

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

G11C 11/02

G11C 11/14



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200310113899. X

[43] 公开日 2004年8月11日

[11] 公开号 CN 1519856A

[22] 申请日 2003. 11. 11

[21] 申请号 200310113899. X

[30] 优先权

[32] 2002. 11. 15 [33] US [31] 10/295, 678

[71] 申请人 国际商业机器公司

地址 美国纽约

[72] 发明人 拜瑞·C·斯戴普

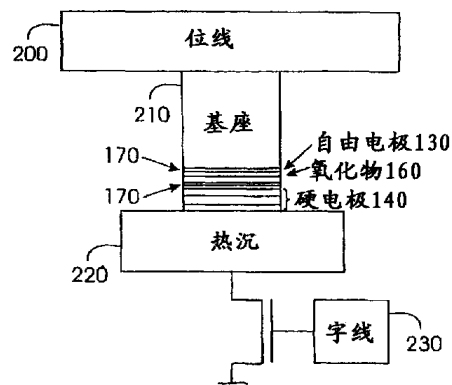
[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利
商标事务所
代理人 王永刚

权利要求书5页 说明书10页 附图2页

[54] 发明名称 利用氧化层和电流诱导加热的热辅助磁写入

[57] 摘要

一种非易失性磁随机存取存储器器件的方法和结构，此设备含有稳定磁电极、与稳定磁电极相邻的氧化层，和自由磁电极。氧化层位于稳定磁电极和自由磁电极之间。在本发明中，导体被连接至稳定磁电极。氧化层的电阻处于允许产生足够功率耗散的水平，以通过电流诱导加热降低自由磁电极的各向异性。使用电流诱导加热结合自旋交换转矩或磁场，以转换自由磁电极。



ISSN 1008-4274

1. 一种非易失性磁随机存取存储器器件, 包含:

稳定的磁电极;

绝缘体层; 以及

自由磁电极, 其中所述绝缘体层位于所述稳定的磁电极和所述自由磁电极之间;

其中所述绝缘体层的电阻具有允许产生足够的功率耗散的值, 以通过电流诱导加热来加热所述自由磁电极从而降低所述自由磁电极的各向异性; 并且

其中所述加热辅助转换所述自由磁电极, 以在所述磁随机存取存储器器件中写入信息, 并将所需电流密度降低至低于在不存在所述加热情况下所需电流密度的数值。

2. 如权利要求 1 的器件, 其中所述稳定的磁电极包含一或更多层。

3. 如权利要求 1 的器件, 其中所述加热电流为自旋极化电流, 并具有允许在所述自由磁电极中发生基于自旋变换的写入的值。

4. 如权利要求 1 的器件, 还包括连接至所述自由磁电极和所述稳定的磁电极的位线和字线, 其中所述加热电流与流经所述位线和字线的电流产生的磁场结合转换所述自由磁电极。

5. 如权利要求 1 的器件, 所述绝缘体层具有热特性, 并且其中所述电阻和所述热特性被优化以通过所述电流诱导加热暂时降低所述各向异性。

6. 如权利要求 1 的器件, 其中所述自由磁电极的材料的选择被优化以在较小温度变化的情况下具有增加的各向异性下降, 以允许在所述信息写入过程中降低临界电流密度。

7. 一种非易失性磁随机存取存储器器件, 包含:

稳定的磁电极;

连接至所述稳定的磁电极的绝缘体层, 其中所述绝缘体层为连

续且不含针孔；以及

连接至所述绝缘体层的自由磁电极，其中所述绝缘体层位于所述稳定的磁电极和所述自由磁电极之间；

其中所述绝缘体层的电阻处于具有产生足够的功率耗散的值，以通过电流诱导加热来加热所述自由磁电极从而降低所述自由磁电极的各向异性；并且

其中所述加热辅助转换所述自由磁电极，以在所述磁随机存取存储器器件中写入信息，并将所需电流密度降低至低于在不存在所述加热情况下所需电流密度的数值。

8.如权利要求 7 的器件，其中所述稳定的磁电极包含一或更多层。

9.如权利要求 7 的器件，其中所述加热电流为自旋极化电流，并具有允许在所述自由磁电极中发生基于自旋变换的写入的值。

10.如权利要求 7 的器件，还包括连接至所述自由磁电极和所述稳定的磁电极的位线和字线，其中所述加热电流与流经所述位线和字线的电流产生的磁场结合转换所述自由磁电极。

11.如权利要求 7 的器件，所述绝缘体层具有热特性，并且其中所述电阻和所述热特性被优化以通过所述电流诱导加热暂时降低所述各向异性。

12.如权利要求 7 的器件，其中所述自由磁电极的材料选择被优化以在较小温度变化的情况下具有增加的各向异性下降，以允许在所述信息写入过程中降低临界电流密度。

13. 一种非易失性磁随机存取存储器器件，包含：

稳定的磁电极；

多孔绝缘体层；

与所述绝缘体层相邻的非磁性层；以及

自由磁电极，其中所述绝缘体层和所述非磁性层位于所述稳定的磁电极和所述自由磁电极之间；

其中所述绝缘体层的电阻具有允许产生足够的功率耗散的值，

以通过电流诱导加热来加热所述自由磁电极从而降低所述自由磁电极的各向异性；并且

其中所述加热辅助转换所述自由磁电极以在所述磁随机存取存储器器件中写入信息，并将所需电流密度降低至低于在不存在所述加热情况下所需电流密度的数值。

14.如权利要求 13 的器件，其中所述稳定的磁电极包含一或更多层。

15.如权利要求 13 的器件，其中所述加热电流为自旋极化电流，并发生在允许在所述自由磁电极中发生基于自旋变换的写入的水平。

16.如权利要求 13 的器件，还包括连接至所述自由磁电极和所述稳定磁电极的位线和字线，其中所述加热电流与流经所述位线和字线的电流产生的磁场结合转换所述自由磁电极。

17.如权利要求 13 的器件，所述绝缘体层具有热特性，并且其中所述电阻和所述热特性被优化以通过所述电流诱导加热暂时降低所述各向异性。

18.如权利要求 13 的器件，其中所述自由磁电极的材料选择被优化以在较小温度变化的情况下具有增加的各向异性下降，以允许在所述信息写入过程中降低临界电流密度。

19.一种制造非易失性磁随机存取存储器器件的方法，所述方法包括：

形成稳定的磁电极；

在所述稳定的磁电极上形成绝缘体层；以及

在所述绝缘体层上形成自由磁电极，以使所述绝缘体层在所述稳定的磁电极和所述自由磁电极之间；

其中进行所述绝缘体层的所述形成，使得所述绝缘体层具有产生足够功率耗散的电阻值，以加热所述自由磁电极，从而通过电流诱导加热降低所述自由磁电极的各向异性；并且

其中所述加热辅助转换所述自由磁电极以在所述磁随机存取存储器器件中写入信息，并将所需电流密度降低至低于在不存在所述加

热情况下所需电流密度的数值。

20.如权利要求 19 的方法，其中所述稳定磁电极的形成包含形成一或更多层。

21.如权利要求 19 的方法，其中所述加热电流为自旋极化电流，并发生在允许在所述自由磁电极中发生基于自旋变换的写入的水平。

22.如权利要求 19 的方法，还包括形成连接至所述自由磁电极和所述稳定的磁电极的位线和字线，其中所述加热电流与流经所述位线和字线的电流产生的磁场结合转换所述自由磁电极。

23.如权利要求 19 的方法，执行所述绝缘体层的所述形成以使所述绝缘体层具有热特性，并且其中所述电阻和所述热特性被优化以通过所述电流诱导加热暂时降低所述各向异性。

24.如权利要求 19 的方法，其中所述自由磁电极的材料选择被优化以在较小温度变化的情况下具有增加的各向异性下降，以允许在所述信息写入过程中临界电流密度被降低。

25. 一种非易失性磁随机存取存储器器件，其包含：

稳定的磁电极；

连接至所述稳定磁电极的绝缘体层，其中所述绝缘体层连续且不含针孔；以及

连接至所述绝缘体层的自由磁电极，其中所述绝缘体层位于所述稳定的磁电极和所述自由磁电极之间，

其中所述绝缘体层具有允许足够电流密度存在的电阻值，以促进所述自由磁电极中的基于自旋变换的写入。

26.如权利要求 25 的器件，其中所述稳定磁电极包含一或更多层。

27.如权利要求 25 的器件，还包括连接至所述自由磁电极和所述稳定磁电极的位线和字线，其中所述基于自旋变换的写入与流经所述位线和字线的电流产生的磁场结合转换所述自由磁电极。

28.如权利要求 25 的器件，其中所述绝缘体层的阻尼、极化度和力矩特性被优化以促进所述基于自旋变换的写入。

29.如权利要求 25 的器件, 其中所述基于自旋变换的写入在没有电压击穿或过热的情况下发生。

利用氧化层和电流诱导加热热辅助磁写入

技术领域

本发明通常涉及磁随机存取存储器器件中的热辅助磁写入，更具体地涉及电流诱导加热。

背景技术

非易失性存储器芯片市场现在被闪存(flash)技术所统治。不幸的是，闪存非常慢并且在失效之前具有非常有限的写入循环次数（大约 10^6 ），使其不适合作为例如 DRAM 或 SRAM 之类的易失性存储器的替代物。也认为具有超过 65nm 技术节点(technology node)的有限可量测性。因此，就需要一种新型的非易失性存储器。

发明内容

本发明提供一种非易失性磁随机存取存储器(MRAM)设备，其具有由一个或更多层组成的稳定磁电极、氧化层、和由一个或更多层组成的自由磁电极。当氧化物被用作势垒时，稳定和自由磁电极靠近氧化物。在含有孔的氧化物设计中，在此两电极之间也可以有非磁性金属隔层。氧化层位于稳定磁电极和自由磁电极之间。在本发明中，导体被连接至稳定磁电极。氧化层的电阻处于允许产生足够功率耗散的水平，以通过电流诱导加热降低自由磁电极的磁各向异性。使用电流诱导加热结合自旋变换转矩或磁场，以转换自由磁电极。稳定磁电极比自由磁电极更厚或具有更高的磁各向异性。

在本发明中，使用晶体管控制电流是否通过自由磁电极和稳定磁电极之间。电流诱导加热仅暂时降低各向异性直至自由磁电极被转换。氧化层的电阻和热特性被优化以通过电流诱导加热暂时降低自由磁电极的各向异性。优化自由磁电极的材料选择，使较小温度变化的

情况下具有增加的各向异性下降，以允许在写过程中降低转换所需的电流密度。本发明提供一种非易失性 MRAM 存储器器件，其具有大量读写周期、电流控制转换、极好的可量测性、超快的转换速度、非常小的位单元、低电压、低功率，和 CMOS 集成的最佳电阻。

本发明还提供一种制造非易失性磁随机存取存储器(MRAM)设备的方法。本发明首先形成稳定磁电极。本发明随后在稳定磁电极上形成氧化层并在氧化层上形成自由磁电极，以使氧化层在稳定磁电极和自由磁电极之间。形成具有一定电阻水平的氧化层，以允许足够的功率耗散加热自由磁电极，从而通过电流诱导加热降低自由磁电极的各向异性。加热可以辅助转换自由磁电极以在 MRAM 器件中写入信息，并可以将所需的电流密度降低至低于在不存在加热的情况下所需的数值。稳定磁电极的形成可以形成一个或更多层。加热电流为自旋极化电流，并以一定水平发生，以允许在自由磁电极中发生基于自旋变换的写入。本发明可以形成连接至自由磁电极和稳定磁电极的位和字线。加热电流与流经位和字线的电流产生的磁场结合转换自由磁电极。本发明形成具有热特性的氧化层。电阻和热特性被优化以通过电流诱导加热暂时降低各向异性。自由磁电极的材料选择被优化以在较小温度变化的情况下具有增加的各向异性下降，以允许在信息写入过程中降低临界电流密度。

附图说明

从下文参照附图的本发明优选实施方式的详细说明中，将更好地理解上述及其它目的、方面和优点，其中：

图 1 是磁随机存取存储器结构的示意图；

图 2 是磁随机存取存储器结构的示意图；和

图 3 的曲线图表示温度与磁性合金的磁化之间的关系。

具体实施方式

在本发明中，通过将电流通过靠近或接近待转换的自由电极的

超低电阻氧化层，完成热辅助磁写入。电流诱导加热降低自由电极的各向异性，并降低场或基于自旋变换的写入所需的电流密度。在本发明的一实施方式中，沿氧化层的电阻在 $4 \text{ } \mu\text{m}^2$ 左右，自由电极由 Tb_xFe_y 基合金构成，并通过热辅助自旋变换转矩感应转换。因此，本发明提供一种非易失性 MRAM 存储器器件，其具有大量读写周期、电流控制转换、极好的可量测性、超快的转换速度、非常小的位单元、低电压、低功率，和 CMOS 集成的最佳电阻。

如上所述，非易失性存储器芯片市场现在被闪存技术所统治。不幸的是，闪存非常慢并且在失效之前具有非常有限的写入循环次数（大约 10^6 ），使其不适合作为例如 DRAM 或 SRAM 之类的易失性存储器的替代物。也认为具有超过 65nm 技术节点的有限可量测性。两种主要的新兴存储器技术为相变（也称为双向通用存储器(Ovonic Universal Memory) - OUM）和使用磁隧道结 MTJ 的磁随机存取存储器(MRAM)。OUM 使用高和低电阻态的相变介质（非晶态对晶态）存储位，而 MRAM 使用高和低电阻态 MTJ（平行对反平行磁电极）存储位。

通过将高电流通入介质以使材料上升至结晶温度或熔化温度（大约 700 至 900K），完成 OUM 写入。熔融介质的快速冷却导致非晶（高电阻）相。结晶相的写入需要更长的时间以发生成核和生长。通过将电流通入字和位线，以产生足够强的磁场从而在这些线的接合点处转换“软”或“自由”磁电极，完成 MTJ-MRAM 写入。

OUM 和 MTJ-MRAM 技术都有大量缺点。对 OUM 而言，由于所需的结晶期导致写入时间相当慢（大约 50ns），并且由于介质的反复熔化导致写入循环有限（大约 10^{13} ）。MTJ-MRAM 可以快十倍多并且可以具有几乎无限的写入循环次数。但是，MTJ-MRAM 可能受到由较复杂的写入方法引起的大单元尺寸的不利影响，和由材料改变与半选择寻址方案引起的位或字线上别处元件的意外转换。但是，最严重的限制是当导线变小且软电极的矫顽性被增加以避免超顺磁性时，MTJ-MRAM 受到产生写入磁场所需的电流密度的不佳定标的不

利影响。例如，定标为 20nm 节点，立方磁位需要的各向异性性能 (K_u) 为 $K_u = 50K_B T/V = 2.8 \times 10^5 \text{ ergs/cm}^3$ ，其中 T/V 为温度电压比。假定 1000 ergs/cm^3 的磁化强度，各向异性磁场 (H_k) 将需要为 $H_k = 2K_u/M = 570 \text{ Oe}$ ，其中 M 为磁化强度。在 Stoner - Wohlfarth 模型的逆磁化中，我们可以取 H_k 约等于快速转换所需的磁场。对 $20 \text{ nm} \times 20 \text{ nm}$ 位和字线（与磁轴成 45 度）从其中心产生 570 Oe 20nm 而言，电流密度将需要至少为 $j = (5/2^{1/2}) H_k/d = 1 \times 10^9 \text{ A/cm}^2$ ，其中 d 为高度和宽度。假定铜位和字线长度为 256 单元 ($10 \mu\text{m}$)，电压将为 $V = j\rho L = 2$ 伏特，其中 j 为电流密度， ρ 为电阻率，而 L 为线的长度。功率将为 $P = 2Vjd^2 = 16 \text{ mW}$ 。在如此大的电流密度下的电迁移和功率耗散问题看来排除在 20nm 节点的场感应 MTJ 写入的实际应用（在达到此节点之前可能很好）。

优选地，电流密度应该保持尽可能低（大约 10^7 A/cm^2 ）。当为字和位线应用磁场时通过直接沿 MTJ 传递电流保持低电流密度。于是功率耗散 ($P = I^2 R$) 加热自由电极并暂时降低写入过程中的 H_k 。冷却后， H_k 增加至其初始值以保证写入位的长期热稳定性。下文给出几个说明本发明的具体实施例。热辅助 MTJ 写入也解决半选择问题。在 MTJ 写入中，通过字线提供一半磁场，另一半来自位线。这意味着位和字线上的其它单元经历的磁场为交叉处的一半。有时这种情况偶尔转换。使用热辅助避免传统 MTJ 结构的半选择问题，因为电流仅通过待写入的接合点（例如通过使用 FET）。因而，利用本发明仅对接合点降低 H_k 。

自旋极化电流通过自旋转换也可以用于磁转换。当与磁体的磁化方向呈横向的自旋电流部件被吸附在磁体表面时发生自旋转换。对图 1 所示的具体实例而言，非磁性金属隔层 120 插入厚稳定磁体 140 和薄“自由”磁体 130 之间。磁化层 130、140 具有垂直于控制施加的、交换和退磁化磁场的各层平面的各向异性（此设备的另一版本具有平面内的磁化）。电流从厚磁体 140 传送至薄磁体 130，并且厚磁体方向中的电流极化影响薄磁体。对平行或反平行磁化而言不发生自

旋转换。但是，薄磁体方向的任何小偏差（由热运动或缺陷引起）导致非磁性隔层 120 和自由磁体 130 间的界面处的与自由磁体方向平行的自旋电流。这种角动量的传送导致自由电极 130 的磁矩上的扭矩。此扭矩导致磁化方向 150 旋转并沿各向异性方向进动。如果角动量的传送快于进动矩 (precessing moment) 的阻尼 (damping)，倾斜 (canting) 将会增加直至发生反转。通过沿相反方向通电流，自由电极矩可以被转换复位，因为电流被自由电极变得自旋极化。由于在隔层和厚电极界面处的横向自旋电流的吸附，角动量损失。于是角动量以这种方式消失以满足反取向。

假定自由电极垂直各向异性支配形状各向异性（退磁场满足平面内磁化），并且“厚”或“硬”电极 140 与隔层 120 被设计用于低交换和静磁场（为了完成此目的厚电极 140 可以实际上包含许多层），转换所需的临界电流为： $I = \alpha e \gamma S H_k / g$ 。在此公式中， α 为 Gilbert 阻尼参数， e 为电子电荷， γ 为旋磁比， S 为自由电极的总自旋，而 g 为根据自旋电流极化度而定的参数。由于 $S = MV / \gamma \hbar$ 而 $H_k = 2K_u / M$ （假定 Stoner - Wohlfarth 模型），临界电流密度为 $j = 2\alpha e t K_u / g$ ，其中 t 为自由电极厚度。在 20nm 节点下，必须避免超顺磁性，于是 $t K_u > 50 K_B T / A = 0.6 \text{ erg/cm}^2$ （例如，在 330k 和 $t = 2 \text{ nm}$ 下 $K_u = 3 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ ）。如果极化度为 0.35（纯钴的典型情况），那么 $g = 0.2$ 。

对块状钴和其它高质量金属磁体而言， α 可以小于 0.01，但是已经发现在钴薄膜（20nm 厚）中 $0.04 < \alpha < 0.2$ ，并且纳米收缩 (nano-constrictions) 表明表面附近的磁阻尼可以非常大。对 2nm 厚的薄膜而言，如果 $\alpha = 0.04$ ，那么临界电流密度为 $4 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 。此值不能通过使薄膜更薄被降低，因为 K_u 将于是必须更大以避免超顺磁性。为了具有快速转换，电流密度将需要大于此值，因为必须通过自旋扭矩超过有效阻尼矩。所需的额外电流密度为 $j_{\text{switch}} = e M t / (\gamma \hbar g \tau)$ ，其中 τ 为转换时间。如果 $t = 2 \text{ nm}$ ， $\tau = 1 \text{ ns}$ ，而 $M = 200 \text{ emu/cm}^3$ （钴的磁化强度为 1400 emu/cm^3 ），那么 $j_{\text{switch}} = 1 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 。对平面外 (out-of-

plane)器件而言,这种低磁化强度将是所期望的,以使平面内形状各向异性不占优势。形状各向异性引起 $2\pi M^2=2.5\times 10^5$ ergs/cm³ 的有效电流密度,此电流密度小于本实施例中的 K_u 10 倍多。

在图 1 所示的结构中,自旋变换器件在 20nm 节点下所需的总电流密度为 5×10^7 A/cm²,假定材料具有钴的极化度、小于钴 7 倍的力矩、高各向异性和低 Gilbert 阻尼。即使在优化的假定条件下,图 1 所示的结构电流密度不合需要地大,可能导致随时间过去的电迁移和器件失效的问题。

在图 1 所示的器件中,电阻太低,因为它是一种全金属器件。实验地,简单的 7 层设备的电阻为大约 $0.01\Omega\text{-}\mu\text{m}^2$,而电阻变化为大约 $0.001\Omega\text{-}\mu\text{m}^2$ 。在 20nm 节点下,此电阻变化为 2.5Ω ,而铜位线(假定 256 单元长)将具有 $R=\rho L/A=500\Omega$ 的电阻,并且 $\Delta R/R=0.005$,其中 ΔR 代表电阻的差别而 L 是线的长度。检测这么小的信号将是困难的。位线必须如此长,以致所有与写和读相关的电子元件与存储单元相比未占用太多的芯片不动产(chip real estate)。在更大的长度范围下此问题更严重,因为导线电阻随特征尺寸呈线性下降而器件电阻随特征尺寸的平方下降(因此,在约 100nm 节点下, $\Delta R/R=0.001$)。理想地,此电阻需要以至少 20 的因数增加。增加电阻的一种方法是将薄多孔氧化层放在一个和更多界面处(例如在稳定电极和非磁性金属隔层之间)。这具有沿孔隙集聚电流和减少设备有效面积的作用。不幸的是,这也增加局部电流密度。例如,为了以因数 20 增加电阻,对我们 20nm 节点设计而言,孔隙应该占面积的 5% 而局部电流密度将必须为 1×10^9 A/cm²。因此,高电流密度带来的问题可能变得更严重。

在一种实施方式中,通过用例如一种氧化物(如图 2 所示)之类的绝缘体势垒 160 取代金属隔层 120 解决上述问题,以增加电阻(最好没有电流集聚)、优化电阻和热特性以通过电流诱导加热暂时降低各向异性、并优化自由磁电极材料以在较小温度变化的情况下具有较大的各向异性下降,以使写过程中临界电流密度被显著降低。氧

氧化物层 160 最好具有 $0.2\Omega\text{-}\mu\text{m}^2$ 和 $20\Omega\text{-}\mu\text{m}^2$ 之间的电阻。图 2 也说明位线 200 和字线 230、热沉 220、基座（电接触）210 和晶体管 240。因此，图 2 所示设备为一种具有通过自旋变换和热辅助（例如，大于 50°C 变化）的组合电流诱导转换的 MTJ。

这种实施方式也可以利用使用与上述连续无针孔层氧化物势垒 160 相反的多孔氧化物。如上所述，增加电阻的一种方法是将薄多孔氧化层放在一个和更多界面处。这具有沿孔隙集聚电流和减少设备有效面积的作用。因此，图 2 也说明可选的非磁性金属隔层 170，如果氧化物势垒为多孔氧化物势垒，非磁性金属隔层 170 可以被放置在氧化物势垒 160 的任一侧（或两侧）上。非磁性金属隔层 170 可以在氧化物势垒 160 与自由和稳定电极 130、140 的其中之一（或两者）之间。多孔氧化物 160 不是必须被放置在磁电极 130、140 之间。相反，多孔氧化物 160 可以仅仅在磁电极的附近，只要在达到自由电极之前沿绝缘体 160 的孔隙的电流扩散不太大，并且氧化物处的功率耗散导致自由电极的加热。

自旋变换的概念首先在隧道势垒的范围内被考虑，但是因为由以与 MTJ 相关的典型电阻值过量加热导致的不可能而被排除。幸运的是，已经做了大量的工作降低 MTJ 电阻以用作磁头中的传感器，并且现在可以制造电阻低于 $10\Omega\text{-}\mu\text{m}^2$ 和 $\Delta R/R$ 大于 0.2 的无针孔器件。

图 2 所示的几何形状也是新的。注意 FET240 允许双向电流流动。并且，硬电极 140 和自由电极 130 也可以包含多层以优化其磁特性，并且连接其中之一的可以是 TbFeCo 合金。本发明也包括用于硬电极的反铁磁钉扎层与合成铁磁体，和用于自由电极的“盖”（capping）层。此器件可以在 20nm 节点下以 $1\times 10^8\text{A}/\text{cm}^2$ 无热辅助写入。这种器件在读回信号和功率耗散方面的优选电阻为大约等于对应于 $0.2\Omega\text{-}\mu\text{m}^2$ 的 500Ω 的位线电阻（假定长度为 256 单元）。假定这种低电阻 MTJ 可以在无针孔条件下制造（或者可以制造具有良好 $\Delta R/R$ 的多孔氧化物设备），并且这种高电流密度可以被维持，在接合

点中的功率将为 $80\mu\text{W}$ ，且在位线中的功率为 $80\mu\text{W}$ ，或者总体为 $160\mu\text{W}$ 。

假定基座 210 高 20nm ，具有 100W/mK 的热导率（良好纯金属的典型情况），并且结功率的一半被沉积在自由电极 130 上（ $40\mu\text{W}$ ），稳定上升将为 $\Delta T = Ph/K_A = 20\text{K}$ ，其中 h 为基座的高度， P 为功率而 K 为热导率。这里通过假定势垒为一种有效热绝缘体计算温度上升，并解决简单的 1 维热流动问题。结论是大约 10^8A/cm^2 左右的电流密度可以在 20nm 的器件中导致电迁移、需要高功率、低信号水平、和难以保持的电阻值等问题。但是，在 40nm 节点下利用自旋变换并且没有热辅助的 MTJ 写入要合理得多，因为临界电流取值范围与按照 $t K_u > 50 K_B T/A$ 的区域相反。对无热辅助的 40nm 器件而言可能的参数为： $t = 2\text{nm}$ ， $K_u = 7.5 \times 10^5 \text{ergs/cm}^3$ ， $\alpha = 0.04$ ， $g = 0.2$ ， $j_{\text{crit}} = 1 \times 10^7 \text{A/cm}^2$ ， $M = 100 \text{emu/cm}^3$ ， $\tau = 1\text{ns}$ ， $j_{\text{switch}} = 5 \times 10^6 \text{A/cm}^2$ ， $j_{\text{total}} = 1.5 \times 10^7 \text{A/cm}^2$ ， $I = 0.24\text{mA}$ ， $R = 1\Omega\text{-}\mu\text{m}^2 = 625\Omega$ ， $V = 0.15\text{Volts}$ ， $P = 36\mu\text{W}$ ， $h = 40\text{nm}$ ， $K = 100\text{W/mK}$ ， $\Delta T = 4.5\text{K}$ 。为了获得此目标，必须要有一种具有低阻尼、高极化度、和低力矩的材料。因此，本发明降低绝缘体 160 的电阻以提供一种低电阻隧道结势垒。此低电阻隧道结势垒允许足够高的电流密度存在，以使在没有击穿电压或过热的情况下发生基于自旋变换的写入。

现在考虑利用图 2 所示的热辅助在 20nm 节点下设计用于在 $1 \times 10^7 \text{A/cm}^2$ 下写入的器件。对 $4\Omega\text{-}\mu\text{m}^2 = 10\text{K}\Omega$ 的电阻和 0.4V 的电压而言，总功率为 $16\mu\text{W}$ （在此电流下位线中的功率将非常小）。对高度为 50nm 的基座、 10W/mK 的热导率（许多合金的典型情况）而言，并假定一半功率被损耗在自由电极 130 上，温度上升将为 100K 。此外，热时间常数可以被计算为 $\tau_{\text{thermal}} = h^2 C/K = 0.75\text{ns}$ ，其中 C 为热容（假定为 $3 \times 10^6 \text{J/m}^3$ ）。因此，本发明的器件非常快。注意功率大约小于非热辅助情况下（假定 $1 \times 10^8 \text{A/cm}^2$ ）的 10 倍，并低于无热辅助场感应 MTJ 写入情况下的 1000 倍。此分析表明 MTJ、自旋扭矩、和热辅助的组合可以允许小、快、功率效率高的设备，并且

具有大信号和 CMOS 集成的理想电阻值。

在另一实施方式中，由通过位线和字线的电流引起的磁场可以辅助转换。例如，在我们的 20nm 节点设计中以 $1 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ 的电流密度通过这些线，可以产生大约 60 Oe 的磁场。 $1 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 的 MTJ 电流加热该位以降低各向异性至低于 60 Oe 用于写入。此外，以相比无热辅助的最好情况的因数 100 降低功率，并且避免半选择寻址具有的问题。

理想地适合用于自由电极 130 的一类材料为铁磁性 RT-TM 合金，例如含 Gd、Co、和其它可选少量添加的元素以调整特性的“非晶态” Tb_xFe_y 。在 Tb_xFe_y 中，稀土 (RE) Tb 和过渡金属 (TM) Fe 磁化彼此相反，并具有不同的温度依赖性。当 x 等于 0.1 时，TM 磁化占优势，而当 x 等于 0.3 时，RE 磁化占优势。当 x 等于约 0.22 时，磁化强度在室温下抵消 (补偿) (在图 3 中通过虚线指示)，并然后当 TM 次网格的磁化分量大于 RE 次网格时随温度上升 (在图 3 中通过磁化矢量的大小指示)。因为铁磁体的总磁化强度非常小 (典型地低于 300 emu/cm^3)，临界电流可能小于其它材料，使得其即便没有热辅助也很具吸引力。 Tb_xFe_y 合金在 300K 具有等于 $1.5 \times 10^7 \text{ emu/cm}^3$ 的可调垂直各向异性，在 400K 附近的 Curie 温度下降至 0。这种大各向异性和低 Curie 点使得这种类型的材料对本发明非常有吸引力 (即便 $10 \text{ nm} \times 10 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$ 的自由电极将为热稳定)。低磁化强度保证平面外磁化。在上述 20nm 热辅助设备的给定实施例中，在功率仅为 $16 \mu\text{W}$ 的情况下通过隧穿电流导致的损耗在小于 1ns 内将自由电极加热至 400K。理解 Curie 温度附近的温度相关的临界电流很重要。对于小 P 取 $g^a P^{3/2}$ ，临界电流密度为：可以取 $j(T) \propto K_u(T)/P(T)^{3/2}$ 和 $K_u(T) \propto M_{\text{RE}}(T)^2$ 。由于 RE 的磁电子处于 Fermi 能级中的 4f 层，而 TM 的磁电子处于的 3d 层 (在 Fermi 能级中)，极化度可以主要由 TM 极化度支配。假定 $P(T) \propto M_{\text{TM}}(T)$ ，产生 $j(T) \propto M_{\text{RE}}(T)^2/M_{\text{TM}}(T)^{3/2}$ 。注意这显得相比场感应写入较不理想，因为在这种情况下 $j(T) \propto H_k \propto M_{\text{RE}}(T)^2/M_{\text{TM}}(T)$ 。但是，这里考虑的是最坏的情

况，因为硬电极实际上可以有效散热并且由具有低温度响应和高 Curie 温度的材料制成，其中只有自由电极的极化度将显著下降。即便如此，由于在分子中指数较大并且 M_{RE} 下降快于 M_{TM} ，这表示临界电流将随温度上升而急剧地下降。如果自由电极倍加热至 Curie 点并冷却，写入将以最理想的温度发生（仅低于 Curie 点）。

因此，如上所述，利用本发明，通过沿邻近或接近待转换自由电极的超低电阻氧化层通电流完成热辅助磁写入。电流诱导加热降低自由电极的各向异性并降低场或基于自旋变换的写入所需的电流密度。本发明提供一种非易失性 MRAM 存储器器件，其具有极好的耐用性、电流控制转换、极好的可量测性、超快的转换速度、非常小的位单元、低电压、低功率，和 CMOS 集成的最佳电阻。

虽然已经以优选实施方式的形式说明本发明，本领域的技术人员将认识到本发明在权利要求书的精神和领域内可以被修改实施。

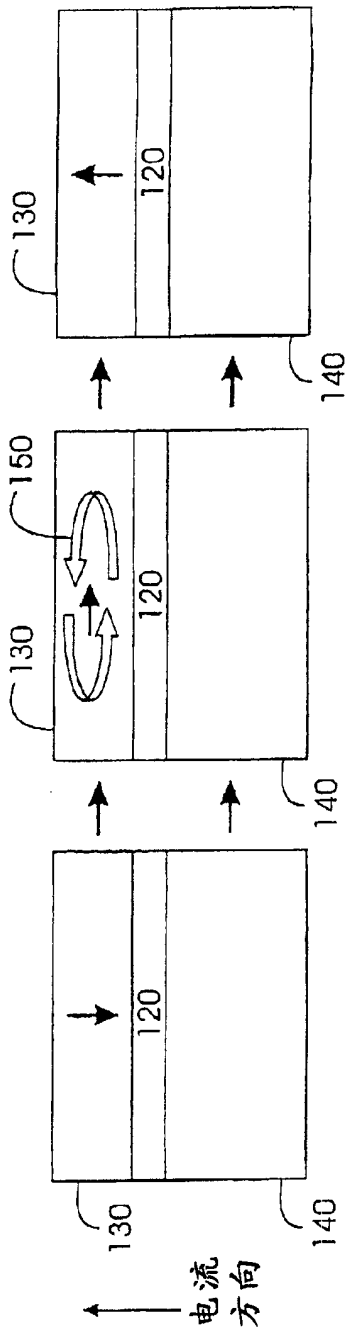


图1

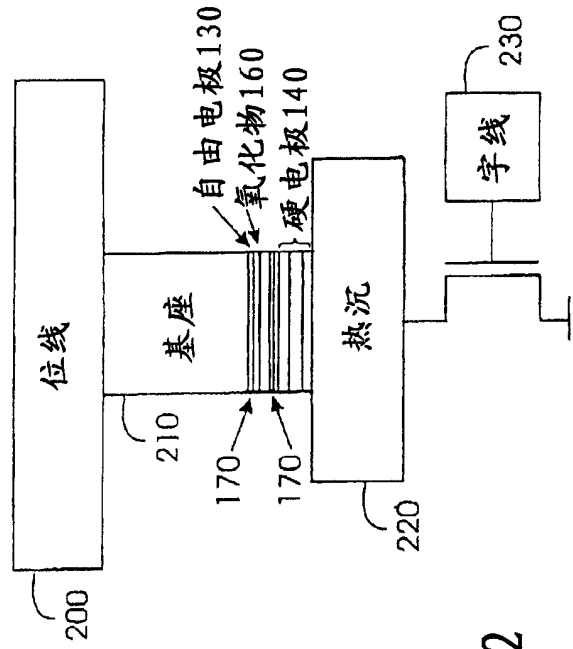


图2

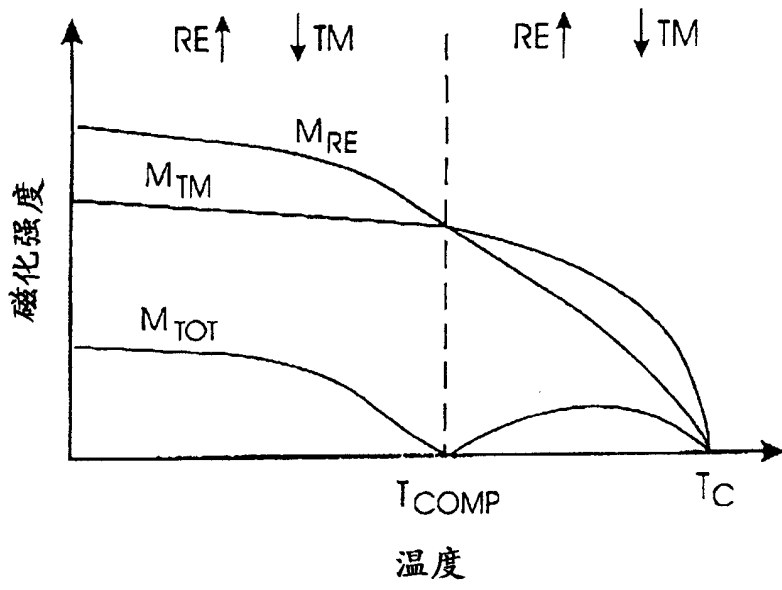


图 3