



低维拓扑量子材料的分子束外延生长

冯硝^{1,2,3*}, 何珂^{1,2,3*}, 薛其坤^{1,2,3,4*}

1. 清华大学物理系, 低维量子物理国家重点实验室, 北京 100084

2. 量子信息前沿科学中心, 北京 100084

3. 北京量子信息科学研究院, 北京 100193

4. 南方科技大学, 深圳 518055

*联系人, 冯硝, E-mail: xiaofeng@mail.tsinghua.edu.cn; 何珂, E-mail: kehe@mail.tsinghua.edu.cn; 薛其坤, E-mail: qkxue@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2026-03-28; 接受日期: 2026-06-15; 网络出版日期: 2026-07-17

摘要 低维拓扑量子材料凭借其独特的电子能带结构与新奇量子效应, 在低功耗电子学、容错量子计算等前沿领域展现出重大应用潜力. 高质量材料的可控制备是开展基础物理研究与推进应用探索的前提. 分子束外延技术具有原子级精度的生长与调控能力, 已发展成为低维拓扑量子材料可控制备的核心技术手段之一. 本文以清华大学薛其坤团队的一系列原创性研究成果为核心主线, 系统综述了低维拓扑量子材料的分子束外延生长和相关量子效应.

关键词 低维拓扑量子材料, 量子效应, 分子束外延

PACS: 73.20.-r, 73.43.-f, 73.50.-h, 73.63.-b, 81.15.-z

1 引言

20世纪80年代以来, 凝聚态物理学最激动人心的进展之一便是拓扑量子物态的发现与研究. 与依赖对称性破缺来描述的传统物态(如晶体、磁体、超导体)不同, 拓扑物态由材料电子波函数的全局拓扑性质所定义, 这种拓扑不变性赋予了材料一系列新奇的物理性质. 自整数量子霍尔效应被实验观测以来, 拓扑量子材料家族与各类新奇量子效应不断被发现. 其中, 量子反常霍尔(Quantum Anomalous Hall, QAH)效应体系由于具有手性的、无耗散边缘态, 为低功耗电子器件的实现提供了重要的物理基础, 而拓扑超导体系

中存在的马约拉纳零能模或边缘模, 有可能用于实现拓扑量子计算, 二者共同构成当前拓扑量子物态研究中极具前景的两大重要方向.

然而, 要观测并利用这些精妙的量子效应, 一个根本性的前提是获得高质量的材料. 分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)技术是一种在超高真空环境下, 通过精确控制各种元素束流以及衬底温度, 可实现原子级精确生长的先进技术. 它能够实现对薄膜厚度、化学组分、掺杂浓度和界面结构等的原子级精准控制, 是制备高质量、低缺陷密度薄膜和异质结的最有力工具之一.

清华大学薛其坤领导的研究团队是国际上利用

引用格式: 冯硝, 何珂, 薛其坤. 低维拓扑量子材料的分子束外延生长. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 280004

Feng X, He K, Xue Q-K. Molecular beam epitaxy growth of low-dimensional topological quantum materials (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 280004, doi: 10.1360/SSPMA-2026-0218

MBE技术探索拓扑量子物态的先驱者和引领者, 使用MBE技术制备出多种高质量拓扑量子材料, 取得了一系列科学发现. 本文系统梳理这一系列工作, 整体结构按照“材料的生长与调控-量子效应实现-面向器件应用拓展”的逻辑展开. 首先介绍MBE技术及拓扑绝缘体薄膜的生长, 随后介绍磁性拓扑绝缘体体系中QAH效应的实现, 最后介绍拓扑量子计算器件等更前沿领域的研究, 以期为相关领域的研究人员提供一幅清晰、完整且富有启发性的发展图景(图1)^[1-5].

2 分子束外延技术与拓扑绝缘体的生长

2.1 分子束外延技术原理与特点

分子束外延技术于20世纪60年代末由美国贝尔实验室Arthur和Cho首次提出并实现, 是一种基于超高真空环境的精确薄膜生长技术. 其核心原理为: 在超高真空环境下(真空度通常优于 1×10^{-10} Torr), 通过精确加热高纯度元素源使其发生热蒸发, 形成定向的分子束

或原子束; 该分子束/原子束定向入射至经高温处理的单晶衬底表面, 借助原子间的相互作用及表面扩散动力学行为, 在衬底表面形成高质量单晶薄膜.

MBE技术的核心优势主要体现在以下四个方面:

(1) 原子级生长的调控能力. 通过精确控制元素源温度可实现分子束流强度的精准调节, 结合反射式高能电子衍射仪(Reflection High Energy Electron Diffraction, RHEED)的原位实时监测, 能够将薄膜生长速率控制在单原子层/分钟量级, 并实时表征薄膜表面的平整度、结晶质量及生长模式. (2) 组分与掺杂的精准调控. 多蒸发源独立控制体系可实现多组分合金薄膜的可控制备及掺杂浓度的连续可调, 尤其适用于复杂组分材料的精确制备. (3) 超高清洁的生长环境. 超高真空条件可有效抑制残余气体分子对薄膜的污染, 保障所制备薄膜的高化学纯度与低缺陷密度. (4) 原位表征的兼容性. MBE系统可集成角分辨光电子能谱(Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, ARPES)、扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope,

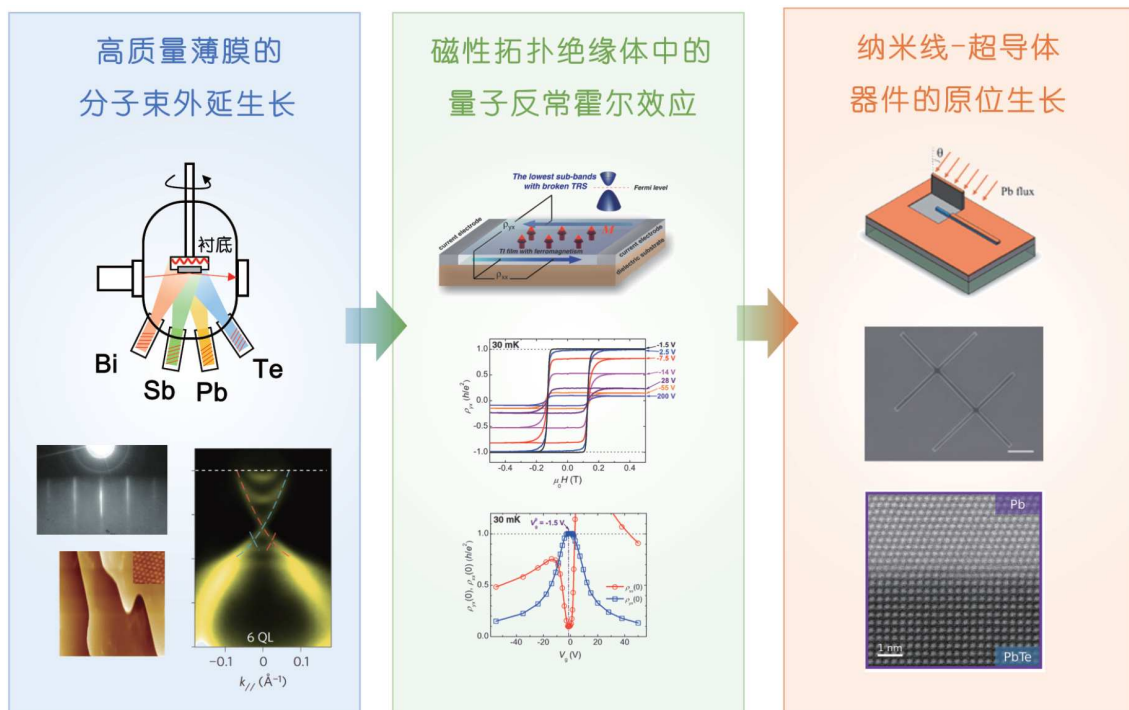


图1 文章逻辑图. 该图展示了本文各部分的整体逻辑关系. 转载自参考文献[1-5]. Copyright©2010, Wiley; Copyright©2010, Springer Nature; Copyright©2013, AAAS; Copyright©2022, APS; Copyright©2023, APS

Figure 1 Logic diagram of the article. The diagram illustrates the overall logical relationships among different parts of this article. Reprinted and reproduced from refs. [1-5]. Copyright©2010, Wiley; Copyright©2010, Springer Nature; Copyright©2013, AAAS; Copyright©2022, APS; Copyright©2023, APS.

STM)等先进表征手段,实现薄膜生长、结构表征与电子态分析的一体化研究,为揭示材料生长机制与物理特性的内在关联提供关键技术支撑.目前,分子束外延技术已成为低维量子材料领域制备材料的主流技术之一.

2.2 拓扑绝缘体的生长与性质研究

20世纪80年代,整数和分数量子霍尔效应的相继发现,深刻改变了人们对凝聚态物质有序态的认知,正式开启了拓扑量子物态这一全新的研究领域^[6,7].在其后三十多年的发展中,将拓扑物态从强磁场诱导的量子霍尔体系拓展至零磁场环境,并提升量子效应的观测温度以满足应用需求,成为该领域的核心科学目标.然而,拓扑物态研究面临一个关键瓶颈:在相当长一段时期内,新型拓扑物态的实验探索几乎局限于极低温、强磁场下的高迁移率二维电子气系统,对实验条件与技术手段要求严苛,不仅整体研究进展缓慢,也严重制约了拓扑物态研究向器件应用的转化.1988年,Haldane^[8]在二维蜂窝状六角晶格模型中引入空间周期性分布、平均磁通抵消的局域磁通量,理论预言了不依赖外磁场和朗道能级的QAH效应.这类具有非零陈数的体态绝缘拓扑相也称作陈(Chern)绝缘体.2005年前后,在一定程度上受Haldane模型的启发,受时间反演对称性保护的拓扑绝缘体(Topological Insulator, TI)的概念被提出^[9-13].拓扑绝缘体按发现顺序与晶体结构特征可分为第一代(如 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 合金)与第二代(如 Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3)体系. Bi_2Te_3 等第二代拓扑绝缘体具有更为简单的晶体结构(菱形六方结构,空间群 $R\bar{3}m$),是典型的层状范德瓦耳斯材料,基本结构单元为“五层”(Quintuple Layer, QL)结构,原子排列遵循Te(Se)-Bi-Te(Se)-Bi-Te(Se)的顺序,每个QL内部通过较强的化学键结合,而QL之间通过较弱的范德瓦耳斯相互作用连接.相较 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 合金, Bi_2Te_3 等具有更大的体能隙($\sim 0.3\text{--}0.6\text{ eV}$),其表面态仅由单一狄拉克锥构成,是研究拓扑物理特性与量子输运效应的理想体系.

薛其坤团队率先开展第二代拓扑绝缘体的MBE生长研究.基于多年积累的MBE研究经验,将III-V族半导体的生长理念与调控策略拓展至拓扑绝缘体体系.通过系统研究生长温度、束流比、生长速率等关键参数对薄膜质量的影响规律,建立了第二代拓扑绝缘体的MBE生长动力学模型与参数调控窗口^[1,14-16].

比如团队发现生长温度需要满足“三温度法”,同时,富Se或Te的环境可以有效抑制阴离子空位^[1,16,17],这些后来被国际同行广泛借鉴与采用,显著推动了拓扑绝缘体领域的快速发展与研究深化.

同时,团队通过对 Bi_2Se_3 等薄膜厚度的精确控制(1-6层),揭示了三维拓扑绝缘体薄膜的有限尺寸效应.当薄膜厚度降低至纳米尺度(小于三维体相临界厚度)时,表面态狄拉克点处会打开一个能隙,同时观察到Rashba型的自旋劈裂^[2].通过低温扫描隧道显微镜,在 Bi_2Se_3 薄膜上观察到朗道量子化现象,并且有零级朗道能级,证明 Bi_2Se_3 表面态是狄拉克型表面态^[18].通过在拓扑绝缘体表面引入非磁性杂质,并测量杂质周围的干涉图样,可以看到背散射缺失,进一步证明拓扑表面态的“自旋-动量锁定”特性^[19].

Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 和 Sb_2Te_3 虽具备明确的拓扑特性,但受本征缺陷影响,其体相通常存在自掺杂现象,其中, Bi_2Te_3 因Te空位缺陷呈现本征n型, Sb_2Te_3 则因Sb-Te反位缺陷呈现本征p型,这些严重干扰表面态量子输运特性的精准观测.为解决这一关键科学问题,薛其坤团队提出通过 Bi_2Te_3 与 Sb_2Te_3 共生长形成 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ 三元化合物^[20],利用两种母体材料的缺陷补偿效应,通过组分调控实现能带结构的精准调节与费米能级调控,可以获得全配比范围内从电子型到空穴型的拓扑绝缘体薄膜,其中 x 在0.88-0.96范围内时,输运过程由表面态主导,实现理想的本征拓扑绝缘体,为表面态量子输运研究与器件应用提供优质的材料平台.

3 磁性拓扑绝缘体与量子反常霍尔效应

3.1 磁性掺杂拓扑绝缘体中的量子反常霍尔效应

非磁性拓扑绝缘体的表面态受时间反演对称性保护,若引入长程铁磁序破坏时间反演对称性,可使表面态狄拉克点处打开能隙,进而实现QAH效应——一种无需外加磁场即可实现的量子霍尔效应.2008年,有理论研究表明,无论二维还是三维拓扑绝缘体,通过引入铁磁序破坏时间反演对称性,都可以实现QAH效应^[21,22].2010年,相关理论进一步预言,在三维拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 族薄膜中进行磁性掺杂,可以通过范弗莱克(van Vleck)机制实现不依赖体载流子的稳定长程铁磁序,进而在实验上实现QAH效应^[23].

想要在实验上实现QAH效应,材料需要同时满足

三个苛刻的条件: 具有拓扑非平庸的能带结构、长程铁磁序以及费米能级必须精确位于由磁性打开的表面态能隙之内. 薛其坤团队为此设计了精巧的材料方案. 选择 $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ 作为拓扑绝缘体母体, 结合Bi和Sb的比例调控和栅极电压调控, 粗调和微调样品的载流子浓度和表面费米能级, 调控Cr的掺杂浓度实现长程铁磁序, 优化生长工艺参数与界面结构等获得高质量拓扑绝缘体薄膜. 最终于2013年, 在Cr掺杂的 $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ 薄膜中首次观察到QAH效应^[3], 结束了人们对于无磁场量子霍尔效应长达25年的追寻. 在5层的薄膜中, 零磁场下可以观测到量子化的反常霍尔电阻($\rho_{yx} = h/e^2$), 且纵向电阻有显著下降. 在几个特斯拉的外加磁场辅助下, 可以进一步实现完全量子化($\rho_{yx} = h/e^2$, $\rho_{xx} = 0$). 尽管体系中由于Bi/Sb的混合和Cr元素掺杂等引入了一定量的无序, 使得薄膜的迁移率低于 $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 但这种低迁移率条件下仍能观测到严格量子化的输运行为更为直观地体现了该体系的拓扑性.

然而, 在Cr掺杂的 $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ 薄膜中, QAH效应仅能在30 mK的极低温下实现, 严重制约了相关物理机制的深入研究与实际器件应用. 磁性掺杂会带来磁不均匀、化学势不均匀等无序, 这可能是导致QAH效应极低实现温度的主要原因, 提升体系中的磁有序度可能是提高QAH效应观测温度的途径之一. 借鉴稀磁半导体中通过多种元素共掺增强磁有序的思路, 薛其坤团队成功制备了Cr与V双磁性元素共掺杂的 $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ 薄膜^[24], 显著提升了QAH效应的实现温度, 其完全量子化温度可以达到300 mK, 且在1.5 K下零场反常霍尔电阻达到了量子化数值的97%. 磁力显微镜表征结果进一步表明, 双磁性元素共掺样品的磁有序度高于单一的Cr或V掺杂体系. 即便如此, 如何进一步提升QAH效应的实现温度仍是该领域亟待攻克的难题.

3.2 量子反常霍尔系统的多层结构

目前已实现QAH效应的体系大多为陈数 $C = 1$ 的拓扑态, 体系中仅存在单一的手性边缘导电通道. 若将两层性质一致的QAH薄膜通过普通绝缘体层进行隔离堆叠, 可构建出具有两条并行手性边缘态的复合体系, 其等效陈数可达 $C = 2$. 当这两层QAH薄膜的磁化方向相反时, 对应的手性边缘态将呈现相反的动量与

自旋取向, 进而形成与量子自旋霍尔绝缘体类似的螺旋边缘态. 二者的主要区别在于这个螺旋边缘态的两支导电通道在空间上是分离的. 以此类推, 借助普通绝缘体间隔堆叠多层QAH薄膜, 理论上可以获得具有更高等效陈数的QAH体系.

清华大学薛其坤团队利用分子束外延技术, 成功构筑了由磁性掺杂的 $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ 薄膜和CdSe(0001)普通绝缘体薄膜交替生长的CVBST/CdSe超晶格结构, 实现了最多4层的QAH多层体系, 并在实验中观测到满足 h/Ne^2 的高阶等效QAH效应, 其中 N 是QAH层的层数, 为探索新型拓扑量子物态提供了重要的实验基础^[25]. 由于多层手性边缘通道的并联可有效降低“热点”处的等效电阻, 实验结果也清晰显示, 该多层结构的两端电阻随层数增加有明显下降, 这一结果对未来将QAH手征边缘态应用于低功耗电子器件具有重要的参考价值.

3.3 内禀磁性拓扑绝缘体

2010年的研究表明, 在 Bi_2Se_3 家族拓扑绝缘体中嵌入PbTe, GeTe等化合物, 可形成具有 AB_2X_4 , $\text{A}_2\text{B}_2\text{X}_5$, 以及 AB_4X_7 等结构的一系列衍生物, 其中A为Pb或Ge, B为Bi或Sb, X为Te或Se^[26]. 如果将A替换为磁性元素, 则可能在该类材料中引入本征的磁有序. 后续实验工作成功合成了亚稳态的 MnBi_2Te_4 , MnBi_2Se_4 等^[27-29]. 2017年, 理论研究进一步提出, 在典型的 Bi_2Te_3 薄膜表面外延生长单层 MnBi_2Te_4 作为铁磁绝缘层(Ferromagnetic Insulator, FMI), 可使 Bi_2Te_3 的表面态“扩展”到单层 MnBi_2Te_4 中, 从而实现拓扑表面态与局域磁矩的强耦合, 并可打开最大约77 meV的磁能隙^[30], 为实现高温QAH效应提供了新的可能路径.

薛其坤/何珂团队基于前期的研究经验敏锐地意识到 MnBi_2Te_4 材料本身可能就是拓扑的^[31]. 2019年, 团队和合作者结合实验表征和理论计算^[32,33], 证实 MnBi_2Te_4 是一种内禀磁性拓扑绝缘体, 为探索磁性拓扑物理提供了理想的材料体系. 该材料天然具有层状结构, 基本结构单元为“七层”(Septuple Layer, SL)原子结构, 原子排列遵循Te-Bi-Te-Mn-Te-Bi-Te的顺序. 同一层内Mn原子间的磁矩为铁磁耦合, 在层与层之间则表现为反铁磁耦合. 受这种层间磁构型影响, 奇数层 MnBi_2Te_4 薄膜可呈现QAH效应, 而偶数层薄膜则对应轴子绝缘体态^[33-36]. 若施加外磁场克服较弱的层间反

铁磁耦合, 体系可被极化为铁磁态, 并进入磁性外尔半金属相. 理论计算显示, 该体系的表面磁能隙可以达到数十毫电子伏特, 具备实现高温QAH效应的潜力, 因此近年来受到广泛关注. 实验上, 已在单晶解理的薄片观测到了QAH效应^[37-39], 以及轴子绝缘体到陈绝缘体相的相变行为^[40]. 在较厚的薄片, 研究者还观察到了陈数 $C = 2$ 的量子化霍尔电阻平台^[41], 为铁磁态 MnBi_2Te_4 是磁性外尔半金属相提供了重要实验依据. 更为重要的是, 强磁场下反常霍尔电阻的量子化特征可以维持到几十开尔文, 预示着在更高温度下实现QAH效应的可能^[42]. 但是由于存在大量替位和反替位缺陷, 零场QAH效应的重复以及进一步提高QAH效应实现温度仍存在巨大的挑战.

MBE制备的 MnBi_2Te_4 薄膜在缺陷浓度和层厚控制方面不如单晶解理样品. 然而, 通过单晶解理获得的 MnBi_2Te_4 薄片往往尺寸有限, 且构筑异质结构的工艺繁琐, 难以满足大批量、可重复的制备需求. MBE样品具有大面积且均匀性高的优势, 更便于制备各类异质及超晶格结构. 通过精确调控化学配比、薄膜厚度、优化衬底和保护层等参数, 优化微纳加工工艺, 薛其坤团队在 MnBi_2Te_4 外延薄膜中实现了高场和零场量子化霍尔电阻的实验观测^[43,44], 为未来探索高温QAH效应提供了基础. 通过系统研究不同尺寸和不同温度下 MnBi_2Te_4 薄膜的量子化输运性质, 团队发现高温下电子退相干长度变短导致电子局域化失效是系统偏离量子化的主要原因^[45], 无关系统磁能隙大小, 这为探索高温QAH效应提供了新的理解.

4 面向拓扑量子计算的选区外延PbTe基纳米线

拓扑量子计算是拓扑量子物态研究领域的“圣杯”. 薛其坤/何珂团队在平面半导体-超导异质纳米线器件的选区分子束外延研究方面取得了一系列进展, 为拓扑量子计算研究开辟了一条新的道路.

拓扑量子计算是一种基于非阿贝尔任意子的量子计算实现方式, 为量子纠错这一量子计算研究核心问题提供了一个根本性的解决方案^[46]. 具有非阿贝尔任意子性质的马约拉纳零能模在过去十几年吸引了大量研究者的兴趣^[47]. 半导体-超导异质纳米线是实现马约拉纳零能模的主要平台之一^[48]. 基于该体系, 在理论

上已经提出了具体且可行的拓扑量子计算实现方案和路线图^[49,50], 微软量子团队基于InAs-Al二维电子气的后加工纳米线在此方向全力攻关, 并在过去几年取得了令人关注的进展^[51,52]. 然而, 此方向研究面临一个瓶颈问题, 就是样品质量仍不够高. 有理论估计, 微软团队当前样品的无序度需减少1个数量级才能满足拓扑量子计算的要求^[53-55]. 考虑到III-V族半导体的制备技术已发展得相当成熟, 满足这个要求非常困难.

薛其坤/何珂团队和合作者发展出一个新的纳米线体系: 选区分子束外延生长的PbTe-超导异质纳米线, 有望突破这一瓶颈^[4,56]. PbTe在低温下具有巨大的介电常数, 可以有效屏蔽缺陷电荷, 因此对缺陷不敏感. 选区分子束外延技术可以在超高真空环境用分子束外延的方法直接生长出平面异质器件, 很大程度上避免了微纳加工过程对器件性能的破坏. 选区分子束外延由两部分组成. PbTe纳米线的生长需要预先在衬底上制备介电材料掩膜(通常为 SiN_x), 上面加工出露出衬底表面的线状窗口. 在分子束外延生长过程中, 通过选择适当的衬底温度, 可以让PbTe只成核、生长于窗口处的衬底表面, 从而形成平面纳米线结构. 超导微纳结构的生长通过阴影墙生长技术实现, 即在衬底上预先用微纳加工制备出三维的结构(阴影墙), 生长时将衬底降至约100 K的低温(很多超导薄膜的生长需要低温), 让蒸发束流与衬底呈一定角度, 在阴影墙的遮挡下, 就可以在衬底上生长出具有特定图案的超导薄膜. PbTe相比III-V族纳米线的另一大优势是可以找到和其晶格很匹配的衬底: CdTe. 晶格匹配不但避免了纳米线中应力的形成, 还避免了选区外延生长中由于多点成核导致的晶界. 此外, PbTe和CdTe在晶格匹配的同时还具有不同的晶格结构: 前者为岩盐矿, 后者为闪锌矿. 这导致二者阳离子之间的互扩散很难, 可以形成非常锐利的界面^[4].

利用上述这些优势, 团队与合作者在CdTe上制备出了极高质量的平面外延PbTe纳米线和各种纳米线网络结构. 纳米线的场效应迁移率很容易超过 $1 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ^[4,57,58]. 在生长出的PbTe纳米线环路中观测到了阿哈罗诺夫-玻姆(Aharonov-Bohm, AB)效应, 根据振荡周期推算出其相干长度可以达到8 μm 量级, 满足了利用干涉实现拓扑量子比特读取的要求^[57]. 利用选区外延制备的PbTe-Pb纳米线显示出原子级清洁、平整、锐利的界面, 且界面具有外延关系^[4,5], 具有近邻

超导硬能隙^[59], 且可以生长出约瑟夫森结和超导量子干涉器件等较为复杂的器件^[5,60].

为了进一步提高样品质量, 团队改善了纳米线制备方法, 将纳米线生长于CdTe衬底表面下的沟槽中, 两侧面被CdTe衬底以外延的方式保护, 上下两个表面通过Eu掺杂的PbTe层保护. Eu掺杂可以促进PbTe在CdTe表面的成核, 让界面在大范围保持平整, 且具有较大能隙, 可以构成势垒层. 在此类所有表面都被外延保护的PbTe纳米线中, 电子可以在长达1.7 μm 的长度保持弹道输运特性, 这比微软报道的III-V纳米线高出1个数量级^[61]. 此外, 在此种纳米线中, PbTe体材料的能谷简并被打开, 且可以被外场调控, 满足了实现单个马约拉纳零能模的要求^[62]. 选区外延的PbTe-Pb纳米线则显示出量子化安德烈夫(Andreev)电导平台, 标志着极高质量的半导体-超导结^[63]. 最近团队与合作者在该种器件中观测到了稳定存在的零能电导峰. 有意思的是, PbTe-Pb纳米线垂直方向的g因子由于界面被显著增强, 结果是零能电导峰在0.2 T的垂直磁场下即可存在^[64]. 为了在半导体-超导体纳米线体系中实现马约拉纳零能模, 需要通过施加外磁场在Rashba劈裂能带的交叉点处打开塞曼能隙. 对于以往InAs-Al和InSb-Al体系, 所需磁场达1–2 T, 这么强的磁场有可能影响拓扑量子比特读取电路中的超导线路的工作, 还有可能引入更复杂的物理过程. PbTe-Pb纳米线中零能电导峰所需外磁场的大幅降低解决了这个问题.

因此, 在选区外延生长PbTe基纳米线中, 团队已经克服了构建拓扑量子比特器件的主要技术问题, 所制备的样品显示出比III-V基纳米线更高的样品质量. 基

于这种新的马约拉纳纳米线体系, 有望率先实现拓扑量子比特“从零到一”的突破.

5 总结与展望

本文以清华大学薛其坤团队的研究成果为核心主线, 系统综述了低维拓扑量子材料的分子束外延生长、调控机制与物理特性, 这些研究充分显示了MBE技术的原子级调控优势. 尽管低维拓扑量子材料的MBE生长研究已取得显著进展, 但仍面临诸多关键科学与技术挑战. 其一, QAH效应的实现温度仍处于低温区间($<2\text{ K}$), 距离高温甚至室温应用存在较大差距; 其二, 内禀磁性拓扑绝缘体的质量有待进一步提升, 薄膜质量、均匀性及大面积制备能力仍需优化; 其三, 低维拓扑量子材料的器件化工艺尚不成熟, 原子级界面调控、电极制备等关键技术亟待突破, 难以满足实际应用需求. 未来研究方向可聚焦以下三个方面: (1) 开发新型内禀磁性拓扑材料体系, 通过成分调控、结构设计与异质界面工程提升居里温度与量子化稳定性; (2) 发展MBE与微纳器件加工的集成技术, 推动拓扑量子器件的实用化进程与性能优化; (3) 探索低维拓扑量子材料与其他功能材料(如超导材料、磁性材料、二维材料)的异质集成, 实现更丰富的量子效应与多功能调控.

随着MBE技术的持续发展与研究的不断深入, 低维拓扑量子材料的可控制备与功能调控将取得更大突破, 有望在低功耗电子器件、高性能量子计算等领域实现突破性应用, 推动相应领域的产业变革与技术升级.

参考文献

- Li Y, Wang G, Zhu X, et al. Intrinsic topological insulator Bi_2Te_3 thin films on Si and their thickness limit. *Adv Mater*, 2010, 22: 4002–4007
- Zhang Y, He K, Chang C Z, et al. Crossover of the three-dimensional topological insulator Bi_2Se_3 to the two-dimensional limit. *Nat Phys*, 2010, 6: 584–588
- Chang C Z, Zhang J, Feng X, et al. Experimental observation of the quantum anomalous Hall effect in a magnetic topological insulator. *Science*, 2013, 340: 167–170
- Jiang Y, Yang S, Li L, et al. Selective area epitaxy of PbTe-Pb hybrid nanowires on a lattice-matched substrate. *Phys Rev Mater*, 2022, 6: 034205
- Zhang Z, Song W, Gao Y, et al. Proximity effect in PbTe-Pb hybrid nanowire Josephson junctions. *Phys Rev Mater*, 2023, 7: 086201
- Haldane F D M. Nobel lecture: Topological quantum matter. *Rev Mod Phys*, 2017, 89: 040502
- Wen X G. Colloquium: Zoo of quantum-topological phases of matter. *Rev Mod Phys*, 2017, 89: 041004
- Haldane F D M. Model for a quantum Hall effect without Landau levels: Condensed-matter realization of the “parity anomaly”. *Phys Rev Lett*, 1988, 61: 2015–2018

- 9 Kane C L, Mele E J. Quantum spin Hall effect in graphene. *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 226801
- 10 Kane C L, Mele E J. Z_2 topological order and the quantum spin Hall effect. *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 146802
- 11 Bernevig B A, Zhang S C. Quantum spin Hall effect. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 106802
- 12 Hasan M Z, Kane C L. Colloquium: Topological insulators. *Rev Mod Phys*, 2010, 82: 3045–3067
- 13 Qi X L, Zhang S C. Topological insulators and superconductors. *Rev Mod Phys*, 2011, 83: 1057–1110
- 14 Wang G, Zhu X, Wen J, et al. Atomically smooth ultrathin films of topological insulator Sb_2Te_3 . *Nano Res*, 2010, 3: 874–880
- 15 Wang G, Zhu X, Sun Y, et al. Topological insulator thin films of Bi_2Te_3 with controlled electronic structure. *Adv Mater*, 2011, 23: 2929–2932
- 16 Song C L, Wang Y L, Jiang Y P, et al. Topological insulator Bi_2Se_3 thin films grown on double-layer graphene by molecular beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 143118
- 17 Chen X, Ma X, He K, et al. Molecular beam epitaxial growth of topological insulators. *Adv Mater*, 2011, 23: 1162–1165
- 18 Cheng P, Song C, Zhang T, et al. Landau quantization of topological surface states in Bi_2Se_3 . *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 076801
- 19 Zhang T, Cheng P, Chen X, et al. Experimental demonstration of topological surface states protected by time-reversal symmetry. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 266803
- 20 Zhang J, Chang C Z, Zhang Z, et al. Band structure engineering in $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ ternary topological insulators. *Nat Commun*, 2011, 2: 574
- 21 Qi X L, Hughes T L, Zhang S C. Topological field theory of time-reversal invariant insulators. *Phys Rev B*, 2008, 78: 195424
- 22 Liu C X, Qi X L, Dai X, et al. Quantum anomalous Hall effect in $\text{Hg}_{1-y}\text{Mn}_y\text{Te}$ quantum wells. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 146802
- 23 Yu R, Zhang W, Zhang H J, et al. Quantized anomalous Hall effect in magnetic topological insulators. *Science*, 2010, 329: 61–64
- 24 Ou Y, Liu C, Jiang G, et al. Enhancing the quantum anomalous Hall effect by magnetic codoping in a topological insulator. *Adv Mater*, 2018, 30: 1703062
- 25 Jiang G, Feng Y, Wu W, et al. Quantum anomalous Hall multilayers grown by molecular beam epitaxy. *Chin Phys Lett*, 2018, 35: 076802
- 26 Xu S-Y, Wray L A, Xia Y, et al. Discovery of several large families of topological insulator classes with backscattering-suppressed spin-polarized single-Dirac-cone on the surface. arXiv: 1007.5111
- 27 Hagmann J A, Li X, Chowdhury S, et al. Molecular beam epitaxy growth and structure of self-assembled $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Bi}_2\text{MnSe}_4$ multilayer heterostructures. *New J Phys*, 2017, 19: 085002
- 28 Hirahara T, Eremin S V, Shirasawa T, et al. Large-gap magnetic topological heterostructure formed by subsurface incorporation of a ferromagnetic layer. *Nano Lett*, 2017, 17: 3493–3500
- 29 Lee D S, Kim T H, Park C H, et al. Crystal structure, properties and nanostructuring of a new layered chalcogenide semiconductor, Bi_2MnTe_4 . *CrystEngComm*, 2013, 15: 5532–5538
- 30 Otrokov M M, Menshchikova T V, Vergniory M G, et al. Highly-ordered wide bandgap materials for quantized anomalous Hall and magnetoelectric effects. *2D Mater*, 2017, 4: 025082
- 31 Chang C Z, Tang P, Feng X, et al. Band engineering of Dirac surface states in topological-insulator-based van der Waals heterostructures. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 136801
- 32 Gong Y, Guo J, Li J, et al. Experimental realization of an intrinsic magnetic topological insulator. *Chin Phys Lett*, 2019, 36: 076801
- 33 Li J, Li Y, Du S, et al. Intrinsic magnetic topological insulators in van der Waals layered MnBi_2Te_4 -family materials. *Sci Adv*, 2019, 5: eaaw5685
- 34 Zhang D, Shi M, Zhu T, et al. Topological axion states in the magnetic insulator MnBi_2Te_4 with the quantized magnetoelectric effect. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 206401
- 35 Otrokov M M, Klimovskikh I I, Bentmann H, et al. Prediction and observation of an antiferromagnetic topological insulator. *Nature*, 2019, 576: 416–422
- 36 Otrokov M M, Rusinov I P, Blanco-Rey M, et al. Unique thickness-dependent properties of the van der Waals interlayer antiferromagnet MnBi_2Te_4 films. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 107202
- 37 Deng Y, Yu Y, Shi M Z, et al. Quantum anomalous Hall effect in intrinsic magnetic topological insulator MnBi_2Te_4 . *Science*, 2020, 367: 895–900
- 38 Guo Z, Gao J, Huang Z, et al. Quantized topological states and parity anomaly in intrinsic quantum anomalous Hall insulator MnBi_2Te_4 . arXiv: 2507.03342
- 39 Lian Z, Wang Y, Wang Y, et al. Antiferromagnetic quantum anomalous Hall effect under spin flips and flops. *Nature*, 2025, 641: 70–75
- 40 Liu C, Wang Y, Li H, et al. Robust axion insulator and Chern insulator phases in a two-dimensional antiferromagnetic topological insulator. *Nat Mater*, 2020, 19: 522–527

- 41 Ge J, Liu Y, Li J, et al. High-Chern-number and high-temperature quantum Hall effect without Landau levels. *Natl Sci Rev*, 2020, 7: 1280–1287
- 42 He K. MnBi_2Te_4 -family intrinsic magnetic topological materials. *npj Quantum Mater*, 2020, 5: 90
- 43 Bai Y, Li Y, Luan J, et al. Quantized anomalous Hall resistivity achieved in molecular beam epitaxy-grown MnBi_2Te_4 thin films. *Natl Sci Rev*, 2024, 11: nwad189
- 44 Li Y, Bai Y, Feng Y, et al. Reentrant quantum anomalous Hall effect in molecular beam epitaxy-grown MnBi_2Te_4 thin films. arXiv: 2401.11450
- 45 Bai Y, Li Y, Luan J, et al. Interplay between electronic dephasing and localization in finite-sized Chern insulator. arXiv: 2404.09083
- 46 Kitaev A Y. Unpaired Majorana fermions in quantum wires. *Phys-Usp*, 2001, 44: 131–136
- 47 Alicea J. New directions in the pursuit of Majorana fermions in solid state systems. *Rep Prog Phys*, 2012, 75: 076501
- 48 Lutchyn R M, Bakkers E P A M, Kouwenhoven L P, et al. Majorana zero modes in superconductor-semiconductor heterostructures. *Nat Rev Mater*, 2018, 3: 52–68
- 49 Aasen D, Aghaee M, Alam Z, et al. Roadmap to fault tolerant quantum computation using topological qubit arrays. arXiv: 2502.12252
- 50 Cao Z, Chen S, Zhang G, et al. Recent progress on Majorana in semiconductor-superconductor heterostructures—Engineering and detection. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2023, 66: 267003
- 51 Aghaee M, Akkala A, Alam Z, et al. InAs-Al hybrid devices passing the topological gap protocol. *Phys Rev B*, 2023, 107: 245423
- 52 Aghaee M, Alcaraz Ramirez A, Alam Z, et al. Interferometric single-shot parity measurement in InAs-Al hybrid devices. *Nature*, 2025, 638: 651–655
- 53 Ahn S, Pan H, Woods B, et al. Estimating disorder and its adverse effects in semiconductor Majorana nanowires. *Phys Rev Mater*, 2021, 5: 124602
- 54 Woods B D, Das Sarma S, Stanescu T D. Charge-impurity effects in hybrid Majorana nanowires. *Phys Rev Appl*, 2021, 16: 054053
- 55 Pan H, Das Sarma S. Physical mechanisms for zero-bias conductance peaks in Majorana nanowires. *Phys Rev Res*, 2020, 2: 013377
- 56 Cao Z, Liu D E, He W X, et al. Numerical study of PbTe-Pb hybrid nanowires for engineering Majorana zero modes. *Phys Rev B*, 2022, 105: 085424
- 57 Geng Z, Zhang Z, Chen F, et al. Observation of Aharonov-Bohm effect in PbTe nanowire networks. *Phys Rev B*, 2022, 105: L241112
- 58 Song W, Wang Y, Miao W, et al. Conductance quantization in PbTe nanowires. *Phys Rev B*, 2023, 108: 045426
- 59 Gao Y, Song W, Yang S, et al. Hard superconducting gap in PbTe nanowires. *Chin Phys Lett*, 2024, 41: 038502
- 60 Gao Y, Song W, Yu Z, et al. SQUID oscillations in PbTe nanowire networks. *Phys Rev B*, 2024, 110: 045405
- 61 Song W, Yu Z, Wang Y, et al. Reducing disorder in PbTe nanowires for majorana research. *Nano Lett*, 2025, 25: 2350–2356
- 62 Wang Y, Song W, Cao Z, et al. Gate-tunable subband degeneracy in semiconductor nanowires. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2024, 121: e2406884121
- 63 Gao Y, Song W, Wang Y, et al. Quantized Andreev conductance in semiconductor nanowires. *Phys Rev Appl*, 2025, 23: L061004
- 64 Zhang S, Song W, Li Z, et al. Strong enhancement of g -factor in PbTe-Pb hybrid nanowires. *Nano Lett*, 2026, 26: 4739–4744

Molecular beam epitaxy growth of low-dimensional topological quantum materials

FENG Xiao^{1,2,3*}, HE Ke^{1,2,3*} & XUE Qi-Kun^{1,2,3,4*}

¹ State Key Laboratory of Low Dimensional Quantum Physics, Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

² Frontier Science Center for Quantum Information, Beijing 100084, China

³ Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100193, China

⁴ Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

*Corresponding authors (FENG Xiao, email: xiaofeng@mail.tsinghua.edu.cn; HE Ke, email: kehe@mail.tsinghua.edu.cn; XUE Qi-Kun, email: qkxue@mail.tsinghua.edu.cn)

Low-dimensional topological quantum materials exhibit significant application potential in cutting-edge fields, such as low-power-consumption electronics and fault-tolerant quantum computing, owing to their unique electronic band structures and novel quantum effects. The controllable preparation of high-quality materials is a prerequisite for both fundamental physical research and advancing applied exploration. Molecular beam epitaxy, featuring atomic-precision growth and manipulation capabilities, has evolved into one of the core techniques for synthesizing low-dimensional topological quantum materials. Centered on a series of pioneering research achievements by Qi-Kun Xue's team at Tsinghua University, we systematically review the molecular beam epitaxial growth of low-dimensional topological quantum materials and related quantum phenomena in this work.

low-dimensional topological quantum materials, quantum effects, molecular beam epitaxy

PACS: 73.20.-r, 73.43.-f, 73.50.-h, 73.63.-b, 81.15.-z

doi: [10.1360/SSPMA-2026-0218](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2026-0218)