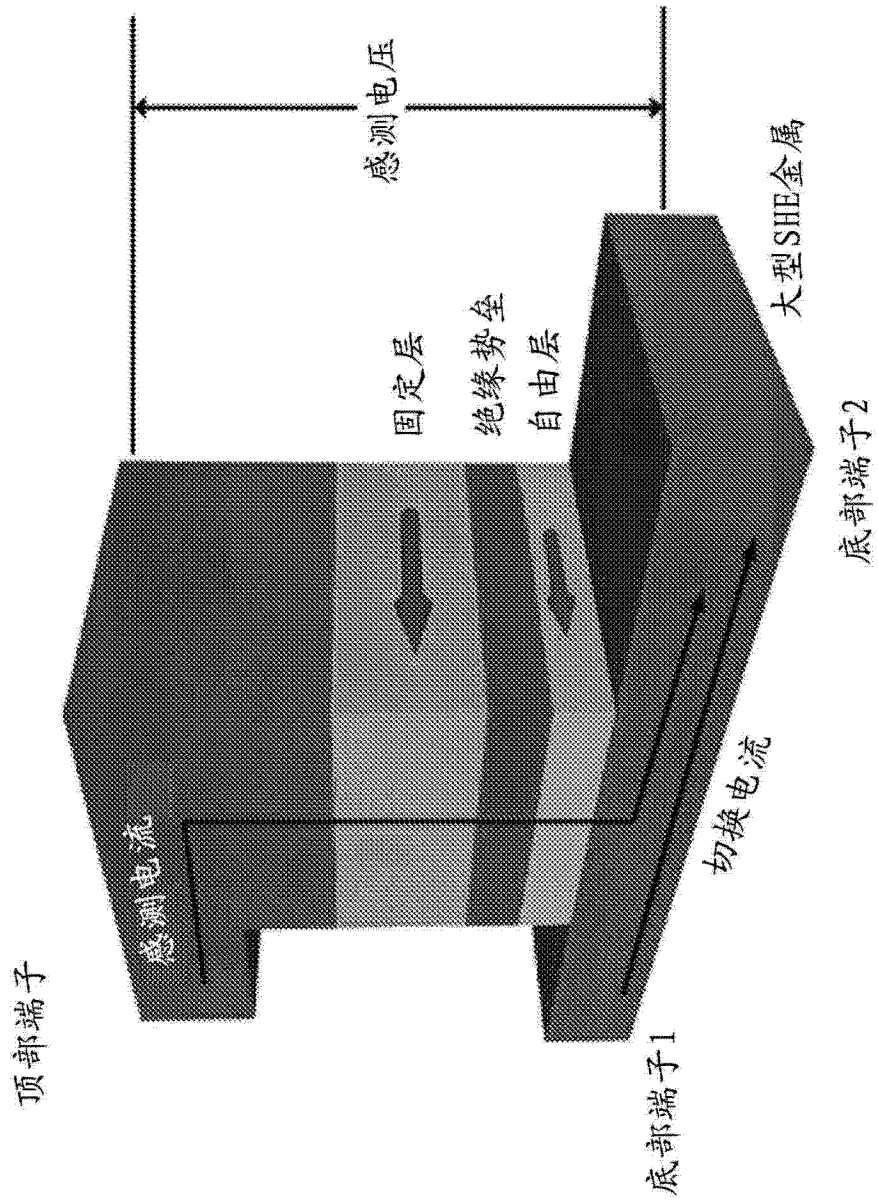


图 5A

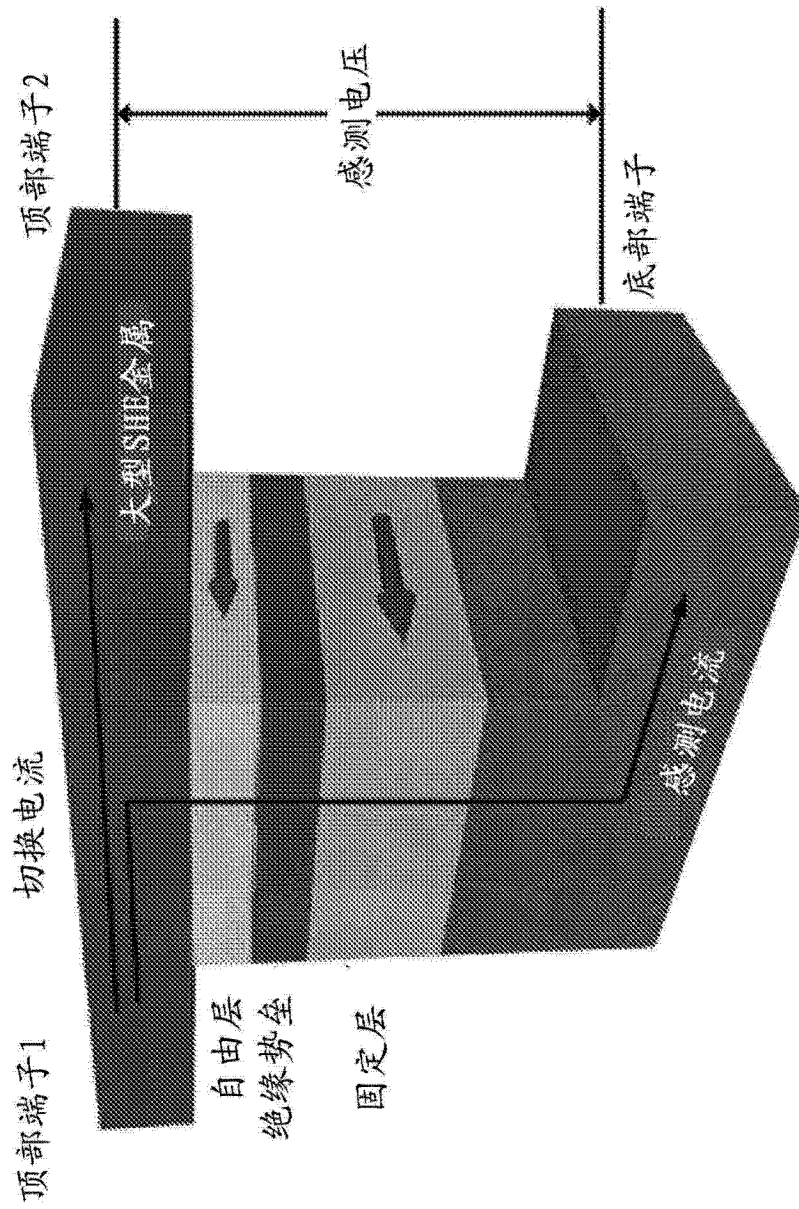


图 5B



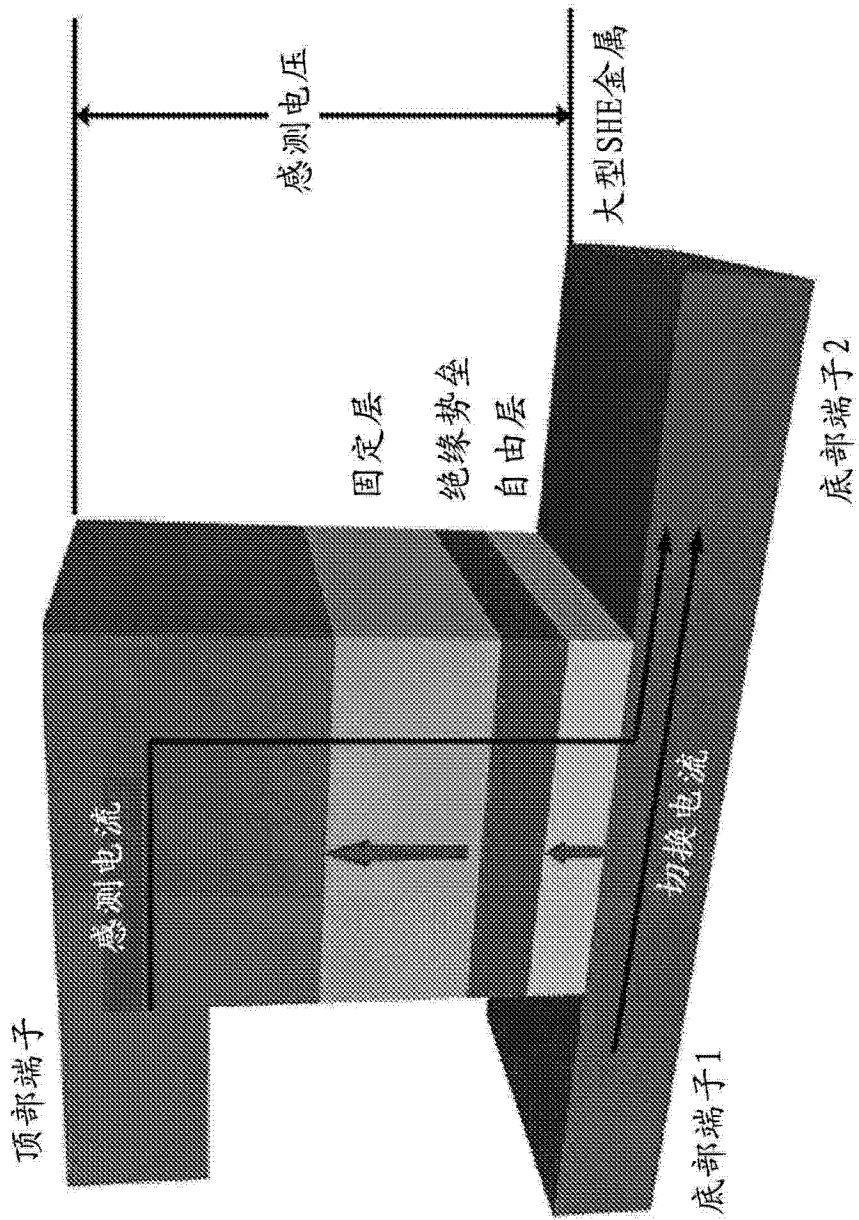


图 6A

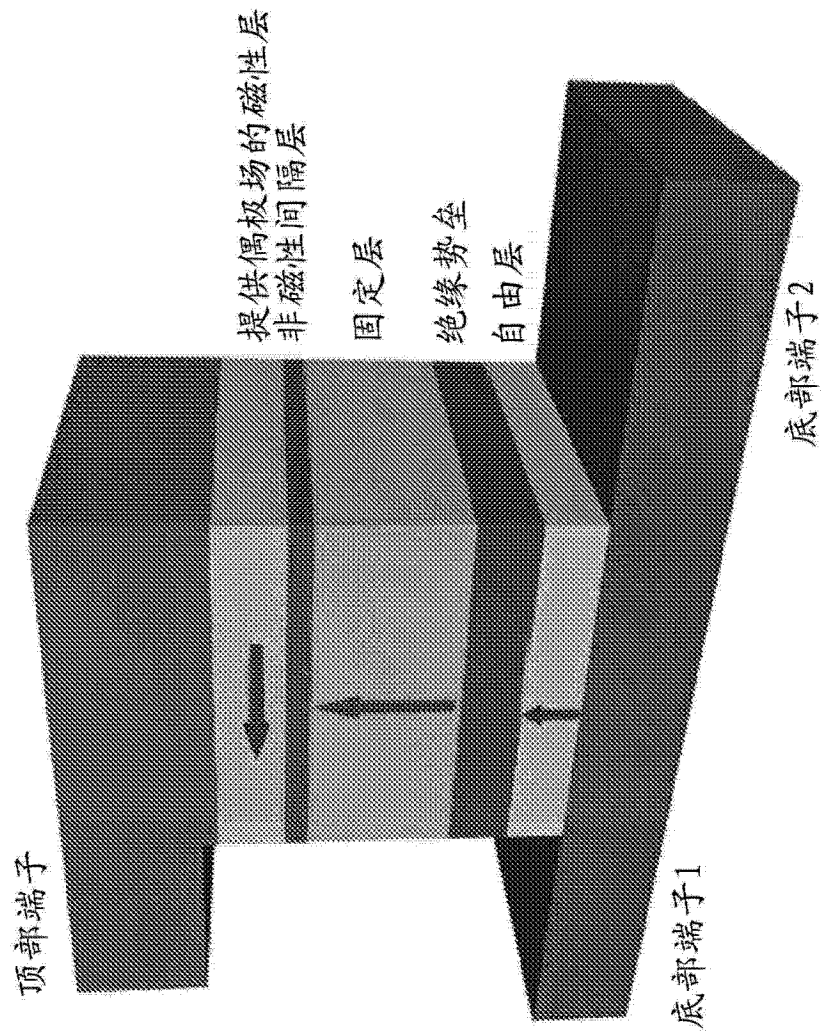


图 6B

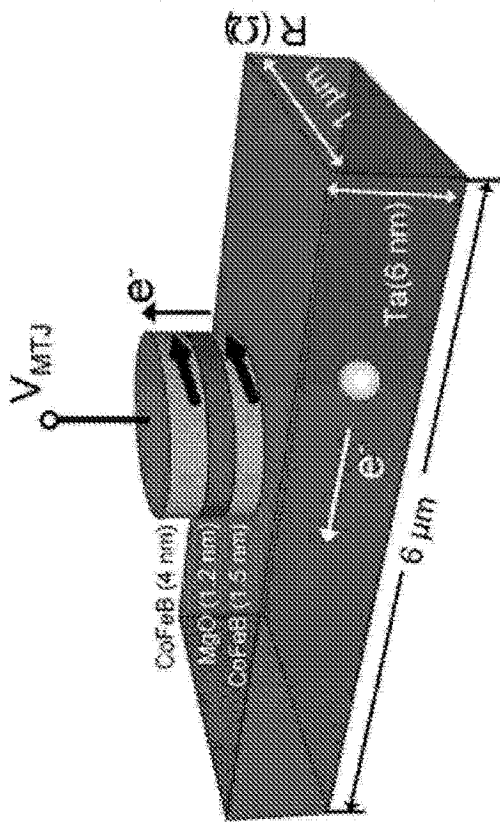


图 7A

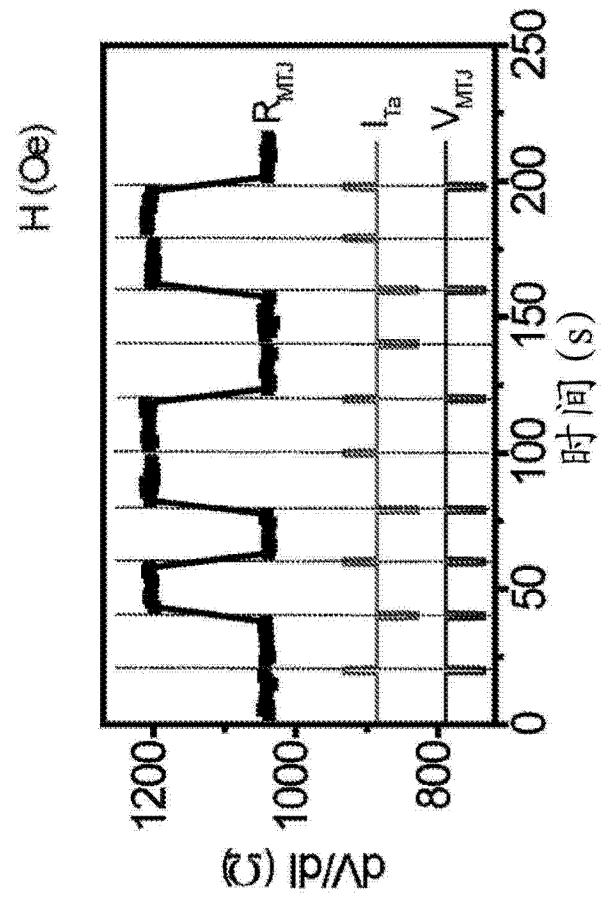


图 7D

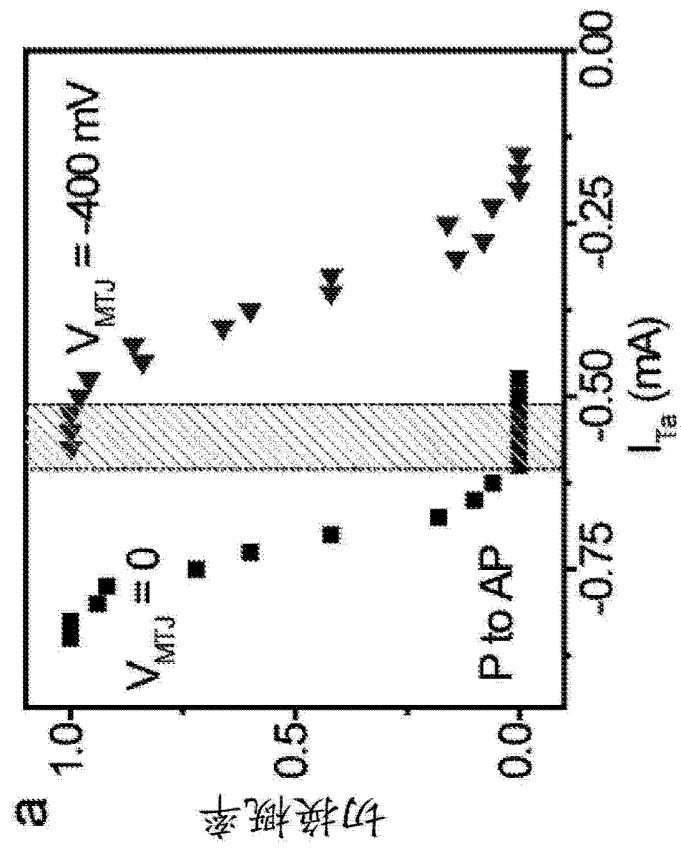


图 7B

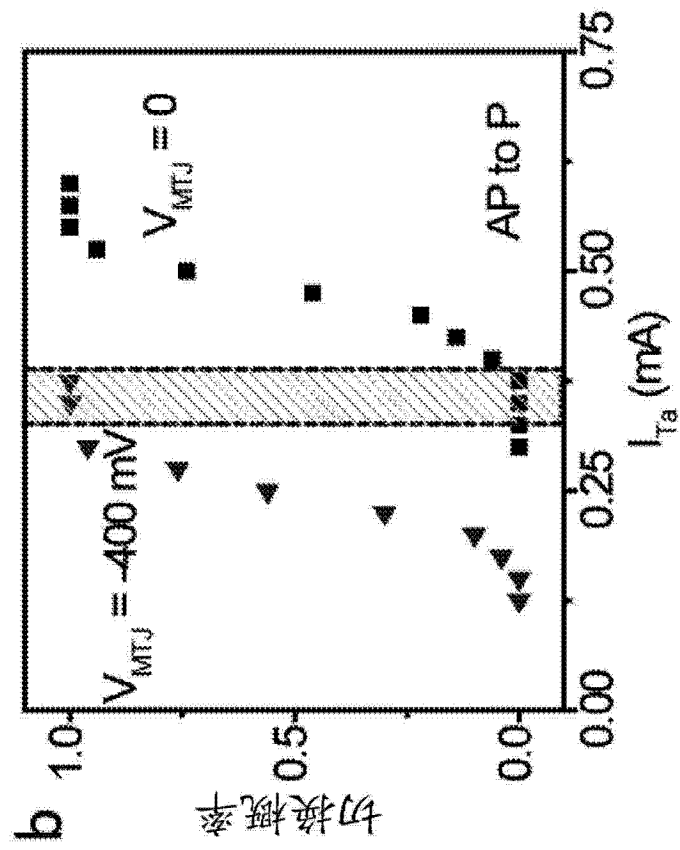


图 7C

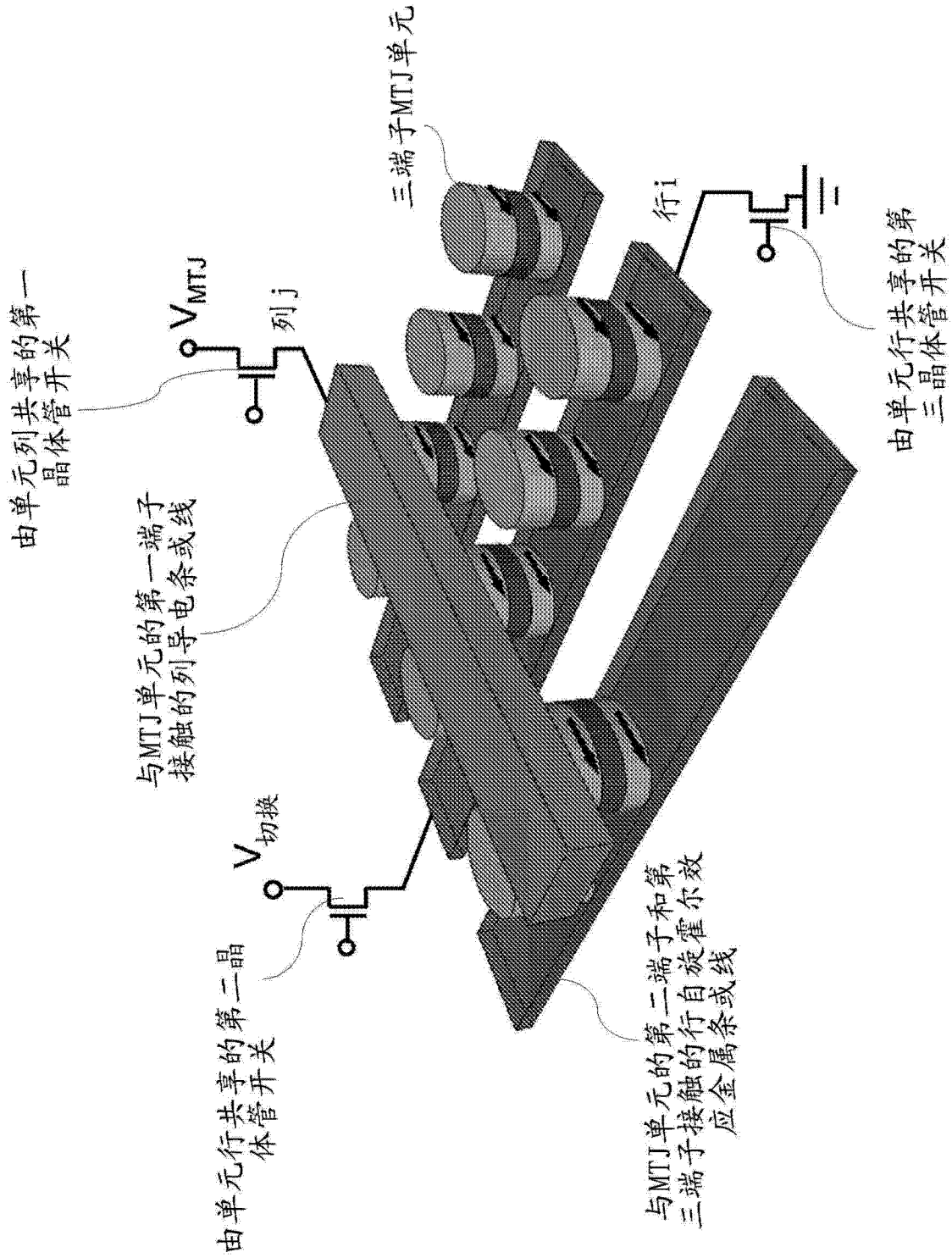


图 8

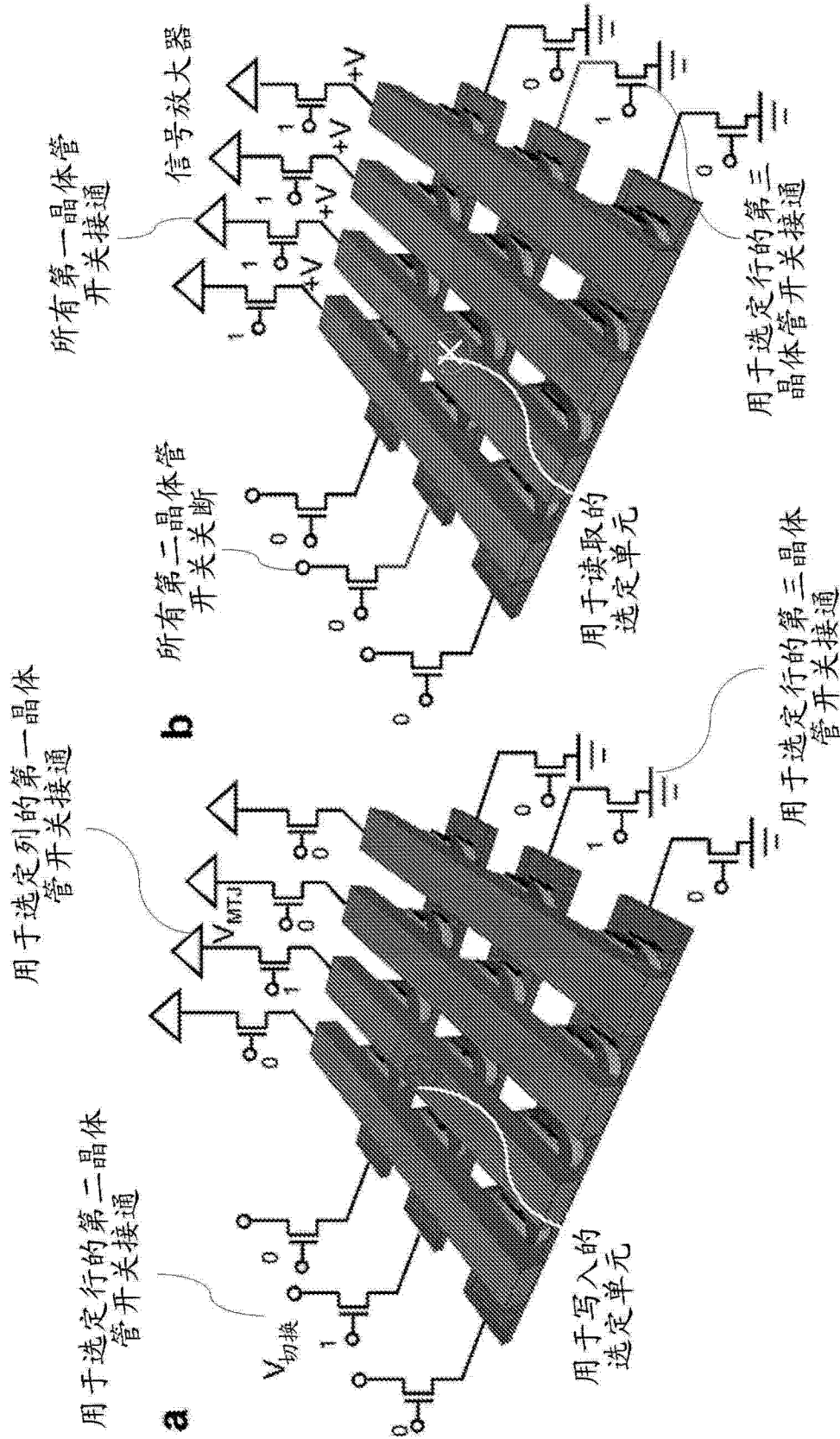


图 9A  
(写入操作)

图 9B  
(读取操作)

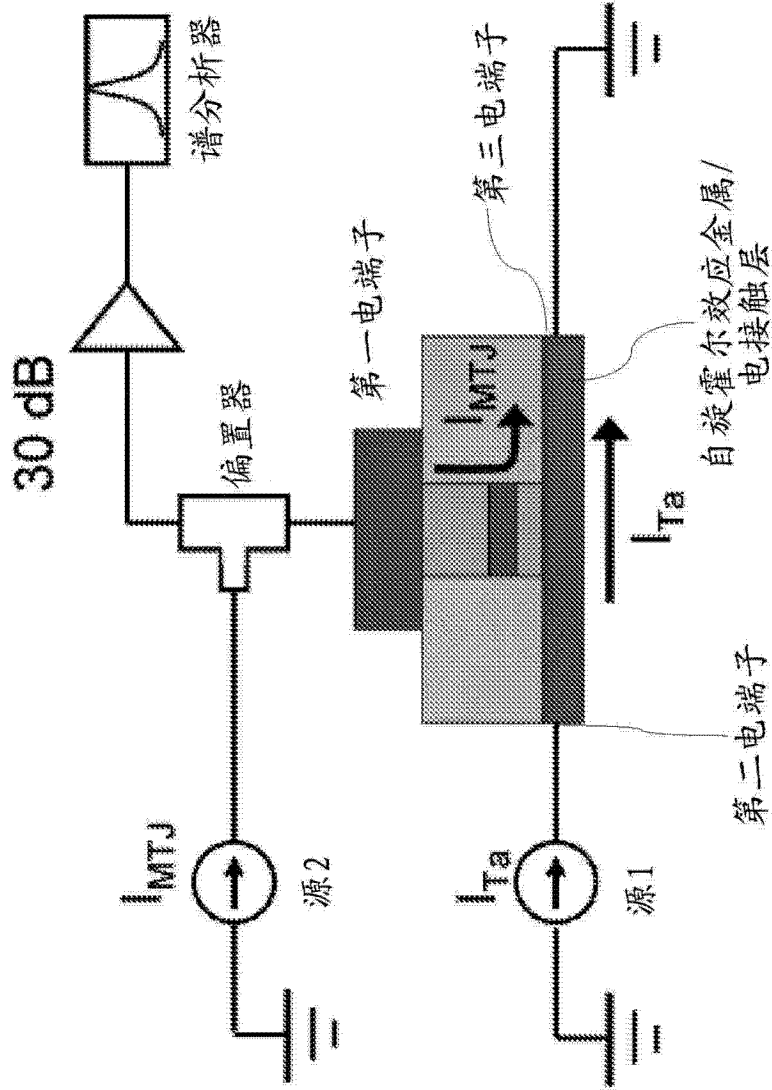


图 10



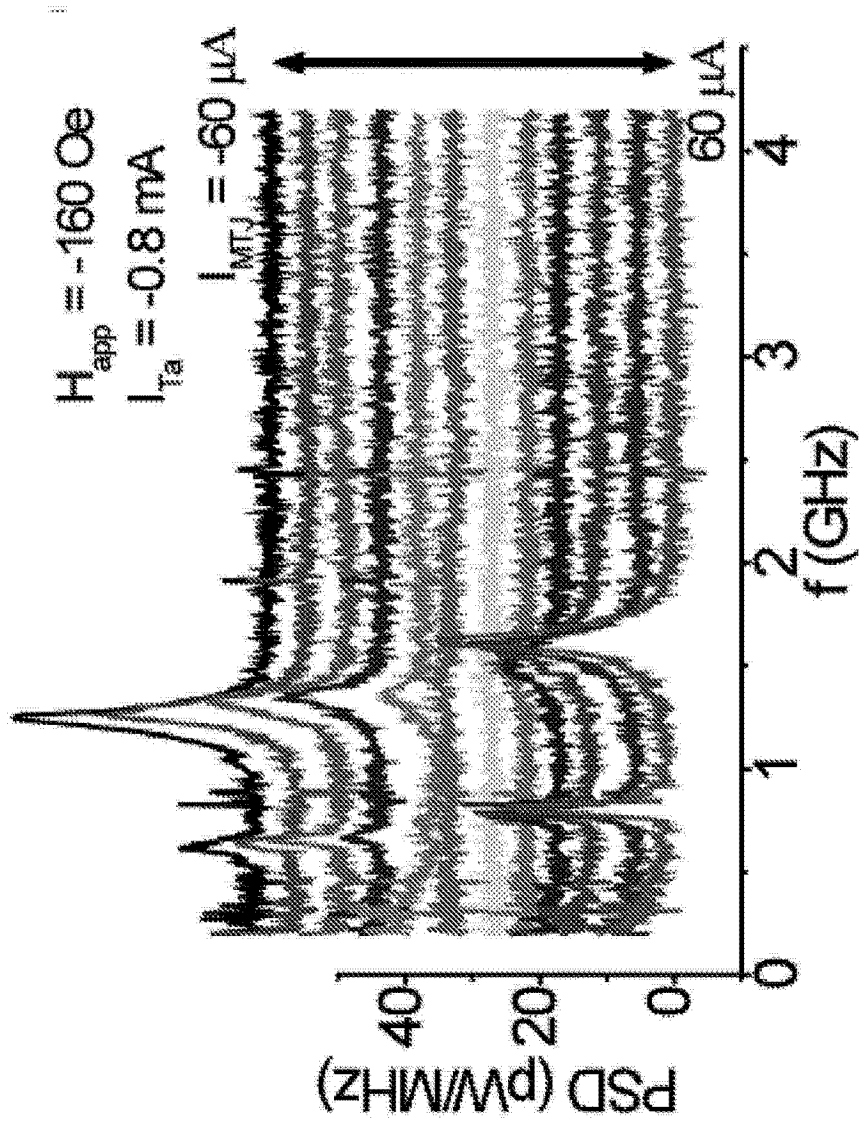


图 11

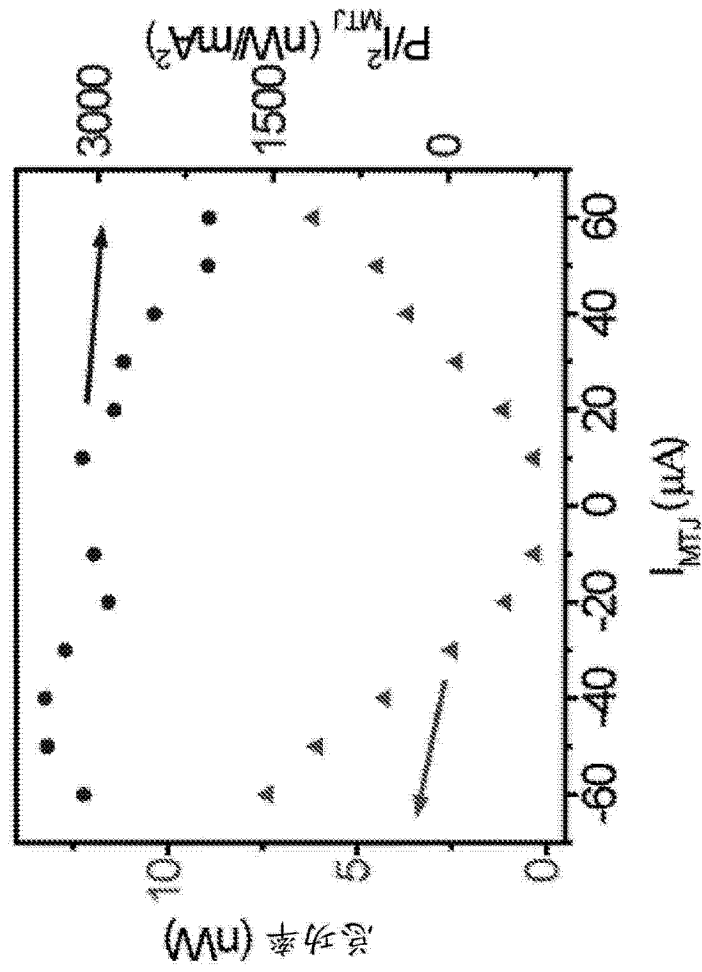


图 12A

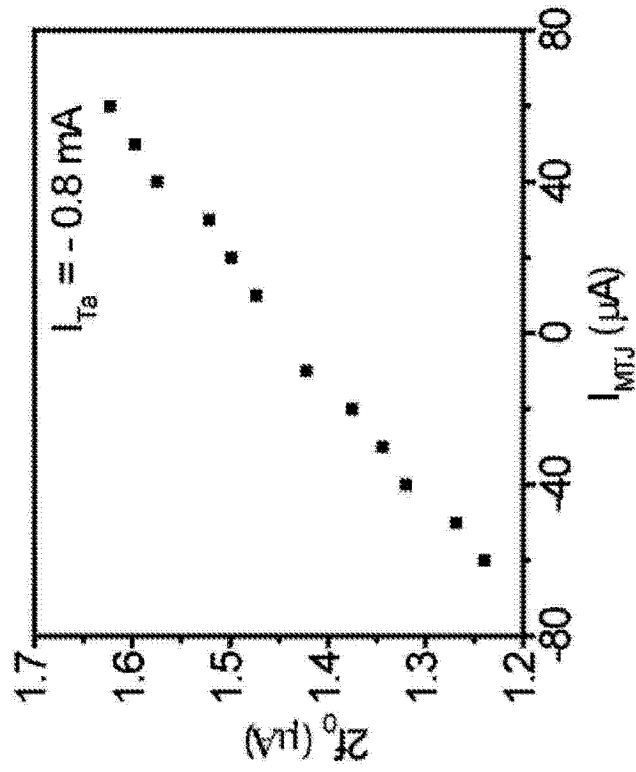


图 12B

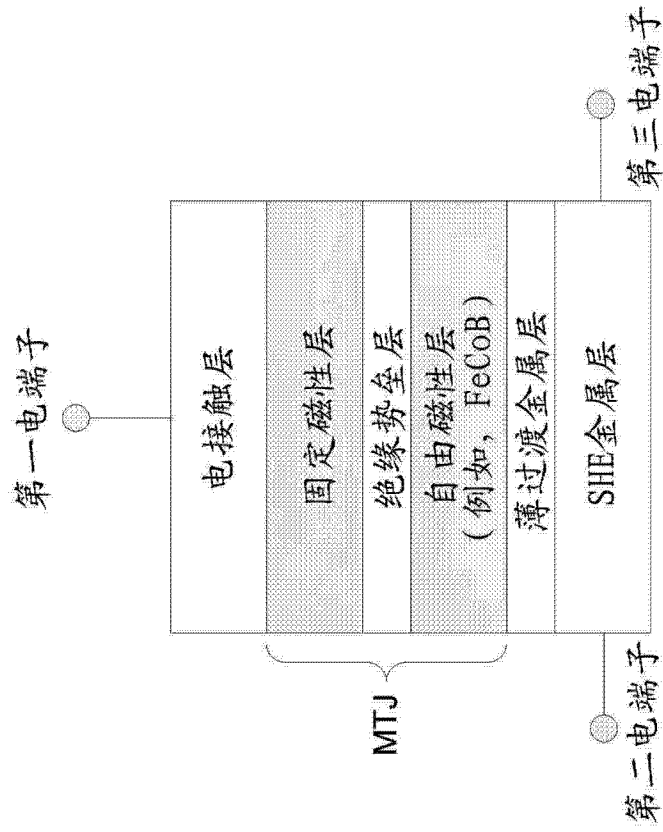


图 13

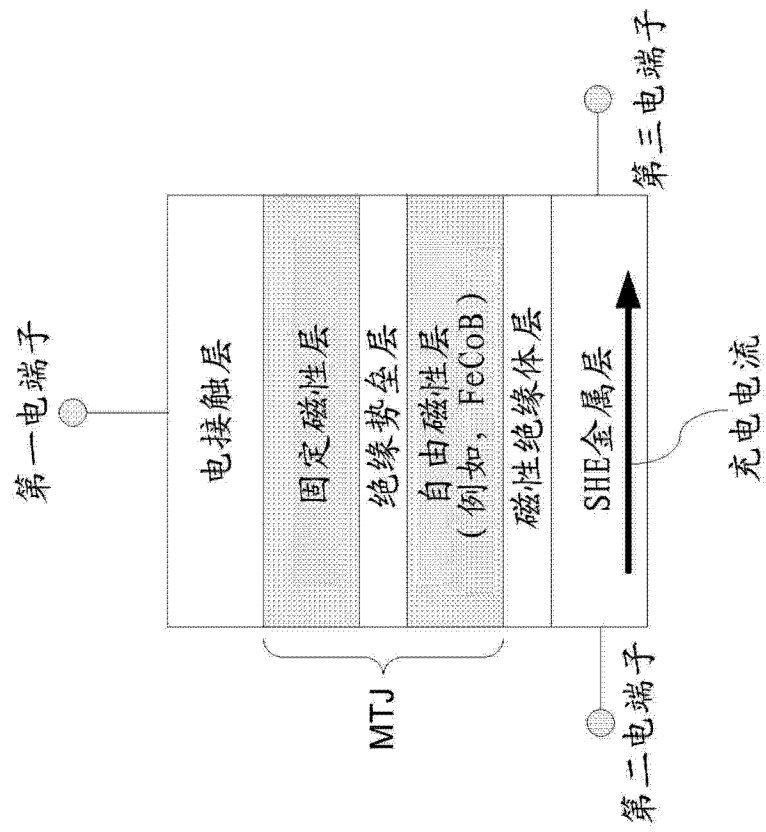


图 14A

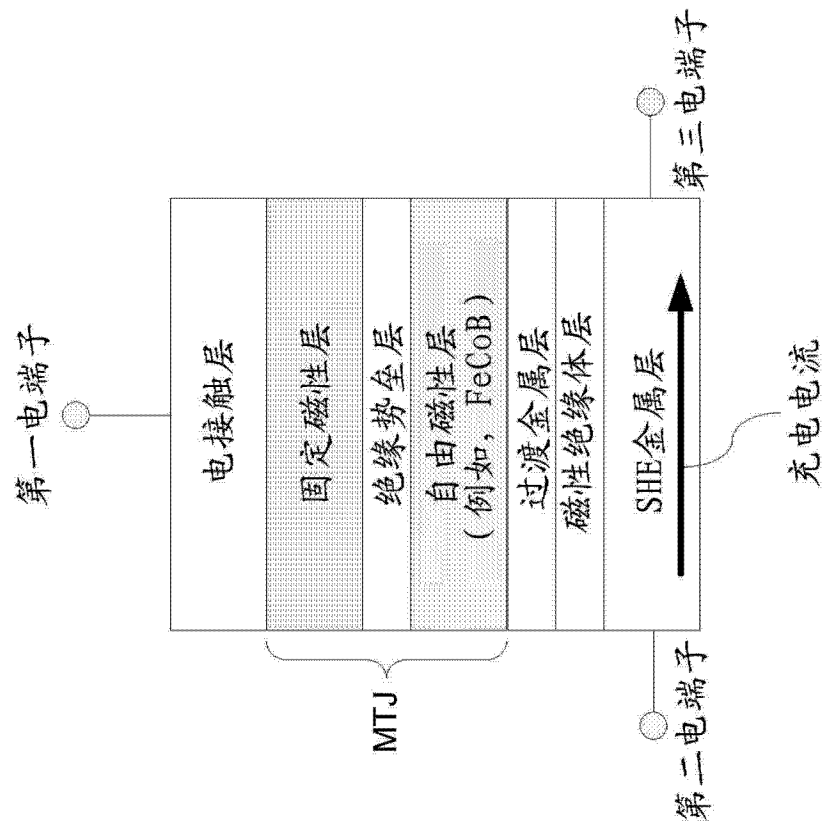


图 14B