

激光与光电子学进展

马约拉纳费米子的研究进展

陈华俊*

安徽理工大学力学与光电物理学院, 安徽 淮南 232001

摘要 马约拉纳费米子遵循非阿贝尔统计,在拓扑量子计算和量子信息处理方面具有潜在的应用前景。过去十多年中,各种可能存在马约拉纳零模的复合低维凝聚态系统相继被提出,并通过各种电学手段探测到了类似马约拉纳费米子的信号,如半导体纳米线/超导体系统、铁原子链/超导结构、铁基超导复合系统,以及拓扑绝缘体/超导体异质结等,并且拓扑绝缘体可能存在马约拉纳费米子的提议备受关注。最近几年也在实验上观测到了类似马约拉纳费米子的信号。然而对于马约拉纳费米子在低维凝聚态系统中存在的确凿证据以及马约拉纳费米子实现的拓扑量子计算还有待研究。本文综述了在各种复合低维凝聚态系统中找寻马约拉纳费米子的方案,并对实验探寻马约拉纳费米子的电学方法进行了详细的阐述。当前马约拉纳费米子的理论研究和实验探测方案主要集中在电学测量方面,为了得到更确凿的马约拉纳费米子的证据,有必要提出可供选择的探测马约拉纳费米子的方法或模型。考虑目前在微纳尺度上的技术进展,结合复合微纳系统,通过引入光学泵浦-探测技术,提出一系列全光学探测马约拉纳费米子的方法。然后,对光学探测马约拉纳费米子,以及马约拉纳费米子诱导的相干光学传输进行了综述。最后,展望了在固态量子器件中马约拉纳费米子在拓扑量子计算上的应用前景。

关键词 量子光学; 马约拉纳费米子; 半导体纳米线; 铁原子链; 超导结构; 拓扑绝缘体; 光学泵浦-探测技术; 量子点; 纳米机械振子

中图分类号 O469

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212849

Research Progress on Majorana Fermions

Chen Huajun*

*School of Mechanics and Photoelectric Physics, Anhui University of Science and Technology,
Huainan 232001, Anhui, China*

Abstract Majorana fermions (MF) obey non-Abelian statistics and have potential applications in topological quantum computation and quantum information processing. Several types of hybrid devices that can possibly host MFs in low-latitude condensed matter systems have been proposed in the last decade, including hybrid semiconductor nanowire/superconductor devices, iron chains on the superconducting surface, hybrid iron-based superconductor, and topological insulator/superconductor structures, with the analogous Majorana signals have been observed in the above hybrid system with different electrical means. And the proposal that there may be Majorana fermions in topological insulators has attracted much attention. Although a mass of theoretical schemes have been proposed consecutively, and similar Majorana signatures have been experimentally demonstrated, no conclusive evidence of the existence of MFs in low-latitude condensed matter systems is available and MFs-based topological quantum computing is difficult to achieve. In this review, we introduce several schemes for detecting MFs in low-latitude condensed matter systems, as well as elaborate on the different electrical means for probing MFs. Most MFs detection schemes focus on electronic transport properties recently, and in order to obtain more conclusive evidence of MFs, it is necessary to propose alternative methods for detecting MFs. Alternative setups or proposals for detecting MFs are thus required to obtain definitive signatures of MFs. We introduced an all-optical pump-probe technology accompanying hybrid micro- and nano-systems, and proposed a series of all-optical methods for detecting MFs, benefiting from recent progress in nanotechnology. Moreover, we also review the optical detection of MFs and MFs-induced coherent optical propagation. Finally, we anticipate quantum computation

收稿日期: 2021-11-01; 修回日期: 2022-01-14; 录用日期: 2022-01-17; 网络首发日期: 2022-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(11647001, 11804004)、中国博士后科学基金(2020M681973)、安徽省自然科学基金(1708085QA11)、高校优秀青年骨干教师国外访问研修项目(gxgwf2021024)、安徽理工大学引进人才科研启动项目(11211)

通信作者: *chenphysics@126.com

using MFs in solid-state quantum devices.

Key words quantum optics; Majorana fermions; semiconductor nanowire; iron chains; superconductor structures; topological insulator; optical pump-probe technology; quantum dot; nanomechanical resonator

1 引 言

2012年,《Science》发布了该年度十个重要的科学突破成果,其中一项是科研者们寻找多年的马约拉纳费米子信号在低维凝聚态物理系统中的发现。什么是马约拉纳费米子呢?我们可把量子粒子可分为两类:一是服从费米-狄拉克统计的自旋为半奇数的粒子统称为费米子,比如电子、质子等,即其反粒子不等于它本身;二是服从玻色-爱因斯坦统计的有整数自旋的粒子统称为玻色子,比如光子、介子等,其反粒子等于它本身。是否有一种粒子,它是费米子,但是它的反粒子又等于它本身呢?在1937年,有个名叫马约拉纳的意大利物理学家在对著名的英国物理学家狄拉克所提出的用于描述费米子和玻色子行为的方程式进行改写后,得到了一个有趣的方程^[1],该方程不仅能论证中性自旋1/2的费米子粒子,而且满足该方程的费米子的反粒子恰是它自己本身。同时马约拉纳还大胆预测自然界中极有可能存在一种反粒子是它本身的费米子,这便是后来科学家们口中所说的马约拉纳费米子。为了更好地区别马约拉纳费米子与狄拉克费米子,我们可以引入经过二次量子化的产生和湮灭算符,即 γ^\dagger 和 γ 。对于狄拉克费米子,满足关系式 $\gamma^\dagger \neq \gamma$;对于马约拉纳费米子,关系式为 $\gamma^\dagger = \gamma$ 。从马约拉纳费米子概念的提出到目前为止已有八十多年,研究者一直在找寻马约拉纳费米子的迹象。曾经有科学家预测中微子有可能是马约拉纳费米子,但几十年过去了,仍然没有发现中微子就是马约拉纳费米子的迹象,而且在基本粒子中也没有发现类似马约拉纳费米子的粒子。

由于在 高能粒子物理中至今依然没有找到马约拉纳费米子迹象,近二十年内,许多研究者尝试在其他物理系统中找寻马约拉纳费米子的信号。其中,最著名的便是凝聚态物理学家们所做的尝试,他们尝试从固体物质内电子的集体行为中形成马约拉纳费米子,尤其是一些低维复合的纳米系统,如一维纳米半导体线与超导体相互接触的表面,期望马约拉纳费米子能以准粒子的形式出现在低维凝聚态物理系统中。众所周知,在超导体中准粒子恰是其自己的反粒子,因此马约拉纳费米子是否也能作为准粒子产生于超导体中呢?超导体规定电子-空穴对称于准粒子激发,将能量为 E 的产生算符 $\gamma(E)$ 与能量为 $-E$ 的湮没算符 $\gamma(-E)$ 关联在一起。当能量费米能级(E)为零时,得到关系式 $\gamma^\dagger = \gamma$,马约拉纳费米子将被束缚在某个缺陷中,我们将整个系统称作“马约拉纳束缚态”或“马约拉纳零模”。

研究者之所以不断努力寻找马约拉纳费米子,主要是由于其在量子计算方面的重要应用。马约拉纳费米子遵循非阿贝尔统计,可以形成稳定的比特,变换次序会改变系统的状态,因此可以通过编制算符来实现对它的操控以便实现拓扑量子计算及量子信息处理。一旦在凝聚态物理系统中找到马约拉纳费米子,就意味着研究者们找到了一把打开拓扑量子计算大门的“钥匙”,从而使得在固态物理系统中实现拓扑量子计算成为可能。其结果不仅能解决量子计算中的容错性问题,还为拓扑量子计算拓展了巨大的运算空间,引发未来在电子技术领域中新一轮的技术革命。更重要的是,马约拉纳费米子在凝聚态物理中的发现也为其在凝聚态物理中找寻其他物质(如暗物质)提供了新思路。

本文主要介绍近十多年来实验上提出的可能存在马约拉纳费米子的实验方案,以及各种电学探测马约拉纳费米子信号的方法。结合我们近年来所提出的光学探测马约拉纳费米子所做的一系列成果,引入光学泵浦探测技术以及复合微纳系统,并对光学方法探测马约拉纳费米子进行了综述。

2 马约拉纳费米子的电学测量

2.1 马约拉纳费米子存在的典型复合系统

2.1.1 半导体纳米线/超导体复合结构

在过去十几年中,人们相继提出大量关于马约拉纳费米子是否存在于凝聚态物理系统中的理论研究方案^[2-4]。2008年,Fu和Kane^[2]所做的工作为在低维凝聚态物理系统中研究马约拉纳费米子,并取得了突破性的理论研究进展。他们设计出一种超导体/拓扑绝缘体的复合结构,并预言马约拉纳束缚态将出现于拓扑绝缘体与超导体的接口,然而当时尚无实验证实该理论提出的模型。2010年,Lutchyn等^[5-6]则进一步分别独立提出了实验上较容易实现的理论模型,他们设计的复合系统比较相似,即把带有自旋-轨道耦合的一维纳米线置于常规s波超导体上,在磁场的作用下纳米线发生量子相变进入拓扑超导相,同时一对马约拉纳费米子将出现在纳米线的两端。但是他们各自的系统也有着明显的差别,Lutchyn等在他们的模型中证明了在交界处的Andreev束缚态能谱在拓扑上的平凡(即不包含任何Majorana)和非平凡相性质是不同的,它们在零能量时分别有偶数和奇数个交叉。通过超导电流的测量,人们易于辨别拓扑上不同的相位,并通过简单改变平面内磁场或栅电压来观察拓扑相变^[5]。Oreg等^[6]提出的模型中自旋轨道耦合与塞曼场或强相

相互作用的结合可能导致单通道量子线中螺旋电子流的形成,并且这些马约拉纳态不需要系统中存在涡流。

2012年,研究者在低维凝聚态物理系统中找到了类似马约拉纳费米子迹象的首个实验证据。该实验工作由荷兰代尔夫特理工大学的研究团队所完成,实验装置如图1^[7]所示,一条通有轴向磁场的半导体纳米线放在一个超导体上形成复合结构,其中半导体纳米线是铋化锑,具有自旋-轨道耦合,超导体为s-波超导结构。通过隧道效应光谱对该器件进行观测,可以发现,当磁场强度处于100~400 mT时,微分电导在电压为零处的隧道效应光谱中呈现出零偏压电导峰现象。进一步增大磁场强度,当大于400 mT时,扫描隧道显微镜显示,隧道效应光谱中呈现零偏压电导峰的分裂行为。该实验结果恰好与一对马约拉纳束缚态十分吻合。他们预测在半导体纳米线与超导体结构的接触区域的两端各出现一个马约拉纳费米子,即一对马约拉纳费米子出现在半导体纳米线的两端^[7]。他们实验观测的结果与理论预测以及马约拉纳费米子信号相吻合,这一开创性的实验报道为马约拉纳费米子的找寻指明了方向。长期以来,人们在高能物理中孜孜不倦地找寻马约拉纳费米子的信号,却一直未找到。而该工作把研究者的思路引入到凝聚态物理系统中,如果能在凝聚态物理系统中观察到马约拉纳费米子的迹象,不仅表明凝聚态物理的强大生命力,还可以使马约拉纳费米子在凝聚态物理系统中更容易操控,为基于马约拉纳费米子的量子计算提供基础。

同年,瑞典隆德大学固体物理实验室的研究团队和北京大学徐洪起研究团队,以及美国普渡大学研究

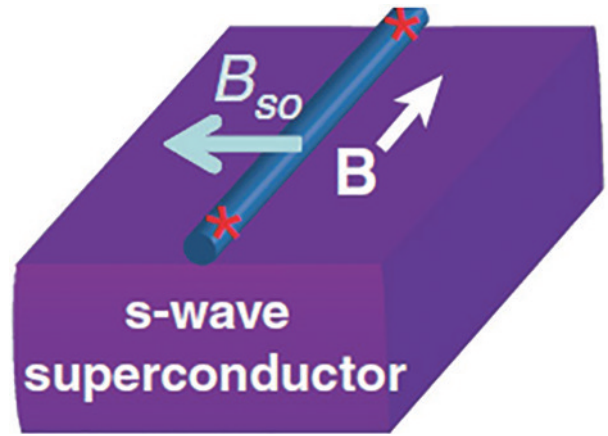


图1 半导体纳米线/超导体复合器件^[7]
Fig. 1 Semiconductor nanowire/superconductor composite device^[7]

团队,几乎同时各自在铋化锑纳米线/铌超导体复合结构中的约瑟夫森结中独立地观察到马约拉纳费米子所产生的超导电流现象。北京大学徐洪起研究团队所观测的实验结果表明,在无磁场和存在库伦阻塞的条件下,约瑟夫森结被局限在一个很小的阈值范围内,如图2^[8]所示。然而当磁场存在且超过一定的磁场强度阈值时,铋化锑纳米线将实现由普通相变到拓扑相的转变,同时超导电流将产生很大的极聚增强的效果,并伴随幅度量子化特征^[8]。该研究工作也对选择铋化锑纳米线的原因做了解释:该材料具有较优越的电子输运特性,更容易在隧道效应光谱中观测到零偏压电导峰。另一方面,美国普渡大学研究团队采用超导量子干涉仪进行实验探测,当有限磁场存在时,实验上观察

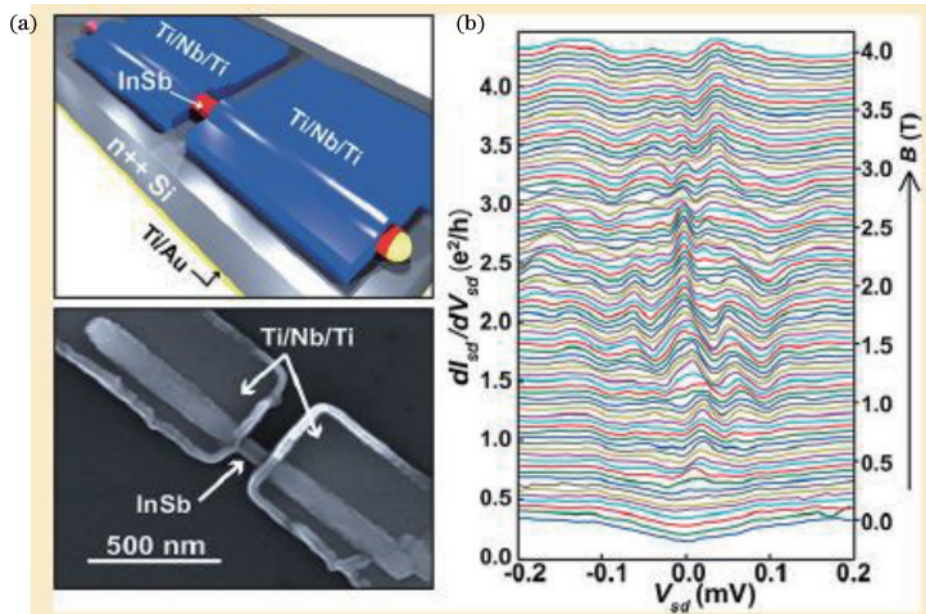


图2 铋化锑纳米线/铌超导体复合结构。(a)铋化锑纳米线/铌超导体器件结构图;(b)该器件的扫描电子显微镜照片;

(c)微分电导曲线^[8]

Fig. 2 Composite structure of Nb-InSb nanowire-Nb superconductor. (a) Device structure of Nb-InSb nanowire-Nb superconductor; (b) scanning electron microscope image of the device; (c) differential conductance curves^[8]

到了交流分数约瑟夫森效应,如图 3^[9]所示。以上独立的实验分别指出了在半导体/超导体复合结构中存在的三个事实:1)存在零能态;2)零能态电导呈现量子化特征;3)出现分数约瑟夫森效应。这些实验结果与理论上预期的结果十分吻合。相比于通过隧道效应光谱

中的零偏压电导峰来表征马约拉纳费米子,交流约瑟夫森效应的优势是可以有效地避免两个不同马约拉纳费米子的 Andreev 能带在费米面的非弹性弛豫。因此,约瑟夫森效应在该复合系统中的观测也是马约拉纳费米子存在于低维凝聚态物理系统中的另一个证据。

2.1.2 铁原子链/铅超导体结构

马约拉纳费米子是其自身的反粒子,人们首先想到的是通过隧穿光谱学来证明它们是否存在,这是由于马约拉纳独特的性质会导致其在零偏压处诱导出电导峰。而上述几个实验也确实通过隧穿光谱学实验探测到了类似的零偏压电导峰,因此他们认为该电导峰就是马约拉纳费米子所引起的。但是,仍有许多研究者对上述实验结果质疑,并且对其是否是马约拉纳费米子一直存在争论^[10-14]。这是因为在凝聚态物理系统中,类似的零偏压电导峰也可能是其他物理机制所产生的,比如常见的近藤效应^[15-16]、反局域效应^[17]、压带隙态^[18-19],以及半导体纳米线的混乱或带隙弯曲^[20]等。因此,以上实验结果仅通过隧穿光谱中的零偏压电导峰无法明确证明在凝聚态物理系统中确实存在马约拉纳费米子。2014年,美国普林斯顿大学的研究团队设计了由许多铁原子构成的铁原子链平铺在铅超导体表面,通过使用低温扫描隧道显微镜在铁原子链的两端观测到了马约拉纳束缚态,如图 4^[21]所示,这也是低维凝聚态物理系统中第一次观测到了马约拉纳束缚态。

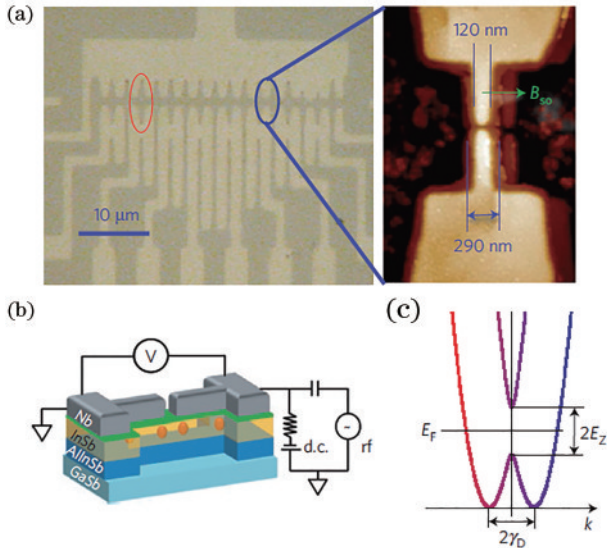


图 3 超导量子干涉实验。(a) 该器件的光学成像;(b) 该器件的示意图;(c) 自旋轨道相互作用能量耗散^[9]
Fig. 3 Superconducting quantum interference experiment. (a) Optical imaging of the device; (b) schematic of the device; (c) energy dispersion with spin-orbit interaction^[9]

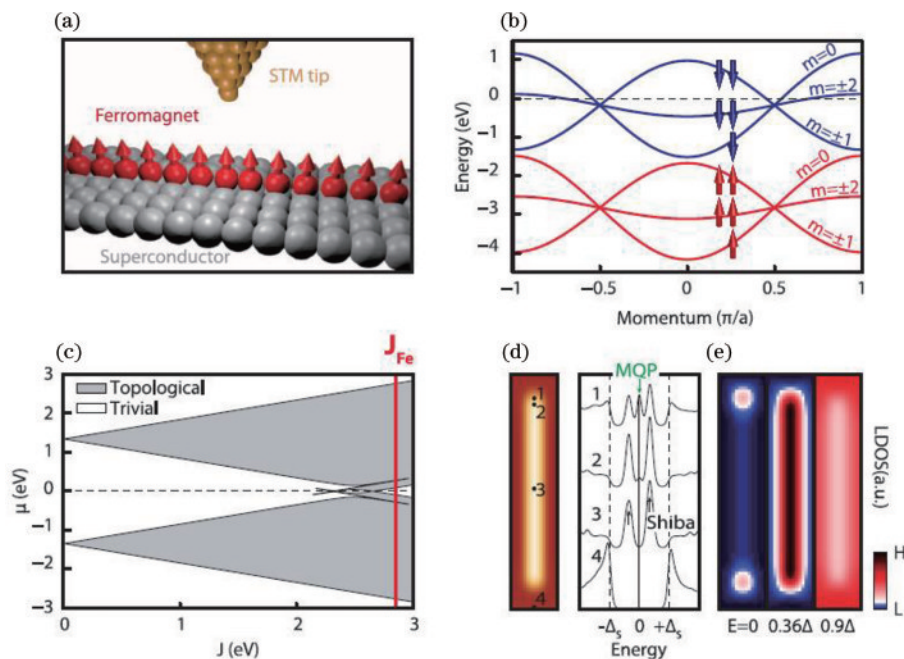


图 4 铁原子链/超导体复合系统。(a) 铁原子链/超导体装置;(b) 线性铁原子链的能带结构;(c) 拓扑超导相位作为交换相互作用的函数;(d) 原子链植入到超导体中局域态密度的模型计算;(e) 不同的能量、相同模型计算的空间可分辨的局域态密度^[21]
Fig. 4 Fe atomic chain/superconductor hybrid system. (a) Fe atomic chain/superconductor device; (b) band structure of linear Fe atomic chain; (c) topological superconducting phase as a function of exchange interaction; (d) model calculation of local density of states of atomic chain embedded into superconductor; (e) spatially resolved local density of states calculated by same model with different energies^[21]

美国加州理工学院的研究者 Alicea 曾对此实验结果做过评论:该项实验的结果对马约拉纳费米子存在于凝聚态物理系统中给出了“令人信服”的证据。2017年, Jeon 等^[22]继续采用普林斯顿大学研究团队所提出的铁原子链/铅超导体复合结构,通过自旋-极化扫描隧道显微技术进一步实验证明了马约拉纳零模在凝聚态物理系统的存在,同时 Jeon 研究组的成果表明,该方案能够区分马约拉纳零模信号与其他准粒子所产生的信号,并且马约拉纳零模出现在拓扑带结构中,该研究结果为马约拉纳费米子存在于凝聚态物理系统提供了更为直接的证据。

2.1.3 铁基超导结构

2015年,中国科学院物理研究所的潘庶亨和丁洪研究团队基于休斯顿大学超导中心的吴净研究员所生长的铁基超导体 $\text{Fe}1+x(\text{Te},\text{Se})$,通过极低温高分辨率的扫描隧道显微镜,在该铁基超导体中发现位于间隙位置的单原子铁杂质上产生了一个非常尖锐的零能电导峰。他们通过搬运原子的方法,证实了该束缚态是由铁杂质所诱导的,如图 5^[23]所示。结果表明,该零能束缚态仅存在于 1 nm 范围内的单个铁杂质原子上,而且呈现各向同性。更有趣的是,其能量稳健且严格处于零能

态,即使增强磁场强度到 8 T(这是一般磁铁磁场的 100 倍),或者让两个各自独立的零能束缚态互相接近,都无法使其偏离零能态或者产生零电导峰的分裂。为了验证该零能束缚态的稳定性,他们不断重复该实验,并讨论了不同磁场强度对结果的影响,以及磁通涡旋和零能束缚态间之间的相互作用对结果的影响。中国科学院物理研究所的胡江平研究组与波士顿学院汪自强教授研究组的理论合作者对结果进行了仔细研讨和分析,他们最终认为该零能束缚态与常规超导体中的杂质态有着很大的区别。众所周知,在一般的超导体中,磁性或非磁性杂质通常会产生一正一负、能量上对称的一对束缚态,并且在磁场的作用下即便是恰好在零能的普通束缚态也会发生分裂现象。因此,他们认为该结果可能是因为 Te 的掺入对该体系产生了比较大的影响。由于 Te 相比于 Se 具有更大的自旋轨道耦合,将很可能改变材料的拓扑性质。并且实验中观测到的如此稳健的零能束缚态现象又与理论预言的拓扑超导体中的马约拉纳费米子的性质十分吻合,因此他们有理由相信该零能电导峰的出现很有可能是近年来研究者们不断找寻的马约拉纳费米子^[23],也为马约拉纳费米子存在于低维凝聚态物理系统提供了进一步的证明。

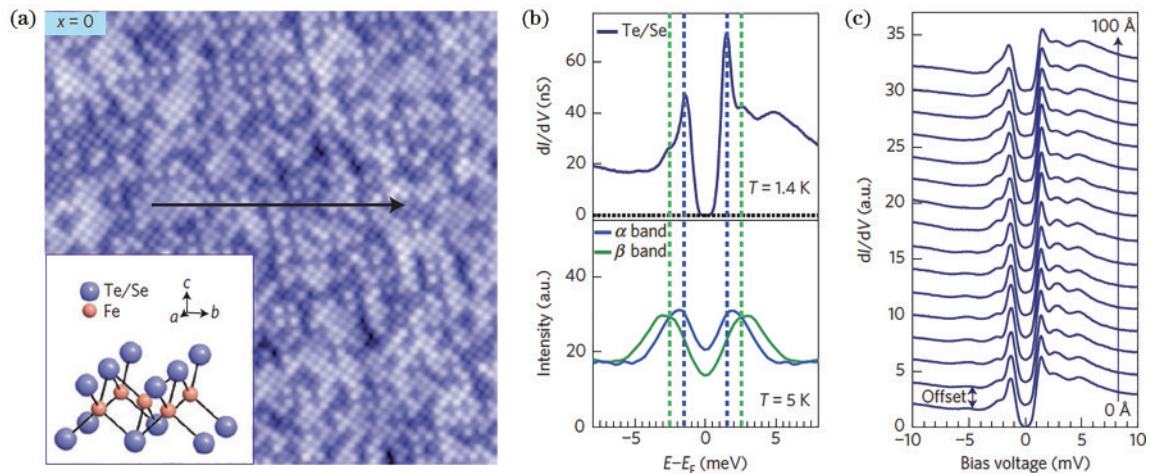


图 5 Fe(Te,Se)上的均匀双带隙结构。(a) (Te,Se)的拓扑成像,插图为Fe(Te,Se)晶体结构;(b) (Te,Se)表面的扫描隧道光谱和角分辨光电子能谱;(c)沿着图(a)箭头的扫描隧道光谱^[23]

Fig. 5 Homogeneous two-gap structure on Fe(Te,Se)^[23]. (a) Topographic imaging of (Te,Se), inset is crystal structure of Fe(Te,Se); (b) scanning tunneling spectroscopy and angle-resolved photoelectron spectroscopy of (Te,Se) surface; (c) scanning tunneling spectroscopy along the arrow in Fig. (a)^[23]

2.1.4 拓扑绝缘体材料

近年来,拓扑绝缘体越来越多地受到了研究者的广泛关注^[24]。拓扑绝缘体是一类新颖的量子态,其内部不导电,呈现绝缘体特性,其表面出现无能隙的表面态。表面态具有时间反演对称性,其中的电子自旋和动量方向耦合在一起,因此,表面态在能量和动量空间中呈自旋极化的螺旋型色散关系^[25]。在过去的十几年中,人们相继在实验上制备出了各种各样拓扑绝缘体材料^[26]。当拓扑绝缘体表面态与磁体或者超导体

相靠近并产生相互作用时,会诱发出许多奇特的量子现象,如量子反常霍尔效应^[27-28]、拓扑超导特性^[29],以及Majorana费米子^[2,30]等。

基于对拓扑绝缘体材料的研究,通过制备拓扑绝缘体/超导体异质结器件,利用超导近邻效应能使拓扑绝缘体的表面态发生超导转变。2012年,上海交通大学贾金峰研究组在实验室制备出了一种由拓扑绝缘体材料与超导体材料复合而成的特殊人工薄膜^[31]。他们将三维拓扑绝缘体薄膜(材料为 Bi_2Se_3)沉积在超导体

(材料为 NbSe_2) 的表面上,通过扫描隧道显微镜对拓扑绝缘体的表面进行实验观测,发现拓扑绝缘体的表面态出现了超导能隙,如图 6(a)所示。此外,角分辨光电子能谱实验也成功证明表面态的拓扑特性仍被保持着,从而证明了拓扑表面态和超导态共存的结果。随后,贾金峰教授研究组分别在 2014 年和 2015 年对该拓扑绝缘体材料做了进一步分析,结果表明该材料中存在着类似马约拉纳费米子零模的迹象。实验观测到的结果显示,在同样的材料系统中发现在拓扑绝缘体的表面上所得到的微分电导谱出现了零偏压电导峰。他们通过外加磁场等实验手段排除了拓扑平庸态的影响,证明了马约拉纳零模可能存在于拓扑绝缘体材料中的迹象^[32-33]。2016 年,贾金峰研究团队与清华大学

薛其坤团队、浙江大学的许祝安团队、浙江大学的张富春团队、南京大学的李绍春团队以及美国普林斯顿的付亮等多方协同合作,通过对超导的涡旋进一步研究,在三维拓扑绝缘体/超导体这个复合结构中利用扫描隧道显微镜成功观测到零偏压电导峰的信号,该结果进一步表明,零偏压电导峰的来源是由马约拉纳零模所诱导的^[34],如图 6(c)所示。他们同时解决了一个从上至下包含理论基础、材料制备以及实验探测的复杂问题,为马约拉纳费米子的存在问题与探测手段提供了最新的直接的证据^[34]。在低维凝聚态物理系统中对马约拉纳信号的观测,为马约拉纳费米子的存在提供了直接的证据,也为基于马约拉纳费米子的拓扑量子计算提供了基础。

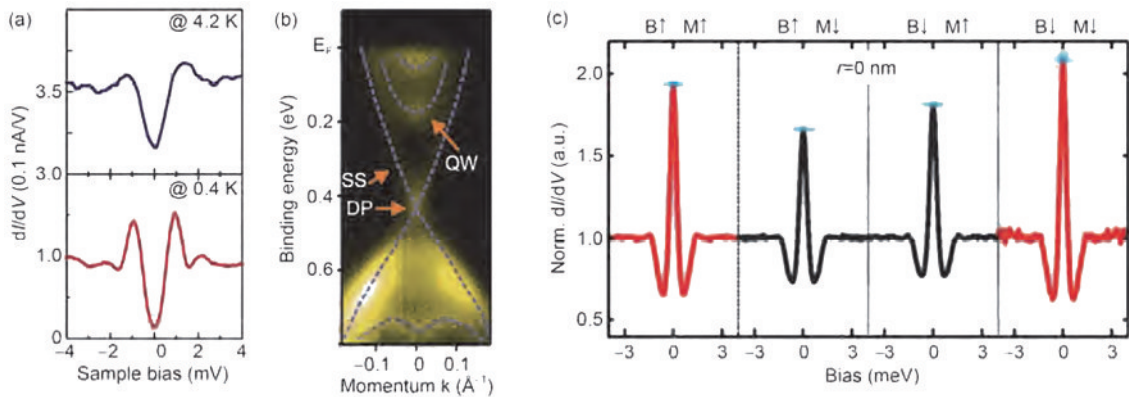


图 6 拓扑绝缘体中的超导性^[31,34]。(a) Bi_2Se_3 膜在 4.2 K 和 0.4 K 的微分电导谱;(b) 结合能为 0.45 eV 的狄拉克点;(c) 自旋极化针尖在涡旋中心测得的微分电导

Fig. 6 Superconductivity in topological insulator^[31,34]. (a) Differential conductance spectra of Bi_2Se_3 films at 4.2 K and 0.4 K; (b) Dirac point with binding energy of 0.45 eV; (c) differential conductance at the vortex center measured with spin-polarized tip

2017 年 7 月,加利福尼亚大学洛杉矶分校的王康隆团队在实验中观测到了马约拉纳费米子模存在的证据,并且在很大程度上排除了其他因素所造成的影响,该实验结果成为马约拉纳准费米子存在的强有力证据^[35]。他们的实验利用反常量子霍尔绝缘体与超导体耦合,进而形成一种新的拓扑量子态,即拓扑超导体。通过采用分子束外延技术,该团队制备了 6 nm 厚的反常量子霍尔绝缘体薄膜,超导体后将样品沉积在该薄膜上并冷却至接近绝对零度。该样品由外加电场与磁场所调控,通过测量样品的量子电导,证明了具有马约拉纳费米子激发的输运态。在世界上首次实现其粒子的量子化,为马约拉纳费米子的存在提供最有力的证据。

与此同时,2017 年丁洪研究组与日本东京大学合作,利用超高分辨角分辨光电子能谱证实了拓扑表面态的存在并研究了拓扑能带的性质^[36]。实验发现拓扑表面态具有较大的超导能隙以及很小的费米能,这使得上述要求在 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 单一材料中有机地结合起来,为清晰干净地直接观测马约拉纳束缚态提供了基础。其实验结果表明,探测到的马约拉纳束缚态峰位

不随空间位置变化,实验峰宽接近于系统的能量分辨率。随后验证了马约拉纳束缚态在不同隧道结、磁场以及温度下的行为。理论模拟表面磁通涡旋中的马约拉纳束缚态来源于拓扑表面态超导的准粒子激发。此外,体态磁通涡线的准粒子热激发会抑制表面的马约拉纳束缚态。这些结果表明,实验观测到的马约拉纳束缚态不与平庸的低能激发态混合,首次清晰地观测到了纯的马约拉纳束缚态。其较高的零能峰观测温度,暗示未来可以调控实现液氮温度的马约拉纳束缚态(图 7)。

2.2 马约拉纳费米子探测的电学方法

由于马约拉纳费米子是其自身的反粒子,并且马约拉纳费米子成对地出现于一维拓扑超导体的两端,因此最简单直接的验证方法是隧穿谱测量。由于隧穿电子与马约拉纳费米子在界面处产生局域共振 Andreev 反射,将会在隧穿电导谱中出现一个零偏压电导峰,上述实验也的确在隧穿谱中观测到了零偏压电导峰信号。虽然隧穿谱中的零偏压反常是一个简单有效的探测马约拉纳费米子存在于复合超导结构中的方法,但是该方法仍然是一个必要但非充分的方案,并

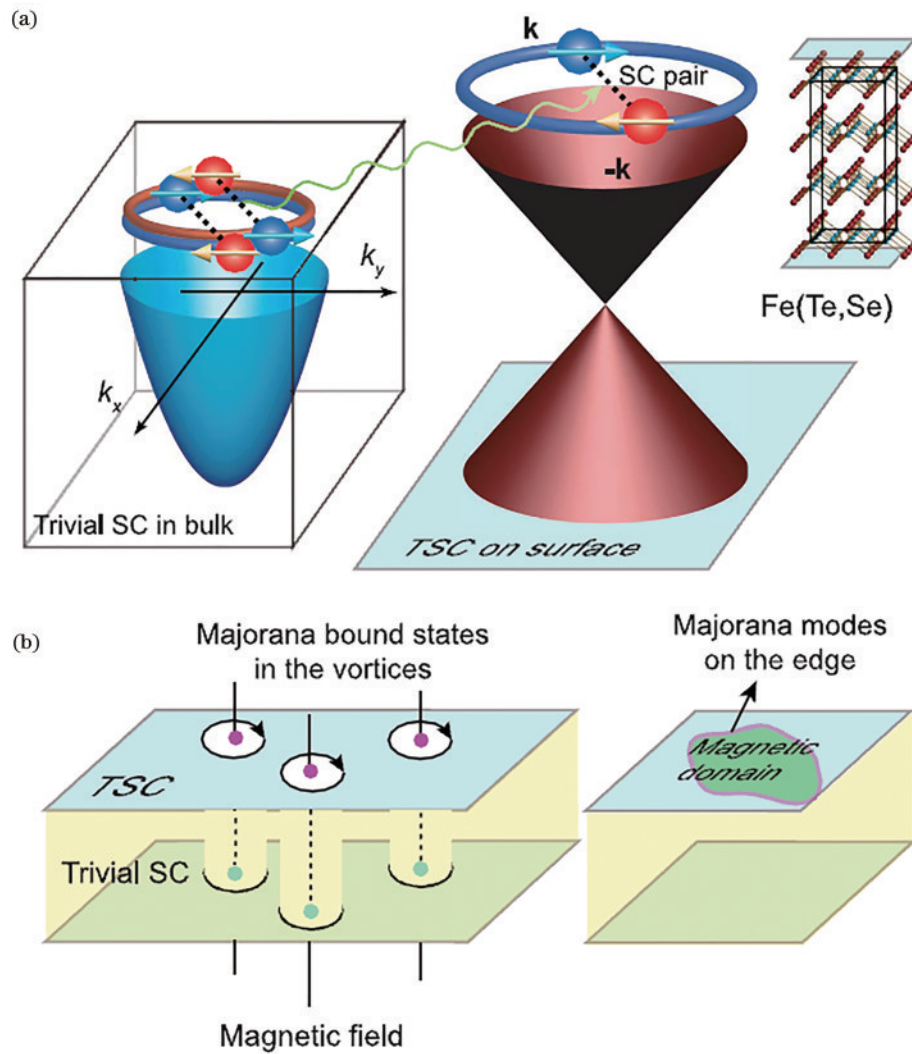


图7 拓扑超导电性和马约拉纳态^[36]。(a)在 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 表面上的拓扑超导电性；(b)磁场在 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 中产生涡旋，在表面上表现为拓扑超导性的边界

Fig. 7 Topological superconductivity and Majorana states^[36]. (a) Topological superconductivity on the surface of $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$; (b) magnetic field creates vortices in $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$, which behave as boundaries for topological superconductivity on the surface

且零偏压电导峰也可能由其他原因引起,如近藤效应^[37]等。此外虽然实验上观测到了零偏压电导峰,但峰值比理论值小了一个数量级,这也是实验工作需要解决的问题。尽管如此,通过隧穿谱中的零偏压电导峰来验证马约拉纳费米子的存在依然为大多研究者所采用。2017年,Chen等^[38]通过零偏压电导峰的相图在超导体/半导体纳米线器件中实验证实了马约拉纳费米子的存在,为马约拉纳费米子的操控和基于马约拉纳费米子的拓扑量子比特的编制提供一种方法。通过约瑟夫森效应来探测马约拉纳费米子的方案也在实验上得到证实^[9]。

最近,人们相继提出不同的探测方法来验证马约拉纳费米子的存在。2016年哥本哈根大学和哈佛大学的研究组通过库伦阻塞光谱观测到了零能量马约拉纳模式分裂的现象,该实验方案的施行对于马约拉纳费米子在拓扑量子计算中的应用是一个里程碑式的事

件,如图8^[39]所示。

2017年,Jeon等^[22]采用自旋-极化扫描隧道显微技术在铁原子链系统中实验证明马约拉纳零模的存在,如图9所示。这些方法的提出为马约拉纳费米子的探测与证实提供了有力的保证。

另一方面,在理论探测马约拉纳费米子的方案中,半导体量子点常被看作中间媒介来探测马约拉纳信号^[40-41],其中,量子点的电导峰值能有效区别马约拉纳费米子与普通费米子。此外,也有研究者提出通过量子点来测量马约拉纳费米子的寿命^[42]。以量子点为媒介探测马约拉纳费米子的方案在2016年由Deng等^[43]进一步证实,并采用隧穿谱实验观测到了马约拉纳费米子迹象。

综上所述,不管是理论方案还是实验探测,对于马约拉纳费米子的研究主要集中在电学领域。仅通过电学探测手段这一种方法来证明马约拉纳费米子的存在

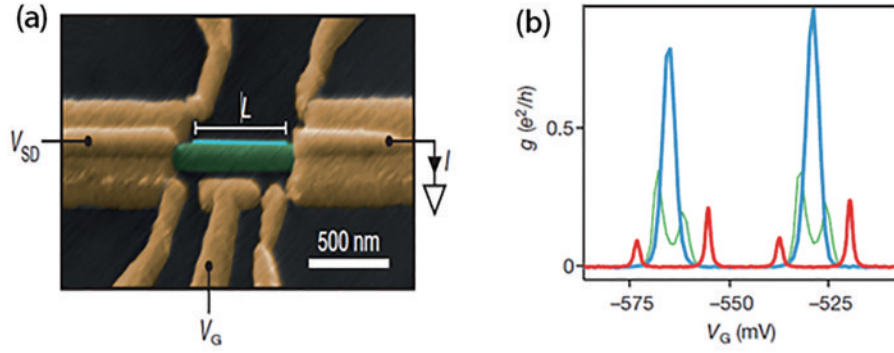


图 8 马约拉纳器件^[39]。(a)电子显微照片;(b)在零偏置时微分电导与栅电压的关系
Fig. 8 Majorana device^[39]. (a) Electron micrograph; (b) differential conductance versus gate voltage at zero bias

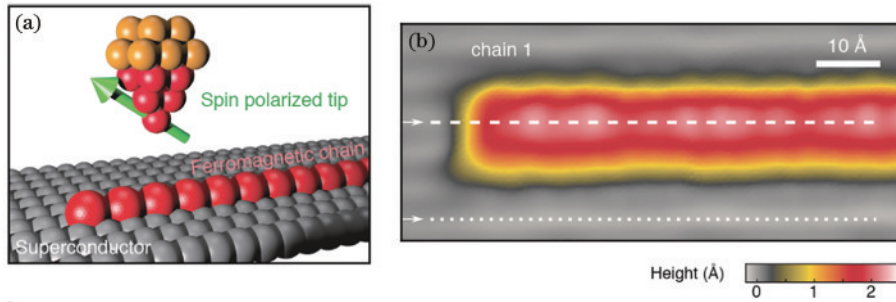


图 9 Pb(110)上 Fe 链正常态的自旋极化^[22]。(a)示意图;(b)典型 Fe 原子链的形貌
Fig. 9 Spin polarization of Fe chains on Pb(110) at normal state^[22]. (a) Schematic; (b) topography of a typical Fe chain

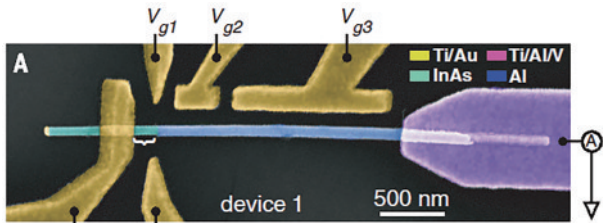


图 10 端点外延混合纳米线^[43]
Fig. 10 Epitaxial hybrid nanowire with end dot^[43]

与否在某种程度上也是不完备的。此外,在电学实验的报道中,所谓的马约拉纳费米子是指马约拉纳费米子被束缚在某个缺陷,即“马约拉纳束缚态”或“马约拉纳零模”,而远非真正的马约拉纳费米子。另外,虽然目前有诸多电学方法来探测马约拉纳费米子,但如何证明和确认所观测到的信号就是真正的马约拉纳费米子迹象目前仍然是一个巨大挑战,因为诸多因素也会导致出现类似马约拉纳费米子的信号,这也是目前探测马约拉纳费米子过程中所面临的困难。因此,为了得到更加确凿和直接的马约拉纳费米子存在的证据,提出可供选择的探测马约拉纳费米子的实验设想或理论模型也是很有必要的。另外,其他的有效探测方法,如全光学方案探测马约拉纳费米子,不管是在理论研究还是实验探测方面一直很少受到研究者的关注。

3 全光学方案探测马约拉纳费米子

3.1 光学泵浦-探测技术

近年来,在研究光与物质相互作用时,光学泵浦-探测方法逐渐成为一种越来越受欢迎的研究方法。如图 11 所示,光学泵浦-探测方法中包括一束较强的泵浦场和一束较弱的探测场,两束光场同时照射到研究系统上。在光学泵浦-探测方法中,较强的泵浦激光场用来激发系统产生光学相干效应,较弱的探测激光场作为探测光用于探测光学现象。通过该方法,线性和

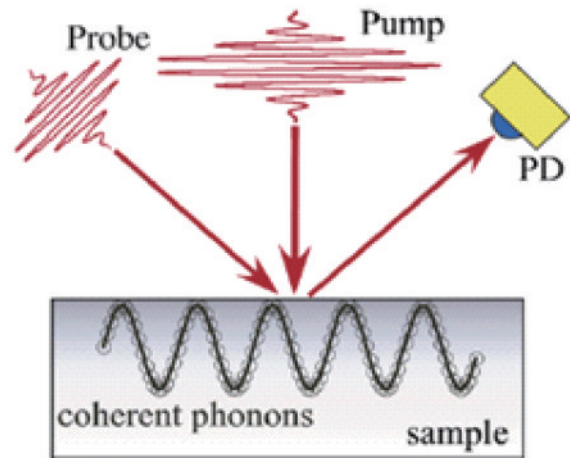


图 11 光学泵浦-探测方法示意图^[57-58]
Fig. 11 Schematic diagram of optical pump-probe technique^[57-58]

非线性光学效应可通过线性光学谱和非线性光学谱来研究。基于光学泵浦-探测方法,2007年,Xu等^[44]报道了用两束激光(强泵浦场与弱探测场)驱动半导体量子点的相干光学谱实验。该研究成果为半导体量子点激光、光学调节器,以及量子逻辑器件的实现提供了基础。另一方面,光学泵浦-探测方法近年来在腔光力学系统中也得到了广泛的应用。通过该方法,许多光力学现象,如光机械诱导透明、光速调控、光学存贮等在腔光力学系统中相继得以证实^[45-47]。

3.2 复合微纳系统

3.2.1 半导体量子点

半导体量子点(SQD)是准零纬度的纳米材料,其包含少量的原子。量子点在三个维度上的尺寸都在100 nm以下,外观类似一点状物,电子在各方向上的运动都受到限制,因此呈现很强的量子限域效应。半导体量子点中的载流子可以像“自由电子”一样穿梭于该材料中,因而半导体量子点也被称为“人造原子”。

由于半导体量子点能表现出原子所具有的特性,在低温和近共振激发下,可以用二能级模型来描述半导体量子点^[48]。二能级的半导体量子点由基态 $|g\rangle$ 和激发态 $|ex\rangle$ 构成(二能级系统可以由赝自旋 $-1/2$ 算符 S^+ 和 S^- 来描述)。当半导体量子点与其他纳米系统产生相互作用时,相互作用迹象将由辐照在量子点上的光带出。通过观测半导体量子点的线性及非线性光学现象,便能很好地探测复合纳米尺度系统中的相干光学特性。

3.2.2 金属纳米颗粒

金属纳米颗粒(MNP)是一种尺寸在纳米量级的金属材料,其表面效应和量子尺寸效应非常显著,表现出许多奇异的光学特性,因而近年来吸引了研究者的兴趣。金属纳米颗粒,如金、银等纳米颗粒在光的激发下将诱发一种特殊的结构——表面等离子激元(SP),该激元在金属纳米颗粒的特定区域发生强烈的电荷集聚和振荡效应,进而在金属纳米颗粒的近场区域产生强烈的局域电磁场增强效应。这种电磁场增强效应能够有效地提高分子的荧光信号、原子的高次谐波产生效率,以及分子的拉曼散射信号等。

3.2.3 复合半导体量子点-金属纳米颗粒

把金属纳米颗粒与半导体量子点复合,构成复合纳米材料,当外界光场照射到这种复合材料上时,金属纳米颗粒激发出来的表面等离子体对外界光场有放大的作用,将显著增强半导体量子点的相干光学特性。这些独特的性质使得表面等离子激元在物理、化学、材料科学和纳米科技等领域中有着重要的应用,从而诱导出一些新型复合光学材料和应用型光学器件。目前,有两种方法来描述复合半导体量子点-金属纳米颗粒系统中的激子与等离子体之间的相互作用。一种是半经典描述^[49],其中,量子点中的激子用量子论描述,而

金属纳米颗粒激发的表面等离子激元则用经典电动力学描述,并且基于半经典理论的许多特性和现象已经被证实,比如Fano共振^[50]、基于等离子激元的电磁诱导透明^[51],以及快光与慢光现象^[50,52]。虽然半经典处理在弱场极限能揭示一些光学行为,但在强场条件下的非线性行为,例如光学双稳态将被量子涨落所掩盖。为了能揭示更多的量子光学特性,人们提出了全量子理论^[53-55]来描述复合半导体量子点-金属纳米颗粒系统,其中,激子和表面等离子激元都用量子化描述。该理论为量子信息处理的潜在应用铺平了道路。

3.2.4 复合纳米机械振子系统

纳米机械系统是纳米尺度量级的机械系统,是由半导体材料通过微纳加工技术和光学刻蚀的方法制作出来的纳米尺度量级的机械系统。纳米机械系统具有量子效应、界面效应以及纳米尺寸效应,同时还具有超高的振动频率、超轻的质量和超高的品质因子等显著的特性。该系统对弱力和微小质量有着较高的灵敏度,因此常被用来进行微弱力的探测和质量探测。近年来,由于各种纳米材料的制造工艺逐渐完善,目前已经能实现将不同纳米材料,比如量子点、纳米机械振子、金属纳米颗粒,进行复合而构成一种复合的系统。该复合系统包含诸多单元,因此将会产生一些新奇有趣的量子现象。图12^[56]为一个半导体量子点与一个纳米机械振子相互耦合的系统,其中,半导体量子点被嵌入到纳米机械系统中。Wilson-Rae研究组基于该系统通过激光泵浦将纳米机械振子冷却到了基态,实现了基态冷却。上海交通大学的朱卡的研究组基于该系统也做出了一系列的研究工作^[57-58]。该系统中,竖直方向的振动导致半导体量子点发生形变进而实现半导体量子点与纳米振子的耦合,但遗憾的是,这种耦合非常微弱。近些年,有研究者提出并且实验上证实了一种耦合机制,即棒球状纳米机械振子与半导体量子点

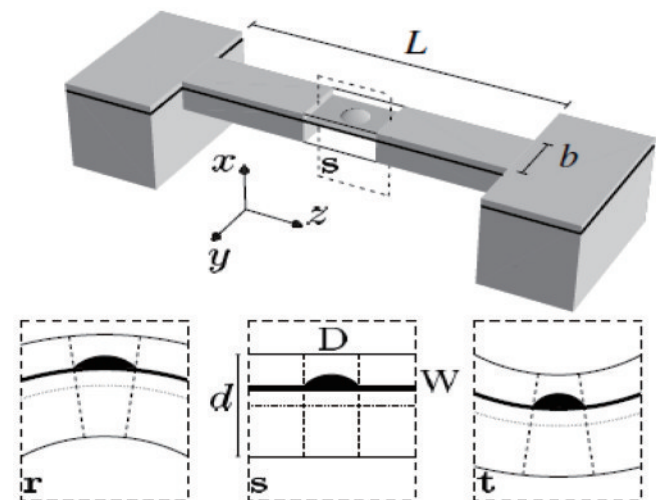


图12 半导体量子点嵌入GaAs纳米振子的示意图^[56]
Fig. 12 Schematic of GaAs nanoresonator with embedded SQD^[56]

耦合系统^[59]。该系统中纳米线的振动产生了一个时变的应变场调制量子点能级的分裂。实验发现,量子点-纳米振子耦合强度可以达到千赫兹,远大于普通的复合纳米机械系统。该复合系统中,纳米线不仅能实现量子点与机械振子的耦合,还能作为波导来增强光场与量子点的相互作用。因此,该复合纳米机械系统有可能取代先前的纳米机械系统。

3.3 基于半导体量子点-纳米机械振子系统的马约拉纳费米子探测

鉴于半导体量子点-纳米机械振子复合系统的显著特征,我们曾经提出引入光学泵浦-探测技术来驱动复合量子点-纳米机械振子系统来探测铁磁原子链/

铅超导体复合系统中的马约拉纳费米子迹象^[60-62]。

图 13^[62]为其模型图,铁磁原子链平铺在铅超导体表面^[21-22],由于铁磁链具有较大的磁矩,因此其作用与半导体纳米线实验中外加的磁场所起的作用相同^[7]。与 Mourik 等^[7]的实验不同的是,该磁场被局域在铁磁链上而很少漏到系统外面,因而沿着铁磁链的超导特性没有被破坏。在该实验方案中,铁原子的交换耦合能级尺度远大于纳米线/超导体复合结构中的 Rashba 自旋-轨道耦合和超导配对。图 13(a)是该系统的能级耦合模型,图 13(b)为铁磁原子链/铅超导体复合系统与半导体量子点耦合,图 13(c)为半导体量子点植入到纳米机械振子中。

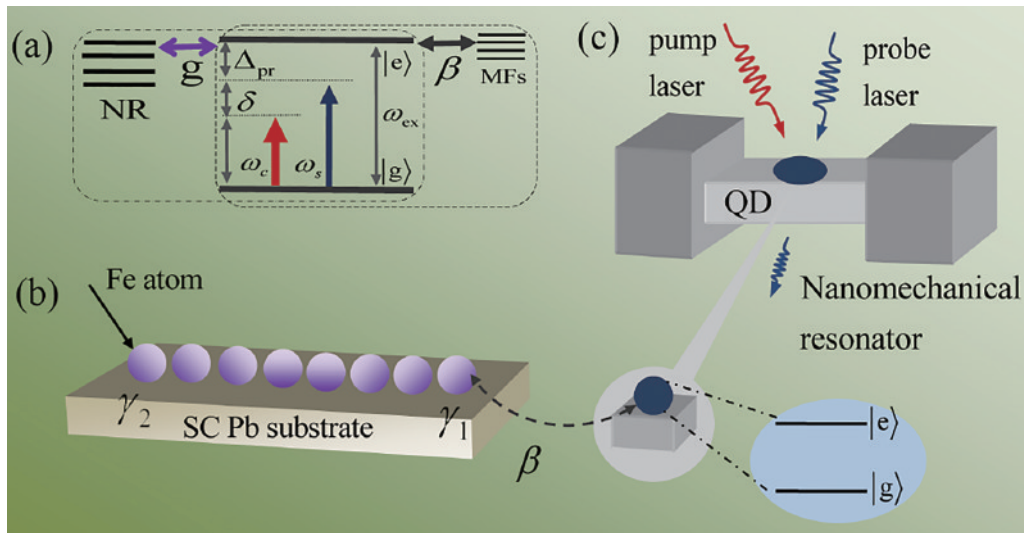


图 13 光学探测马约拉纳费米子方法示意图^[62]。(a) 该系统的能级耦合示意图;(b) 铁磁原子链/铅超导体复合系统与半导体量子点耦合;(c) 半导体量子点植入到纳米机械振子

Fig. 13 Schematic of optical detection method of Majorana fermions^[62]. (a) Schematic of energy level coupling of the system; (b) Fe atom chain/Pb superconductor composite system coupled with SQD; (c) schematic of nanoresonator with embedded SQD

基于该系统分别研究激子-泵浦光失谐在红失谐和蓝失谐条件下探测光透射谱与吸收谱的特征。比较了无耦合马约拉纳模式和耦合马约拉纳模式下相干光学谱线中谱线分裂的情况,讨论了马约拉纳模式诱导的分裂的物理机制,给出了相干光学谱线呈现出类似于三能级原子系统中的电磁诱导透明与电磁诱导吸收现象(在该系统中我们分别定义其为马约拉纳模式诱导透明与吸收)。然后,分析了产生马约拉纳模式诱导透明有吸收的条件及其物理机制,以及讨论马约拉纳模式诱导透明与吸收对泵浦光功率、失谐参量、振子的寿命等参数的依赖关系。最后,分析了三模耦合对马约拉纳模式诱导透明与吸收现象的调控,以及通过测量无耦合马约拉纳模式和耦合马约拉纳模式下谱线的分裂宽度,给出了确定半导体量子点-马约拉纳费米子耦合强度的方法。

本方案中,耦合的量子点-纳米机械振子系统与铁磁原子链/铅超导体之间无实质的接触,因而能有

效避免其他杂质信号的引入,以及对马约拉纳费米子信号探测的干扰。相比于电学实验探测马约拉纳费米子的方案,该方法中的半导体量子点是一个二能级系统(包含基态与激发态)而不是无自旋单能态^[40-43]。当一对马约拉纳费米子同时出现在铁磁原子链的两端并与量子点产生相互作用时,我们可以通过相干光学谱观测马约拉纳费米子诱导的信号迹象。因此,相干光学谱中的信号可作为马约拉纳费米子存在于铁磁原子链中的另一个潜在的证据。光学探测方案为马约拉纳费米子的探测提供了一种可供人们选择的方法,同时,该方法与隧穿实验中的零偏压峰探测马约拉纳费米子有着完全本质上的不同^[7-8]。另一方面,为了更容易实现半导体量子点的激发态的读出,我们曾经进一步引入激子共振谱来探讨纳米机械振子对马约拉纳费米子信号的影响。数值结果表明,纳米机械振子的振动表现出声子腔的行为,显著地增强了激子共振谱的强度,使得马约拉纳费米子更容易被探测到。

3.4 基于复合半导体量子点-金属纳米颗粒系统的马约拉纳费米子探测

如上文所述,当半导体量子点与金属纳米颗粒耦合而形成复合系统时,金属纳米颗粒所激发出来的表面等离激元体会对外界光场有放大的作用,将显著增强半导体量子点的相干光学特性,我们进一步考虑引

入该复合系统来探测马约拉纳费米子。在目前理论描述半导体量子点-金属纳米颗粒的方案中,由于全量子理论能更好地揭示该复合系统中的相干光学现象,这里我们采用全量子理论方案来描述该复合系统,该方案如图 14^[63]所示。

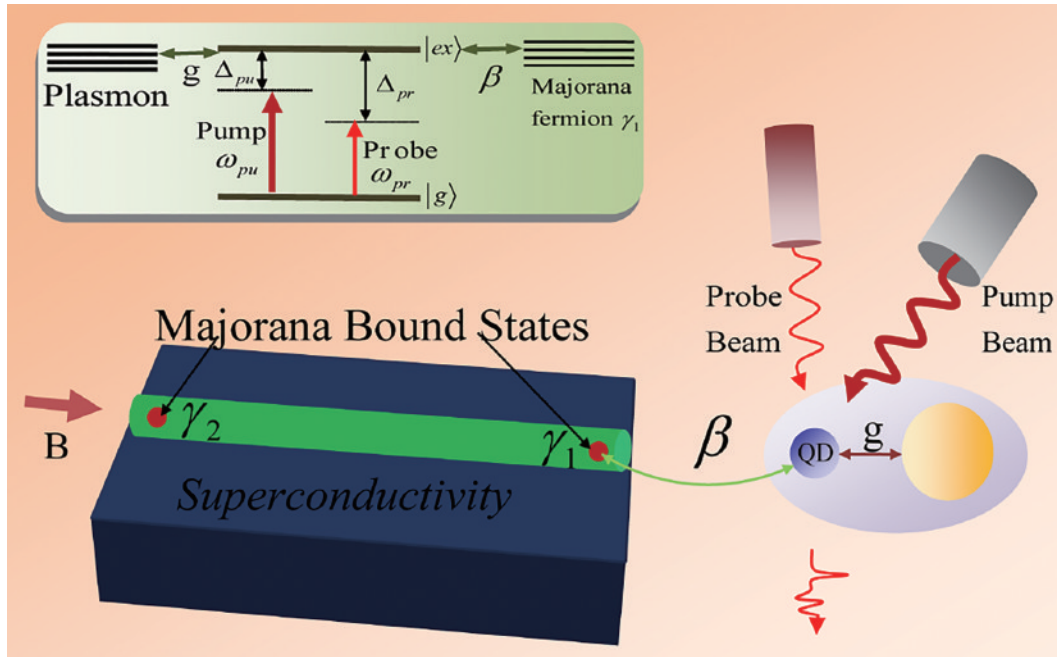


图 14 光学探测马约拉纳费米子方案^[63]

Fig. 14 Schematic of optical detection of Majorana fermions^[63]

通过探测吸收谱研究了马约拉纳费米子存在的迹象,比较了耦合模式与无耦合模式下探测吸收谱所呈现出来的模式分裂现象,证明了分裂现象正是因为量子点与邻近马约拉纳费米子耦合引起的。另外,探测吸收谱呈现了类似原子系统中的电磁诱导透明,这个现象称为马约拉纳模式诱导透明。同时,提出一种测量量子点与马约拉纳费米子之间的耦合强度的全光学方法。

当半导体量子点与金属纳米颗粒耦合而形成复合系统时,通过全量子理论来描述金属纳米颗粒表面所激发的表面等离激元,发现表面等离激元将显著地增强半导体量子点的相干光学特性,这使得探测吸收谱中的模式分裂行为显著增强,其相干光学效应也显著增强,提升了对马约拉纳费米子信号的探测能力。虽然表面等离激元的弛豫速率远大于半导体量子点与马约拉纳费米子的寿命,但数值结果表明,其对马约拉纳费米子的影响比较微弱,因而可以忽略^[63]。

3.5 基于半导体量子点-环状纳米线/超导体复合系统的马约拉纳费米子探测

在之前的探测马约拉纳费米子的方案中,我们仅考虑了半导体量子点与邻近马约拉纳费米子相互作用

的情况,即只考虑一个马约拉纳费米子与半导体量子点之间的相互作用。这种考虑在半导体纳米线足够长时是可行的。而且之前的研究工作主要集中于通过引入光学方案来实现对马约拉纳费米子的探测。而由马约拉纳费米子呈现的光学行为所诱导的应用讨论不多。

本节提出一个环状半导体纳米线/超导体复合结构^[64],探讨该系统中一对马约拉纳费米子与量子点之间的相互作用,研究了由马约拉纳费米子所调制的相干光学现象,包括马约拉纳模式诱导透明、色散现象、Kerr非线性效应等。分别讨论了在耦合模式与无耦合模式下探测吸收谱中呈现的Rabi分裂现象。结果显示,当一对马约拉纳费米子与半导体量子点耦合时,相干光学谱的半峰全宽和振幅强度将大于单个马约拉纳费米子与半导体量子点耦合。

基于该环状复合系统,在失谐条件下进一步讨论了马约拉纳费米子诱发的Fano共振、Rabi分裂、马约拉纳模式诱导透明与吸收,以及色散现象随参数的演化过程。讨论由以上现象所诱导的相干光学传播,如快光与慢光现象,以及快光与慢光效应之间的转换,如图 15^[65]所示。

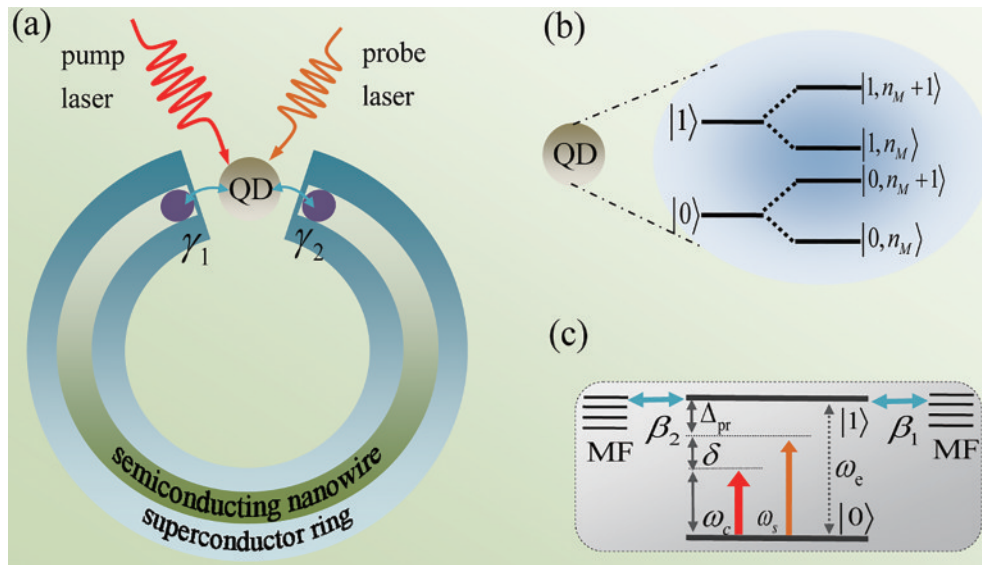


图 15 半导体量子点探测一对马约拉纳费米子示意图^[65]。(a) 复合半导体/超导体器件结构图；(b) 二能级量子点被马约拉纳模式修饰后形成修饰态 $|0, n_M\rangle$, $|0, n_M + 1\rangle$, $|1, n_M\rangle$ 和 $|1, n_M + 1\rangle$ ；(c) 一对马约拉纳费米子与量子点耦合的能级图

Fig. 15 Schematic of SQD detecting a pair of Majorana fermions^[65]. (a) Structure of hybrid semiconductor/superconductor device; (b) two-level quantum dots are modified by Majorana mode to form modified states $|0, n_M\rangle$, $|0, n_M + 1\rangle$, $|1, n_M\rangle$, and $|1, n_M + 1\rangle$; (c) energy-level diagram of a pair of Majorana fermions coupled to quantum dots

4 结束语

本文综述了马约拉纳费米子在低维凝聚态物理系统中的实验进展,包括半导体纳米线/超导体系统^[7-9, 66]、铁原子链/超导结构^[21-22]、铁基超导复合系统^[67],以及拓扑绝缘体/超导体异质结^[68-70]等。同时综述了不同的探测马约拉纳费米子信号的电学方法,如隧穿谱中的零偏压电导峰^[38]、约瑟夫森效应^[9]、库伦阻塞光谱^[39]、自旋-极化扫描隧道显微技术^[22]等,这为确认马约拉纳零能模的存在提供了必要但还不够充分的证据。我们注意到,以上所有的实验探测方案主要集中在电学探测领域,而其他的探测方法,比如光学探测手段却一直未受到足够的重视。

近年来,得益于微纳技术的进展,一些微纳系统,如半导体量子点^[71-73]、金属纳米颗粒、纳米机械振子等相继被实验证实。结合近几年兴起的光学探测方法——光学泵浦-探测技术,我们提出了通过复合的微纳系统探测马约拉纳费米子的全光学探测方案,并取得了一系列的研究成果。以半导体为媒介,研究了半导体量子点与马约拉纳耦合所诱导的线性与非线性光学效应。虽然之前也有研究组借助半导体量子点,通过隧穿谱中的零偏压电导峰在电学领域中也观测到了类似的马约拉纳费米子信号^[43],但在电学探测方案中,量子点通常被看作无自旋的单态。在全光学探测方案中,我们把半导体量子点看作是二能级系统,以便实现与光学泵浦-探测方案的耦合。当半导体量子点与马约拉纳费米子产生相互作用时,马约拉纳费米子的迹象被半导体量子点的相干光学谱带出来。

另一方面,在电学探测马约拉纳费米子的实验方案中,量子点与马约拉纳费米子通过隧穿效应实现耦合。相比于电学探测方案,本文光学探测方案中量子点与马约拉纳费米子之间的耦合则是通过电偶极相互作用来实现。目前的实验结果表明,量子点与马约拉纳费米子之间的有效距离是可以在几十个纳米尺度范围内调节的,因此可以忽略量子点与马约拉纳费米子之间的隧穿效应。线性及非线性光学谱中的信号改变是马约拉纳费米子存在于低维凝聚态物理系统中的另一个潜在证据。光学探测方案提供了另一种可供人们选择的方法来探测马约拉纳费米子。

作为一个新兴的领域,马约拉纳费米子的研究面临着更多的机遇和挑战。不管是电学测量手段还是光学探测方法,均可以找到马约拉纳零能态特征,而且已经有大量的实验证据可以支持马约拉纳零模的存在,但是,非阿贝尔马约拉纳零模存在的确凿证据还没有被发现,这是因为目前的实验证据都是对局域的单个马约拉纳零模的性质直接测量操作。为了论证马约拉纳零模的存在,最直接也是最确凿无疑的证据就是验证马约拉纳零模的非阿贝尔统计性质,即通过编织两个马约拉纳零模前后系统的基态发生了变化。但实现马约拉纳量子比特仍然具有相当大的挑战性,因为这包括两方面的难题:1)读取两个马约拉纳零模融合后的量子态;2)实现马约拉纳零模的非阿贝尔编织操作、从而实现对量子态的操控。遗憾的是,目前还没有任何实验可以证明两个马约拉纳零模组成的复费米子态的非局域性,并直接读出两个马约拉纳零模的量子态。一旦实现了马约拉纳零模的编织操作,并验证了相应

的非阿贝尔统计,拓扑量子计算的应用将成为可能。

自 1937 年被预言以来,马约拉纳费米子在粒子物理领域和暗物质领域就广受关注。马约拉纳费米子迹象在凝聚态物理中的发现,为研究马约拉纳费米子提供了新的方向。鉴于马约拉纳费米子满足非阿贝尔统计,因此可以用来实现容错的量子计算机而备受凝聚态领域所关注。然而,从 2012 年实验上观测到马约拉纳费米子信号到目前为止也仅仅 10 年的时间,要实现基于马约拉纳费米子的拓扑量子计算还需要许多研究者的持续努力,从理论发现到现实应用还有很长的一段路要走。但是可以预见的是,马约拉纳零模对凝聚态物理的深远影响和巨大的潜在应用价值将吸引越来越多的人力和物力的投入,可以期待马约拉纳实验工作取得更丰硕的成果。在不远的未来,凝聚态中的马约拉纳零模探测与拓扑量子计算的实现将会取得重大突破,让我们看到了实现量子计算的曙光^[74-77]。

参 考 文 献

- [1] Majorana E. Teoria simmetrica dell' elettrone e del positrone[J]. Il Nuovo Cimento, 1937, 14(4): 171-184.
- [2] Fu L, Kane C L. Superconducting proximity effect and Majorana fermions at the surface of a topological insulator [J]. Physical Review Letters, 2008, 100(9): 096407.
- [3] Tanaka Y, Yokoyama T, Nagaosa N. Manipulation of the Majorana fermion, Andreev reflection, and Josephson current on topological insulators[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(10): 107002.
- [4] Klinovaja J, Stano P, Yazdani A, et al. Topological superconductivity and Majorana fermions in RKKY systems [J]. Physical Review Letters, 2013, 111(18): 186805.
- [5] Lutchyn R M, Sau J D, Sarma S D. Majorana fermions and a topological phase transition in semiconductor-superconductor heterostructures[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(7): 077001.
- [6] Oreg Y, Refael G, von Oppen F. Helical liquids and Majorana bound states in quantum wires[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(17): 177002.
- [7] Mourik V, Zuo K, Frolov S M, et al. Signatures of Majorana fermions in hybrid superconductor-semiconductor nanowire devices[J]. Science, 2012, 336(6084): 1003-1007.
- [8] Deng M T, Yu C L, Huang G Y, et al. Anomalous zero-bias conductance peak in a Nb-InSb nanowire-Nb hybrid device[J]. Nano Letters, 2012, 12(12): 6414-6419.
- [9] Rokhinson L P, Liu X Y, Furdyna J K. The fractional A. C. Josephson effect in a semiconductor-superconductor nanowire as a signature of Majorana particles[J]. Nature Physics, 2012, 8(11): 795-799.
- [10] Wilczek F. Majorana returns[J]. Nature Physics, 2009, 5(9): 614-618.
- [11] Alicea J. New directions in the pursuit of Majorana fermions in solid state systems[J]. Reports on Progress in Physics, 2012, 75(7): 076501.
- [12] Beenakker C W J. Search for Majorana fermions in superconductors[J]. Annual Review of Condensed Matter Physics, 2013, 4: 113-136.
- [13] Alicea J. Exotic matter: Majorana modes materialize[J]. Nature Nanotechnology, 2013, 8(9): 623-624.
- [14] Elliott S R, Franz M. Colloquium: Majorana fermions in nuclear, particle, and solid-state physics[J]. Reviews of Modern Physics, 2015, 87(1): 137-163.
- [15] Lee E J H, Jiang X C, Houzet M, et al. Spin-resolved Andreev levels and parity crossings in hybrid superconductor-semiconductor nanostructures[J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9(1): 79-84.
- [16] Finck A D K, Van Harlingen D J, Mohseni P K, et al. Anomalous modulation of a zero-bias peak in a hybrid nanowire-superconductor device[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(12): 126406.
- [17] Pikulin D I, Dahlhaus J P, Wimmer M, et al. Zero-voltage conductance peak from weak antilocalization in a Majorana nanowire[J]. New Journal of Physics, 2012, 14(12): 125011.
- [18] Potter A C, Lee P A. Multichannel generalization of Kitaev's Majorana end states and a practical route to realize them in thin films[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(22): 227003.
- [19] Frolov S M, Manfra M J, Sau J D. Topological superconductivity in hybrid devices[J]. Nature Physics, 2020, 16(7): 718-724.
- [20] Bagrets D, Altland A. Class D spectral peak in Majorana quantum wires[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(22): 227005.
- [21] Nadj-Perge S, Drozdov I K, Li J, et al. Topological matter. Observation of Majorana fermions in ferromagnetic atomic chains on a superconductor[J]. Science, 2014, 346(6209): 602-607.
- [22] Jeon S, Xie Y L, Li J, et al. Distinguishing a Majorana zero mode using spin-resolved measurements[J]. Science, 2017, 358(6364): 772-776.
- [23] Yin J X, Wu Z, Wang J H, et al. Observation of a robust zero-energy bound state in iron-based superconductor Fe(Te, Se)[J]. Nature Physics, 2015, 11(7): 543-546.
- [24] Qi X L, Zhang S C. Topological insulators and superconductors[J]. Reviews of Modern Physics, 2011, 83(4): 1057.
- [25] Hasan M Z, Kane C L. Colloquium: topological insulators[J]. Reviews of Modern Physics, 2010, 82(4): 3045-3067.
- [26] Ando Y. Topological insulator materials[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 2013, 82(10): 102001.
- [27] Yu R, Zhang W, Zhang H J, et al. Quantized anomalous Hall effect in magnetic topological insulators[J]. Science, 2010, 329(5987): 61-64.
- [28] Chang C Z, Zhang J S, Feng X, et al. Experimental observation of the quantum anomalous Hall effect in a magnetic topological insulator[J]. Science, 2013, 340(6129): 167-170.
- [29] Schnyder A P, Ryu S, Furusaki A, et al. Classification of topological insulators and superconductors in three spatial dimensions[J]. Physical Review B, 2008, 78(19): 194403.

- 195125.
- [30] Linder J, Tanaka Y, Yokoyama T, et al. Unconventional superconductivity on a topological insulator[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(6): 067001.
- [31] Wang M X, Liu C H, Xu J P, et al. The coexistence of superconductivity and topological order in the Bi_2Se_3 thin films[J]. *Science*, 2012, 336(6077): 52-55.
- [32] Xu J P, Liu C H, Wang M X, et al. Artificial topological superconductor by the proximity effect[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(21): 217001
- [33] Xu J P, Wang M X, Liu Z L, et al. Experimental detection of a Majorana mode in the core of a magnetic vortex inside a topological insulator-superconductor $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{NbSe}_2$ heterostructure[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(1): 017001.
- [34] Sun H H, Zhang K W, Hu L H, et al. Majorana zero mode detected with spin selective andreev reflection in the vortex of a topological superconductor[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(25): 257003.
- [35] He Q L, Pan L, Stern A L, et al. Chiral Majorana fermion modes in a quantum anomalous Hall insulator-superconductor structure[J]. *Science*, 2017, 357(6348): 294-299.
- [36] Zhang P, Yaji K, Hashimoto T, et al. Observation of topological superconductivity on the surface of an iron-based superconductor[J]. *Science*, 2018, 360(6385): 182-186.
- [37] Hsu C H, Stano P, Klinovaja J, et al. Majorana Kramers pairs in higher-order topological insulators[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(19): 196801.
- [38] Chen J, Yu P, Stenger J, et al. Experimental phase diagram of zero-bias conductance peaks in superconductor/semiconductor nanowire devices[J]. *Science Advances*, 2017, 3(9): e1701476.
- [39] Albrecht S M, Higginbotham A P, Madsen M, et al. Exponential protection of zero modes in Majorana islands [J]. *Nature*, 2016, 531(7593): 206-209.
- [40] Liu D E, Baranger H U. Detecting a Majorana-fermion zero mode using a quantum dot[J]. *Physical Review B*, 2011, 84(20): 201308.
- [41] Flensberg K. Non-Abelian operations on Majorana fermions via single-charge control[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(9): 090503.
- [42] Leijnse M, Flensberg K. Scheme to measure Majorana fermion lifetimes using a quantum dot[J]. *Physical Review B*, 2011, 84(14): 140501.
- [43] Deng M T, Vaitiekėnas S, Hansen E B, et al. Majorana bound state in a coupled quantum-dot hybrid-nanowire system[J]. *Science*, 2016, 354(6319): 1557-1562.
- [44] Xu X D, Sun B, Berman P R, et al. Coherent optical spectroscopy of a strongly driven quantum dot[J]. *Science*, 2007, 317(5840): 929-932.
- [45] Weis S, Rivière R, Deléglise S, et al. Optomechanically induced transparency[J]. *Science*, 2010, 330(6010): 1520-1523.
- [46] Teufel J D, Li D L, Allman M S, et al. Circuit cavity electromechanics in the strong-coupling regime[J]. *Nature*, 2011, 471(7337): 204-208.
- [47] Safavi-Naein A H, Mayer Alegre T P, Chan J, et al. Electromagnetically induced transparency and slow light with optomechanics[J]. *Nature*, 2011, 472(7341): 69-73.
- [48] Urbaszek B, Marie X, Amand T, et al. Nuclear spin physics in quantum dots: an optical investigation[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2013, 85(1): 79-133.
- [49] Artuso R D, Bryant G W. Optical response of strongly coupled quantum dot-metal nanoparticle systems: double peaked Fano structure and bistability[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(7): 2106-2111.
- [50] Miroshnichenko A E, Flach S, Kivshar Y S. Fano resonances in nanoscale structures[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2010, 82(3): 2257-2298.
- [51] Hatef A, Sadeghi S M, Singh M R. Plasmonic electromagnetically induced transparency in metallic nanoparticle-quantum dot hybrid systems[J]. *Nanotechnology*, 2012, 23(6): 065701.
- [52] Lu Z E, Zhu K D. Slow light in an artificial hybrid nanocrystal complex[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2009, 42(1): 015502.
- [53] Chen H J. Fano resonance induced fast to slow light in a hybrid semiconductor quantum dot and metal nanoparticle system[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17(2): 025201.
- [54] Ridolfo A, Di Stefano O, Fina N, et al. Quantum plasmonics with quantum dot-metal nanoparticle molecules: influence of the Fano effect on photon statistics[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(26): 263601.
- [55] Peng P, Liu Y C, Xu D, et al. Enhancing coherent light-matter interactions through microcavity-engineered plasmonic resonances[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(23): 233901.
- [56] Wilson-Rae I, Zoller P, Imamoglu A. Laser cooling of a nanomechanical resonator mode to its quantum ground state[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(7): 075507.
- [57] 李金金. 广义纳米光机械系统的光学传播特性及其应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- Li J J. Light propagation and application in generalized nano-optomechanical systems [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [58] 陈华俊. 微纳尺度光力学系统中的量子光学特性及其在光学探测上的应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- Chen H J. Quantum optical properties of micro(nano)-scale optomechanical systems and their applications in optical detections [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [59] Yeo I, de Assis P L, Gloppe A, et al. Strain-mediated coupling in a quantum dot-mechanical oscillator hybrid system[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(2): 106-110.
- [60] Chen H J, Zhu K D. Nonlinear optomechanical detection for Majorana fermions via a hybrid nanomechanical system[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2014, 9(1): 166.
- [61] Chen H J, Zhu K D. Possibility of Majorana signature detecting via a single-electron spin implanted in a suspended carbon nanotube resonator[J]. *RSC Advances*, 2014, 4(88): 47587-47592.

- [62] Chen H J, Fang X W, Chen C Z, et al. Robust signatures detection of Majorana fermions in superconducting iron chains[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 36600.
- [63] Chen H J, Zhu K D. Surface plasmon enhanced sensitive detection for possible signature of Majorana fermions via a hybrid semiconductor quantum dot-metal nanoparticle system[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13518.
- [64] Chen H J, Wu H W. Rabi splitting and optical Kerr nonlinearity of quantum dot mediated by Majorana fermions[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 17677.
- [65] Chen H J. Majorana fermions induced Fano resonance and fast-to-slow light in a hybrid semiconductor/superconductor ring device[J]. *Quantum Information Processing*, 2020, 19(6): 171.
- [66] 文炼均, 潘东, 赵建华. 从高质量半导体/超导体纳米线到马约拉纳零能模[J]. *物理学报*, 2021, 70(5): 058101.
Wen L J, Pan D, Zhao J H. From high-quality semiconductor/superconductor nanowires to Majorana zero mode[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(5): 058101.
- [67] 孔令元, 丁洪. 铁基超导涡旋演生马约拉纳零能模[J]. *物理学报*, 2020, 69(11): 110301.
Kong L Y, Ding H. Emergent vortex Majorana zero mode in iron-based superconductors[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(11): 110301.
- [68] 何庆林. 拓扑超导与马约拉纳费米子[J]. *科学通报*, 2018, 63(26): 2717-2730.
He Q L. Topological superconductivity and Majorana fermion[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(26): 2717-2730.
- [69] 李耀义, 贾金锋. 在人工拓扑超导体磁通涡旋中寻找 Majorana 零能模[J]. *物理学报*, 2019, 68(13): 137401.
Li Y Y, Jia J F. Search for Majorana zero mode in the magnetic vortex of artificial topological superconductor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(13): 137401.
- [70] 梁奇锋, 王志, 川上拓人, 等. 拓扑超导 Majorana 束缚态的探索[J]. *物理学报*, 2020, 69(11): 117102.
Liang Q F, Wang Z, Kawakami T, et al. Exploration of Majorana bound states in topological superconductors[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(11): 117102.
- [71] 刘超, 郭小伟, 李绍荣, 等. 拓扑光子晶体边缘态理论与应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(1): 0100001.
Liu C, Guo X W, Li S R, et al. Theory and application of edge states in topological photonic crystals[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(1): 0100001.
- [72] 李晓博, 王海龙, 马利男, 等. 基于光子晶体的量子点半导体光放大器波长转换特性[J]. *光学学报*, 2022, 42(2): 0206001.
Li X B, Wang H L, Ma L N, et al. Wavelength conversion characteristics of quantum-dot semiconductor optical amplifier based on photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 0206001.
- [73] 陈长锋, 郑懿, 方朝龙. 微透镜阵列结构膜提高 CsPbBr₃ 量子点薄膜发光效率及其稳定性[J]. *中国激光*, 2021, 48(13): 1313001.
Chen C F, Zheng Y, Fang C L. Improvement of luminescence efficiency and stability of CsPbBr₃ quantum dot films with microlens array structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(13): 1313001.
- [74] 朱国毅, 王瑞蕊, 张广铭. Majorana 费米子与拓扑量子计算[J]. *物理*, 2017, 46(3): 154-167.
Zhu G Y, Wang R R, Zhang G M. Majorana fermions and topological quantum computation[J]. *Physics*, 2017, 46(3): 154-167.
- [75] Fu J B, Li B, Zhang X F, et al. Experimental review on Majorana zero-modes in hybrid nanowires[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2021, 64(10): 107001.
- [76] Chen H J. Nanoresonator enhancement of Majorana-fermion-induced slow light in superconducting iron chains[J]. *Micromachines*, 2021, 12(12): 1435.
- [77] Chen H J, Zhu P J, Chen Y L, et al. Majorana fermions induced fast-and slow-light in a hybrid semiconducting nanowire/superconductor device[J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(2): 027802.