

拓扑绝缘体中自旋极化电流的产生与调控方法

段一飞

石家庄职业技术学院, 河北 石家庄 050800

DOI:10.61369/EPTSM.2026010014

摘 要： 拓扑绝缘体作为带特殊电子构造的新型量子功能材质，该种材质的表面或界面中，有受时间反演对称性守护的拓扑表面态，电子自旋和动量呈现出锁定联系，给产生与调控高效自旋极化电流打造了理想的平台。本文从拓扑绝缘体具备的电子结构特征入手，对自旋极化电流的产生机理展开探寻，包含光致自旋极化电流、电致自旋极化电流及磁致自旋极化电流的物理实质和达成路径；对栅压调控方式、磁场调控方式、界面工程调控方式等主要调控办法的作用原理、调控成效以及适用状况进行系统解析。旨在给基于拓扑绝缘体的自旋电子器件的设计与优化供应理论方面的参考。

关 键 词： 拓扑绝缘体；自旋极化电流；自旋—动量锁定；调控方法；界面工程

Generation and Regulation Methods of Spin-Polarized Current in Topological Insulators

Duan Yifei

Shijiazhuang Vocational Technology Institute, Shijiazhuang, Hebei 050800

Abstract： As a novel quantum functional material with unique electronic structures, topological insulators feature topological surface states protected by time-reversal symmetry on their surfaces or interfaces, where electron spin and momentum exhibit a locked relationship, providing an ideal platform for generating and manipulating efficient spin-polarized currents. Starting from the electronic structural characteristics of topological insulators, this paper explores the generation mechanisms of spin-polarized currents, including the physical essence and realization pathways of photoinduced, electrically induced, and magnetically induced spin-polarized currents. It systematically analyzes the working principles, modulation effects, and applicability of major modulation methods such as gate voltage modulation, magnetic field modulation, and interface engineering modulation. The aim is to provide theoretical references for the design and optimization of spintronic devices based on topological insulators.

Keywords： topological insulators; spin-polarized current; spin-momentum locking; modulation methods; interface engineering

引言

自旋电子学将电子自旋的自由程度当作核心内容，全力追求达成信息的高效存储、传送以及处理，该领域关键的技术阻碍在于低能耗地产生自旋极化电流以及对其进行精确调控。传统的自旋电子材料借助铁磁层和非磁层界面的自旋注入来实现自旋极化，存在注入效率不高、能耗较大等内在不足^[1]。拓扑绝缘体的发现给突破这一阻碍带来了新的机会，它独有的拓扑表面状态具备自旋和动量锁定的特性，也就是电子的自旋方向由动量方向唯一决定，能够自然形成百分百自旋极化的电流，并且受到时间反演对称特性的守护，不容易受到缺陷散射的作用。

一、拓扑绝缘体的电子结构与自旋特性

拓扑绝缘体是一类在物体内部呈绝缘状态、在表面或界面存在金属性拓扑表面状态的新型拓扑量子材料，其电子结构的拓扑属性由拓扑不变量来描述，不会受到材料表面形态和化学组成细微变动的影响^[2]。从能带理论的角度来讲，拓扑绝缘体的体能带

存在能隙，而表面状态则跨越体能隙，形成封闭的狄拉克锥构造，狄拉克点刚好处于费米能级的位置。拓扑表面状态最为核心的特性是自旋和动量的锁定，这一特性源自时间反演对称特性的守护。对于三维拓扑绝缘体（像 Bi_2Se_3 、 Bi_2Te_3 、 Sb_2Te_3 等），其表面状态的电子自旋方向和动量方向严格垂直，并且遵循右手螺旋的关系：当电子沿着 +x 方向移动时，自旋方向固定为 +z 方

作者简介：段一飞（1991.01—），女，山西运城人，理学硕士，石家庄职业技术学院电气与电子工程系教师，研究方向：光学，电子技术、电气自动化。

向；当电子沿着 $-x$ 方向移动时，自旋方向就变为 $-z$ 方向^[3]。这种严格的锁定联系让拓扑表面态的电子天生就具备百分百的自旋极化程度，不需要额外的铁磁层辅助就能够形成自旋极化电流，从根本上解决了传统自旋注入效率低下的问题。同时，由于受到时间反演对称特性的守护，拓扑表面态的电子在传输过程中，不会因为非磁性缺陷的散射而改变自旋方向，具备良好的自旋输运特性，为研发低能耗的自旋电子器件奠定了根基。

二、拓扑绝缘体中自旋极化电流的产生机制

（一）光致自旋极化电流

光致自旋极化电流现象为光照拓扑绝缘体表层之际，运用光子和拓扑表面态电子间的互相影响状况，催生自旋极化电流现象的进程，该现象的核心作用机制体现为圆偏振光的光子角动量同电子自旋角动量的耦合传递情形。依照角动量守恒原理内容，不一样旋向的圆偏振光能够进行选择性地催生特定自旋朝向的电子。针对三维拓扑绝缘体表面态而言，当入射光线属于左旋圆偏振光之时，光子携带者 $+\hbar$ 数值的角动量，和拓扑表面态里自旋朝向为 $+z$ 方向的电子产生耦合作用，能够高效率地催生该自旋朝向的电子从价带位置跃迁至导带位置；然而右旋圆偏振光携带者 $-\hbar$ 数值的角动量，仅仅能够催生自旋朝向为 $-z$ 方向的电子产生跃迁情况。鉴于拓扑表面态所具备的自旋-动量锁定特征，受到激发的不同自旋朝向的电子会沿着特定的动量方向开展运动，进而构建出定向形式的自旋极化电流现象。以 Bi_2Se_3 拓扑绝缘体薄膜为例实施说明，运用波长处于 800 nm 范围的飞秒左旋圆偏振光实施照射操作，能够在表层催生自旋极化度超出 90% 程度的电流，并且电流强度会伴随入射光功率的增加呈现线性增强态势^[4]。光致自旋极化电流的产生态势具备响应速度快捷、调控方式灵活等方面的优势特性，可以通过对入射光的旋向、波长、功率以及入射角等相关参数实施调节操作，对自旋极化方向和电流强度实施精准化控制操作。

（二）电致自旋极化电流

电致自旋极化电流现象是指通过施加电场形式，驱动拓扑表面态的自旋极化电子实施定向运动所构建的电流现象，该现象的核心要点是运用拓扑表面态的自旋-动量锁定特征，通过电场形式对电子的动量方向实施调控操作，进而实现自旋极化电流的产生目标^[5]。在拓扑绝缘体薄膜器件内部，通过在器件两端位置施加电压操作，能够在表层构建沿着电场方向的电势梯度情况，驱动电子沿着电场反方向开展运动。由于自旋-动量锁定特征的存在，运动电子的自旋方向由动量方向实施唯一性确定，因此所构建的电流天然具备 100% 的自旋极化度。同传统形式的铁磁层自旋注入方式相对比，电致自旋极化电流不需要克服自旋注入壁垒状况，注入效率表现得更高，并且能量消耗表现得更低。以 Bi_2Te_3 拓扑绝缘体场效应晶体管为例实施说明，当施加栅压对费米能级实施调节使其处于拓扑表面态区域之时，漏极电流的自旋极化度能够达到 95% 以上水平，远远高于传统形式的自旋注入方式。需要加以注意的是，电致自旋极化电流的产生效率同拓扑绝缘体的

表面态纯度之间存在密切关联。当拓扑绝缘体表面出现氧化层或者杂质吸附情况时，会造成拓扑表面态遭受破坏，自旋极化度出现显著降低现象。所以说，制备高质量水准、低缺陷状况的拓扑绝缘体薄膜以及界面情况，是实现高效电致自旋极化电流目标的关键环节。

（三）磁致自旋极化电流

磁致自旋极化电流是借助施加外部磁场打破拓扑绝缘体时间反演对称性，对表面态电子自旋方向实施调控以催生定向自旋极化电流的进程。时间反演对称性作为表面态自旋-动量锁定的关键保障，外部磁场会对这种对称性造成破坏，致使拓扑表面态狄拉克锥出现分裂状况，形成自旋简并解除的能带构造，推动电子自旋朝着磁场方向发生偏斜，通过对磁场大小和方向进行调整，能够精确地把控自旋取向，让具备特定自旋方向的电子参与到输运当中，进而形成极化电流。以 Bi_2Se_3 器件为例，当沿 z 方向的外部磁场从 0 升高到 5 T 时，表面态电流自旋极化程度会从 0 提升至 85%，而且极化方向能够随着磁场的反转而产生翻转。这种调控方式具有较高的调控精度和良好的稳定性，能够对极化方向和极化程度进行连续调节，然而外部磁场会使器件体积增大、能耗增加，对微型化应用形成限制，所以无外部磁场调控便成为该领域的重要研究方向^[6]。

三、拓扑绝缘体中自旋极化电流的调控方法

（一）栅压调控

栅压调控是通过施加栅极电压对拓扑绝缘体的费米能级位置进行调节，从而对自旋极化电流的强度和极化程度实施调控，其核心机制在于费米能级的移动能够改变参与输运的电子态类型（表面态或者体态）。拓扑绝缘体的表面态只有在费米能级处于体能隙内部时，才会在输运过程中起主导作用，当费米能级进入体能隙时，输运主要由表面态的自旋极化电子主导，形成高自旋极化电流；当费米能级进入体能带时，体态电子的输运会使自旋极化程度降低，导致自旋极化电流强度下降。常见的栅压调控结构包含场效应晶体管（FET）结构，像顶栅、底栅结构。以 Bi_2Se_3 拓扑绝缘体顶栅 FET 器件为例，通过在器件表面沉积绝缘层（例如 Al_2O_3 ）和栅电极，施加正栅压时，费米能级向上移动进入体能隙，表面态输运得到增强，自旋极化电流强度显著提高；施加负栅压时，费米能级向下移动进入体能带，体态输运所占比例增加，自旋极化程度降低。除此之外，栅压还能够对拓扑表面态的载流子浓度进行调控，进而对自旋极化电流的强度进行调节。栅压调控具有调控电压低、响应速度快、不依赖磁场等优势，是实现自旋极化电流电调控的核心手段，已经被广泛应用于拓扑绝缘体基自旋电子器件的研发工作中。

（二）磁场调控

磁场调控是通过外部磁场或者内置磁矩打破拓扑绝缘体的时间反演对称性，实现对自旋极化电流的极化方向和强度的调控，主要涵盖外磁场调控和磁近邻效应调控两种方式。外磁场调控的核心是通过磁场诱导拓扑表面态的狄拉克锥发生分裂，改变电子

的自旋取向。如前面所讲述的内容，外磁场强度的增加能够使自旋极化程度逐渐提高，磁场方向的反转能够使自旋极化方向发生翻转。此外，对不同方向磁场（像面内磁场、面外磁场）实施施加动作，还能够对自旋极化电流的输运方向展开调控活动。然而外磁场调控存在着器件体积呈现出较大状态、能耗处于较高程度的缺陷状况，对其实际应用形成了限制情形。磁近邻效应调控是借助于在拓扑绝缘体表面实施铁磁层（例如 Fe、Co、Ni 等）的沉积操作，运用铁磁层的内置磁矩针对拓扑表面态产生交换耦合作用，对时间反演对称性造成破坏结果，达成无外磁场状况下的自旋极化电流调控目标。当拓扑绝缘体与铁磁层产生接触现象时，铁磁层的磁矩会经由界面交换作用传递到拓扑表面态方面，致使狄拉克锥出现分裂情况，形成自旋极化的表面态形态。通过对铁磁层的磁化方向进行调节行为，能够自旋极化电流的方向实施精准控制举动；通过对铁磁层的厚度与成分做出改变操作，能够对交换耦合强度开展调控工作，进而对自旋极化度进行调节活动。比如，在 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Fe}$ 异质结构当中，Fe 层的内置磁矩可以让 Bi_2Te_3 的表面态产生明显的自旋分裂现象，在不存在外磁场的条件下就能够实现自旋极化度达到 80% 程度的电流输出情况，并且通过对 Fe 层的磁化方向进行翻转操作，能够实现自旋极化电流的反向结果。磁近邻效应调控将外磁场调控的体积与能耗难题予以解决处理，是达成拓扑绝缘体基自旋电子器件微型化、低能耗目标的关键技术。

（三）界面工程调控

拓扑绝缘体的自旋极化电流输运过程主要依靠于表面态部分，而表面态的特性非常容易受到界面结构与化学环境的影响作用，所以通过界面工程对表面态的质量与特性实施调控行为，能够实现自旋极化电流的高效调控目的。界面工程调控主要涵盖界面修饰、异质结构筑等方式类型。界面修饰是通过在拓扑绝缘体表面进行超薄绝缘层（例如 Al_2O_3 、 HfO_2 ）或者金属层（例如 Au、Ag）的沉积操作，对表面化学环境做出改善处理，对表面态的散射现象加以抑制，使自旋极化电流的输运效率得到提升。

比如，在 Bi_2Se_3 拓扑绝缘体表面开展超薄 Al_2O_3 层的沉积工作，能够有效抑制表面氧化与杂质吸附问题，减少表面态电子的散射情况，让自旋极化电流的输运距离从几个纳米的状态提升至几十纳米的程度。此外，凭借表面掺杂修饰办法，还能调整拓扑绝缘体的费米能级所在之处，进而对自旋极化电流的强度实施调控。异质结构建造是借助拓扑绝缘体与其他功能材料（像铁磁材料、超导材料、二维材料等）构建异质结，运用界面耦合效应调节拓扑表面态的特征，达成自旋极化电流的多功能调控。除了前面所讲的拓扑绝缘体 / 铁磁体异质结，拓扑绝缘体 / 超导体重合构造能够成就拓扑超导体，其表面态为马约拉纳零能模，可运用于拓扑量子计算；拓扑绝缘体 / 二维材料（例如石墨烯、 MoS_2 ）异质结能够借助二维材料的高迁移率属性，提高自旋极化电流的输运效率。以 Bi_2Se_3 / 石墨烯异质结为例，石墨烯的高迁移率可让自旋极化电流的迁移率提升一个数量级，明显增强电流输运性能。界面工程调控不光可以提高自旋极化电流的输运效率，还能够实现自旋极化电流的多功能调控，给拓扑绝缘体基自旋电子器件的功能扩展提供了可能性。

四、结论

拓扑绝缘体依靠独特的自旋 - 动量锁定特性，给自旋极化电流的高效产生与调控提供了理想平台。本文深入分析了光致、电致、磁致三种产生机制的物理本质和实现途径，系统探讨了栅压、磁场、界面工程等主流调控方法的作用机理、技术特点以及优劣势。目前相关研究已经取得显著进展，然而仍然面临高质量材料可控制备难度大、表面缺陷与氧化问题显著，界面耦合机制不清晰造成自旋极化度降低，以及器件稳定性与实用化程度需要提升等关键挑战。未来研究需要聚焦高精度制备技术研发、表面态调控机制与自旋输运关联探究以及器件集成化实用化推进，相关技术的突破将会给自旋电子学发展带来新的机遇。

参考文献

[1] 武文逸. 三维拓扑绝缘体及二维 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 材料的自旋光电流研究 [D]. 福州大学, 2022.
[2] 陆新原, 李新兴, 王越超, 陶炜, 郝承磊, 张弛. 发电机绝缘故障位置自动化在线监测诊断系统 [J]. 电子设计工程, 2025, 33(02): 181-184+191.
[3] 刘想, 王希光, 李志雄, 郭光华. 铁磁畴壁中自旋极化电流诱导的左旋极化自旋波 [J]. 物理学报, 2024, 73(14): 228-233.
[4] 魏高帅. 自旋极化电子的太赫兹波辐射与太赫兹波探测 [D]. 中国科学院大学 (中国科学院物理研究所), 2023.
[5] 付恩狄, 姚明亮, 梁宇柔, 彭伟军. 基于 JAVA 技术的设备绝缘状态自动化监控方法 [J]. 电气自动化, 2023, 45(02): 36-38+41.
[6] 顾臻, 李小平, 周磊, 张静月, 贺青. 基于红外图像识别技术的电力设备绝缘自动化检测研究 [J]. 制造业自动化, 2022, 44(10): 174-178.