

# 稳态强磁场实验装置在凝聚态物理学中的应用

史可 王钊胜

(中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心 230031)

凝聚态物理学是通过研究构成凝聚态物质(固体和液体)的电子、离子、原子及分子的运动形态和规律,从而认识其物理性质的学科。凝聚态物理学这一名称最早出现于20世纪70年代,它是固体物理学的向外延拓。经过半个多世纪的发展,凝聚态物理学已成为物理学中最大也是最重要的分支学科之一,在半导体、超导、磁学等许多学科领域中取得的重大成就为发展新材料、新器件和新工艺提供了科学基础,有些在当代高新技术领域中已起到关键性作用。同时其不断涌现出新的前沿研究热点,如近年来广受关注的拓扑材料与二维材料等。而凝聚态物理学研究中所使用的实验条件也从常规条件发展到极端条件以及多种极端条件相结合。

利用磁场来探索凝聚态系统电子结构是当前凝聚态物理学研究中的一种重要方法,通过磁场对材料内部电子的作用,可以帮助我们得到材料内部的许多微观信息。磁场越强,对电子的作用就越大,并且有些物理现象只发生在极高的磁场下,因此磁场越强能够得到的信息也就越多。稳态强磁

场实验装置为凝聚态物理学实验研究提供了最高达45.22特斯拉的极端稳态强磁场环境,同时可以结合超低温与超高压等极端实验条件,为相关方向的研究人员提供了一个独特的极端条件实验平台,并已帮助众多用户取得了优秀的科研成果。本文挑选了几个具有代表性的成果来展示稳态强磁场实验装置在凝聚态物理学几个方向上的重要应用。

## 一、拓扑材料

拓扑学,是研究几何图形或空间在连续改变形状后还能保持不变的一些性质的学科。它只考虑物体间的位置关系而不考虑它们的形状和大小。有关拓扑学的一个有趣示例就是一个带手柄的杯子如何变成一个甜甜圈。如图1所示,先将杯子的底部移动到顶部,再将杯子向中间挤压,最后拉伸一下手柄,这样一个带手柄的杯子就变成了一个甜甜圈。

近年来的相关研究表明,可以将拓扑这一概念运用到凝聚态物理体系上,某些材料的能带具有拓

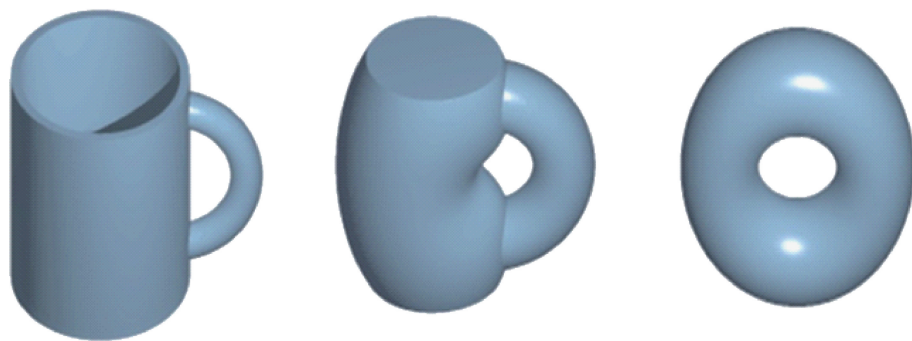


图1 杯子变甜甜圈示意图

扑性质并可通过拓扑不变量进行描述,这就是拓扑材料,其电子等准粒子结构具有拓扑特性。拓扑材料体系的研究范畴包括:固体材料中电子、声子、磁振子以及等离激元等元激发谱的拓扑分类研究;各种拓扑材料材料生长、制备和物相表征;各种拓扑材料的拓扑物性研究,包括谱学、输运、磁性、光学特性等。拓扑材料主要分为拓扑绝缘体、拓扑半金属等。拓扑绝缘体是指其体态为有能隙的绝缘体,而边界上具有导电通道的拓扑能带结构的材料。电子在边缘态上传输时不会受到杂质的散射,不会消耗能量,因此具有巨大的应用潜力,有关拓扑绝缘体的研究也是当今凝聚态物理的热点。我国科学家对拓扑绝缘体的研究做出了巨大贡献。2009年理论预测了 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 家族为拓扑绝缘体,随后又理论预测掺杂磁性原子Fe或Cr的 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 薄膜可以实现反常量子霍尔效应,最终这些理论预测都得到了实验证实。

随着拓扑绝缘体的发现,材料的拓扑性质和新型的量子效应在过去十年中引起了广泛的关注。拓扑材料家族已从最初的拓扑绝缘体逐渐扩展到狄拉克半金属和外尔半金属。狄拉克半金属和外尔半金属都属于拓扑半金属,其典型特征为价带和导带接触点的出现。到目前为止,人们已经发现了多种类型的拓扑半金属,其类型可以通过能带接触点的属性加以区分,例如接触点的简并度、接触点是否连成封闭曲线以及价带和导带在能量上是否

有能量交叠等。这些属性的区分极大地扩展了拓扑半金属家族。在实验上证实了狄拉克半金属和外尔半金属的存在则将拓扑半金属的研究工作推到了凝聚态物理的最前沿。而强磁场在相关研究中被广泛应用,稳态强磁场实验装置的用户在相关工作中做出了许多重要的成果。

$\text{ZrTe}_5$ 是一种低对称性的准二维(2D)层状材料,但角度分辨光发射光谱(ARPES)和磁红外光谱研究表明它是3D狄拉克半金属的有前途的候选材料。研究人员在稳态强磁场实验装置高达31T的磁场下通过对角度依赖性磁阻进行测量,发现了层状材料 $\text{ZrTe}_5$ 的3D狄拉克半金属相的直接量子传输证据。研究人员观察到明显的量子振荡现象,为证实 $\text{ZrTe}_5$ 是3D狄拉克半金属相提供了明确的证据。此外,在高磁场下观察到明显的朗道能级分裂(如图2所示),表明 $\text{ZrTe}_5$ 材料中的狄拉克点可能分裂成外尔点。研究结果表明, $\text{ZrTe}_5$ 是研究层状化合物中三维无质量狄拉克和外尔费米子的理想平台。该项成果发表在*Physical Review B*杂志上。另外通过对在强磁场中高压下 $\text{ZrTe}_5$ 单晶的磁阻和SdH量子振荡测量观察到量子振荡的突然相移,并从高度各向异性演变为几乎各向同性的电子系统。通过高达33T的磁场中的热电效应测量,在量子极限以下观察到了异常的能斯特效应和热电的准线性场依赖性,这可能是由零级朗道能带闭合导致的。这些成果都发表在了*Physical Review Letter*杂志上。

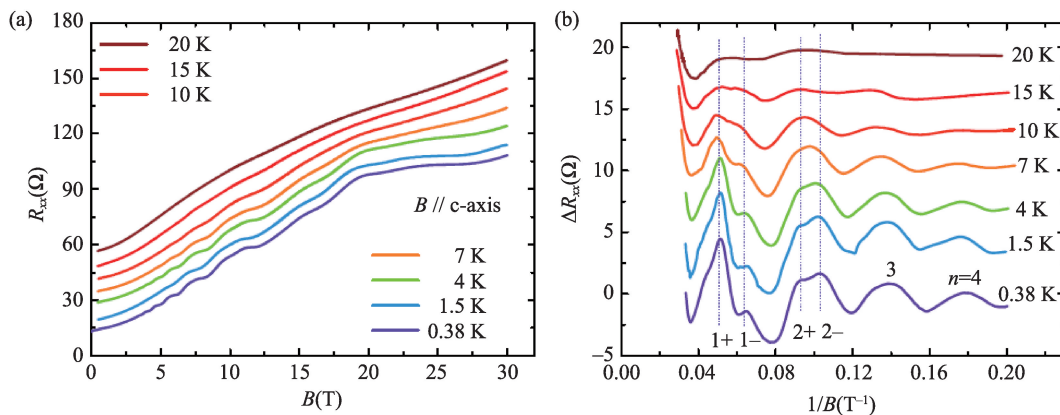


图2 (a) 在不同温度下,磁阻 $R_{xx}$ 与磁场 $B$ (高达31 T)的关系图;  
(b) 不同温度下的振荡分量 $\Delta R_{xx}$ 与 $1/B$ 的关系[*Phys. Rev. B*95,125135(2017)]

TaAs是另一种典型的拓扑材料。研究发现,压力可以诱导 TaAs 产生新的拓扑相,并且这种新的压力诱导相可以在降到常压时保持稳定。研究人员利用强磁场实验装置研究了 TaAs 在高达 33T 的磁场中的电输运性质,发现当外尔电子被限制在最低的朗道能级时,霍尔信号和低温下的纵向磁阻中会出现强烈的温度依赖性异常[*Phys. Rev. B* 94, 205120 (2016)]。依托于稳态强磁场装置水冷磁体,研究人员在强磁场中测量了 TaAs 的磁化性质,观察到当系统进入量子极限时,TaAs 具有准线性磁场依赖的有效横向磁化和非饱和纵向磁化行为,验证了 TaAs 是一种外尔半金属拓扑材料(图3)。该项成果发表于 *Nature Communications* 杂志上。通过强磁场研究材料的量子振荡也被广泛用于研究其他拓扑材料,如  $\text{SrxBi}_2\text{Se}_3$ , PdTe, TaSb<sub>2</sub>, 并已用于实验验证 PtBi<sub>2</sub>, WC 中的三重简并节点和具有巨大异常霍尔效应的磁性外尔半金属  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 。

## 二、超导材料

1908 年荷兰低温物理学家昂内斯成功地液化了氦气,而后于 1911 年发现某些金属在液氦温度下电阻会突然消失,即“超导电性”现象,昂内斯也因此发现获得了 1913 年诺贝尔奖。

超导材料具有两大显著特性,零电阻效应和迈斯纳效应。零电阻效应是指材料在特定温度下电阻突然消失,这一温度叫做超导转变温度  $T_c$ ,也叫临界温度。临界温度之上材料为正常态,临界温度

之下材料为超导态。迈斯纳效应是指处在超导态的物体完全排斥磁场,即磁力线不能进入超导体内部。超导体可用来实现诸如无损耗输电、稳恒强磁场和高速磁悬浮车等。目前超导材料在医疗器械、国防军事、电子通信、电力能源、交通运输等众多领域取得了广泛应用。

1957 年巴丁,库伯和施里弗合作发表了 BCS 理论对超导现象进行了解释并随后获得了诺贝尔奖。假设电子是有规律运动,原子核是周期性结构,声子也是有规律运动的,这样只需考虑一个原子核相邻的两个电子。库伯证明了低温下费米球外一对自旋相反的电子存在相互吸引作用,可以束缚成对,叫做库伯对,这种互相吸引是通过电子间交换虚声子产生的。库伯对的产生减小了电子基态的能量,使费米能处的单个电子凝聚到一个能量低  $\Delta$  的态中。 $\Delta$  称为 BCS 能隙,至少需要  $2\Delta$  的能量才能打破库珀对,形成激发态。库伯对是玻色子,在低温下会出现玻色爱因斯坦凝聚,所有的库伯对都被凝聚在了基态上,在电子输运时就不会被散射,宏观上表现为零电阻效应。

根据 BCS 理论解释,由于电声子耦合作用的限制,超导体的转变温度一般低于 40K,即麦克米兰极限。但是随着越来越多的超导体的发现,超导转变温度也在逐渐提高。一些不能被 BCS 理论所解释的超导体被称为非常规超导体。氧化铜高温超导体是最著名的非常规超导体,铁基超导体作为第二个高温超导家族也受到了广泛的关注。高温超

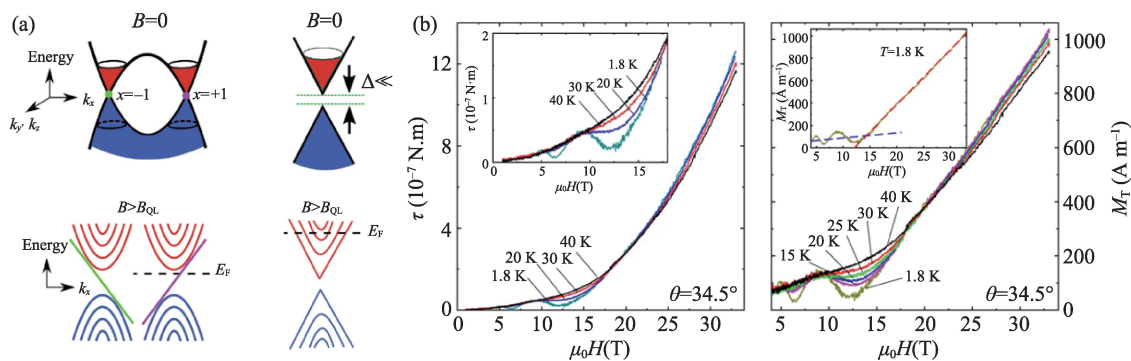


图3 (a)外尔半金属能带示意图;(b) TaAs 磁扭矩、横向磁化率随磁场的变化[*Nature Communications* 10, 1028 (2019)]



导体的超导机制不同于传统超导体,目前普遍认为高温超导体的库珀对形成与磁相互作用以及自旋涨落有关。超导体的上临界磁场对应着磁场破坏超导的两种机制,一种是轨道拆对机制,另一种是泡利顺磁极限机制。泡利顺磁极限机制可以理解为外加磁场导致材料中电子的能带根据自旋方向发生劈裂,系统能量降低,降低的能量尺度为塞曼能。当塞曼能大于超导凝聚态能时,超导态被破坏。对于非常规超导体,可能存在远超出弱耦合泡利顺磁极限 1.86 T<sub>c</sub> 的较大的上临界磁场,这种现象可以在强磁场下得到证实。

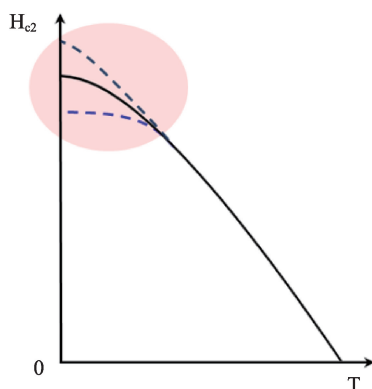


图4 超导体的 $H_{c2}$ 随温度的变化关系

如图4所示,作为基本参数,上临界场( $H_{c2}$ )的温度依赖性不仅对超导材料的应用具有重要的意义,同时它也对材料的超导机理研究具有重要的意义,特别是在接近零温时的行为,可以给出材料配对称性与能隙结构等方面的信息。而稳态强磁场实验装置所能提供的强磁场环境在新发现的超

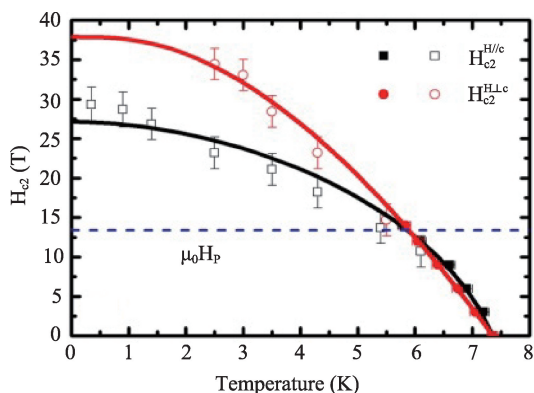


图5  $RbCr_3As_3$  的 $H_{c2}$ -T相图[*Phys. Rev. B* 100, 214512(2019)]

导体(如 $Nb_2Pd_xS_{5-x}$ <sup>20</sup>和基于Cr的准一维超导体等)的 $H_{c2}$ 测定中起着重要作用。图5显示了 $RbCr_3As_3$ 晶体的 $H_{c2}$ -T相图。可以看出, $H_{c2}^c(0)$ 和 $H_{c2}^{ab}(0)$ 均超过BCS弱耦合泡利极限( $\mu_0 H_p$ ),表明此材料为非常规超导体,该项成果发表在*Physical Review B*杂志上。

对于一些传统的超导体,当它们被简化为二维(2D)时,它们也显示出超过泡利极限的增强 $H_{c2}$ 。研究人员采用超高真空分子束外延法制备了宏观面积的单层 $NbSe_2$ 薄片,利用稳态强磁场实验装置在强磁场和极低温下的输运测量结果表明上临界场是 $NbSe_2$ 顺磁极限场的5倍以上[*Nano Letters* 17, 6802 (2017)]。研究人员通过在硅衬底上的铅条纹非公度相上用超高真空分子束外延技术成功制备出一种宏观面积的、塞曼保护的二维超导体。图6显示了这种超薄单晶Pb薄膜在磁场高达35.5 T下的各种温度下电阻的平行磁场依赖性。显然,零温度下的 $H_{c2}$ 远高于泡利极限 $\mu_0 H_p = 14.7$  T,这表明超薄Pb薄膜中具有塞曼保护的超导性。随后研究人员对此进行了理论计算,定量地解释了塞曼保护超导电性的物理机制。基于微观分析,发现塞曼型自旋轨道相互作用(SOI)在很大程度上增强了面内临界场。本工作揭示了界面调制SOI对外延异质结构中的超导对具有深远的影响,可为研究非常规超导性提供有前途的平台。预示出人们有望在二维超导体中,通过界面调制发现新的非常规超导特性。这种宏观尺度强自旋轨道耦合下的二维超导,也为拓扑超导的探索提供了新的平台,并为未

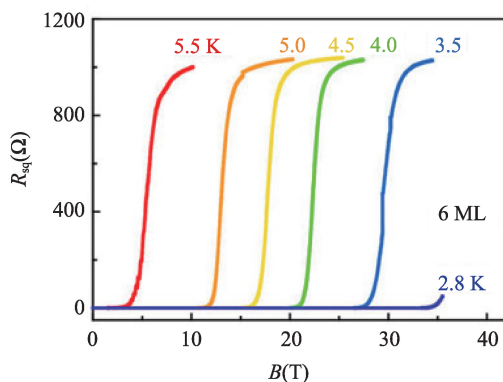


图6 不同温度下超薄单晶Pb薄膜在平行磁场下(最高场高达35.5 T)的电阻与磁场关系图[*Phys. Rev. X* 8, 021002(2018)]



来无耗散或低耗散量子器件的设计与集成奠定了基础。该项成果发表在 *Physical Review X* 杂志上。

极端条件下超导体的研究对于应用和超导机理研究具有重要意义。即使对于一些传统的超导体,它们在极端条件下的性能仍然缺乏知识。NbTi 合金是制造商用超导磁体的最重要材料之一,科研人员利用稳态强磁场实验装置其在强磁场和高压下进行了研究。图7显示了NbTi合金的压力-磁场- $T_c$ 相图。随着压力从0增加到261 GPa,  $T_c$ 从9.6 K增加到19.1 K,  $H_{c2}$ 在1.8 K时从15.4 T增加到19 T。值得注意的是,在如此超高压下没有结构相变,尽管环境压力体积缩小了45%。结果表明,NbTi合金的超导性在已知超导体中在压力下是最稳健的。此外,其高压下的  $T_c$  和  $H_{c2}$  值在仅由过渡金属元素组成的合金超导体中创下了新纪录。这些发现不仅揭示了NbTi合金非凡的高压超导性能,而且有助于更好地理解超导机理。该项成果 *Physical Review X* 杂志上。

### 三、低维材料

低维材料是指至少在一个维度上尺寸处于纳米尺度的材料,主要包括零维、一维和二维结构,以及以低维结构为基本单元构筑的复合结构、组装体

和功能器件。二维材料,包括两种材料的界面,或附着在基片上的薄膜,其中界面的深或膜层的厚度在纳米量级。半导体量子阱是典型的二维材料。一维材料,或称量子线,线的粗细为纳米量级。零维材料,或称量子点,它由少数原子或分子堆积而成,微粒的大小为纳米量级。典型的零维材料是半导体和金属的原子簇。

在低维体系中,维度的降低导致体系对载流子浓度、介电环境、压强、应力、电场、磁场等非常敏感。因此,我们可以在一个极其宽广的多参数空间对其结构和物性进行精细调控,进而实现一系列新奇量子物态。低维材料具有极小的体积和大量的表面积,使得低维材料具有大量的表面活性位点,这种特性使其在催化,吸附和储能等方面表现出优异的性能。低维材料还具有独特的光电学性质,其电子结构与三维材料中的电子结构不同,电子由于被约束在一维或二维空间内,其动力学行为变得更加复杂,出现了一些奇特的电子结构和能带结构,使得低维材料在光电器件和太阳能电池领域有广阔的发展空间。低维材料体积小,可以更好地承受应变,在外加应力下,表现出了极高的应变率,可应用于电声传感器和光学器件领域。

目前,类似石墨烯的低维材料正在被广泛研

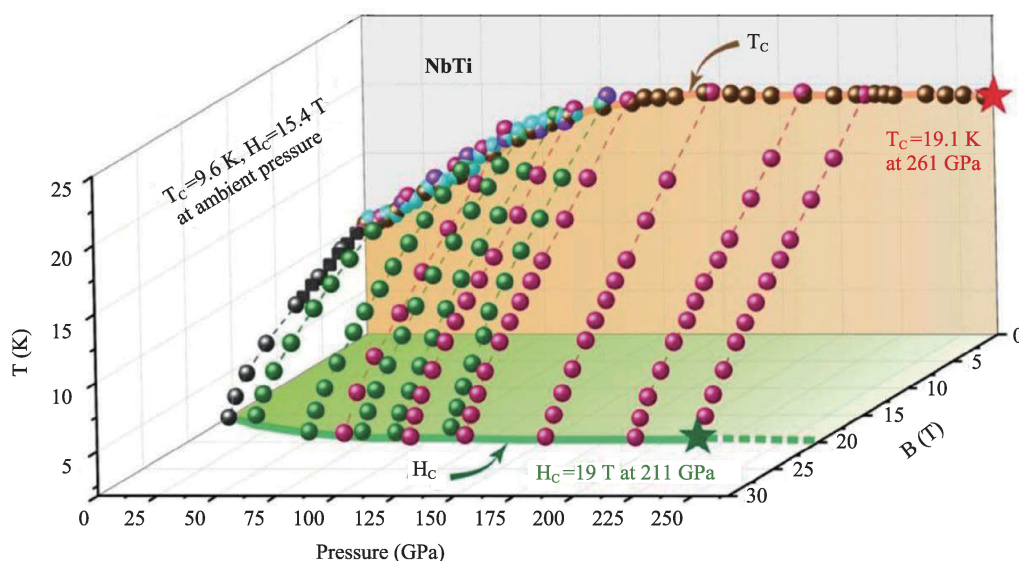


图7 NbTi合金的压力-磁场- $T_c$ 相图[*Phys. Rev. X* 8, 021002(2018)]

究。随着维数的减小,量子效应增加。在三维(3D)材质中可以忽略不计的界面效应、尺寸效应和拓扑效应将在低维材质中显现出来。因此,低维材料会表现出3D材料所没有的新颖量子效应。由于空间维数的减小,电子的电荷、自旋、轨道与晶格自由度之间的相关性和耦合性也会局部加强,从而使自旋量子态对磁场、电场、应力场、光场和温度的响应更加显著。科研人员利用稳态强磁场实验装置对低维材料进行了许多研究。

研究人员利用聚合物转移的方法,将石墨,氮化硼和黑磷的薄层依次叠加在衬底上形成异质结结构,在稳态强磁场实验装置提供的强磁场环境下首次观察到了黑磷中的量子霍尔效应,如图8所示。整数量子霍尔效应是指霍尔电阻并不随磁场强度的增大按线性关系变化,而是作台阶式的变化。这项研究为进一步研究黑磷中的量子运输奠定了基础。该项成果发表在*Nature Nanotechnology*杂志上。

元素铋是半金属,由于其具有低的电子浓度、小的电子有效质量和大的电子平均自由程,从而成为人们研究宏观量子现象的典型材料而被长期关

注。而铋纳米结构的性质更加丰富,理解块状铋中的奇异量子现象仍然存在争议,并引起了人们的新兴趣。问题的焦点是这些量子特性是否就是体材料所具有的性质,还是与Bi基拓扑绝缘体有关的由于自旋-轨道相互作用所导致的表面效应。近年来,铋化合物被发现是拓扑绝缘体,但对铋单晶是否具有拓扑绝缘体性质还缺乏实验证据。研究人员利用稳态强磁场实验装置在磁场高达31T下对不同厚度的单晶铋纳米带进行了角度依赖的磁阻(AMR)测量,发现铋纳米带具有二维的拓扑表面态,且表面态与纳米带的厚度有关。如图9所示。在厚度为40 nm的薄纳米带中观察到二重对称的低场AMR谱和两组量子振荡。实验结果显示,随着样品厚度的增加,低场AMR谱变为四重对称,量子振荡变为三维体材料行为。这些结果表明纳米带具有二维金属表面状态和体绝缘的性质。该研究成果发表在*ACS Applied Nano Materials*杂志上。

低维材料由于较大的表面积比,表面状态和拓扑效应会变得更加明显。量子霍尔效应是凝聚态物理中研究最多的现象之一,并且与拓扑相、强

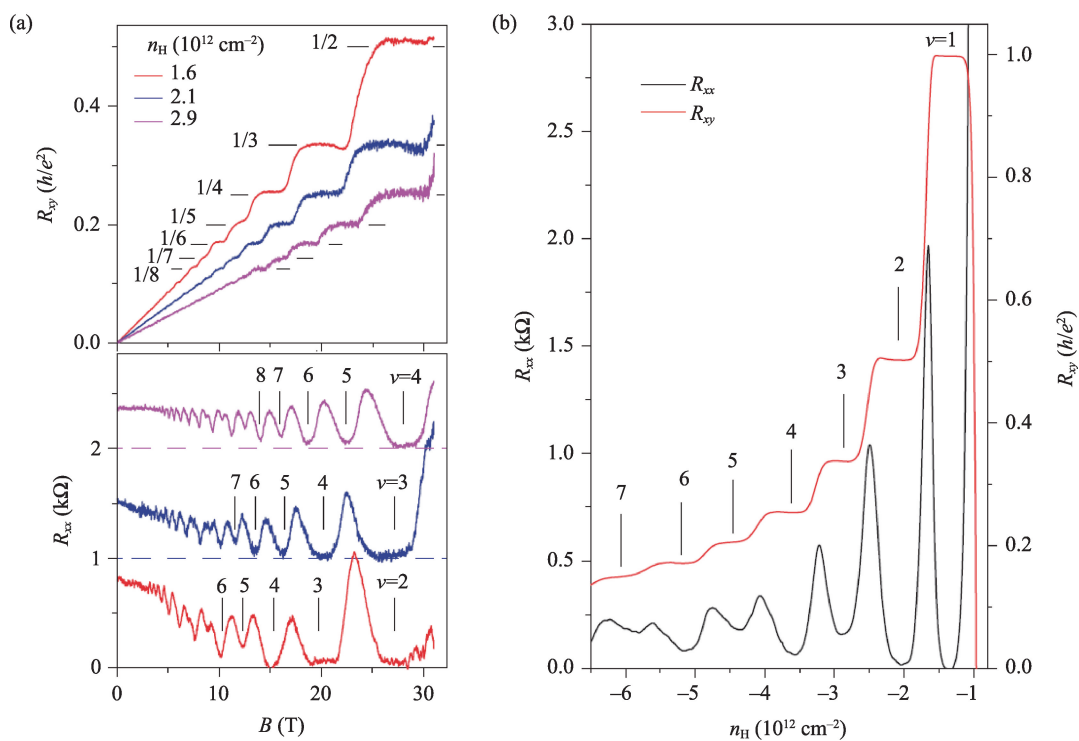


图8 稳态强磁场下黑磷二维空穴气体中的量子霍尔效应[*Nat. Nanotech.* 11, 593 - 597(2016)]

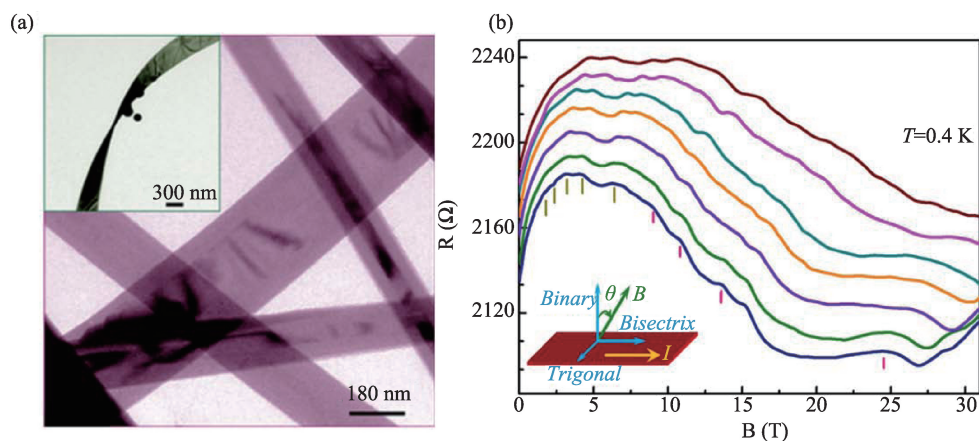


图9 (a) 纳米带的透射电子显微镜图像 (b) 在 0.4 K 下样品的电阻与磁场的关系[*ACS Nano* 8, 7506-7512(2014)]

电子相关性和量子计算等研究领域相关,量子霍尔效应是否可以在不简单堆叠二维系统的情况下扩展到更高维度有待进一步研究。依托稳态强磁场实验装置,研究人员在 $Cd_3As_2$ 纳米材料上发现了新的量子霍尔效应。 $Cd_3As_2$ 是一种拓扑狄拉克半金属。在表面主导的 $Cd_3As_2$ 纳米片中,研究人员观察到量子振荡随着磁场的增加而发展为具有非零纵向电阻的量子霍尔态。与传统的二维系统不同,这种独特的量子霍尔效应可能与外尔轨道的量子化有关。然后,研究人员使用具有可变厚度的楔形 $Cd_3As_2$ 纳米结构在强磁场下进行了输运实验。他们发现量子霍尔传输受到样品厚度的强烈调制,如图10所示。朗道能级对磁场大小和方向以及样品厚度的依赖性与基于外尔轨道修正的Lifshitz-Onsager关系

的理论预测一致。该项成果发表在*Nature*杂志上。

#### 四、总结和展望

稳态强磁场实验装置是国家发改委支持的“十一五”国家重大科技基础设施,在建设和运行中创造了多项世界纪录并实现多个国际首创,为凝聚态物理、化学、材料、生物学和生命科学等多学科领域开展国际前沿探索、交叉前沿研究提供了重要的稳态强磁场实验平台。开放运行10多年以来,稳态强磁场实验装置在凝聚态物理学领域支撑了国内外众多用户开展了大量高水平、有特色的研究工作,产生了一大批具有国际影响力的科学成果。未来稳态强磁场实验装置将继续为我国抢占国际前沿科技高地提供平台支撑。

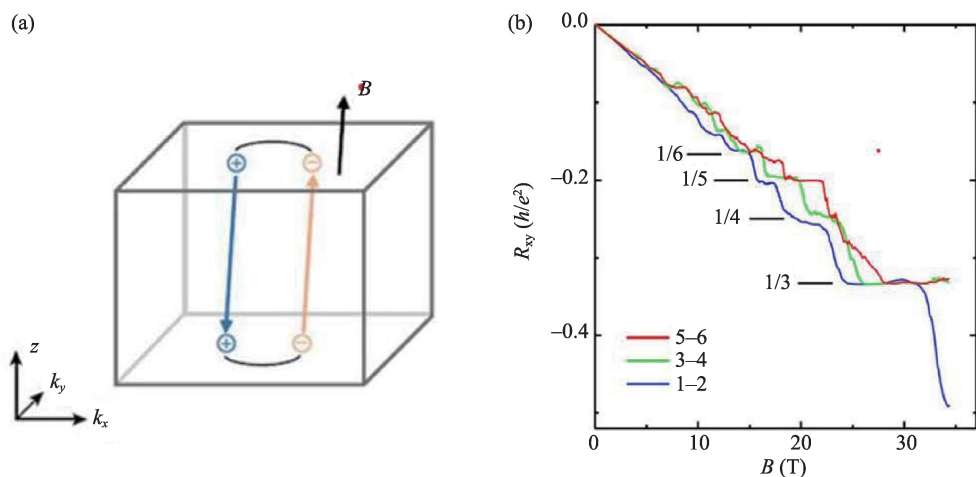


图10 (a) 外尔轨道在磁场 $B$ 下的示意图(b)霍尔电阻 $R_{xy}$ 与磁场的关系示意图[(*Nature* 565, 331 - 336(2019))]