1 绪论

1.1 引言

拓扑绝缘体是一类新兴的物态，其独特之处在于体相绝缘但边缘态导电，且边缘态受到拓扑保护。除此之外，其边缘态的电子还具有自旋方向与动量方向严格垂直，形成手性螺旋结构的特性。其拓扑保护的边缘态使得边缘态导电性不易受到材料杂质和缺陷的影响，扩展了人们对量子态的理解，同时也在低功耗电子器件领域展现出巨大的应用潜力，为新型电子器件的开发提供了新的可能。因此激发了人们对于拓扑绝缘体的研究兴趣。拓扑绝缘体可以根据时间反演对称性是否被破坏分为两大类[1]。早期的整数量子霍尔效应系统和Haldane模型均属于破坏时间反演对称性的拓扑相，其中Haldane模型是首个理论预测的陈绝缘体[2]。2005年，Kane和Mele提出了具有突破性的Kane-Mele模型[3]。该模型不仅是一个时间反演不变的拓扑绝缘体，而且首次预言了量子自旋霍尔效应，从而开创了时间反演对称性保护的拓扑绝缘体研究范式。同时，Kane与Mele还引入了Z₂拓扑不变量作为新的拓扑绝缘体分类标准[4]。Kane-Mele模型为拓扑绝缘体向更丰富的种类扩展奠定了基础，并加深了人们对拓扑绝缘体背后物理机制的理解。

随着对物质拓扑态的深入研究，拓扑绝缘体的调控发展出了许多不同的方法。例如通过调整磁场可以通过Zeeman效应或轨道磁效应破坏系统的时间反演对称性，从而得到量子霍尔效应或量子反常霍尔效应。也可以通过调节电压来调节Rashba自旋轨道耦合强度，从而诱导材料发生拓扑相变。对材料进行磁性或非磁性掺杂也是一种对拓扑绝缘体进行调控的手段。例如实验上可以通过掺杂磁性杂质如Cr、Fe等，引入内禀磁性，实现零磁场下的量子反常霍尔效应等。但是传统的调控高度依赖于低温条件或掺杂手段等，且磁场强度、磁场方向的调控参数灵活性较低，在实验实现上具有诸多不便性。近年来，研究者们发现，对材料添加时间周期性外场的驱动，同样可以诱导拓扑相并对其进行调控，而且还会呈现出许多与静态系统截然不同的现象[5][6][7]。使用光场通过弗洛凯理论对拓扑绝缘体进行调控属于非平衡过程，使用圆偏振光驱动拓扑系统可以在打破时间反演对称性的情况下，在非平衡态下诱导出新拓扑相。特别地，光场作为一种易于在实验中实现的时间周期性外场，可以更方便地调控拓扑态，具有很强的可操控性和易实现性。因此，光场驱动下的拓扑凝聚态模型为拓扑性质的研究提供了一种更为便捷的途径，对于加深人们对拓扑性质的理解具有重要意义。

拓扑物态自发现以来就成为了凝聚态物理领域的研究热点。1980年，K.v.Klitzing等人通过研究二维电子气在强磁场和低温下的输运行为，发现了如图1（b）所示的整数量子霍尔效应，这种量子效应呈现了绝缘的体态和受拓扑保护的导电边缘态以及不受杂质和缺陷干扰的量子化霍尔电导平台，在低能耗电子器件中表现出了巨大的应用潜力[8]。Thouless和TKNN等人在1982年通过对强磁场和二维周期性势场共同作用下电子系统的量子霍尔效应进行研究，首先阐明了量子化霍尔电导的产生机制，并提出了使用陈数对拓扑凝聚态系统进行分类的方法，使得人们对拓扑绝缘体有了较为系统和全面的认识[9]。随着日后人们对于拓扑物态进行了更广泛更深入的研究，量子霍尔效应衍生出了许多性质各异的霍尔效应，比如图1（d）所示的量子反常霍尔效应和图1（f）所示量子自旋霍尔效应。

量子自旋霍尔效应则是材料在无外磁场的条件下自旋相反的电子沿材料边缘反相流动形成无耗散的自旋极化电流的效应，是一种二维拓扑绝缘体特有的现象。最早在2005年由Kane和Mele在Kane-Mele模型中提出石墨烯中强自旋轨道耦合是一种实现QSHE的可能方法[3]。但是由于石墨烯中的自旋轨道耦合（SOC）效应过于微弱，未能在实验上实现。但是Kane和Mele在论文中提出的使用Z2拓扑数对拓扑绝缘体进行分类的方法加深了人们对于拓扑绝缘体的认知，推动了不同种类的拓扑绝缘体的研究和发现。随后，在2006年Bernevig等人从理论上提出HgTe/CdTe量子阱是实现QSHE的理想系统[12]，并在2007年，由Markus König和Steffen Wiedmann等人在HgTe体系中成功观测到了量子自旋霍尔效应的边缘态导电性，验证了Bernevig的理论预言[13]。

量子反常霍尔效应是一种无需外加磁场的量子霍尔效应，即在零磁场条件下也可以观测到量子化的霍尔电导率。其物理机制是源于材料内部自发的时间反演对称性破缺和拓扑非平庸能带结构。量子反常霍尔效应的理论基础最早由Haldane在1988年构建的二维周期性磁场调制的蜂窝晶格模型中建立[2]。Haldane在这篇文章中引入了空间周期性调制的无净磁通量的人工磁场，证明了无需外部磁场也可实现量子霍尔效应。但是由于其周期性磁场在空间上过于复杂而无法在实验上实现。在2010年，Yu等人首次提出在磁性掺杂的拓扑绝缘体中可以通过自发磁化打破时间反演对称性并保持拓扑非平庸的能带结构，从而实现量子反常霍尔效应的理论预测[10]。2013年，薛其坤团队首次在Cr-doped (Bi,Sb)₂Te₃薄膜中实验观测到该效应，为进一步研究拓扑物态提供了实验支撑[11]。

在传统的拓扑绝缘体研究中，材料的调控高度依赖于平衡态下的磁场：例如，Haldane通过引入空间周期性人工磁场打破时间反演对称性，构建了预言QAHE的理论模型；Yu等人则对拓扑绝缘体进行磁性掺杂以构建内禀铁磁序，从而实现QAHE在实验上的观测。然而这些调控方法面临着极低温和掺杂不均的两大挑战。为了突破这两大限制，2010年，Lindner等人提出了一种新颖的非平衡拓扑态调控范式——Floquet拓扑绝缘体，创新性地提出了利用时间周期性外场直接调控系统拓扑性质的方法，并提出了在现有材料（HgTe/CdTe量子阱）中实现Floquet拓扑绝缘体的理论方案[14]。通过使用时间周期性外场（如光场）驱动拓扑系统进入非平衡拓扑态，这种方法可以对拓扑不变量进行直接调控，避免了磁场的极低温条件和掺杂的不均匀问题，为拓扑绝缘体的调控提供了新思路。该研究不仅将拓扑物态的研究范畴从平衡态扩展至非平衡态，更揭示了时间维度对拓扑序的调控潜力，为探索光致拓扑超导、Floquet马约拉纳零能模等前沿方向奠定了理论基础。

1.2 本文主要研究内容

本课题主要研究双圆偏振光驱动下Kane-Mele模型的拓扑相变，并深入分析光驱动拓扑相变的物理机制。具体而言，首先熟悉紧束缚模型理论，基于紧束缚模型方法重现Kane-Mele模型的电子能带结构和边缘态，并计算该模型的拓扑不变量。其次，熟悉并理解Floquet工程的研究背景和物理意义，结合Peierls代换和Floquet理论研究固体系统中周期性光场驱动下的电子行为。最终，将重点研究双圆偏振光驱动下Kane-Mele模型电子性质的演化行为。

1.3 本文研究意义

研究双圆偏振光驱动下的Kane-Mele模型的拓扑相变，有助于加深我们对光与物质相互作用的理解，并完善拓扑物理的发展。拓扑绝缘体在自旋电子学、量子计算等领域具有巨大的应用潜力。时间周期性光场调控下的拓扑绝缘体可以实现对自旋流等系统性质的精确控制，从而为发展新型拓扑器件、打破传统半导体器件的瓶颈、进一步深入研究拓扑相变以及突破绝缘体研究瓶颈奠定基础。

1.4 本章小结

拓扑绝缘体是一类具有受到拓扑保护的导电边缘态、绝缘体态、自旋动量锁定等特性的新兴物态。Floquet理论是一种研究时间周期性外场驱动下的拓扑系统的理论。本文在拓扑绝缘体和Floquet理论的基础上，对于Kane-Mele模型的能带结构、电子性质进行了研究。