



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114078955 A

(43) 申请公布日 2022. 02. 22

(21) 申请号 202010842090.4

(22) 申请日 2020.08.20

(71) 申请人 中国科学院物理研究所

地址 100190 北京市海淀区中关村南三街8号

(72) 发明人 曹立新 王瑞 黄忠学 杨鑫
陈浩锋

(74) 专利代理机构 北京泛华伟业知识产权代理有限公司 11280

代理人 郭广迅

(51) Int. Cl.

H01L 29/267 (2006.01)

G23C 14/06 (2006.01)

G23C 14/28 (2006.01)

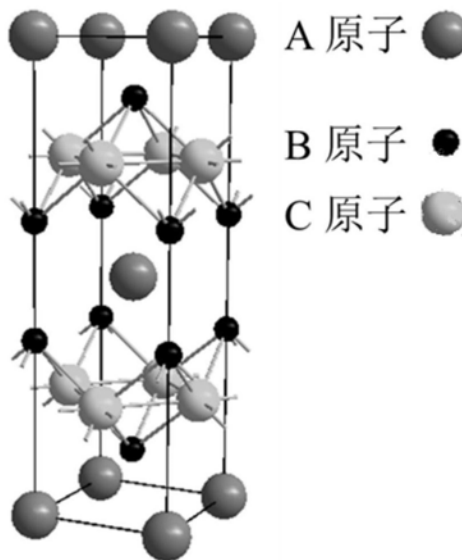
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

异质结及其制备方法

(57) 摘要

本发明提供一种异质结,该异质结由外延的磁性半导体薄膜与外延的超导体薄膜构成。本发明还提供一种制备本发明的异质结的方法。本发明的异质结通过同构异质外延制备了具有近乎完美、稳定可重复的安德烈夫界面,在测量磁性半导体的自旋极化率、获得完全自旋极化的自旋流等方面具有应用潜力。



1. 一种异质结, 该异质结由外延的磁性半导体薄膜与外延的超导体薄膜构成。

2. 根据权利要求1所述的异质结, 其中, 所述异质结由 $Ba_{1-x}K_x(Zn_{1-y}Mn_y)_2As_2$ 形成的外延的磁性半导体薄膜与 $Ba(Fe_{1-z}Co_z)_2As_2$ 形成的外延的超导体薄膜构成, 其中 $x=0.03-0.08$, $y=0.05-0.15$, $z=0.05-0.15$;

优选地, 所述 $Ba_{1-x}K_x(Zn_{1-y}Mn_y)_2As_2$ 为 $Ba_{0.97}K_{0.03}(Zn_{0.95}Mn_{0.05})_2As_2$ 、 $Ba_{0.92}K_{0.08}(Zn_{0.95}Mn_{0.05})_2As_2$ 或 $Ba_{0.92}K_{0.08}(Zn_{0.85}Mn_{0.15})_2As_2$ 。

3. 根据权利要求2所述的异质结, 其中, 所述 $Ba(Fe_{1-z}Co_z)_2As_2$ 为 $Ba(Fe_{0.92}Co_{0.08})_2As_2$ 。

4. 一种制备权利要求1-3中任一项所述的异质结的方法, 其包括如下步骤:

(1) 将多晶磁性半导体靶材与多晶超导体靶材同时放置在脉冲激光沉积系统的真空腔室内;

(2) 将基片固定在基片台上, 并将所述基片台放入所述真空腔室内;

(3) 利用脉冲激光沉积方法在所述基片上生长外延的超导体薄膜;

(4) 在步骤(3)生长得到的外延的超导体薄膜上, 利用脉冲激光沉积方法生长外延的磁性半导体薄膜, 如此制得异质结。

5. 根据权利要求4所述的方法, 其中, 所述多晶磁性半导体靶材的组成由以下化学式表示: $Ba_{1-m}K_m(Zn_{1-y}Mn_y)_2As_2$, 所述外延的磁性半导体薄膜的组成由以下化学式表示: $Ba_{1-x}K_x(Zn_{1-y}Mn_y)_2As_2$, 其中 $m=0.2-0.3$, $x=0.03-0.08$, $y=0.05-0.15$; 和

所述多晶超导体靶材的组成由以下化学式表示: $Ba(Fe_{1-z}Co_z)_2As_2$, 所述外延的超导体薄膜的组成由以下化学式表示: $Ba(Fe_{1-z}Co_z)_2As_2$, 其中 $z=0.05-0.15$ 。

6. 根据权利要求4所述的方法, 其中, 所述步骤(3)中的生长外延的超导体薄膜是在基片温度为 T_1 的条件下进行的; 所述步骤(4)中的生长外延的磁性半导体薄膜是在基片温度为 T_2 的条件下进行的; 其中, $T_1-T_2 > 100^\circ C$;

优选地, 由 T_1 降温至 T_2 是在降温速率为 $20-30^\circ C/min$ 的条件下直接降温进行的, 或者是由 T_1 自然冷却至室温, 然后再以 $10-20^\circ C/min$ 的加热速率由室温加热至 T_2 的条件下间接进行的。

7. 根据权利要求4所述的方法, 其中, 所述步骤(3)中的生长外延的超导体薄膜是在如下条件下进行的:

基片温度为 $700-800^\circ C$, 靶材和基片之间的距离为 $3-5cm$, 真空腔室内的气压为 $2 \times 10^{-5}-3 \times 10^{-5}Pa$ 。

8. 根据权利要求4所述的方法, 其中, 所述步骤(4)中的生长外延的磁性半导体薄膜是在如下条件下进行的:

基片温度为 $500-600^\circ C$, 靶材和基片之间距离为 $2-4cm$, 真空腔室内气压为 $2 \times 10^{-5}Pa-10Pa$ 。

9. 根据权利要求4所述的方法, 其中, 所述方法还包括在步骤(4)之后的下述步骤: (5) 通入Ar气至所述真空腔室的气压达到 $0.1-0.8$ 个大气压, 将基片降温至 $250-350^\circ C$, 并保持 $20-40min$, 然后自然冷却到室温;

优选地, 所述步骤(3)中的利用脉冲激光沉积方法在所述基片上生长外延的超导体薄膜之前还包括如下步骤: 用挡板挡住基片, 用脉冲激光预溅射多晶超导体靶材表面, 其中, 脉冲数为 $500-1000$ 个;

优选地,所述步骤(4)中的利用脉冲激光沉积方法生长外延的磁性半导体薄膜之前还包括如下步骤:用挡板挡住基片,用脉冲激光预溅射多晶磁性半导体靶材表面,其中,脉冲数为500-1000个。

10. 根据权利要求4所述的方法,其中,所述基片是(001)取向的 SrTiO_3 单晶基片、(001)取向的 $(\text{La}_{0.272}\text{Sr}_{0.728})(\text{Al}_{0.648}\text{Ta}_{0.352})\text{O}_3$ 单晶基片或(001)取向的 LaAlO_3 单晶基片。

异质结及其制备方法

技术领域

[0001] 本发明属于磁性半导体与超导体领域。具体地,本发明涉及自旋掺杂与电荷掺杂相互分离的半导体与超导体构成的异质结及其制备方法。

背景技术

[0002] 正常金属与超导体组成的异质结构被称作安德烈夫结,如果正常金属中的电子存在自旋极化,其自旋极化率会反映到安德烈夫结的电导曲线之上,通过理论模型的计算,可以从电导曲线中推导出自旋极化率(Phys.Rev.B 25,4515(1982))。在III-V族稀磁半导体刚发现不久,就开始使用安德烈夫结的方式测量其中的自旋极化率(Phys.Rev.Lett.91,056602(2003))。但是,依然存在很多问题,(1)居里转变温度不高,目前该体系稀磁半导体最高居里转变温度只有200K(Nano.Letters.11,2584(2011)),(2)安德烈夫结两端的磁性半导体和超导体不属于同一种晶体结构,这影响了二者之间构成的界面的晶体学质量及其物理特性,导致穿越界面的自旋流的自旋极化率会因为自旋散射的存在而出现下降。2011年起,一类锌砷基、自旋掺杂与电荷掺杂相互分离的磁性半导体材料被发现,并很快报道了230K的居里转变温度(Chin.Sci.Bull.59,2524(2014)),并且有基于单晶材料的点接触安德烈夫结成功制备的报道出现(Scientific Reports 7,14473(2017))。但是,异质结中的超导体为非晶态的常规超导体,所以,依然为非同构异质结,上述第二个问题依然没有解决。

[0003] $Ba_{1-x}K_x(Zn_{1-y}Mn_y)_2As_2$ 单层薄膜的生长(AIP Advance 7,045017(2017))就面临难成相、易变质的问题,且薄膜中的K掺杂含量受脉冲激光沉积条件的影响,所以,如何稳定可重复地得到低界面散射、高超导转变温度的安德烈夫界面是目前急需解决的技术问题。

发明内容

[0004] 为此,本发明的目的在于提供一种异质结,该异质结具有界面散射趋于零、稳定可重复的安德烈夫界面。本发明的目的还在于提供本发明的异质结的制备方法。

[0005] 本发明的上述目的是通过如下技术方案实现的。

[0006] 一方面,本发明提供一种异质结,该异质结由外延的磁性半导体薄膜与外延的超导体薄膜构成。

[0007] 优选地,在本发明所述的异质结中,所述异质结由 $Ba_{1-x}K_x(Zn_{1-y}Mn_y)_2As_2$ 形成的外延的磁性半导体薄膜与 $Ba(Fe_{1-z}Co_z)_2As_2$ 形成的外延的超导体薄膜构成,其中 $x=0.03-0.08$, $y=0.05-0.15$, $z=0.05-0.15$ 。

[0008] 优选地,在本发明所述的异质结中,所述 $Ba_{1-x}K_x(Zn_{1-y}Mn_y)_2As_2$ 为 $Ba_{0.97}K_{0.03}(Zn_{0.95}Mn_{0.05})_2As_2$ 、 $Ba_{0.92}K_{0.08}(Zn_{0.95}Mn_{0.05})_2As_2$ 或 $Ba_{0.92}K_{0.08}(Zn_{0.85}Mn_{0.15})_2As_2$ 。

[0009] 优选地,在本发明所述的异质结中,所述 $Ba(Fe_{1-z}Co_z)_2As_2$ 为 $Ba(Fe_{0.92}Co_{0.08})_2As_2$ 。 $Ba(Fe_{0.92}Co_{0.08})_2As_2$ 比文章(Scientific Reports 7,14473(2017))中使用的常规超导体的超导转变温度高出10K以上,进而使得本发明的异质结的应用温度有大幅度的提高。

[0010] 另一方面,本发明提供一种制备本发明的异质结的方法,其包括如下步骤:

[0011] (1) 将多晶磁性半导体靶材与多晶超导体靶材同时放置在脉冲激光沉积系统的真空腔室内;

[0012] (2) 将基片固定在基片台上,并将所述基片台放入所述真空腔室内;

[0013] (3) 利用脉冲激光沉积方法在所述基片上生长外延的超导体薄膜;

[0014] (4) 在步骤(3)生长得到的外延的超导体薄膜上,利用脉冲激光沉积方法生长外延的磁性半导体薄膜,如此制得异质结。

[0015] 优选地,在本发明所述的方法中,所述多晶磁性半导体靶材的组成由以下化学式表示: $Ba_{1-m}K_m(Zn_{1-y}Mn_y)_2As_2$,所述外延的磁性半导体薄膜的组成由以下化学式表示: $Ba_{1-x}K_x(Zn_{1-y}Mn_y)_2As_2$,其中 $m=0.2-0.3$, $x=0.03-0.08$, $y=0.05-0.15$;和

[0016] 所述多晶超导体靶材的组成由以下化学式表示: $Ba(Fe_{1-z}Co_z)_2As_2$,所述外延的超导体薄膜的组成由以下化学式表示: $Ba(Fe_{1-z}Co_z)_2As_2$,其中 $z=0.05-0.15$ 。

[0017] 本发明人发现,在本发明的方法中,靶材 $Ba_{1-m}K_m(Zn_{1-y}Mn_y)_2As_2$ 经脉冲激光沉积形成薄膜 $Ba_{1-x}K_x(Zn_{1-y}Mn_y)_2As_2$ 的过程中,K的比例会有所降低,而其他元素Zn、Mn、As的比例保持不变。不希望受限于理论,认为这是由于K的饱和蒸汽压比靶材 $Ba_{1-m}K_m(Zn_{1-y}Mn_y)_2As_2$ 中的其它元素的饱和蒸气压高,导致在薄膜沉积时,K元素从靶材到衬底的运输过程中会有流失。靶材 $Ba(Fe_{1-z}Co_z)_2As_2$ 经脉冲激光沉积形成薄膜 $Ba(Fe_{1-z}Co_z)_2As_2$ 的过程中,各金属元素比例保持一致。

[0018] 优选地,在本发明所述的方法中,所述步骤(3)中的生长外延的超导体薄膜是在基片温度为 T_1 的条件下进行的;所述步骤(4)中的生长外延的磁性半导体薄膜是在基片温度为 T_2 的条件下进行的;其中, $T_1-T_2>100^\circ C$ 。

[0019] 优选地,在本发明所述的方法中,由 T_1 降温至 T_2 是在降温速率为 $20-30^\circ C/min$ 的条件下直接降温进行的,或者是在 T_1 自然冷却至室温,然后再以 $10-20^\circ C/min$ 的加热速率由室温加热至 T_2 的条件下间接进行的。

[0020] 优选地,在本发明所述的方法中,所述步骤(3)中的生长外延的超导体薄膜是在如下条件下进行的:

[0021] 基片温度为 $700-800^\circ C$,靶材和基片之间的距离为 $3-5cm$,真空腔室内的气压为 $2 \times 10^{-5}-3 \times 10^{-5}Pa$ 。

[0022] 优选地,在本发明所述的方法中,所述步骤(4)中的生长外延的磁性半导体薄膜是在如下条件下进行的:

[0023] 基片温度为 $500-600^\circ C$,靶材和基片之间距离为 $2-4cm$,气压为 $2 \times 10^{-5}Pa-10Pa$ 。

[0024] 优选地,在本发明所述的方法中,所述步骤(4)之后还包括如下步骤:

[0025] (5) 通入Ar气至所述真空腔室的气压达到 $0.1-0.8$ 个大气压,将基片降温至 $250-350^\circ C$,并保持 $20-40min$,然后自然冷却到室温。

[0026] 优选地,在本发明所述的方法中,所述步骤(3)中的利用脉冲激光沉积方法在所述基片上生长外延的超导体薄膜之前还包括如下步骤:用挡板挡住基片,用脉冲激光预溅射多晶超导体靶材表面,其中,脉冲数为 $500-1000$ 个。

[0027] 优选地,在本发明所述的方法中,所述步骤(4)中的利用脉冲激光沉积方法生长外延的磁性半导体薄膜之前还包括如下步骤:用挡板挡住基片,用脉冲激光预溅射多晶磁性

半导体靶材表面,其中,脉冲数为500-1000个。

[0028] 优选地,在本发明所述的方法中,所述基片是(001)取向的 SrTiO_3 单晶基片、(001)取向的 $(\text{La}_{0.272}\text{Sr}_{0.728})(\text{Al}_{0.648}\text{Ta}_{0.352})\text{O}_3$ (LSAT)单晶基片或(001)取向的 LaAlO_3 单晶基片。

[0029] 在本发明方法的一个优选实施方案中,本发明的异质结的制备方法包括如下步骤:

[0030] (1) 将多晶靶材 $\text{Ba}_{1-m}\text{K}_m(\text{Zn}_{1-y}\text{Mn}_y)_2\text{As}_2$ 和 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-z}\text{Co}_z)_2\text{As}_2$ 同时放置在脉冲激光沉积系统的真空腔室内,其中 $m=0.2-0.3$, $y=0.05-0.15$, $z=0.05-0.15$;

[0031] (2) 将基片固定在基片台上,并将所述基片台放入所述真空腔室内;

[0032] (3) 利用脉冲激光沉积方法在所述基片上生长外延的 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-z}\text{Co}_z)_2\text{As}_2$ 薄膜;

[0033] (4) 在步骤(3)生长得到的外延的 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-z}\text{Co}_z)_2\text{As}_2$ 薄膜上,利用脉冲激光沉积方法生长外延的 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x(\text{Zn}_{1-y}\text{Mn}_y)_2\text{As}_2$ 薄膜,如此制得异质结。

[0034] 在本发明的方法中,关于脉冲激光沉积系统的大致介绍可以参见Willmott等人的文章(*Rev. Mod. Phys.* 72, 315 (2000)), 该文章的内容通过引用并入本文。

[0035] 理想情况下,晶体由全同的原子团在空间上无限重复排列构成。这些原子团基元在数学上可以抽象为几何点,而这些点的集合被称作晶格。晶格可以通过平移操作或者点对称操作与其自身重合,同时涵盖平移对称操作和点对称操作的集合,被称作空间群,共有230种。例如,在晶体学开放数据库(Crystallography Open Database, COD)有超过45万条记录,它们其中任意一种结构的空间群,必然属于230种其中的一种,本发明讨论的两种物质的晶格结构所属的空间群均是第139号空间群,用符号 $I4/mmm$ 表示,满足的对称操作主要有c轴方向的4重对称,沿a轴、b轴和沿二者对角线方向的2重对称,以及沿a、b轴构成的平面的镜面对称。满足此空间群的材料也有很多种,比如铜氧化物超导体 $\text{Bi}_{2.1}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (*J. Phys. Soc. Japan*, 72, 2924 (2003))、锰氧化物庞磁电阻(Colossal Magnetoresistance, CMR)材料 $\text{Sr}_{1.50}\text{La}_{0.50}\text{MnO}_4$ (*Mater. Res. Bull.*, 16, 855 (1981))。本发明涉及到的两种物质的晶格结构也为同一种结构,参见附图1,结构的化学分子式可以写成 AB_2C_2 ,其代表物质有 ThCr_2Si_2 等。第一种情况,A原子为Ba,B原子为Fe,C原子为As,而Fe为又可以使用Co元素掺杂,则为铁基超导体 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-z}\text{Co}_z)_2\text{As}_2$;第二种情况,A原子、C原子依然为Ba和As,B原子换为Zn,同时,Ba使用K掺杂,Zn使用Mn掺杂,则有磁性半导体 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x(\text{Zn}_{1-y}\text{Mn}_y)_2\text{As}_2$ 。而磁性半导体 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x(\text{Zn}_{1-y}\text{Mn}_y)_2\text{As}_2$ 面内晶格常数约为0.412-0.413nm, $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-z}\text{Co}_z)_2\text{As}_2$ 的面内晶格常数约为0.396nm,两者之间的晶格失配率小于5%。通过外延生长的方法制备上述两种材料构成的安德烈夫界面,它的两边是同一结构,且薄膜生长应力可以在很薄的区域得到释放,所以如此形成的安德烈夫界面,其界面散射长度的无量纲因子 Z (*Phys. Rev. B* 25, 4515 (1982))趋近于零,这会极大地降低界面散射,进而有助于获得完全自旋极化的自旋流。

[0036] 本发明具有如下有益效果:

[0037] 本发明的方法能够制备出高质量的单相、c-取向外延的自旋、电荷掺杂分离的磁性半导体薄膜 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x(\text{Zn}_{1-y}\text{Mn}_y)_2\text{As}_2$ 和高温铁基超导体薄膜 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-z}\text{Co}_z)_2\text{As}_2$ 。

[0038] 本发明的异质结为同构异质外延,构成异质结的铁基超导体与磁性半导体具有相同的空间群、相同的晶格结构,具有相近的面内晶格常数,又同为单相、c取向外延生长,所以形成的安德烈夫界面的界面散射长度趋于零。此外,本发明的超导体薄膜为高温铁基超导体,超导临界温度(T_c)大于20K。本发明可以稳定可重复地通过换靶、调控生长工艺等方

法调整异质结的化学组分。因此,本发明提供的异质结在测量磁性半导体的自旋极化率、获得完全自旋极化的自旋流等方面具有应用潜力。

附图说明

[0039] 以下,结合附图来详细说明本发明的实施方案,其中:

[0040] 图1为构成本发明异质结的两种物质共同的结构示意图。

[0041] 图2(a)为根据本发明的实施例1-4所制备的异质结的X射线衍射全谱图。

[0042] 图2(b)为图2(a)在局部角度内的放大。

[0043] 图3为根据本发明的实施例1所制备的异质结与磁性半导体薄膜 $Ba_{1-x}K_x(Zn_{1-y}Mn_y)_2As_2$ 和铁基超导体薄膜 $Ba(Fe_{1-z}Co_z)_2As_2$ 的X射线衍射在某一角度范围内的比较图。

[0044] 图4为本发明实例1-4使用的超导体薄膜的电阻率温度曲线。

具体实施方式

[0045] 下面结合具体实施方式对本发明进行进一步的详细描述,给出的实施例仅为了阐明本发明,而不是为了限制本发明的范围。

[0046] 实施例1

[0047] (1) 准备 $Ba_{0.7}K_{0.3}(Zn_{0.95}Mn_{0.05})_2As_2$ 靶材(多晶)和 $Ba(Fe_{0.92}Co_{0.08})_2As_2$ 靶材(多晶),并将它们同时固定在靶材支架上,然后将靶材支架装入脉冲激光沉积系统的真空腔室中。

[0048] (2) 准备(001)取向的 $SrTiO_3$ 单晶基片(衬底1),先后使用丙酮和酒精超声清洗5分钟,再使用压缩氮气吹干后固定在基片台上,然后将基片台放入真空腔室,靶材和基片的距离控制在3cm左右。

[0049] (3) 打开多级真空泵,当腔室的真空度优于 $2 \times 10^{-6} Pa$ 时,开始加热基片台,以 $25^\circ C/min$ 的升温速率,将基片温度加热至 $760^\circ C$ 。

[0050] (4) 当真空腔室真空度优于 $2 \times 10^{-5} Pa$ 时,一开始使用挡板挡住基片,调整靶材支架,使得 $Ba(Fe_{0.92}Co_{0.08})_2As_2$ 靶材在基片的正下方,然后用脉冲激光预溅射靶材表面,脉冲数约为1000个。

[0051] (5) 移开挡板,开始用脉冲激光沉积方法在基片上生长薄膜,沉积脉冲数为1800个。

[0052] (6) 薄膜生长完成后,控制加热器,使得基片以 $22^\circ C/min$ 每分钟的速度降温至 $540^\circ C$ 。

[0053] (7) 调整靶材支架,使得 $Ba_{0.7}K_{0.3}(Zn_{0.95}Mn_{0.05})_2As_2$ 靶材在基片的正下方,下移靶材和基片的距离至3cm左右,然后用脉冲激光预溅射靶材表面,脉冲数约为500个。

[0054] (8) 移开挡板,开始用脉冲激光沉积方法在基片上生长薄膜,沉积脉冲数为1800个。

[0055] (9) 薄膜生长完后,通入Ar气至真空腔室气压为0.2个大气压,以 $10^\circ C/min$ 的降温速率使基片温度降至 $300^\circ C$,并保持30min,然后关闭加热器,使基片自然冷却到室温。

[0056] 本实施例制得的异质结由外延的 $Ba_{0.97}K_{0.03}(Zn_{0.95}Mn_{0.05})_2As_2$ 磁性半导体薄膜与外延的 $Ba(Fe_{0.92}Co_{0.08})_2As_2$ 超导体薄膜构成。

[0057] 实施例2

[0058] (1) 准备 $\text{Ba}_{0.7}\text{K}_{0.3}(\text{Zn}_{0.95}\text{Mn}_{0.05})_2\text{As}_2$ 靶材(多晶)和 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ 靶材(多晶),并将它们同时固定在靶材支架上,然后将靶材支架装入脉冲激光沉积系统的真空腔室中。

[0059] (2) 准备(001)取向的 $(\text{La}_{0.272}\text{Sr}_{0.728})(\text{Al}_{0.648}\text{Ta}_{0.352})\text{O}_3$ 单晶基片(衬底2),先后使用丙酮和酒精超声清洗5分钟,再使用压缩氮气吹干后固定在基片台上,然后将基片台放入真空腔室,靶材和基片的距离控制在3cm左右。

[0060] (3) 打开多级真空泵,当腔室的真空度优于 $2 \times 10^{-6}\text{Pa}$ 时,开始加热基片台,以 $25^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率,将基片温度加热至 740°C 。

[0061] (4) 当真空腔室真空度优于 $2 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 时,一开始使用挡板挡住基片,调整靶材支架,使得 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ 靶材在基片的正下方,然后用脉冲激光预溅射靶材表面,脉冲数约为1000个。

[0062] (5) 移开挡板,开始用脉冲激光沉积方法在基片上生长薄膜,沉积脉冲数为1800个。

[0063] (6) 薄膜生长完成后,关闭加热器,使得基片自然冷却至室温。

[0064] (7) 调整靶材支架,使得 $\text{Ba}_{0.7}\text{K}_{0.3}(\text{Zn}_{0.95}\text{Mn}_{0.05})_2\text{As}_2$ 靶材在基片的正下方,下移靶材和基片的距离至3cm左右,然后用脉冲激光预溅射靶材表面,脉冲数约为1000个。

[0065] (8) 以 $15^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率,将基片温度加热至 520°C ,移开挡板,开始用脉冲激光沉积方法在基片上生长薄膜,脉冲数为1800个。

[0066] (9) 薄膜生长完后,通入Ar气至真空腔室气压为0.2个大气压,以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的降温速率使基片温度降至 300°C ,并保持30min,然后关闭加热器,使基片自然冷却到室温。

[0067] 本实施例制得的异质结由外延的 $\text{Ba}_{0.97}\text{K}_{0.03}(\text{Zn}_{0.95}\text{Mn}_{0.05})_2\text{As}_2$ 磁性半导体薄膜与外延的 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ 超导体薄膜构成。

[0068] 实施例3

[0069] (1) 准备 $\text{Ba}_{0.7}\text{K}_{0.3}(\text{Zn}_{0.95}\text{Mn}_{0.05})_2\text{As}_2$ 靶材(多晶)和 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ 靶材(多晶),并将它们同时固定在靶材支架上,然后将靶材支架装入脉冲激光沉积系统的真空腔室中。

[0070] (2) 准备(001)取向的 SrTiO_3 单晶基片(衬底1),先后使用丙酮和酒精超声清洗5分钟,再使用压缩氮气吹干后固定在基片台上,然后将基片台放入真空腔室,靶材和基片的距离控制在3cm左右。

[0071] (3) 打开多级真空泵,当腔室的真空度优于 $2 \times 10^{-6}\text{Pa}$ 时,开始加热基片台,以 $25^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率,将基片温度加热至 760°C 。

[0072] (4) 当真空腔室真空度优于 $2 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 时,一开始使用挡板挡住基片,调整靶材支架,使得 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ 靶材在基片的正下方,然后用脉冲激光预溅射靶材表面,脉冲数约为1000个。

[0073] (5) 移开挡板,开始用脉冲激光沉积方法在基片上生长薄膜,沉积脉冲数为600个。

[0074] (6) 薄膜生长完成后,关闭加热器,使得基片自然冷却至室温。

[0075] (7) 调整靶材支架,使得 $\text{Ba}_{0.7}\text{K}_{0.3}(\text{Zn}_{0.95}\text{Mn}_{0.05})_2\text{As}_2$ 靶材在基片的正下方,下移靶材和基片的距离至2cm左右,然后用脉冲激光预溅射靶材表面,脉冲数约为1000个。

[0076] (8) 关闭腔室与真空泵的阀门,通过充气系统通入Ar气至腔室的气压为5Pa,使用脉冲激光沉积方法在基片上生长薄膜,沉积脉冲数为1800个。

[0077] (9) 薄膜生长完后,通入Ar气至真空腔室气压为0.2个大气压,以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的降温

速率使基片温度降至300℃,并保持30min,然后关闭加热器,使基片自然冷却到室温。

[0078] 本实施例制得的异质结由外延的 $\text{Ba}_{0.92}\text{K}_{0.08}(\text{Zn}_{0.95}\text{Mn}_{0.05})_2\text{As}_2$ 磁性半导体薄膜与外延的 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ 超导体薄膜构成。

[0079] 实施例4

[0080] (1) 准备 $\text{Ba}_{0.7}\text{K}_{0.3}(\text{Zn}_{0.85}\text{Mn}_{0.15})_2\text{As}_2$ 靶材(多晶)和 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ 靶材(多晶),并将它们同时固定在靶材支架上,然后将靶材支架装入脉冲激光沉积系统的真空腔室中。

[0081] (2) 准备(001)取向的 SrTiO_3 单晶基片(衬底1),先后使用丙酮和酒精超声清洗5分钟,再使用压缩氮气吹干后固定在基片台上,然后将基片台放入真空腔室,靶材和基片的距离控制在3cm左右。

[0082] (3) 打开多级真空泵,当腔室的真空度优于 2×10^{-6} Pa时,开始加热基片台,以25℃/min的升温速率,将基片温度加热至760℃。

[0083] (4) 当真空腔室真空度优于 2×10^{-5} Pa时,一开始使用挡板挡住基片,调整靶材支架,使得 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ 靶材在基片的正下方,然后用脉冲激光预溅射靶材表面,脉冲数约为1000个。

[0084] (5) 移开挡板,开始用脉冲激光沉积方法在基片上生长薄膜,沉积脉冲数为1200个。

[0085] (6) 薄膜生长完成后,关闭加热器,使得基片自然冷却至室温。

[0086] (7) 调整靶材支架,使得 $\text{Ba}_{0.7}\text{K}_{0.3}(\text{Zn}_{0.85}\text{Mn}_{0.15})_2\text{As}_2$ 靶材在基片的正下方,下移靶材和基片的距离至2cm左右,然后用脉冲激光预溅射靶材表面,脉冲数约为1000个。

[0087] (8) 关闭腔室与真空系统的阀门,通过充气系统通入Ar气至腔室的气压为6Pa,使用脉冲激光沉积方法在基片上生长薄膜,沉积脉冲数为1800个。

[0088] (9) 薄膜生长完后,通入Ar气至真空腔室气压为0.2个大气压,以10℃/min的降温速率使基片温度降至300℃,并保持30min,然后关闭加热器,使基片自然冷却到室温。

[0089] 本实施例制得的异质结由外延的 $\text{Ba}_{0.92}\text{K}_{0.08}(\text{Zn}_{0.85}\text{Mn}_{0.15})_2\text{As}_2$ 磁性半导体薄膜与外延的 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ 超导体薄膜构成。

[0090] 图1为构成本发明异质结的两种材料的晶格结构示意图,满足空间群I4/mmm,一般化学式为 AB_2C_2 。

[0091] 图2(a)为根据本发明的实施例1-4所制备的异质结的X射线衍射全谱图。图2(b)为图2(a)的异质结(004)衍射峰附近区间的放大图。图2(a)示出了4个实施例的X射线衍射图谱,图谱中可以看到,所有的实施例异质结的两个构成部分都是单向、c方向外延(衍射峰有且仅有(00L)衍射峰)。图2(a)中的虚线标记了衬底1的(003)衍射峰的峰位,可以看到4个实施例中包含了两种衬底。图2(b)中标记出来了不同实施例的磁性半导体薄膜的(004)衍射峰的峰位情况,它们的峰位关系符合单一层磁性半导体薄膜的峰位同组分的关系(AIP Advance 7,045017(2017)),另外,相同组分的超导薄膜表现出不同的衍射峰峰位,这涉及到衬底对不同厚度超导体薄膜晶格参数调控的问题,这里不作讨论。以上,可以看到在较大的成份区域内,多种单晶衬底下,同构外延的异质结都是可以制备成功的。

[0092] 图3为根据本发明的实施例1所制备的异质结与磁性半导体 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x(\text{Zn}_{1-y}\text{Mn}_y)_2\text{As}_2$ 薄膜和铁基超导体 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-z}\text{Co}_z)_2\text{As}_2$ ($z=0.08$)薄膜的X射线衍射在某一角度范围内的比较图。图3示出了异质结在(004)衍射峰附件的双衍射峰,及双衍射峰与单独的磁性半导体薄

膜衍射峰、单独铁基超导体薄膜衍射峰的峰位比较,可以看到,异质结的两端依然保持和单一层薄膜一致的晶格参数,保证了异质结两端材料物理性质的稳定不变,另外,也说明了异质结确实为同构异质外延。

[0093] 图4为本发明中使用的铁基超导体 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-z}\text{Co}_z)_2\text{As}_2$ ($z=0.08$) 薄膜的电阻率温度曲线。图4示出了此异质结中所使用的为具有较高铁磁转变温度的超导体的超导转变温度, T_c^0 (完全进入超导的温度) 约为18.9K, T_c^{onset} (开始进入超导的温度) 约为23.4K, 这比文章 (Scientific Reports 7,14473 (2017)) 中使用的常规超导体的超导转变温度高出10K以上, 进而使得本发明的异质结的应用温度有大幅度的提高。

[0094] 最后所应说明的是, 以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制。尽管参照实施例对本发明进行了详细说明, 本领域的普通技术人员应当理解, 对本发明的技术方案进行修改或者等同替换, 都不脱离本发明技术方案的精神和范围, 其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

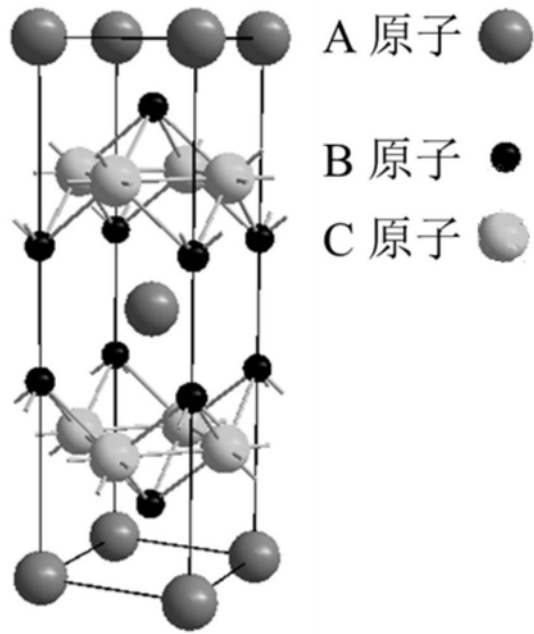


图1

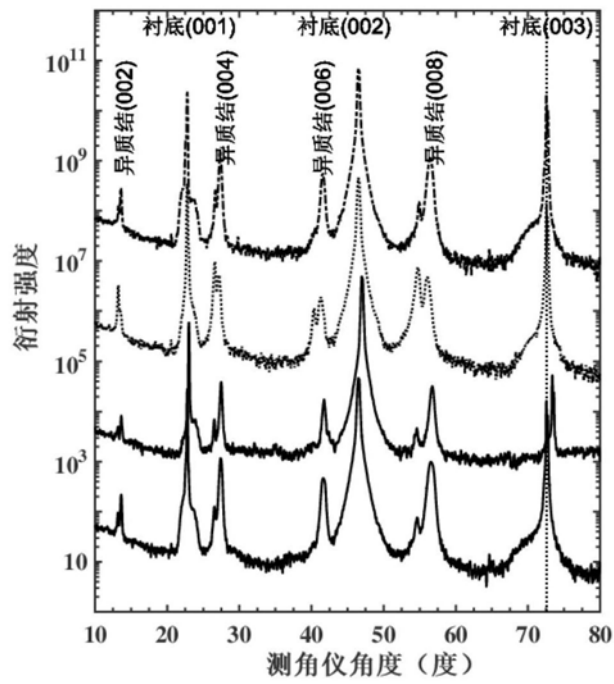


图2(a)

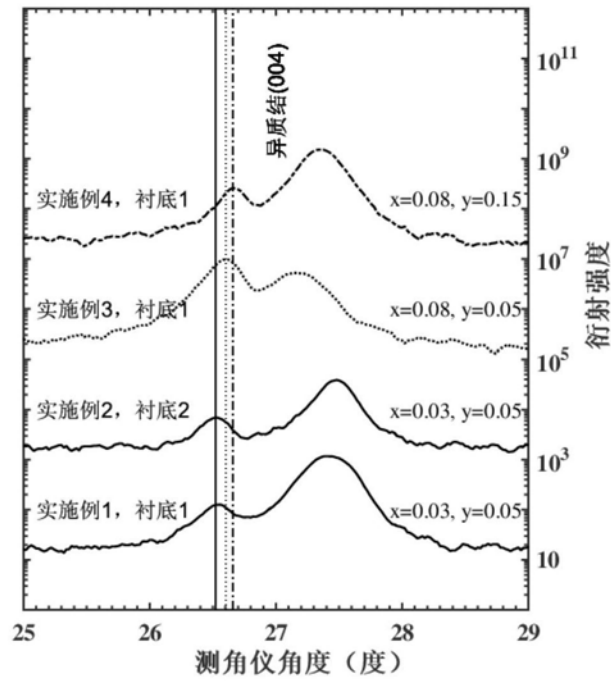


图2 (b)

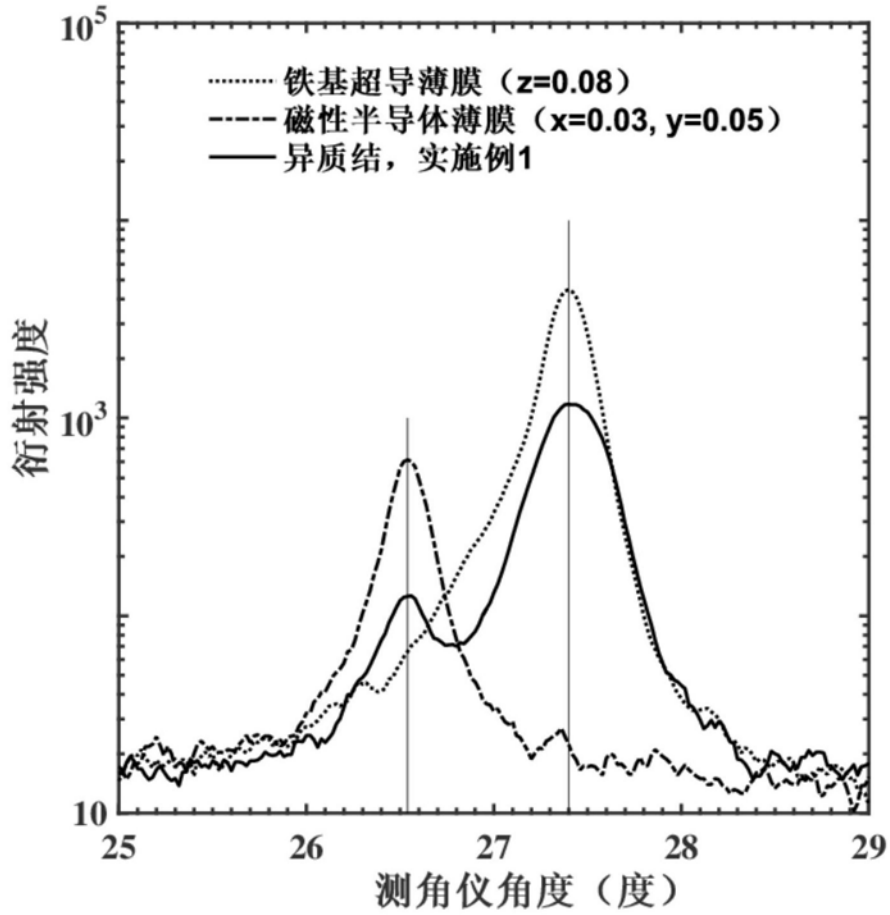


图3

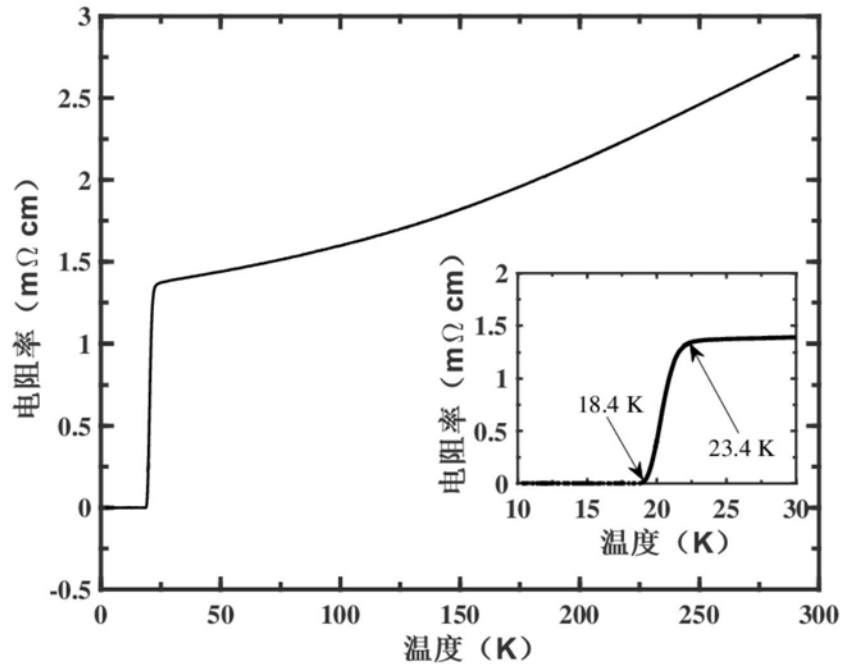


图4