



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117480619 A

(43) 申请公布日 2024. 01. 30

(21) 申请号 202280042206.3

(22) 申请日 2022.06.15

(30) 优先权数据

2021-099796 2021.06.15 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2023.12.13

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2022/024040 2022.06.15

(87) PCT国际申请的公布数据

W02022/265058 JA 2022.12.22

(71) 申请人 国立大学法人东北大学

地址 日本国宫城县

(72) 发明人 斋藤好昭 远藤哲郎 池田正二

(74) 专利代理机构 上海光华专利事务所(普通合伙) 31219

专利代理师 余明伟 李磊

(51) Int.Cl.

H01L 29/82 (2006.01)

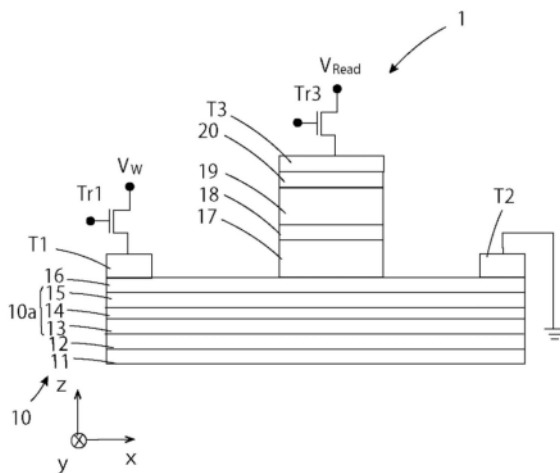
权利要求书2页 说明书28页 附图45页

(54) 发明名称

磁性层叠膜和磁阻效应元件

(57) 摘要

本发明提供一种能够使写入电流流过并实现高密度化和/或高速存储器的层叠膜、使用该层叠膜的磁阻效应元件。磁性层叠膜(10)包括:第1铁磁层(12);设置在第1铁磁层(12)上的层间耦合非磁性层(10a);以及设置在层间耦合非磁性层(10a)上的第2铁磁层(16),层间耦合非磁性层(10a)采用包括第1非磁性层(13)、层间耦合层(14)和第2非磁性层(15)的三层构造形成。层间耦合层(14)选自至少含有Ir、Ru、Rh的金属或合金。第1非磁性层(13)、第2非磁性层(15)选自含有Pt的金属或合金。



1. 一种磁性层叠膜,其特征在于,包括:
第1铁磁层;
反铁磁耦合层,其设置在所述第1铁磁层上;以及
第2铁磁层,其设置在所述反铁磁耦合层上,
所述反铁磁耦合层包括第1非磁性层和层间耦合非磁性层。
2. 根据权利要求1所述的磁性层叠膜,其特征在于:
所述反铁磁耦合层包括:所述第1非磁性层;所述层间耦合非磁性层,其设置在所述第1非磁性层上;以及第2非磁性层,其设置在所述层间耦合非磁性层上。
3. 根据权利要求1或2所述的磁性层叠膜,其特征在于:
所述第1非磁性层采用含有Pt的金属或合金形成。
4. 根据权利要求1至3中任一项所述的磁性层叠膜,其特征在于:
所述层间耦合非磁性层采用含有Ir、Rh和Ru中的至少任一种的金属或合金形成。
5. 根据权利要求1至4中任一项所述的磁性层叠膜,其特征在于:
所述第1铁磁层和所述第2铁磁层各自的磁化因基于电流产生的自旋轨道转矩而发生反转。
6. 根据权利要求1至5中任一项所述的磁性层叠膜,其特征在于:
在所述第1铁磁层的与所述反铁磁耦合层相反的面和/或在所述第2铁磁层的与所述反铁磁耦合层相反的面设置有第3非磁性层,所述第3非磁性层采用含有W、Cu、Ta、Mn中的至少任一种的金属或合金形成。
7. 一种磁阻效应元件,其特征在于,包括:
权利要求1至6中任一项所述的磁性层叠膜;
记录层,其包括铁磁层或反铁磁层,所述记录层设置在所述磁性层叠膜上;
阻挡层,其采用绝缘物构成,设置在所述记录层上;以及
参考层,其设置在所述阻挡层上,
所述磁性层叠膜的所述第1铁磁层或所述第2铁磁层与所述记录层中的所述铁磁层或所述反铁磁层通过交换相互作用进行耦合,
通过使电流沿着与所述磁性层叠膜的层叠方向相交的方向流过,所述第1铁磁层的磁化和所述第2铁磁层的磁化分别发生反转,所述记录层的磁化发生反转。
8. 根据权利要求7所述的磁阻效应元件,其特征在于:
所述参考层采用非磁性层形成。
9. 根据权利要求7所述的磁阻效应元件,其特征在于:
所述参考层包括磁化固定的磁性层。
10. 根据权利要求7至9中任一项所述的磁阻效应元件,其特征在于:
在所述磁性层叠膜中,在所述磁性层叠膜的所述记录层侧或与所述记录层相反的一侧设置有第3非磁性层,
所述第3非磁性层采用含有W、Cu、Ta、Mn中的至少任一种的金属或合金形成。
11. 根据权利要求7至9中任一项所述的磁阻效应元件,其特征在于:
在所述磁性层叠膜中,在所述磁性层叠膜的所述记录层侧设置有第3非磁性层,并且在所述磁性层叠膜的与所述记录层相反的一侧设置有第4非磁性层,

所述第3非磁性层和所述第4非磁性层采用含有W、Cu、Ta、Mn中的至少任一种的金属或合金形成。

12. 一种磁阻效应元件,其特征在在于,包括:

导电层,其包括:第1铁磁层、设置在所述第1铁磁层上的反铁磁耦合层、以及设置在所述反铁磁耦合层上的第2铁磁层,所述反铁磁耦合层包括第1非磁性层和层间耦合非磁性层;

存储层,其设置在所述导电层上;

阻挡层,其设置在所述记录层上;以及

参考层,其设置在所述阻挡层上,

所述导电层包括在所述记录层侧或与所述记录层相反的一侧设置的第3非磁性层,所述第3非磁性层采用含有W、Cu、Ta、Mn中的至少任一种的金属或合金形成。

13. 根据权利要求12所述的磁阻效应元件,其特征在在于:

所述第1铁磁层和所述第2铁磁层中的与所述第3非磁性层接触的铁磁层具有相对于所述导电层的电流施加方向倾斜的磁化。

14. 一种磁性层叠膜,其特征在在于,包括:

第1铁磁层;

反铁磁耦合层,其设置在所述第1铁磁层上;以及

第2铁磁层,其设置在所述反铁磁耦合层上,

所述第1铁磁层和所述第2铁磁层进行反铁磁耦合,

所述反铁磁耦合层包括第1非磁性层和层间耦合非磁性层,

所述第1非磁性层采用含有Pt的金属或合金形成,

所述层间耦合非磁性层采用含有Ir、Rh和Ru中的至少任一种的金属或合金形成。

15. 一种磁性层叠膜,其特征在在于,包括:

第1铁磁层;

反铁磁耦合层,其设置在所述第1铁磁层上;以及

第2铁磁层,其设置在所述反铁磁耦合层上,

所述第1铁磁层和所述第2铁磁层进行反铁磁耦合,

所述反铁磁耦合层包括:第1非磁性层、设置在所述第1非磁性层上的所述层间耦合非磁性层、以及设置在所述层间耦合非磁性层上的第2非磁性层,

所述第1非磁性层和所述第2非磁性层采用含有Pt的金属或合金形成,

所述层间耦合非磁性层采用含有Ir、Rh和Ru中的至少任一种的金属或合金形成。

16. 根据权利要求14或15所述的磁性层叠膜,其特征在在于:

在所述第1铁磁层的与所述反铁磁耦合层相反的面和/或在所述第2铁磁层的与所述反铁磁耦合层相反的面设置有第3非磁性层,所述第3非磁性层采用含有W、Cu、Ta、Mn中的至少任一种的金属或合金形成。

磁性层叠膜和磁阻效应元件

技术领域

[0001] 本发明涉及一种磁性层叠膜和磁阻效应元件。

背景技术

[0002] 为了实现自旋电子集成电路,信息的写入非常重要。为了在自旋电子中以电的方式使磁化反转,存在利用自旋注入磁化反转的方法,该方法通过使电流流过磁隧道结(Magnetic Tunnel Junction:MTJ)而使记录层的磁化反转,该磁隧道结包括:记录层,其具有可反转的磁化;阻挡层,其采用绝缘体形成;以及参考层,其磁化的方向固定。另一方面,近年来,为了以电的方式使磁化反转,存在利用自旋轨道转矩(Spin Orbit Torque:SOT)诱导磁化反转的方法,使用该方法的MRAM(Magnetic Random Access Memory,磁随机存取存储器)元件受到瞩目。

[0003] SOT-MRAM元件是在重金属层上设置包括记录层/阻挡层/参考层的MTJ而构成的,通过使电流流过重金属层,因自旋轨道相互作用而诱导自旋流,由自旋流极化后的自旋流入记录层,记录层的磁化发生反转,由此在记录层的磁化方向与参考层的磁化方向平行的状态和反平行的状态之间进行切换,记录数据(专利文献1至专利文献3)。

[0004] 另一方面,使用在阻挡层的一侧设置反铁磁体并且在相反侧设置非磁性金属而构成的NiFe/IrMn/MgO/Pt堆叠结构,关于使用反铁磁体的隧道结的磁阻效应报告如下(非专利文献1)。NiFe的铁磁磁矩因外部磁场而发生反转,与此相伴诱导出与NiFe进行了交换耦合的IrMn的反铁磁磁矩的旋转。伴随着该IrMn的磁矩的旋转,检测出隧道各向异性磁阻效应(tunneling anisotropic magnetoresistance:TAMR)。

[0005] 现有技术文献

[0006] 专利文献

[0007] 专利文献1:国际公开第2016/021468号

[0008] 专利文献2:国际公开第2016/159017号

[0009] 专利文献3:国际公开第2019/159962号

[0010] 非专利文献

[0011] 非专利文献1:Nature Materials,volume 10,pp.347-351(2011)

发明内容

[0012] 关于使用铁磁体的MRAM,如果在小于1Xnm规格的微细化区域,就不能够忽视漏磁场的影响,预计会产生各种故障。

[0013] 因此,本发明的一个目的在于提供一种能够使写入电流流过并实现高密度化和/或高速存储器的磁性层叠膜、以及使用该磁性层叠膜的磁阻效应元件。

[0014] 本发明的构思如下所述。

[0015] (1)一种磁性层叠膜,其包括:

[0016] 第1铁磁层;

- [0017] 反铁磁耦合层,其设置在所述第1铁磁层上;以及
- [0018] 第2铁磁层,其设置在所述反铁磁耦合层上,
- [0019] 所述反铁磁耦合层包括第1非磁性层和层间耦合非磁性层。
- [0020] (2) 在所述(1)所述的磁性层叠膜中,所述反铁磁耦合层包括:所述第1非磁性层;所述层间耦合非磁性层,其设置在所述第1非磁性层上;以及第2非磁性层,其设置在所述层间耦合非磁性层上。
- [0021] (3) 在所述(1)或(2)所述的磁性层叠膜中,所述第1非磁性层采用含有Pt的金属或合金形成。
- [0022] (4) 在所述(1)至(3)中任一项所述的磁性层叠膜中,所述层间耦合非磁性层采用含有Ir、Rh和Ru中的至少任一种的金属或合金形成。
- [0023] (5) 在所述(1)至(4)中任一项所述的磁性层叠膜中,所述第1铁磁层和所述第2铁磁层各自的磁化因基于电流产生的自旋轨道转矩而发生反转。
- [0024] (6) 在所述(1)至(5)中任一项所述的磁性层叠膜中,在所述第1铁磁层的与所述反铁磁耦合层相反的面和/或在所述第2铁磁层的与所述反铁磁耦合层相反的面设置有第3非磁性层,所述第3非磁性层采用含有W、Cu、Ta、Mn中的至少任一种的金属或合金形成。
- [0025] (7) 一种磁阻效应元件,其包括:
- [0026] 所述(1)至(6)中任一项所述的磁性层叠膜;
- [0027] 记录层,其包括铁磁层或反铁磁层,设置在所述磁性层叠膜上;
- [0028] 阻挡层,其采用绝缘物构成,设置在所述记录层上;以及
- [0029] 参考层,其设置在所述阻挡层上,
- [0030] 所述磁性层叠膜的所述第1铁磁层或所述第2铁磁层与所述记录层中的所述铁磁层或所述反铁磁层通过交换相互作用进行耦合,
- [0031] 通过使电流沿着与所述磁性层叠膜的层叠方向相交的方向流过,所述第1铁磁层的磁化和所述第2铁磁层的磁化分别发生反转,所述记录层的磁化发生反转。
- [0032] (8) 在所述(7)记载的磁阻效应元件中,所述参考层采用非磁性层形成。
- [0033] (9) 在所述(7)记载的磁阻效应元件中,所述参考层包括磁化固定的磁性层。
- [0034] (10) 在所述(7)至(9)中任一项记载的磁阻效应元件中,所述磁性层叠膜中,在所述磁性层叠膜的所述记录层侧或与所述记录层相反的一侧设置有第3非磁性层,
- [0035] 所述第3非磁性层采用含有W、Cu、Ta、Mn中的至少任一种的金属或合金形成。
- [0036] (11) 在所述(7)至(9)中任一项记载的磁阻效应元件中,所述磁性层叠膜中,在所述磁性层叠膜的所述记录层侧设置有第3非磁性层,并且在所述磁性层叠膜的与所述记录层相反的一侧设置有第4非磁性层,
- [0037] 所述第3非磁性层和所述第4非磁性层采用含有W、Cu、Ta、Mn中的至少任一种的金属或合金形成。
- [0038] (12) 一种磁阻效应元件,其包括:
- [0039] 导电层,其包括:第1铁磁层、设置在所述第1铁磁层上的反铁磁耦合层、以及设置在所述反铁磁耦合层上的第2铁磁层,所述反铁磁耦合层包括第1非磁性层和层间耦合非磁性层;
- [0040] 存储层,其设置在所述导电层上;

- [0041] 阻挡层,其设置在所述记录层上;以及
- [0042] 参考层,其设置在所述阻挡层上,
- [0043] 所述导电层包括在所述记录层侧或与所述记录层相反的一侧设置的第3非磁性层,所述第3非磁性层采用含有W、Cu、Ta、Mn中的至少任一种的金属或合金形成。
- [0044] (13) 在所述(12)记载的磁阻效应元件中,所述第1铁磁层和所述第2铁磁层中的与所述第3非磁性层接触的铁磁层具有相对于所述导电层的电流施加方向倾斜的磁化。
- [0045] (14) 一种磁性层叠膜,其包括:
- [0046] 第1铁磁层;
- [0047] 反铁磁耦合层,其设置在所述第1铁磁层上;以及
- [0048] 第2铁磁层,其设置在所述反铁磁耦合层上,
- [0049] 所述第1铁磁层和所述第2铁磁层进行反铁磁耦合,
- [0050] 所述反铁磁耦合层包括第1非磁性层和层间耦合非磁性层,
- [0051] 所述第1非磁性层采用含有Pt的金属或合金形成,
- [0052] 所述层间耦合非磁性层采用含有Ir、Rh和Ru中的至少任一种的金属或合金形成。
- [0053] (15) 一种磁性层叠膜,其包括:
- [0054] 第1铁磁层;
- [0055] 反铁磁耦合层,其设置在所述第1铁磁层上;以及
- [0056] 第2铁磁层,其设置在所述反铁磁耦合层上,
- [0057] 所述第1铁磁层和所述第2铁磁层进行反铁磁耦合,
- [0058] 所述反铁磁耦合层包括:第1非磁性层、设置在所述第1非磁性层上的所述层间耦合非磁性层、以及设置在所述层间耦合非磁性层上的第2非磁性层,
- [0059] 所述第1非磁性层和所述第2非磁性层采用含有Pt的金属或合金形成,
- [0060] 所述层间耦合非磁性层采用含有Ir、Rh和Ru中的至少任一种的金属或合金形成。
- [0061] (16) 在所述(14)或(15)所述的磁性层叠膜中,在所述第1铁磁层的与所述反铁磁耦合层相反的面和/或在所述第2铁磁层的与所述反铁磁耦合层相反的面设置有第3非磁性层,所述第3非磁性层采用含有W、Cu、Ta、Mn中的至少任一种的金属或合金形成。
- [0062] 发明效果
- [0063] 根据本发明,能够提供一种能够使写入电流流过并实现高密度化和/或高速存储器的磁性层叠膜、以及使用该磁性层叠膜的磁阻效应元件。

附图说明

- [0064] 图1A是本发明的第1实施方式涉及的磁性层叠膜和使用该磁性层叠膜的磁阻效应元件的俯视图。
- [0065] 图1B是沿着图1A中的A-A线的剖视图。
- [0066] 图2A是用于说明通过使电流流过本发明的第1实施方式涉及的磁性层叠膜而将数据“0”写入记录层的状态的图。
- [0067] 图2B是用于说明通过使电流反向地流过本发明的第1实施方式涉及的磁性层叠膜而将数据“1”写入记录层的状态的图。
- [0068] 图3A是本发明的第2实施方式涉及的磁性层叠膜和使用该磁性层叠膜的磁阻效应

元件的俯视图。

[0069] 图3B是沿着图3A中的B-B线的剖视图。

[0070] 图3C是本发明的第2实施方式涉及磁性层叠膜和磁阻效应元件的另一方式的剖视图。

[0071] 图3D是本发明的第2实施方式涉及磁性层叠膜和磁阻效应元件的另一剖视图。

[0072] 图4A是本发明的第3实施方式涉及磁性层叠膜和使用该磁性层叠膜的磁阻效应元件的俯视图。

[0073] 图4B是沿着图4A中的C-C线的剖视图。

[0074] 图5A是用于说明通过使电流流过本发明的第3实施方式涉及磁性层叠膜而将数据“0”写入记录层的状态的图。

[0075] 图5B是用于说明通过使电流反向地流过本发明的第3实施方式涉及磁性层叠膜而将数据“1”写入记录层的状态的图。

[0076] 图6A是本发明的第4实施方式涉及磁性层叠膜和使用该磁性层叠膜的磁阻效应元件的俯视图。

[0077] 图6B是沿着图6A中的D-D线的剖视图。

[0078] 图6C是本发明的第4实施方式涉及磁性层叠膜和磁阻效应元件的另一方式的剖视图。

[0079] 图6D是本发明的第4实施方式涉及磁性层叠膜和磁阻效应元件的另一剖视图。

[0080] 图7是实施例1的样品的磁化曲线。

[0081] 图8是实施例2的样品的磁化曲线。

[0082] 图9是实施例3的样品的磁化曲线。

[0083] 图10是表示层间耦合力 J_{ex} (mJ/m^2) 的非磁性层的整个膜厚 t_{total} (nm) 依赖性的图表。

[0084] 图11是实施例5的样品的磁化曲线。

[0085] 图12是实施例6的样品的磁化曲线。

[0086] 图13是实施例7的样品的磁化曲线。

[0087] 图14是实施例8的样品的磁化曲线。

[0088] 图15是表示层间耦合力 J_{ex} (mJ/m^2) 的非磁性层的整个膜厚 t_{total} (nm) 依赖性的图表。

[0089] 图16是层间耦合力 J_{ex} 的Ir厚度依赖性。

[0090] 图17是层间耦合力 J_{ex} 的Ru厚度依赖性。

[0091] 图18是示意性地示出作为样品29制作的霍尔棒和测量系统的图。

[0092] 图19A是制作的样品29的剖视图。

[0093] 图19B是制作的比较例2的试料的剖视图。

[0094] 图20是表示样品29、比较例2中的试料的霍尔电阻 R_{xy} (Ω) 的脉冲电流依赖性的图。

[0095] 图21A是表示关于样品30至样品34的自旋生成效率的Ir层厚度依赖性的图。

[0096] 图21B是表示关于样品30至样品34的自旋生成效率的层间耦合力 J_{ex} (mJ/m^2) 依赖性的图。

- [0097] 图22A是表示关于样品35至样品39的自旋生成效率的Pt层厚度依赖性的图。
- [0098] 图22B是表示关于样品35至样品39的自旋生成效率的层间耦合力 J_{ex} (mJ/m^2) 依赖性的图。
- [0099] 图23A是第5实施方式涉及的磁阻效应元件的俯视图。
- [0100] 图23B是沿着图23A中的E-E线的剖视图。
- [0101] 图24是第6实施方式涉及的磁阻效应元件的剖视图。
- [0102] 图25是第7实施方式涉及的磁阻效应元件的剖视图。
- [0103] 图26是实证例10的剖视图。
- [0104] 图27是实证例10中制作的霍尔棒的电子显微镜图像。
- [0105] 图28A是表示关于实证例10中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω) 的脉冲电流依赖性,在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且将一定的外部磁场 H_{ex} 分别以49mT、39mT沿着脉冲电流I的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果的图。
- [0106] 图28B是表示关于实证例10中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω) 的脉冲电流依赖性,在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且将一定的外部磁场 H_{ex} 分别以28.5mT、18mT沿着脉冲电流I的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果的图。
- [0107] 图28C是表示关于实证例10中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω) 的脉冲电流依赖性,在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且将一定的外部磁场 H_{ex} 分别以8mT、0mT沿着脉冲电流I的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果的图。
- [0108] 图28D是表示关于实证例10中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω) 的脉冲电流依赖性,在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且将一定的外部磁场 H_{ex} 分别以-6.5mT、-16.5mT沿着脉冲电流I的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果的图。
- [0109] 图28E是表示关于实证例10中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω) 的脉冲电流依赖性,在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且将一定的外部磁场 H_{ex} 分别以-27mT、-37mT沿着脉冲电流I的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果的图。
- [0110] 图28F是表示关于实证例10中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω) 的脉冲电流依赖性,在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且将一定的外部磁场 H_{ex} 分别以-48mT、-58mT沿着脉冲电流I的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果的图。
- [0111] 图29是表示在实证例10中在无磁场的情况下沿着 \pm 方向交替施加脉冲电流时的霍尔电阻 R_{xy} (Ohm) 的反复次数依赖性的图。
- [0112] 图30是表示关于实证例11中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω) 的脉冲电流依赖性,在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且未施加一定的外部磁场 H_{ex} 时的结果的图。
- [0113] 图31是表示在实证例11中在无磁场的情况下沿着 \pm 方向交替施加脉冲电流时的霍尔电阻 R_{xy} (Ohm) 的反复次数依赖性的图。
- [0114] 图32是实证例12的剖视图。
- [0115] 图33是表示实证例12中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω) 的脉冲电流依赖性的图。
- [0116] 图34是表示实证例13中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω) 的脉冲电流依赖性的图。
- [0117] 图35是表示实证例14中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω) 的脉冲电流依赖性的图。
- [0118] 图36是表示实证例15中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω) 的脉冲电流依赖性的图。

- [0119] 图37是表示实证例16中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流依赖性的图。
- [0120] 图38是表示在实证例16中在无磁场的情况下沿着 \pm 方向交替施加脉冲电流时的霍尔电阻 R_{xy} (Ohm)的反复次数依赖性的图。
- [0121] 图39是表示比较例3中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流依赖性的图。
- [0122] 图40是比较例4的剖视图。
- [0123] 图41A是表示关于比较例4中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流依赖性,在测量过程中将脉冲电流 I 施加200 μ 秒且将一定的外部磁场 H_{ex} 以29mT沿着脉冲电流 I 的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果的图。
- [0124] 图41B是表示关于比较例4中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流依赖性,在测量过程中将脉冲电流 I 施加200 μ 秒且未施加一定的外部磁场 H_{ex} 时的结果的图。
- [0125] 图41C是表示关于比较例4中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流依赖性,在测量过程中将脉冲电流 I 施加200 μ 秒且将一定的外部磁场 H_{ex} 以-27mT沿着脉冲电流 I 的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果的图。
- [0126] 附图标记说明
- [0127] 1、2、3、4、5、6、7:磁阻效应元件
- [0128] 10、40:磁性层叠膜
- [0129] 10a、40a、50a:反铁磁耦合层
- [0130] 11、41:基底层
- [0131] 12、42、52:第1铁磁层
- [0132] 13、44、53:第1非磁性层(非磁性层)
- [0133] 14、43、54:层间耦合层(层间耦合非磁性层)
- [0134] 15、55:第2非磁性层
- [0135] 16、45、56:第2铁磁层
- [0136] 17:记录层
- [0137] 18:阻挡层
- [0138] 19:非磁性层
- [0139] 20:覆盖层
- [0140] 27:非磁性层
- [0141] 28、28A:记录层
- [0142] 29:阻挡层
- [0143] 30:参考层
- [0144] 31:非磁性层
- [0145] 32:固接层
- [0146] 33:覆盖层
- [0147] 34、36:Co层
- [0148] 35:Ir层
- [0149] 50:导电层
- [0150] 61:第3非磁性层
- [0151] 62:第4非磁性层

具体实施方式

[0152] 以下,参照附图对本发明的实施方式进行详细地说明。对本发明的实施方式中已说明的事项,能够在不变更本发明范围的范围内适当地进行设计变更。

[0153] (第1实施方式)

[0154] 图1A是本发明的第1实施方式涉及的磁性层叠膜和使用该磁性层叠膜的磁阻效应元件的俯视图,图1B是沿着A-A线的剖视图。如图1A和图1B所示,本发明的第1实施方式涉及的磁性层叠膜10包括:基底层11,其设置在衬底(未图示)上;第1铁磁层12,其设置在基底层11上;第1非磁性层13,其设置在第1铁磁层12上;层间耦合层14,其设置在第1非磁性层13上;第2非磁性层15,其设置在层间耦合层14上;以及第2铁磁层16,其设置在第2非磁性层15上。即,磁性层叠膜10如下述的那样构成。第1非磁性层13、第2非磁性层15以与层间耦合层14的对应的上表面、下表面接触的方式夹着层间耦合层14,第1铁磁层12、第2铁磁层16以与第1非磁性层13的下表面、第2非磁性层15的上表面对应地接触的方式夹着第1非磁性层13、层间耦合层14、第2非磁性层15,第1铁磁层12以与第1非磁性层13的下表面接触的方式设置,第2铁磁层16以与第2非磁性层15的上表面接触的方式设置。在图示的例子中,在第2铁磁层16上形成有由可磁化反转的材料制成的记录层17。在第1实施方式中,反铁磁耦合层10a由第1非磁性层13、层间耦合层14和第2非磁性层15构成。层间耦合层14也可以称为层间耦合非磁性层。反铁磁耦合层10a包括:第1非磁性层13、设置在第1非磁性层13上的层间耦合非磁性层(层间耦合层14)、以及设置在层间耦合非磁性层上的第2非磁性层15。

[0155] 图2A是用于说明通过使电流流过本发明的第1实施方式涉及的磁性层叠膜10而将数据“0”写入记录层17的状态的图。如图2A所示,在使电流沿着-x方向流动之前,第1铁磁层12的磁化和第2铁磁层16的磁化彼此方向相反。在磁性层叠膜10中使电流沿着-x方向流动,由此在自旋相互作用下因自旋霍尔效应而产生自旋流(自旋运动的流动),彼此方向相反的自旋分别朝向与磁性层叠膜10的 $\pm z$ 方向对应的方向流动,因流过磁性层叠膜10的自旋流而使得朝向一个方向的自旋和朝向另一个方向的自旋分别以在上下方向上分离的方式流动,自旋被积蓄在第1铁磁层12与第1非磁性层13的界面处、以及第2非磁性层15与第2铁磁层16的界面处,分别被第1铁磁层12和第2铁磁层16吸收。因此,如图2A所示,第1铁磁层12的磁化M1、第2铁磁层16的磁化M2与流过电流I之前方向相反。这样,在磁性层叠膜10中通过使电流沿着-x方向流动,基于电流产生自旋轨道转矩,第1铁磁层12和第2铁磁层16各自的磁化发生反转。

[0156] 这里,在本发明的第1实施方式中,磁性层叠膜10中,由于第1非磁性层13和第2非磁性层15夹着层间耦合层14,所以自旋转矩比未夹着层间耦合层14时增大,能够使第1铁磁层12的磁化、第2铁磁层16的磁化分别反转。根据本发明的第1实施方式,在图2A所示的磁性层叠膜10中,铁磁层有2层,由于进行反铁磁耦合,所以能够使热稳定性常数 Δ 增大。另外,在以往的SOT元件中,由于在下部未设置第1铁磁层12,所以仅被蓄积在第2铁磁层16与第2非磁性层15的界面处的自旋流能够用于磁化反转。在本发明的第1实施方式涉及的层叠构造中,由于能够使用在流过电流脉冲时产生的被蓄积在第2铁磁层16与第2非磁性层15的界面处的自旋流、以及被蓄积在第1铁磁层12与第1非磁性层13的界面处的自旋流双方,所以能够使反转的能量效率提高一倍左右。

[0157] 假如在磁性层叠膜10中未设置第1非磁性层13和第2非磁性层15,使得层间耦合层

14被第1铁磁层12和第2铁磁层16直接夹着的情况下,即使作为层间耦合层14采用Ru或Ir形成而实现反铁磁耦合,由于Ru、Ir的自旋霍尔角非常小,所以通过自旋霍尔效应实现磁化反转也非常困难。但是,在本构造中,由于能够利用第1非磁性层13、第2非磁性层15的较大的自旋霍尔效应,所以与未设置第1非磁性层13、第2非磁性层15时相比,能够使自旋的反转电流显著地减少。

[0158] 图2B是用于说明通过使电流反向地流过本发明的第1实施方式涉及的磁性层叠膜10,而将数据“1”写入记录层17的状态的图。如图2B所示,在使电流沿着方向相反的+x方向流动之前,第1铁磁层12的磁化和第2铁磁层16的磁化彼此方向相反。在磁性层叠膜10中使电流沿着+x方向流动,由此在自旋相互作用下因自旋霍尔效应而产生自旋流(自旋运动的流动),彼此方向相反的自旋分别向与磁性层叠膜10的 $\pm z$ 方向对应的方向(这里,与图2A的情况相比向相反的方向)流动,因流过磁性层叠膜10的自旋流而使得朝向一个方向的自旋和朝向另一个方向的自旋分别以在上下方向上分离的方式流动,分别朝向第1铁磁层12、第2铁磁层16流动。因此,如图2B所示,第1铁磁层12的磁化M1、第2铁磁层16的磁化M2的方向与使电流沿着+x方向流动之前相反。这样,在磁性层叠膜10中通过使电流沿着+x方向流动,基于电流产生自旋轨道转矩,第1铁磁层12和第2铁磁层16各自的磁化发生反转。

[0159] 这里,与在第1铁磁层/层间耦合层/第2铁磁层的磁性层叠膜中保持反铁磁耦合的情况同样地,即使如本发明的第1实施方式那样使层间耦合层14由第1非磁性层13、第2非磁性层15夹着来构成磁性层叠膜10,也能够保持反铁磁耦合。这一点用后述的实证例进行说明。

[0160] 在图2A和图2B中,示出了面内磁化的情况,但在垂直磁化的情况下也是同样的。

[0161] 作为磁性层叠膜10的一个利用形态,以磁阻效应元件1为例继续进行说明。磁性层叠膜10在第2铁磁层16上具有用于设置作为记录层17的读取用反铁磁层的面,设置具有可反转的磁化的记录层17。读取用反铁磁层优选Ir-Mn合金、Fe-Mn合金等。在记录层17上以接触的方式设置有阻挡层(也称为隧道阻挡层)18。阻挡层18采用MgO、Al₂O₃、AlN、MgAlO等绝缘材料形成,优选在上述Ir-Mn合金、Fe-Mn合金上外延生长。在阻挡层18上设置有作为参考层的非磁性层19。非磁性层19没有特别限制,但优选Pt、Al、Cu等。通过记录层17、阻挡层18和非磁性层19的层叠,构成了利用隧道各向异性磁阻(tunnelling anisotropic magnetoresistance: TAMR)效应的磁阻效应元件1。这里,作为记录层17的读取用反铁磁层和第2铁磁层16通过交换耦合作用而进行耦合,由于读取用反铁磁层中的反铁磁磁矩因第2铁磁层16中的磁化反转而进行旋转,所以电阻的大小变化较大。

[0162] 在磁性层叠膜10的最上表面、最下表面中的任一面设置有第1端子T1和第2端子T2,第1端子T1和第2端子T2在与磁性层叠膜10的层叠方向正交的方向上远离。写入电流在第1端子T1与第2端子T2之间流动。在非磁性层19上设置覆盖层20后设置有第3端子T3,能够使读取电流流过第3端子T3。在图1B中,晶体管Tr1的一端与第1端子T1连接,第2端子T2接地,通过使晶体管Tr1导通(ON)来施加写入电压 V_w ,电流沿着x方向流动。晶体管Tr3的一端与第2端子T2连接,通过使晶体管Tr3导通(ON)来施加读取电压 V_{Read} ,电流从第3端子T3流向第2端子T2。

[0163] 这里,作为记录层17的读取用反铁磁层和第2铁磁层16通过交换耦合作用而进行耦合,读取用反铁磁层中的反铁磁磁矩因第2铁磁层16的磁化反转而进行旋转。由于电阻伴

随着该反铁磁磁矩的方向发生变化而变化较大,所以能够进行记录层17的读取。

[0164] 因此,通过使电流流过第3端子T3,读取电流的大小发生变化,因此能够判断记录在作为记录层17的读取用反磁性层中的数据是“0”还是“1”。

[0165] 接着,对磁性层叠膜10的具体的材料进行说明。层间耦合层14采用含有Ir、Rh和Ru中的至少任一种的金属或合金形成。在含有Ir的情况下,可以具有范围是0.4nm以上0.7nm以下的厚度。在含有Ru的情况下,可以具有范围是0.6nm以上0.9nm以下的厚度。优选层间耦合层14采用含有Ir、Rh中的至少任一种的具有fcc结构的金属或合金形成。特别优选层间耦合层14采用含有Ir、Ir-Os合金、Rh、Ir-Rh合金、Ir-Re合金、Ir-Ru合金中的任一种的具有fcc结构的金属或合金形成。

[0166] 第1非磁性层13、第2非磁性层15采用含有Pt的金属或合金形成。优选第1非磁性层13、第2非磁性层15采用含有Pt的具有fcc结构的金属或合金形成。特别优选第1非磁性层13、第2非磁性层15选自Pt、Pt-Au合金、Pt-Ir合金、Pt-Cu合金、Pt-Cr合金中的任一种的具有fcc结构的金属、合金。第1非磁性层13、第2非磁性层15也可以是Pt-Pd合金、Pt-Hf合金、Pt-Al合金。

[0167] 在本发明的第1实施方式涉及的磁性层叠膜10中,即使层间耦合层14由第1非磁性层13和第2非磁性层15夹着,第1铁磁层12和第2铁磁层16也会进行反铁磁耦合。因此,磁性层叠膜10为本身不会产生漏磁场的构造,并且热稳定性较好。为了形成更彻底的反铁磁耦合,优选第1铁磁层12和第2铁磁层16具有相等的厚度。

[0168] 如以上所述,通过使用这样的磁性层叠膜10作为使用SOT的磁阻效应元件1的写入控制层,使写入效率进一步提高。另外,通过使用这样的保持反铁磁耦合的磁性层叠膜10,使写入速度提高。

[0169] 在本发明的第1实施方式涉及的磁阻效应元件1中,在第2铁磁层16上设置有:通过交换相互作用而进行耦合的作为记录层17的读取用反磁性层、设置在读取用反磁性层上的阻挡层18、以及由非磁性层19形成的固定层。由于记录层17通过交换相互作用与第2铁磁层16的磁化进行耦合,所以成为不会产生漏磁场的构造。因此,磁阻效应元件1本身不会产生漏磁场。另外,热稳定性由磁性层叠膜10的磁性体的体积决定,因磁性体的体积与如图1B所示那样包括记录层17、阻挡层18、作为参考层的非磁性层19、覆盖层20和端子T3的读取元件相比位于整个下部电极,所以可知热稳定性非常好。

[0170] 因此,通过在至少一个磁性层叠膜10上配置多个作为记录层17的读取用反磁性层/阻挡层18/由非磁性层19形成的固定层的堆叠结构,即使集成化为MRAM等磁存储设备,也能够尽可能地减少因漏磁场导致的误写入、误读取。

[0171] 在第1实施方式涉及的磁性层叠膜10和磁阻效应元件1中,第1铁磁层12、第2铁磁层16既可以是面内磁化,也可以是垂直磁化。在是面内磁化的情况下,如图2A所示,易磁化轴不限于与电流I的方向垂直的方向,易磁化轴也可以是x方向、y方向、以及在xy面内相对于x方向和y方向倾斜的xy方向中的任一种。即,既可以是易磁化轴与自旋平行/反平行的类型Y,也可以是易磁化方向与自旋正交的类型X、类型Z等。

[0172] (第2实施方式)

[0173] 图3A是本发明的第2实施方式涉及的磁性层叠膜和使用该磁性层叠膜的磁阻效应元件的俯视图,图3B是沿着B-B线的剖视图。本发明的第2实施方式涉及的磁性层叠膜10是

与第1实施方式相同的结构,因此产生与第1实施方式相同的作用效果。详细的说明因重复而省略。

[0174] 在第2实施方式中,包含铁磁层的记录层28以隔着非磁性层27的方式设置在第2铁磁层16上,将记录层28与第2铁磁层16的晶体结构分隔开。作为记录层28的铁磁层,采用CoFeBo、FeB、CoB等形成。阻挡层29以与参考层30接触的方式设置。非磁性层31设置在参考层30的与和阻挡层29相邻的一侧相反的一侧,将非磁性层31的上下层的晶体结构分隔开。非磁性层27、非磁性层31从W、Ta、Mo、Hf等中选择一种以上的元素。

[0175] 另外,在隔着非磁性层31与参考层30相反的一侧设置有固接层32,该固接层32例如在垂直磁化膜的情况下采用 $(\text{Co}/\text{Pt})_m/\text{Ir}/(\text{Co}/\text{Pt})_n$ 形成,在面内磁化膜的情况下采用CoFe/Ru/CoFe/IrMn形成,将参考层30中的铁磁层的磁化方向固定而进行钉扎。在这样的情况下,也可以包括铁磁层和固接层在内将其称为参考层。上述的m、n为任意的自然数。覆盖层33设置在固接层32的与非磁性层31相反的一侧,第3端子T3被安装于覆盖层33。第3端子T3与晶体管Tr3连接。

[0176] 在本发明的第2实施方式涉及的磁阻效应元件2中,在第2铁磁层16上构成为所谓的MTJ元件,该MTJ元件包括:通过交换相互作用而进行耦合的作为记录层28的铁磁层、设置在记录层28上的阻挡层29和参考层30。

[0177] 在磁性层叠膜10的最上表面、最下表面中的任一面设置有第1端子T1和第2端子T2,第1端子T1和第2端子T2在与磁性层叠膜10的层叠方向正交的方向上远离。写入电流在第1端子T1与第2端子T2之间流动。

[0178] 在第2实施方式涉及的磁性层叠膜10中,通过使电流在第1端子T1与第2端子T2之间流动,能够进行数据的写入,由于与第1实施方式是相同的,所以省略说明。在读取数据时,通过使电流流过第3端子T3,能够基于流过构成MTJ元件的记录层28、阻挡层29和参考层30的电流的大小来判断记录层28的磁化是与参考层30的磁化平行的还是反平行的,从而能够进行数据的读取。

[0179] 在本发明的第2实施方式涉及的磁性层叠膜10中,即使层间耦合层14由第1非磁性层13和第2非磁性层15夹着,第1铁磁层12和第2铁磁层16也会进行反铁磁耦合。因此,磁性层叠膜10为本身不会产生漏磁场的构造。铁磁层有2层,由于进行反铁磁耦合,所以能够使热稳定性常数 Δ 增大。另外,在以往的SOT元件中,由于在下部未设置第1铁磁层12,所以仅被蓄积在第2铁磁层16与第2非磁性层15的界面处的自旋流能够用于磁化反转。在本元件构造中,由于能够使用在使电流脉冲流过时产生的被蓄积在第2铁磁层16与第2非磁性层15的界面处的自旋流、以及被蓄积在第1铁磁层12与第1非磁性层13的界面处的自旋流双方,所以能够使反转的能量效率增大一倍左右。另外,在本构造中,由于能够利用第1非磁性层13、第2非磁性层15的较大的自旋霍尔效应,所以与未设置第1非磁性层13、第2非磁性层15时相比,能够使自旋的反转电流显著地减少。为了形成更彻底的反铁磁耦合,优选第1铁磁层12和第2铁磁层16具有相等的厚度。

[0180] 通过使用这样的磁性层叠膜10作为使用SOT的磁阻效应元件2的写入控制层,使写入效率进一步提高。通过使用这样的保持反铁磁耦合的磁性层叠膜10,使写入速度提高。

[0181] 在本发明的第2实施方式涉及的磁阻效应元件2中,在第2铁磁层16上构成为所谓的MTJ元件,该MTJ元件包括:通过交换相互作用而进行耦合的作为记录层28的铁磁层、设置

在记录层28上的阻挡层29和参考层30。图3C是本发明的第2实施方式涉及的磁性层叠膜10和磁阻效应元件2的另一方式的剖视图。如图3C所示,作为进一步消除漏磁场的构造,优选使直到记录层28为止的层为磁性层叠膜10,使第1铁磁层12的磁化的值和第2铁磁层16/非磁性层27/记录层28的磁化的值抵消。图3D是本发明的第2实施方式涉及的磁性层叠膜10和磁阻效应元件2的另一剖视图。如图3D所示,也可以将使记录层构造为反铁磁耦合构造而得到的Co层34/Ir层35/Co层36/非磁性层27/记录层28整体设为记录层28A。Co层34、36也可以是Co以外的铁磁层。不限于Ir层35,也可以是采用层间耦合层的材料形成的例如Ru层。参考层30、固接层32能够通过对其膜的厚度进行调整来防止产生漏磁场。因此,磁阻效应元件2本身不会产生漏磁场。

[0182] 因此,通过在至少一个磁性层叠膜10上配置多个包括作为记录层28的铁磁层、设置在记录层28上的阻挡层29和参考层30的所谓的MTJ元件,即使集成化为MRAM等磁存储设备,也能够尽可能地减少因漏磁场导致的误写入、误读取。

[0183] 在第2实施方式涉及的磁性层叠膜10、磁阻效应元件2中,第1铁磁层12、第2铁磁层16、记录层28、参考层30既可以是面内磁化,也可以是垂直磁化。在是面内磁化的情况下,磁化的方向不限于与电流I的方向垂直的方向,既可以是x方向,也可以是y方向,进而只要位于xy面内即可。即,既可以是易磁化轴与自旋平行/反平行的类型Y,也可以是易磁化方向与自旋正交的类型X、类型Z等。

[0184] (第3实施方式)

[0185] 图4A是本发明的第3实施方式涉及的磁性层叠膜和使用该磁性层叠膜的磁阻效应元件的俯视图,图4B是沿着C-C线的剖视图。如图4A和图4B所示,本发明的第3实施方式涉及的磁性层叠膜40包括:基底层41,其设置在衬底(未图示)上;第1铁磁层42,其设置在基底层41上;层间耦合层43,其设置在第1铁磁层42上;第1非磁性层44,其设置在层间耦合层43上;以及第2铁磁层45,其设置在第1非磁性层44上。即,磁性层叠膜40如下述的那样构成。层间耦合层43和第1非磁性层44彼此接触,第1铁磁层42在层间耦合层43的下表面接触,第2铁磁层45在第1非磁性层44的上表面接触,第1铁磁层42和第2铁磁层45夹着层间耦合层43、第1非磁性层44,第1铁磁层42以与层间耦合层43的下表面接触的方式设置,第2铁磁层45以与第1非磁性层44的上表面接触的方式设置。也就是说,如第1实施方式涉及的磁性层叠膜10那样,非磁性层并非两层,而是一层的形态。在图示的例子中,在第2铁磁层45上形成有由可磁化反转的材料形成的记录层17。在第3实施方式中,反铁磁耦合层40a由层间耦合层43和第1非磁性层44构成。层间耦合层43也可以称为层间耦合非磁性层。此外,层间耦合层43和第1非磁性层44也可以上下颠倒。第1非磁性层44也可以简称为非磁性层44。

[0186] 图5A是用于说明通过使电流流过本发明的第3实施方式涉及的磁性层叠膜40而将数据“0”写入记录层17的状态的图。如图5A所示,在使电流沿着-x方向流动之前,第1铁磁层42的磁化和第2铁磁层45的磁化彼此方向相反。在磁性层叠膜40中使电流沿着-x方向流动,由此在自旋相互作用下因自旋霍尔效应而产生自旋流(自旋运动的流动),彼此方向相反的自旋分别向与磁性层叠膜40的 $\pm z$ 方向对应的方向流动,因流过磁性层叠膜40的自旋流而使得朝向一个方向的自旋和朝向另一个方向的自旋分别以在上下方向上分离的方式流动,被积蓄在第1铁磁层42与层间耦合层43的界面处、以及第1非磁性层44与第2铁磁层45的界面处,被第2铁磁层45吸收。因此,如图5A所示,第1铁磁层12的磁化、第2铁磁层16的磁化与

使电流沿着-x方向流动之前方向相反。这样,在磁性层叠膜40中通过使电流沿着-x方向流动,基于电流产生自旋轨道转矩,第1铁磁层42和第2铁磁层45各自的磁化发生反转。

[0187] 这里,在本发明的第3实施方式涉及的磁性层叠膜40中,由于第2铁磁层45与自旋霍尔角较大的第1非磁性层44接触,所以自旋转矩比未设置第1非磁性层44时增大,能够使第1铁磁层42的磁化、第2铁磁层45的磁化同时反转。

[0188] 假如在磁性层叠膜40中未设置第1非磁性层44而使层间耦合层43被第1铁磁层42和第2铁磁层45直接夹着的情况下,即使作为层间耦合层43采用Ru或Ir形成而实现反铁磁耦合,由于Ru、Ir的自旋霍尔角非常小,所以通过自旋霍尔效应实现磁化反转也非常困难。

[0189] 图5B是用于说明通过使电流反向地流过本发明的第3实施方式涉及的磁性层叠膜40而将数据“1”写入记录层17的状态的图。如图5B所示,在使电流沿着方向相反的+x方向流动之前,第1铁磁层42的磁化和第2铁磁层45的磁化彼此方向相反。在磁性层叠膜40中使电流沿着+x方向流动,由此在自旋相互作用下因自旋霍尔效应而产生自旋流(自旋运动的流动),彼此方向相反的自旋分别向与磁性层叠膜40的 $\pm z$ 方向对应的方向(这里,与图5A的情况相比相反的方向)流动,因流过磁性层叠膜40的自旋流而使得朝向一个方向的自旋和朝向另一个方向的自旋分别以在上下方向上分离的方式流动,被积蓄在第1铁磁层42与层间耦合层43的界面处、第1非磁性层44与第2铁磁层45的界面处,被第1铁磁层42、第2铁磁层45吸收。因此,如图5B所示,第1铁磁层42的磁化、第2铁磁层45的磁化与使电流沿着+x方向流动之前方向相反。这样,在磁性层叠膜40中通过使电流沿着+x方向流动,基于电流产生自旋轨道转矩,第1铁磁层42和第2铁磁层45各自的磁化发生反转。

[0190] 这里,与在第1铁磁层/层间耦合层/第2铁磁层的磁性层叠膜中保持反铁磁耦合的情况相比,即使如本发明的第3实施方式那样以层间耦合层43和第1非磁性层44彼此接触的方式构成磁性层叠膜40,也能够保持反铁磁耦合。这一点用后述的实证例进行说明。这是由于,被认为因Ir的费米面的[111]方向的生成矢量(spanning vector)qs所引起的RKKY相互作用而产生的反铁磁耦合在Pt中也是相同的fcc结构,因此费米面的拓扑构造是同等的,所以能够保持RKKY相互作用。

[0191] 在图5A和图5B中,示出了面内磁化的情况,但在垂直磁化的情况下也是同样的。在是面内磁化的情况下,磁化的方向不限于与电流I的方向垂直的方向,既可以是x方向,也可以是y方向,进而只要位于xy面内即可。即,既可以是易磁化轴与自旋平行/反平行的类型Y,也可以是易磁化方向与自旋正交的类型X、类型Z等。

[0192] 作为磁性层叠膜40的一个利用形态,以磁阻效应元件3为例继续进行说明。在第3实施方式中,磁性层叠膜40中,在第2铁磁层45上具有用于设置作为记录层17的读取用反磁性层的面,设置具有可反转的磁化的记录层17。读取用反铁磁层优选Ir-Mn合金、Fe-Mn合金等。在记录层17上以接触的方式设置有阻挡层(也称为隧道阻挡层)18。阻挡层18优选MgO、Al₂O₃、AlN、MgAlO等绝缘材料。在阻挡层18上设置有作为参考层的非磁性层19。非磁性层19没有特别限制,优选Pt、Cu、Al等。通过记录层17、阻挡层18和非磁性层19的层叠,构成使用隧道各向异性磁阻(tunnelling anisotropic magnetoresistance:TAMR)效应的磁阻效应元件3。这里,作为记录层17的读取用反铁磁层和第2铁磁层45通过交换耦合作用而进行耦合,由于读取用反铁磁层中的反铁磁磁矩因第2铁磁层45中的磁化反转而进行旋转,所以电阻的大小变化较大。

[0193] 在磁性层叠膜40的最上表面、最下表面中的任一面设置有第1端子T1和第2端子T2,第1端子T1和第2端子T2在与磁性层叠膜40的层叠方向正交的方向上远离。写入电流在第1端子T1与第2端子T2之间流动。在非磁性层19上设置覆盖层20后设置有第3端子T3,能够使读取电流流过第3端子T3。

[0194] 接着,对磁性层叠膜40的具体材料进行说明。层间耦合层43采用含有Ir、Rh和Ru中的至少任一种的金属或合金形成。在含有Ir的情况下,可以具有范围是0.4nm以上0.7nm以下的厚度。在含有Ru的情况下,可以具有范围是0.6nm以上0.9nm以下的厚度。优选层间耦合层43采用含有Ir、Rh中的至少任一种的具有fcc结构的金属或合金形成。特别优选层间耦合层43采用含有Ir、Ir-Os合金、Rh、Ir-Rh合金、Ir-Re合金、Ir-Ru合金中的任一种的具有fcc结构的金属或合金形成。

[0195] 第1非磁性层44采用含有Pt的金属或合金形成。优选第1非磁性层44采用含有Pt的具有fcc结构的金属或合金形成。特别优选第1非磁性层44选自Pt、Pt-Au合金、Pt-Ir合金、Pt-Cu合金中的任一种、或Pt-Cr合金的具有fcc结构的金属、合金。第1非磁性层44也可以是Pt-Pd合金、Pt-Hf合金、Pt-Al合金。

[0196] 在本发明的第3实施方式涉及的磁性层叠膜40中,通过使第1非磁性层44和层间耦合层43以彼此接触的方式设置,第1铁磁层42和第2铁磁层45进行反铁磁耦合。因此,磁性层叠膜40为本身不会产生漏磁场的构造。铁磁层有2层,由于进行反铁磁耦合,所以能够使热稳定性常数 Δ 增大。另外,在以往的SOT元件中,由于在下部未设置第1铁磁层42,所以仅被蓄积在第2铁磁层45与第1非磁性层44的界面处的自旋流能够用于磁化反转。在本元件构造中,由于能够使用在流过电流脉冲时产生的被蓄积在第2铁磁层45与第1非磁性层44的界面处的自旋流、以及被蓄积在第1铁磁层42与层间耦合层43的界面处的自旋流双方,所以能够使反转的能量效率增大一倍左右。另外,在本构造中,由于能够利用第1非磁性层44的较大的自旋霍尔效应,所以与未设置第1非磁性层44时相比,能够使自旋的反转电流显著地减少。为了形成更彻底的反铁磁耦合,优选第1铁磁层42和第2铁磁层45具有相等的厚度。

[0197] 通过使用这样的磁性层叠膜40作为使用SOT的磁阻效应元件3的写入控制层,使写入效率进一步提高。通过使用这样的保持反铁磁耦合的磁性层叠膜40,使写入速度提高。

[0198] 在本发明的第3实施方式涉及的磁阻效应元件3中,在第2铁磁层45上置有:通过交换相互作用而进行耦合的作为记录层17的读取用反磁性层、设置在读取用反磁性层上的阻挡层18和非磁性层19。记录层17通过交换相互作用与第2铁磁层45的磁化进行耦合。因此,磁阻效应元件3本身因全部采用非磁性体构成而不会产生漏磁场。

[0199] 因此,通过在至少一个磁性层叠膜40上配置多个作为记录层17的读取用反磁性层/阻挡层18/由非磁性层19形成的固定层的堆叠结构,即使集成化为MRAM等磁存储设备,也能够尽可能地减少因漏磁场导致的误写入、误读取。

[0200] 在第3实施方式涉及的磁性层叠膜40和磁阻效应元件3中,第1铁磁层42、第2铁磁层45既可以是面内磁化,也可以是垂直磁化。在是面内磁化的情况下,磁化的方向不限于与电流I的方向垂直的方向,既可以是x方向,也可以是y方向,进而只要位于xy面内即可。即,既可以是易磁化轴与自旋平行/反平行的类型Y,也可以是易磁化方向与自旋正交的类型X、类型Z等。

[0201] (第4实施方式)

[0202] 图6A是本发明的第4实施方式涉及的磁性层叠膜和使用该磁性层叠膜的磁阻效应元件的俯视图,图6B是沿着D-D线的剖视图。本发明的第4实施方式涉及的磁性层叠膜40是与第3实施方式相同的结构,因此在本发明的第4实施方式涉及的磁性层叠膜40中,通过使层间耦合层43和第1非磁性层44以彼此接触的方式设置,第1铁磁层42和第2铁磁层45进行反铁磁耦合。因此,磁性层叠膜40为本身不会产生漏磁场的构造。因此,热稳定性较好。为了形成更彻底的反铁磁耦合,优选第1铁磁层42和第2铁磁层45具有相等的厚度。通过使用这样的磁性层叠膜40作为使用SOT的磁阻效应元件4的写入控制层,使写入效率进一步提高。通过使用这样的保持反铁磁耦合的磁性层叠膜40,使写入速度提高。详细的说明因与第3实施方式相同而省略。

[0203] 在第4实施方式中,除了设置在磁性层叠膜40上的非磁性层27、记录层28、阻挡层29、参考层30、非磁性层31、固接层32、覆盖层33、第3端子T3以外,第1端子T1、第2端子T2、第3端子T3、各晶体管Tr1、Tr2、Tr3也是与第2实施方式相同的结构,因此产生与第2实施方式相同的作用效果。在第2铁磁层45上构成为所谓的MTJ元件,该MTJ元件包括通过交换相互作用而进行耦合的作为记录层28的铁磁层、设置在记录层28上的阻挡层29和参考层30。记录层28通过交换相互作用而与第2铁磁层45的磁化进行耦合,因此能够为不会产生漏磁场的构造。图6C是本发明的第4实施方式涉及的磁性层叠膜40和磁阻效应元件4的另一方式的剖视图。如图6C所示,作为进一步消除漏磁场的构造,优选使直到记录层28为止的层为磁性层叠膜40,使第1铁磁层42的磁化和第2铁磁层45/非磁性层27/记录层28的磁化的值抵消。图6D是本发明的第4实施方式涉及的磁性层叠膜40和磁阻效应元件4的另一剖视图。如图6D所示,也可以将记录层构造为反铁磁耦合构造而得到的Co层34/Ir层35/Co层36/非磁性层27/记录层28整体设为记录层28A。Co层34、36也可以是Co以外的铁磁层,不限于Ir层35,也可以是采用层间耦合层的材料形成的例如Ru层。参考层30、固接层32能够通过对其膜的厚度进行调整来防止产生漏磁场。因此,磁阻效应元件4本身不会产生漏磁场。因此,通过在至少一个磁性层叠膜40上配置多个包括作为记录层28的铁磁层、设置在记录层28上的阻挡层29和参考层30的所谓的MTJ元件,即使集成化为MRAM等磁存储设备,也能够尽可能地减少因漏磁场导致的误写入、误读取。详细的说明因与第2实施方式相同而省略。在第4实施方式涉及的磁性层叠膜40、磁阻效应元件4中,第1铁磁层42、第2铁磁层45、记录层28、参考层30既可以是面内磁化,也可以是垂直磁化。在是面内磁化的情况下,磁化的方向不限于与电流I的方向垂直的方向,既可以是x方向,也可以是y方向,进而只要位于xy面内即可。即,既可以是易磁化轴与自旋平行/反平行的类型Y,也可以是易磁化方向与自旋正交的类型X、类型Z等。

[0204] (其他实施方式)

[0205] 本发明的实施方式涉及的磁性层叠膜10、40并非仅用于使用SOT的磁阻效应元件1、2、3、4,还能够作为在自旋电子元件等各种元件和设备中因反铁磁耦合而不会产生漏磁场的材料、结构加以使用。

[0206] (实证例)

[0207] 作为实证例1,在基底层上形成 $(\text{Co}_{1.3}/\text{Pt}_{0.8}/\text{Ir}_{0.5}/\text{Pt}_{0.8})_2/\text{Co}_{1.3}$ 并改变外部磁场来对磁化进行测量。这里,元素标记后面的数字是指包含该元素标记的层的nm单位的厚度,例如Co1.3是指1.3nm的Co层。图7是实证例1的样品的磁化曲线,横轴是外部磁场H

(Oe), 纵轴是M/Ms。磁化曲线中的一条是外部磁场施加垂直磁场的情况, 磁化曲线中的另一条是外部磁场施加面内磁场的情况。发现在施加垂直磁场时在零磁场中进行反铁磁耦合。

[0208] 作为实证例2, 在基底层上形成 (Co1.3/Pt1.0/Ir0.5/Pt1.0)₂/Co1.3 并改变外部磁场来对磁化进行测量。图8是实证例2的样品的磁化曲线, 横轴是外部磁场H (Oe), 纵轴是磁化M/Ms。磁化曲线中的一条是外部磁场施加垂直磁场的情况, 磁化曲线中的另一条是外部磁场施加面内磁场的情况。发现在施加垂直磁场时在零磁场中进行反铁磁耦合。

[0209] 作为实证例3, 在基底层上形成 Co1.1/Pt0.8/Ir0.5/Pt0.8/Co1.1 并改变外部磁场来对磁化进行测量。图9是实证例3的样品的磁化曲线, 横轴是外部磁场H (Oe), 纵轴是M/Ms。磁化曲线中的一条是外部磁场施加垂直磁场的情况, 磁化曲线中的另一条是外部磁场施加面内磁场的情况。发现在施加垂直磁场时进行反铁磁耦合。

[0210] 如上所述, 可知通过在上下的Co层之间夹着包括Pt层、Ir层和Pt层的反铁磁耦合层, 一个Co层的磁化与另一个Co层的磁化方向相反。

[0211] 因此, 作为实证例4, 通过将Pt层插入Co层/Ir层/Co层中, 来调查Ir的反铁磁耦合如何变化。将Ir层的厚度t_{Ir}设为0.5nm、0.55nm、1.4nm, Pt层和Ir层的厚度之和、即非磁性层的总膜厚在0.5至2.5nm的范围内进行调整。存在非磁性层为Ir/Pt的情况、Pt/Ir/Pt的情况、仅为Ir层的情况。仅为Ir层的情况作为比较例。另外, 在Ir层的上下设置Pt层的情况下, 上下的Pt层的厚度相同。

[0212] 在各样品中, 对层间耦合力J_{ex} (mJ/m²) 进行测量。表1汇总了其结果。

[0213] (表1)

	非磁性的结构	t _{Ir} (nm)	t _{total} (nm)	J _{ex} (mJ/m ²)	
[0214]	样品 1	Ir/Pt	0.5	1.5	0.821
	样品 2	Ir/Pt	0.6	1.6	0.415
	样品 3	Pt/Ir/Pt	0.5	1.7	0.561
	样品 4	Pt/Ir/Pt	0.5	2.5	0.0487
	样品 5	Ir/Pt	0.5	1.5	0.218
	样品 6	Pt/Ir/Pt	0.5	2.1	0.224
	样品 7	Pt/Ir/Pt	0.5	2.1	0.188
	样品 8	Pt/Ir/Pt	0.5	1.6	0.271
	样品 9	Pt/Ir/Pt	0.5	2.1	0.0881
[0215]	样品 10	Ir	0.5	0.5	2.12
	样品 11	Ir	1.4	1.4	0.398
	样品 12	Ir/Pt	0.5	1.1	0.9295
	样品 13	Ir/Pt	0.55	1.15	0.971
	样品 14	Ir/Pt	1.4	2	0.0862
	样品 15	Ir/Pt	1.5	2.1	0.0635

[0216] 图10是表示层间耦合力J_{ex} (mJ/m²) 的非磁性层的整个膜厚t_{total} (nm) 依赖性的图

表。从图10可知,通过将Pt层插入Co/Ir/Co的层叠,表示Ir的反铁磁耦合的大小的层间耦合力 J_{ex} 伴随着非磁性层增厚而单调地减少。另外,可以确认即使Pt/Ir/Pt的整个膜厚是2.5nm也会进行反铁磁耦合,并且可以明确能够以Pt/Ir/Pt的整个膜厚为1.5nm~2.5nm的大范围连续地制作反铁磁耦合膜。由此,表明在Pt中RKKY相互作用被传播,但未产生RKKY振荡。

[0217] 作为实证例5,在基底层上形成 $(Co_{1.3}/Pt_{0.6}/Ru_{0.7}/Pt_{0.6})_2/Co_{1.3}$ 并改变外部磁场来对磁化进行测量。图11是实证例5的样品的磁化曲线,横轴是外部磁场H(Oe),纵轴是M/Ms。Ms是饱和磁化。磁化曲线中的一条是外部磁场施加垂直磁场的情况,磁化曲线中的另一条是外部磁场施加面内磁场的情况。发现在施加垂直磁场时在零磁场中进行反铁磁耦合。

[0218] 作为实证例6,在基底层上形成 $(Co_{1.3}/Pt_{0.8}/Ru_{0.7}/Pt_{0.8})_2/Co_{1.3}$ 并改变外部磁场来对磁化进行测量。图12是实证例6的样品的磁化曲线,横轴是外部磁场H(Oe),纵轴是M/Ms。Ms是饱和磁化。磁化曲线中的一条是外部磁场施加垂直磁场的情况,磁化曲线中的另一条是外部磁场施加面内磁场的情况。发现在施加垂直磁场时在零磁场中进行反铁磁耦合。

[0219] 作为实证例7,在基底层上形成 $(Co_{1.3}/Pt_{0.7}/Ru_{0.7}/Pt_{0.7})_2/Co_{1.3}$ 并改变外部磁场来对磁化进行测量。图13是实证例7的样品的磁化曲线,横轴是外部磁场H(Oe),纵轴是M/Ms。Ms是饱和磁化。磁化曲线中的一条是外部磁场施加垂直磁场的情况,磁化曲线中的另一条是外部磁场施加面内磁场的情况。发现在施加垂直磁场时在零磁场中进行反铁磁耦合。

[0220] 作为实证例8,在基底层上形成 $Co_{1.3}/Pt_{0.6}/Ru_{0.7}/Pt_{0.6}/Co_{1.3}$ 并改变外部磁场来对磁化进行测量。图14是实证例8的样品的磁化曲线,横轴是外部磁场H(Oe),纵轴是M/Ms。Ms是饱和磁化。磁化曲线中的一条是外部磁场施加垂直磁场的情况,磁化曲线中的另一条是外部磁场施加面内磁场的情况。发现在施加垂直磁场时在零磁场中进行反铁磁耦合。

[0221] 如上所述,可知通过在上下的Co层之间夹着包括Pt层、Ru层和Pt层的反铁磁耦合层,一个Co层的磁化与另一个Co层的磁化方向相反。

[0222] 因此,作为实证例9,通过将Pt层插入Co层/Ru层/Co层,来调查Ru的反铁磁耦合如何变化。将Ru层的厚度 t_{Ru} 设为0.4nm、0.7nm、0.8nm,Pt层和Ru层的厚度之和、即非磁性层的总膜厚在0.4至2.3nm的范围内进行调整。存在非磁性层为Ru/Pt的情况、Pt/Ru/Pt的情况、仅为Ru层的情况。仅为Ru层的情况作为比较例。另外,在Ru层的上下设置Pt层的情况下,上下的Pt层的厚度相同。

[0223] 在各样品中,对层间耦合力 J_{ex} (mJ/m²)进行测量。表1汇总了其结果。

[0224] (表2)

[0225]

	非磁性的结构	tRu(nm)	ttotal(nm)	J_{ex} (mJ/m ²)
样品16	Ru/Pt	0.7	1.7	0.28
样品17	Pt/Ru/Pt	0.7	1.9	0.206
样品18	Ru/Pt	0.7	1.7	0.119
样品19	Pt/Ru/Pt	0.7	2.3	0.0408
样品20	Pt/Ru/Pt	0.7	2.3	0.0273
样品21	Ru/Pt	0.7	1.7	0.102

样品22	Ru/Pt	0.7	1	1.06
样品23	Ru/Pt	0.7	1.3	0.768
样品24	Pt/Ru/Pt	0.7	2.1	0.0744
样品25	Pt/Ru/Pt	0.7	1.9	0.093
样品26	Ru/Pt	0.8	1.4	0.605
样品27	Ru	0.4	0.4	2.28
样品28	Ru	0.8	0.8	1.0264

[0226] 图15是表示层间耦合力 J_{ex} (mJ/m^2)的非磁性层的整个膜厚 t_{total} (nm)依赖性的图表。从图15可知,通过将Pt层插入Co/Ru/Co的层叠,表示Ru的反铁磁耦合的大小的层间耦合力 J_{ex} 伴随着非磁性层增厚而单调地减少。另外,能够确认即使Pt/Ru/Pt的整个膜厚是2.3nm也会进行反铁磁耦合。另外,可以明确能够以Pt/Ir/Pt的整个膜厚为1.3nm~2.3nm的大范围连续地制作反铁磁耦合膜。另外,表明在Pt中RKKY相互作用被传播,但未产生RKKY振荡。

[0227] 图16是层间耦合力 J_{ex} 的Ir厚度依赖性。横轴是Ir的厚度 (nm),纵轴是层间耦合力 J_{ex} 。黑色圆形标记是指 $(\text{Co}/\text{Pt})_{4.5}/\text{Ir}/(\text{Co}/\text{Pt})_{4.5}$,菱形标记是指 $(\text{Co}/\text{Pt}/\text{Ir})_2/\text{Co}$ 。各标记的Ir层的厚度 t_{Ir} 如0.4nm、0.5nm、0.6nm、0.7nm、0.8nm、0.9nm、1.0nm、1.1nm、1.2nm、1.3nm、1.4nm、1.5nm、1.6nm那样,相隔0.1nm,除此之外菱形标记还包含0.55nm。可知即使将作为非磁性层的Pt层插入层间耦合层与铁磁层之间,层间耦合力 J_{ex} 也能够保持反铁磁耦合。这一点被认为是由于Ir和Pt为相同的fcc结构,所以费米面的拓扑特性是相同的,RKKY相互作用得到传播。另外,由于未观测到反铁磁的振荡周期的长度和位置的移动,所以可以明确在Pt中没有伴随着RKKY相互作用的振荡。这是如上述的那样在Pt/Ir/Pt的整个厚度为1.5nm~2.5nm的大范围内观测到反铁磁耦合的主要原因。可以明确的是,由于Pt的较大的自旋霍尔角能够用于Pt厚度达1.0nm的较大的膜厚,所以能够显著地提高自旋的反转效率。可知Ir层的厚度优选为0.4nm以上0.7nm以下、1.3nm以上1.6nm以下的范围。

[0228] 图17是层间耦合力 J_{ex} 的Ru厚度依赖性。横轴是Ru的厚度 (nm),纵轴是层间耦合力 J_{ex} 。黑色圆形标记是指 $(\text{Co}/\text{Pt}/\text{Ru})_2/\text{Co}$,菱形标记是指 $(\text{Co}/\text{Pt})_{4.5}/\text{Ru}/(\text{Co}/\text{Pt})_{4.5}$ 。各标记的Ru层的厚度 t_{Ru} 是0.4nm、0.5nm、0.6nm、0.7nm、0.8nm、0.9nm、1.0nm、1.1nm、1.2nm、1.4nm、1.5nm、1.6nm、1.7nm、1.8nm、1.9nm、2.0nm、2.1nm、2.2nm。可知通过夹着Pt使与反铁磁距离的周期 Λ_1 对应的Ru间的层间相互作用所引起的振荡消失。另外,可知Ru的厚度选择为层间耦合力 J_{ex} 的第二峰值的厚度即可。可知Ru层的厚度优选0.6nm以上0.9nm以下、1.7nm以上2.2nm以下的范围。

[0229] 图18是示意性地示出作为样品29制作的霍尔棒和测量系统的图。图19A是制作的样品29的剖视图。如图19A所示,样品29包括:设置有热氧化膜的Si衬底101;设置在热氧化膜上的厚度为2.0nm的Ta层102;设置在Ta层102上的厚度为2.0nm的Ir层103;设置在Ir层103上的厚度为1.1nm的Co层104;设置在Co层104上的厚度为0.8nm的Pt层105;设置在Pt层105上的厚度为0.5nm的Ir层106;设置在Ir层106上的厚度为0.8nm的Pt层107;设置在Pt层107上的厚度为1.1nm的Co层108;设置在Co层108上的厚度为0.5nm的Ir层109;设置在Ir层109上的厚度为1.5nm的MgO层110;以及设置在MgO层110上的厚度为1.0nm的Ta层111。

[0230] 图19B是制作的比较例2中的试料的剖视图。如图19B所示,另一比较试料包括:设置有热氧化膜的Si衬底121;设置在热氧化膜上的厚度为3.0nm的Ta层122;设置在Ta层122

上的厚度为7.2nm的Pt层123;设置在Pt层123上的厚度为1.3nm的Co层124;设置在Co层124上的厚度为0.6nm的Ir层125;设置在Ir层125上的厚度为0.6nm的Pt层126;以及设置在Pt层126上的厚度为3.0nm的Ta层127。

[0231] 使用光刻和Ar离子铣削将样品29和比较例2的试料加工为图18所示那样的霍尔棒。使脉冲电流I沿着y方向流动,对霍尔电压V进行测量。对霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流I依赖性进行测量。此外, R_{xy} (Ω) = V/I。

[0232] 图20是表示样品29、比较例2中的试料的霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流依赖性的图。横轴是脉冲电流I (mA),纵轴是霍尔电阻 R_{xy} (Ω)。是在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且将一定的外部磁场 H_{ex} 以-26mT沿着脉冲电流I的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果。从观测到在如果沿着+方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 增加、而如果沿着-方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 减少的情况可知,Co层104的磁矩因脉冲电流而发生磁化反转。

[0233] 观察样品29和比较试料的反转电流的绝对值,可知使用Co/Pt/Ir/Pt/Co的反铁磁耦合膜时的写入电流(反转电流)比仅使用Pt层时的写入电流(反转电流)减半。由此,可知写入时的能量也减少至大约1/4。

[0234] 作为样品30至样品34,制作与图18和图19A同样的霍尔棒,构建测量系统。如图19A所示,样品30至34包括:设置有热氧化膜的Si衬底101;设置在热氧化膜上的厚度为2.0nm的Ta层102;设置在Ta层102上的厚度为2.0nm的Ir层103;设置在Ir层103上的厚度为1.1nm的Co层104;设置在Co层104上的厚度为0.6nm的Pt层105;设置在Pt层105上的规定厚度的Ir层106;设置在Ir层106上的厚度为0.6nm的Pt层107;设置在Pt层107上的厚度为1.1nm的Co层108;设置在Co层108上的厚度为0.5nm的Ir层109;设置在Ir层109上的厚度为1.5nm的MgO层110;以及设置在MgO层110上的厚度为1.0nm的Ta层111。Ir层106的厚度在样品30中为0.5nm,在样品31中为0.52nm,在样品32中为0.56nm,在样品33中为0.58nm,在样品34中为0.6nm。

[0235] 图21A是表示样品30至样品34的自旋生成效率的Ir层厚度依赖性的图,图21B是表示样品30至样品34的自旋生成效率的层间耦合力 J_{ex} (mJ/m^2)依赖性的图。图21A的横轴是Ir厚度 t_{Ir} (nm),图21B的横轴是层间耦合力 J_{ex} (mJ/m^2),图21A和图21B的纵轴是自旋生成效率 θ_{SH} (%)。在图21A和图21B中,替代Pt层105/Ir层106/Pt层107,还示出了作为比较例的(Pt1.0nm/Ir0.8nm)₄的多层膜的情况和厚度为7.2nm的Pt层的情况的结果。在Ir层的厚度从0.6nm减少至0.5nm时,自旋生成效率 θ_{SH} (%)增大。由于 θ_{SH} (%)与写入电流(反转电流)、消耗电力成反比,所以如果使用 J_{ex} (mJ/m^2)此次得到的最大值,则可以明确与图20的Pt/Co试料(Comparison Sample 2)相比,能够使反转电流降低至大约1/5、消耗电力降低至大约1/25。从本结果可知,层间耦合力 J_{ex} (mJ/m^2)越大越能够降低消耗电力。

[0236] 可知在使用Ir层作为层间耦合层的情况下,Ir层的厚度在上述范围内层间耦合力 J_{ex} (mJ/m^2)越大,自旋生成效率(自旋霍尔角)越大。与作为比较例的(Pt1.0nm/Ir0.8nm)₄的多层膜或厚度为7.2nm的Pt层进行对比,则在合成反铁磁(Synthetic Antiferromagnetic)构造中,Ir层的厚度可以为0.4nm以上0.6nm以下,更优选为0.50nm以上0.58nm以下。

[0237] 作为样品35至样品39,制作与图18和图19A同样的霍尔棒,构建测量系统。如图19A

所示,样品35至样品39包括:设置有热氧化膜的Si衬底101;设置在热氧化膜上的厚度为2.0nm的Ta层102;设置在Ta层102上的厚度为2.0nm的Ir层103;设置在Ir层103上的厚度为1.1nm的Co层104;设置在Co层104上的规定厚度的Pt层105;设置在Pt层105上的厚度为0.5nm的Ir层106;设置在Ir层106上的规定厚度的Pt层107;设置在Pt层107上的厚度为1.1nm的Co层108;设置在Co层108上的厚度为0.5nm的Ir层109;设置在Ir层109上的厚度为1.5nm的MgO层110;以及设置在MgO层110上的厚度为1.0nm的Ta层111。Pt层105和Pt层107的厚度在样品35中为0.8nm,在样品36中为0.7nm,在样品37中为0.6nm,在样品38中为0.5nm,在样品39中为0.4nm。

[0238] 图22A是表示样品35至样品39的自旋生成效率的Pt层厚度依赖性的图,图22B是表示样品35至样品39的自旋生成效率的层间耦合力 J_{ex} (mJ/m^2) 依赖性的图。图22A的横轴是Pt层145和Pt层147的Total厚度 t_{Pt} (nm),图22B的横轴是层间耦合力 J_{ex} (mJ/m^2),图22A和图22B的纵轴是自旋生成效率 θ_{SH} (%)。在图22A和图22B中,除了Pt层145/Ir层146/Pt层147之外,还示出了作为比较例的(Pt1.0nm/Ir0.8nm)₄的多层膜的情况和厚度为7.2nm的Pt层的情况的结果。在Pt层的厚度从0.8nm增加至大约1.3nm时,自旋生成效率 θ_{SH} (%)增加,在Pt层的厚度从大约1.3nm增加至1.6nm时,自旋生成效率 θ_{SH} (%)减少。也就是说,具有自旋霍尔角、自旋生成效率为最大的Pt层的厚度。

[0239] 在使用Pt层作为夹着层间耦合层的非磁性层的情况下,Pt层的厚度在上述范围内与(Pt1.0nm/Ir0.8nm)₄的多层膜或厚度为7.2nm的Pt层的情况相比自旋生成效率较高。优选Pt层105、107的厚度为0.4nm以上0.8nm以下,进一步优选为大约0.5nm以上大约0.8nm以下,特别优选0.55nm以上0.75nm以下。

[0240] (第5实施方式)

[0241] 作为第5实施方式涉及的磁性层叠膜的导电层50,在第1实施方式至第4实施方式涉及的磁性层叠膜10、40中的第2铁磁层16、45的与反铁磁耦合层10a、40a相反的面具有第3非磁性层61,第3非磁性层61包括采用至少含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的层。第5实施方式涉及的磁阻效应元件5,在第1实施方式至第4实施方式涉及的磁阻效应元件1至4涉及的磁性层叠膜10、40中的第2铁磁层16、45的与反铁磁耦合层10a、40a相反的面即记录层17、28、28A侧设置有第3非磁性层(例如图23B所示的第3非磁性层61)。因此,为了避免重复而省略对第1实施方式至第4实施方式中已说明的事项、各层的材质、厚度等的说明,以下,以适用于图1B所示的形态的情况为代表进行说明。关于适用于第2实施方式至第4实施方式的情况的说明对本领域技术人员而言是不需要的。

[0242] 图23A是第5实施方式涉及的磁阻效应元件的俯视图,图23B是沿着图23A中的E-E线的剖视图。第5实施方式涉及的磁阻效应元件5包括:设置在衬底(未图示)上的基底层51;设置在基底层51上的第1铁磁层52;设置在第1铁磁层52上的第1非磁性层53;设置在第1非磁性层53上的层间耦合层54;设置在层间耦合层54上的第2非磁性层55;以及设置在第2非磁性层55上的第2铁磁层56。即,导电层50如下述的那样构成。第1非磁性层53、第2非磁性层55以与层间耦合层54的对应的下表面、上表面接触的方式夹着层间耦合层54来构成反铁磁耦合层50a,通过使第1铁磁层52与第1非磁性层53的下表面接触,第2铁磁层56与第2非磁性层55的上表面接触,第1铁磁层52和第2铁磁层56夹着第1非磁性层53、层间耦合层54和第2

非磁性层55,在第2铁磁层56上具有第3非磁性层61,第3非磁性层61包括采用至少含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的层。

[0243] 在图示的形态中,第3非磁性层61能够与第2铁磁层56的上表面接触并且与记录层57的下表面接触。与第3非磁性层61接触的第2铁磁层56的磁化相对于导电层50的电流方向倾斜、即具有z方向的分量。第3非磁性层61优选在形成磁阻效应元件5(接合分离)之后具有0.3nm以上2.0nm以下的厚度。这是由于,如果W、Cu、Ta、Mn在接合分离之后未残留在第2铁磁层56上,则观测不到以下所示的无磁场时的磁化反转,并且如果太厚,则记录层57与第2铁磁层56之间的磁相互作用变弱,在第1铁磁层52、第2铁磁层56进行了SOT磁化反转时磁阻效应元件5的记录层57也不会发生磁化反转。

[0244] 此外,如图示的那样,在第3非磁性层61上形成有采用可磁化反转的材料形成的记录层57,而且在记录层57上以接触的方式设置有阻挡层58。在阻挡层58上设置有作为参考层的非磁性层59。通过记录层57、阻挡层58和非磁性层59的层叠,构成使用隧道各向异性磁阻效应的磁阻效应元件5,这一点与第1实施方式是相同的。

[0245] 在第5实施方式中,位于第2铁磁层56的上下的第2非磁性层(采用含有Pt的金属或合金形成的层)55与第3非磁性层(采用含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的层)61不同。例如,作为第2铁磁层56的Co层由第2非磁性层(采用含有Pt的金属或合金形成的层)55和第3非磁性层(采用含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的层)61夹着。于是,即使未施加外部磁场,第1铁磁层52和第2铁磁层56也以具有垂直分量的方式被磁化,通过使电流流过导电层50,能够使第1铁磁层52和第2铁磁层56在外部磁场为零的情况下也发生磁化反转。这被认为是在第2铁磁层56与第2非磁性层55的界面处产生的磁场66、在第2铁磁层56与第3非磁性层61的界面处产生的磁场67的相互作用。由Co/Pt和Co/W、Co/Cu、Co/Ta、Co/Mn中的任一种进行相互作用的磁场为不同标记,因此在第2非磁性层55、第2铁磁层56、第3非磁性层61依序层叠时如标记66、67所示的那样沿着相同的方向施加磁场,第2铁磁层56的自旋相对于X方向倾斜。该磁场被认为是基于DM(Dzyaloshinskii-Moriya)相互作用产生的DM相互作用磁场(H_{DMI}),磁场66、67是 H_{DMI} 。

[0246] 如上所述,第5实施方式是在第1实施方式涉及的磁阻效应元件1中,将第3非磁性层61以与磁性层叠膜10相向的方式设置在记录层17(在图23B中为记录层57)侧,例如设置在第2铁磁层16与记录层17之间(在图23B中为第2铁磁层56与记录层57之间)。

[0247] 第5实施方式是在第2实施方式涉及的磁阻效应元件2中,将第3非磁性层61以与磁性层叠膜10相向的方式设置在记录层28、28A侧,例如设置在图3B或图3C所示的第2铁磁层16与非磁性层27之间或图3D所示的第2铁磁层16与记录层28A之间。

[0248] 第5实施方式是在第3实施方式涉及的磁阻效应元件3中,将第3非磁性层61以与磁性层叠膜40相向的方式设置在记录层17侧,例如设置在图4B所示的第2铁磁层45与记录层17之间。

[0249] 第5实施方式是在第4实施方式涉及的磁阻效应元件4中,将第3非磁性层61以与磁性层叠膜40相向的方式设置在记录层28、28A侧,例如设置在图6B或图6C所示的第2铁磁层45与非磁性层27之间或例如图6D所示的第2铁磁层45与记录层28A之间。

[0250] (第6实施方式)

[0251] 作为第6实施方式涉及的磁性层叠膜的导电层50,在第1实施方式至第4实施方式涉及的磁性层叠膜10、40中的第1铁磁层12、42的与反铁磁耦合层10a、40a相反的面具有第3非磁性层61,第3非磁性层61包括采用至少含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的层。第6实施方式涉及的磁阻效应元件6,在第1实施方式至第4实施方式涉及的磁阻效应元件1至4涉及的磁性层叠膜10、40中的第1铁磁层12、42的与反铁磁耦合层10a、40a相反的面即记录层的相反侧设置有第3非磁性层(例如图24所示的第3非磁性层61)。因此,为了避免重复而省略对第1实施方式至第4实施方式中已说明的事项、各层的材质、厚度等的说明,以下以适用于图1B所示的形态的情况为代表进行说明。关于适用于第2实施方式至第4实施方式的情况的说明对本领域技术人员而言是不需要的。

[0252] 图24是第6实施方式涉及的磁阻效应元件的剖视图。俯视图因与图23A相同而省略。在第6实施方式中,第1非磁性层53、第2非磁性层55也以与层间耦合层54的对应的下表面、上表面接触的方式夹着层间耦合层54来构成反铁磁耦合层50a,导电层50在第1铁磁层52的与反铁磁耦合层50a相反的面即下表面设置有第3非磁性层61。第3非磁性层61是采用含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的层。在图示的形态中,第3非磁性层61能够与基底51的上表面接触并且与第1铁磁层52的下表面接触。此外,第1铁磁层52的磁化和第2铁磁层56的磁化相对于导电层50的电流方向倾斜,即具有z方向的分量。第3非磁性层61在以与第1铁磁层52的下表面接触的方式设置的情况下,厚度没有特别限制,但为了保持反铁磁耦合,第1铁磁层52、第1非磁性层53、第2非磁性层55、第2铁磁层56必须维持fcc(111)取向。在这个意义上,这种情况下最优选使用Cu。第3非磁性层61优选具有0.3nm以上2.0nm以下的厚度。

[0253] 在第6实施方式中,位于第1铁磁层52的上下的第1非磁性层(采用含有Pt的金属或合金形成的层)53与第3非磁性层(采用含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的层)61不同。例如,作为第1铁磁层52的Co层由第1非磁性层(采用含有Pt的金属或合金形成的层)53和第3非磁性层(采用含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的层)61夹着。于是,即使未施加外部磁场,第1铁磁层52和第2铁磁层56也以具有垂直分量的方式被磁化,通过使电流流过导电层50,能够使第1铁磁层52和第2铁磁层56在外部磁场为零的情况下也发生磁化反转。这被认为是在第1铁磁层52与第1非磁性层53的界面处产生的磁场66、在第1铁磁层52与第3非磁性层61的界面处产生的磁场67的相互作用。由Co/Pt和Co/W、Co/Cu、Co/Ta、Co/Mn中的任一种进行相互作用的磁场为不同标记,因此在第3非磁性层61、第1铁磁层52、第1非磁性层53依序层叠时如标记66、67所示的那样沿着相同的方向施加磁场,第2铁磁层56的自旋在X方向上倾斜。该磁场被认为是基于DM(Dzyaloshinskii-Moriya)相互作用而产生的DM相互作用磁场(H_{DM}),磁场66、67是 H_{DM} 。

[0254] 如上所述,第6实施方式是在第1实施方式涉及的磁阻效应元件1中,将第3非磁性层61以与磁性层叠膜10相向的方式设置在与记录层17(在图24中为记录层57)相反的一侧,例如设置在图1B所示的基底51与第1铁磁层12之间(在图24中为第2铁磁层56与记录层57之间)。

[0255] 第6实施方式是在第2实施方式涉及的磁阻效应元件2中,将第3非磁性层61以与磁性层叠膜10相向的方式设置在与记录层17相反的一侧,例如设置在图3B、图3C、图3D所示的基底层11与第1铁磁层12之间。

[0256] 第6实施方式是在第3实施方式涉及的磁阻效应元件3中,将第3非磁性层61以与磁性层叠膜40相向的方式设置在与记录层17相反的一侧,例如设置在图4B所示的基底层41与第1铁磁层42之间。

[0257] 第6实施方式是在第4实施方式涉及的磁阻效应元件4中,将第3非磁性层61以与磁性层叠膜40相向的方式设置在记录层28、28A侧,例如设置在图6B或图6C所示的第2铁磁层45与非磁性层27之间或图6D所示的第2铁磁层45与记录层28A之间。

[0258] (第7实施方式)

[0259] 作为第7实施方式涉及的磁性层叠膜的导电层50,在第1实施方式至第4实施方式涉及的磁性层叠膜10、40中的第1铁磁层12、42的与反铁磁耦合层10a、40a相反的面具有第3非磁性层61,在第2铁磁层16、45的与反铁磁耦合层10a、40a相反的面具有第4非磁性层62,第3非磁性层61和第4非磁性层62包括采用至少含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的层。第7实施方式涉及的磁阻效应元件7,在第1实施方式至第4实施方式涉及的磁阻效应元件1至4的磁性层叠膜10、40中的第1铁磁层12、42的与反铁磁耦合层10a、40a相反的面(与记录层相反的一侧)设置有第3非磁性层(例如图25所示的第3非磁性层61),在第2铁磁层16、45的与反铁磁耦合层10a、40a相反的面设置有第4非磁性层(例如图25所示的第4非磁性层62)。因此,为了避免重复而省略对第1实施方式至第4实施方式中已说明的事项、各层的材质、厚度等的说明,以下以适用于图1B所示的形态的情况为代表进行说明。关于适用于第2实施方式至第4实施方式的情况的说明对本领域技术人员而言是不需要的。

[0260] 图25是第7实施方式涉及的磁阻效应元件的剖视图。俯视图因与图23A相同而省略。在第7实施方式中,导电层50的反铁磁耦合层50a包括第1非磁性层53、层间耦合层54和第2非磁性层55,在第1铁磁层52的与反铁磁耦合层50a相反的面即下表面具有第3非磁性层(采用含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的层)61,并且在第2铁磁层56的与反铁磁耦合层50a相反的面即上表面具有第4非磁性层(采用含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的层)62。此外,第1铁磁层52的磁化和第2铁磁层56的磁化相对于导电层50的电流方向倾斜、即具有z方向的分量。第4非磁性层(采用含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的层)62优选在形成磁阻效应元件7(接合分离)之后具有0.3nm以上2.0nm以下的厚度。这是由于,如果W、Cu、Ta、Mn在接合分离之后未残留在第2铁磁层56上,则观测不到以下所示的无磁场时的磁化反转,并且如果太厚,则记录层57与第2铁磁层56之间的磁相互作用变弱,在第1铁磁层52、第2铁磁层56进行了SOT磁化反转时磁阻效应元件7的记录层57也不会发生磁化反转。第3非磁性层(采用含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的层)61的厚度没有特别限制,但为了保持反铁磁耦合,第1铁磁层52、第1非磁性层53、第2非磁性层55、第2铁磁层56必须维持fcc(111)取向。在这个意义上,这种情况下最优选使用Cu。此外,第3非磁性层61和第4非磁性层62采用不同的材质形

成。第3非磁性层61优选具有0.3nm以上2.0nm以下的厚度。

[0261] 在第7实施方式中,位于第1铁磁层52的上下第1非磁性层(采用含有Pt的金属或合金形成的层)53与第3非磁性层(采用含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的层)61不同。位于第2铁磁层56的上下第2非磁性层(采用含有Pt的金属或合金形成的层)55与第4非磁性层(采用含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的层)62不同。因此,如第5实施方式和第6实施方式中说明的那样,即使未施加外部磁场,第1铁磁层52和第2铁磁层56也以具有垂直分量的方式被磁化,通过使电流流过导电层50,能够使第1铁磁层52和第2铁磁层56在外部磁场为零的情况下也发生磁化反转。

[0262] 第7实施方式是在第2实施方式涉及的磁阻效应元件2中,将第3非磁性层61以与磁性层叠膜10相向的方式设置在与记录层17相反的一侧,例如设置在图3B、图3C、图3D所示的基底层11与第1铁磁层12之间,并且将第4非磁性层62以与磁性层叠膜10相向的方式设置在记录层28、28A侧,例如设置在图3B或图3C所示的第2铁磁层16与非磁性层27之间或图3D所示的第2铁磁层16与记录层28A之间。

[0263] 第7实施方式是在第3实施方式涉及的磁阻效应元件3中,将第3非磁性层61以与磁性层叠膜40相向的方式设置在与记录层17相反的一侧,例如设置在图4B所示的基底层41与第1铁磁层42之间,并且将第4非磁性层62以与磁性层叠膜40相向的方式设置在记录层28、28A侧,例如设置在图4B所示的第2铁磁层45与记录层17之间。

[0264] 第7实施方式是在第4实施方式涉及的磁阻效应元件4中,将第3非磁性层61以与磁性层叠膜40相向的方式设置在与记录层28相反的一侧,例如设置在图6B所示的基底层41与第1铁磁层42之间,并且将第4非磁性层62以与磁性层叠膜40相向的方式设置在记录层28、28A侧,例如设置在图6B或图6C所示的第2铁磁层45与非磁性层27之间或图6D所示的第2铁磁层45与记录层28A之间。

[0265] 在第5实施方式至第7实施方式中,是在第1实施方式至第4实施方式的磁阻效应元件1中,在第1铁磁层12、42与磁性层叠膜10、40之间、以及第2铁磁层16、45与磁性层叠膜10、40之间的任一方或双方,插设有采用含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的第3非磁性层61、第4非磁性层62。包含第3非磁性层61、第4非磁性层62在内也能够称为磁性层叠膜。

[0266] 作为实证例10,与图18和图26同样地制作霍尔棒,构建测量系统。图26是实证例10的剖视图。在实证例10中,如图26所示,包括:设置有热氧化膜的Si衬底141;设置在热氧化膜上的厚度为2.0nm的Ta层142;设置在Ta层142上的厚度为2.0nm的Ir层143;设置在Ir层143上的厚度为1.1nm的Co层144;设置在Co层144上的厚度为0.6nm的Pt层145;设置在Pt层145上的厚度为0.5nm的Ir层146;设置在Ir层146上的厚度为0.6nm的Pt层147;设置在Pt层147上的厚度为1.1nm的Co层148;设置在Co层148上的厚度为1.5nm的W层149;设置在W层149上的厚度为1.5nm的MgO层150;以及设置在MgO层151上的厚度为1.0nm的Ta层151。图27是实证例10中制作的霍尔棒的电子显微镜图像,右侧是像中央的放大像。

[0267] 在实证例10中,使脉冲电流I沿着y方向流动,对霍尔电压V进行测量。对霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流I依赖性进行测量。此外, R_{xy} (Ω) = V/I。图28A至图28F是表示实证例10中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流依赖性的图。横轴是脉冲电流I (A),纵轴是霍尔电阻 R_{xy}

(Ω)。图28A示出在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且将一定的外部磁场Hex分别以49mT、39mT沿着脉冲电流I的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果,图28B示出在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且将一定的外部磁场Hex分别以28.5mT、18mT沿着脉冲电流I的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果,图28C示出在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且将一定的外部磁场Hex分别以8mT、0mT沿着脉冲电流I的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果,图28D示出在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且将一定的外部磁场Hex分别以-6.5mT、-16.5mT沿着脉冲电流I的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果,图28E示出在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且将一定的外部磁场Hex分别以-27mT、-37mT沿着脉冲电流I的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果,图28F示出在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且将一定的外部磁场Hex分别以-48mT、-58mT沿着脉冲电流I的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果。

[0268] 在以49mT、39mT、28.5mT、18mT、8mT、0mT、-6.5mT、-16.5mT、-27mT施加外部磁场的情况下,观测到如果沿着+方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 增加,而如果沿着-方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 减少,可知Co层124、128的磁矩因脉冲电流而发生磁化反转。特别要注意的是,即使未施加外部磁场,Co层144、148的磁矩也会因脉冲电流而发生磁化反转。

[0269] 在以-37mT、-48mT、-58mT施加外部磁场的情况下,观测到如果沿着+方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 减少,而如果沿着-方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 增加,可知Co层144、148的磁矩因脉冲电流而发生磁化反转。

[0270] 另外,由此可知产生-27mT ~ -37mT的DM相互作用磁场(H_{DMI})。

[0271] 图29是表示在实证例10中在无磁场的情况下沿着 \pm 方向交替施加脉冲电流时的霍尔电阻 R_{xy} (Ohm)的反复次数依赖性的图。从图29可知即使反复沿着 \pm 方向施加脉冲电流,也会产生稳定的磁化反转。

[0272] 作为实证例11,与图18和图26同样地制作霍尔棒,构建测量系统。在实证例11中,如图26所示,包括:设置有热氧化膜的Si衬底141;设置在热氧化膜上的厚度为2.0nm的Ta层142;设置在Ta层142上的厚度为2.0nm的Ir层143;设置在Ir层143上的厚度为1.1nm的Co层144;设置在Co层144上的厚度为0.6nm的Pt层145;设置在Pt层145上的厚度为0.5nm的Ir层146;设置在Ir层146上的厚度为0.6nm的Pt层147;设置在Pt层147上的厚度为1.1nm的Co层148;设置在Co层148上的厚度为1.0nm的Cu层149;设置在Cu层149上的厚度为1.5nm的MgO层150;以及设置在MgO层150上的厚度为1.0nm的Ta层151。

[0273] 在实证例11中,使脉冲电流I沿着y方向流动,对霍尔电压V进行测量。对霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流I依赖性进行测量。此外, R_{xy} (Ω) = V/I。图30是表示关于实证例11中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流依赖性,在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且未施加一定的外部磁场Hex时的结果的图。横轴是脉冲电流I (mA),纵轴是霍尔电阻 R_{xy} (Ω)。

[0274] 即使未施加外部磁场,也会观测到如果沿着+方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 减少,而如果沿着-方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 增加,可知Co层144、148的磁矩因脉冲电流而发生磁化反转。

[0275] 图31是表示在实证例11中在无磁场的情况下沿着 \pm 方向交替施加脉冲电流时的

霍尔电阻 R_{xy} (Ohm)的反复次数依赖性的图。从图31可知,即使反复沿着±方向施加脉冲电流,也会产生稳定的磁化反转。

[0276] 作为实证例12,与图18同样地制作霍尔棒,构建测量系统。在实证例12中,如图32所示,包括:设置有热氧化膜的Si衬底161;设置在热氧化膜上的厚度为2.0nm的Ta层162;设置在Ta层162上的厚度为2.0nm的Ir层163;设置在Ir层163上的厚度为1.0nm的Cu层164;设置在Cu层164上的厚度为1.1nm的Co层165;设置在Co层165上的厚度为0.6nm的Pt层166;设置在Pt层166上的厚度为0.55nm的Ir层167;设置在Ir层167上的厚度为0.6nm的Pt层168;设置在Pt层168上的厚度为1.1nm的Co层169;设置在Co层169上的厚度为1.0nm的W层170;设置在W层170上的厚度为1.5nm的MgO层171;以及设置在MgO层171上的厚度为1.0nm的Ta层172。

[0277] 在实证例12中,使脉冲电流I沿着y方向流动,对霍尔电压V进行测量。对霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流I依赖性进行测量。此外, R_{xy} (Ω) = V/I。图33是表示实证例12中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流依赖性的图。横轴是脉冲电流I (A),纵轴是霍尔电阻 R_{xy} (Ω)。在测量过程中,将脉冲电流I施加200 μ 秒,而未施加一定的外部磁场Hex。从图32观测到如果沿着+方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 增加,而如果沿着-方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 减少,由此可知Co层165、169的磁矩因脉冲电流而发生磁化反转。

[0278] 作为实证例13,与图18和图26同样地制作霍尔棒,构建测量系统。在实证例13中,如图26所示,包括:设置有热氧化膜的Si衬底141;设置在热氧化膜上的厚度为2.0nm的Ta层142;设置在Ta层142上的厚度为2.0nm的Ir层143;设置在Ir层143上的厚度为1.1nm的Co层144;设置在Co层144上的厚度为0.6nm的Pt层145;设置在Pt层145上的厚度为0.55nm的Ir层146;设置在Ir层146上的厚度为0.6nm的Pt层147;设置在Pt层147上的厚度为1.1nm的Co层148;设置在Co层148上的厚度为0.7nm的W层149;设置在W层149上的厚度为1.5nm的MgO层150;以及设置在MgO层150上的厚度为1.0nm的Ta层151。

[0279] 在实证例13中,使脉冲电流I沿着y方向流动,对霍尔电压V进行测量。对霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流I依赖性进行测量。此外, R_{xy} (Ω) = V/I。图34是表示实证例13中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流依赖性的图。横轴是脉冲电流I (A),纵轴是霍尔电阻 R_{xy} (Ω)。在测量过程中,将脉冲电流I施加200 μ 秒,而未施加一定的外部磁场Hex。从图34观测到,如果沿着+方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 增加,而如果沿着-方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 减少,由此可知Co层144、148的磁矩因脉冲电流而发生磁化反转。

[0280] 作为实证例14,与图18和图26同样地制作霍尔棒,构建测量系统。在实证例14中,形成与实证例13相同的结构,使W层149的厚度为0.3nm。在实证例14中,使脉冲电流I沿着y方向流动,对霍尔电压V进行测量。对霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流I依赖性进行测量。此外, R_{xy} (Ω) = V/I。图35是表示实证例14中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流依赖性的图。横轴是脉冲电流I (A),纵轴是霍尔电阻 R_{xy} (Ω)。在测量过程中,将脉冲电流I施加200 μ 秒,而未施加一定的外部磁场Hex。从图35观测到,如果沿着+方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 增加,而如果沿着-方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 减少,由此可知Co层144、148的磁矩因脉冲电流而发生磁化反转。

[0281] 作为实证例15,与图18和图26同样地制作霍尔棒,构建测量系统。在实证例15中,

在图26所示的结构中,实证例13中形成厚度为0.7nm的W层149,实证例15中形成厚度为1.0nm的Ta层149,除此以外其余是相同的。在实证例15中,使脉冲电流I沿着y方向流动,对霍尔电压V进行测量。对霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流I依赖性进行测量。此外, R_{xy} (Ω) = V/I。图36是表示实证例15中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流依赖性的图。横轴是脉冲电流I (A),纵轴是霍尔电阻 R_{xy} (Ω)。在测量过程中,将脉冲电流I施加200 μ 秒,而未施加一定的外部磁场Hex。从图36观测到,如果沿着+方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 减少,而如果沿着-方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 增加,由此可知Co层144、148的磁矩因脉冲电流而发生磁化反转。

[0282] 作为实证例16,与图18和图26同样地制作霍尔棒,构建测量系统。在实证例16中,在图26所示的结构中,实证例13中形成厚度为0.7nm的W层129,实证例16中形成厚度为2.0nm的 $Ir_{22}Mn_{78}$ 层129,除此以外其余是相同的。在实证例16中,使脉冲电流I沿着y方向流动,对霍尔电压V进行测量。对霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流I依赖性进行测量。此外, R_{xy} (Ω) = V/I。图37是表示实证例16中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流依赖性的图。横轴是脉冲电流I (A),纵轴是霍尔电阻 R_{xy} (Ω)。在测量过程中,将脉冲电流I施加200 μ 秒,而未施加一定的外部磁场Hex。从图37观测到,如果沿着+方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 增加,而如果沿着-方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 减少,由此可知Co层144、148的磁矩因脉冲电流而发生磁化反转。

[0283] 图38是表示在实证例16中在无磁场的情况下沿着 \pm 方向交替施加脉冲电流时的霍尔电阻 R_{xy} (Ohm)的反复次数依赖性的图。从图38可知,与图31同样地即使反复沿着 \pm 方向施加脉冲电流,也会产生稳定的磁化反转。

[0284] 作为比较例3,与图18和图26同样地制作霍尔棒,构建测量系统。在比较例3中,在图26所示的结构中,形成厚度为1.0nm的Mo层149,Ir层126的厚度为0.5nm,除此以外其余是相同的。在比较例3中,使脉冲电流I沿着y方向流动,对霍尔电压V进行测量。对霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流I依赖性进行测量。此外, R_{xy} (Ω) = V/I。图39是表示比较例3中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流依赖性的图。横轴是脉冲电流I (A),纵轴是霍尔电阻 R_{xy} (Ω)。在测量过程中,将脉冲电流I施加200 μ 秒,而未施加一定的外部磁场Hex。从图39无法观察到Co层144、148的磁矩因脉冲电流而发生磁化反转。可以明确,在Pt/Co/Mo的界面处,未与Pt/Co/Ir的界面同样地产生有效的DM(Dzyaloshinskii-Moriya)相互作用磁场(H_{DM})。

[0285] 作为比较例4,与图18同样地制作霍尔棒,构建测量系统。图40是比较例4的剖视图。在比较例4中,包括:设置有热氧化膜的Si衬底181;设置在热氧化膜上的厚度为3nm的Ta层182;设置在Ta层182上的厚度为1.0nm的Pt层和厚度为0.8nm的Ir层的层叠结构183(总膜厚7.2nm);设置在层叠结构183上的厚度为1.3nm的Co层184;设置在Co层184上的厚度为1.5nm的W层185;设置在W层185上的厚度为1.5nm的MgO层186;以及设置在MgO层186上的厚度为1.0nm的Ta层187。

[0286] 在比较例4中,使脉冲电流I沿着y方向流动,对霍尔电压V进行测量。对霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流I依赖性进行测量。此外, R_{xy} (Ω) = V/I。图41A至图41C是表示比较例4中的霍尔电阻 R_{xy} (Ω)的脉冲电流依赖性的图。横轴是脉冲电流I (A),纵轴是霍尔电阻 R_{xy} (Ω)。图41A示出在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且将一定的外部磁场Hex以29mT沿着脉冲电流I的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果,图41B示出在测量过程中将脉冲电

流I施加200 μ 秒而未施加一定的外部磁场Hex时的结果,图41C示出在测量过程中将脉冲电流I施加200 μ 秒且将一定的外部磁场Hex以-27mT沿着脉冲电流I的方向(图18的 $\varphi=0$ 度方向)施加时的结果。

[0287] 在将外部磁场以29mT施加的情况下,观测到如果沿着+方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 减少,而如果沿着-方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 增加,由此可知Co层184的磁矩因脉冲电流而发生磁化反转。

[0288] 在将外部磁场以-27mT施加的情况下,观测到如果沿着+方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 增加,而如果沿着-方向施加脉冲电流则在一定电流值时霍尔电阻 R_{xy} 减少,由此可知Co层184的磁矩因脉冲电流而发生磁化反转。

[0289] 但是,在未施加外部磁场的情况下,Co层184的磁矩没有观测到脉冲电流的磁化反转。这被认为是由于在Co为单层膜的情况下与图23B~图25所示的构造的情况不同,在单层膜的情况下有效的DM相互作用磁场(H_{DM})的大小是不足够的。

[0290] 从以上的实证例和比较例可知:图23B中在第2铁磁层56的与反铁磁耦合层50a相反的面设置有采用至少含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的第3非磁性层61、图24中在第1铁磁层52的与反铁磁耦合层50a相反的面设置有采用至少含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的第3非磁性层61、或者图25中在第1铁磁层52的与反铁磁耦合层50a相反的面设置有采用至少含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的第3非磁性层61并且在第2铁磁层56的与反铁磁耦合层50a相反的面设置有采用至少含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金(W合金、Cu合金、Ta合金、Mn合金、MnIr合金、TaW合金)形成的第4非磁性层62,由此通过施加脉冲电流,即使未施加外部磁场,也能够使第1铁磁层52和第2铁磁层56发生磁化反转。

[0291] 在第2铁磁层56与第1铁磁层52相比更靠记录层侧设置的情况下,第3非磁性层61设置在第1铁磁层52的与记录层相反的一侧或第2铁磁层56的记录层侧即可,或者第3非磁性层61设置在第1铁磁层52的与记录层相反的一侧并且第4非磁性层62设置在第2铁磁层56的记录层侧即可。

[0292] 此时,优选第1铁磁层52和第2铁磁层56中的与第3非磁性层或第4非磁性层接触的铁磁层具有在导电层50的施加电流的方向上倾斜的磁化。这是由于,即使未施加外部磁场,也能够使第1铁磁层52和第2铁磁层56发生磁化反转。

[0293] 此外,如图24或图25所示的第1铁磁层(例如Co层)52与第3非磁性层(含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金的层)61之间、如图23B所示的第2铁磁层(例如Co层)56与第3非磁性层(含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金的层)61之间、如图25所示的第2铁磁层(例如Co层)56与第4非磁性层(含有W、Cu、Ta、Mn中的任一种的金属或合金的层)62之间,也可以分别存在相互扩散层。相互扩散层的厚度是0.2nm至0.35nm。

[0294] 以往,因反铁磁体无法用磁场进行控制而通常被认为不适于应用,但本发明是着眼于近年来能够用SOT控制反铁磁体的自旋这一情况完成的。另外,在本发明的实施方式中,不需要CuMnAs类那样的晶体,不需要如Pt/NiO/Pt那样使电流分别流过上下的Pt层并从上下向NiO层进行基于自旋霍尔效应的自旋注入,由此能够采用如下的三端子构造:能够使写入电流流过以远离的方式设置于磁性层叠膜的第1端子和第2端子,并且在磁性层叠膜上

设置于第1端子与第2端子之间的记录层/阻挡层/固定层上设置第3端子,使读取电流流过第3端子。

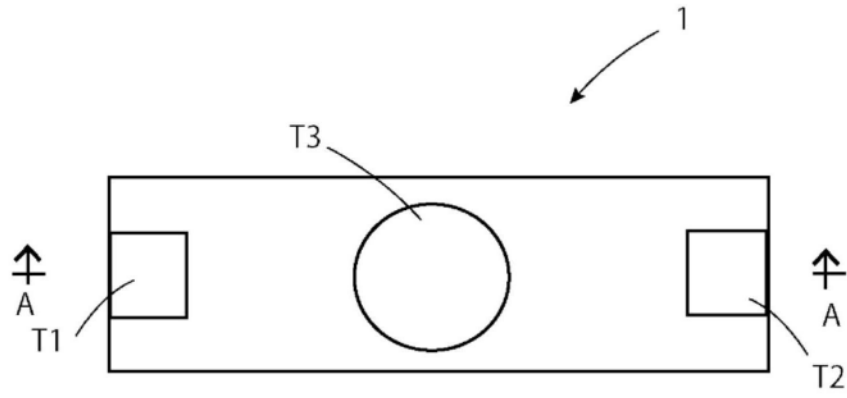


图1A

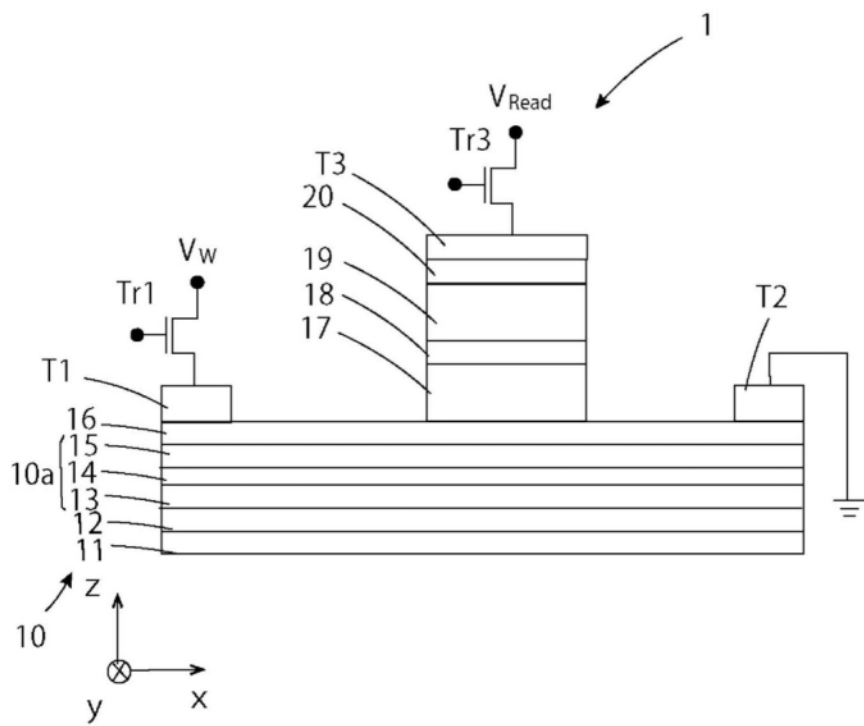


图1B

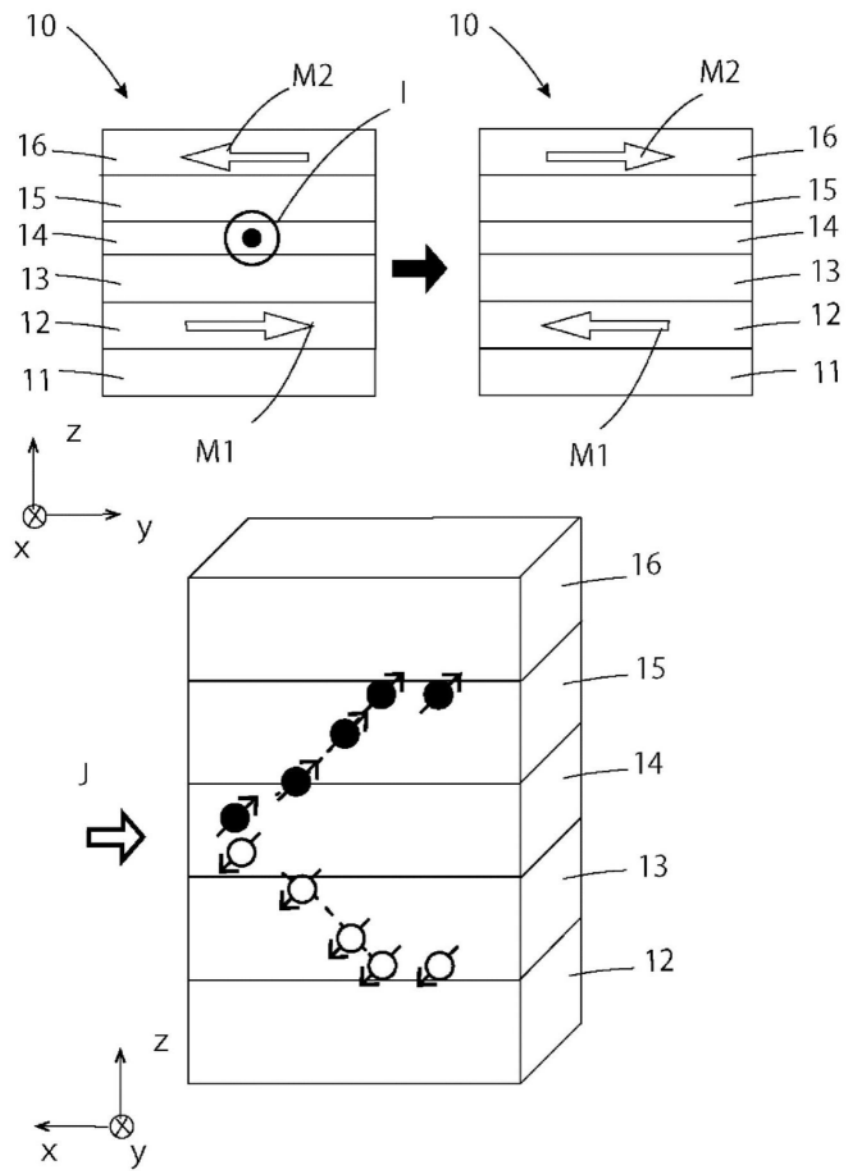


图2A

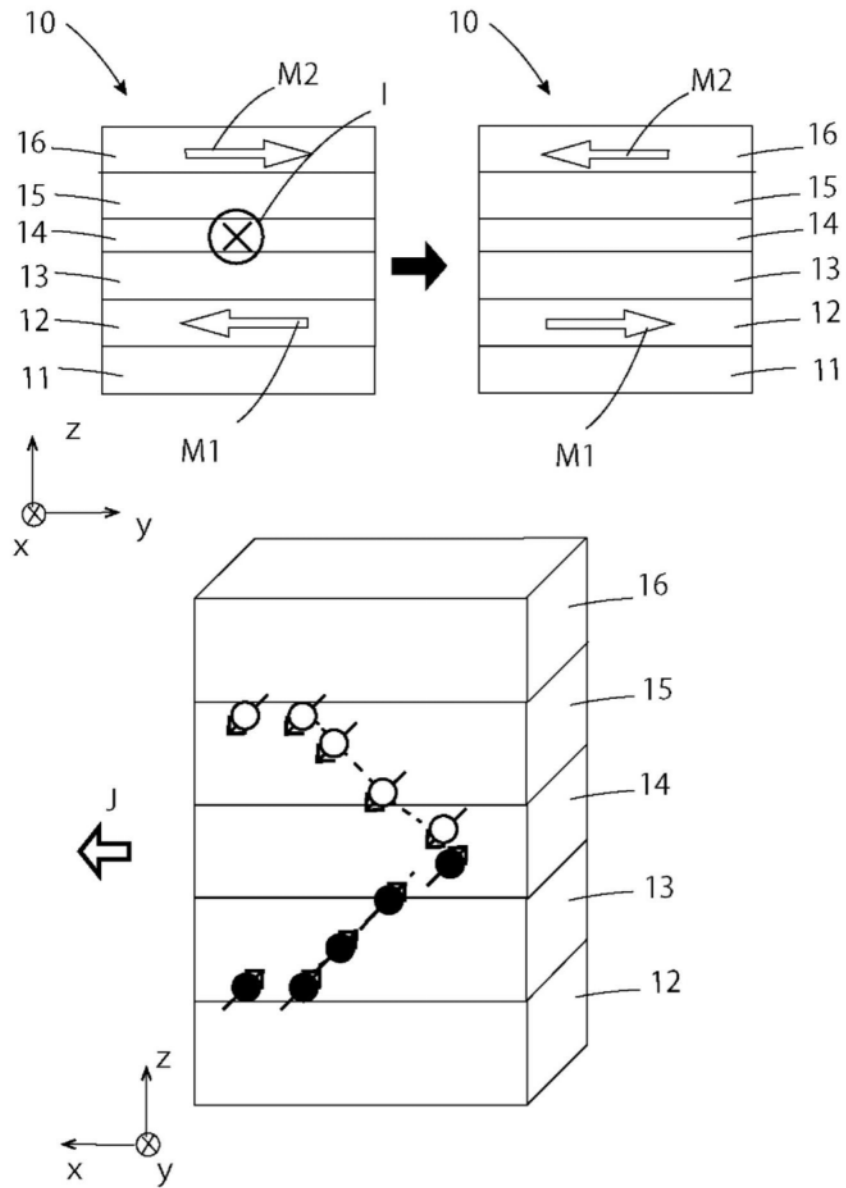


图2B

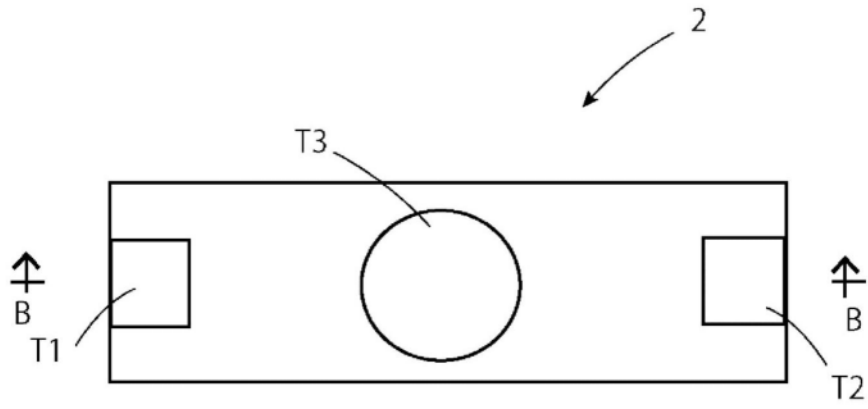


图3A

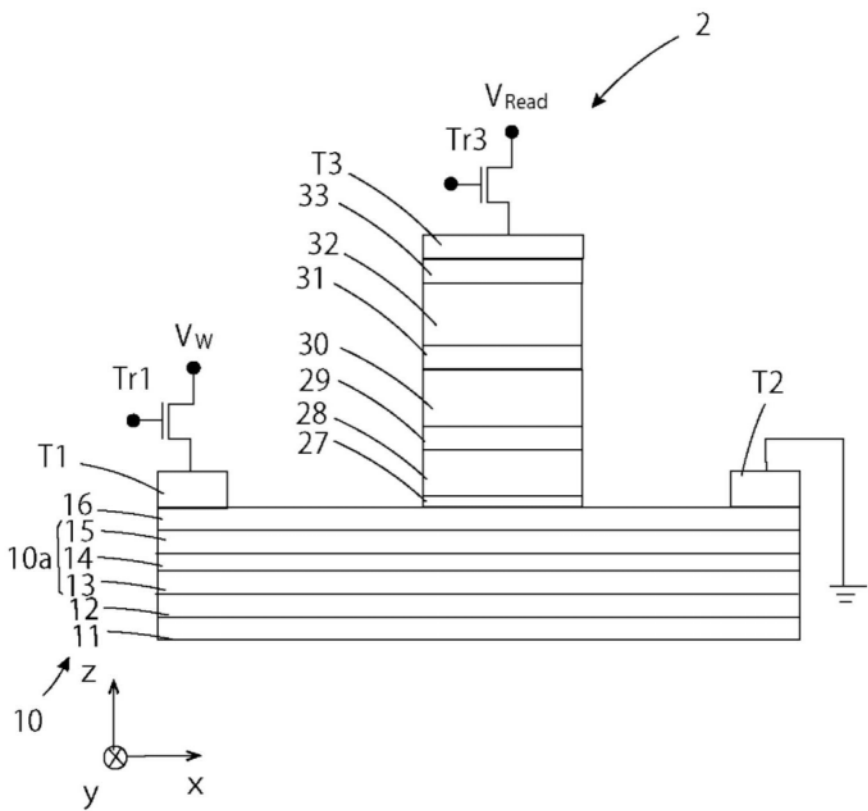


图3B

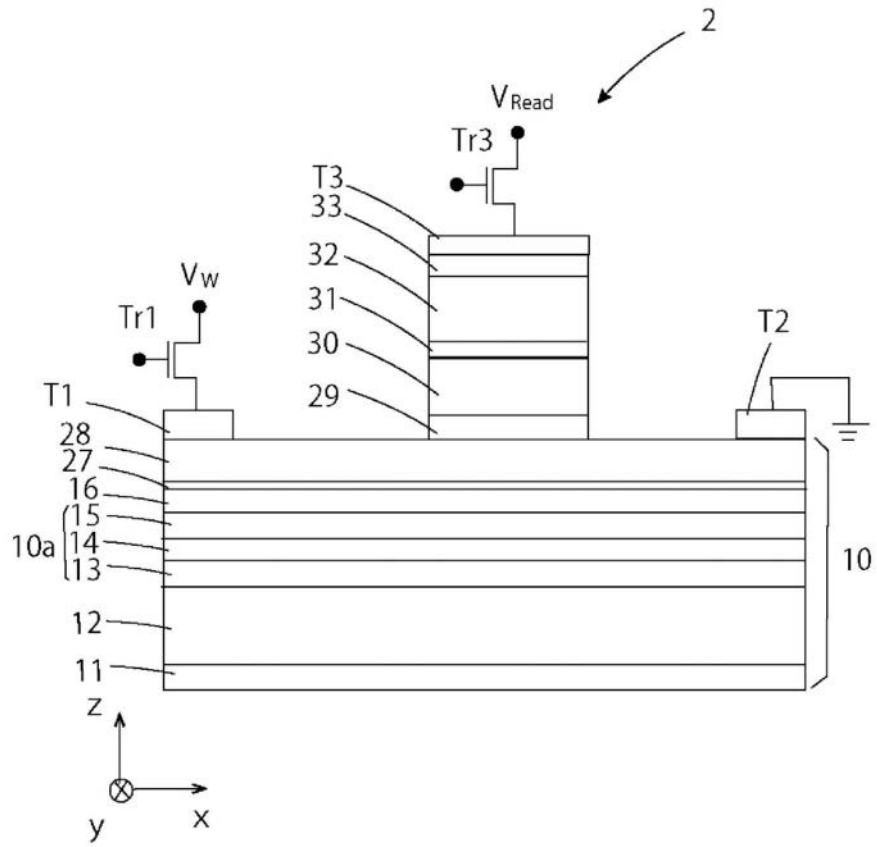


图3C

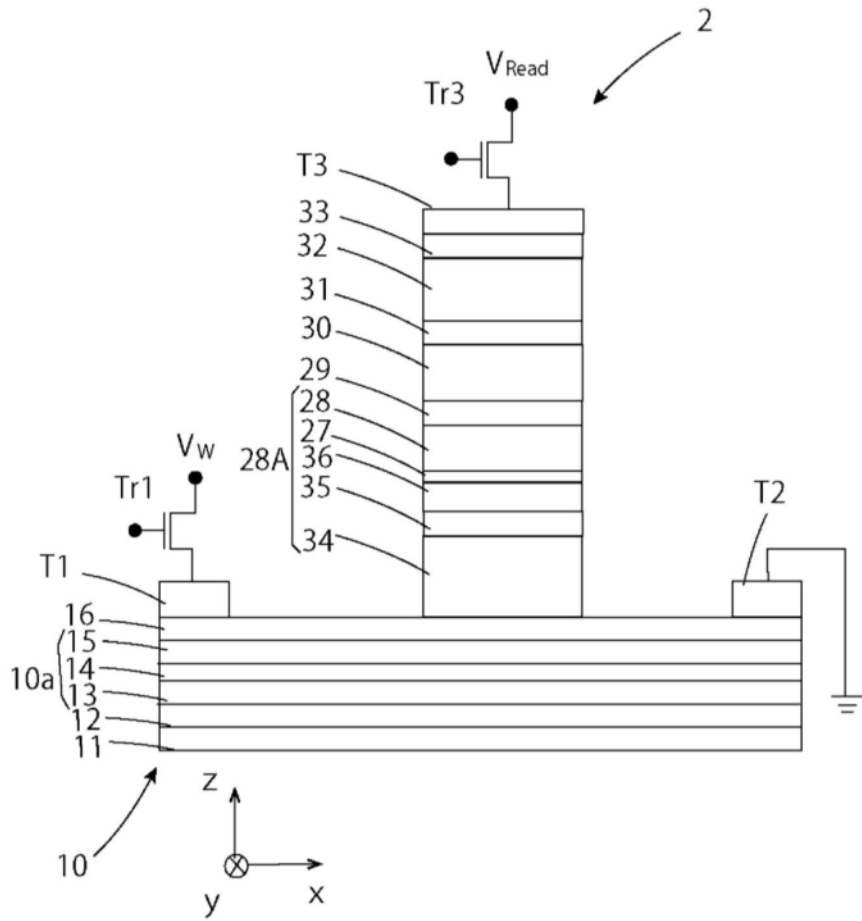


图3D

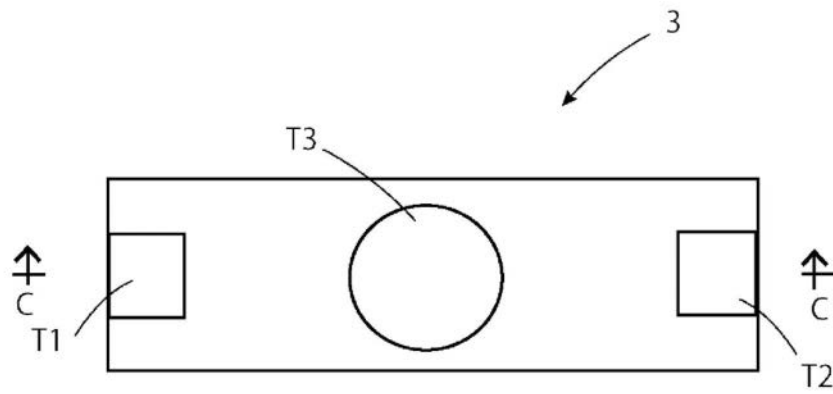


图4A

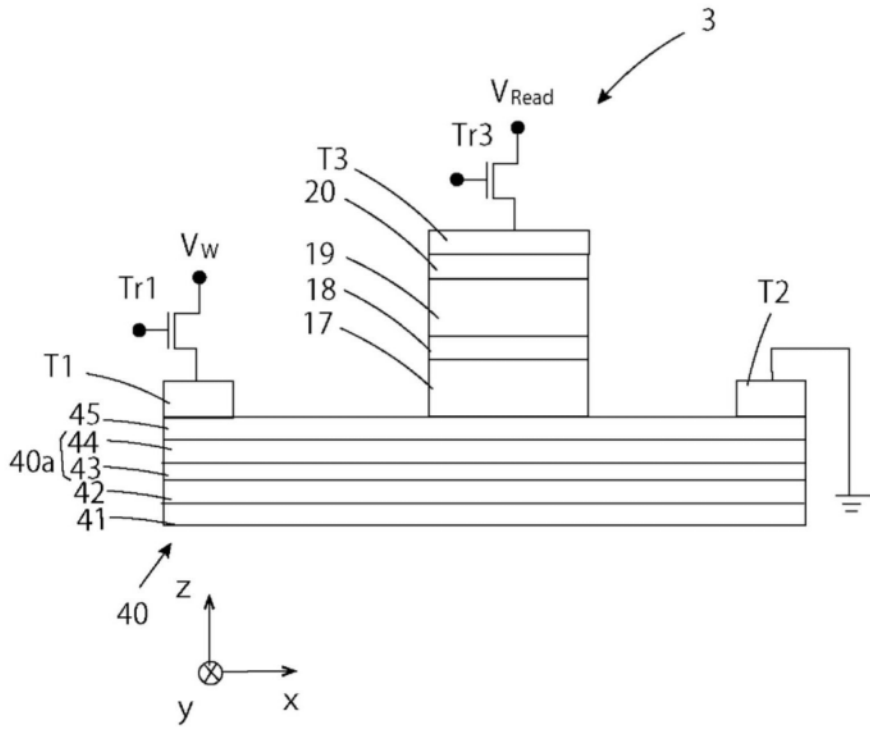


图4B

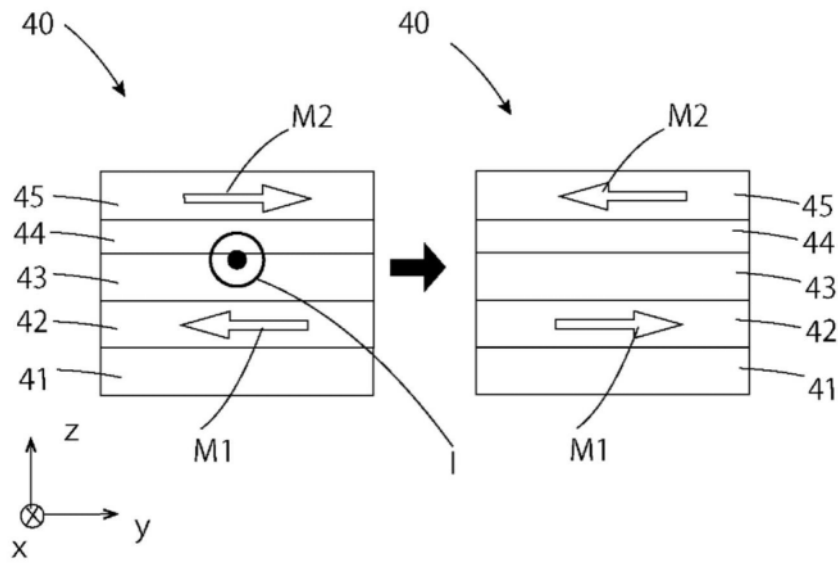


图5A

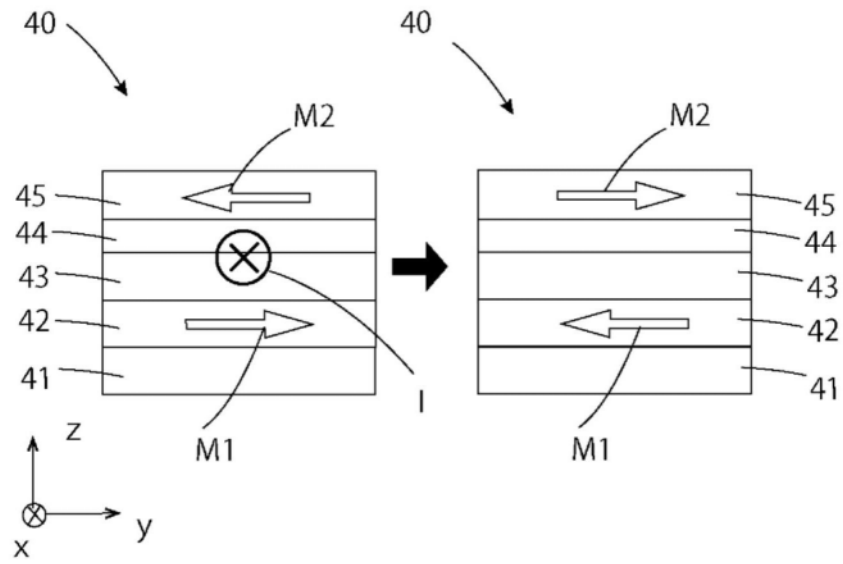


图5B

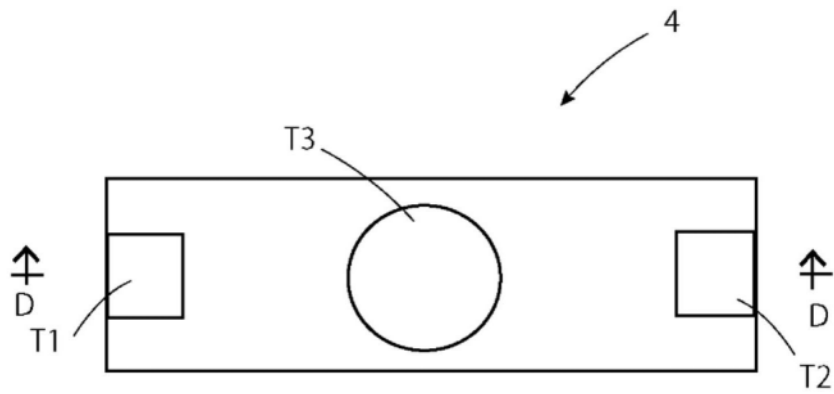


图6A

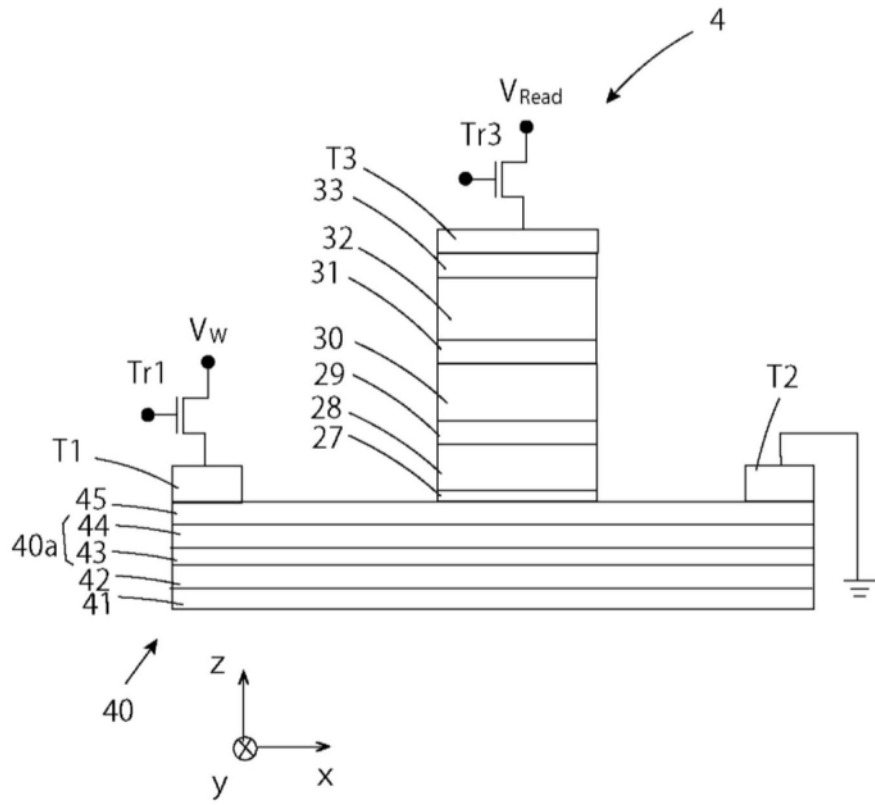


图6B

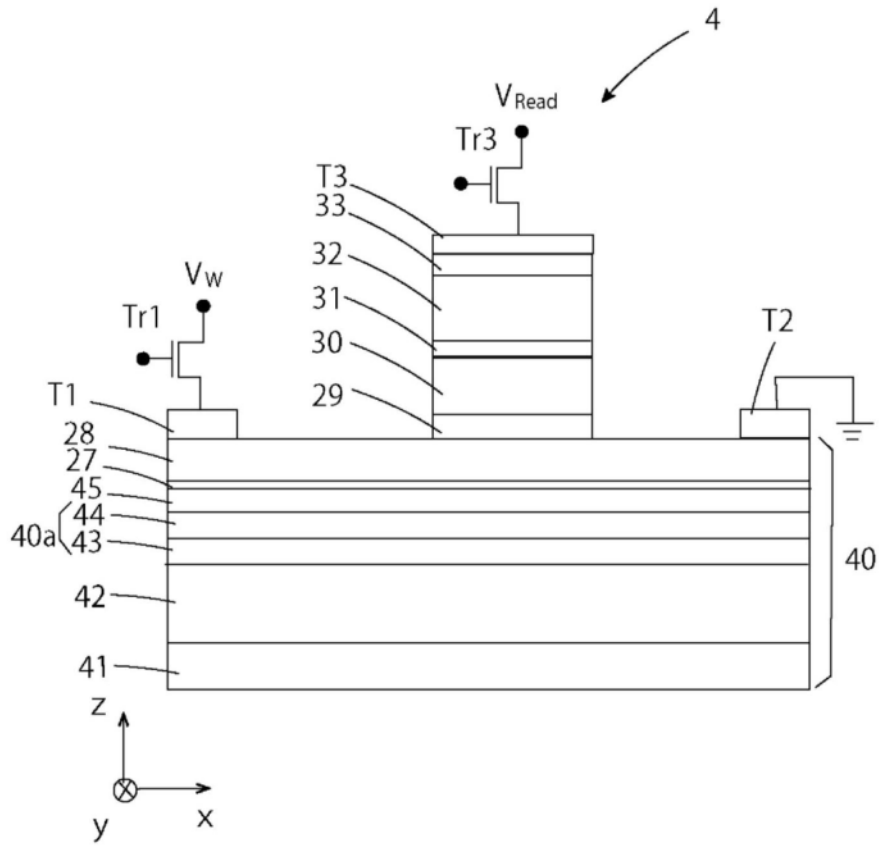


图6C

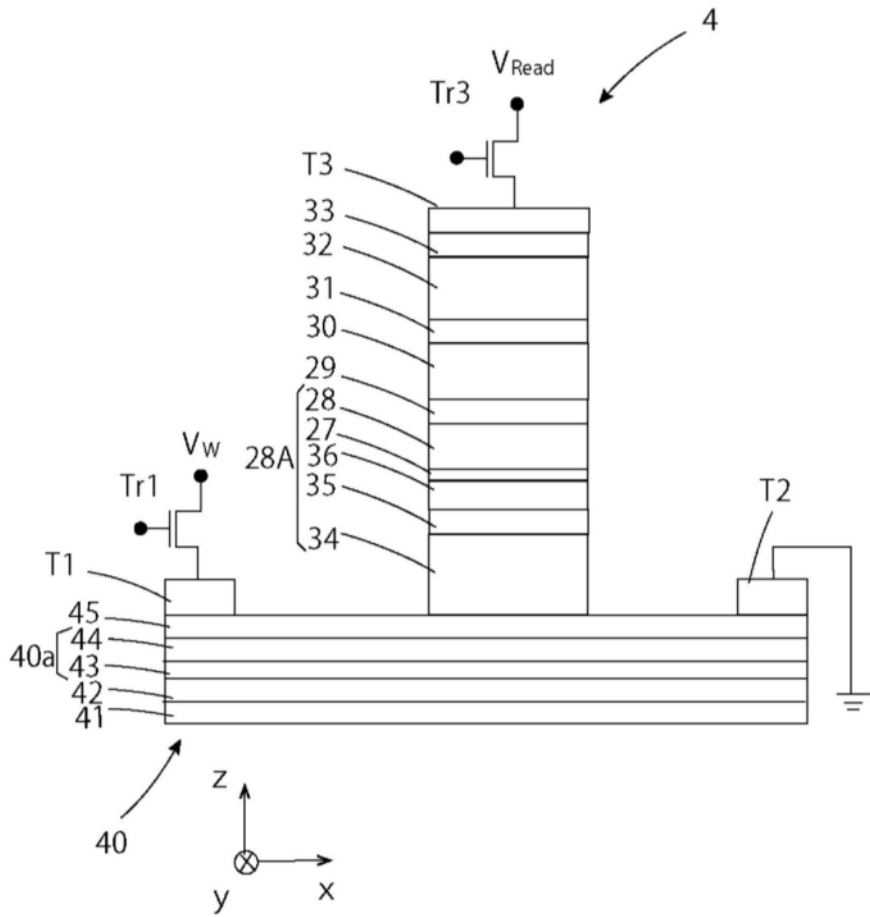


图6D

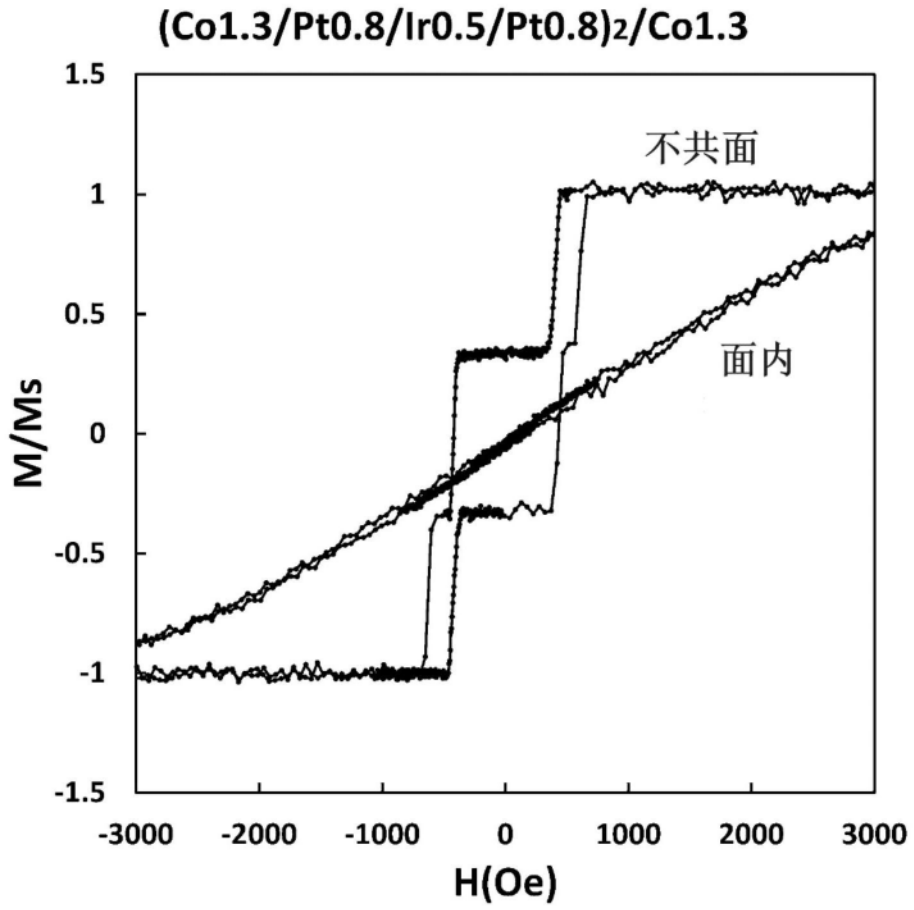


图7

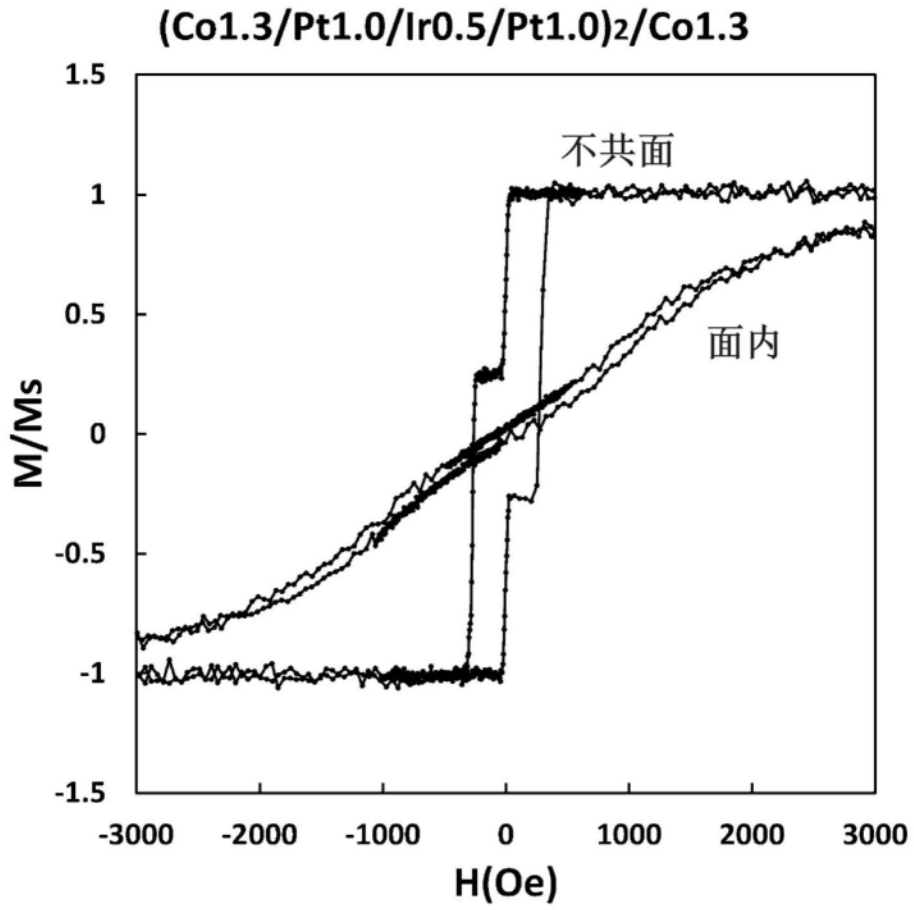


图8

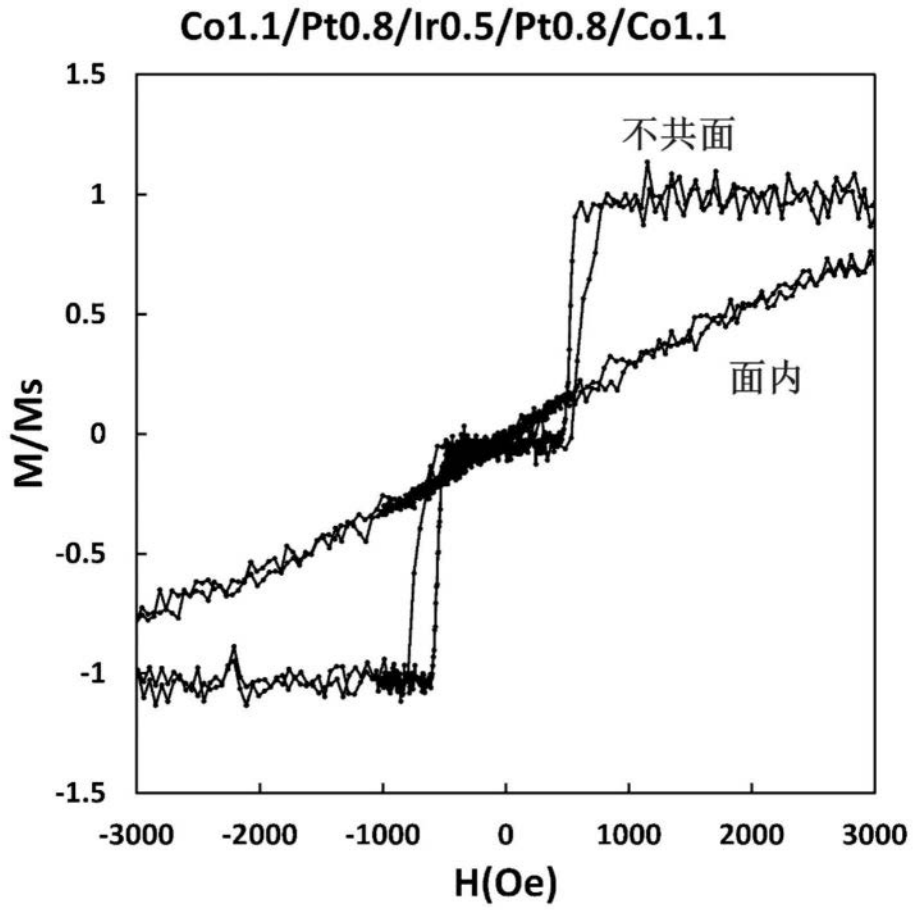


图9

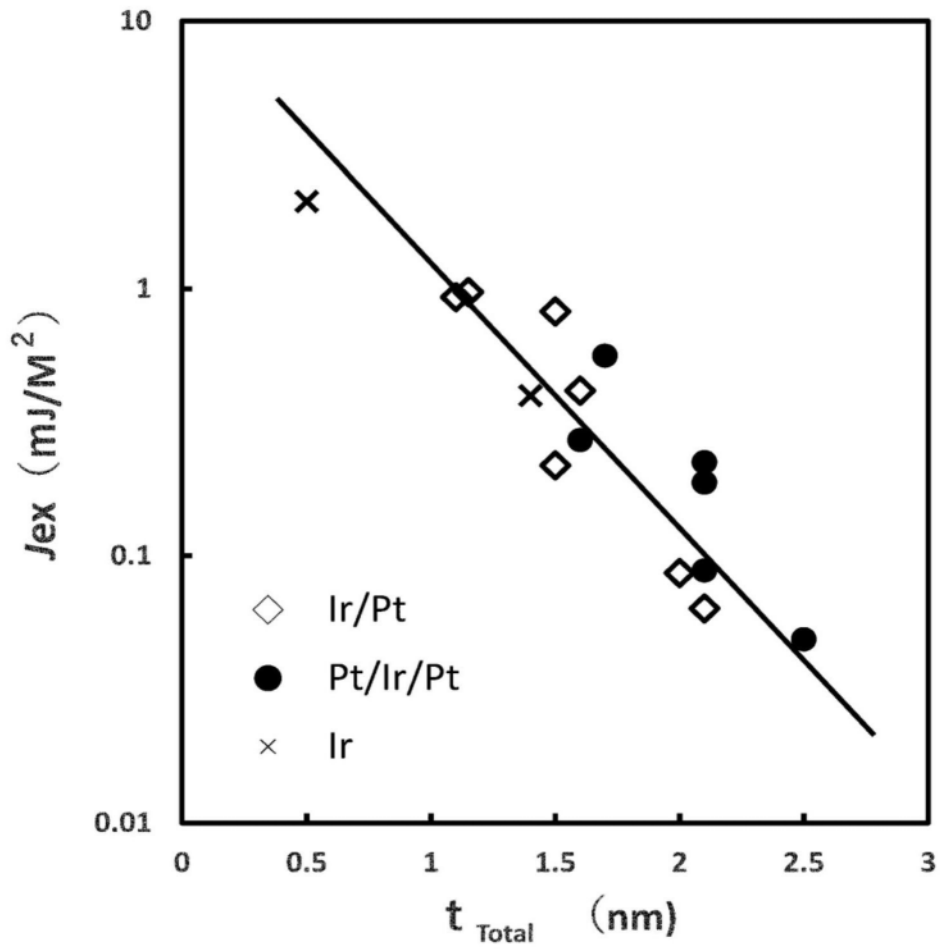


图10

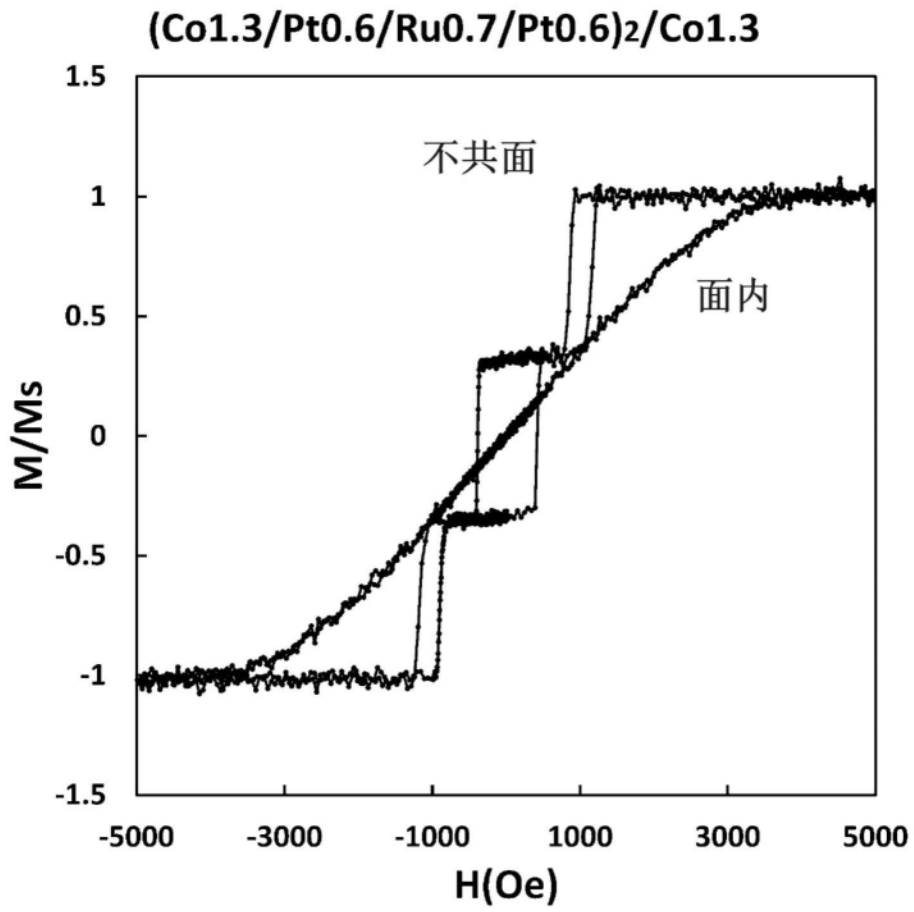


图11

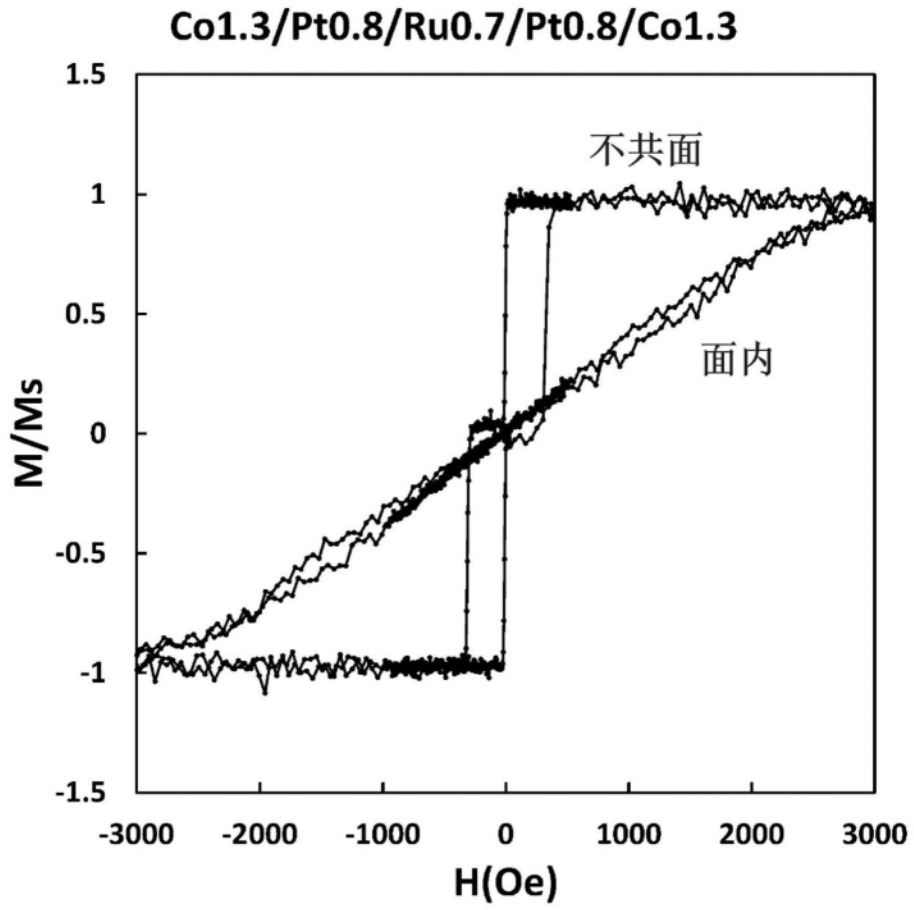


图12

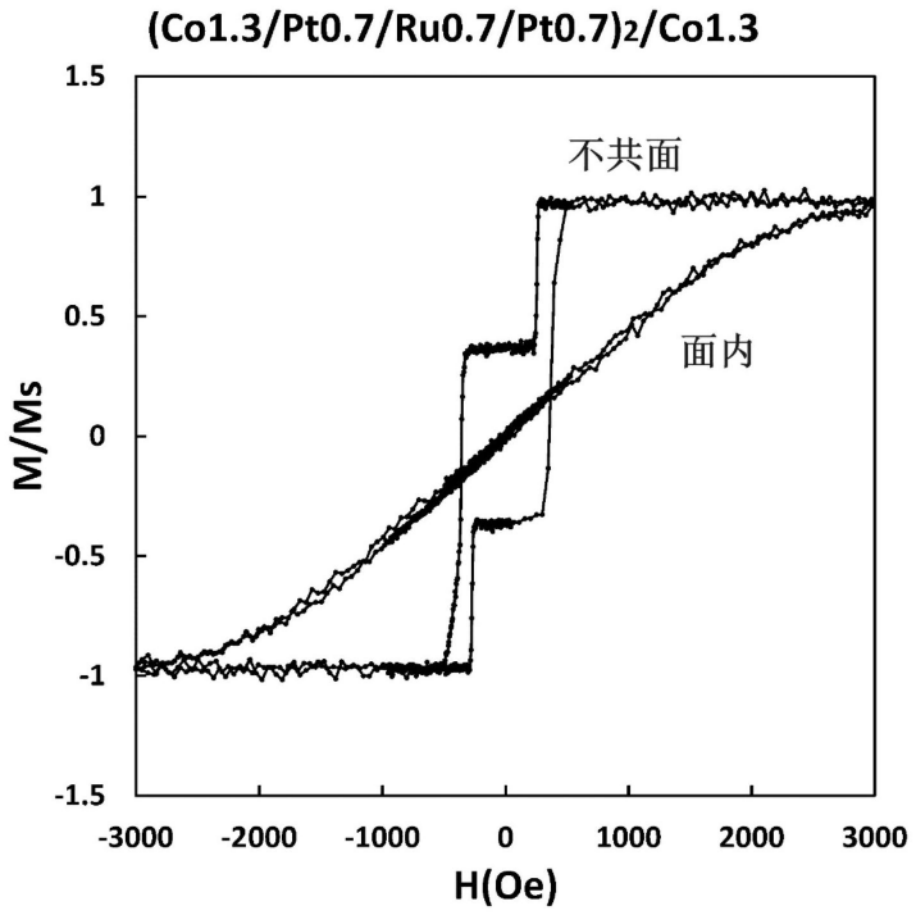


图13

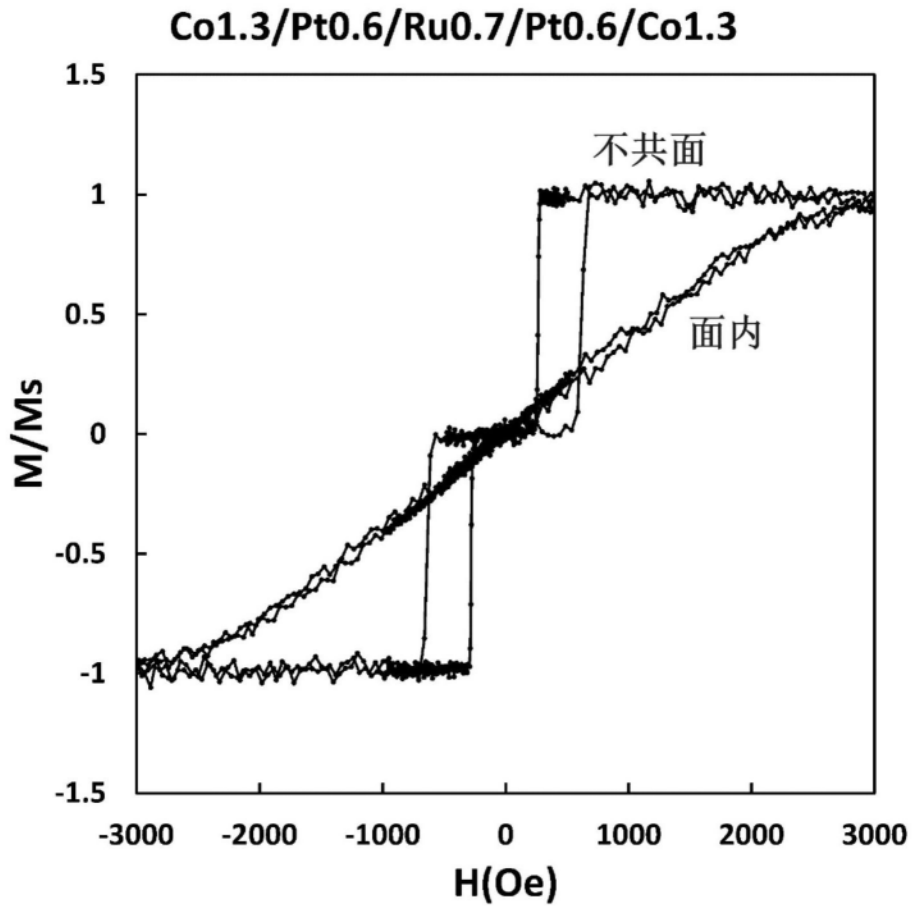


图14

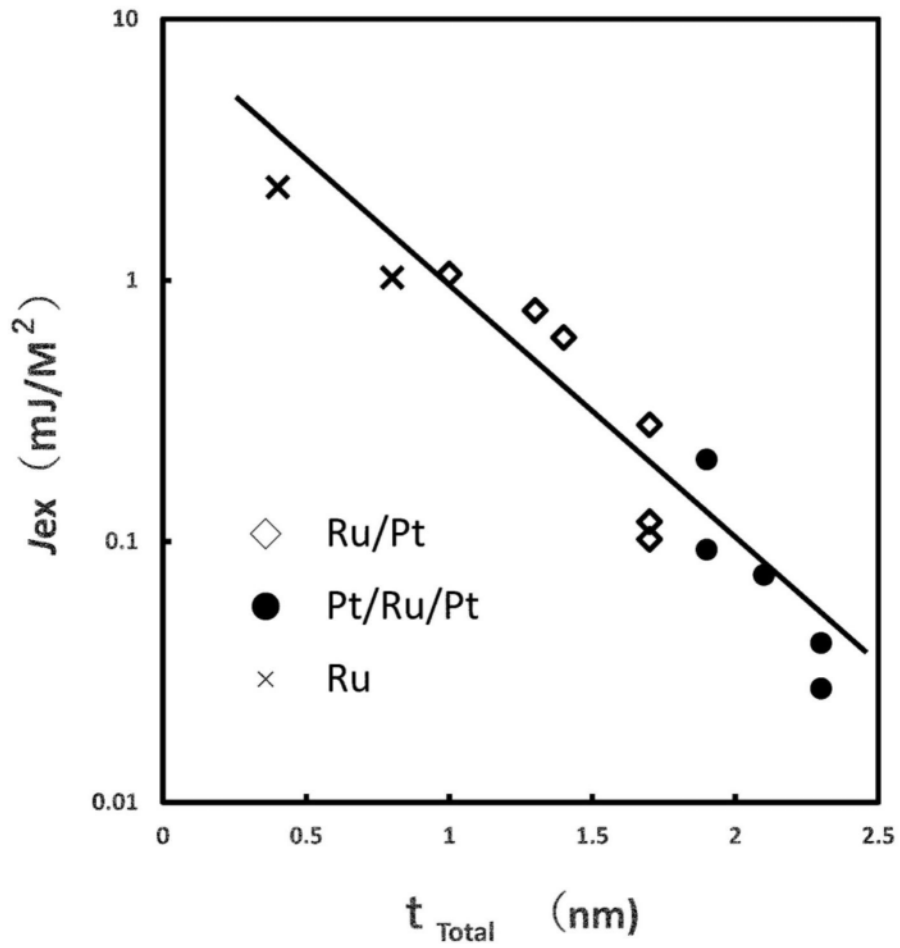


图15

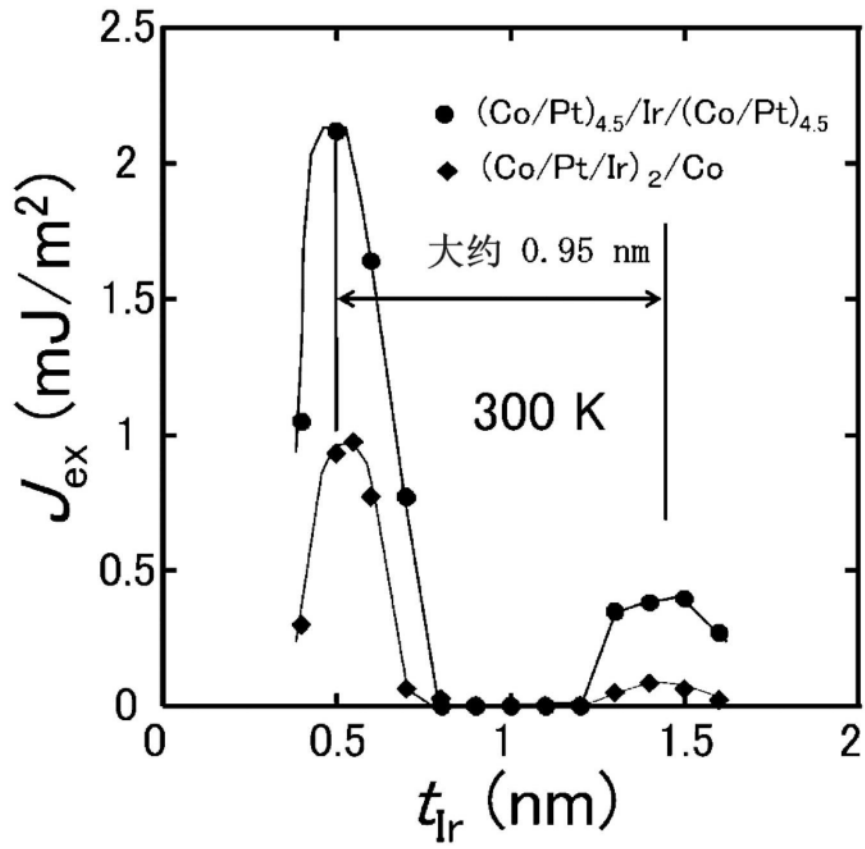


图16

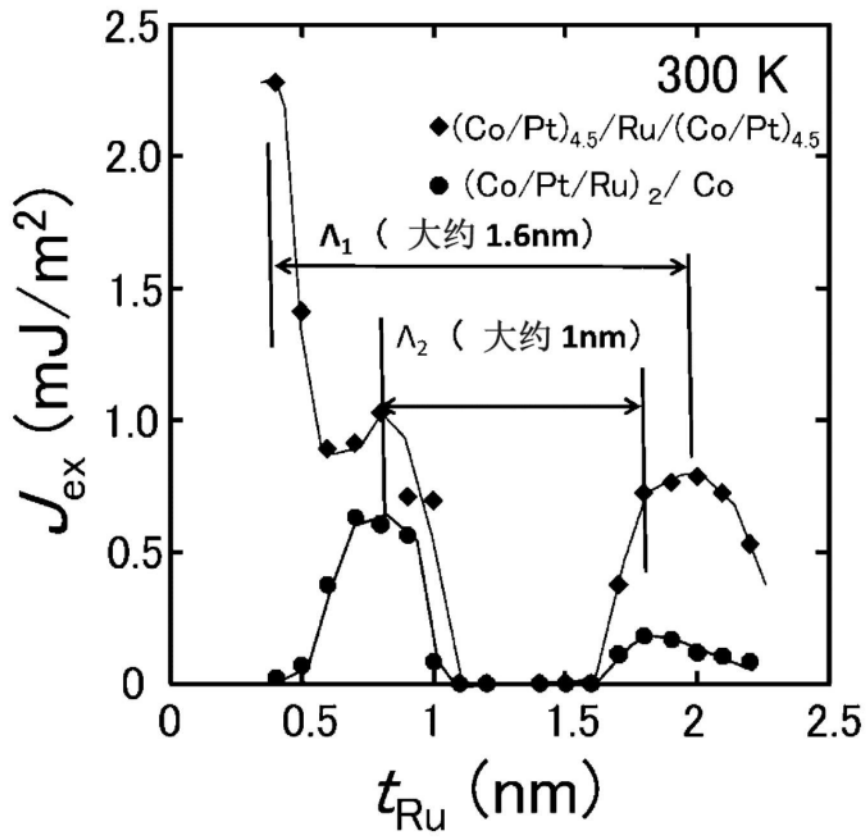


图17

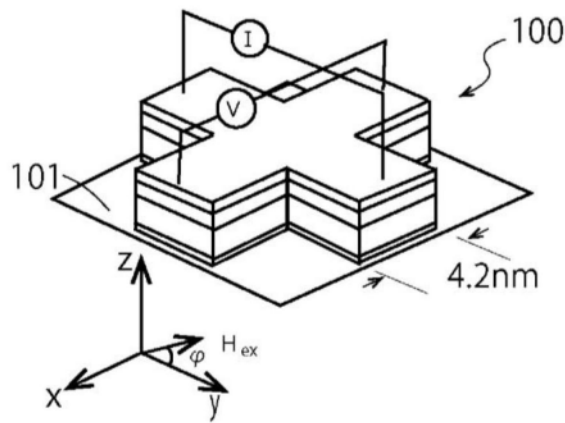


图18

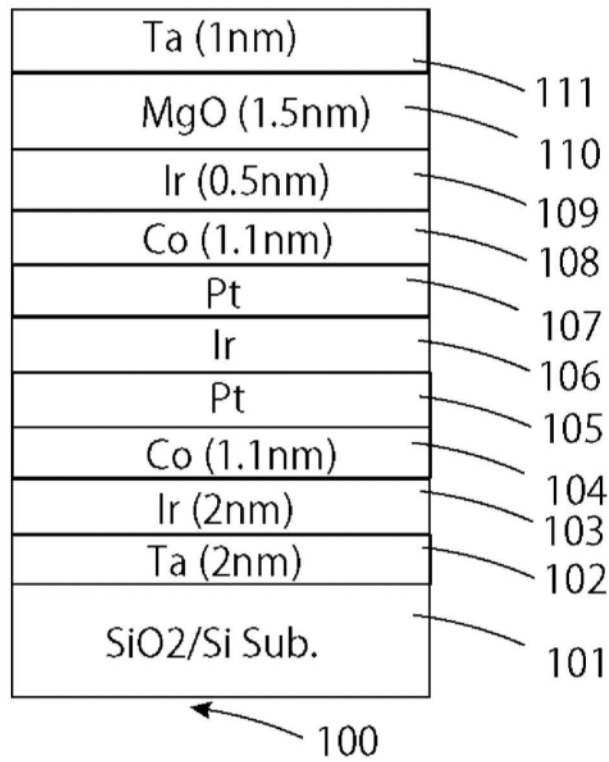


图19A

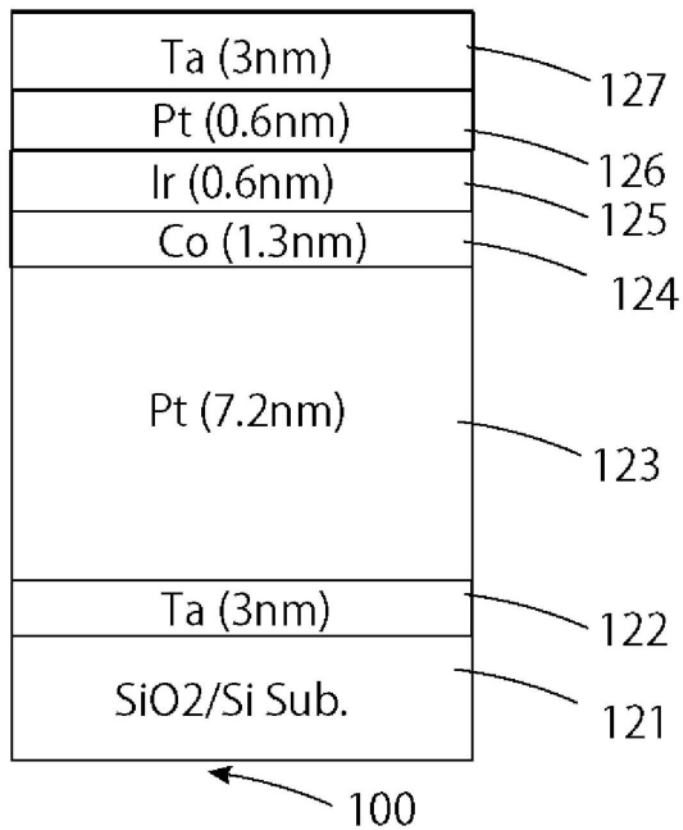


图19B

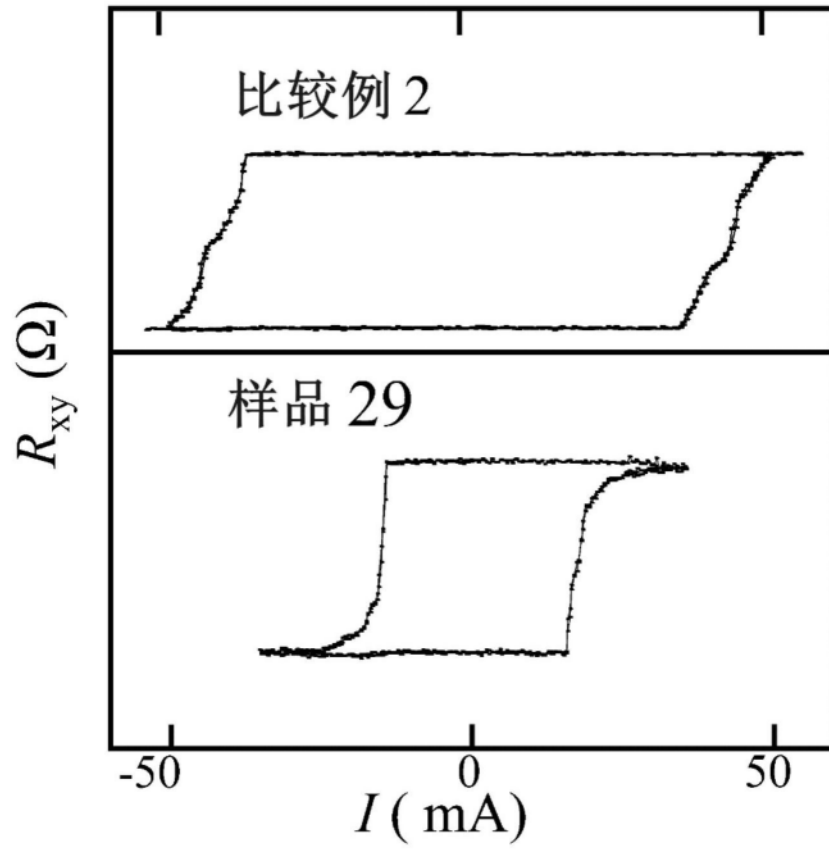


图20

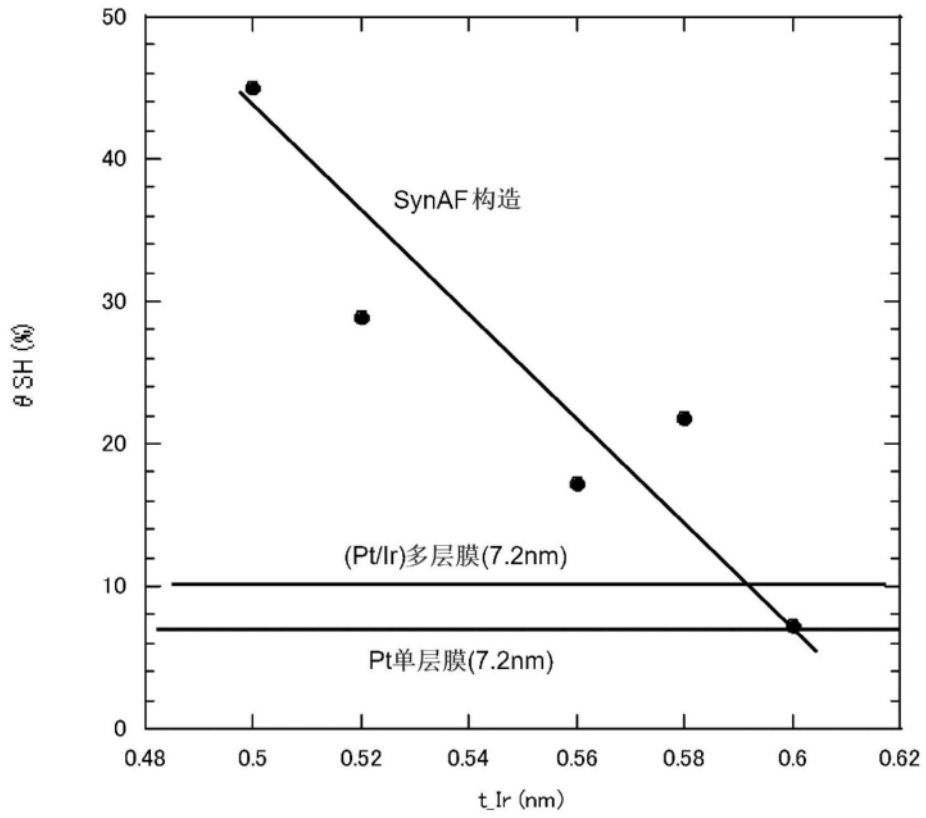


图21A

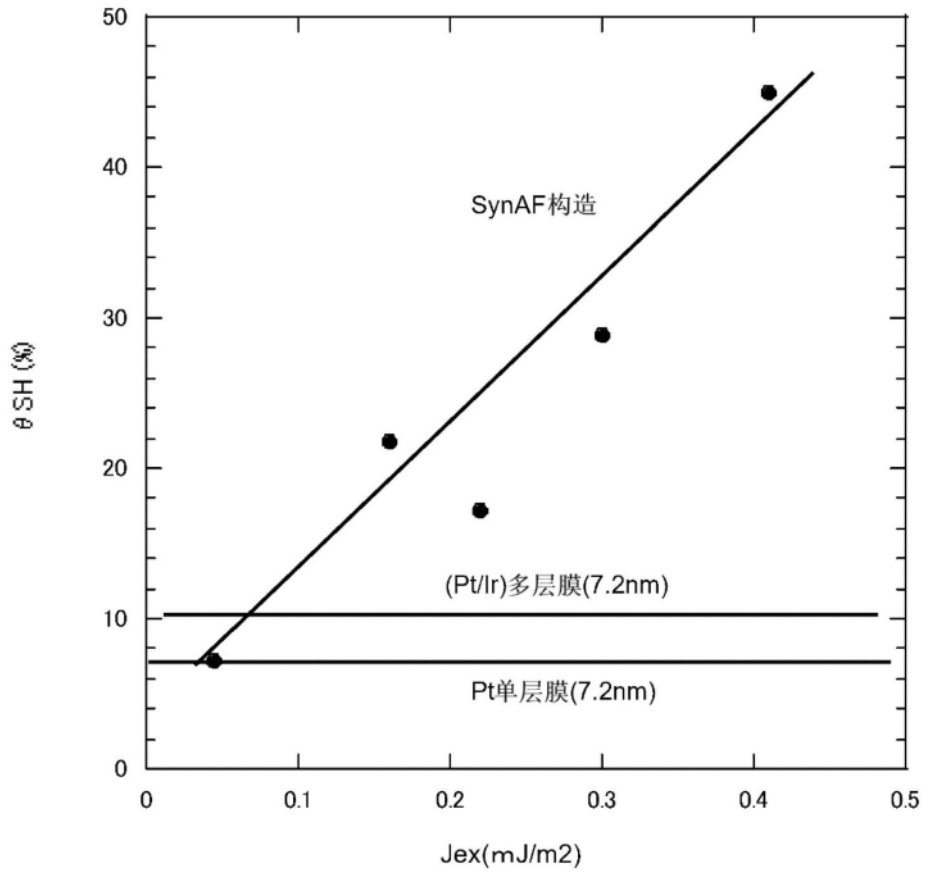


图21B

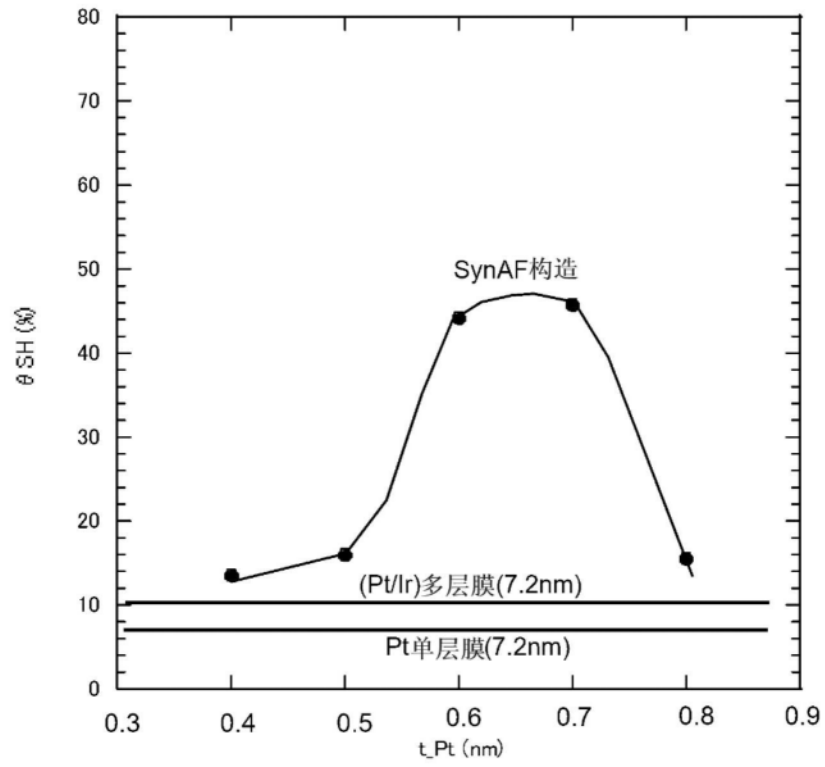


图22A

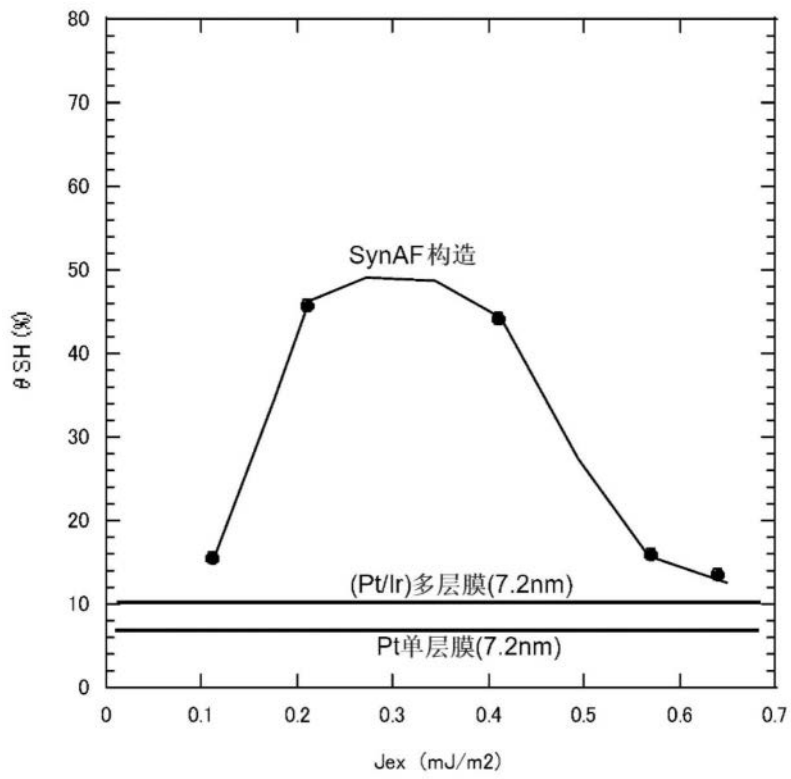


图22B

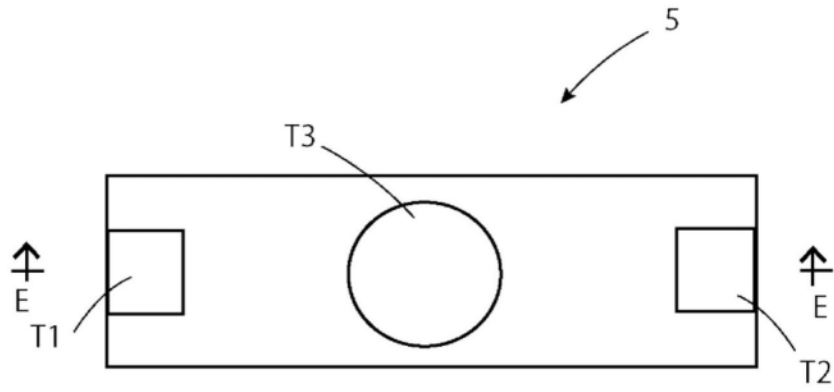


图23A

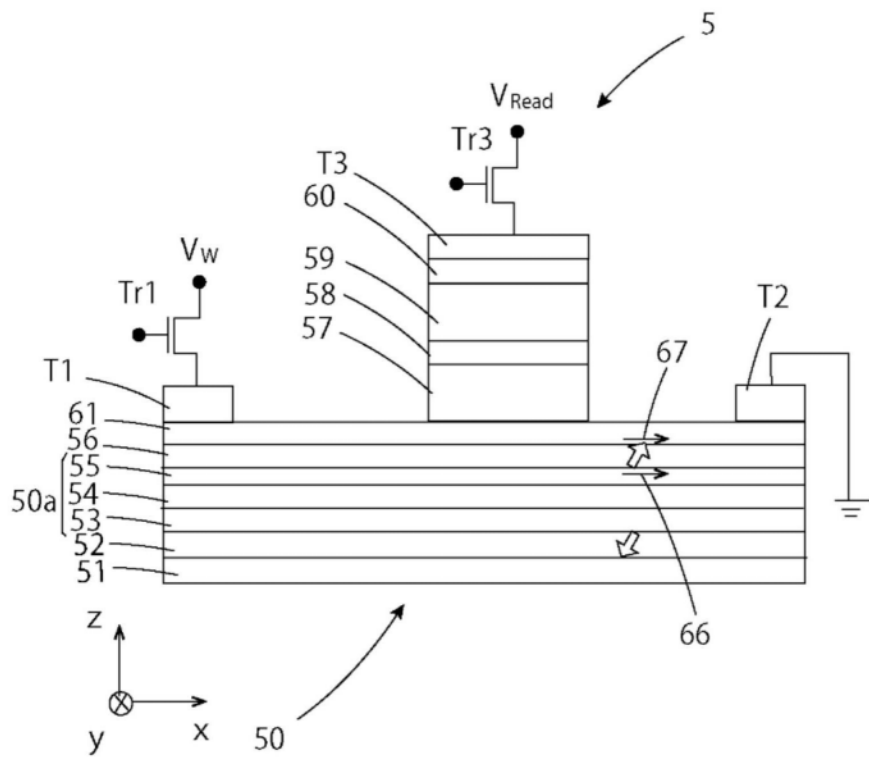


图23B

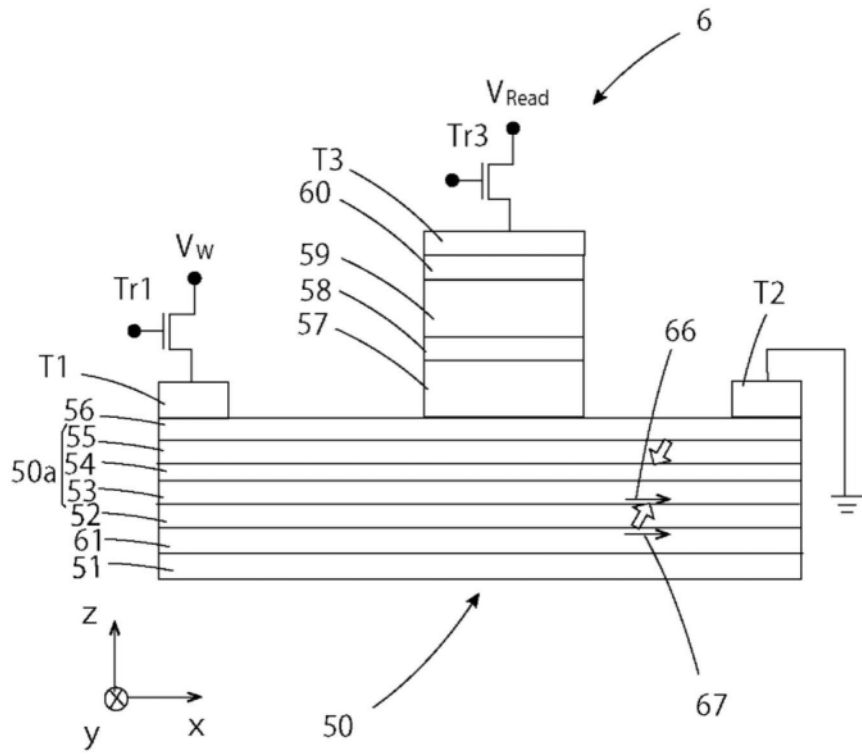


图24

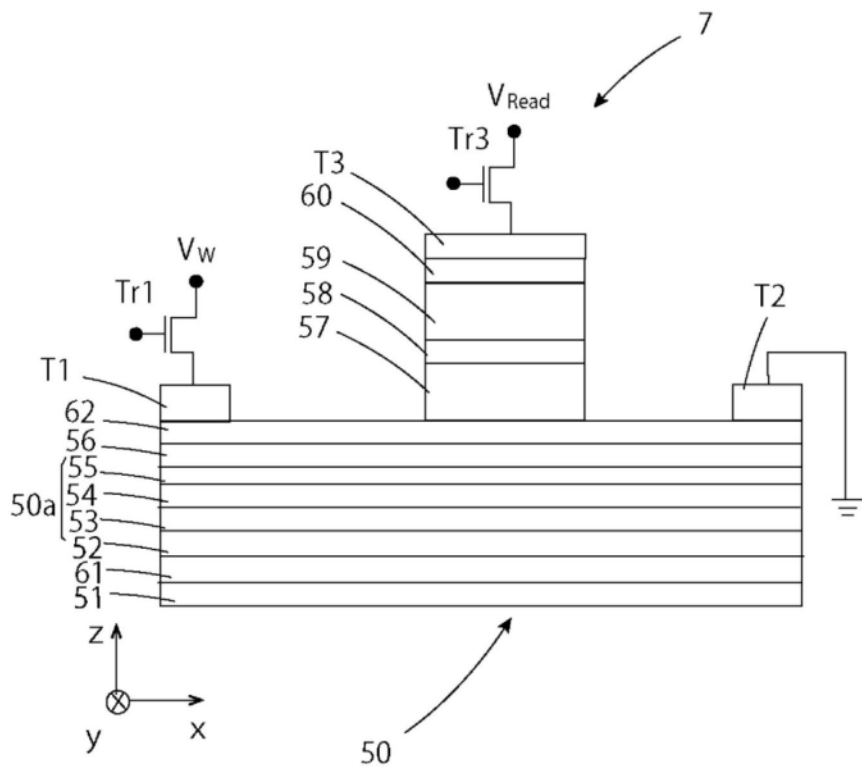


图25

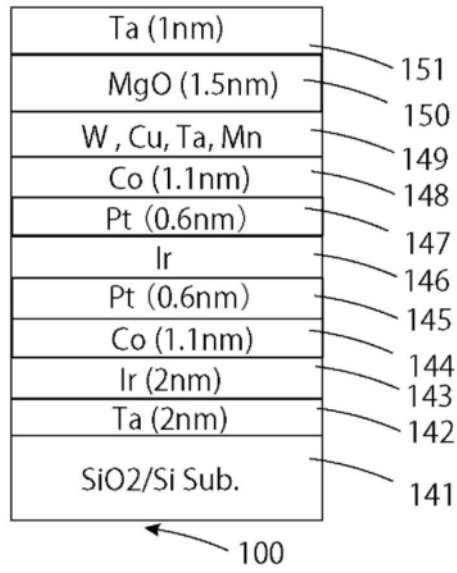


图26

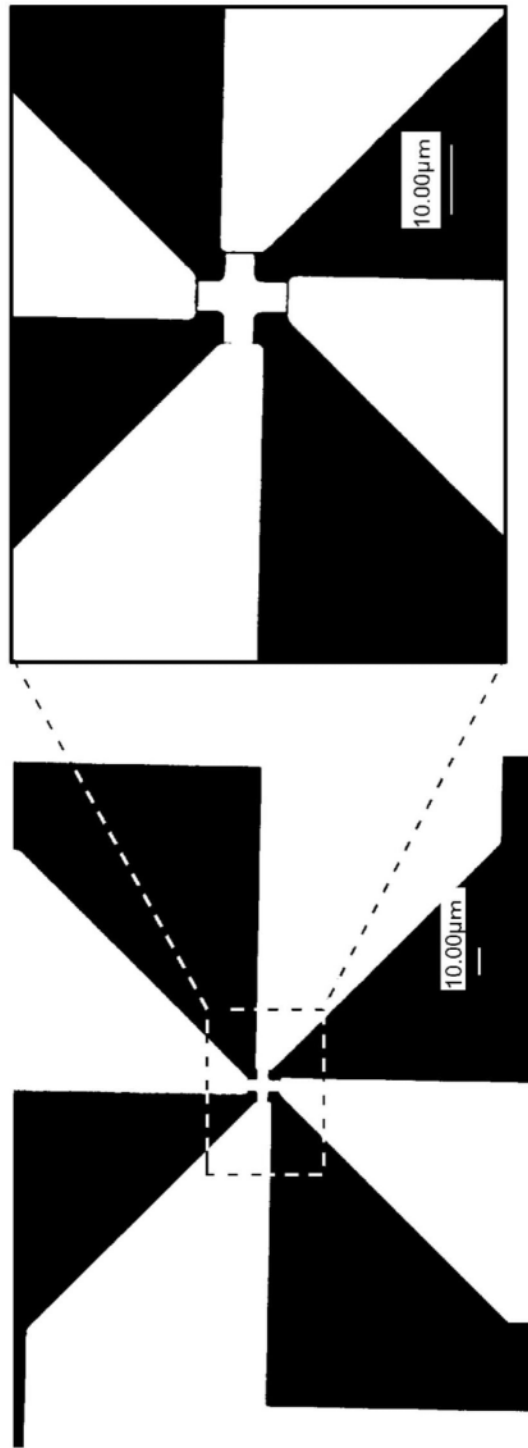


图27

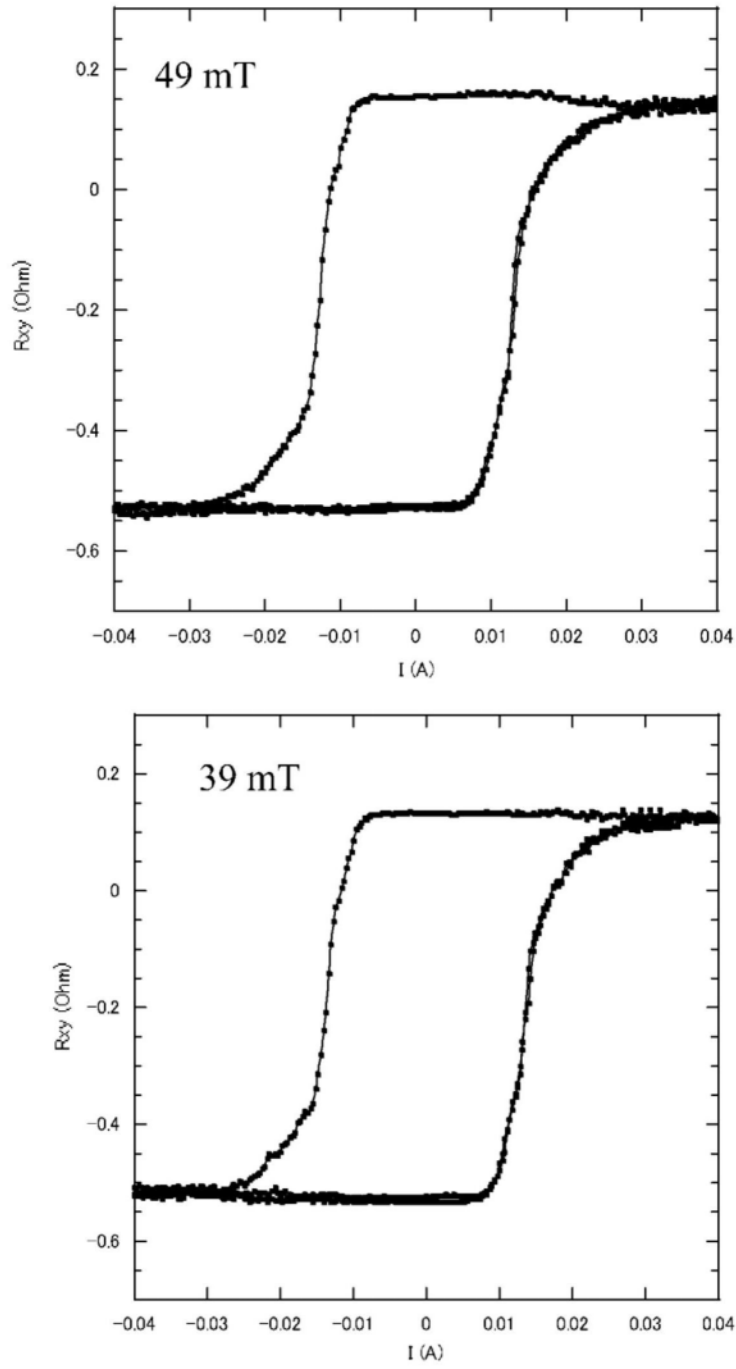


图28A

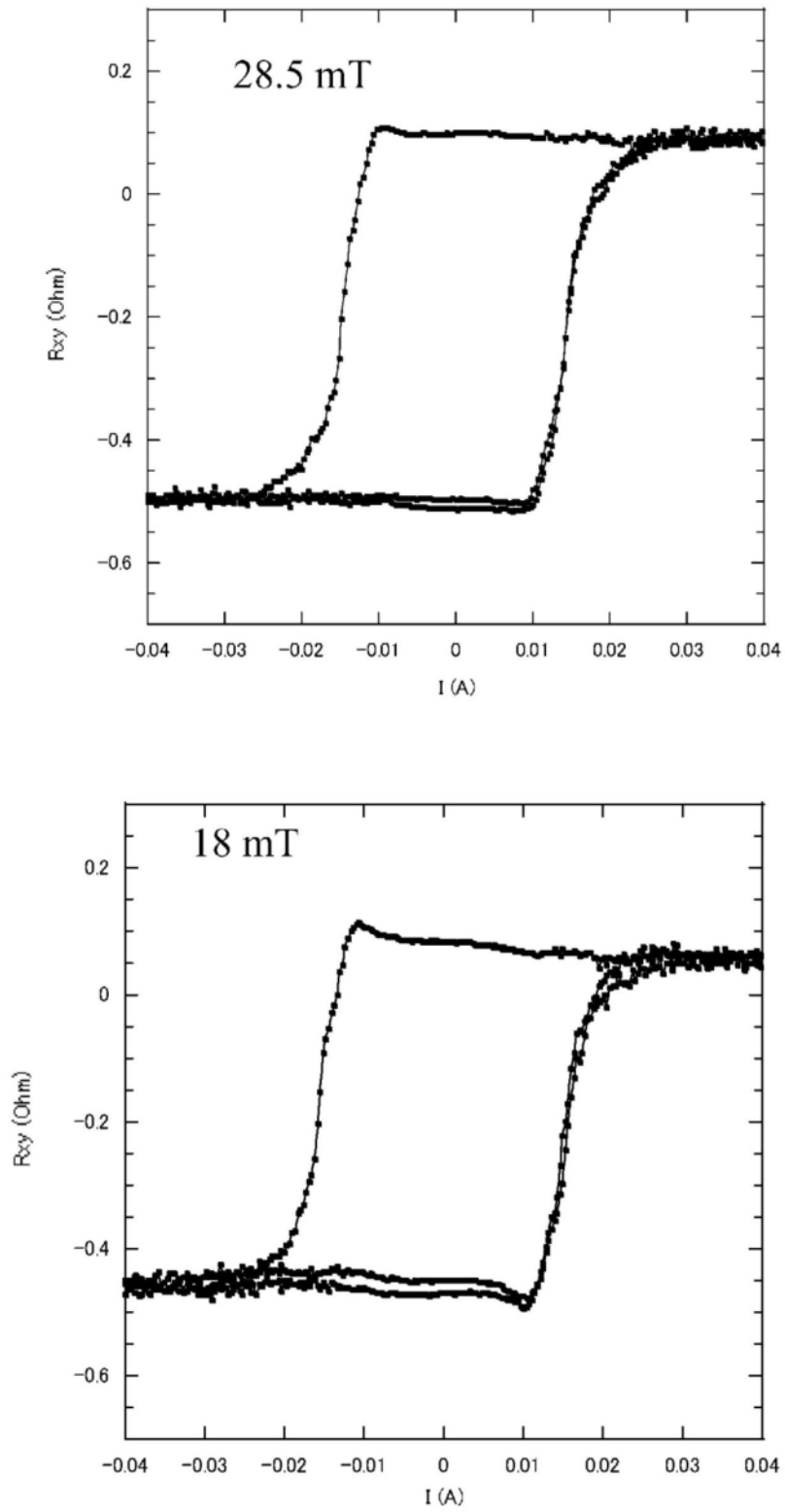


图28B

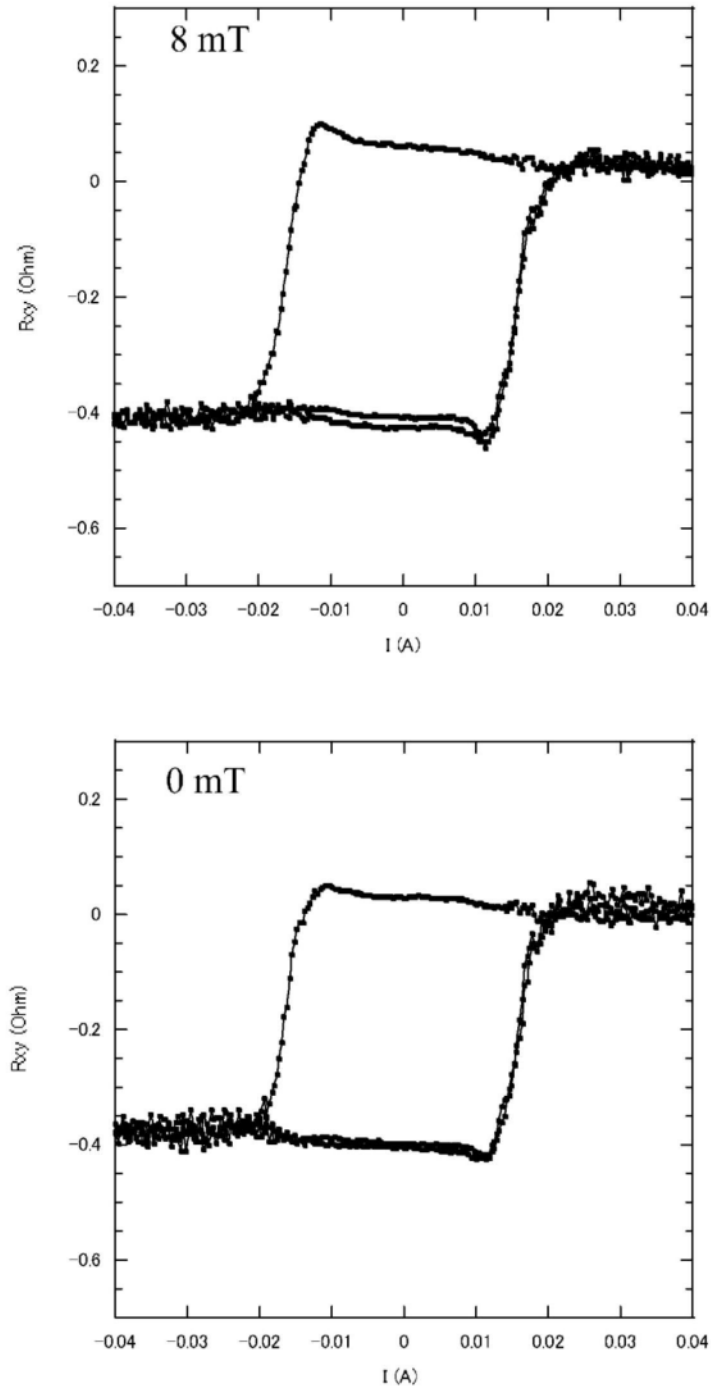


图28C

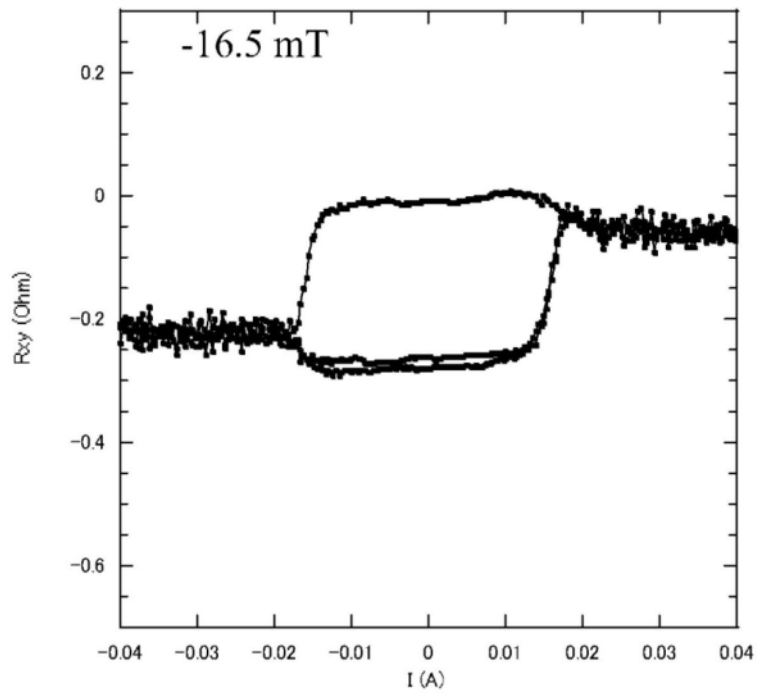
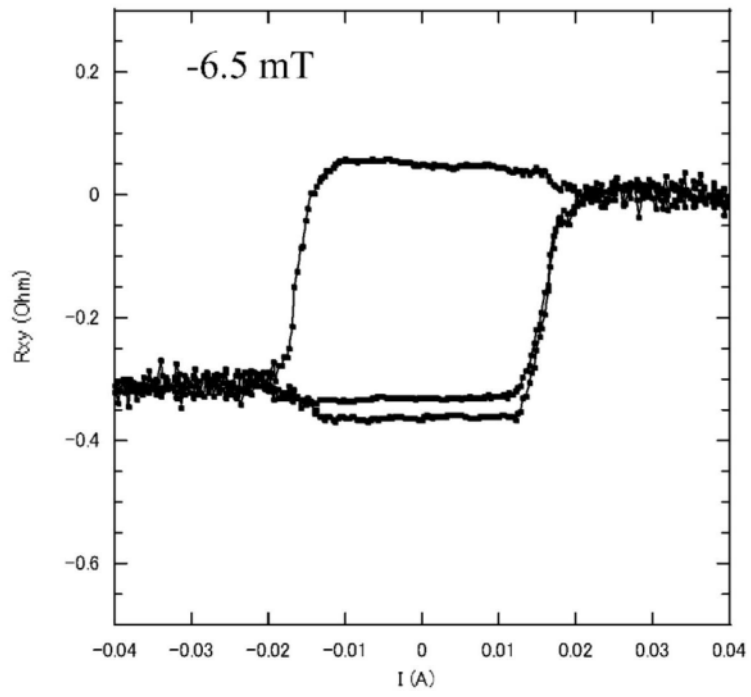


图28D

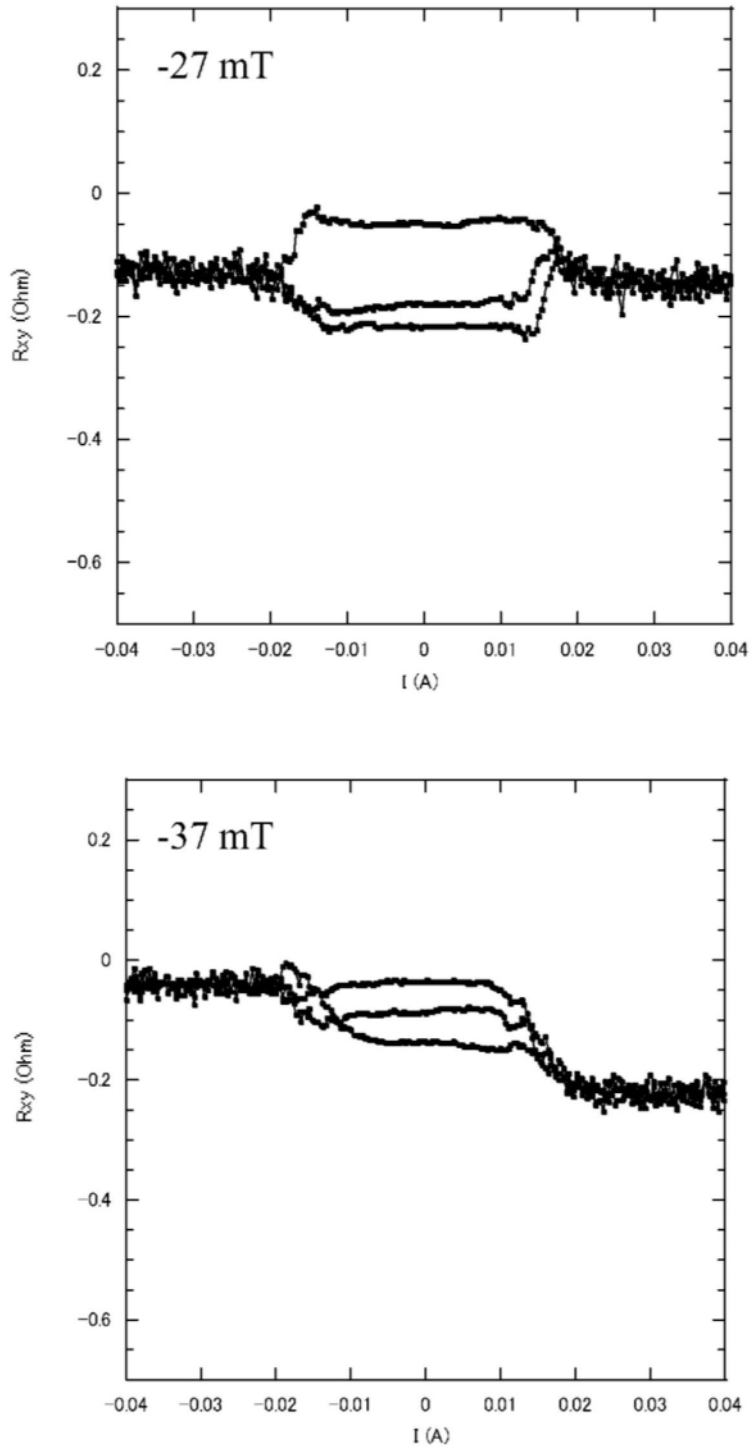


图28E

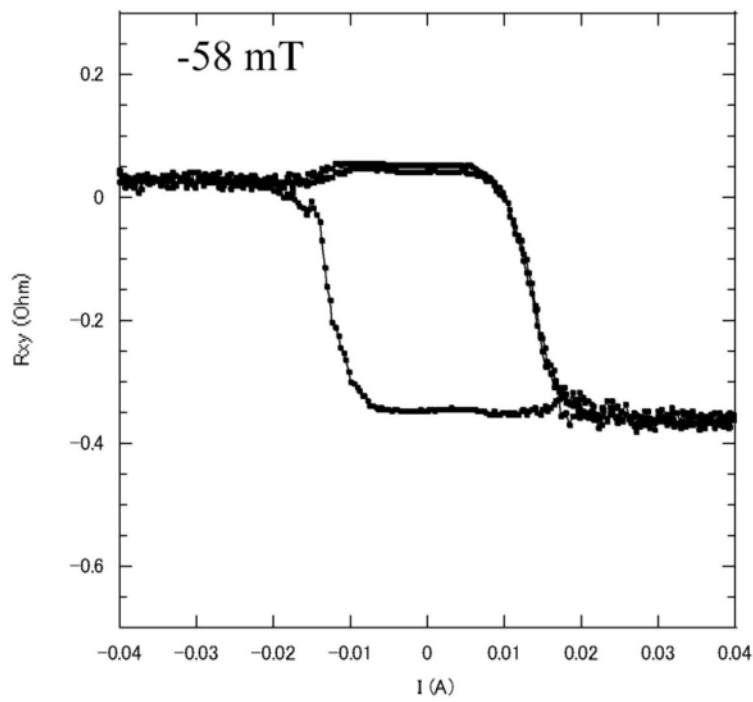
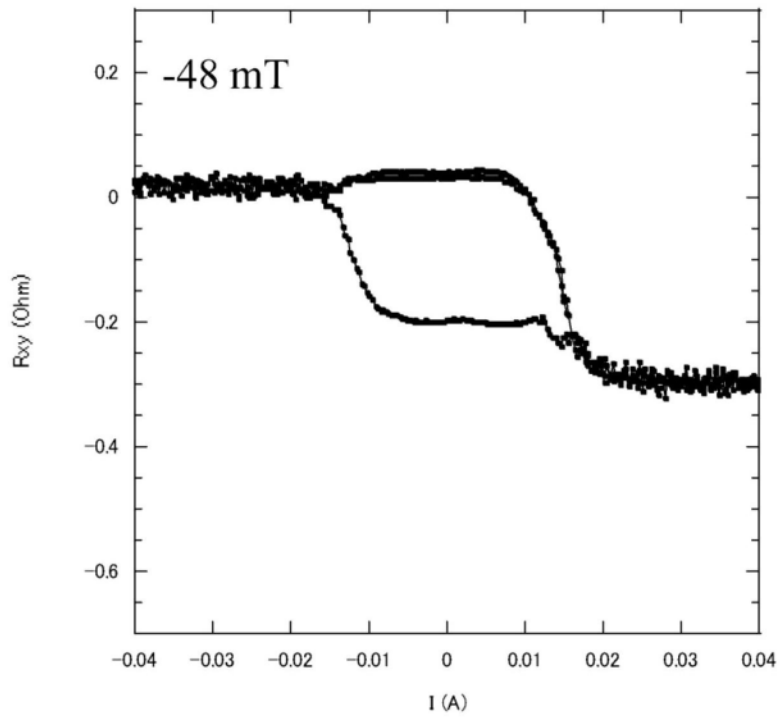


图28F

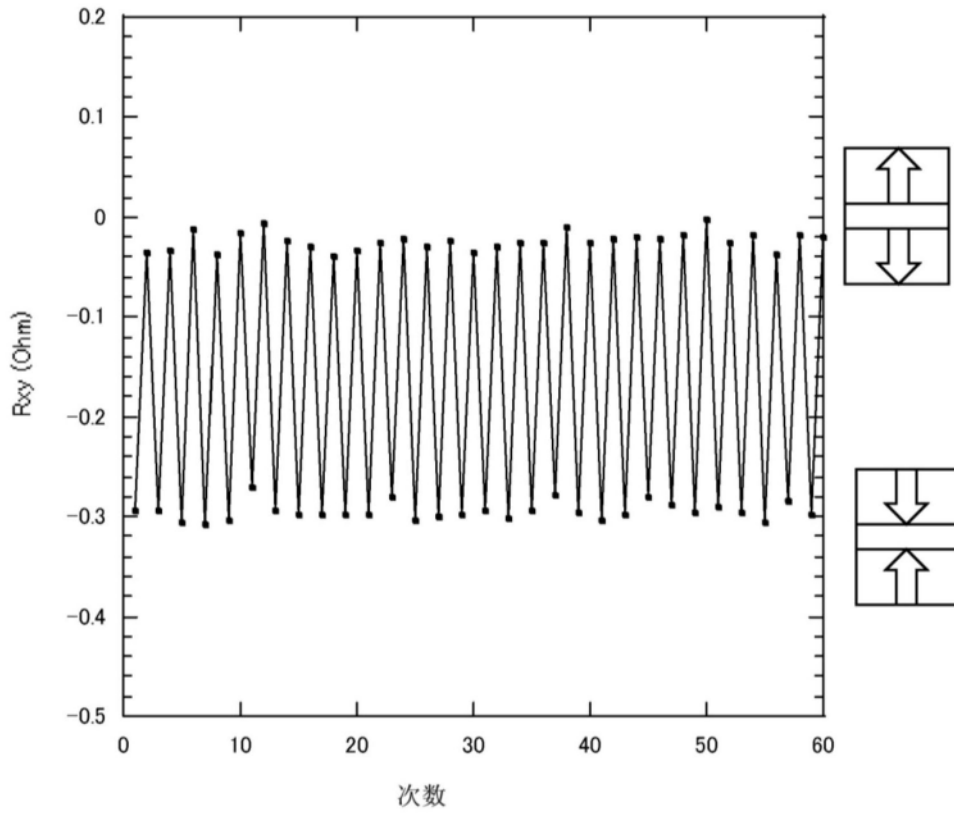


图29

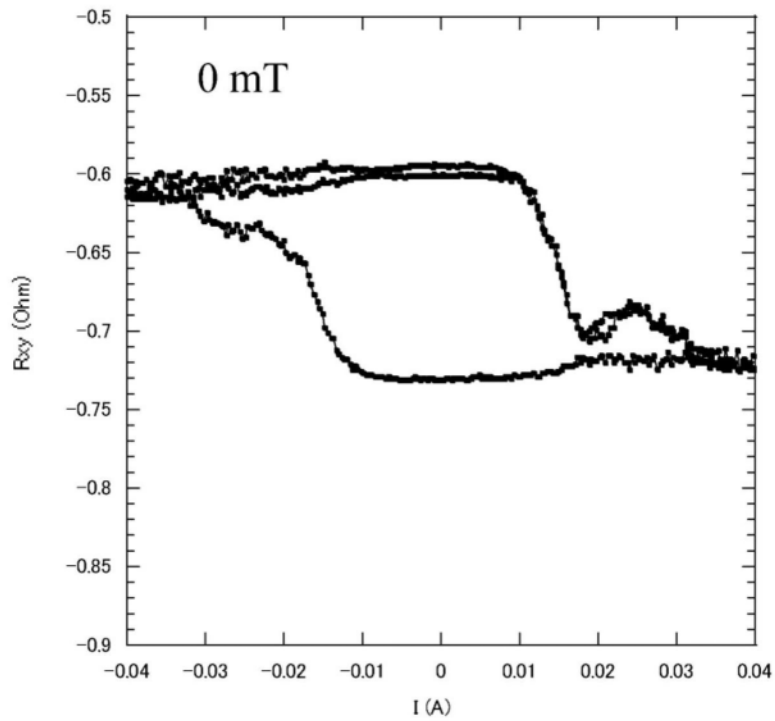


图30

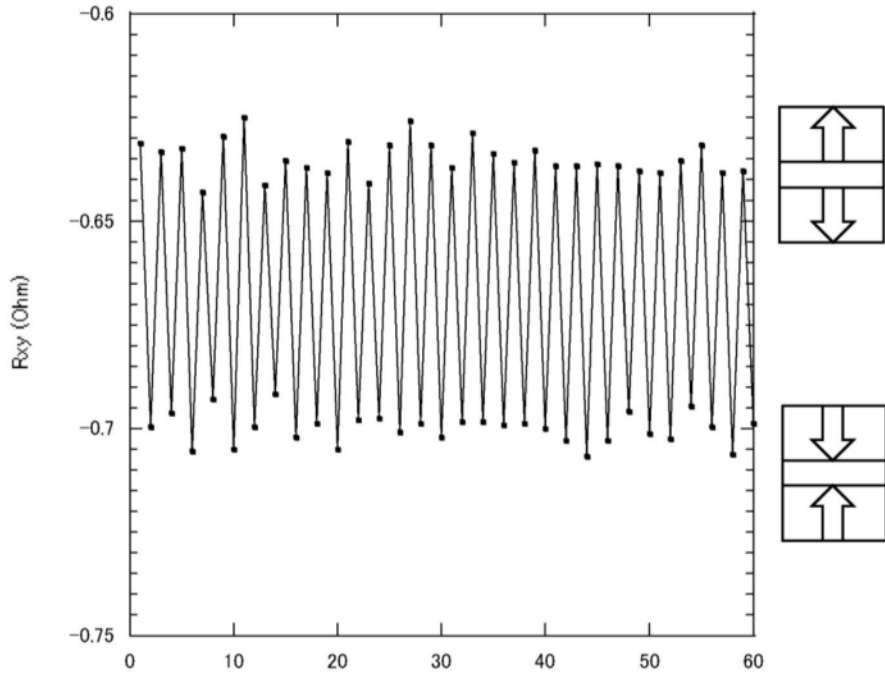


图31

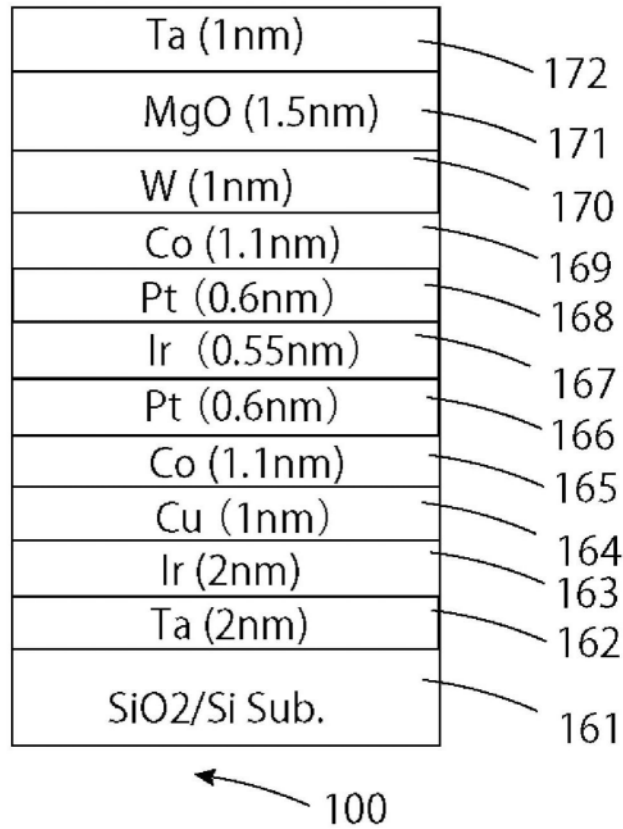


图32

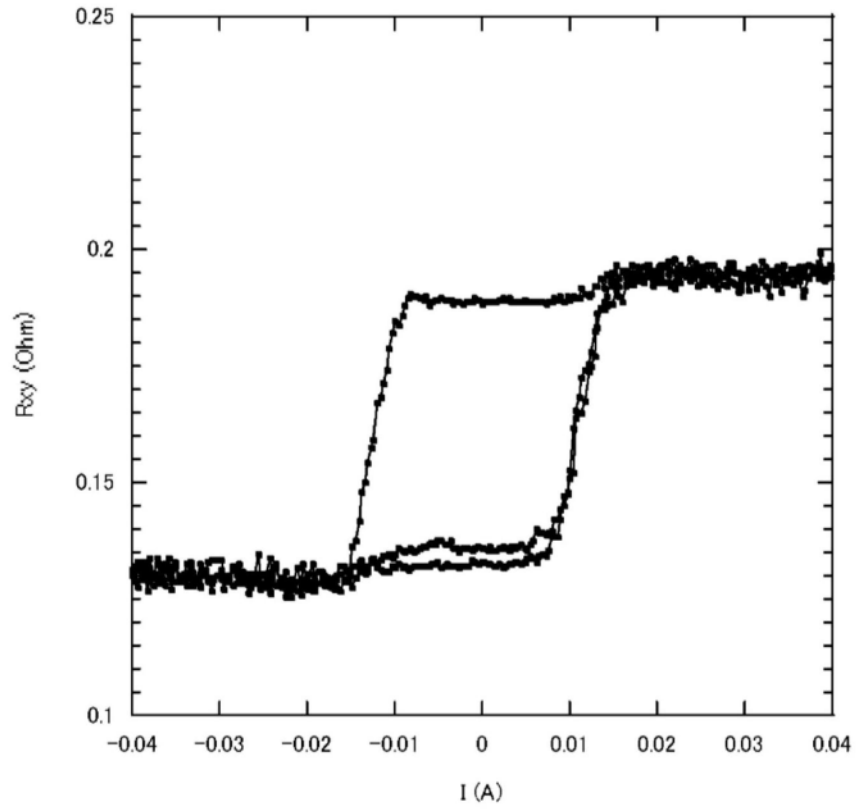


图33

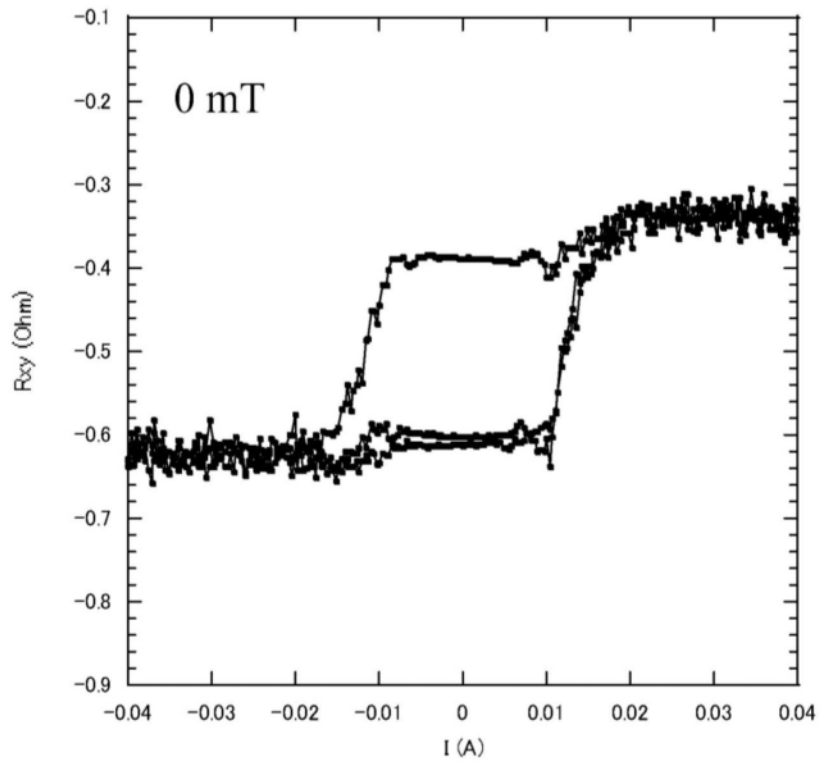


图34

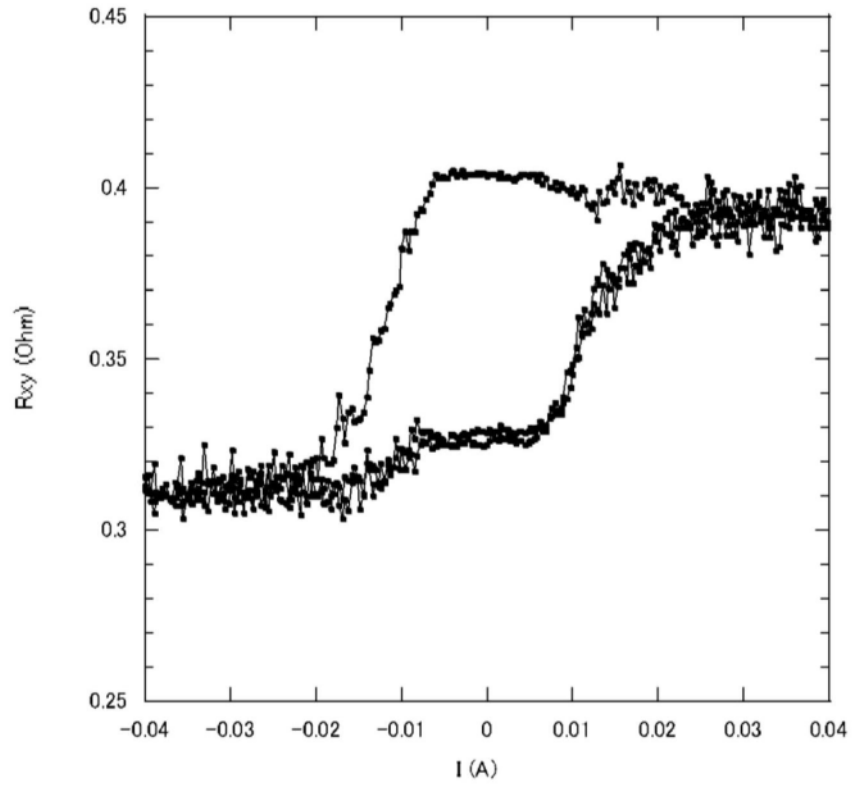


图35

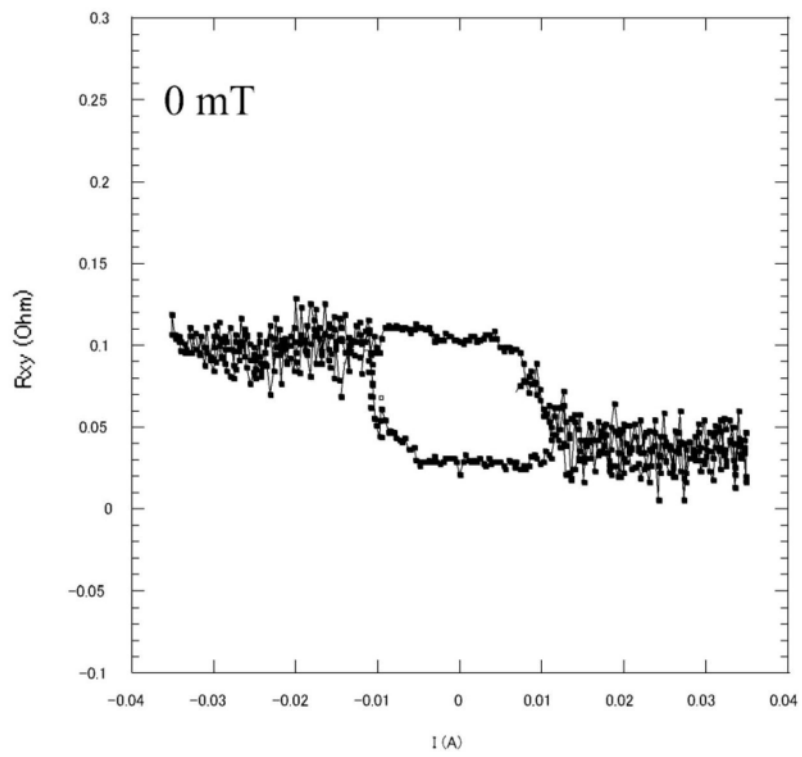


图36

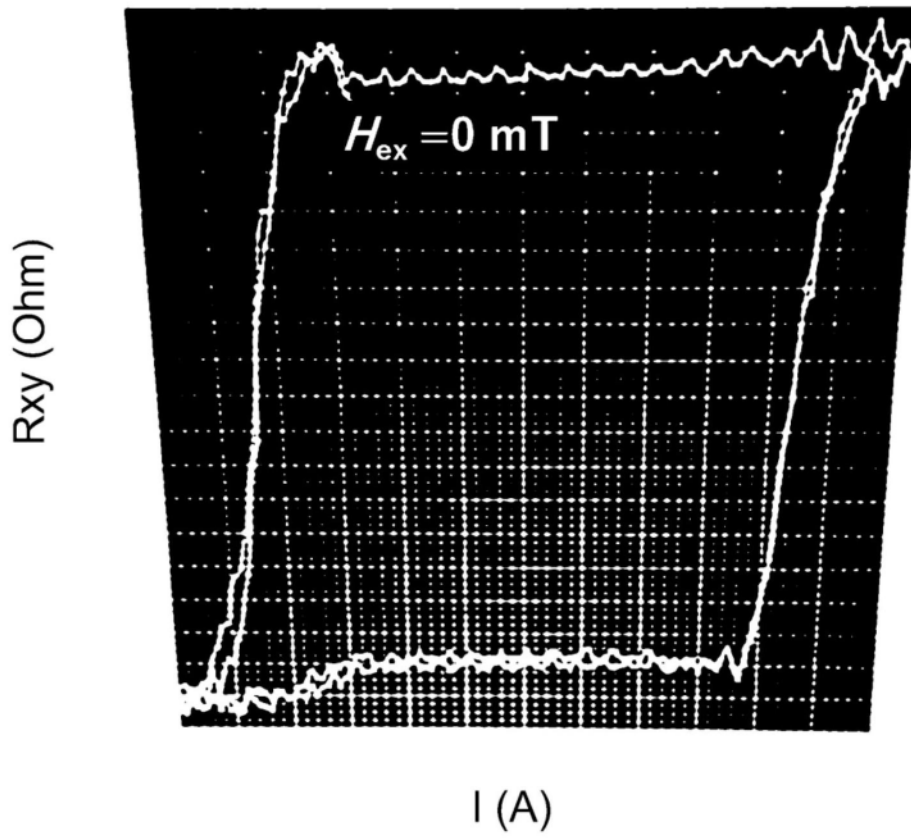


图37

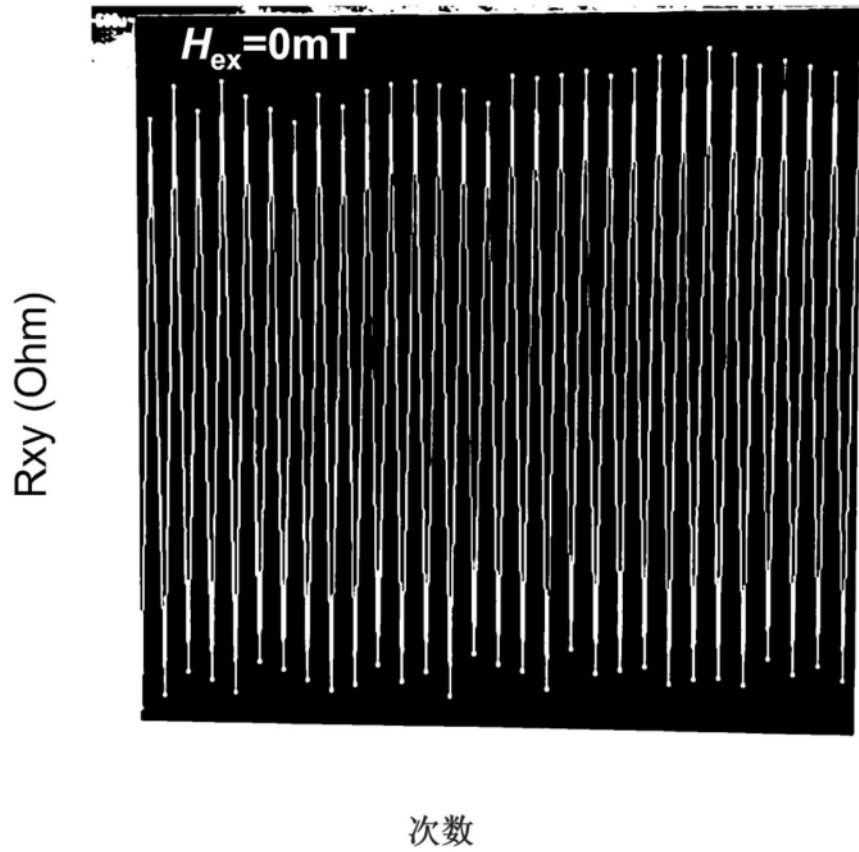


图38

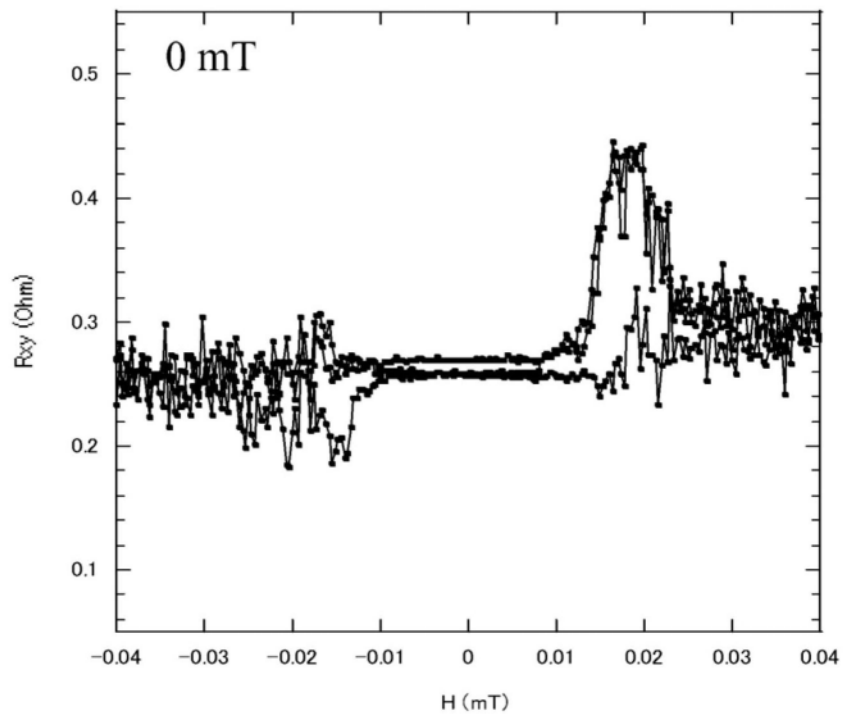


图39

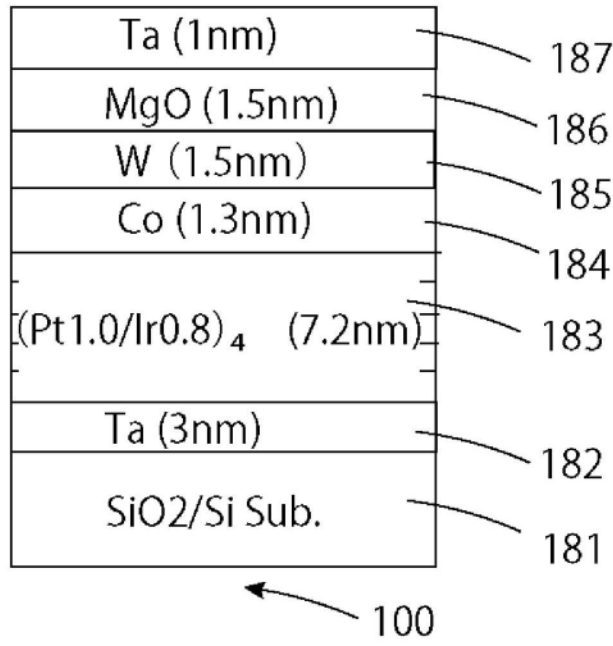


图40

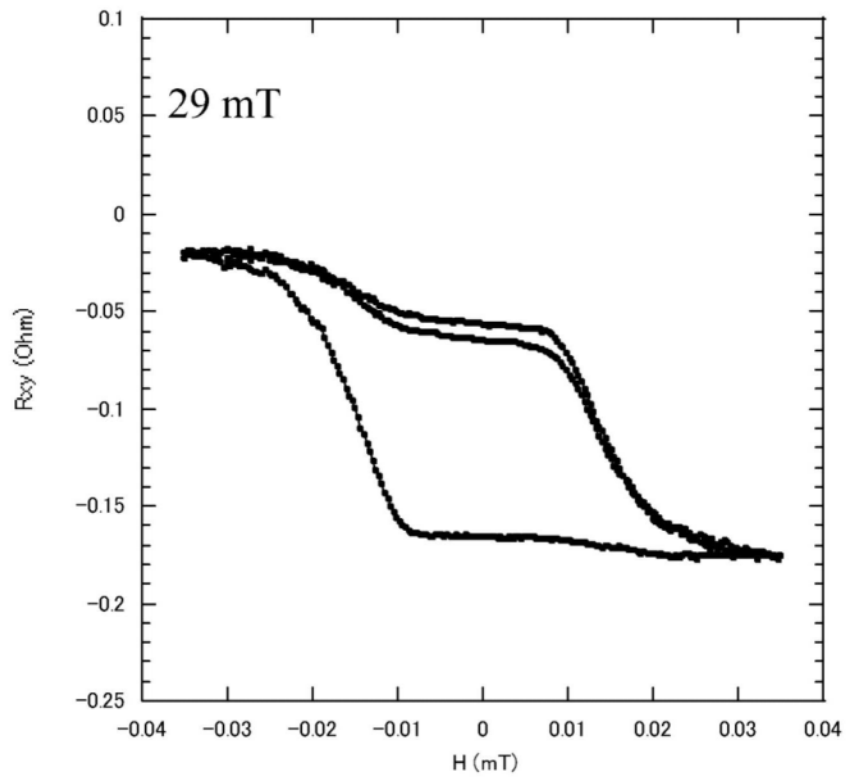


图41A

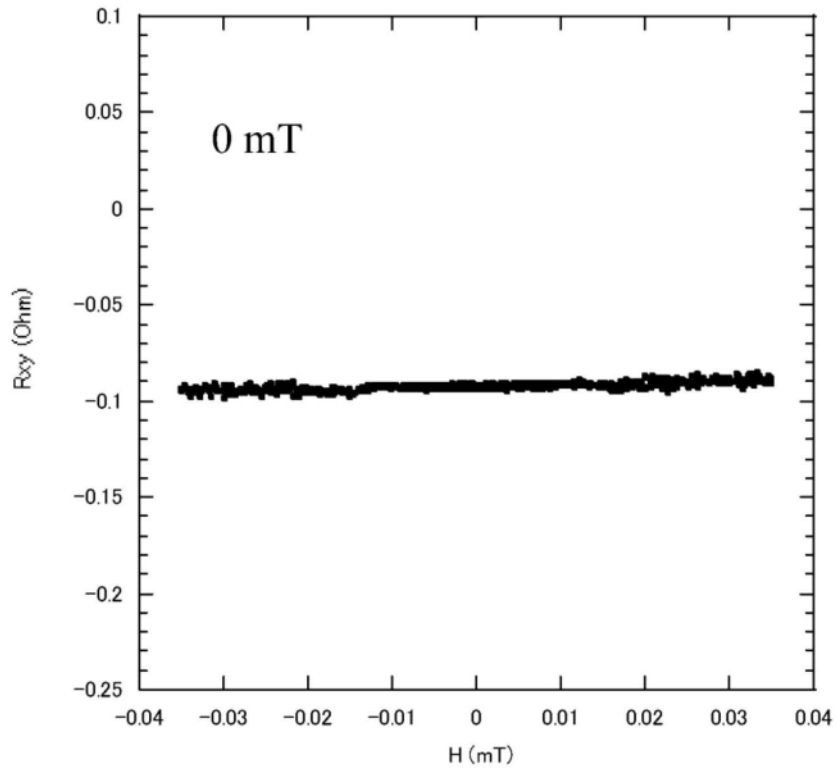


图41B

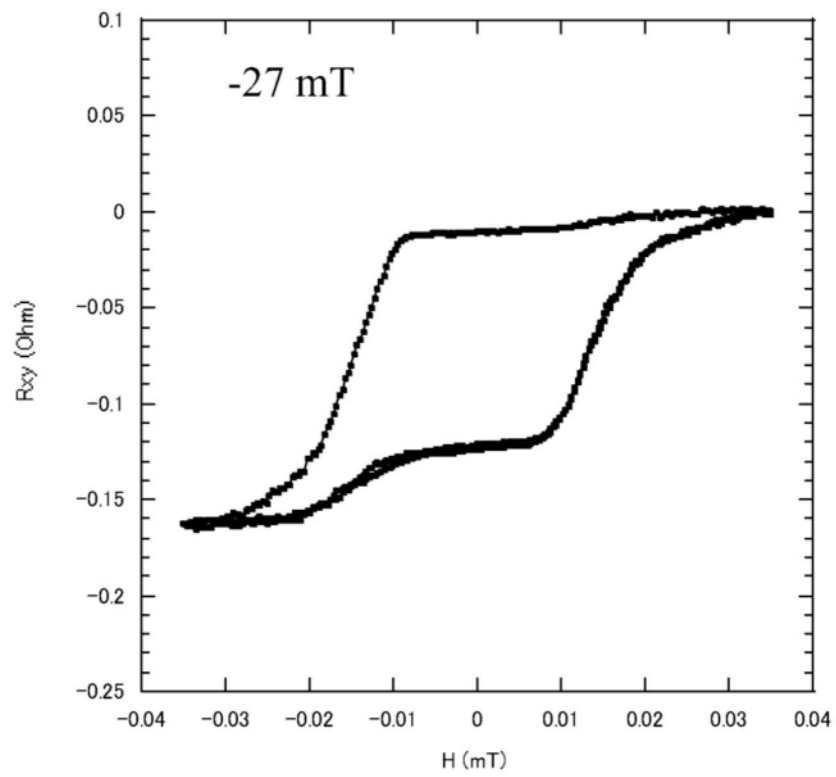


图41C