



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117730640 A

(43) 申请公布日 2024. 03. 19

(21) 申请号 202280049425.4

(22) 申请日 2022.05.08

(30) 优先权数据

17/472,019 2021.09.10 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2024.01.12

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2022/028238 2022.05.08

(87) PCT国际申请的公布数据

W02023/038680 EN 2023.03.16

(71) 申请人 西部数据技术公司

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 冈村进 C·凯撒 B·R·约克

(74) 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司 11245

专利代理师 全璟

(51) Int.Cl.

H10N 50/10 (2023.01)

H10N 50/85 (2023.01)

H10N 50/01 (2023.01)

H10B 61/00 (2023.01)

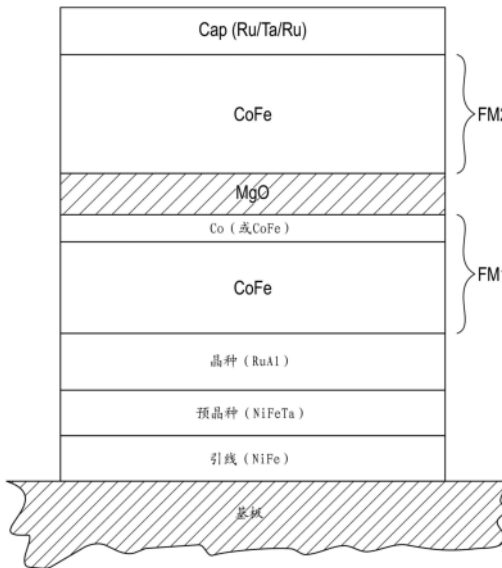
权利要求书2页 说明书5页 附图6页

(54) 发明名称

具有改进的晶种层的隧穿磁阻 (TMR) 器件

(57) 摘要

隧穿磁阻 (TMR) 器件具有经改进的用于下铁磁层或第一铁磁层的晶种层,从而使两个铁磁层不需要硼。例如RuAl合金等晶种层在沉积在无定形预晶种层上时具有带(001)纹理的B2结晶结构,这意味着(001)平面平行于TMR器件基板的表面。随后沉积的如CoFe合金等第一铁磁层以及通常为MgO的隧穿势垒层继承晶种层的(001)纹理。



1. 一种隧穿磁阻 (TMR) 器件, 所述TMR器件包括:
基板;
晶种层, 所述晶种层具有位于所述基板上的结晶结构和 (001) 纹理;
无硼第一铁磁层, 所述无硼第一铁磁层具有位于所述晶种层上的BCC结晶结构和 (001) 纹理, 所述第一铁磁层选自CoFe合金、霍伊斯勒 (Heusler) 合金和半霍伊斯勒 (Heusler) 合金。
隧穿势垒层, 所述隧穿势垒层具有位于所述第一铁磁层上的岩盐结晶结构或尖晶石结构以及 (001) 纹理; 和
第二铁磁层, 所述第二铁磁层位于所述隧穿势垒层上;
2. 根据权利要求1所述的器件, 其中, 所述晶种层选自RuAl合金和CrMo合金。
3. 根据权利要求1所述的器件, 其中, 所述隧穿势垒层选自MgO、ZnO、MnO、CoO、TiO、VO、 MgAl_2O_4 和 MgGa_2O_4 。
4. 根据权利要求1所述的器件, 还包括位于所述基板与所述晶种层之间的无定形预晶种层。
5. 根据权利要求4所述的器件, 其中, 所述预晶种层是一层或多层, 包含选自NiFeTa合金、CoFeTa合金、CoFeB合金、CoFeBTa合金和Ta的材料。
6. 根据权利要求1所述的器件, 其中, 所述第一铁磁层包括选自Co和CoFe合金的纳米层。
7. 根据权利要求1所述的器件, 还包括位于所述晶种层与所述第一铁磁层之间的具有BCC结晶结构的非铁磁子层。
8. 根据权利要求7所述的器件, 其中, 所述子层基本上由Cr组成。
9. 根据权利要求1所述的器件, 其中, 所述第二铁磁层是无硼铁磁层。
10. 根据权利要求1所述的器件, 其中, 所述TMR器件选自钉扎型TMR器件和双自由层 (DFL) TMR器件。
11. 根据权利要求1所述的器件, 其中, 所述TMR器件是磁记录读头。
12. 一种磁记录器件, 所述磁记录器件包括根据权利要求11所述的磁记录读头。
13. 一种磁随机存取存储器器件, 所述磁随机存取存储器器件包括根据权利要求1所述的TMR器件。
14. 一种感测器器件, 所述感测器器件包括根据权利要求1所述的TMR器件。
15. 一种隧穿磁阻 (TMR) 器件, 所述TMR器件包括:
基板;
无定形预晶种层, 所述无定形预晶种层位于所述基板上;
晶种层, 所述晶种层选自RuAl合金和CrMo合金并且具有位于所述预晶种层上的结晶结构和 (001) 纹理;
无硼合金, 所述无硼合金包括Co和Fe的第一铁磁层, 所述Co和Fe的第一铁磁层具有位于所述晶种层上的BCC结晶结构和 (001) 纹理;
隧穿势垒层, 所述隧穿势垒层位于所述第一铁磁层上基本上由MgO组成; 和
第二铁磁层, 所述第二铁磁层位于所述隧穿势垒层上。
16. 根据权利要求15所述的器件, 其中, 所述预晶种层是一层或多层, 包含选自NiFeTa

合金、CoFeTa合金、CoFeB合金、CoFeBTa合金和Ta的材料。

17. 根据权利要求15所述的器件, 其中, 所述晶种层基本上由 $\text{Ru}_x\text{Al}_{(100-x)}$ 组成, 其中, x 以原子百分比计并且大于或等于45且小于或等于60。

18. 根据权利要求15所述的器件, 其中, 所述第一铁磁层包括与所述隧穿势垒层相邻的选自Co和CoFe合金的纳米层, 并且所述第二铁磁层包括与所述隧穿势垒层相邻的选自Co和CoFe合金的纳米层。

19. 根据权利要求15所述的器件, 还包括位于所述晶种层与所述第一铁磁层之间的基本上由Cr组成的子层。

20. 根据权利要求15所述的器件, 其中, 所述第二铁磁层是无硼铁磁层。

21. 根据权利要求15所述的器件, 其中, 所述TMR器件选自钉扎型TMR磁记录读头和双自由层 (DFL) 磁记录读头。

22. 一种磁记录器件, 所述磁记录器件包括根据权利要求21所述的磁记录读头。

23. 根据权利要求15所述的器件, 其中, 所述TMR器件是适于在磁随机存取存储器 (MRAM) 器件中使用的磁隧道结 (MTJ) 存储器单元。

24. 一种磁随机存取存储器器件, 所述磁随机存取存储器器件包括根据权利要求23所述的MTJ存储器单元。

25. 一种感测器器件, 所述感测器器件包括根据权利要求1所述的TMR器件。

具有改进的晶种层的隧穿磁阻 (TMR) 器件

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请出于所有目的要求2021年9月10日提交的名称为“具有改进的晶种层的隧穿磁阻 (TMR) 器件 (SELECTIVE REBUILD TMR INTERRUPTED DEVICES WITH DATA STORAGE SEED LAYER)”的美国非临时申请第17/472,019号的全部内容的权益并且特此以引用方式并入该美国非临时申请的全部内容。

背景技术

技术领域

[0003] 本发明整体涉及隧穿磁阻 (TMR) 器件,并且更具体地,涉及具有晶种层的TMR器件,该晶种层改进隧穿势垒层的形成和TMR器件的性能。

[0004] 相关领域的描述

[0005] 隧穿磁阻 (TMR) 器件,也称为磁隧穿结 (MTJ) 器件,由被薄绝缘隧穿势垒层分开的两个铁磁层构成。该势垒层通常由金属氧化物制成,该金属氧化物足够薄以至于在两个铁磁层之间发生电荷载流子的量子力学隧穿。虽然已经提出诸如ZnO、MnO、CoO、TiO和VO之类的各种金属氧化物作为隧穿势垒材料,但是最常见的材料是结晶氧化镁 (MgO)。量子力学隧穿过程与电子自旋相关,这意味着当跨结施加感测电流时所测量的电阻取决于铁磁层和势垒层的自旋相关电子特性,并且随两个铁磁层的磁化的相对定向而变化。

[0006] 在一种类型的被称为钉扎 (pinned) 类型的TMR或MTJ器件中,其中一个被称为基准层的铁磁层的磁化被固定或钉扎,而另一被称为自由层的铁磁层的磁化响应于外部磁场而自由旋转。钉扎型TMR器件可用于磁记录读头中,其中,在存在所记录的磁介质的磁场的情况下,自由铁磁层的磁化相对于基准铁磁层的磁化旋转。钉扎型TMR器件还可用于使用MTJ作为存储器存储位或单元的磁随机存取存储器 (MRAM) (例如,自旋转移力矩MRAM (STT-MRAM) 和自旋轨道力矩MRAM (SOT-MRAM)) 器件中,其中,相对于MTJ中的基准层的自由层的磁化直接随着电流而改变。TMR器件也可用作可用于各种应用 (例如工业、汽车、医疗) 的磁感测器器件的一部分。

[0007] 在另一类型的被称为双自由层 (DFL) 类型的TMR器件中,存在两个自由铁磁层,其中,两个铁磁层的磁化响应于外部磁场按“剪切”效应相对于彼此自由旋转。US 7,035,062 B2和US 8,670,217 B1中描述了用于磁记录器件的DFL读头。

发明内容

[0008] 由于具有一定对称性的电子发生相干隧穿效应,因此如CoFe/MgO/CoFe隧穿结等具有MgO隧穿势垒层的TMR器件表现出非常大的隧穿磁阻 (TMR)。然而,要求铁磁层和MgO势垒层具有完美的结晶度以实现高TMR。铁磁层和MgO势垒层通常是通过溅射沉积并且后续进行退火形成的,该溅射沉积和后续退火形成结晶结构。表现出所要求的低电阻-面积乘积 (RA) 的CoFe/MgO/CoFe隧道结不表现出高TMR,这可能是由于MgO势垒层的结晶度较差导致。

然而,已经发现当硼(B)用于一个或多个铁磁层中时,诸如在多层结构中使用薄型无定形CoFeB层或CoFeBTa层时,在退火之后观察到更高的TMR。无定形CoFeB层促进具有(001)纹理(平行于基板的表面的表面平面)的MgO更好生长,并且因此促进TMR更高。

[0009] TMR甚至更高的先进TMR器件将会要求减小电阻-面积乘积(RA),这意味着将需要将MgO势垒层制造得更薄。然而,随着MgO厚度减小,击穿电压和TMR也降低,这被认为部分由于硼扩散到MgO势垒层中而造成。所需要的是具有薄型MgO势垒层并且因此RA得到减小但TMR高的TMR器件。

[0010] 本发明的实施方案涉及具有经改进的用于下铁磁层或第一铁磁层的晶种层的TMR器件,从而使铁磁层不需要硼。例如RuAl合金等晶种层具有带(001)纹理的B2结晶结构(也称为CsCl结晶结构),意味着(001)平面平行于TMR器件基板的表面。随后沉积的如CoFe合金等第一铁磁层以及通常为MgO的隧穿势垒层也继承晶种层的(001)纹理。在对第二铁磁层进行沉积和退火之后,由于不存在硼扩散并且无硼铁磁层的晶粒尺寸较大,因此铁磁层和隧穿势垒层的结晶得到改进,这减少了晶粒边界处的缺陷。与现有技术的含硼TMR器件相比,所得到的TMR器件的RA得到减小并且TMR得到提高。

[0011] 为了更全面地理解本发明的实质和优点,应当参考结合附图所作的以下具体描述。

附图说明

[0012] 图1是示出两种类型的常规隧穿磁阻(TMR)器件的结构剖视图。

[0013] 图2是作为自旋转移力矩磁随机存取存储器(STT-MRAM)器件中的存储器单元的磁隧道结(MTJ)的透视图。

[0014] 图3是示出现有技术的钉扎型TMR读头的详细结构的剖视图。

[0015] 图4是示出典型的FM 1层/MgO/FM 2层结构的示意图,其中,硼存在于两个铁磁(FM)层中。

[0016] 图5是根据本发明的实施方案的具有经改进的晶种层和无硼的FM1层和FM2层的FM1-层/MgO/FM2-层结构的示意性剖视图。

[0017] 图6A是示出在B2结构晶种层上生长具有(001)纹理的隧穿势垒层和FM1的侧视图的示意图。

[0018] 图6B是RuAl(晶种)、CoFe(FM1)和MgO(隧穿势垒)层的(001)平面的示意性顶视图,并且示出了MgO层的NaCl结构,其(001)平面以45度角生长在CoFe层上。

[0019] 图7是现有技术的双自由层(DFL)器件以及根据本发明的实施方案的DFL器件的所测量的TMR与电阻-面积乘积(RA)的曲线图。

具体实施方式

[0020] 图1示出了两种类型的TMR读头10的剖视图。TMR读头包括底部铁磁(FM1)层18、绝缘隧穿势垒层20和顶部铁磁(FM2)层32。TMR读头分别具有底部非磁性电极或引线12和顶部非磁性电极或引线14,其中,底部非磁性电极12形成在合适的基板上。晶种层(未示出)可位于底部引线12与FM1层18之间,并且覆盖层(未示出)可位于FM2层32与顶部引线14之间。在DFL读头中,FM1和FM2两者均为“自由”铁磁层,因为在存在所记录的磁介质的外部磁场的情况下,它们的磁

化按剪切效应相对于彼此自由旋转。

[0021] 在钉扎型TMR器件中,FM1或FM2使其磁化固定或钉扎,而另一铁磁层使其磁化在存在外部磁场的情况下自由旋转。钉扎型铁磁层被称为基准层,因为其磁化被阻止旋转。基准层的磁化可通过由高矫顽力膜形成或通过被交换耦合到反铁磁(AF)“钉扎”层进行固定或钉扎。钉扎型TMR器件可用作STT-MRAM器件中的存储器单元,如图2所示。描绘了STT-MRAM器件中的单个MTJ。可使用自旋极化电流来修改自由铁磁层的磁化的定向以得到与基准层的固定磁化平行或反向平行的定向,从而产生表示1(平行)或0(反向平行)的两个电阻电平作为MTJ单元中的位。MTJ可以类似方式用于SOT-MRAM器件中,其与STT-MRAM的主要不同点在于如何通过SOT效应而不是STT效应来实现写入。如上所述,除了读头和磁存储器应用之外,TMR器件也可以是感测器器件的一部分。

[0022] 钉扎型TMR器件还可用作如硬盘驱动器等磁记录器件中的读头,如图3更详细所示。图3是示出如在磁记录硬盘驱动器中使用的现有技术的钉扎型TMR读头的结构的高度示意性剖视图。该剖视图是通常被称为TMR读头的气体承载表面(gas-bearing surface,GBS)的视图。TMR读头包括形成在两个铁磁屏蔽层S1、S2之间的感测器层叠堆,该两个铁磁屏蔽层S1、S2通常由电镀NiFe合金膜制成。感测器叠堆包括具有横向(远离页面)定向的钉扎磁化121的铁磁基准层120、具有能够响应于记录盘的横向外部磁场而在层110的平面中旋转的磁化111的铁磁自由层110,以及在铁磁基准层120与铁磁自由层110之间的通常为氧化镁(MgO)的电绝缘隧穿势垒层130。

[0023] 基准层120可以是常规的“简单”钉扎层或单个钉扎层,其磁化方向121通常通过被交换耦合到反铁磁层而被钉扎或固定。然而,在图3的示例中,基准层120是众所周知的反向平行(AP)钉扎结构或通量闭合结构(也称为“层压”钉扎层)的一部分,如US 5465185中所描述。AP钉扎结构使基准层120与自由层110的静磁耦合最小化。AP钉扎结构包括跨AP耦合(APC)层123(诸如Ru、Ir、Rh或Cr或其合金)反铁磁耦合的基准铁磁性(AP2)层120和下钉扎铁磁(AP1)层122。由于跨APC层123进行反向平行耦合,因此基准(AP2)铁磁层120和钉扎(AP1)铁磁层122具有彼此反向平行定向的其相应磁化121、127。因此,AP2铁磁层120和AP1铁磁层122的净磁化非常小,使得由铁磁自由层110中的通量闭合结构引起的退磁场基本上被最小化,并且因此TMR读头实现最佳运行变成可行。

[0024] 位于基板、下屏蔽层S1和AP钉扎结构之间的是晶种层125和反铁磁(AF)钉扎层124。晶种层125促进AF钉扎层124生长具有强结晶纹理的微结构并且因此形成强反铁磁性。AF钉扎层124因此强烈地交换耦合到铁磁钉扎层122,并且由此在垂直于GBS且远离GBS的方向上刚性钉扎铁磁钉扎层122的磁化127。然后,跨APC层123的反向平行耦合随后在垂直于ABS且朝向ABS的方向上并且反向平行于磁化127刚性钉扎铁磁基准层120的磁化121。因此,铁磁AP2层120和铁磁AP1层122的净磁化被刚性钉扎,因此确保了TMR读头的最佳运行。

[0025] 位于铁磁自由层110与上屏蔽层S2之间的是层112,有时被称为封盖层或覆盖层。层112保护铁磁自由层110在处理期间免受化学损坏和机械损坏,使得铁磁自由层110维持良好的铁磁特性。

[0026] 在存在感兴趣范围内的外部磁场(即记录盘上的写入数据的磁场)的情况下,当铁磁层120、122的净磁化保持刚性钉扎时,铁磁自由层110的磁化111将会响应于磁场而旋转。因此,当感测电流 I_s 从上屏蔽层S2垂直流过感测器叠堆到达下屏蔽层S1时,铁磁自由层111

的磁化旋转将导致铁磁基准层120与铁磁自由层110的磁化之间的角度发生变化,这可检测作为电阻发生的变化。因为感测电流被垂直引导通过两个屏蔽件S1与S2之间的层叠堆,所以TMR读头是电流垂直于平面(CPP)的读头。

[0027] 图3还示出了分别在屏蔽件S1、S2与感测器叠堆之间的可选的单独电引线126、113。该引线是可选的,并且可用于调节屏蔽件到屏蔽件的间隔。如果不存在引线126和引线113,则底部屏蔽件S1和顶部屏蔽件S2用作电引线。虽然图3中示出的TMR读头是“底部钉扎”读头,因为AP钉扎结构在自由层110下方,但自由层110可位于AP钉扎结构下方。在此类布置中,AP钉扎结构的层被反转,其中,AP2层120在势垒层130的顶部上并且与之接触。

[0028] 要求MgO隧道结具有(001)纹理且结晶度完美。MgO势垒层通常通过溅射沉积作为具有(001)纹理的NaCl(岩盐)结晶结构沉积在无定形层上,并且随后的退火通过去除应变来改进结晶结构。已经发现,在一个或两个铁磁层中使用薄型无定形CoFeB层或CoFeBTa层导致TMR或TMR比率($\Delta R/R$)更高。已知如此沉积的无定形CoFeB层促进(001)带纹理的MgO和具有CoFeB的较高TMR在退火后结晶成(001)纹理。

[0029] 图4是典型的FM 1层/MgO/FM 2层结构的示意性剖视图,其中,硼存在于两个铁磁层中。FM1和FM2两者可以均为DFL器件中的自由层,或者FM1和FM2中的一者可以是钉扎型器件中的基准层。基准铁磁层和自由铁磁层各自被描绘为与MgO势垒层相邻的薄型(例如,厚度介于约1Å至4Å之间)CoFe“纳米层”、CoFe层以及在纳米层与CoFe层之间的CoFeB(以及在一些情况下,CoHf、CoFeBTa或其它无定形插入层)层。CoFeB层具有 $(\text{Co}_x\text{Fe}_{(100-x)})_{(100-y)}\text{B}_y$ 的典型组成成分,其中,下标表示原子百分比,x介于约40至100之间,并且y介于约10至20之间。FM1铁磁层和FM2铁磁层各自的总厚度通常介于约20Å至80Å之间。用于铁磁层的其它材料是公知的,诸如Co或Fe纳米层、NiFe合金和霍伊斯勒(Heusler)合金。

[0030] 然而,已经发现,在图4的现有技术TMR器件中,硼在退火期间扩散到MgO势垒层中,这降低了击穿电压和TMR。此外,对于先进的TMR器件,需要将MgO制成更薄以减小电阻-面积乘积(RA)。更薄的MgO势垒层甚至更容易受到硼扩散的影响。此外,沉积在CoFeB上的MgO的晶粒较小,意味着在退火之后,MgO晶粒边界中可能存在更多缺陷。

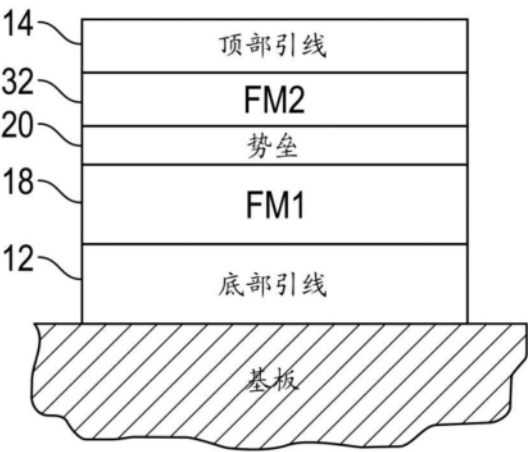
[0031] 图5是根据本发明的实施方案的具有无硼铁磁层和经改进的晶种层的FM 1层/MgO/FM 2层结构的示意性剖视图。FM1层和FM2层各自可以是单层或多层。FM1示出为具有与MgO界面相邻的可选Co(或CoFe)纳米层。将导电无定形预晶种层直接沉积在形成于合适基板上的引线层上。预晶种层可以是包含选自NiFeTa合金、CoFeTa合金、CoFeB合金、CoFeBTa合金和Ta的材料的层或多层,总厚度在约5Å至50Å的范围内。优选为RuAl合金(或者可选地CrMo合金)的导电晶种层直接沉积在预晶种层上,并且在RuAl的情况下形成B2结晶结构(也称为CsCl结构),或者在具有(001)纹理的CrMo(Mo介于约30至50原子百分比之间)的情况下形成BCC相,即(001)平面平行于基板和预晶种层的表面。RuAl晶种层的厚度在约5Å至50Å的范围内且优选组成成分为 $\text{Ru}_x\text{Al}_{(100-x)}$,其中,x以原子百分比计并且大于或等于45且小于或等于60。优选为CoFe合金的无硼FM1层沉积在晶种层上,在<001>方向上生长并且继承(001)纹理。如Cr等可选的BCC子层(图5中未示出)可在沉积FM1层之前沉积在晶种层上,在这种情况下,FM1层直接沉积在子层上。(如本文所用,短语“在层上”是指在上层和下层之间可存在一个或多个中间层,而短语“直接在层上”是指上层直接在下层上并与之接

触)。无硼FM1层的典型厚度在 $20\text{\AA}$ 至 $80\text{\AA}$ 的范围内,并且也可以是多层,如图5所示。虽然CoFe合金是FM1的优选材料,但是具有可继承晶种层的(001)纹理的BCC结构的其它合适材料包括CoFeNi基合金、霍伊斯勒合金,如 Co_2MnSi 、 Co_2MnAl 、 Co_2MnGe 、 Co_2FeSi 和 Co_2FeAl ,以及半霍伊斯勒合金,如NiMnSb。然后,将MgO势垒层直接沉积在CoFe层上,或者可选地直接沉积在可选的Co纳米层($2\text{\AA}$ 至 $20\text{\AA}$)上,达到约 $4\text{\AA}$ 至 $20\text{\AA}$ 的范围内的厚度。MgO势垒层在FM1层上以001纹理外延生长。虽然MgO是优选的,但是可充当隧穿势垒层并且继承FM1层的(001)纹理的其它材料包括ZnO、MnO、CoO、TiO和VO,以及如 MgAl_2O_4 和 MgGa_2O_4 等尖晶石材料。图6A是示出在RuAl晶种层上生长具有(001)纹理的隧穿势垒层和FM1的 $\langle 001 \rangle$ 生长方向的侧视图的示意图。图6B是RuAl(晶种)、CoFe(FM1)和MgO(隧穿势垒)层的(001)平面的示意性顶视图,并且示出了MgO层的NaCl结构的(001)平面在CoFe层上成45度角。

[0032] 然后,在MgO势垒层上沉积FM2层。虽然FM2层也优选为无硼层并且优选为CoFe合金,但是为了获得软磁特性或降低磁致伸缩,也可以含有B。FM2层可以是BCC结构或包括无定形层或FCC层的多层,只要在MgO界面处的层具有BCC结构即可。在沉积叠堆中的各层之后,对叠堆进行退火,优选地在约180至280℃下退火2至5小时。这通过减小应变改进了FM1层和FM2层以及势垒层的结晶度。与现有技术不同的是,没有硼扩散到势垒层中。另外,势垒层的结晶结构中的通常为MgO的缺陷位于晶粒边界处,但是因为本发明的各种实施方案中的势垒层中的晶粒大于形成在现有技术的CoFeB层上的势垒层的晶粒,所以在退火之后在势垒层中存在较少缺陷。如Ru/Ta/Ru多层等非磁性覆盖层可形成在FM2上。

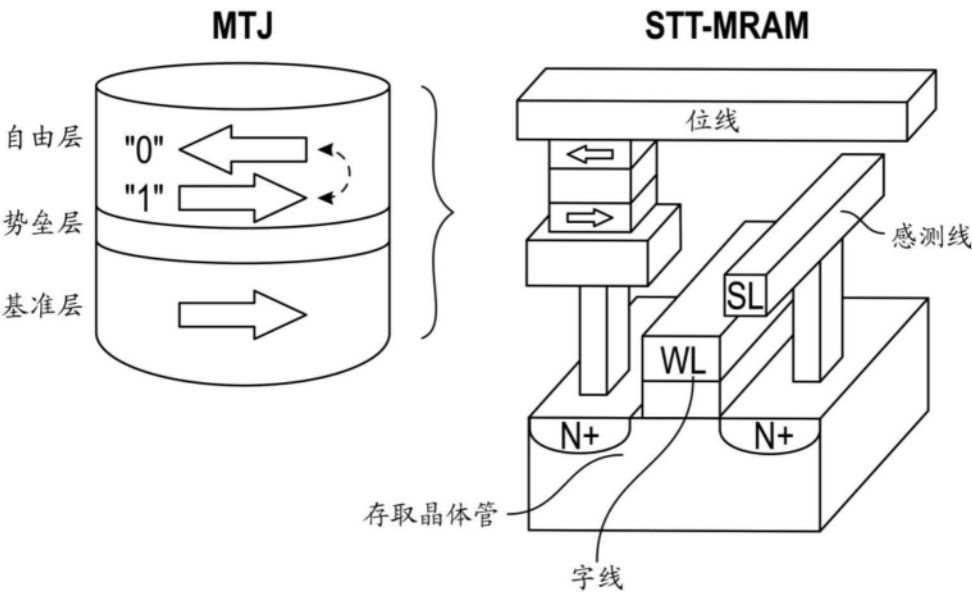
[0033] 图7是现有技术的DFL晶片(如图4)和根据本发明的实施方案的DFL晶片(如图5)的所测量的TMR与RA的曲线图。TMR比率由 $\Delta R/R = (R_{\text{AP}} - R_{\text{P}})/R_{\text{P}}$ 得出,其中, R_{P} 和 R_{AP} 表示为铁磁层磁化的平行构型和反向平行构型测量得到的电阻。现有技术的其数据由下面的曲线示出的DFL晶片具有CoHf($20\text{\AA}$)/CoFeB($50\text{\AA}$)/Co($4\text{\AA}$)多层的FM1和CoFe($4\text{\AA}$)/CoFeB($50\text{\AA}$)/CoHf($20\text{\AA}$)多层的FM2。本发明的其数据由上面的曲线示出的实施方案具有RuAl晶种层、CoFe($50\text{\AA}$)/Co($5\text{\AA}$)多层的FM1和CoFe($50\text{\AA}$)层的FM2。对于约0.34至0.38(欧姆-微米²)的RA范围,与范围为约50至85%的现有技术相比,本发明的实施方案的TMR更高,介于约80至100%之间。类似地,对于约50至85%的TMR范围,与范围为约0.34至0.38(欧姆-微米²)的现有技术相比,本发明的实施方案的RA更低,介于约0.28至0.34(欧姆-微米²)之间。

[0034] 虽然已参考优选的实施方案具体示出并描述了本发明,但本领域的技术人员将理解,在不脱离本发明的实质和范围的情况下可在形式和细节上作出各种更改。因此,所公开的本发明被认为仅是示例性的,并且在范围上仅限于所附权利要求书中指定的范围。



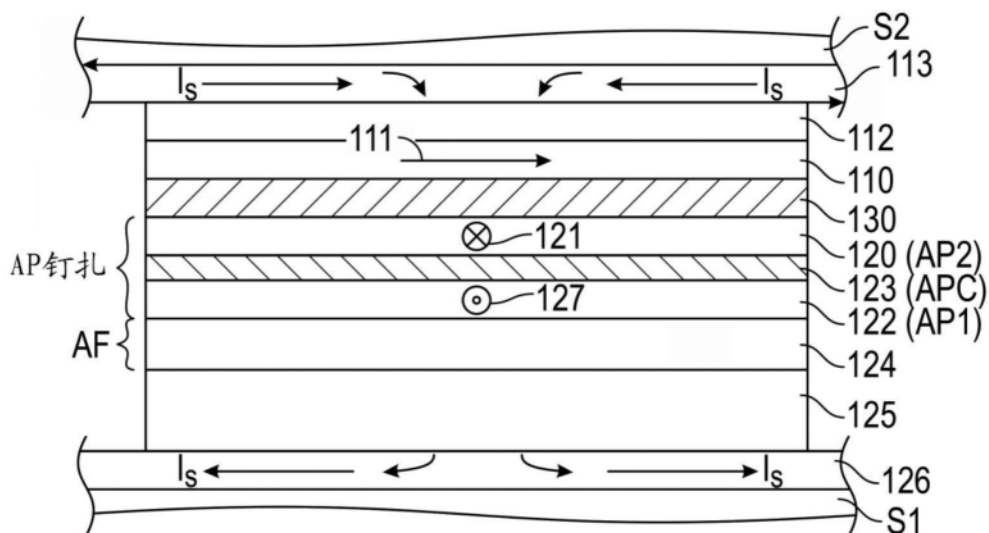
(现有技术)

图1



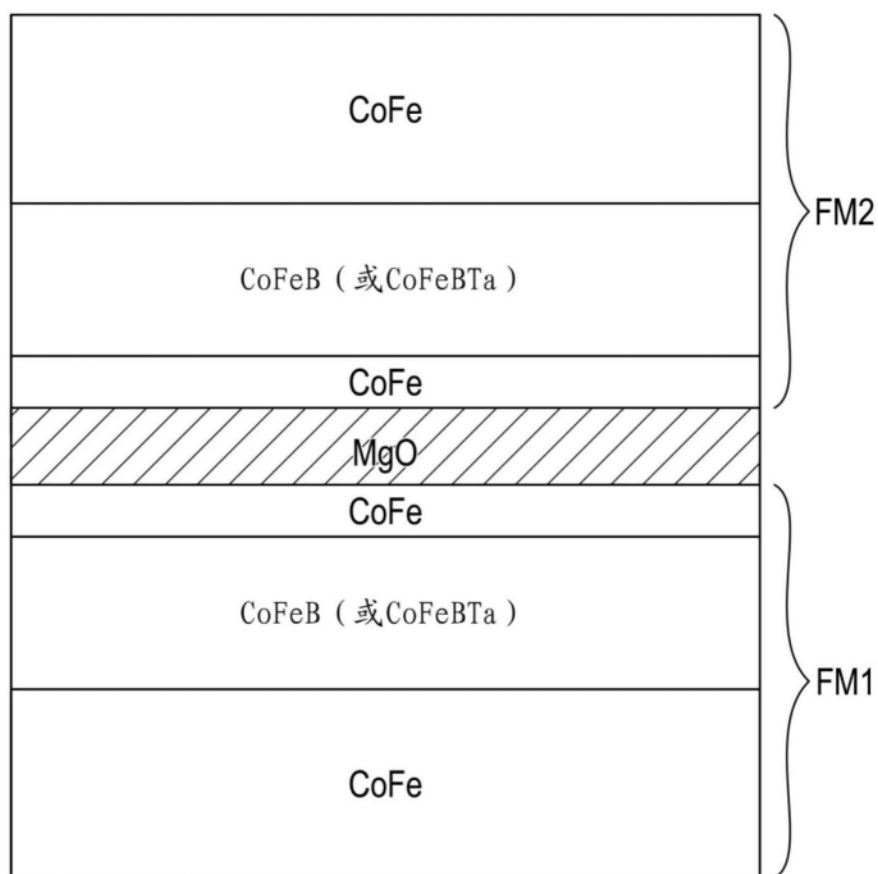
(现有技术)

图2



(现有技术)

图3



(现有技术)

图4

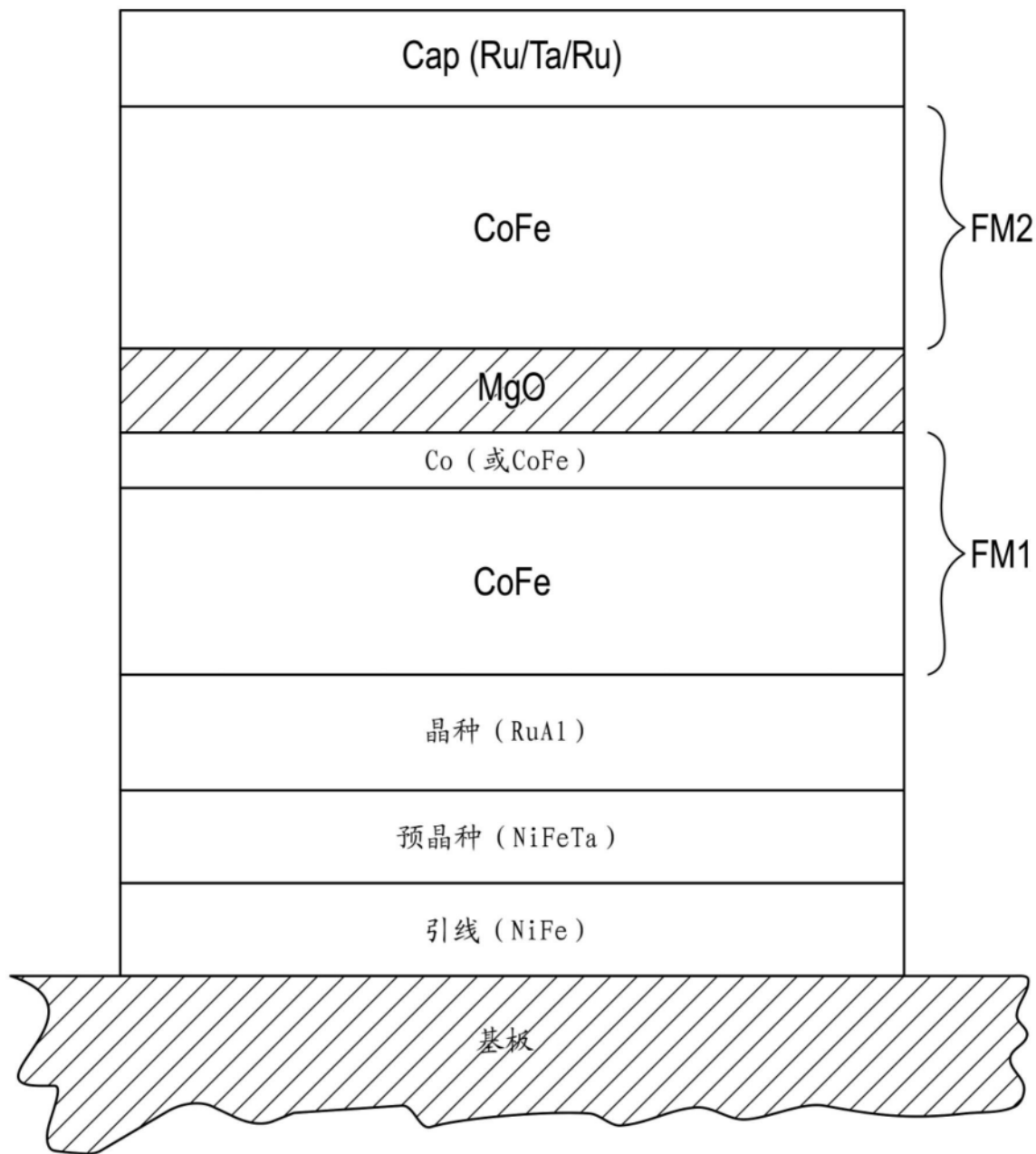


图5

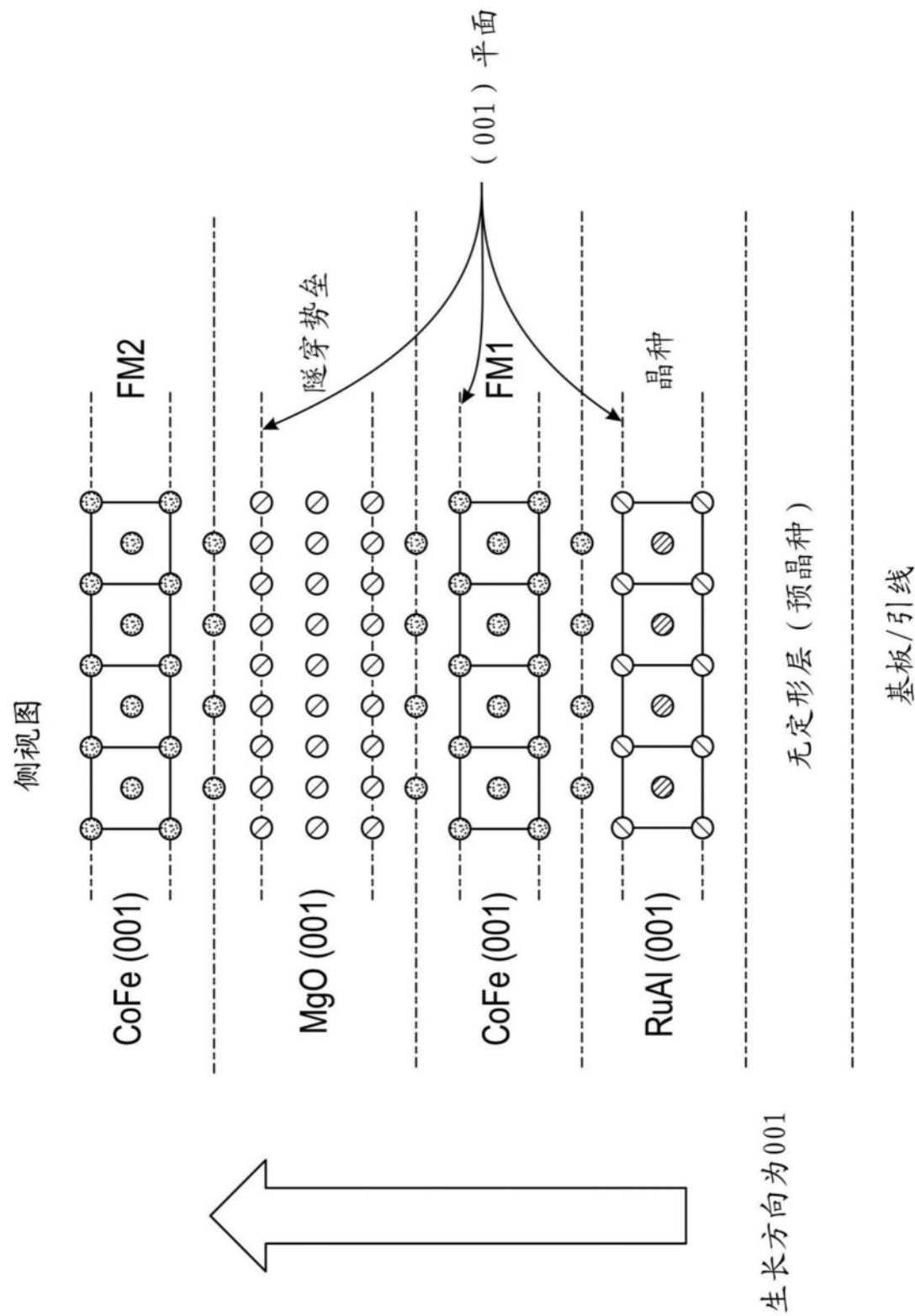


图6A

顶视图

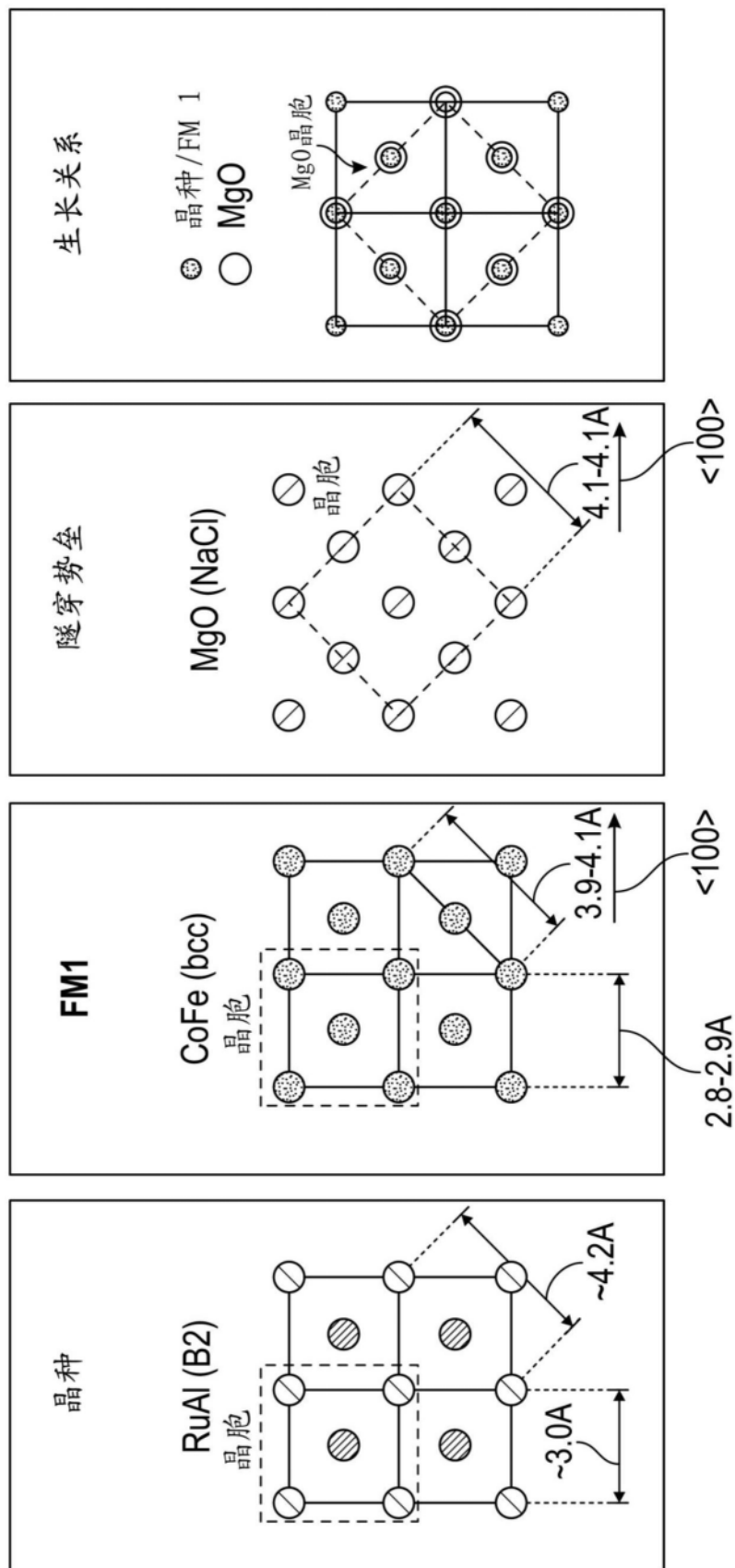


图6B

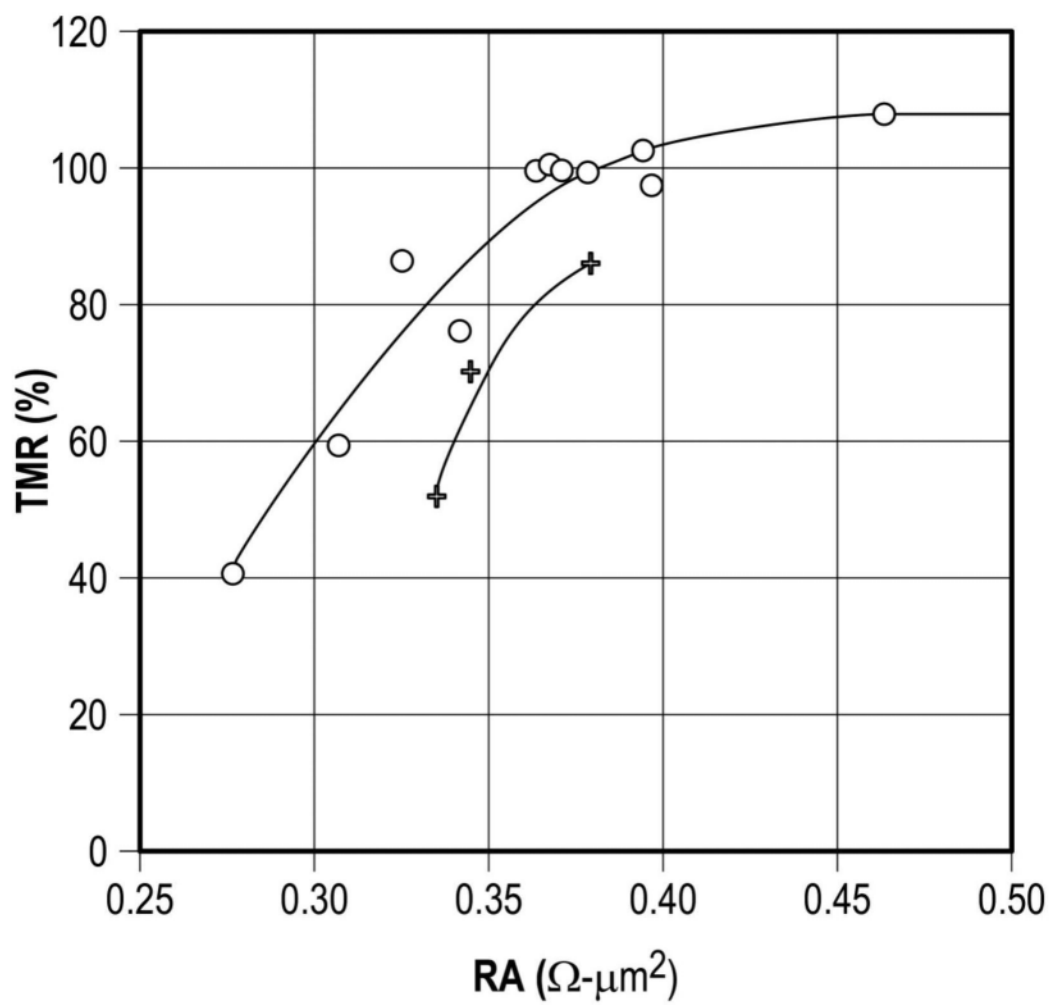


图7