



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115207132 B

(45) 授权公告日 2025. 11. 14

(21) 申请号 202210515489.0

H10D 30/01 (2025.01)

(22) 申请日 2022.05.12

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 111933793 A, 2020.11.13

申请公布号 CN 115207132 A

CN 114164484 A, 2022.03.11

(43) 申请公布日 2022.10.18

谢冯俊. 基于 PEO/LiClO4 固态电解质的二维 MoS2 双电层晶体管的制备与性能研究. 基于 PEO/LiClO4 固态电解质的二维 MoS2 双电层晶体管的制备与性能研究. 2022, 22-40.

(73) 专利权人 香港理工大学深圳研究院

地址 518057 广东省深圳市南山区粤海街道高新技术产业园南区粤兴一道18号
香港理工大学产学研大楼205室

审查员 刘立平

(72) 发明人 柴扬 陈杰威

(74) 专利代理机构 深圳市君胜知识产权代理事

务所(普通合伙) 44268

专利代理师 庄敏芳 谢松

(51) Int. Cl.

H10D 30/67 (2025.01)

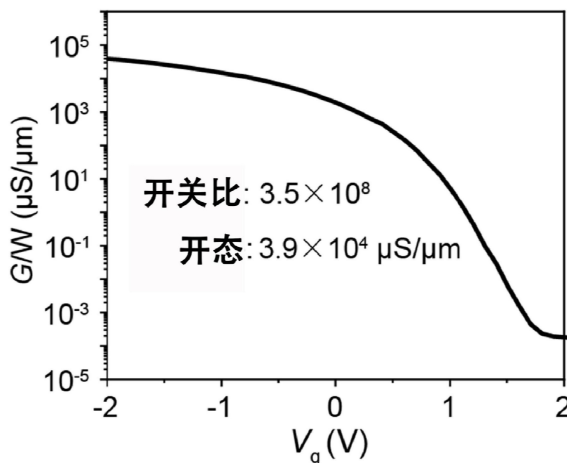
权利要求书1页 说明书6页 附图5页

(54) 发明名称

一种基于外尔半导体的拓扑相变晶体管及制备方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于外尔半导体的拓扑相变晶体管及制备方法,晶体管包括:外尔半导体层;源极,设置于所述外尔半导体层;漏极,设置于所述外尔半导体层,与所述源极间隔设置;栅极,与所述外尔半导体层连接;其中,在所述栅极的静电调控下所述外尔半导体层拓扑相变,以使所述基于外尔半导体的拓扑相变晶体管呈开态或关态。本发明利用外尔半导体的贝利曲率和对应的陈数可调特性,实现了陈数为0的传统半导体和陈数为1的拓扑半金属间的拓扑相变。实现具低功耗和高性能的场效应晶体管。通过静电调控,实现了 10^8 开关比和39毫西门子每微米的开态电导。



1. 一种基于外尔半导体的拓扑相变晶体管,其特征在于,包括:
外尔半导体层,所述外尔半导体作为沟道层,所述外尔半导体层为碲烯片;
源极,设置于所述外尔半导体层;
漏极,设置于所述外尔半导体层,与所述源极间隔设置;
栅极,与所述外尔半导体层连接;
第一电极和第二电极,所述第一电极和所述第二电极均位于所述源极和所述漏极之间;

其中,所述第一电极和所述第二电极均具有与所述外尔半导体层的能带匹配的功函数;所述源极和所述漏极均具有与所述外尔半导体层的能带匹配的功函数;所述栅极通过栅介质与所述外尔半导体层连接;所述栅介质与所述外尔半导体层上所述源极和所述漏极之间区域连接;在所述栅极的静电调控下所述外尔半导体层拓扑相变,所述沟道层的表面形成超薄的双电层,以使所述基于外尔半导体的拓扑相变晶体管呈开态或关态。

2. 根据权利要求1所述的基于外尔半导体的拓扑相变晶体管,其特征在于,所述栅介质包括固态电介质或液态离子电介质;和/或

所述栅介质的可调控 10^{13}cm^{-2} 级别载流子浓度。

3. 根据权利要求2所述的基于外尔半导体的拓扑相变晶体管,其特征在于,所述液态离子电介质为DEME-TSFI;

所述固态电介质为PEO/LiClO₄。

4. 根据权利要求1所述的基于外尔半导体的拓扑相变晶体管,其特征在于,所述栅极为背栅、顶栅或侧栅;和/或

所述基于外尔半导体的拓扑相变晶体管还包括:

衬底,所述外尔半导体层设置于所述衬底上。

5. 根据权利要求4所述的基于外尔半导体的拓扑相变晶体管,其特征在于,所述衬底包括固态电介质。

6. 一种如权利要求1-5任意一项所述的基于外尔半导体的拓扑相变晶体管的制备方法,其特征在于,

制备外尔半导体层;

在所述外尔半导体层上制备源极、漏极以及栅极;所述外尔半导体层为碲烯片;所述外尔半导体层采用水热法或气相生长法制备得到;所述栅极通过栅介质与所述外尔半导体层连接;

在所述外尔半导体层和所述栅极上制备栅介质。

7. 根据权利要求6所述的基于外尔半导体的拓扑相变晶体管的制备方法,其特征在于,所述在所述外尔半导体层上制备源极、漏极以及栅极,包括:

在所述外尔半导体层上利用电子束光刻技术来曝光得到电极图案;

采用热蒸发技术制备源极、漏极以及栅极,并去除电极图案。

一种基于外尔半导体的拓扑相变晶体管及制备方法

技术领域

[0001] 本发明涉及半导体技术领域,尤其涉及的是一种基于外尔半导体的拓扑相变晶体管及制备方法。

背景技术

[0002] 场效应晶体管是现代半导体器件的基本元件。传统基于电荷输运机制的场效应晶体管,其开态和关态的转换,是通过静电调控下沟道载流子的积累和耗尽来实现的。由于载流子散射,传统半导体的电荷型晶体管在工作过程中往往有较多的能量以热能的形式耗散掉,特别是高开态电流的时候。

[0003] 金属-绝缘体相变晶体管是一种基于电荷输运机制的器件。金属-绝缘体相变是指材料在电场、压力等作用下,发生金属与绝缘相间的转变。在这个转变过程中,电阻率会发生明显的突变,从而可以用于高性能场效应晶体管。然而,由于金属-绝缘体相变晶体管仍然是依赖于欧姆输运机制,在高开态电流的时候,热耗散高,静态功耗大。

[0004] 现有技术中,理想的场效应晶体管是同时具备极高的性能和能耗效率,但传统电荷欧姆输运机制的场效应晶体管会面临短沟道效应等问题,难以同时实现高性能和低能耗。

[0005] 因此,现有技术还有待于改进和发展。

发明内容

[0006] 本发明要解决的技术问题在于,针对现有技术的上述缺陷,提供一种基于外尔半导体的拓扑相变晶体管及制备方法,旨在解决现有技术中场效应晶体管难以兼容高性能和低能耗的问题。

[0007] 本发明解决技术问题所采用的技术方案如下:

[0008] 一种基于外尔半导体的拓扑相变晶体管,其中,包括:

[0009] 外尔半导体层;

[0010] 源极,设置于所述外尔半导体层;

[0011] 漏极,设置于所述外尔半导体层,与所述源极间隔设置;

[0012] 栅极,与所述外尔半导体层连接;

[0013] 其中,在所述栅极的静电调控下所述外尔半导体层拓扑相变,以使所述基于外尔半导体的拓扑相变晶体管呈开态或关态。

[0014] 所述的基于外尔半导体的拓扑相变晶体管,其中,所述栅极通过栅介质与所述外尔半导体层连接;

[0015] 所述栅介质与所述外尔半导体层上所述源极和所述漏极之间区域连接。

[0016] 所述的基于外尔半导体的拓扑相变晶体管,其中,所述外尔半导体层为碲烯片;和/或

[0017] 所述栅介质包括固态电介质或液态离子电介质;和/或

- [0018] 所述栅介质的可调控 10^{13}cm^{-2} 级别载流子浓度。
- [0019] 所述的基于外尔半导体的拓扑相变晶体管,其中,所述液态离子电介质为DEME-TSFI;
- [0020] 所述固态电介质为PEO/LiClO₄。
- [0021] 所述的基于外尔半导体的拓扑相变晶体管,其中,所述栅极为背栅、顶栅或侧栅;和/或
- [0022] 所述源极和所述漏极均具有与所述外尔半导体层的能带匹配的功函数;和/或
- [0023] 所述基于外尔半导体的拓扑相变晶体管还包括:
- [0024] 第一电极和第二电极,所述第一电极和所述第二电极均位于所述源极和所述漏极之间;和/或
- [0025] 所述基于外尔半导体的拓扑相变晶体管还包括:
- [0026] 衬底,所述外尔半导体层设置于所述衬底上。
- [0027] 所述的基于外尔半导体的拓扑相变晶体管,其中,所述第一电极和所述第二电极均具有与所述外尔半导体层的能带匹配的功函数;和/或
- [0028] 所述衬底包括固态电介质。
- [0029] 一种基于外尔半导体的拓扑相变晶体管的制备方法,其中,
- [0030] 制备外尔半导体层;
- [0031] 在所述外尔半导体层上制备源极、漏极以及栅极。
- [0032] 所述的基于外尔半导体的拓扑相变晶体管的制备方法,其中,所述外尔半导体层采用水热法或气相生长法制备得到。
- [0033] 基于外尔半导体的拓扑相变晶体管的制备方法,其中,所述栅极通过栅介质与所述外尔半导体层连接;
- [0034] 所述制备方法还包括:
- [0035] 在所述外尔半导体层和所述栅极上制备栅介质。
- [0036] 基于外尔半导体的拓扑相变晶体管的制备方法,其中,所述在所述外尔半导体层上制备源极、漏极以及栅极,包括:
- [0037] 在所述外尔半导体层上利用电子束光刻技术来曝光得到电极图案;
- [0038] 采用热蒸发技术制备源极、漏极以及栅极,并去除电极图案。
- [0039] 有益效果:通过栅极的静电调控,外尔半导体可以出现拓扑相变,实现外尔半金属和常规半导体的转变,从而使得源极和所述漏极之间导通或断开。外尔半导体处于关态,表现出较小的电荷输运电流,且外尔半导体处于开态时,以拓扑输运占主导,因此,性能较高且功耗较低。

附图说明

- [0040] 图1a是本发明中外尔半导体层为传统半导体时的能带结构图。
- [0041] 图1b是本发明中外尔半导体层为外尔半金属时的能带结构图。
- [0042] 图2是外尔半导体碲烯在不同费米能级位置下的贝利曲率强度和陈数数,以及对栅调节下的相变。
- [0043] 图3为具体实施例一中拓扑相变晶体管与角度相关的磁阻特性。

- [0044] 图4为具体实施例二中拓扑相变晶体管与载流子密度相关的磁阻特性。
- [0045] 图5为具体实施例三中外尔半导体碲烯的栅压调控示意图。
- [0046] 图6为具体实施例三中样品的磁阻曲线。
- [0047] 图7为具体实施例四中基于外尔半导体的拓扑相变晶体管输出曲线。
- [0048] 图8为具体实施例四中基于外尔半导体的拓扑相变晶体管转移曲线。
- [0049] 附图标记说明：
- [0050] 1、源极；2、第一电极；3、第二电极；4、漏极；5、栅介质；6、栅极；7、外尔半导体层；8、衬底。

具体实施方式

[0051] 为使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚、明确，以下参照附图并举实施例对本发明进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

[0052] 请同时参阅图1a-图8，本发明提供了一种基于外尔半导体的拓扑相变晶体管的一些实施例。

[0053] 如图5所示，本发明的基于外尔半导体的拓扑相变晶体管，包括：

[0054] 外尔半导体层7；

[0055] 源极1，设置于所述外尔半导体层7；

[0056] 漏极4，设置于所述外尔半导体层7，与所述源极1间隔设置；

[0057] 栅极6，与所述外尔半导体层7连接；

[0058] 其中，在所述栅极6的静电调控下所述外尔半导体层7拓扑相变，以使所述基于外尔半导体的拓扑相变晶体管呈开态或关态。

[0059] 值得说明的是，外尔半导体是指具有外尔点的半导体，外尔半导体具有拓扑属性和半导体属性。外尔半导体作为沟道层，通过栅极6的静电调控，外尔半导体可以出现拓扑相变，实现外尔半金属和常规半导体的转变，从而使得源极1和所述漏极4之间导通或断开。利用现有技术中的拓扑半金属制备器件时，拓扑半金属处于开态，会带来较高的静态功耗。而本申请中外尔半导体处于关态（如图1a和图2所示）时，表现出较小的电荷输运电流，且外尔半导体处于开态（如图1b和图2所示）时，以拓扑输运占主导，因此，性能较高且功耗较低。

[0060] 具体地，材料的拓扑态与费米能级附近的能带结构密切相关，可以通过陈数来描述。贝利曲率可以看成是动量空间中的磁场，陈数是对贝利曲率进行积分得到的。所述外尔半导体层7在所述栅极6的静电调控下可调制所述外尔半导体层7的费米能级和外尔点之间的能量距离，并带来贝利曲率和陈数的变化，具体地，沟道可以表现出不同的贝利曲率，从而器件可以实现外尔半金属（陈数非0）和常规半导体（陈数=0）间的相变及输运特性。开态对应是拓扑输运占主导，关态则是通过将费米能级移到带隙中，在常规半导体中表现出较小的电荷输运（欧姆输运）电流。

[0061] 在本发明实施例的一个较佳实现方式中，如图5所示，所述栅极6通过栅介质5与所述外尔半导体层7连接；所述栅介质5与所述外尔半导体层7上所述源极1和所述漏极4之间区域连接。

[0062] 具体地，在栅极6和外尔半导体之间设置栅介质5，栅介质5的第一端连接在源极1

和漏极4之间的区域,栅介质5的第二端与栅极6连接。

[0063] 在本发明实施例的一个较佳实现方式中,所述外尔半导体层7为碲烯片。

[0064] 具体地,碲是一种窄能带半导体,由于空间反演对称性破缺以及相应的强自旋轨道耦合,在价带顶附近存在能带交叉的外尔点。本申请的外尔半导体采用碲烯片,当然还可以采用其它形貌和结构的碲材料。

[0065] 在本发明实施例的一个较佳实现方式中,所述栅介质5包括固态电介质或液态离子电介质。

[0066] 具体地,栅介质5可以采用高介电常数材料,例如,采用固态电介质或液态离子电介质。所述固态电介质可以为PEO/LiClO₄,所述液态离子电介质可以为DEME-TSFI(N,N-diethyl-N-(2-methoxyethyl)-N-methylammonium bis(trifluoromethylsulphonyl)imide)。

[0067] 在本发明实施例的一个较佳实现方式中,所述栅极6为背栅、顶栅或侧栅。

[0068] 具体地,栅极6的设置位置可以根据需要调整,可以采用背栅、顶栅或侧栅。如图5所示,栅极6采用侧栅。

[0069] 在本发明实施例的一个较佳实现方式中,所述栅介质5的可调控 10^{13}cm^{-2} 级别载流子浓度。

[0070] 具体地,静电调控方式可以通过背栅、顶栅或侧栅来施加,可以调控 10^{13}cm^{-2} 级别载流子浓度。

[0071] 在本发明实施例的一个较佳实现方式中,所述源极1和所述漏极4均具有与所述外尔半导体层7的能带匹配的功函数。

[0072] 具体地,采用与所述外尔半导体层7的能带匹配的功函数的源极1或漏极4时,有利于外尔半导体层7与源极1之间,或外尔半导体层7与漏极4之间的电连接。

[0073] 在本发明实施例的一个较佳实现方式中,如图5所示,所述基于外尔半导体的拓扑相变晶体管还包括:

[0074] 第一电极2和第二电极3,所述第一电极2和所述第二电极3均位于所述源极1和所述漏极4之间。

[0075] 具体地,晶体管的构型为2探针或4探针测电阻构型,采用2探针时,即采用源极1和漏极4;采用4探针时,在采用源极1和漏极4的基础上,设置第一电极2和第二电极3,且第一电极2和第二电极3位于源极1和漏极4之间。

[0076] 所述第一电极2和所述第二电极3均具有与所述外尔半导体层7的能带匹配的功函数。有利于第一电极2、第二电极3与外尔半导体层7之间的电连接。

[0077] 在本发明实施例的一个较佳实现方式中,如图5所示,所述基于外尔半导体的拓扑相变晶体管还包括:

[0078] 衬底8,所述外尔半导体层7设置于所述衬底8上。

[0079] 具体地,可以直接在衬底8上制备外尔半导体层7,也可以先制备外尔半导体层7,然后转移到衬底8上。所述衬底8包括固态电介质,例如,采用高介电常数的材料,衬底8可以采用硅衬底、蓝宝石衬底、碳化硅衬底、HfO₂衬底和Al₂O₃衬底中的至少一种。

[0080] 与现有基于欧姆输运机制的场效应晶体管相比,本发明具有以下有益效果:

[0081] (1) 本发明所采用的方法可以实现贝利曲率和陈数的调节。

[0082] (2) 本发明所采用的方法可以通过拓扑相变来实现开态电流是拓扑输运占主导, 而保持关态电流是电荷输运。

[0083] (3) 本发明所采用的方法可以实现同时兼顾高性能和低能耗。

[0084] 基于上述任意一实施例所述的基于外尔半导体的拓扑相变晶体管, 本发明还提供了一种基于外尔半导体的拓扑相变晶体管的制备方法的较佳实施例:

[0085] 本发明实施例的基于外尔半导体的拓扑相变晶体管的制备方法, 包括以下步骤:

[0086] 步骤S100、制备外尔半导体层。

[0087] 具体地, 所述外尔半导体层采用水热法或气相生长法制备得到。

[0088] 步骤S200、在所述外尔半导体层上制备源极、漏极以及栅极。

[0089] 具体地, 在所述外尔半导体层上制备源极、漏极以及栅极。需要说明的是, 源极、漏极以及栅极可以一次制备, 也可以先制备源极和漏极, 再制备栅极。

[0090] 具体地, 步骤S200包括:

[0091] 步骤S210、在所述外尔半导体层上利用电子束光刻技术来曝光得到电极图案。

[0092] 步骤S220、采用热蒸发技术制备源极、漏极以及栅极, 并去除电极图案。

[0093] 具体地, 在外尔半导体层上制备抗蚀剂, 并采用电子束曝光改变抗蚀剂的溶解性, 然后进行显影, 选择性去除曝光区域或未曝光区域, 得到电极图案。采用热蒸发的方式在电极图案上蒸发电极材料, 并去除电极图案后, 则可以在外尔半导体层上形成源极、漏极以及栅极。

[0094] 步骤S300、在所述外尔半导体层和所述栅极上制备栅介质。

[0095] 具体地, 可以采用滴加或覆盖的方式, 在外尔半导体上制备栅介质。

[0096] 具体实施例一

[0097] 通过水热方法制备碲烯片, 然后将其转移到具有30 nm厚的 HfO_2 衬底上。利用电子束光刻技术来曝光得到金属电极的图案, 并在在 3×10^{-7} 托的真空下, 以 0.3 \AA/s 的速率热蒸发Au (80nm) 制备金属电极。所制备图案是4探针构型, 并有侧栅电极。用Quantum Design的物理性质测量系统和Keithley 4200来进行电输运测量。

[0098] 图3为具体实施例一种拓扑相变晶体管与角度相关的磁阻特性。测试结果显示, 器件电阻具有很强的角度依赖特性, 可以由电磁场平行时候的负磁阻, 转变到电磁场垂直时候的磁阻。

[0099] 具体实施例二

[0100] 本实施例与具体实施例一不同的是, 制备了不同载流子浓度的材料作为栅介质, 并进行了系统的负磁阻特性研究。

[0101] 图4为具体实施例二中拓扑相变晶体管与载流子密度相关的磁阻特性。当电磁场平行时, 载流子浓度越高, 负磁阻值就越大。

[0102] 具体实施例三

[0103] 选用离子液体DEME-TSFI来调控器件。将一滴离子液体DEME-TSFI覆盖在碲烯片表面和侧栅电极上。侧电极和沟道之间的电压可以驱动离子的运动。然后, 将器件在 6×10^{-8} 托的高真空下保持24小时。为了实现有效的调控并避免损坏样品, 将初始调控温度设置为220 K, 接近离子液体DEME-TFSI的凝聚点。此时, 离子液体调控下造成的损伤效应可以忽略不计(例如, 表面电化学反应)。

[0104] 图5为具体实施例三中外尔半导体碲烯的栅压调控示意图。这里是侧栅调控结构,通过驱动沟道和侧栅电极间的电压,可以在沟道表面形成超薄的双电层。

[0105] 图6为具体实施例三中样品的磁阻曲线。在不同的栅压调控下,器件的调控率展现出很大的变化。

[0106] 具体实施例四

[0107] 本实施例与具体实施例三不同的是选用固态电解质PEO/LiClO₄来调控器件。通过将PEO和LiClO₄以9:1的质量比溶解在甲醇中,制备了PEO/LiClO₄。涂覆PEO/LiClO₄后,将样品在80°C下加热10分钟,以去除溶剂和水。测试温度设定为10 K。

[0108] 图7为具体实施例四中基于外尔半导体的拓扑相变晶体管输出曲线。拓扑相变晶体管展示出了类似传统电荷晶体管的输出曲线特性,可以被栅极电压有效调控。

[0109] 图8为具体实施例四中基于外尔半导体的拓扑相变晶体管转移曲线。我们制备的拓扑相变晶体管在低工作 $\leq 2V$ 的栅电压调控下显示出非常高的开/关比(10^8)和高电导(39 mS/m)。

[0110] 应当理解的是,本发明的应用不限于上述的举例,对本领域普通技术人员来说,可以根据上述说明加以改进或变换,所有这些改进和变换都应属于本发明所附权利要求的保护范围。

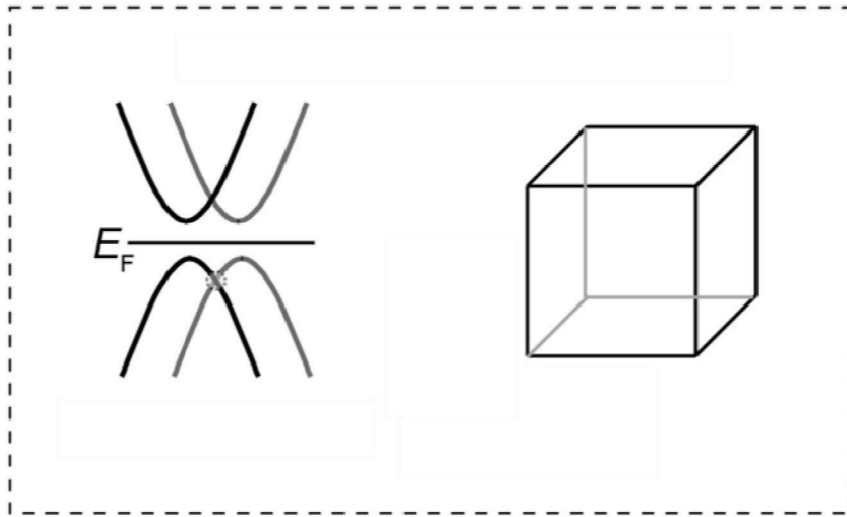


图1a

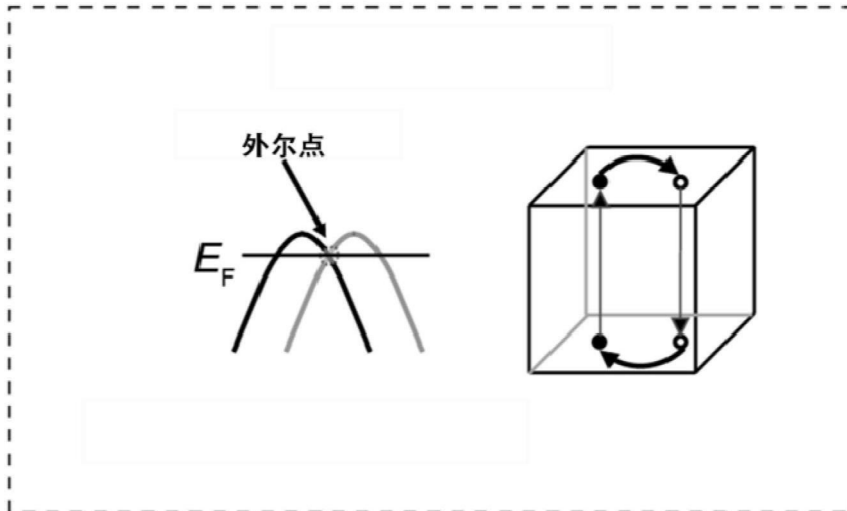


图1b

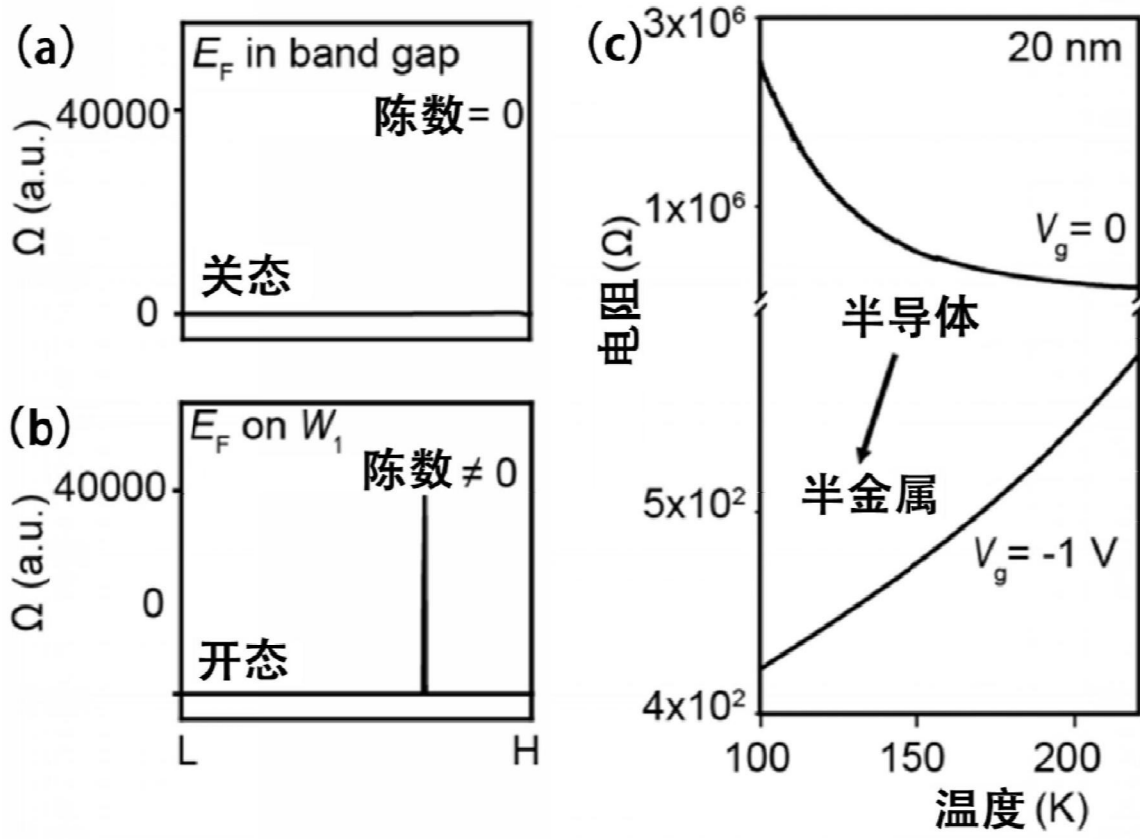


图2

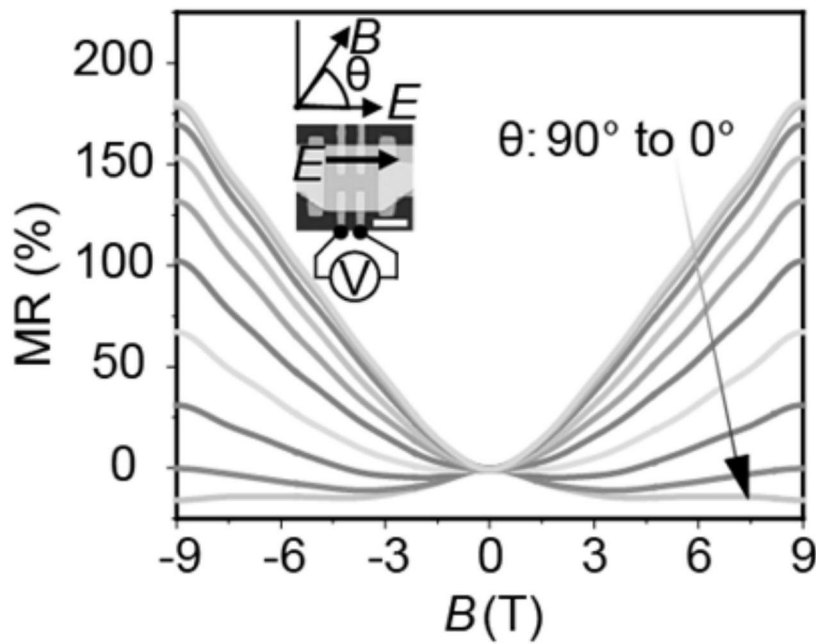


图3

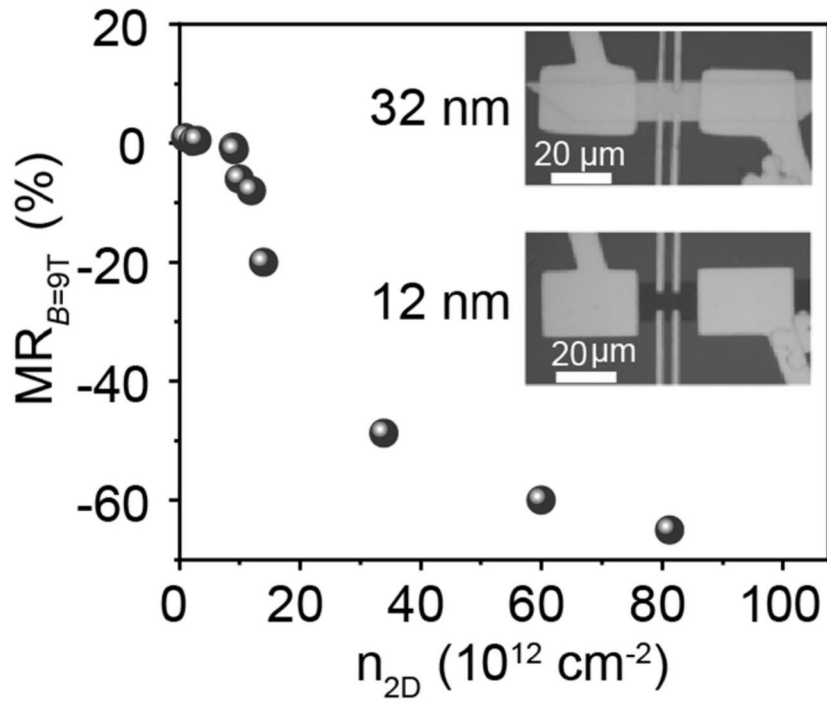


图4

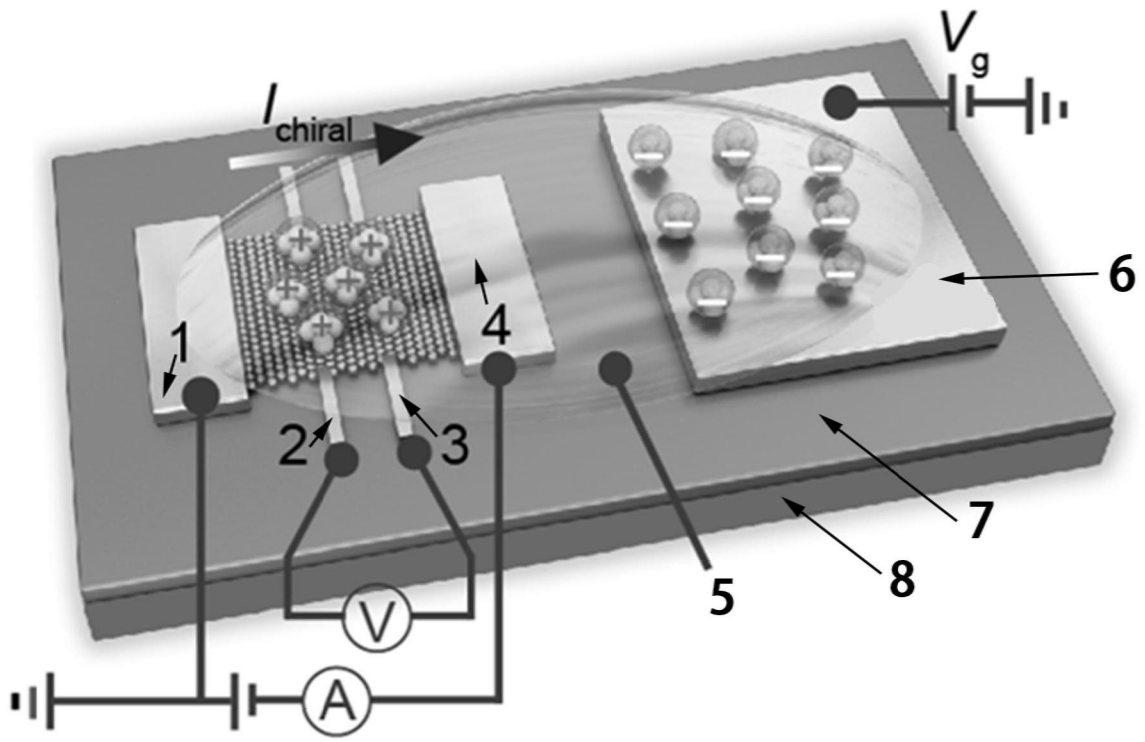


图5

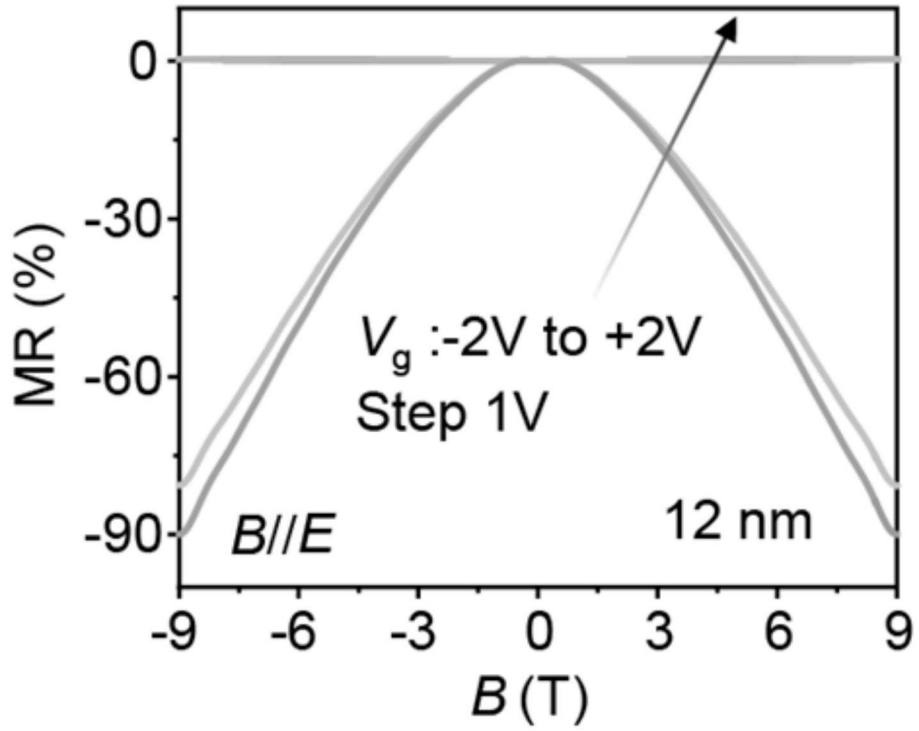


图6

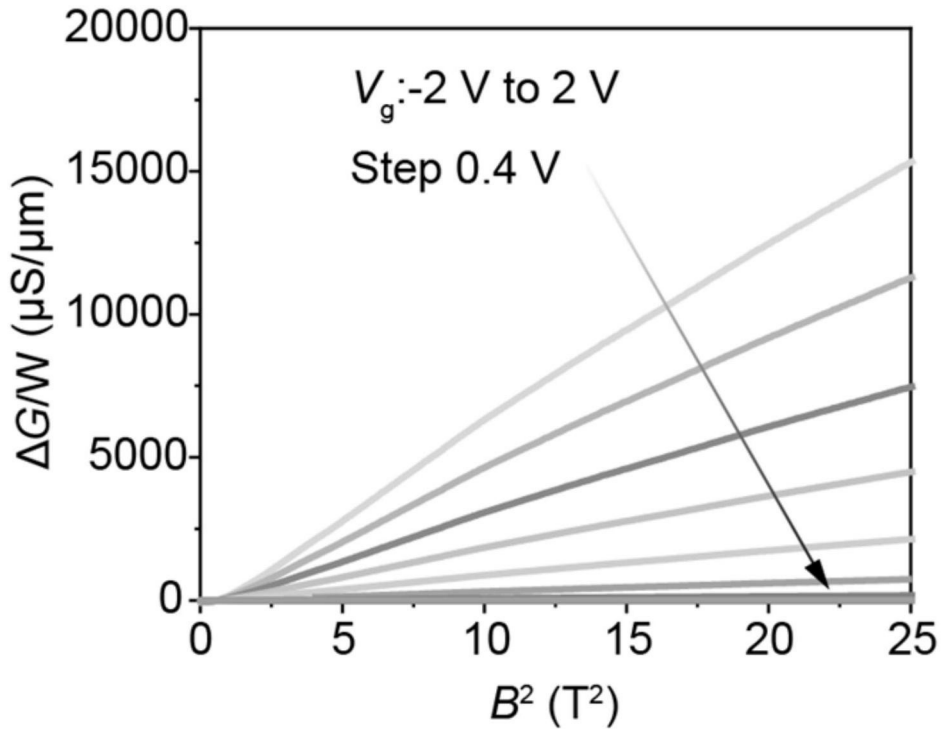


图7

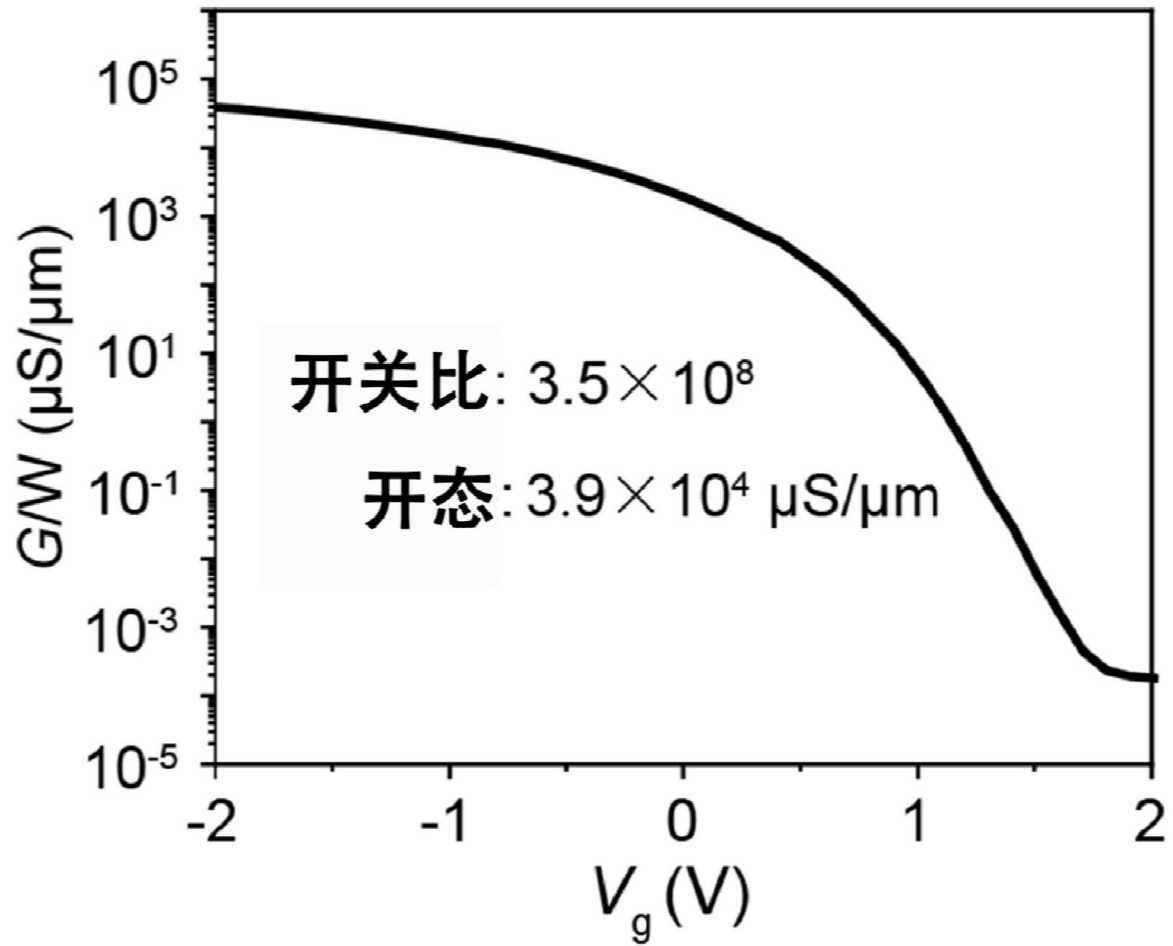


图8