

引用格式: ZHOU Yuhong, ZHENG You, XU Li, et al. Progress of Nonreciprocal Topological Photonics (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(8):0826002

周裕鸿, 郑悠, 徐力, 等. 非互易拓扑光子学研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(8):0826002

非互易拓扑光子学研究进展(特邀)

周裕鸿¹, 郑悠¹, 徐力¹, 喻平¹, 高振², 王卓远¹

(1 宁波工程学院 电信学院, 宁波 315211)

(2 南方科技大学, 深圳 518055)

摘要:光的传播通常是互易的, 传统的互易性光学器件面临光学衍射极限等问题, 限制了其性能的进一步提升。非互易性光学器件能够实现光的单向可控传输, 非互易拓扑光子态具有抗背向散射、免疫障碍物和缺陷等多种优异的物理性质, 因而在光集成电路、非线性光学等多个领域具有潜在的应用价值。本文聚焦并回顾了非互易拓扑光子学的应用价值和研究进展, 分别介绍了通过旋磁材料光子晶体、基于磁表面等离子激元、利用光学非线性效应和基于时间调制等不同的途径和手段实现非互易光子拓扑态的理论依据和研究进展, 比较各自特点, 并对其未来发展趋势和面临的关键问题进行了分析和展望。

关键词:非互易性; 拓扑光子学; 光子晶体; 旋磁材料; 磁表面等离子激元; 非线性效应

中图分类号: O469

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235208.0826002

0 引言

拓扑光子学是光学和相关科学一个重要的前沿交叉领域, 它利用几何和拓扑思想来设计和控制光的行为, 研究者的兴趣主要聚焦在实现拓扑态的方法和拓扑态的新奇性质上, 如光的单向传输、高阶拓扑、拓扑激光等等, 这些现象也酝酿了巨大的应用前景。拓扑光子学最早来自于物质拓扑相, 其中, 量子霍尔效应为拓扑光子设计提供了灵感, 早在 1980 年, KLITZING K V 发现了整数量子霍尔效应, 他们对二维电子气施加周期性磁场再施加电场, 观察到截然不同于传统霍尔效应的电流, 其中, 霍尔电导呈现 e^2/h 的整数倍的台阶, 被称为整数量子霍尔效应^[1]。而霍尔电导率中的整数与系统的一个拓扑不变量有关, 这个拓扑不变量就是陈数, 它是一个整数且与动量空间中布里渊区间内的所有的电子的波函数有关, 反映了整体的拓扑性质。后来, 人们将量子霍尔效应和拓扑绝缘体引入到光学系统中, 发现有类似的效应, 从而导致了光子拓扑绝缘体的诞生^[2]。

一般来说, 光的传播具有互易性, 光学互易性也称为时间反演对称性, 即光沿着给定的正向传播和与这个反方向的传播是可逆的, 其本质是麦克斯韦方程支持这种互易解的存在。可以说受洛伦兹定理约束的互易性是光学系统中光传输的基础之一。它提供了一种定量描述光在界面上的反射和折射行为的方法, 为光学系统的设计和分析提供了基础。利用互易性制成的光学器件, 在复杂电磁条件下, 容易受到不同类型的电磁波干扰, 进而影响了器件的工作性能。因此, 考虑对光的单向操控、单向控制具有十分重要的意义, 比如在光通信、光信息处理等方面, 实现光学非互易性, 光的单向放大能够抑制噪音。产生光学非互易的关键核心在于打破洛伦兹互易定理。实现光学非互易性可以采用三种方法: 第一种方法是引入磁场, 引导光通过具有强磁光法拉第效应的材料, 在旋磁或者旋电介质中施加强磁场, 破坏时间反演对称性, 从而打破光学

基金项目: 红外物理国家重点实验室开放课题基金(No. SKLIP2021006), 浙江省教育厅科研项目(No. Y202147586), 铁电电压材料与器件湖北省重点实验室开放课题项目(No. K202106), 浙江省自然科学基金(Nos. LY20F050006, LY18F020025, Y19F020034, LY21F040004), 宁波市自然科学基金(No. 2019A610106), 宁波市 2025 重大专项(No. 2020Z021)

第一作者: 周裕鸿, yuhong-zhou@qq.com

通讯作者: 郑悠, zhengyou@nbut.edu.cn; 王卓远, zywang1981@163.com

收稿日期: 2023-03-30; **录用日期:** 2023-07-07

<http://www.photon.ac.cn>

互易定理,基于这种方法的非互易性通常需要强大的外部磁场,这对在实验中观察强光学非互易性提出了挑战,且难于实现集成应用;第二种方法是通过引入光学非线性来获得单向传输,但一般光学材料非线性较弱,所以这种方法通常需要较强的光强;第三种方法采用时间调制打破光学互易性,但该方法实现难度大,因为要求不同位置处的介电常数都进行动态调制。总之,设计具有单向传输的光学器件,既是当代集成光学芯片发展面临的巨大挑战、又是具有巨大应用前景的课题。因此,研究非互易性光学具有十分重要的现实意义。本文将回顾非互易性传输主要的四种不同方案,并对非互易性光子学的未来发展趋势进行展望。

1 基于旋磁材料光子晶体的非互易传输

1987年,JOHN S和YABLONOVITCHE分别独立指出,在介电系数呈周期性排列的介电材料中,电磁波经介电函数散射后,某些波段的电磁波强度会因破坏性干涉而呈指数衰减,无法在系统内传递,相当于在频谱上形成能隙,于是色散关系也具有带状结构,即光子能带结构^[3,4]。光子晶体是具有折射率变化的材料,其周期性与穿过它们的光的波长相当,它也有光子能带结构,有的能带禁止某些频率的光在其中传播,称之为光子禁带。禁带的光无法在光子晶体中传播,如果在禁带内引入缺陷,可以用来控制光的传播,如光子晶体波导和光子晶体光纤^[5]。光子晶体的许多性质可以通过麦克斯韦方程中的周期介质与薛定谔方程中的周期势的类比得到。

基于量子霍尔效应的单向传输边界模式被提出来,如果在光子晶体中打破原有的周期性结构,如引入结构缺陷或者不同参数的结构,会产生新的能带间隙,实现单向波传输^[6]。2003年,LYUBCHANSKII I L等在磁性材料构成的光子晶体中发现,当晶体中时间反演对称性被打破时,该波导结构中存在单向传输^[7]。2009年,WANG Zheng等在微波频段中利用二维磁性光子晶体证实了互易性传输,我们把这样的光学材料称为光拓扑陈数绝缘体,其表面态可以实现光不受材料杂质缺陷散射的无损耗传播,如图1所示^[8]。通常陈数一般为零,除非系统的反演时间对称性被打破,为了获得非零陈数,可以使用外加磁场劈裂打开二维磁光子晶体的一个狄拉克点,创造一个禁带或能隙来得到^[2];另一种方法是无需分开狄拉克点,仅分开简并点也可创造非零陈数,这一结论通过在微波段采用钇铁石榴石晶体实验证明了在旋磁光子晶体边缘无反射单向波传输^[9]。目前,产生光的整数量子霍尔效应和陈数绝缘体有几个重要的理论模型:1)朗道能级。它是指

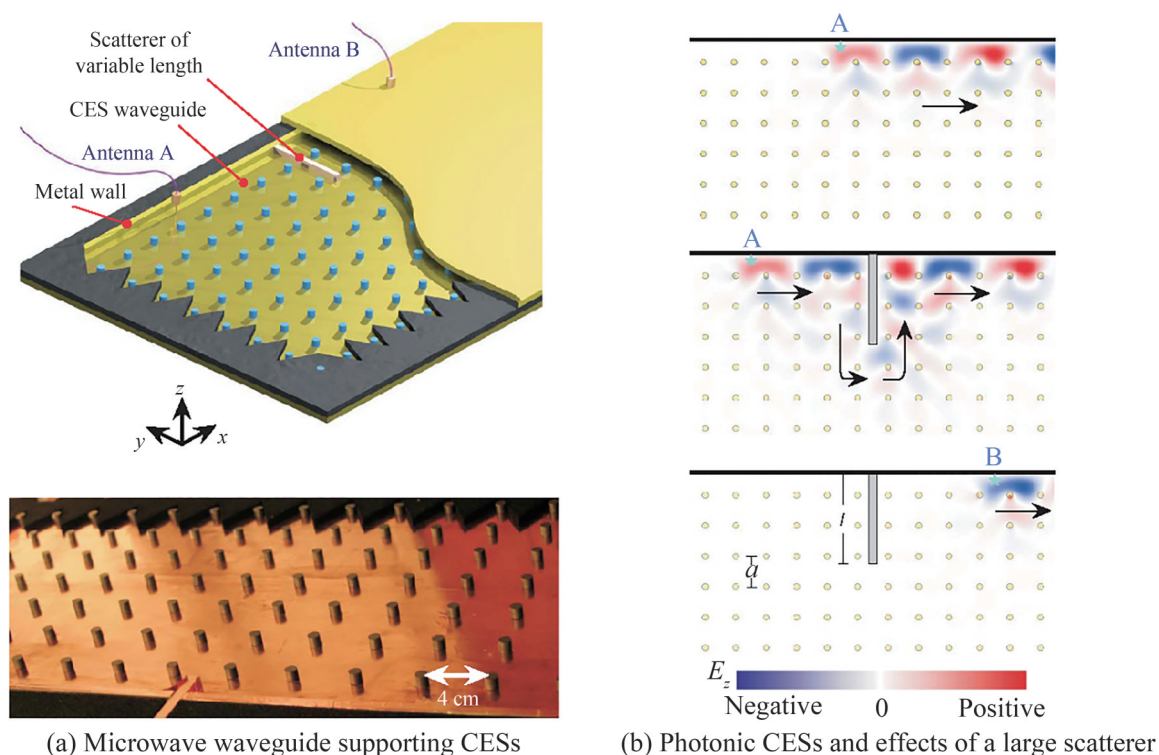


图1 单向波导示意图

Fig. 1 Unidirectional waveguide diagram

在一定的均匀磁场下,二维电子气产生朗道能级和整数量子霍尔效应;2)均匀磁场中的紧束缚晶格模型,即 Harper-Hofstadter 模型;3)Haldane 模型,它是指通过时间反演对称的打破得到量子霍尔效应。2018年,HE Lingjuan 等通过施加外部磁场,在 InSb 光子晶体中观察到太赫兹波段的单向传播的特性^[10]。2008年,HALDANE F D M 等提出利用磁光材料打破时间反演对称性,使具有狄拉克点的能带结构的光子晶体结构有非零拓扑值,并在二维磁性光子晶体的微波频段得到验证,且观测到鲁棒性的非互易性单向传输^[2]。当然,这是光子学系统在理想情况下的结果,拓扑光子学系统在实际输运应用还要考虑光学吸收、样品磁性杂质散射、动力学扰动所引起双向传输和损耗。因此,拓扑光子学系统在实际应用中遇到了阻力,如何减少来自于这些因素的散射面临巨大的挑战。

不同类型的单向波导的光子晶体引起了广泛的关注和研究^[11]。HALDANE F D M 和 RAGHU S 提出将量子霍尔效应表面模式推广到光子晶体的单向表面波,指出如果两种介质禁带的陈数不同,那么在禁带频率内,两介质交界面存在单向表面波^[2,12]。AO Xianyu 等研究了二维光子晶体中的非互易性传输^[13]。2010年,FU Jinxin 等通过实验验证了三角晶格旋磁光子晶体和普通介电光子晶体共同光子带隙组成的单向波导,因其直流磁场作用下旋磁光子晶体的时间反演对称性破缺,边缘模式呈现单向特性^[14]。这里所说的边缘模式是指二维体系边界中的激发态,这些激发态可以形成电磁场的定向传输;由于拓扑保护性,这种定向传输在较大程度上不受杂质和缺陷态的干扰。边缘态的概念最早由 HALPERIN B I 在解释二维电子气中的量子霍尔效应引入^[15]。2012年,LIU Kexin 等证明了在外加直流磁场作用下,旋磁光子晶体板的边缘态可以维持单向波传输^[16]。因此,光子晶体中的禁带与光子的单向传输并不矛盾,光子晶体中光子的单向传输主要是通过边缘态的单向传输来实现的。但因其需要外加磁场而影响光学器件集成,频率仅限于微波领域而未推广到光学频率、以及旋磁材料对磁场响应较弱的原因,要实现光的整数量子霍尔效应还具有一定的难度。HE Lingjuan 等通过在半导体材料 InSb 中打上周期性的空气孔,再施加外部直流磁场,提出了类似的更简单的单向边界模式^[17]。尽管这些基于光子晶体的波导具有单向传输的优越性能,但是由于光子晶体结构的制备工艺繁琐及精度高等特点,限制了其广泛应用。YANG Yihao 等提出了一种由多个开口谐振器构成的电磁单元结构,该电磁单元结构具有很强的电磁双各向异性特性,可以在实验上实现三维光学拓扑绝缘体,有望大幅度提高光子在波导中的传输效率^[18]。

总之,对于旋磁材料的光子晶体,一方面其独特的单向波特性,另一方面其张量磁导率与外磁场有关,所以可通过外加磁场调控其传输特性,能够做出可调的非互易器件。

2 基于磁表面等离子激元的非互易传输

磁化等离子体是指通过磁场作用使得等离子体具有磁性的一种状态,磁化等离子体是一种最简单的非互易、旋向、均匀介质的材料,根据 Onsager-Casimir 原理,磁化等离子体的介电常数张量是不对称的,介电常数张量的不对称性意味着材料破坏了洛伦兹互易,这些功能是互易介质无法实现的,是真正的隔离。而打破时间反演对称性并不等同于打破互易性(这两个概念仅在无损介质中是等效的),因此,实现表面等离子体极化子不对称色散的唯一方法是破坏互易性,一般可通过外磁场或漂移电流来实现^[19]。非互易的强度取决于对角张量元素和非对角张量元素的相对强度,通过优化介电常数张量元,可以实现最大非互易性。而磁场作用下的磁光材料界面处传播的近场电磁波称为磁表面等离子激元,其拥有非互易性传输特性。基于这样特殊的物理性质,就可实现电磁波在光学器件中的单向传输,这种非对称的色散关系起源于左手旋波和右手旋波非互易介质具有不同的相互作用。当其在传输中遇到器件的缺陷或者弯曲时,单向传输的电磁波可保持传输特性且不会受到干扰,这一特性已被广泛用于实现许多非互易器件,如隔离器、旋转器和循环器。1972年,BRION J J 等发展了一种半导体磁表面等离子激元理论,通过对 InSb 材料上加不同方向的磁场,其磁表面等离子激元的色散关系就会出现能隙^[20]。1973年,在外加磁场下微波段材料铁氧体 YIG 的研究发现,磁表面等离子激元可在 YIG 与介质的表面传输,并且在频率间隙内存在非互易性^[21]。2008年,YU Zongfu 等从理论上证明了在静磁场作用下,由半无限光子晶体结构和半无限金属区域形成的波导中存在单向电磁模式,如图 2 所示^[22]。

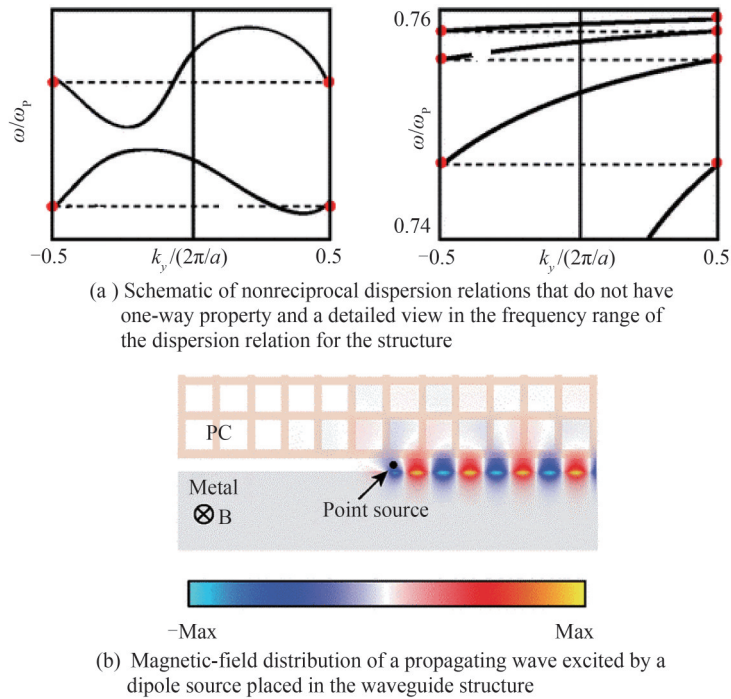


图2 波导中单向电磁模式
Fig.2 Electromagnetic mode in waveguide

KUZMIAK V等理论上证明了金属与均匀磁化的二维磁光晶体之间的界面具有单向频率范围,其中表面等离子激元只允许在一个方向上传播^[23]。2012年,HU Bingzhi等提出了一种基于金属-介电-半导体结构的亚波长尺度单向宽可调谐太赫兹等离子体波导,这种单向等离子激元器件基于外部磁场作用下的非互易表面磁等离子激元,研究发现,该波导的工作频率范围可以通过改变外加磁场的强度进行调节^[24]。ZHANG Xiaogang等提出旋磁体材料的光子带隙可以很好地限制单向模式,这在光子集成电路中有很大的应用潜力^[25]。2015年,SHEN Linfang等采用半导体材料InSb-介电-金属的平板波导结构,在不同的直流磁场强度下,表面等离子激元可在半导体带隙内进行完全单向传输^[26]。随后 TSAKMAKIDIS K L等在2017年提出了太赫兹波段高品质因数的谐振腔,打破了洛伦兹互易性,克服了谐振系统的时间带宽极限^[27]。2022年,TANG Yuxiang等构建了一个基于银纳米圆盘与单层二硫化钨(WS_2)半导体材料的Plexcitons体系,称为等离子激元-激子极化激元,由于深亚波长电磁场局域性,它们表现出巨大的室温非线性^[28],如图3所示。激子非线性主要由高阶激发退相作用主导,使得极化激元粒子在空间上互相靠近,碰撞作用增强,且最终以高阶相互作用的形式呈现。此外,他们证明了这种巨大的非线性可以被用来操纵固态系统的超快非线性吸收特性,激子在本质上具有较强的相互作用,有望促进全光逻辑器件中的光开关和全光神经网络中的非线性激

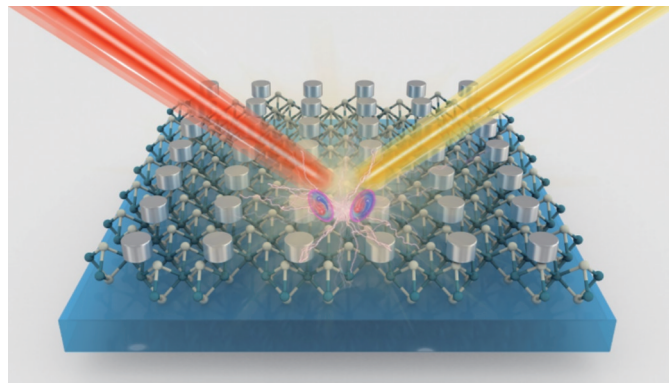


图3 基于 Ag ND- WS_2 异质结构的 plexciton 器件
Fig.3 Ag ND- WS_2 heterostructure plexcitonic system

活函数器件的发展。2022年,FENG Mingming等采用一种新型有源金属-石墨烯混合表面等离子激元器件实现了显著的相位调制,提供了一种在CMOS兼容电压下动态调制太赫兹表面等离子激元相位和截止频率的新方法,在非互易和拓扑表面等离子激元以及表面等离子激元天线阵的波束控制等领域具有潜在应用^[29]。

综上所述,基于磁表面等离子激元的单向波导结构不仅具有局域增强效应,还能打破衍射极限,在亚波长尺度对光场进行调制,这是传统互易光学器件不具备的,因此近年来备受学者的关注,这为开展空间环境探测中高性能、高分辨率及高集成化的新型光学功能器件的研发打下了坚实的基础。同时,我们也注意到,基于等离子激元的非互易传输可能受吸收干扰,其实用价值有待进一步检验。因为即便实现了非互易传输功能,但可能传播不远就开始衰减,导致实际应用价值有限,而且被吸收的光转化成热会造成负面干扰。因此,如何减少基于等离子激元的非互易传输的光学器件中的吸收是值得深入探讨的。我们认为,设计和利用拓扑保护的表面等离子激元来实现非互易传输,是减少光学器件中的吸收的最有可能的方法。

3 基于光学非线性效应非互易传输

由于描述电磁传播的麦克斯韦方程的时间反转对称性,光学非互易性难以实现。通常,需要以磁场形式的控制输入来打破这种对称性,一般来说,强磁场体积大,磁场的存在也可能会对其他器件造成影响,集成磁光材料需要的工艺与CMOS工艺不兼容,对芯片不利,这种输入对于光学集成电路来说是不实用的。2012年,FAN Li等研究使用光学非线性方法开发了一种基于硅的微谐振器装置,其原理是调节微腔和波导之间的距离,使得正向和反向的耦合效率呈现非互易特性^[30]。该装置与目前的互补金属氧化物半导体加工技术兼容,因此易于集成到光电电路中。LIN Xusheng等利用非线性克尔效应实现了光学谐振腔的双稳性单向传输的方法^[31]。2018年,LEONARDO D等利用光学非线性相互作用,制作了微谐振器的光学隔离器和循环器^[32]。而光学非线性实现非互易传输的一个很大的弊端就是需要高强度的入射光,所以这种办法在实际运用中也受到限制。SINGH N等展示了一个基于三阶光学非线性的单片、完全互补的金属氧化物-半导体兼容的非线性Mach-Zehnder干涉仪隔离器,这种器件不仅可以用于集成光学系统,还可以用于光纤光学系统(如图4所示)^[33]。

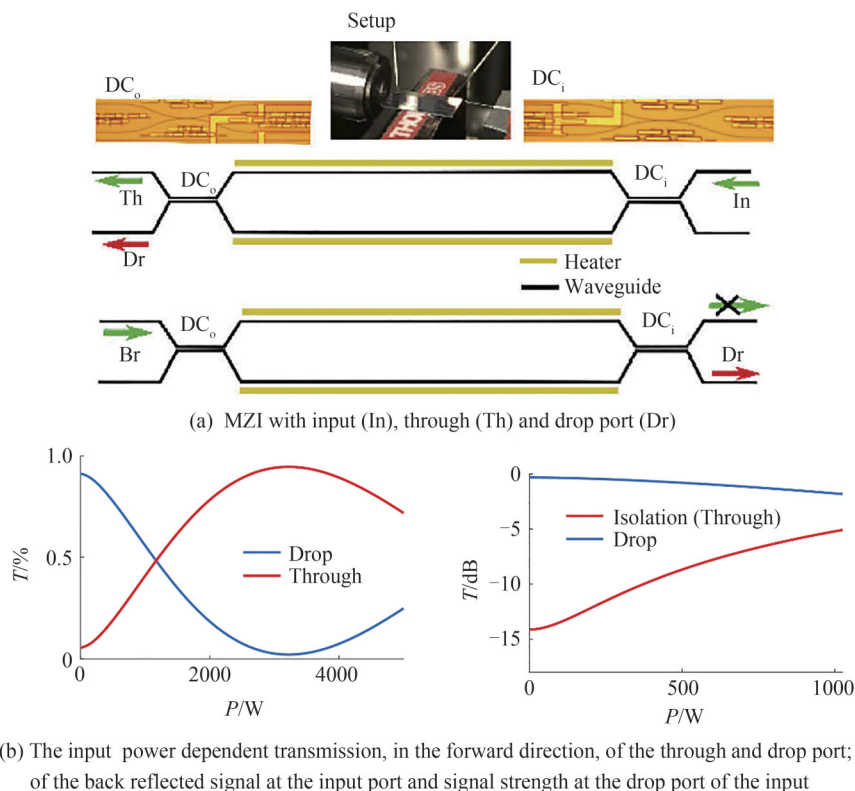


图4 Mach-Zehnder干涉仪隔离器装置图
Fig.4 Mach-Zehnder interferometer isolator concept

2020年, LIE等应用非线性克尔效应在实验上实现了无腔光学隔离器和环行器。其非互易来自N型原子的热运动,它对弱探针束产生了强烈的手性交叉非线性克尔响应。并在Sagnac干涉仪中获得了高达20 dB隔离比的双端口光隔离器。弱探测场的不同传播方向决定了它的交叉相移和传输,由此证明了四端口光循环器^[34]。2021年,中国科学技术大学郭光灿团队实现了超越磁光效应的百兆赫兹带宽单光子非互易传输^[35],如图5所示,他们研究了单光子条件下的非互易特点,利用冷原子系统产生的标记单光子,并将单光子作为信息载体入射到热原子隔离器,实现了 22.52 ± 0.10 dB的隔离度和约1.95 dB的插入损耗,带宽高达数百兆赫。除此之外,他们还实现了多频段复用的光学非互易,从而拓展了可实现非互易的信号频段范围。ZHONG Hua等主要依托弱光非线性光折变光学晶体,提出并证明了直写激光的各向异性光子晶格中固有的II型狄拉克点的非线性谷霍尔边缘态^[36]。这些自陷的霍尔边缘态,表现为拓扑间隙准孤子,可以沿畴壁单向移动而不改变其轮廓,与外部磁场或复杂的纵向调制无关,因此与先前报道的拓扑边缘孤子相比更优越。这个发现可能为理解具有违反洛伦兹不变性的II型狄拉克点系统中的非线性现象提供了一条途径,并可能为后续光场操作和光子器件的技术发展带来可能性。

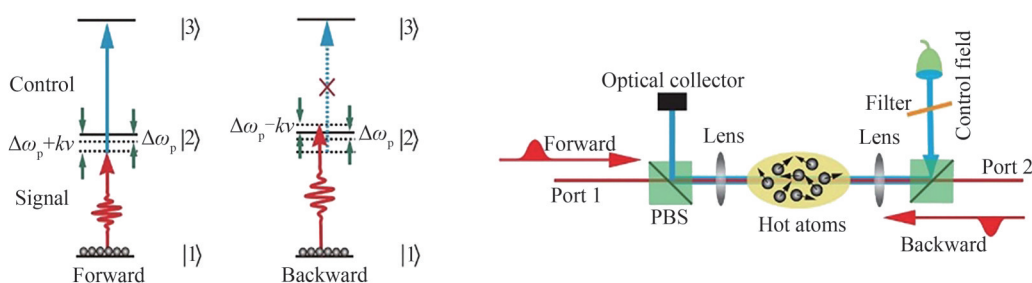


图5 室温下全光隔离的光学非互易原理示意图及实验装置

Fig.5 Schematic optical non-reciprocity principle and experimental setup for room temperature all-optical isolation

尽管如此,基于上述的泵浦调控、克尔效应、非线性 Mach-Zehnder干涉仪、空间光谐振结构和单光子腔等非线性光学效应导致的非互易传输容易受诸如环境的热涨落、磁场的变化等外界因素的干扰,这些干扰将导致非互易传输功能减弱。类似光子晶体中霍尔边缘态形成的拓扑边缘孤子相,设计拓扑保护的非线性光学现象来实现非互易传输是减少外界干扰和衰减的最有可能的发展方向。另一方面,若不依赖于外加强磁场下实现非互易传输,易实现系统集成。但是,为了实现非线性效应,通常需要极高的电/磁场强度或者大量使用非线性材料,这样就限制了其应用的广泛性。首先,这种非互易性仅发生在某个确定的功率和频率范围内,其次,非线性性质意味着叠加原理的缺失,因此这类应用通常不能在多端口连续激励的隔离器中应用,从而限制了它们在脉冲操作中的应用。尽管有诸多限制,基于光学非线性效应可以使简化设备的设计和制造,尤其当系统工作在多端口同时激励情况下,它们可以用于隔离应用。我们设想,将这些结果进一步研究并推广到更复杂的系统,例如具有非瞬时效应和记忆效应的系统,可能有助于克服其中的一些限制,并为基础和应用研究带来新的机会^[37, 38]。

4 基于时间调制及其它性质的非互易传输

基于其它原理的非互易性传输也取得长足的发展,如采用时间调制打破光学互易性,基于合成角动量的非互易性光学传输,利用非线性谐振腔之间耦合特性等等。2017年,ZOLLER P等提出了手性量子光学的概念^[39]。它使非互反单光子器件的组装成为可能,这些器件可以在两个或多个操作状态的量子叠加下操作,并实现确定性自旋光子界面,为光学非互易的研究提供了一种新的途径。光力学成为一种利用多径干涉实现非互易的新方法,2022年,LAN Yanting等通过选择适当的传输相位和驱动场强度,可以在较低的温度下实现双向非互易性传输^[40]。

HUANG Xinyao等提出了一种利用损耗实现光学非互易性的新原理。通过引入存在耗散的连接模式,无直接相互作用的系统模式间可产生等效耦合,由于耗散相位与能量传输方向无关,通过引入多个耗散模式,耗散模式具有由能量损耗引起的相位滞后,这与能量传输方向无关。不同损失相位的耦合通道之间的

干涉导致正向和反向耦合强度不同,产生非互易性,如图6所示^[41],其中,上图为通过引入具有耗散的连接模式,在无直接相互作用的系统模式间建立多通道的等效耦合;下图是多耦合通道干涉诱导实现非互易的物理机制。吉林大学吉张旭霖研究团队利用飞秒激光直写技术来进行光子芯片的制备,实现任意三维结构加工的工艺。采用这种编织机制拓展到其它光学系统中,利用贝里相位矩阵作为新的自由度,能够提供更多的手段来操控光子^[42]。

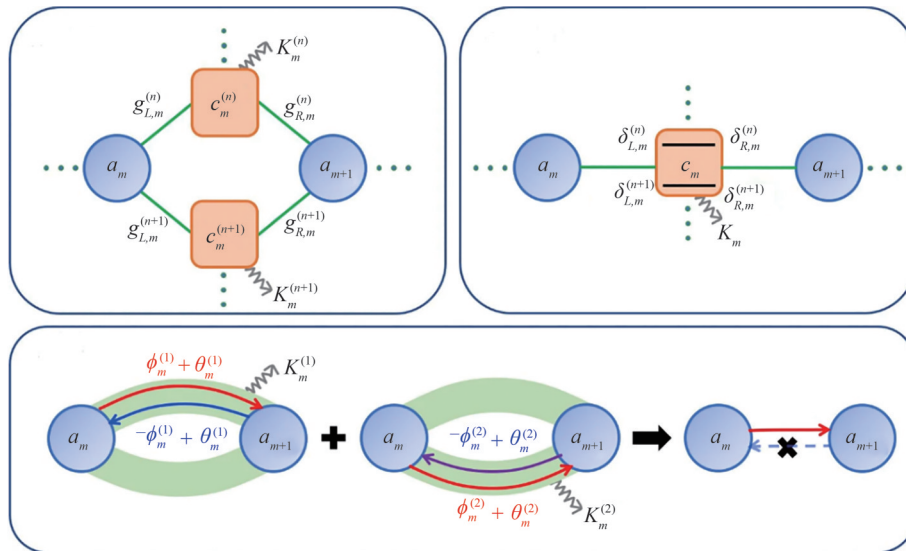


图6 耗散诱导非互易理论模型
Fig.6 Loss-induced nonreciprocity

全光开关是一种用光来操控光的设备,它是光通信、光计算和量子信息的基础。发展高效、超快且紧凑的全光开关是下一代光计算和量子计算的关键核心。一般来说,高品质因子的谐振腔可实现低能耗,但更长寿命的高品质因子模式限制了高速开关,哈尔滨工业大学宋清海团队通过优化微环或光子晶体等谐振器的方法迅速提升了全光开关性能,实现超低能耗和超短切换时间。利用拓扑保护连续区域中的束缚态的远场特性,有望打破超短切换时间与超低能耗之间的矛盾,如图7所示,其中,左图为设计的钙钛矿超表面示意图,右边三个小图分别为 ΓX 和 ΓM 两个方向激光共振在550 nm附近的色散关系,计算四种共振的Q因子和准bic模式的Q因子随着折射率虚部 $\Delta n''$ 的增长而减小。这一优势有望带来高效的超快全光调制,并最终革新全光计算领域^[43]。2022年,TANG Jiangshan等创新性地提出了一种全光学方法,通过量子压缩两个耦合谐振腔模式之一来实现芯片上的光学非互易性^[44],如图8所示,基于这种手性谐振腔耦合,实现了一个全光二极管和一个三端口准循环器。通过将第二个压缩真空场应用到压缩谐振腔模式,非互易器件也适用于单光子脉冲。该工作为实现集成非互易量子信息处理提供了一种新的方案。另外,加州理工学院团队实现了无腔全光开关,通过该光学开关可用更低的能耗处理更快的信息,在没有谐振腔的情况下,有效地利用了铌酸锂纳米波导强大的瞬时二次非线性特性,如图9所示^[45]。通过对色散和准相位匹配的同步工程设计,设计并演示了一种非线性分路器,该分路器可以实现低至80飞焦的超低开关能量,在集成光子学中具有46飞秒的最快开关时间和 3.7×10^{-27} 焦秒的最低能量时间积。研究结果可以实现片上超快速和节能的全光信息处理。

当前,非互易性几乎全是通过磁光法拉第效应实现的。这种效果需要铁氧体材料(铁氧体,如钇铁石榴石和由氧化铁和其他元素(Al, Co, Mn, Ni)组成的材料),都需要静态偏置磁场,其价格昂贵,难以调谐,体积庞大,并且与平面技术不兼容,如硅基集成电路和波导线量子电路。此外,铁氧体材料有很强的耗散损耗,特别是在光学领域,影响了它们的使用。而考虑单光子能级时,磁场会破坏射频超导性。然而,考虑没有磁场的情况下,利用新的散射效应、新材料及超材料实现电磁场的非互易性的新途径已经实现。这包括动态时空调制、合成磁场、光子或声学系统中的角动量偏置、非线性、带间光子跃迁、光力学、光声学、奇偶时间对称性破缺、单向增益和损耗、移动/旋转腔和发射器、多普勒频移、手性光-物质耦合和谷偏振、量子非线性

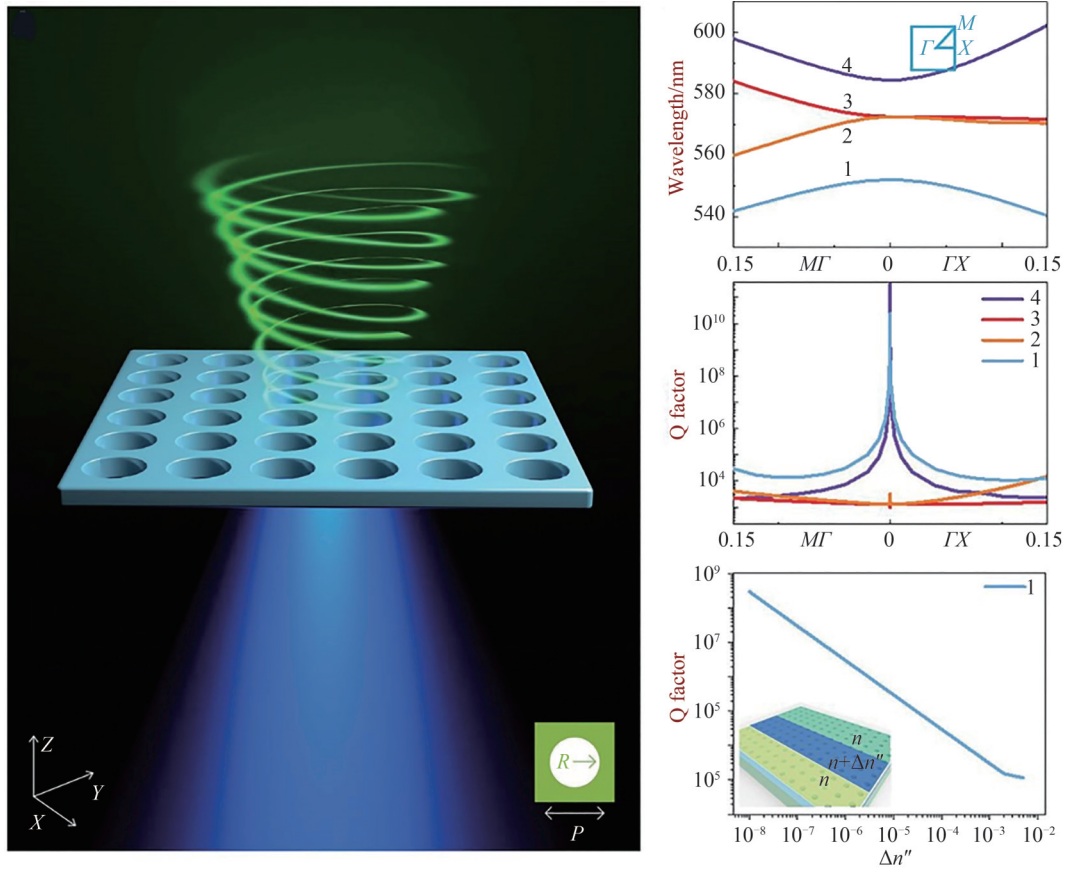


图7 准BIC模式的设计与控制
Fig.7 Design and control of the quasi-BIC modes

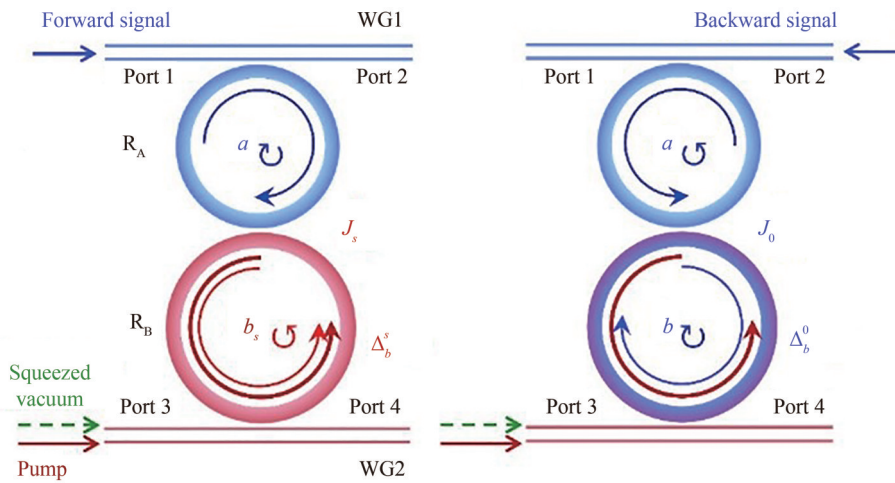


图8 由两个微环谐振器(R_A 和 R_B)和两个附近光波导(WG1和WG2)组成的全光非互易系统
Fig.8 Schematic of an all-optical nonreciprocal system consisting of two microring resonators (R_A and R_B) and two nearby optical waveguides (WG1 and WG2)

性、超导约瑟夫森结的量子系统^[46]。值得注意的是,在这些方法中,基于时间、相位和能量调制及损耗等方法实现非互易光学传输也面临不稳定的问题,这也是当前人们在该领域的一个主要研究方向,其潜在的解决方法之一是设计成与拓扑相关和拓扑保护来实现非互易传输,以减少光学器件中反向输运导致的损耗。利用谐振腔时空调制产生的电场,可以实现强传输非互易效应。全光开关是“以光控光”的基本光子器件,一般要采用非线性光学方法间接地实现。用全光开关代替现有的电子开关,可实现真正的光子集成芯片和高速、海量的光子数字信息处理。探索实现无磁非互易光子能带结构,可促进光子量子信息技术的进步。

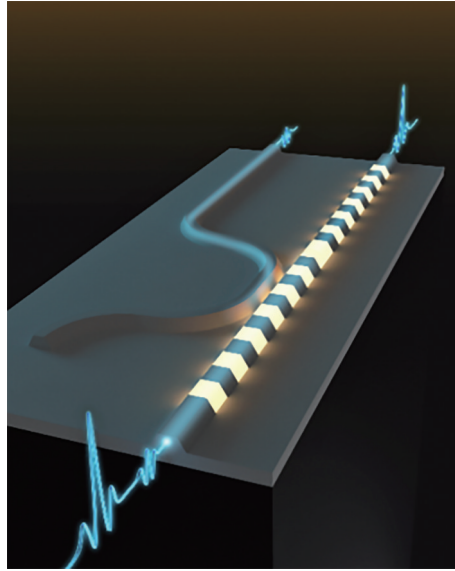


图9 基于薄膜铌酸锂的片上超快超低能耗全光开关示意图

Fig.9 Device design of ultra-fast ultra-low energy all-optical switching in lithium niobate nanophotonics

南京大学陆延青教授团队研究了一维耦合谐振光波导中的单光子带结构,该波导手性耦合到一组二能级量子发射器(QEs)上。谐振腔模式与QE之间的手性相互作用可以在不产生磁光效应的情况下打破时间反演对称性,实现无需磁场的非互易单光子拓扑能带结构和单光子隔离^[47]。

5 结论

非互易光学器件的突出优点是对反射光的抑制作用,可以有效降低有害的逆向散射,这一点在激光器、调制器等有源器件非常重要。总的来说,从光通信到集成光子学,非互易性在光学信息处理和拓扑光子学中起着重要作用。正因为拓扑光子学有着深远的影响和重要的应用前景,不论在磁性元件、非线性光学,还是外部调制元件,人们都在积极的探讨拓扑光子学的性质。

另一方面,量子信息处理也是手性量子光场的持续发展的另一个研究方向,研究外部纠缠光子对单光子态的拓扑保护,实现从单光子态到手性边缘态的发射和鲁棒传输。目前,实现非互易性的原理依赖于磁场、时空调制或非线性、模耦调制,是否存在新的原理和机制值得进一步深入探讨和研究。

参考文献

- [1] KLITZING K V, DORDA G, PEPPER M. New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized hall resistance[J]. *Physical Review Letters*, 1980,45(6):494-497.
- [2] HALDANE F D M, RAGHU S. Analogs of quantum-Hall-effect edge states in photonic crystals[J]. *Physical Review A*, 2008,78(3):33834.
- [3] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23):2486-2489.
- [4] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987,58(20):2059-2062.
- [5] JOANNOPOULOS J D, JOHNSON S G, WINN J N, et al. *Photonic crystals: molding the flow of light-second edition* [M].Princeton University Press, 2008.
- [6] COSTATO, PRANGE M R E, GIRVIN S M. R. E, et al. Girvin-the quantum hall effect[J]. *Il Nuovo Cimento B (1971-1996)*, 1994,109(2):211-212.
- [7] LYUBCHANSKII I L, DADOENKOVA N N, LEE Y P, et al. Photonic crystals based on functional materials[J]. 2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks, 2011: 1-2.
- [8] WANG Zheng, CHONG Yidong, JOANNOPOULOS J D, et al. Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states[J]. *Nature*, 2009,461(7265):772-775.
- [9] WANG Zheng, CHONG Y D, JOANNOPOULOS J, et al. Reflection-free one-way edge modes in a gyromagnetic photonic crystal[J]. *Physical Review Letters*, 2008,100(1):13905.

- [10] HE Lingjuan, SHEN Qian, XU Jie, et al. One-way edge modes in a photonic crystal of semiconductor at terahertz frequencies[J]. *Scientific Reports*, 2018,8(1):8165.
- [11] KHANIKAEV A B, BARYSHEV A V, INOUE M, et al. One-way electromagnetic Tamm states in magnetophotonic structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2009,95(1):423.
- [12] RAGHU S, HALDANE F D M. Possible Realization of directional optical waveguides in photonic crystals with broken time-reversal symmetry[J]. *Physical Review Letters*, 2008,100(1):13904.
- [13] AO Xianyu, LIN Zhifang, CHAN C T. One-way edge mode in a magneto-optical honeycomb photonic crystal [J]. *Physical Review B*, 2009,80(3):33105.
- [14] FU Jinxin, LIU Rongjuan, LI Zhiyuan. Robust one-way modes in gyromagnetic photonic crystal waveguides with different interfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2010,97:41112.
- [15] HALPERIN B I. Quantized Hall conductance, current-carrying edge states, and the existence of extended states in a two-dimensional disordered potential[J]. *Physical Review B*, 1982,25(4):2185.
- [16] LIU Kexin, SHEN Linfang, HE Sailing. One-way edge mode in a gyromagnetic photonic crystal slab[J]. *Optics Letters*, 2012,37 19:4110-4112.
- [17] HE Lingjuan, SHEN Linfang, DENG Xiaohua, et al. One-way edge modes in truncated semiconductor photonic crystal at terahertz frequencies[J]. *Journal of Optics*, 2019,21(6):65802.
- [18] YANG Yihao, GAO Zhen, XUE Haoran, et al. Realization of a three-dimensional photonic topological insulator[J]. *Nature*, 2019,565(7741):622-626.
- [19] ALÙ A, TRETAKOV S, SOUNAS D, et al. Electromagnetic nonreciprocity[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(4):47001.
- [20] BRION J J, WALLIS R F, HARTSTEIN A, et al. Theory of surface magnetoplasmons in semiconductors[J]. *Physical Review Letters*, 1972,28(22):1455-1458.
- [21] HARTSTEIN A, BURSTEIN E, MARADUDIN A A, et al. Surface polaritons on semi-infinite gyromagnetic media[J]. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 1973,6(7):1266.
- [22] YU Zongfu, VERONIS Georgios, WANG Zheng, et al. One-way electromagnetic waveguide formed at the interface between a plasmonic metal under a static magnetic field and a photonic crystal[J]. *Physical Review Letters*, 2008,100(2): 23902.
- [23] KUZMIAK V, EYDERMAN S, VANWOLLEGHEM M. Controlling surface plasmon polaritons by a static and/or time-dependent external magnetic field[J]. *Physical Review B*, 2012,86(4):45403.
- [24] HU Bingzhi, WANG Qijie, ZHANG Ying. Broadly tunable one-way terahertz plasmonic waveguide based on nonreciprocal surface magneto plasmons[J]. *Optics Letters*, 2012,37(11):1895-1897.
- [25] ZHANG Xiaogang, LI Wei, JIANG Xunya. Confined one-way mode at magnetic domain wall for broadband high-efficiency one-way waveguide, splitter and bender[Z]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100 (4): 041108.
- [26] SHEN Linfang, YOU Yun, WANG Zhuoyuan, et al. Backscattering-immune one-way surface magnetoplasmons at terahertz frequencies[J]. *Optics Express*, 2015,23(2):950-962.
- [27] TSAKMAKIDIS K L, SHEN L, SCHULZ S A, et al. Breaking Lorentz reciprocity to overcome the time-bandwidth limit in physics and engineering[J]. *Science*, 2017,356:1260-1264.
- [28] TANG Yuxiang, ZHANG Yanbin, LIU Qirui, et al. Interacting plexcitons for designed ultrafast optical nonlinearity in a monolayer semiconductor[J]. *Light: Science & Applications*, 2022,11(1):94.
- [29] FENG Mingming, ZHANG Baoqing, LING Haotian, et al. Active metal-graphene hybrid terahertz surface plasmon polaritons[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(14):3331-3338.
- [30] FAN Li, WANG Jian, VARGHESE L, et al. An all-silicon passive optical diode [J]. *Science*, 2012, 335 (6067) : 447-450.
- [31] LIN Xusheng, YAN Junhu, WU Lijun, et al. High transmission contrast for single resonator based all-optical diodes with pump-assisting[J]. *Optics Express*, 2008,16(25):20949-20954.
- [32] LEONARDO D, JONATHAN M S, MICHAEL T M W, et al. Microresonator isolators and circulators based on the intrinsic nonreciprocity of the Kerr effect[J]. *Optica*, 2018,5(3):279-282.
- [33] SINGH N, KÄRTNER F X. Nonlinear Mach-Zehnder interferometer isolator[J]. *Optics Express*, 2022, 30(4) : 5973-5980.
- [34] LI Enze, DING Dongsheng, YU Yichen, et al. Experimental demonstration of cavity-free optical isolators and optical circulators[J]. *Physical Review Research*, 2020,2(3):33517.
- [35] DONG Mingxin, XIA Keyu, ZHANG Weihang, et al. All-optical reversible single-photon isolation at room temperature[J]. *Science Advances*, 2021,7(12):e8924.
- [36] ZHONG Hua, XIA Shiqi, ZHANG Yiqi, et al. Nonlinear topological valley Hall edge states arising from type-II Dirac cones[J]. *Advanced Photonics*, 2021,3(5):56001.

- [37] COTRUFO M, MANN S A, MOUSSA H, et al. Nonlinearity-induced nonreciprocity—part II [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(8):3584–3597.
- [38] COTRUFO M, MANN S A, MOUSSA H, et al. Nonlinearity-induced nonreciprocity—part I [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(8):3569–3583.
- [39] ZOLLER P, LODAHL P, MAHMOODIAN S, et al. Chiral quantum optics[J]. Nature, 2017, 541(7638):473–480.
- [40] LAN Yanting, SU Wanjun, WU Huaizhi, et al. Nonreciprocal light transmission via optomechanical parametric interactions[J]. Optics Letters, 2022, 47(5):1182–1185.
- [41] HUANG Xinyao, LU Cuicui, LIANG Chao, et al. Loss-induced nonreciprocity [J]. Light: Science & Applications, 2021, 10(1):30.
- [42] ZHANG Xulin, YU Feng, CHEN Zeguo, et al. Non-Abelian braiding on photonic chips[J]. Nature Photonics, 2022, 16(5):390–395.
- [43] HUANG Can, ZHANG Chen, XIAO Shumin, et al. Ultrafast control of vortex microlasers [J]. Science, 2020, 367(6481):1018–1021.
- [44] TANG Jiangshan, CHEN Mingyuan, NORI F, et al. Quantum squeezing induced optical nonreciprocity [J]. Physical Review Letters, 2022, 128(8):83604.
- [45] GUO Qishi, SEKINE R, LEDEZMA L, et al. Femtojoule femtosecond all-optical switching in lithium niobate nanophotonics[J]. Nature Photonics, 2022, 16(9):625–631.
- [46] KUTSAEV S V, KRASNOK A, ROMANENKO S N, et al. Up-and-coming advances in optical and microwave nonreciprocity: from classical to quantum realm[J]. Advanced Photonics Research, 2021, 2(3):2000104.
- [47] NIE W, TANG L, CHEN M, et al. Nonreciprocal single-photon band structure[J]. Physical Review Letters, 2022, 128(20):203602.

Progress of Nonreciprocal Topological Photonics (Invited)

ZHOU Yuhong¹, ZHENG You¹, XU Li¹, YU Ping¹, GAO Zhen², WANG Zhuoyuan¹

(1 School of Electronics and Information Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China)

(2 Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The propagation of light is generally reciprocal. Optical reciprocity, also known as temporal inversion symmetry, is essentially the existence of reciprocal solutions supported by Maxwell's equations. However, traditional reciprocal optical components suffer from problems such as the optical diffraction limit, which limits their further development toward high performance. In recent years, with the rapid development of topological photonics, it has been found that topological photon states have one-way transmission properties with forward conduction and reverse blocking state. At the same time, local structural defects will not influence global properties in optical topology, therefore, non-reciprocal topological photon states have many excellent physical properties, such as immunity to obstacles and defects, which can ensure that the one-way transmission has strong robustness and consequently promises potential applications such as optical integrated circuits and nonlinear optics. Magneto-optical photonic crystals based on gyromagnetic materials are the earliest topological optical structures to realize non-reciprocal topological photon states. They are also the most commonly used topological optical structures to study the generation, interaction and novel topological optical phenomena of topological photon states, which still contain a series of physical mechanisms worthy of further exploration. However, an external magnetic field is required, which affects the integration of optical devices, the frequency is limited to the microwave, and the gyromagnetic material has a weak response to the magnetic field, so it is still difficult to realize the integer quantum Hall effect of light, thus limiting its practical application prospects.

Magnetoplasma is a simple material with non-reciprocal, rotational and homogeneous medium. The maximum non-reciprocity can be achieved by optimizing the permittivity tensor or the permeability tensor since the strength of the non-reciprocity depends on the relative strength of the diagonal tensor elements and the off-diagonal tensor elements. According to the Onsager-Casimir principle, the dielectric constant tensor of a magnetic plasma is asymmetric, which implies the breakdown of the Lorentz reciprocity. The near-field electromagnetic wave propagating at the interface of magneto-optical materials under the action of a magnetic field is called a magnetic surface plasmon, which has non-reciprocal transmission

characteristics. The unidirectional waveguide structure based on magnetic surface plasmon not only has a local enhancement effect, but also can break the diffraction limit, which lays a solid foundation for the development of new optical functional devices with high performance, high resolution, and high integration in space environment detection. At the same time, we also note that non-reciprocal transmission based on plasmon may be subject to absorption interference, and its practical value needs further verification. The optical nonlinear effect is also one of the ways to achieve non-reciprocal transmission. To achieve non-reciprocal transmission, the most likely development direction is to design topologically protected nonlinear optical phenomena in accordance with the topological edge soliton phase formed by Hall edge states in photonic crystals. It is easy to realize the system integration without the external magnetic field to achieve non-reciprocal transmission. However, in order to achieve nonlinear effects, it usually requires extremely high electric/magnetic field strength or extensive use of nonlinear materials, which greatly limits its application. Finally, this paper also briefly discusses non-reciprocal transmission based on other principles, such as breaking optical reciprocity using time modulation, non-reciprocal optical transmission based on synthetic angular momentum, and the use of coupling characteristics between nonlinear resonators, and so on. Non-reciprocal optical transmission based on time, phase, and energy modulation, as well as losses, also faces instability issues. This is currently a major research direction in the field, with one potential solution being to design systems related to and protected by topology to realize non-reciprocal transmission, thereby reducing losses caused by reverse transport in optical devices. Additionally, we analyzed and looked forward to its future development trends and key issues it may face.

Key words: Nonreciprocity; Topological photonics; Photonic crystal; Gyromagnetic material; Surface magneo-plasmons; Nonlinear effect

OCIS Codes: 260.1180; 160.3820; 210.3810; 230.3990

Foundation item: Foundation of State Key Laboratory of Infrared Physics(No. SKLIP2021006), Scientific Research Project of Education Department of Zhejiang Province(No. Y202147586), Hubei Key Laboratory of Ferro & Piezoelectric Materials and Devices(No. K202106), Foundation of Natural Science Foundation of Zhejiang (Nos. LY20F050006, LY18F020025, Y19F020034, LY21F040004), Natural Science Foundation of Ningbo(No. 2019A610106), Major Science and Technology Innovation in 2025 Projects of Ningbo(No. 2020Z021)