

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

H01L 29/82 (2006.01)

H01L 43/08 (2006.01)

H01L 27/105 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 03822480.1

[45] 授权公告日 2009年3月18日

[11] 授权公告号 CN 100470844C

[22] 申请日 2003.7.25 [21] 申请号 03822480.1

[30] 优先权

[32] 2002.7.25 [33] JP [31] 217336/2002

[32] 2003.3.26 [33] JP [31] 86145/2003

[86] 国际申请 PCT/JP2003/009438 2003.7.25

[87] 国际公布 WO2004/012272 日 2004.2.5

[85] 进入国家阶段日期 2005.3.21

[73] 专利权人 科学技术振兴机构

地址 日本埼玉县

[72] 发明人 菅原聪 田中雅明

[56] 参考文献

JP11-238924A 1999.8.31

JP2001-85763A 2001.3.30

审查员 张 健

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 杨 凯 叶恺东

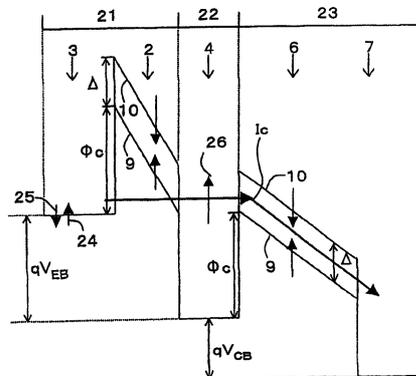
权利要求书 3 页 说明书 27 页 附图 14 页

[54] 发明名称

基于自旋滤波器效应的自旋晶体管和利用自旋晶体管的非易失存储器

[57] 摘要

一种自旋晶体管包括自旋注入器和自旋分析器，所述自旋注入器用于把载流子作为热载流子从第一非磁性电极注入第二非磁性电极层，所述载流子的自旋平行于构成第一铁磁阻挡层的能带边缘的自旋能带，所述自旋分析器用于通过第二铁磁阻挡层的能带边缘上的自旋分裂，当注入第二非磁性电极的自旋偏振热载流子的自旋方向平行于第二铁磁阻挡层的能带边缘上的自旋能带的自旋方向时，把热载流子导通到第三非磁性电极，并且当所述自旋偏振热载流子的自旋方向与注入所述第二磁性电极的自旋方向反平行时，不把所述热载流子导通到第三非磁性电极。还提供一种利用所述自旋晶体管的存储装置。



1. 一种晶体管，它包括由铁磁物质制成的发射极、由铁磁物质制成的基极、由非磁性物质或铁磁物质制成的集电极、由非磁性物质制成的设置在所述发射极和所述基极之间的第一阻挡层和由非磁性物质制成设置在所述基极和所述集电极之间的第二阻挡层，

其中把自旋偏振载流子通过 Fowler-Nordheim 隧道效应，从所述发射极注入所述基极；以及

所述第二阻挡层的阻挡高度能使得所述自旋偏振载流子在所述发射极和所述基极具有平行磁化时能通过所述阻挡高度而被传送、而在所述发射极和所述基极具有反平行磁化时不能通过所述阻挡高度而被传送。

2. 如权利要求 1 所述的晶体管，其中所述发射极和所述基极是由铁磁金属或铁磁半导体制成的。

3. 如权利要求 1 所述的晶体管，其中所述发射极和所述基极是由铁磁半导体形成的，而所述第一阻挡层和所述第二阻挡层由半导体形成。

4. 如权利要求 1 所述的晶体管，其中调整所述第一阻挡层和第二阻挡层的势垒高度以便允许室温工作。

5. 如权利要求 1 所述的晶体管，其中从所述发射极注入所述基极的所述载流子相对于所述集电极的电流传输系数取决于所述发射极和所述基极的相对磁化方向。

6. 一种晶体管，它包括由铁磁物质制成的发射极、由铁磁物质制成的基极、由非磁性物质或铁磁物质制成的集电极、设置在所述发射极和所述基极之间的由非磁性材料制成的第一阻挡层、设置在所述基极和所述集电极之间的由非磁性材料制成的第二阻挡层，

其中自旋偏振载流子通过热电子发射从所述发射极注入所述基极。

7. 如权利要求 6 所述的晶体管，其中所述发射极和所述基极由铁

磁金属或或铁磁半导体制成，而所述第一阻挡层和第二阻挡层由半导体制成。

8. 如权利要求6所述的晶体管，其中利用欧姆接触或隧道接触形成所述发射极和所述第一阻挡层。

9. 如权利要求6所述的晶体管，其中当所述基极是铁磁金属时，所述基极和所述第一阻挡层的势垒结构由 Schottky 结形成，而当所述基极是铁磁半导体时，所述基极和所述第一阻挡层的势垒结构根据所述基极和所述第一阻挡层的能带不连续性形成。

10. 如权利要求6所述的晶体管，其中当所述基极是铁磁金属时，所述基极和所述第二阻挡层的势垒结构通过 Schottky 结形成，而当所述基极是铁磁半导体时，所述基极和所述第二阻挡层的势垒结构根据所述基极和所述第二阻挡层的能带不连续性形成。

11. 如权利要求6所述的晶体管，其中所述发射极由铁磁半导体制成，所述基极由铁磁金属制成，所述第一阻挡层由形成在铁磁半导体和铁磁金属之间的 Schottky 势垒形成。

12. 如权利要求6所述的晶体管，其中从所述发射极注入所述基极的载流子相对于所述集电极的电流传输系数取决于所述发射极和所述基极的相对磁化方向。

13. 一种晶体管，它包括由第一导电类型的铁磁半导体制成的发射极、由第一导电类型的铁磁半导体制成的集电极和由不同于第一导电类型的第二导电类型的铁磁半导体制成的基极，

其中这样调整所述基极的宽度，以便形成从所述发射极到所述集电极的隧道；以及

可根据所述发射极和所述集电极的相对磁化方向控制输出电流的跨导或振幅。

14. 如权利要求13所述的晶体管，其中所述基极是对于所述发射极和所述集电极的多数载流子的隧道阻挡层，而所述基极中的导带的底部低于所述集电极中的价带的顶部，使得所述发射极和所述集电极是对于所述基极的多数载流子的能量势垒。

15. 一种存储装置，它包括：

根据权利要求 1 到 14 中任何一项的一个晶体管；

信息重写装置，用于通过改变包括在所述晶体管中的所述铁磁物质的磁化状态来重写所述晶体管中的信息；以及

信息读取装置，用于从所述晶体管的输出特性读取以磁化状态的形式存储的信息。

16. 如权利要求 15 所述的存储装置，其中根据权利要求 1 到 14 中任何一个的晶体管具有能够独立地控制磁化方向的铁磁物质的自由层和不改变磁化方向的铁磁物质的固定层，并且所述晶体管可以保持其中所述自由层和所述固定层具有相同磁化方向的第一状态以及其中所述自由层和所述固定层具有不同磁化方向的第二状态。

17. 一种存储装置，其中根据权利要求 1 到 14 中任何一个的晶体管具有能够独立地控制磁化方向的铁磁物质的自由层和不改变磁化方向的铁磁物质的固定层，并且用以按照所述固定层和所述自由层的相对磁化方向存储信息，以便根据所述晶体管的取决于所述固定层和所述自由层的相对磁化方向的输出特性检测存储在所述晶体管中的信息。

18. 一种存储装置，它包括：

根据权利要求 1 到 14 中任何一个的一个晶体管；

连接到所述发射极的第一导线；

连接到所述基极的第二导线；以及

连接到所述集电极第三导线。

基于自旋滤波器效应的自旋晶体管 和利用自旋晶体管的非易失存储器

技术领域

本发明涉及一种新型晶体管。更具体地说，本发明涉及一种具有取决于载流子自旋方向的输出特性的晶体管和利用所述种晶体管的非易失存储器电路(非易失存储器)。

背景技术

从工作速度和集成度的观点看来，DRAM(动态随机存取存储器)已主要用作以微电脑为代表的电子设备用的半导体存储器。在DRAM中，由于保持存储器要消耗能量和断电时所存储的内容丢失的问题，难以满足近年来节能和移动设备的要求。为了满足这样的要求，重要的是一种除高速、高集成度和低功耗外，还具有非易失特性的新型存储器。

作为一种可以实现工作速度和集成度等于DRAM的并具有非易失特性的下一代存储器，注意力集中在MRAM(磁阻随机存取存储器)上。MRAM按照铁磁物质的磁化方向存储信息并通过自旋阀装置的巨磁阻效应或磁隧道结(MTJ)的隧道磁阻(TMR)效应在电气上按照其磁化方向读取信息。使用铁磁物质的MRAM可以在不消耗能量的情况下以非易失方式保存信息。

图17(A)和17(B)是表示利用MTJ的MRAM的典型单元结构的简图。如图17(A)所示，在所述MRAM中，一位存储单元由一个MTJ和一个MOS(金属氧化物半导体)晶体管构成。所述MOS晶体管的栅极连接到读出字线，其源极接地，其漏极连接到MTJ的一端，而MTJ的另一端连接到位线。

如图17(B)所示, MTJ具有隧道结构, 后者具有插入两个铁磁电极之间的薄的绝缘膜, 并且所述MTJ具有TMR效应, 其中隧道电阻按照两个铁磁电极的相对磁化方向而不同。具体地说, 当两个铁磁电极具有平行的磁化时和当它们具有反平行磁化时TMR的变化速率称为TMR比率, 用以计算TMR的效应。

MRAM采用以下方法来存储信息: 利用由流入位线和与其正交的重写字线(未示出)的电流感生的合成磁场, 使MTJ的磁化状态, 也就是说, 两个铁磁电极的相对磁化方向可以是平行磁化或是反平行磁化。

为了读出存储在指定单元的存储信息, 向连接所述单元的指定读出字线施加一个电压, 以便使MOS晶体管导通, 读出电流(以下称为"驱动电流")从连接所述单元的指定位线流到MTJ, 而把基于TMR效应的MTJ的电压降作为输出电压检测出来, 以便读出所述存储的信息。

发明内容

利用MTJ的MRAM使用铁磁物质, 以便具有非易失、低功耗和高速的特性。所述单元的结构已被简化, 以便适用于高密度集成。MRAM预期作为下一代非易失存储器。为了实现这一点, 需要解决以下问题。

(1) MTJ具有与平行磁化和反平行磁化状态对应的二进制电阻值。MRAM使驱动电流流到MTJ, 以便以输出电压的形式检测所述电阻值。为了获得高的输出电压, 必须调整MTJ绝缘膜的厚度以便优化所述隧道电阻。因为TMR比率取决于所述绝缘膜的厚度, 所以隧道电阻的优化受到限制。

(2) 为了精确地读出存储器的信息内容, 所述TMR比率必须大, 以便增大平行磁化和反平行磁化两个磁化状态的输出电压比率。为了实现高的TMR比率, 必须使用具有大的自旋偏振率的铁磁物质来优化形成方法、材料和绝缘层的膜厚。

(3)在利用MTJ的MRAM中，施加在MTJ上的偏置必须大，以便提高工作速度。MTJ在原理上具有不可避免的问题，当铁磁电极之间引起的电压降增大时，TMR比率降低。基于TMR的输出电压的改变速率随着在MTJ中引起的电压降增大而降低。所述现象是TMR效应本身造成的。只要磁化状态只根据TMR效应读出，这是难以避免的。

总结上述问题，为了在MTJ中以高的灵敏度检测存储信息，必须调整MTJ的阻抗(结电阻)，以便优化输出电压的振幅。另外，所述TMR比率必须大，以便增大平行磁化和反平行磁化两个磁化状态输出信号的比率。为使TMR比率不会由于偏置而减少，TMR比率的偏置电阻是必不可少的。

若输出信号可以不管存储装置的特性而通过存储装置以外的外围电路自由设计，则上述所有问题都可以解决。

本发明的一个目的是提供一种非易失存储器，它按照磁化状态把信息存储在包括在晶体管中的铁磁物质中，并利用所述晶体管的取决于载流子的自旋方向的输出特性来读取所述信息。

按照本发明的一个观点，提供一种具有自旋注入器和自旋分析器的晶体管，所述自旋注入器通过自旋滤波效应来注入自旋偏振热载流子，而所述自旋分析器用以通过所述自旋滤波效应选择注入的自旋偏振热载流子。可以根据自旋偏振热载流子的自旋方向来控制所述晶体管的输出特性。

自旋注入器最好具有：第一铁磁阻挡层；与第一个铁磁阻挡层一个端面结合的第一非磁性电极层；以及与第一个铁磁阻挡层另一个端面结合的第二非磁性电极层。

自旋分析器最好具有：第二铁磁阻挡层；与第二铁磁阻挡层一个端面结合的所述第二非磁性电极层；以及与第二铁磁阻挡层另一个端面结合的第三非磁性电极层，所述自旋分析器与所述自旋注入器共享第二非磁性电极层。

第一和第二铁磁阻挡层最好包括绝缘的铁磁半导体或铁磁绝缘

体，并且铁磁阻挡层的能带边缘是通过自旋分裂由上自旋能带和下自旋能带中的任何一种构成的。第二非磁性电极层的厚度最好小于第二非磁性电极层的自旋偏振热载流子的平均自由程。

自旋注入器对于具有平行于构成第一铁磁阻挡层能带边缘的自旋能带的自旋的载流子，具有大的隧穿几率，而对于具有与其反平行的自旋的载流子，具有小的隧穿几率。可以把具有平行于构成第一铁磁阻挡层能带边缘的自旋能带的自旋的载流子作为热载流子从第一非磁性电极注入第二非磁性电极层。

当注入第二非磁性电极的自旋偏振热载流子的自旋方向平行于第二铁磁阻挡层能带边缘上的自旋能带的自旋方向时，自旋分析器通过在第二铁磁阻挡层的能带边缘上的自旋分裂把自旋偏振热载流子导通到第三非磁性电极层，而当所述自旋偏振热载流子的自旋方向与第二铁磁阻挡层的能带边缘上的自旋能带的自旋方向反平行时，不把自旋偏振热载流子导通到第三铁磁电极。

相同偏置下所述晶体管的输出特性取决于第一铁磁阻挡层和第二铁磁阻挡层的相对磁化方向。当第一铁磁阻挡层和第二铁磁阻挡层具有平行磁化时，电流传输系数或电流放大系数高。当它们具有反平行磁化时，电流传输系数或电流放大系数低。

提供一种非易失存储器电路，按照第一铁磁阻挡层和第二铁磁阻挡层的相对磁化方向存储信息，并根据取决于所述磁化状态的晶体管输出特性读取信息。所述存储器电路可以只用所述晶体管构成存储单元。

按照本发明的另一个方面，提供一种非易失存储器电路，它具有：利用自旋晶体管按照铁磁物质的磁化方向存储信息的装置，所述自旋晶体管包括一种其输出特性取决于载流子自旋方向的铁磁物质；和根据输出特性在电气上读取存储在所述自旋晶体管中的信息的装置。

所述自旋晶体管最好具有能够独立地控制磁化方向的至少一种

铁磁物质(以下称为"自由层")和不改变磁化方向的至少一种铁磁物质(以下称为"固定层(pin layer)"),并且作为存储的信息保持其中自由层的磁化方向与固定层的磁化方向相同的第一状态和其中磁化方向不同的第二状态。

所述自旋晶体管最好具有:注入自旋偏振载流子的第一电极结构;接收自旋偏振载流子的第二电极结构;和控制从第一电极结构导通到第二电极结构的自旋偏振载流子数量的第三电极结构,而所述固定层和自由层被包括在第一至第三电极结构中的任何一个中。

提供一种存储电路,它具有:排列成矩阵的自旋晶体管、连接到第三电极结构的字线;使第一电极结构接地的第一导线;和连接到第二电极结构的位线。多条字线沿着列方向延伸。多条位线沿着与位线交叉的方向(行方向)延伸。自旋晶体管排列在字线和位线的交叉点附近。

所述存储器电路通过使电流流到所述自旋晶体管上处在电气上彼此绝缘状态的交叉的另一个第一导线和另一个第二导线而感生的磁场,使自由层的磁化倒转,以便改变自由层和固定层的相对磁化状态,来存储(或重写)信息。

可以使用字线和位线或使用字线和位线中任何一个来代替另一个第一导线和另一个第二导线,或另一个第一导线和另一个第二导线中的任何一个。

所述存储器电路可以根据被包括在所述自旋晶体管中的自由层和固定层具有平行磁化时自旋晶体管的输出特性来读出信息。

提供存储器电路,其中,在每一条位线的一端形成输出端子并且设置从每一条位线分支出来并通过负载连接到电源的第二导线。

在这种情况下,可以通过根据负载的电压降获得的输出电压来读出信息,所述负载的电压降是由在所述自旋晶体管的第一和第二电极结构之间产生的取决于所述自由层和所述固定层的相对磁化状态的电流引起的。

利用上述电路可以提供一种高速高集成密度的非易失存储器电路，它可以通过负载和电源来设计与晶体管的磁化状态相应的输出电压。

附图的简要说明

图1(A)和1(B)是表示按照所述实施例的自旋滤波晶体管的结构示意图，其中图1(A)是示意的剖面图，而图1(B)是图1(A)所示结构的导带(或价带)的能带示意图，图中示出阻挡层自旋能带的自旋方向。

图2(A)和2(B)是按照所述实施例在自旋滤波晶体管的发射极(第一非磁性电极层)、基极(第二非磁性电极层)和集电极(第三非磁性电极层)之间施加基极接地偏压时的能带的示意图，其中图2(A)表示第一和第二铁磁阻挡层的磁化方向彼此平行的情况，而图2(B)表示第一和第二铁磁阻挡层的磁化方向彼此反平行的情况。

图3(A)和3(B)是表示按照所述实施例的自旋滤波晶体管基极接地时的静态特性示意图，其中水平轴以所述图中的向右的方向向表示集电极-基极电压 V_{CB} ，而以其向左的方向向表示发射极-基极电压 V_{EB} ，而垂直轴表示发射极电流 I_E 、基极电流 I_B 和集电极电流 I_C ，其中图3(A)表示发射极和集电极的铁磁阻挡层之间的磁化状态是平行磁化的情况的特性，而图3(B)表示它是反平行磁化的情况的特性；

图4(A)是表示利用按照所述实施例的自旋滤波晶体管1的存储单元结构实例的示意图，图4(B)是表示存储器电路的结构实例的示意图，而图4(C)是示意图，其中垂直轴表示集电极电流 I_C ，水平轴表示集电极-发射极电压 V_{CE} 和自旋滤波晶体管1的 I_C - V_{CE} 特性，并且在同一图中还示出负载电阻的负载直线。

图5(A)是示意地表示电流驱动型自旋晶体管输出特性实例的示意图，而图5(B)是示意地表示电压驱动型自旋晶体管输出特性实例的示意图；

图6(A)是表示利用按照所述实施例电压驱动型自旋晶体管的存储单元结构实例的示意图,图6(B)是表示存储器电路结构实例的示意图,而图6(C)是其中垂直轴表示漏极电流 I_D ,水平轴表示漏极-源极电压 V_{DS} 的示意图,并且同一图中示出电压驱动型自旋晶体管150的 I_D - V_{DS} 特性和有源负载的负载曲线;

图7是表示热电子晶体管型自旋晶体管的结构实例的能带示意图;

图8是表示利用热分离注入(heat release injection)的热电子晶体管型自旋晶体管的结构实例的示意图;

图9是表示利用自旋滤波器效应的热电子晶体管型自旋晶体管结构实例的能带示意图;

图10是表示隧道基极晶体管型自旋晶体管的结构实例的能带示意图;

图11是表示MOS晶体管型自旋晶体管结构实例的剖面图;

图12是表示调制掺杂晶体管型自旋晶体管结构实例的剖面图;

图13是表示具有铁磁半导体沟道的MOS晶体管型自旋晶体管的结构实例剖面图;

图14是表示具有一种结构的自旋晶体管结构实例的剖面图,在所述结构中向设置在铁磁源极和铁磁漏极之间的非磁性绝缘隧道势垒提供栅极绝缘膜和栅极;

图15是表示具有一种结构的自旋晶体管的结构实例的剖面图,在所述结构中向设置在铁磁源极和铁磁漏极或非磁性漏极之间的绝缘铁磁隧道势垒提供栅极绝缘膜和栅极;

图16(A)是表示具有共享源极结构的存储单元的结构实例的示意图;

图16(B)是表示具有共享源极结构的存储单元的剖面结构实例的示意图;以及

图17(A)是表示利用MTJ的典型MRAM结构的示意图,而图17(B)是

表示MTJ工作原理的示意图。

本发明的最佳实施方式

按照本发明的晶体管具有：自旋注入器，用于注入具有指定自旋方向的自旋偏振热载流子；和自旋分析器，用于按照自旋方向选择所述注入的自旋偏振热载流子。自旋注入器具有：第一铁磁阻挡层，它具有允许出现诸如Fowler-Nordheim隧道或直接隧道的隧道效应的厚度；与第一铁磁阻挡层一个端面结合的第一非磁性电极层；以及与第一铁磁阻挡层的另一个端面结合的第二非磁性电极层。自旋分析器具有：第二铁磁阻挡层；与第二铁磁阻挡层一个端面结合的第二非磁性电极层；以及与第二铁磁阻挡层的另一个端面结合的第三非磁性电极层，并且自旋分析器与自旋注入器共享所述第二非磁性电极层。第二非磁性电极层的厚度最好低于非磁性电极层自旋偏振热载流子的平均自由程。

上述结构可与已知的热电子晶体管相比较。第一非磁性电极层和第一铁磁阻挡层相当于发射极和发射极阻挡层。第二非磁性电极层对应于基极。第二铁磁阻挡层和非磁性电极层相当于集电极阻挡层和集电极。

第一和第二铁磁阻挡层包括绝缘铁磁半导体或铁磁绝缘体。铁磁阻挡层的能带是通过磁交换相互作用而自旋分裂的。只有上自旋能带或只有下自旋能带通过自旋分裂而存在于能带边缘。其中只有所述各自旋能带之一存在的能量宽度称为自旋分裂宽度。

按照自旋注入器的自旋滤波效应，在诸如Fowler-Nordheim(FN)隧道或通过第一非磁性电极层和第二非磁性电极层向第一铁磁阻挡层施加电压而产生的直接隧道中，其自旋方向(当载流子是电子时，指与第一铁磁阻挡层的磁化反平行的自旋方向，而当载流子是空穴时，指与第一铁磁阻挡层的磁化平行的自旋方向)与第一非磁性电极层载流子第一铁磁阻挡层能带边缘上的自旋能带的自旋方向匹配的

载流子穿过隧道的几率大；而其自旋方向(当载流子是电子时，指与第一铁磁阻挡层的磁化平行的自旋方向，而当载流子是空穴时，指与第一铁磁阻挡层的磁化反平行的自旋方向)与与第一非磁性电极层载流子第一铁磁阻挡层能带边缘上的自旋能带的自旋方向不匹配的载流子穿过隧道的几率小。

按照自旋分析器的自旋滤波效应，在从自旋注入器把自旋偏振热载流子注入第二铁磁阻挡层自旋分裂能带的情况下，当注入的自旋偏振热载流子的自旋方向平行于第二铁磁阻挡层能带边缘上的自旋能带的自旋方向(第一和第二铁磁阻挡层具有平行磁化)时，所述自旋偏振热载流子通过第二铁磁层的自旋能带导通到第三非磁性电极层，而当所述自旋偏振热载流子的自旋方向与第二铁磁阻挡层(第一和第二铁磁阻挡层具有反平行磁化)的能带边缘上的自旋能带的自旋方向反平行时，所述自旋偏振热载流子不能通过第二铁磁阻挡层导通。

按照上述结构，第一非磁性电极层中其自旋方向平行于第一铁磁阻挡层能带边缘上自旋能带的自旋方向的载流子，作为自旋偏振热载流子通过诸如Fowler-Nordheim隧道或直接隧道等隧道效应注入第二非磁性电极层。此时，这样偏置上述晶体管，使得注入自旋偏振热载流子的能量，大于第二铁磁阻挡层能带边缘处自旋能带边缘上的能量，并小于自旋分裂宽度加到自旋能带边缘的能量。第二非磁性电极层的厚度低于第二非磁性电极层中自旋偏振热载流子的平均自由程。注入的自旋偏振热载流子在不损失能量的情况下抵达第二铁磁阻挡层。这些自旋偏振热载流子的能量，大于第二铁磁阻挡层能带边缘处自旋能带边缘上的能量，并小于所述自旋分裂宽度加到自旋能带边缘上的能量。当注入的自旋偏振热载流子的自旋方向平行于第二铁磁阻挡层能带边缘上自旋能带的自旋方向时，第二铁磁阻挡层中产生的电场引导自旋偏振热载流子穿过自旋能带，进入第三非磁性电极层，并变为第三非磁性电极层和第一非磁性电极层

之间流动的电流。

当注入的自旋偏振热载流子的自旋方向反平行于第二铁磁阻挡层能带边缘上自旋能带的自旋方向时，自旋偏振热载流子在第二非磁性电极层和第二铁磁阻挡层的界面上被散射(或反向散射)，并变为在第二非磁性电极层和第一非磁性电极层之间流动的电流。

根据第一铁磁阻挡层和第二铁磁阻挡层的相对磁化方向是平行还是反平行，在第一铁磁阻挡层中流动的电流可以切换到通过第二铁磁阻挡层在第三非磁性电极层和第一非磁性电极层之间流动的电流，或者通过同一阻挡层在第二非磁性电极层和第一非磁性电极层之间流动的电流。通过第二铁磁阻挡层流动的电流可以按照第一铁磁阻挡层和第二铁磁阻挡层的相对磁化方向控制。与基极接地或发射极接地的已知热电子晶体管和双极性晶体管的工作相比，这对应于通过基极电流控制集电极电流。按照所述实施例的晶体管可以按照第一铁磁阻挡层和第二铁磁阻挡层的相对磁化方向，控制集电极电流对基极电流的电流放大系数。按照所述实施例的晶体管可以控制电流放大系数，并可以按照第一铁磁阻挡层和第二铁磁阻挡层的相对磁化方向以及基极电流(或第一和第二非磁性电极之间的偏压)控制集电极电流的电流放大系数。

改变第一铁磁阻挡层和第二铁磁阻挡层的矫顽力或固定所述各磁化方向之一。施加具有适当强度的磁场(在此磁场强度下第一铁磁阻挡层和第二铁磁阻挡层的磁化方向中的任何一个倒转)，以便任意改变第一铁磁阻挡层和第二铁磁阻挡层的相对磁化方向，使之平行或反平行。换句话说，可以把信息存储在所述晶体管中。

可以利用所述晶体管来构成存储单元。现将描述利用按照所述实施例的晶体管的非易失存储器的实例。按照所述实施例的晶体管的第二非磁性电极层连接到字线。所述晶体管第三非磁性电极层连接到位线。位线通过负载连接到电源，使所述晶体管的第一非磁性电极层接地。按照所述结构，通过向第二非磁性电极层施加偏置来

选择指定的字线。选择指定的位线以便检测输出电压(在第三非磁性电极边缘上产生的电压)。所述输出电压按照所述晶体管第一铁磁阻挡层和第二铁磁阻挡层的相对磁化方向改变,所述相对磁化方向是平行时,输出电压小。相对磁化方向是反向平行时,输出电压较大。可以根据输出电压的振幅读出存储的信息。

在上述非易失存储器中,按照所述实施例的晶体管用作发射极接地的晶体管,电源和负载加在集电极上,而集电极电压是输出电压。通过作为源极电压和负载的外围电路,可以把第一和第二铁磁阻挡层具有平行磁化时的输出电压以及它们具有反平行磁化时的输出电压设计为所需值。利用上述非易失存储器,通过施加偏压可以解决利用MTJ的MRAM中隧道电阻小和输出电压小,TMR比率小和存储的信息难以识别,以及输出电压的比率较小的问题。

现将参照附图详细描述所述晶体管的结构和操作。为了易于理解以下描述,把按照所述实施例的晶体管称为自旋滤波晶体管。

图1(A)和1(B)是表示按照所述实施例的自旋滤波晶体管的结构示意图,其中图1(A)是示意的剖面图,而图1(B)是图1(A)中所示结构的导带(或价带)的能带示意图,图中示出阻挡层自旋能带的自旋方向。当载流子是空穴时,能带边缘上的自旋方向与所述磁化方向一致。当载流子是电子时,能带边缘上的自旋方向与磁化方向相反。

按照所述实施例的自旋滤波晶体管1具有自旋注入器5和自旋分析器8;所述自旋注入器5具有第一铁磁阻挡层2、与第一铁磁阻挡层2的一个端面结合的第一非磁性电极层3以及与第一铁磁阻挡层2的另一个端面结合的第二非磁性电极层4;所述自旋分析器8具有第二铁磁阻挡层6、与第二铁磁阻挡层6一个端面结合的第二非磁性电极层4以及与第二铁磁阻挡层6的另一个端面结合第三个非磁性电极层7。正如从图1(A)显然看出的,自旋注入器5和自旋分析器8共享第二非磁性电极层4。

作为第一、第二和第三非磁性电极层3、4和7,可以使用非磁金

属、n-型非磁性半导体或p-型非磁性半导体。第二非磁性电极层4的厚度最好低于从自旋注入器注入的自旋偏振热载流子在第二非磁性电极层4中的平均自由程。基极宽度比平均自由程短，以便允许电流传输系数为0.5或更大。可以获得电流放大功能。

作为第一和第二铁磁阻挡层2和6，可以使用绝缘铁磁半导体或铁磁绝缘体。铁磁阻挡层的能带是通过磁交换相互作用而自旋分裂的。可以在所述能带边缘上形成其中只存在上自旋或只有下自旋的能量区。自旋偏振能带称为自旋能带。所述能量区的宽度称为自旋分裂宽度 Δ 。

如图1(B)所示，用指向铁磁阻挡层2和6的箭头 \uparrow 表示的实线标示其中可以存在上自旋的能带边缘，也就是说，上自旋能带边缘9。用指向铁磁阻挡层2和6的箭头 \downarrow 表示的实线标示其中可以存在下自旋的能带边缘，也就是说，下自旋能带边缘10。图1(B)中的上自旋能带边缘9和下自旋能带边缘10之间的部分是其中只可以存在上自旋的区域。其能量高于下自旋能带边缘10的区域是其中上自旋和下自旋都可以存在的区域。图1(B)表示上自旋的自旋能带低于下自旋的自旋能带的情况。相反的状态也是可能的。

第一铁磁阻挡层2具有这样一个厚度，使得其中可以通过诸如Fowler-Nordheim隧道(以下称为FN隧道)或直接隧道等隧道效应，通过施加于第一非磁性电极层3和第二非磁性电极层4的电压，把载流子从第一非磁性电极层3输送到第二非磁性电极层4。直接隧道是指这样一种现象，其中载流子直接穿过薄的势垒输送。FN隧道是指这样一种现象，其中在某个外加电压以下直接隧道造成的隧道电流可以忽略不计，而载流子借助隧道效应穿过由施加某个数值以上的电压而产生的势垒上部的三角形电势。

施加于第一非磁性电极层3和第二非磁性电极层4的电压可以是用于典型的存储器电路的电压范围，例如，大约为几百毫伏到几伏。第二铁磁阻挡层6的厚度必须是这样的厚度，使得从第二非磁性电极

层4到第三非磁性电极层7不出现载流子的热分离和由所述隧道引起的电流(所谓漏电流)。

非磁性电极层3、4和7以及铁磁电极层2和6形成图1(B)所示的能带结构。图1(B)中非磁性电极层部分的实线11显示金属的Fermi能量、n-型(p-型)半导体的Fermi能量或导带底端的能量(价带的顶部)。铁磁阻挡层2和6到非磁性电极层部分的实线11的较低的能量势垒5用 Φ_c 表示,而自旋分裂宽度用 Δ 表示。铁磁阻挡层2和6可以具有不同的 Φ_c 和 Δ 。下面将示出铁磁阻挡层2和6具有相同 Φ_c 和 Δ 的情况。当载流子是电子时,非磁性金属或n-型半导体用作非磁性电极层3、4和7,而用绝缘铁磁半导体或铁磁绝缘体作铁磁阻挡层2和6。在这种情况下,铁磁阻挡层2和6的上自旋能带边缘9和下自旋能带边缘10是这样的自旋能带边缘:其中导带的底端是自旋分裂的。当载流子是空穴时,用p-型半导体作非磁性电极层3、4和7,并用绝缘铁磁半导体或铁磁绝缘体作铁磁阻挡层2和6。在这种情况下,铁磁阻挡层2和6的上自旋能带边缘9和下自旋能带边缘10是这样的自旋能带边缘,其中价带的顶部是自旋分裂的。

现将详细描述自旋滤波晶体管的工作原理。在以下的描述中,为了简化描述,同时使用热电子晶体管标记。第一非磁性电极层3和第一铁磁阻挡层2称为发射极21。第二非磁性电极层4称为基极22。第二铁磁阻挡层6和第三非磁性电极层7称为集电极23。第一非磁性电极层3称为发射极3。第三非磁性电极层7称为集电极7。现将描述载流子为电子时的情况的一个实例(当载流子是空穴时工作原理基本相同,故此描述从略)。

图2(A)和2(B)是当按照所述实施例的自旋滤波晶体管的发射极、基极和集电极之间施加基极接地偏压时的能带示意图,其中图2(A)表示第一和第二铁磁阻挡层的磁化方向彼此平行的情况,而图2(B)表示第一和第二铁磁阻挡层的磁化方向彼此反平行并与图2(A)对应的情况。偏压 V_{EB} 施加在发射极21和基极22之间。偏压 V_{CB} 施加在基极22和

集电极23之间。 V_{BB} 的振幅设置为满足 $(\Phi_c < qV_{BB} < \Phi_c + \Delta)$ 的方程关系。 Q 为电荷量。

发射极21用作自旋注入器，把自旋偏振热电子注入基极22。当偏压 V_{BB} 通过隧道把载流子从发射极3通过第一铁磁阻挡层2输送，第一铁磁阻挡层2的导带自旋分裂，而存在于发射极3中的上自旋电子24和下自旋电子25对所述势垒高度的感觉是不同的。图2(A)中，上自旋电子24感觉的势垒高度是对第一铁磁阻挡层2的上自旋能带边缘9的能量，也就是说， Φ_c 。下自旋电子25感觉的势垒高度是第一铁磁阻挡层2的下自旋能带边缘10的能量，也就是说， $\Phi_c + \Delta$ 。控制基极-发射极电压可以选择性地把其自旋具有较低感觉势垒高度的电子，在这种情况下就是具有上自旋的电子24以热电子的形式隧道注入到基极22中(所述现象称为自旋滤波效应)。

自旋滤波晶体管的集电极23用作自旋分析器，选择注入基极22的自旋偏振热电子的方向。通过偏压 V_{BB} 变热并注入基极22的自旋偏振热电子26，因为基极22的宽度设置得低于自旋偏振热电子26的平均自由程，所以可以以弹道方式(ballistically)在不损失能量的情况下达到基极22和集电极23的界面。在集电极23的第二铁磁阻挡层6中，通过所述导带的自旋分裂出现两个具有不同的势垒高度的势垒。如图2(A)所示，当第一和第二铁磁阻挡层2和6的磁化方向彼此平行时，其自旋与自旋偏振热电子26的自旋平行的第二铁磁阻挡层6的上自旋能带边缘9，其能量低于自旋偏振热电子26能量。自旋偏振热电子26被引导穿过第二铁磁阻挡层6，到达集电极7，成为集电极电流 I_C 。

如图2(B)所示，第一和第二铁磁阻挡层2和6的磁化方向彼此反平行时，具有下自旋的自旋偏振热电子27注入基极22。具有下自旋的第二铁磁阻挡层6的下自旋能带边缘10，其能量高于所述自旋偏振热电子27的能量。所述自旋偏振热电子27不能通过第二铁磁阻挡层6的导带，在基极22和集电极23的界面上发生与自旋有关的散射(或反散射)，损失能量，变为基极电流 I_B 。

从发射极流到集电极的电流，其电流传输系数取决于发射极22的第一铁磁阻挡层2和集电极23的第二铁磁阻挡层6的相对磁化方向而非常不同。换句话说，集电极电流对基极电流的电流放大系数非常不同。

图3(A)和3(B)是表示按照所述实施例的自旋滤波晶体管基极接地时的静态特性的示意图，其中水平轴在所述图中的向右的方向表示集电极-基极电压 V_{CB} ，而在其向左的方向表示发射极-基极电压 V_{EB} ，而垂直轴表示发射极电流 I_E 、基极电流 I_B 和集电极电流 I_C ，其中图3(A)表示发射极和集电极的铁磁阻挡层之间的磁化状态是平行磁化的情况的特性，而图3(B)表示它是反平行磁化的情况的特性。在图3(A)和3(B)中， α 是电流传输系数， β 是电流放大系数，而下标 \uparrow 和 \downarrow 表示发射极和集电极的铁磁阻挡层的相对磁化方向平行的情况和它们反平行的情况。

如图3(A)所示，当发射极和集电极的磁化方向平行时，大部分发射极电流 I_E 可以是集电极电流 I_C 。如图3(B)所示，当磁化方向反平行时，大部分发射极电流 I_E 可以成为基极电流 I_B ，类似于已知热电子晶体管或双极性晶体管，按照所述实施例的晶体管可以用基极电流 I_B 控制集电极电流 I_C ，可以按照第一和第二铁磁阻挡层的相对磁化方向控制电流放大系数。

作为按照所述实施例的自旋滤波晶体管的铁磁阻挡层，可以使用诸如EuS，EuSe和EuO等铁磁半导体。还可以使用诸如R3Fe5O12(R表示稀土元素)等铁磁绝缘体。作为非磁性电极层可以使用非磁性物质。例如，可以使用以高密度作为杂质掺杂的诸如Al或Au等金属或诸如Si或GaAs等非磁性半导体。用EuS作铁磁阻挡层，用Al作非磁性电极层时，势垒高度 $\Phi_c=1.4\text{eV}$ ，而自旋分裂宽度 $\Delta=0.36\text{eV}$ 。按照所述实施例的自旋滤波晶体管可以利用上述材料通过已知的分子束外延生长法、真空淀积法和溅射法制造。

现将以存储单元的形式描述利用本发明的自旋滤波晶体管的非

易失存储器。

图4(A)是表示利用按照所述实施例的自旋滤波晶体管1的存储单元结构实例的示意图。在图4(A)所示的存储单元中,若干个自旋滤波晶体管排列成矩阵,发射极端子E接地,以便把集电极端子C和基极端子B连接到读出位线BL和读出字线WL。重写字线和重写位线在与其它导线处于电气绝缘的状态下在自旋滤波晶体管上排列成彼此交叉。可以使用读出位线BL和读出字线WL作为重写字线和重写位线。图4(A)是表示所述种情况的单元结构的示意图。图4(A)中,存储单元可以只用自旋滤波晶体管构成,并且可以具有很简单的布线结构。可以容易地构成适用于高密度集成的布置。相同的单元结构用于图4(B)。

现将参照图4(B)描述按照所述实施例的存储器电路。在按照所述实施例的存储器电路41中,第二非磁性电极4作为自旋滤波晶体管1(图1)的基极连接到字线42,第三非磁性电极7作为自旋滤波晶体管1的集电极连接到位线43,位线43通过负载(R_L)44连接到电源(V_{CC})45,而第一非磁性电极3作为自旋滤波晶体管1的发射极接地。用纯电阻作负载。可以使用利用晶体管的有源负载。

为了读出指定存储单元存储的信息,选择指定的字线,在发射极和基极之间施加偏压,通过负载电阻44向位线43施加电源45的电源电压 V_{CC} ,按照出现在位线43上的输出电压 V_0 的振幅读出存储的信息。图4(C)中,垂直轴表示集电极电流 I_C ,水平轴表示集电极-发射极电压 V_{CE} ,在同一图中示出所述自旋滤波晶体管的 I_C - V_{CE} 特性和负载电阻44的负载直线46。

根据这些特性曲线的交点确定输出电压 V_0 。如图4(C)所示,其中第一和第二铁磁阻挡层2和6的相互磁化状态为平行和反平行的输出电压是 $V_{0\uparrow\uparrow}$ 和 $V_{0\downarrow\uparrow}$ 。 $V_{0\uparrow\uparrow}$ 和 $V_{0\downarrow\uparrow}$ 的绝对值和 $V_{0\uparrow\uparrow}$ 和 $V_{0\downarrow\uparrow}$ 的比率可以通过电路参数(R_L 和 V_{CC})优化。与MTJ不同,在不调整装置本身结构的情况下,按照所述实施例的非易失存储装置可以获得具有所必需的振

幅的输出信号和输出信号的比率。

用于按照所述实施例的晶体管中的自旋滤波效应是一种利用铁磁物质能带自旋分裂的效应，并具有高于MTJ的TMR效应的自旋选择本领。当把基极宽度设置成低于自旋偏振热载流子的平均自由程并且第一和第二铁磁阻挡层之间的相对磁化状态为平行磁化时，电流传输系数 α (由 I_C/I_E 定义)可以是0.5或更高。当它是反平行磁化时，电流传输系数很小。从电流放大系数 β (由 I_C/I_B 定义)看，在平行磁化和反平行磁化的情况下电流传输系数的改变还可以进一步放大。上述外围电路针对其中磁化状态差异巨大的自旋滤波晶体管输出特性优化输出信号。可以容易地获得所需的输出信号绝对值和所需的输出信号比率。

现将描述一种利用其输出特性随载流子自旋方向而定的晶体管(以下称为"自旋晶体管")的非易失存储器电路。

按照本发明的存储器电路涉及一种利用自旋晶体管的非易失存储器电路。所述自旋晶体管包括诸如铁磁金属和铁磁半导体等铁磁物质，并按照磁化状态控制载流子的自旋方向，以便改变所述输出特性。根据铁磁物质的磁化状态在所述自旋晶体管中存储信息，利用反映磁化状态的晶体管输出特性来读出所述信息。一位非易失存储单元可以用一个自旋晶体管构成。可以通过连接到所述存储单元的外围电路来优化关于所述存储信息的输出信号的数值。

更详细地说，所述自旋晶体管具有能够通过磁场独立地控制磁化方向的至少一个铁磁层(自由层)和其中磁化方向是固定的或其矫顽力大于自由层的矫顽力的至少一个铁磁层(固定层)，并且所述自旋晶体管是一种能够在相同的偏置下按照自由层和固定层的相对磁化方向控制晶体管输出特性的晶体管。通过磁场改变自由层的磁化方向。自由层和固定层的相对磁化状态可以是平行磁化和反平行磁化的两种磁化状态。两种磁化状态对应于存储的二进制信息。

自旋晶体管可以根据诸如与自旋有关的散射、隧道磁电阻效应

和自旋滤波效应等随流子的自旋方向而改变的导电现象获得与所述晶体管内的磁化状态相应的输出特性。自旋晶体管具有注入自旋偏振载流子的第一电极结构、接收自旋偏振载流子的第二电极结构和控制从第一电极结构导通到第二电极结构的自旋偏振载流子数量的第三电极结构。

自旋晶体管是基于与典型晶体管相同的工作原理工作的，例外的是导电现象取决于自旋。自旋晶体管可以分为诸如双极性晶体管等的电流驱动型晶体管或诸如场效应晶体管等的电压驱动型晶体管。在电流驱动型晶体管中，第一电极结构对应于发射极，第二电极结构对应于集电极，而第三电极结构对应于基极。在所述实施例中描述的自旋滤波晶体管分类为电流驱动型。在电压驱动型晶体管中，第一电极结构对应于源极，第二电极结构对应于漏极，而第三电极结构对应于栅极。在相同的偏置下，在自旋晶体管中的输出电流(集电极电流或漏极电流)是按照包括在所述自旋晶体管中的铁磁物质的磁化状态而改变的。

现将描述所述自旋晶体管的细节。将描述自旋晶体管和一种利用自旋晶体管的非易失存储器的典型输出特性。可以利用施加在自旋晶体管中的自由层的磁场来实现自由层和固定层的相对磁化状态的平行磁化或反平行磁化。磁化状态可以稳定地存在，除非施加了一个高于自由层矫顽力的磁场。

图5(A)示意地表示电流驱动型自旋晶体管的输出特性的实例。类似于典型电流驱动型晶体管，可以按照基极电流 I_B 的振幅来控制集电极电流 I_C 。集电极电流的振幅取决于包括在所述自旋晶体管中的铁磁物质的磁化状态。图5(A)中，当向所述自旋晶体管施加相同的偏置($I_B=I_{B1}$)，平行磁化时集电极电流 $I_{C\uparrow}$ 大，反平行磁化时集电极电流 $I_{C\downarrow}$ 小。

图5(B)示意地表示电压驱动型自旋晶体管输出特性的一个实例。类似于诸如典型的MOS晶体管等场效应晶体管，当栅极-源极电

压 (V_{GS}) 小于阈值 V_T ($V_{GS} < V_T$) 时, 自旋晶体管处于非导通状态, 于是几乎不产生漏极电流。施加高于 V_T 的 V_{GS} 时, 所述自旋晶体管便进入导通状态。在相同偏置 ($V_{GS} = V_{GS1}$) 下, 当包括在所述自旋晶体管中的铁磁物质具有平行磁化或反平行磁化时, 漏极电流值不同。图3(B)中, 在具有平行磁化的情况下, 漏极电流 $I_{D\uparrow}$ 大, 而在具有反平行磁化的情况下, 漏极电流 $I_{D\downarrow}$ 小。

自旋晶体管可以根据集电极电流或漏极电流的振幅在电气上检测出包括在所述电流驱动型和电压驱动型器件中自由层和固定层的相对磁化方向。正如上面描述的, 铁磁物质可以稳定地保持其磁化方向, 除非从外面施加一个高于所述自由层矫顽力的磁场。自旋晶体管可以通过允许包括在所述器件中的自由层和固定层的相对磁化状态是平行磁化的或是反平行磁化, 以非易失的方式存储二进制信息。一位非易失存储单元可以用一个自旋晶体管构成。

现将以利用电压驱动型自旋晶体管的情况为例, 详细描述利用自旋晶体管的非易失存储器。利用电流驱动型自旋晶体管作为存储单元的非易失存储器可以用相同的方式构成。

图6(A)是表示利用自旋晶体管的存储单元结构实例的示意图, 图6(B)是表示基于所述存储单元的存储器电路结构实例的示意图。图6(A)和6(B)的关系与图4(A)和4(B)的关系相同。在图6(A)所示的存储单元中, 若干个自旋晶体管150排列成矩阵, 源极S接地, 以便分别把漏极D和栅极G连接到读出位线BL和读出字线WL。重写字线和重写位线在所述自旋晶体管150上排列成彼此交叉, 处于在电气上与其它导线绝缘的状态下。可以使用读出位线BL和读出字线WL作为重写字线和重写位线。图6(A)和6(B)是表示所述情况的结构示意图。在图6(A)和6(B)中, 存储单元可以用一个自旋晶体管构成并可以具有非常简易的布线结构。

具体地说, 在具有类似于MOS晶体管的形式电压驱动型自旋晶体管中, 在相邻存储单元之间源极是共享的。可以容易地构成适合

于微加工的布局。

重写/读出位线和重写/读出字线简称为位线BL和字线WL。

重写信息的方法如下：使电流流到在选定的存储单元上交叉的位线BL和字线WL，以便利用由流到各自导线的电流感生的合成磁场来使所述选定的存储单元的自由层倒转。在这种情况下，为了使连接到与选定的单元相同位线BL或字线WL上的非选定的单元不倒转磁化，要这样设置流到各自导线的电流值，使得在由所述各导线之一引起的磁场中不发生磁化倒转。

读取信息时，向连接到选定单元的字线WL施加电压，以便所述所述自旋晶体管导通，然后向所述位线施加电压，检测漏极电流的振幅。根据所述漏极电流的振幅，可以检测出自由层和固定层的相对磁化状态。

图6(B)是存储器电路，它连接到输出端Vo和从输出端Vo通过负载分支到图6(A)所示的存储器电路位线一端的源极电压V_{DD}。图6(C)表示图6(B)所示的存储单元的静态特性和工作点。这里，用由抑制型(depression type)MOS晶体管形成的有源负载160作为负载。如图4(B)所示，可以使用纯电阻。如图6(C)所示，读取信息时在自旋晶体管150的栅极上施加栅极电压V_{GS}，以便通过所述负载把源极电压V_{DD}施加在位线BL上，有源负载的工作点按照固定层和自由层的磁化状态，在图6(C)中的负载曲线上移动(图中p11和p12)。平行磁化和反平行磁化时的输出信号Vo是图中的V_{o↑↑}和V_{o↓↑}。各自输出信号的绝对值和(V_{o↑↑}/V_{o↓↑})的比率可以用有源负载的晶体管特性和外围电路的参数诸如V_{DD}优化。例如，优化所述自旋晶体管的静态特性和有源负载的负载曲线的交点。当漏极电流比率I_{o↑↑}/I_{o↓↑}小时，可以获得大的输出信号比率。当存储单元改变I_{o↑↑}和I_{o↓↑}的数值，而有源负载的饱和电流大于I_{o↓↑}而小于I_{o↑↑}时，输出电压几乎无法改变。因为不使用读出放大器来读取信息，故可能高速读取。所述存储器电路具有以下优点：可以容易获得所需振幅的输出信号，并可能高速读出。

在利用先有技术MTJ和MOS晶体管的存储单元中，按照MTJ的电阻用读出放大器读出输出电压。输出电压由流到MTJ的电流值和MTJ的阻抗(结电阻)确定。输出电压比率不能用外围电路自由调整。

现将参照附图描述可以应用于按照所述实施例的非易失存储器电路的自旋晶体管结构。FM是铁磁金属的缩写，FS是导电铁磁半导体的缩写，IFS是绝缘铁磁半导体的缩写，而NM是非磁性物质的缩写。NM金属表示非磁性金属，而NM半导体表示非磁性半导体。现将描述电流驱动型自旋晶体管。

图7是热电子晶体管型自旋晶体管的能带示意图。自旋晶体管200具有由FM或FS制成的发射极201和基极205。更详细地说，自旋晶体管200具有由FM(或FS)制成的发射极201、由NM制成的发射极阻挡层203、由FM(或FS)制成的基极205、由NM制成的集电极阻挡层207和由NM制成的集电极211。可以使用非磁性金属或非磁性半导体作为NM。

在图7所示的自旋晶体管200中，自旋偏振热载流子从发射极201通过发射极阻挡层203隧道注入基极205。

当发射极201和基极205具有平行磁化时，注入的自旋偏振热载流子在基极205中几乎不发生与自旋有关的散射。当这样设置基极宽度使得自旋偏振热载流子可以按弹道方式通过基极205而输送时，它们穿过集电极阻挡层207到达集电极211。执行与典型热电子晶体管相同的晶体管操作。

当发射极201和基极205具有反平行磁化时，从发射极201注入基极205的自旋偏振热载流子由于基极205中与自旋有关的散射而损失能量，变为基极电流，不穿过集电极阻挡层207。当发射极201和基极205具有反平行磁化时，电流传输系数比两者具有平行磁化的情况低。向自旋晶体管200施加相同的偏置时，发射极201和基极205的相对磁化状态上的差异使电流传输系数或电流放大系数不同。适当地选择集电极阻挡层的势垒高度，自旋晶体管200可以在室温下工作。

自旋晶体管200必须具有大的基极宽度，使得与自旋有关的散射

可以有效地发挥作用，以便在发射极和基极具有平行磁化的情况下和它们具有反平行磁化的情况下电流传输因子的比率增大。当基极宽度加大而发射极和基极具有平行磁化时，电流传输系数较小并低于0.5，使得失去放大功能，需要权衡利弊。

图8是利用热分离作为向基极自旋注入机制的热电子晶体管型自旋晶体管的能带示意图。如图8所示，自旋晶体管220具有由FM(或FS)制成的发射极221、由FM(或FS)制成的基极225和设置在两者之间的由NM制成的发射极阻挡层223。它还具有由NM形成的集电极阻挡层227和在基极225和发射极阻挡层223的结的相反一侧由NM形成的集电极231。可以把非磁性半导体用作发射极阻挡层223和集电极阻挡层227。可以把非磁性半导体或非磁性金属用作集电极231。

在发射极221和发射极阻挡层223之间形成欧姆接触或隧道接触。在基极225和发射极阻挡层223之间或基极225和集电极阻挡层227之间形成结，以便具有图9中所示的能带不连续性。能带不连续性可以通过NM半导体和FM之间的Schottky结和NM半导体和FS的异质结实现。或者，由FS和FM形成Schottky结，在这种情况下产生的Schottky势垒是发射极势垒，FS是发射极而FM是基极。

通过向基极225施加相对于发射极221的偏置，通过热分离使从发射极221扩散到发射极阻挡层223的自旋偏振载流子作为热载流子注入基极225。发射极221和基极225具有平行磁化时，注入基极225的自旋偏振载流子在不发生与自旋有关的散射的情况下抵达集电极。发射极221和基极225具有反平行磁化时，自旋偏振载流子通过与自旋有关的散射变为基极电流。自旋晶体管220利用基极中的与自旋有关的散射。类似于自旋晶体管200，在平行磁化和反平行磁化下电流传输因子的比率和平行磁化中电流传输系数之间存在权衡利弊的关系。与利用隧道注入的自旋晶体管相比，存在这样一种特性，即，电流驱动力可以大而且容易实现室温工作。

图9是利用自旋滤波效应的热电子晶体管型自旋晶体管的能带示

意图。虽然已经详细描述过，但是现在还要简短地描述它的特性。图9中所示的自旋晶体管240具有由IFS制成的发射极阻挡层243和集电极阻挡层247。只有具有发射极阻挡层243的自旋滤波效应造成的自旋的载流子，才可以从NM半导体(或NM金属)制成的发射极241，选择性地注入NM半导体(或NM金属)制成的基极245。把基极宽度设置成低于自旋偏振热载流子的平均自由程。注入基极245的自旋偏振热载流子以弹道方式通过基极245导通。此时，向自旋晶体管240提供这样的偏置，使得自旋偏振热载流子注入集电极阻挡层247(用图9中向上箭头表示的自旋能带边缘)的上自旋能带的能量分裂宽度和下自旋能带(图9中的向下箭头表示的自旋能带边缘)。当发射极阻挡层243和集电极阻挡层247具有平行磁化时，注入基极245的自旋偏振热载流子用具有集电极阻挡层247中的低能量的自旋能带，通过集电极阻挡层247的自旋滤波效应穿过所述势垒，并可以传播到NM半导体(或NM金属)的集电极251。当发射极阻挡层243和集电极阻挡层247具有反平行磁化时，大部分自旋偏振热载流子不能靠集电极阻挡层247的自旋滤波效应穿过集电极阻挡层247，变为基极电流。

在自旋晶体管240中，电流传输系数(或电流放大系数)按照发射极阻挡层243和集电极阻挡层247的相对磁化方向而不同。自旋滤波效应具有很大的自旋选择本领。在所述晶体管中，平行磁化和反平行磁化时的电流传输因子的比率增大。自旋晶体管240可以充分地减小基极宽度。与利用图7和8所示的与自旋有关的散射的自旋晶体管不同，有以下优点：在电流放大系数和自旋选择本领之间对基极宽度不存在权衡利弊的关系。

图10是隧道基极晶体管型自旋晶体管的能带示意图。如图10所示，在隧道基极晶体管型自旋晶体管260中，p-型(或n-型)FS用作发射极261和集电极265，而n-型(或p-型)NM半导体用作隧道基极263。最好使用II型异质结，使得基极263是在发射极和基极之间以及在基极和集电极之间对空穴(或电子)的势垒。基极宽度较小，以便产生

从发射极到集电极的隧道电流。

在图10中所示的结构中，当发射极261和集电极265具有平行磁化时，具有发射极的若干自旋的载流子可以容易地穿过隧道到达集电极265，并且隧道电导率高。当发射极261和集电极265具有反平行磁化时，由于隧道磁阻效应(TMR效应)隧道电导率低。集电极电流的振幅可以按照发射极261和集电极265的相对磁化状态控制。

当自旋晶体管260中的TMR比率大时，取决于发射极和集电极的磁化状态的集电极电流的变化可以增大。为了有效地通过自旋晶体管260呈现TMR效应，当向基极-集电极结施加反偏置时，抑制层最好不扩展到集电极侧。当抑制层扩展到基极侧时，在集电极电流的饱和特性上存在出现问题的可能性。

当基极层以高密度掺杂，使得自旋晶体管260中的抑制层不展宽到基极层，而基极-集电极结的抑制层扩展到集电极侧时，不能期望基极中的TMR效应和注入集电极的载流子通过集电极中的与自旋有关的散射而产生电阻。利用与自旋有关的散射可以改变集电极电流按照发射极和集电极的磁化状态的振幅。与自旋有关的散射造成的电阻变化小。与利用TMR效应相比，效应可能不高。现将参照附图描述电压驱动型自旋晶体管。

图11是表示MOS 晶体管型自旋晶体管的剖面结构的示意图。如图11所示，MOS晶体管型自旋晶体管300具有这样一种结构，其中源极303由FM制成，漏极305由FM制成，而栅极311通过栅极绝缘膜307在NM半导体301上形成。用FM和NM半导体的Schottky结作为源极303和漏极305。其它结构与典型的MOS晶体管相同。

从源极303注入直接在NM半导体301中栅极绝缘膜307下面形成的沟道的自旋偏振载流子穿过沟道到达漏极305(为简单起见，以下忽略注入所述沟道的自旋的栅极电场造成的Rashba效应的影响)。当源极303和漏极305具有平行磁化时，注入漏极305的自旋偏振载流子不发生与自旋有关的散射。当它们具有反平行磁化时，在漏极305中产生

与自旋有关的散射造成的电阻。

在晶体管300中，跨导依源极和漏极相对磁化方向而不同。

FS还可以用作源极303和漏极305，在它和半导体301之间形成pn结，以形成源极和漏极。

图12是表示调制掺杂晶体管型自旋晶体管的剖面结构的示意图。自旋晶体管320具有：由FM(或FS)制成的连接到在第一NM半导体321和第二NM半导体327的界面上产生的二维载流子气体的源极323；由FM(或FS)制成的漏极325；以及栅极331。这与典型的调制掺杂晶体管相同，只是源极323和漏极325由铁磁物质制成。

自旋偏振载流子从源极323注入由二维载流子气体形成的沟道333。由于漏极325中与自旋有关的散射的缘故，达到漏极325的自旋偏振载流子按照源极323和漏极325的相对磁化方向而具有不同的跨导。

图13是利用FS作为沟道区域的MOS晶体管型自旋晶体管的剖面图。图13所示的自旋晶体管340具有这样一种结构，其中通过栅极绝缘膜347在FS 341上形成由FM制成的源极343、由NM(或FM或FS)制成的漏极345和栅极351。FM和FS的Schottky结用作源极343。其它结构与典型的MOS晶体管相同。

自旋偏振载流子从源极343通过Schottky势垒隧道注入沟道341。通过隧道注入的TMR效应和FS 341的沟道中与自旋有关的散射来实现取决于源极343和FS341的相对磁化方向的跨导。

在图14中示出其剖面结构的自旋晶体管360是一种具有插入在由FM(FS)制成的源极361和由FM(或FS)制成的漏极363之间的隧道结结构并且这样设置栅极371以便向隧道阻挡层365施加电场的自旋晶体管。

最好这样设置隧道阻挡层365的膜厚度，使得当只在源极和漏极之间施加偏置时不发生Fowler-Nordheim(FN)隧道。通过栅极电压来改变在源极和漏极之间施加偏置而产生的隧道势垒能带边缘的三角形电势，以便诱生FN隧道，获得漏极电流。

从源极361注入的自旋偏振载流子按照源极361和漏极363的相对磁化状态而在漏极363内发生与自旋有关的散射。可以通过源极和漏极的相对磁化方向来控制所述晶体管的跨导。

图15中示出其剖面结构的自旋晶体管380用一种由IFS制成的隧道阻挡层385代替图14中所示的自旋晶体管360的隧道阻挡层。源极381必须是由FM或FS制成的。漏极383不必是铁磁物质。IFS隧道阻挡层385的势垒高度按照载流子的自旋方向而不同。当源极381和隧道阻挡层385具有平行磁化时，在源极和漏极之间以及源极和栅极之间施加偏置，使晶体管进入导通状态。在相同的偏置条件下，当源极381和隧道阻挡层385具有反平行磁化时，从源极381的若干自旋看到的隧道势垒的高度增大了。自旋偏振载流子的隧穿几率减小，使漏极电流减小。自旋滤波效应的自旋选择本领很大。利用一种具有大的自旋偏振率的铁磁物质作为源极381时，跨导按照源极和漏极的相对磁化方向可以发生很大的变化。

上述不同的自旋晶体管可以用作图4或图6所示的存储器电路的存储单元。

还有可能形成一种结构，其中两个图11、14和15中所示的电压驱动型自旋晶体管的源极作为一个源极共享。图16(A)是表示具有共享源极结构的存储单元的结构实例的示意图。图16(B)是表示具有共享源极结构的存储单元的剖面结构实例的示意图。

图16(A)和16(B)中所示的存储单元结构具有：彼此相邻的第一自旋晶体管Tr1和第二自旋晶体管Tr2；可共享地连接第一自旋晶体管Tr1的栅极G1和第二自旋晶体管Tr2的栅极G2的字线WL；连接到第一自旋晶体管Tr1的第一漏极D1的第一位线BL1；连接到第二自旋晶体管的第二漏极D2的第二位线BL2；在第一和第二自旋晶体管Tr1和Tr2之间共享的铁磁源极S；以及将其接地的导线。利用上述共享源极的结构提供一种适宜于高密度集成的单元结构。

为了在图11、14和15中所示的电压驱动型自旋晶体管中，把非

导通时的漏电流减到最小，最好使用图16(B)中所示的具有高绝缘性的SOI衬底。

如上所述，按照本发明所述实施例的自旋滤波晶体管 and 所述实施例中所示的不同自旋晶体管具有一种能够按照包括在所述器件中的固定层和自由层的相对磁化方向控制输出特性的特性。所述相对磁化状态具有非易失的特性，能够在不施加电源的情况下保持其状态。所述相对磁化状态可以以非易失的方式存储二进制信息。利用上述输出特性可以在电气上检测所述相对磁化状态。一位非易失存储单元可以用一个自旋晶体管构成。利用所述非易失存储器电路，利用按照所述实施例的自旋晶体管，可以自由地设计输出信号的振幅和输出信号对存储信息的比率。

利用按照本发明所述实施例的自旋晶体管和利用所述种自旋晶体管的存储器电路，可以提高非易失存储器电路的工作速度和集成度。

上面通过一些实施例描述了本发明。本发明不限于此。对于本专业的技术人员来说，显然可以实现各种不同的修改、改进和组合。

工业应用的可能性

如上所述，按照本发明的自旋滤波晶体管可以按照铁磁阻挡层的相对磁化方向极大地改变输出特性。

利用自旋滤波晶体管和另一个具有与其相同的特性的自旋晶体管作为存储单元的非易失存储器电路可以按照包括在所述晶体管中的铁磁物质的相对磁化方向存储二进制信息，并可以在电气上检测所述相对磁化方向。利用本发明的非易失存储器电路可以自由地设计相对于所述存储的信息的输出信号。可以实现一种只用一个晶体管构成一位非易失存储单元以高密度集成的高速非易失存储器电路。

图 1(A)

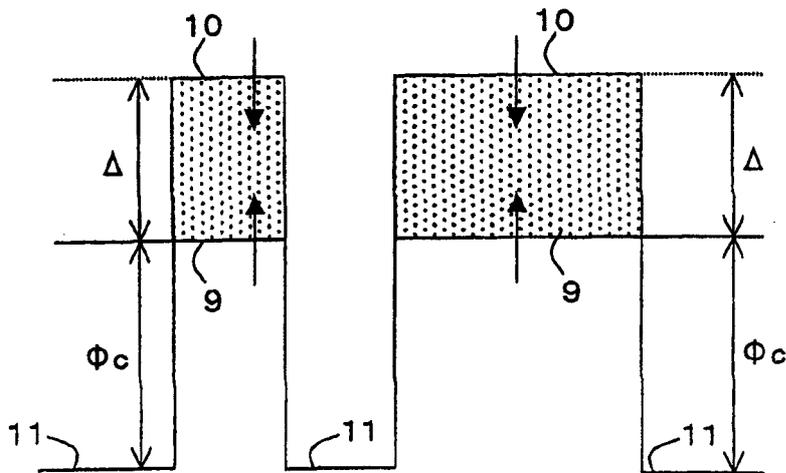
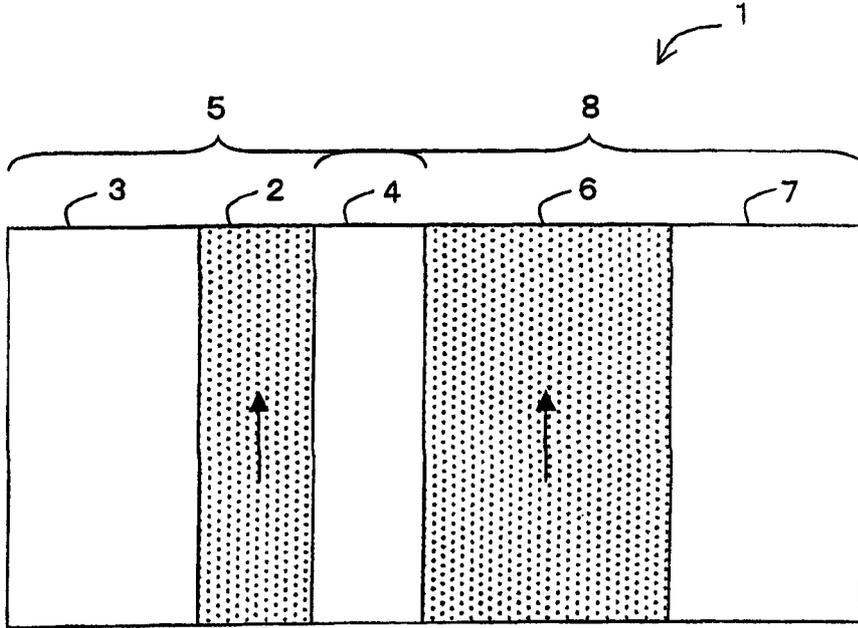


图 1(B)

图 2(A)

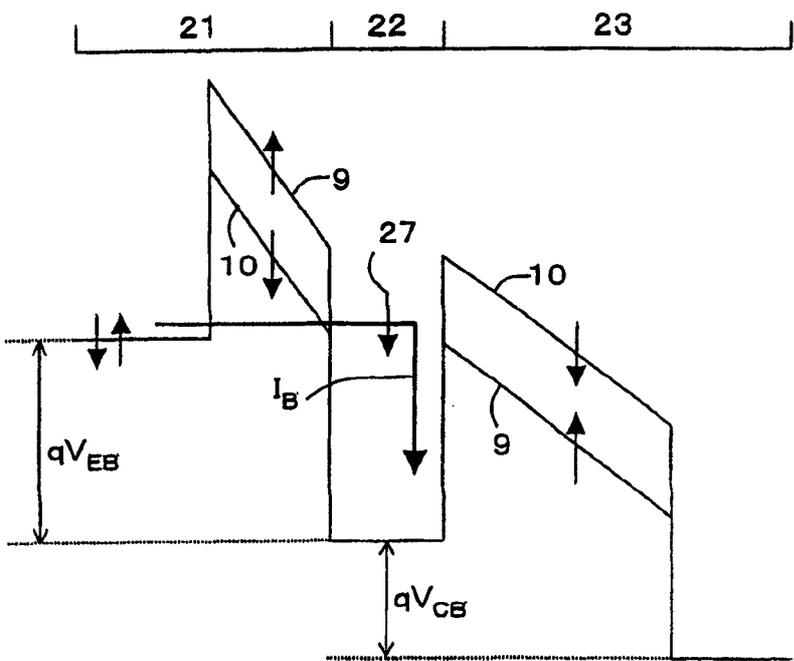
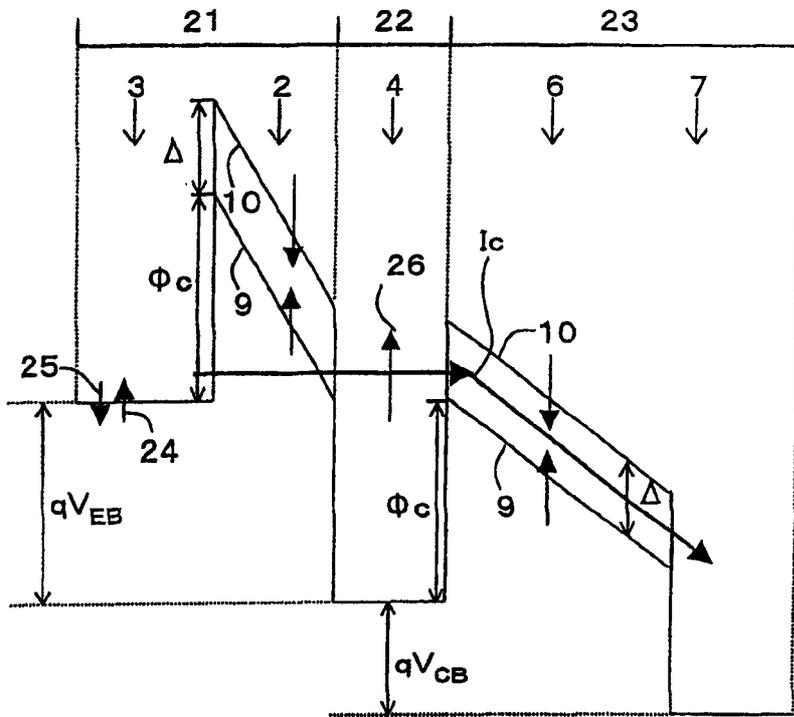


图 2(B)

图 3(A)

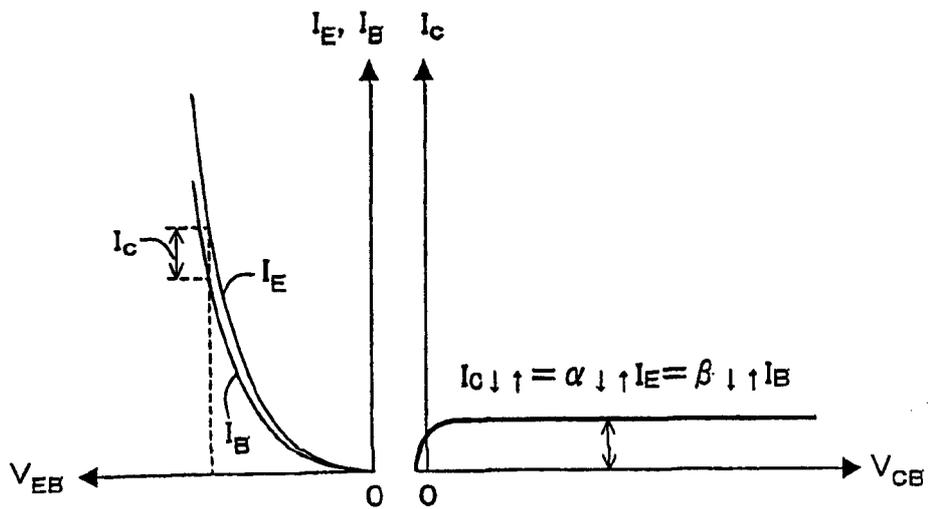
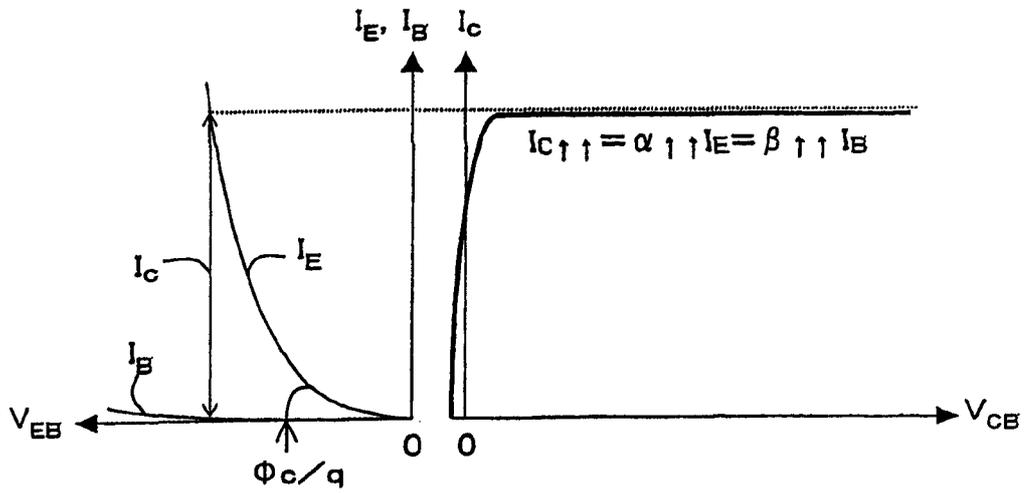


图 3(B)

图 4(A)

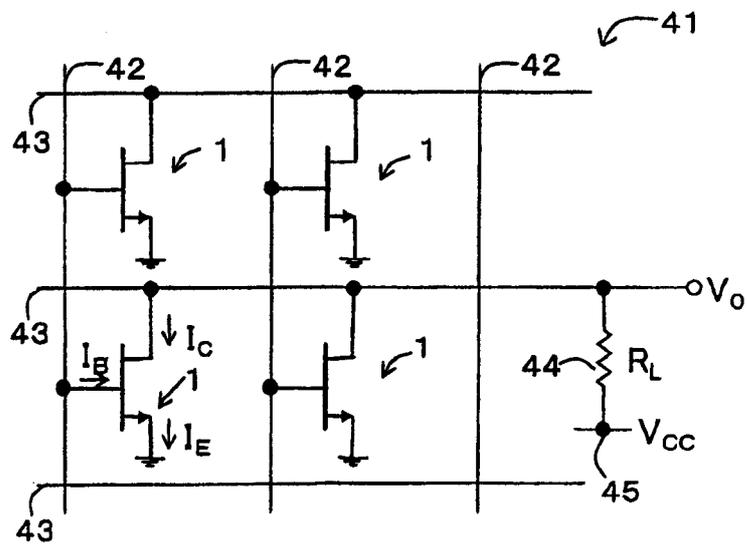
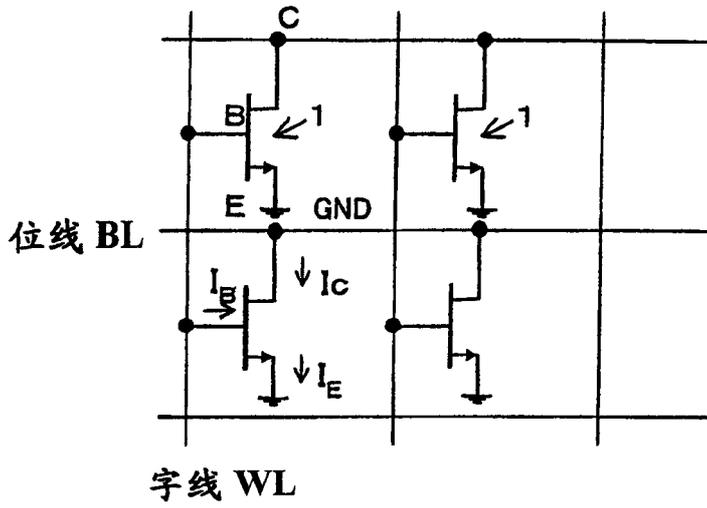


图 4(B)

图 4(C)

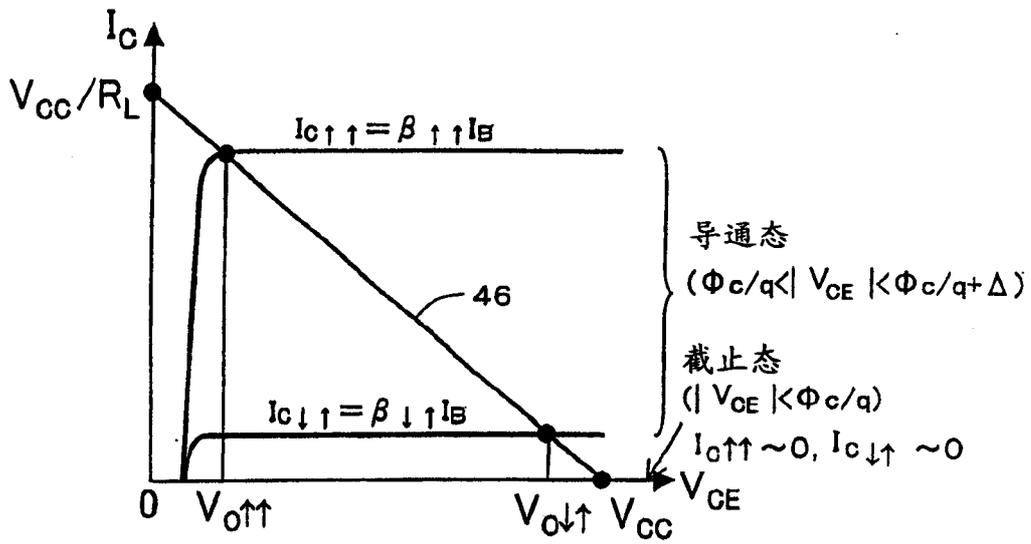


图 5(A)

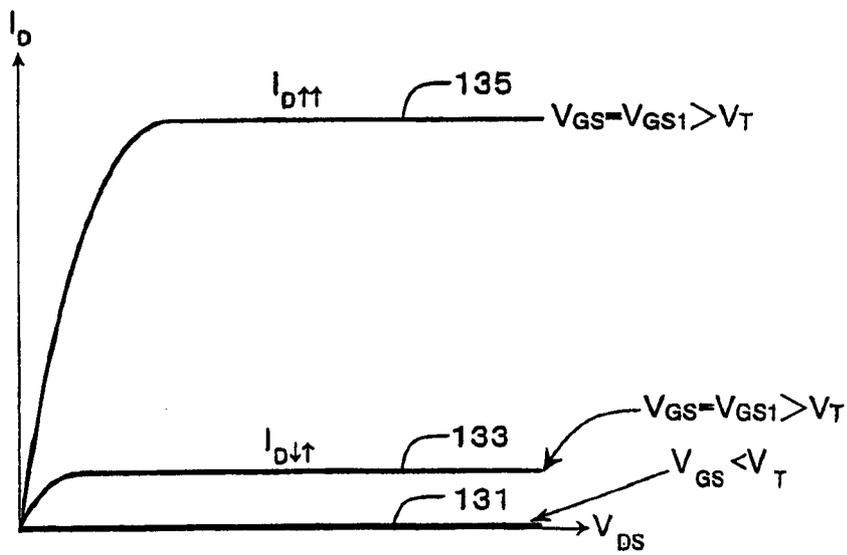
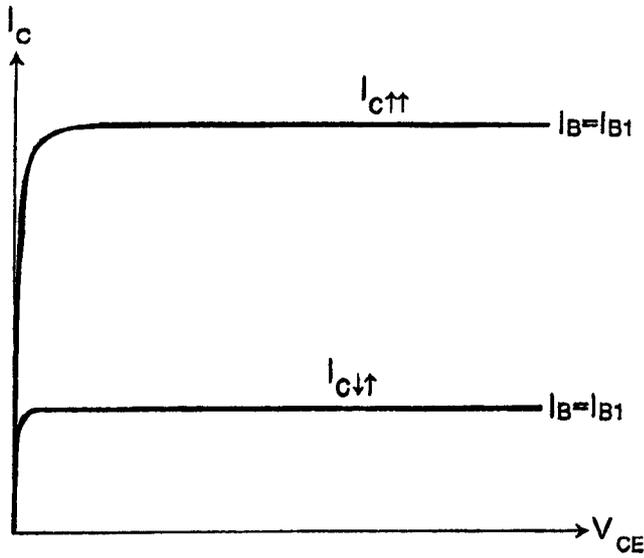


图 5(B)

图 6(A)

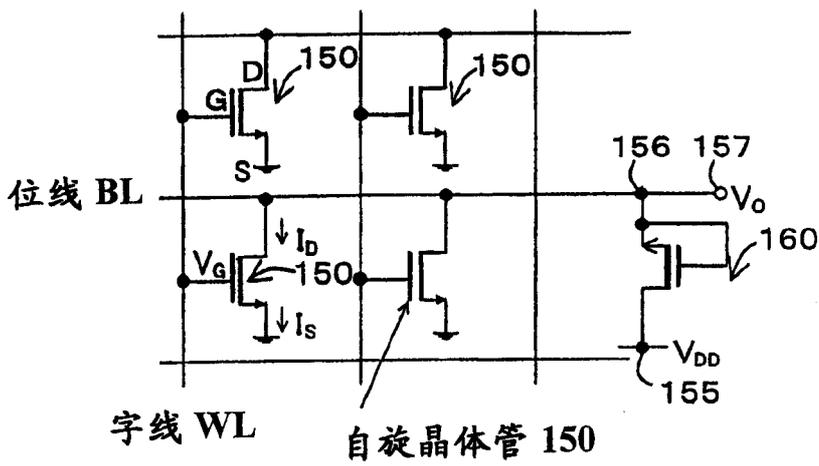
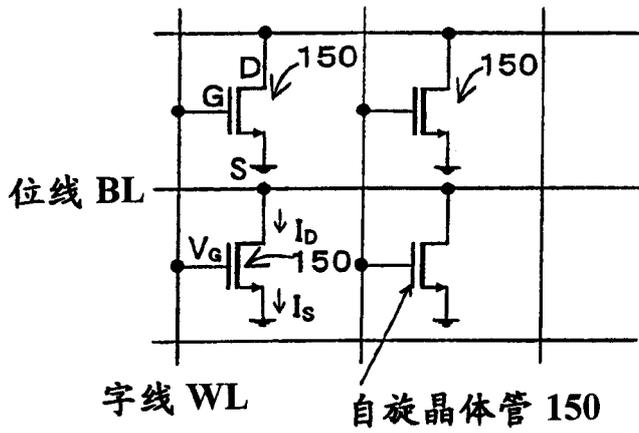


图 6(B)

图 6(C)

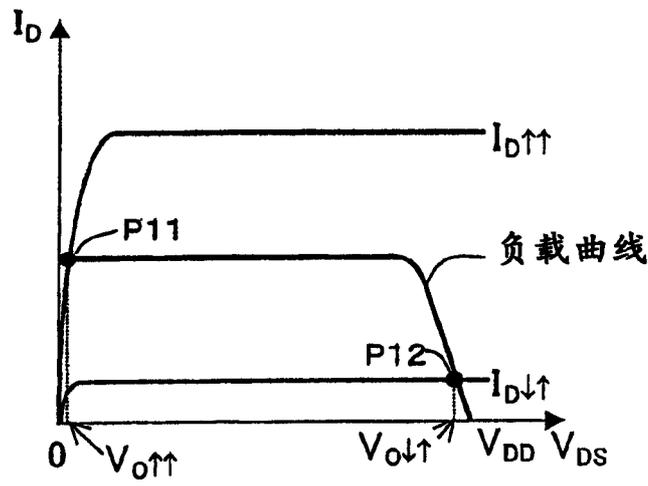


图 7

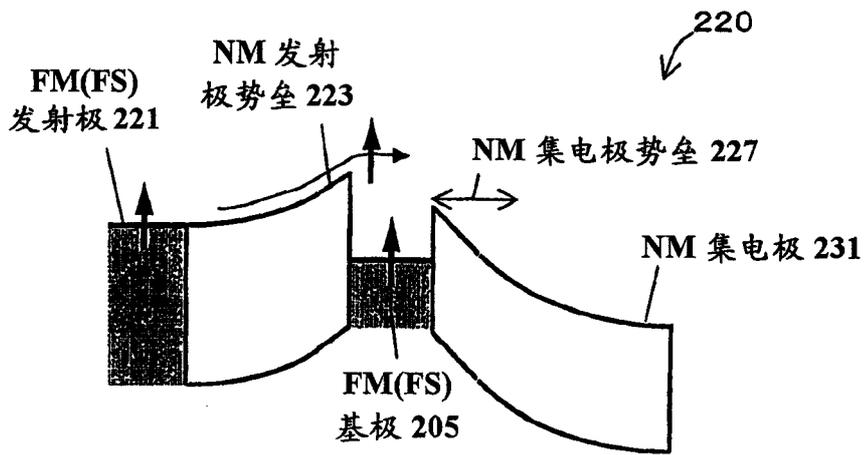
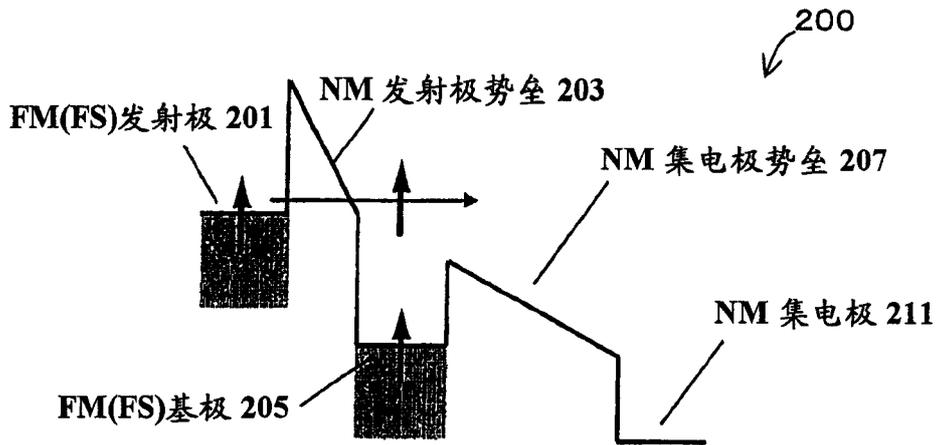


图 8

图 9

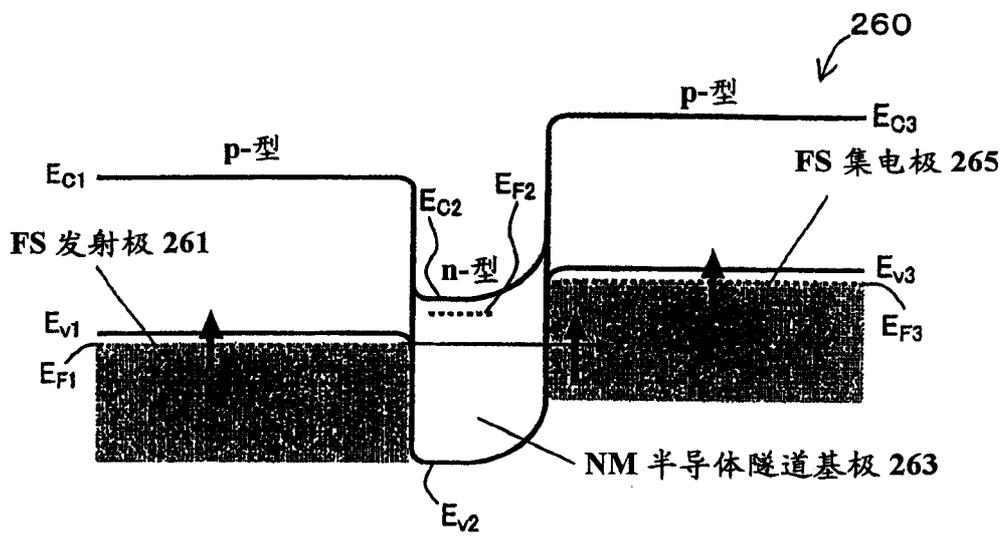
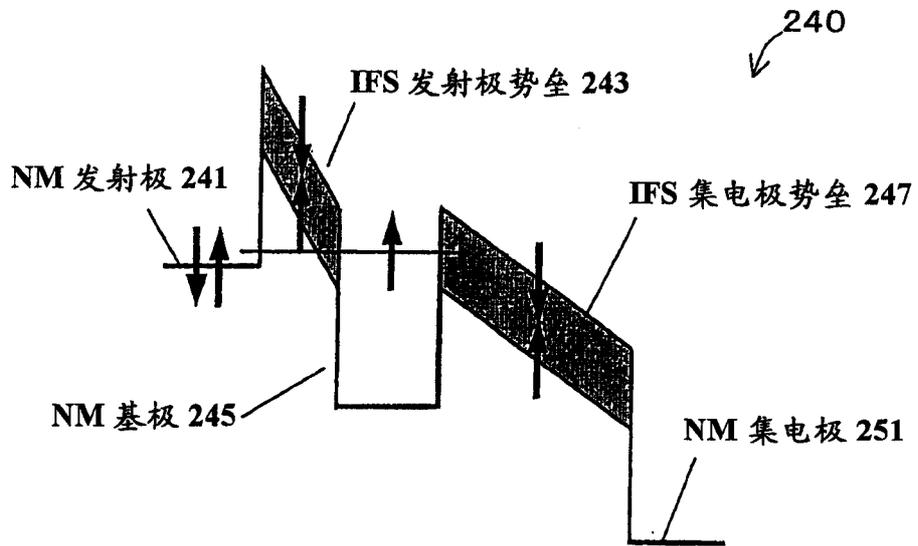


图 10

图 11

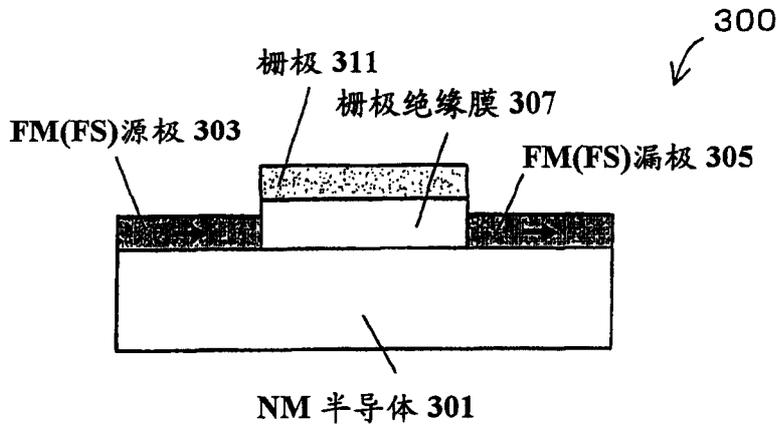


图 12

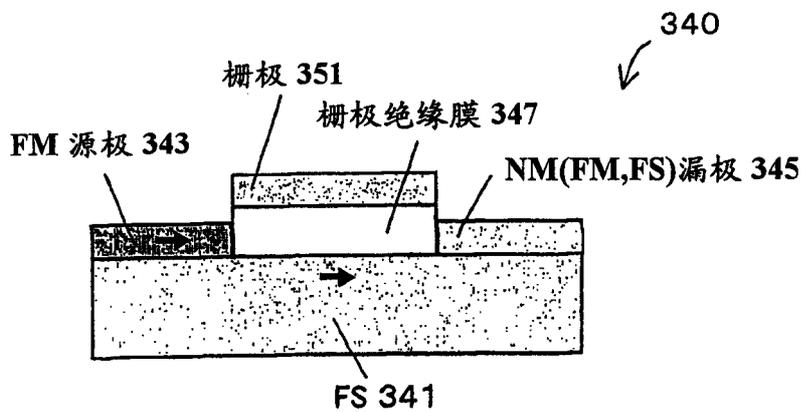
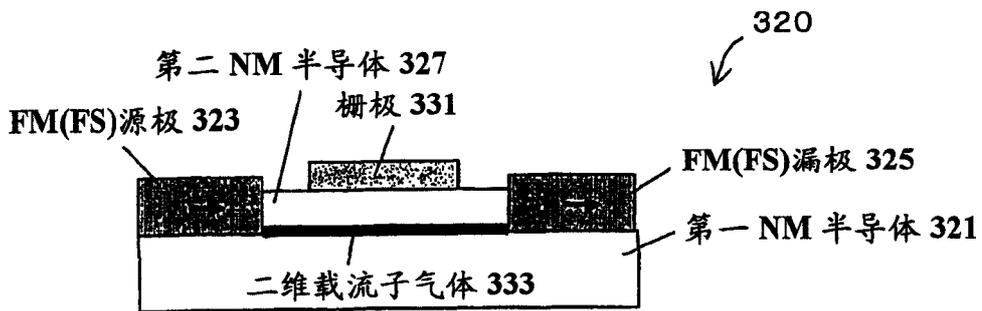


图 13

图 14

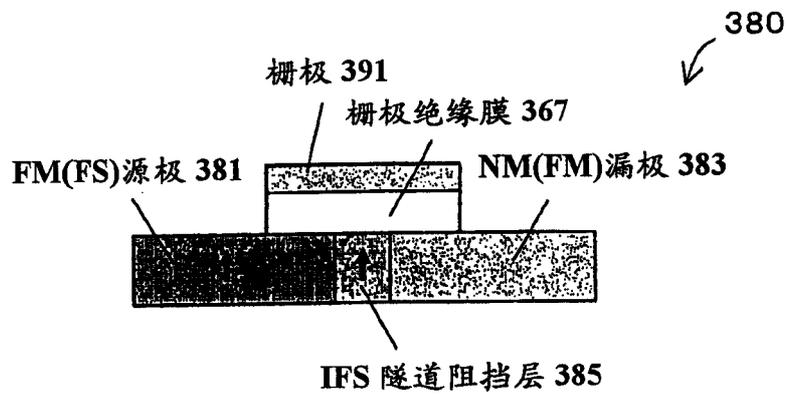
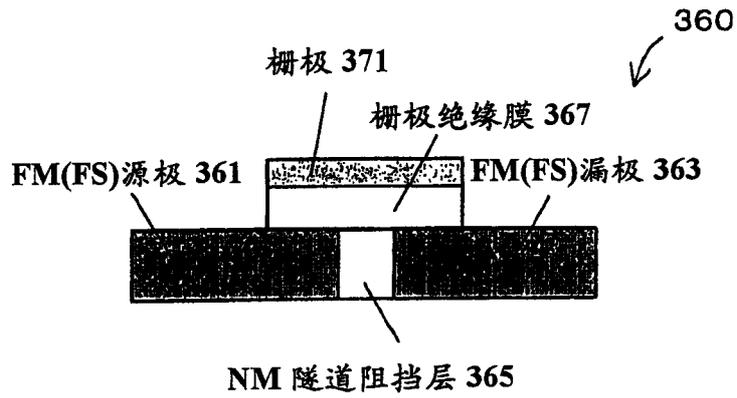


图 15

图 16(A)

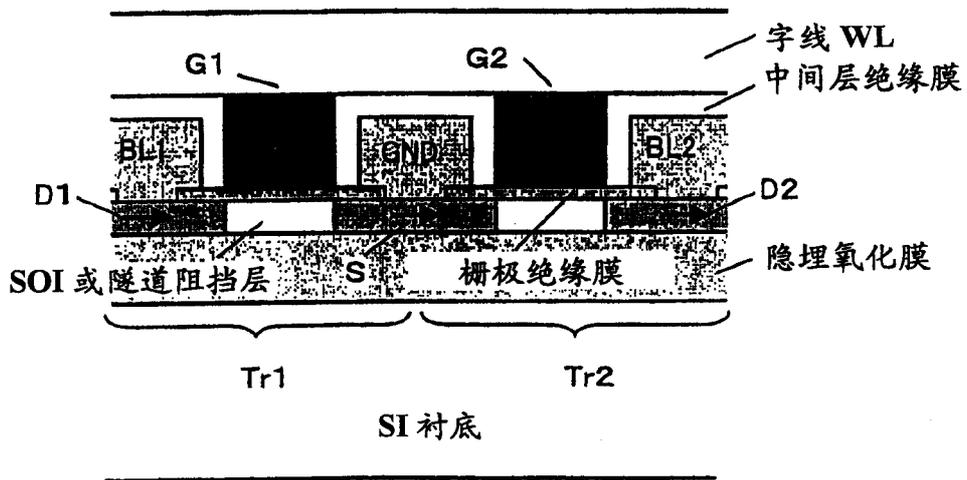
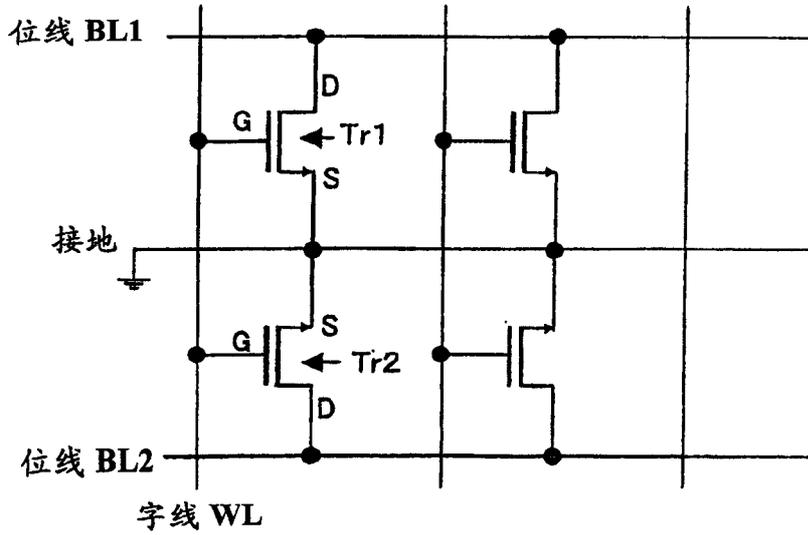


图 16(B)

图 17(A)

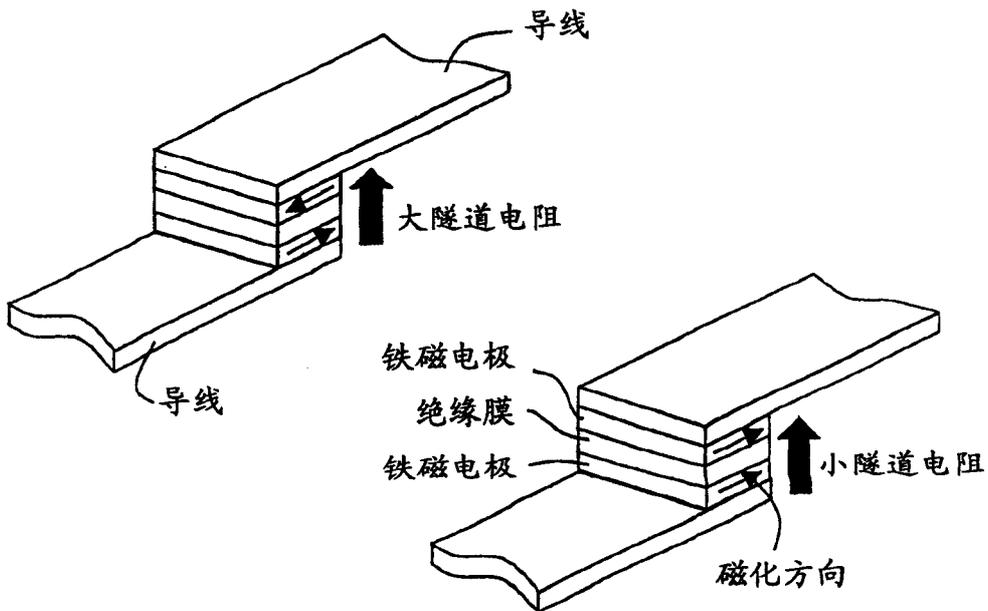
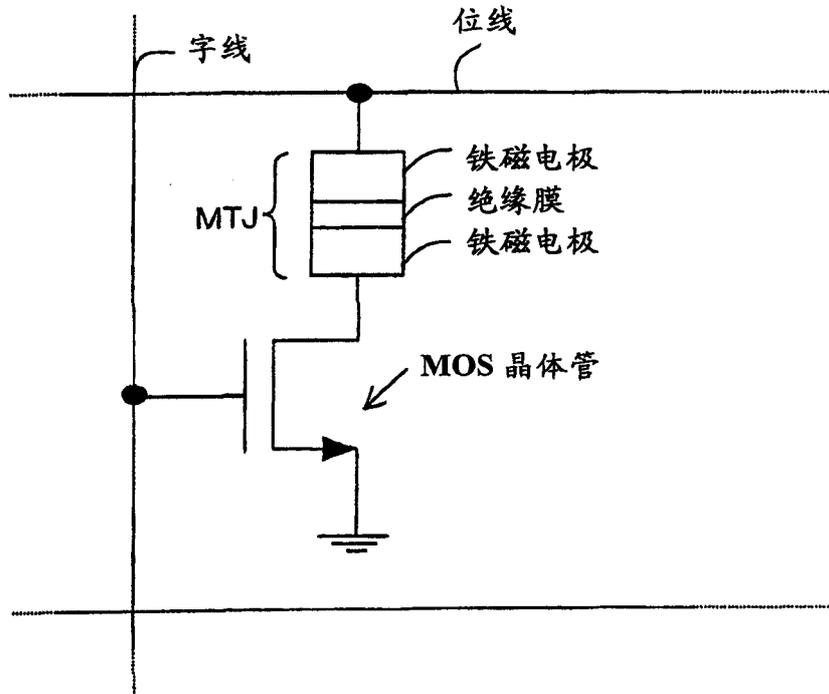


图 17(B)