

光学学报

有源和无源的无磁非互易研究进展

刘立峰^{1,2}, 胡依奇^{1,2}, 张示城¹, 祁义红¹, 林功伟^{1,3}, 钮月萍^{1*}, 龚尚庆^{1**}

¹华东理工大学物理学院, 上海 200237;

²华东理工大学材料科学与工程学院, 上海 200237;

³福建师范大学物理与能源学院, 福建省量子调控与新能源材料重点实验室, 福建 福州 350108

摘要 根据洛伦兹互易定理, 在通常的光学系统中, 交换信号源和探测器的位置后接收到的光信号不变。这为光路设计和分析带来了方便。在全光通信和量子网络中, 需要有效地控制光信号的定向传输以避免反射光对信号的干扰、分离相向传输的光信号等, 因此需要只允许光单向传输的非互易器件。以磁光隔离器为背景切入, 简单介绍磁光领域的研究现状。重点从有源和无源两个方面对无磁非互易领域的发展进行综述, 以展现量子光学在无磁非互易领域的重要应用。

关键词 量子光学; 洛伦兹互易; 磁光非互易; 无磁非互易; 有源器件; 无源器件

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0327010

Research Progress on Active and Passive Magnetic-Free Nonreciprocity

Liu Lifeng^{1,2}, Hu Yiqi^{1,2}, Zhang Shicheng¹, Qi Yihong¹, Lin Gongwei¹,
Niu Yueping^{1*}, Gong Shangqing^{1**}

¹ School of Physics, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

² School of Materials Science and Engineering, East China University of Science and Technology,
Shanghai 200237, China;

³ College of Physics and Energy, Fujian Provincial Laboratory of Quantum Manipulation and New Energy Materials,
Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350108

Abstract According to Lorentz reciprocity theorem, we know that in ordinary optical systems, the received optical signal is unchanged even if the positions of the signal source and the detector are exchanged. This brings us convenience for optical design and analysis. However, in all-optical communication and quantum network, it is necessary to effectively control the directional transmission of optical signals to avoid the interference of reflected light and separate the optical signals transmitted in opposite direction. Therefore, nonreciprocal devices that only allow one-way transmission of light are also essential components. This review starts from the background of the magneto-optical isolators and then briefly introduces the research status of the magneto-optical field. The research focus is the development of magnetic-free nonreciprocity, from both the active and passive aspects, which undoubtedly demonstrates the important role of quantum optics in the field of magnetic-free nonreciprocity.

Key words quantum optics; Lorentz reciprocity; magneto-optical nonreciprocity; magnetic-free nonreciprocity; active device; passive device

1 引言

随着通信技术的高速发展, 以光子为信息载体

的全光通信和量子网络受到越来越广泛的关注。非互易器件作为不可或缺的元件可以有效地控制光信号的定向传输、分离相向传输的光信号, 如隔离器、

收稿日期: 2021-10-26; 修回日期: 2021-12-20; 录用日期: 2021-12-30

基金项目: 上海市优秀学术带头人项目(21XD1400700)

通信作者: *niuyp@ecust.edu.cn; **sqgong@ecust.edu.cn

循环器、移相等。传统非互易器件的实现依赖于晶体的磁光效应。1845 年,英国物理学家法拉第发现了磁光偏振旋转现象:当一束传输方向与外加磁场平行的光经过磁光介质时,其偏振会发生旋转。磁光介质的介电常数 ϵ 在磁场的作用下是非对称的张量,入射光偏振的旋转方向与磁场方向有关,因此光在磁光介质中的传输是一种典型的非互易传输。

光隔离器是一种两端器件,只允许光单向通过。1964 年,Apilet 等^[1]利用法拉第效应实现了磁光隔离器。通过在法拉第旋转器前后放置两个偏振相差 45° 的偏振器,就得到了最传统的磁光隔离器。竖直偏振的入射光经过法拉第旋转器后偏振旋转 45° 并顺利通过偏振器 B;反射光通过旋转器后偏振以相同的方向再次旋转 45° ,此时光的偏振方向刚好与偏振器 A 垂直,于是被隔离,如图 1 所示。但是将基于该法拉第旋光效应的隔离器、循环器等非互易器件集成到波导时,为了获得 45° 的偏振旋转,必须实现波导中横电模 (TE) 和横磁模 (TM) 之间的相位匹配,这在实际应用中难以实现^[2],因此这类磁光非互易器件常被用作体积较大的分立元件。

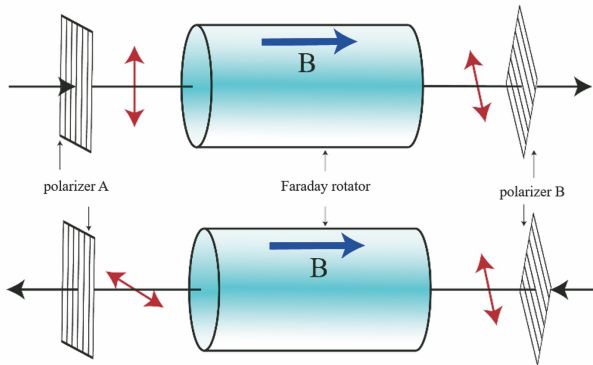


图 1 基于法拉第效应的隔离器

Fig. 1 Isolators based on Faraday effect

随着实际应用对小型可集成光子系统需求的增加,集成光学的概念被提出。集成光学是在光电子学和微电子学基础上,采用集成方法研究和发光学器件和混合光学电子学器件系统的一门新的学科。集成光学元件具有尺寸小、损耗低及与 CMOS 工艺兼容等优势,在光通信领域发挥着越来越重要的作用,引起了研究者的广泛关注^[3-5]。在诸多集成光学元件中,非互易器件的集成一直是该领域研究的重点和难点。为了向可集成推进,不需要 TE-TM 相位匹配的磁光非互易相移方案被提出^[2,6],其原理是:在横向磁场作用下,信号光正、反向通过磁光介质时经历的相移不同;光的非互易传输不再依

赖于偏振的非互易旋转,而是通过马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 的干涉将光学非互易相位转化为非互易光强^[2,6-7]。从原理上看,该方案支持光子器件的集成,但在常用光波导平台上生长磁光晶体存在实际困难。2010 年 Takei 等^[8-9]提出了晶圆键合的方法,该方法极大地降低了磁光材料与半导体集成的困难。2017 年 Huang 等^[10]用金属电极的电流来提供局域磁场,这避免了外加偏置磁场的过程,进而减小了磁场对其他光路的影响。这些磁光材料方面的研究进展进一步提高了基于磁光非互易实现集成的可能性。

另一方面,为了彻底解决磁场带来的问题,近十年来,研究者们开始关注无磁的新原理、新方案,展开了对无磁非互易的探索研究,诸多的量子光学效应被广泛应用。在无磁方案中,从是否需要通过外加场实现非互易的角度,将非互易分为有源非互易和无源非互易两种。常见的有源方案包括时空调制^[11-25]、光机械相互作用^[26-32]、手性相互作用^[33-38](态的制备需要外场)、宏观多普勒效应^[39-41]和微观多普勒效应^[42-51]等。无源方案包括光热非线性^[52-53]、光学双稳^[54-55]和与原子热运动相结合的饱和吸收^[56]等。下面对其分别进行介绍。

2 无磁非互易——有源方案

2.1 时空调制方案

根据洛伦兹互易定理,可以通过将介质打造成时变系统的方式实现非互易。时变系统可以通过如时空折射率调制^[11-16]、时间振幅调制^[17-19]等方法获得。2009 年 Yu 等^[12]在理论上提出利用时空折射率调制实现波导传输模式间单向跃迁、进而获得非互易传输的方案。其折射率调制可表示为

$$\epsilon(x, y, z, t) =$$

$$\epsilon_{\text{static}}(x, y) + \Delta\epsilon(x, y)\cos(\omega_m t - k_m z), \quad (1)$$

式中: $\epsilon_{\text{static}}(x, y)$ 是材料本身的介电常数; $\Delta\epsilon(x, y)$ 为调制幅度在横截面 xy 上的分布; ω_m 为调制频率; k_m 为调制波数; z 为波导传输方向。在(1)式所示的时空调制下,当波导中传输的两个正交模式 (ω_1, k_1) 和 (ω_2, k_2) 满足频率差 $\Delta\omega = \omega_m$ 和波数差 $\Delta k = k_m$ 时,两个模式便会相互转化,其中 ω_1, ω_2 为频率, k_1, k_2 为波数。当模式 (ω_1, k_1) 在波导中正向传播时,模式 (ω_1, k_1) 和 (ω_2, k_2) 的频率差为 ω_m , 波数差为 $-k_m$; 而反向传播时频率差为 ω_m , 波数差为 k_m 。若时空折射率调制的频率和波数分别为 ω_m 和 $-k_m$, 则在正向上传播的模式可以实现光子间接带

间跃迁,而反向传播的模式无法实现这种跃迁,于是形成了非互易传输,如图 2(a)所示。基于微环谐振腔结构,可实现与硅波导完全兼容的非互易光子传输结构,同时基于滤波器件可以实现高效率的光子隔离。2012 年, Lira 等^[13]在一对耦合波导中实现了该理论方案。同年, Fang 等^[17]另辟蹊径,利用时变振幅调制实现了非互易。该振幅调制方式可以用方程表示为

$$E(t) = E_0 \cos(\omega t) \cos(\omega_m t + \phi) = E_0 \{ \cos[(\omega + \omega_m)t + \phi] + \cos[(\omega - \omega_m)t - \phi] \} / 2, \quad (2)$$

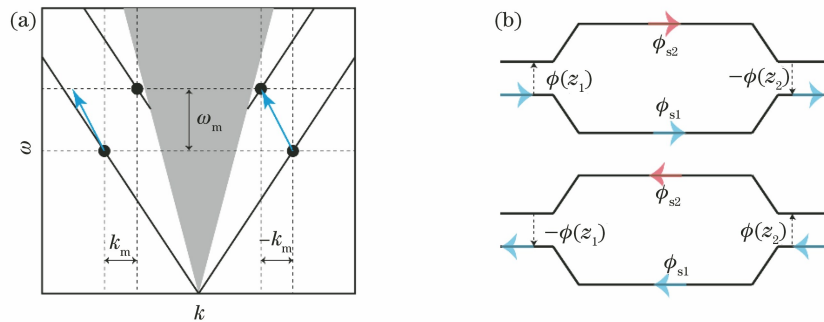


图 2 基于时空调制的无磁非互易方案。(a)基于时空调制实现光子的间接带间跃迁;(b)基于振幅调制实现非互易

Fig. 2 Magnetic-free nonreciprocity scheme based on spatiotemporal modulation. (a) Indirect interband transition of photons realized by spatiotemporal modulation; (b) nonreciprocity realized by amplitude modulation

2016 年,基于时空折射率调制的非互易方案被应用到弹性波的传输领域^[24]。2021 年 Wang 等^[25]利用时空调制实现了光子模式的循环器。

2.2 光机械系统方案

光机械系统是典型的量子系统,它可以通过光子与受激布里渊散射产生的声子相互作用实现非互易。最初的方案类似于时空折射率行波调制^[26],两束泵浦场激发波导产生布里渊散射(SBS),在波导上形成定向传输的声波。该声波在波导传输的过程中实现对波导折射率的时空行波调制,基于 2.1 节中讨论的时空折射率行波调制方法,可以实现对另一束信号光的非互易传输。后来发展的方案由一个强控制场对波导施加偏置^[27],弱信号场与之同向传输时满足激发 SBS 的相位匹配条件,产生光子与声子的相互转换,信号光被受激吸收或放大;反之,不满足相位匹配条件时,信号光则无影响地透射。但是,由于光机械相互作用较弱,实现非互易需要很长的波导。2012 年 Hafezi 等^[28]首次在理论上提出了在高品质微环行波腔中利用光机械耦合实现信号光非互易传输的方案,该方案利用光学腔对光的放大作用克服了光机械相互作用弱的问题。2016 年

式中: ϕ 为调制相位。从(2)式可以看出,光子从低频模式跳到高频模式时相位增加 ϕ ,反之相位减小 ϕ 。如果两次模式转换的调制相位不同,正、反向模式往返转换一次便会积累一个相位差,而且反向模式转换积累的相位差为相反数,如图 2(b)所示。若 $\phi_{s2} - \phi_{s1} = \pi/2$ 且 $\phi(z_1) - \phi(z_2) = -\pi/2$ [ϕ_{s1} 和 ϕ_{s2} 分别为上、下两个路径的传输相位, $\phi(z_1)$ 和 $\phi(z_2)$ 为模式跃迁产生的相位],则正向两个路径的光相干相长而反向两个路径的光相干相消,形成非互易。该方法为时空调制非互易提供了新的思路。2014 年该方案分别在不同的系统中得以实现^[15-16]。

Shen 等^[29]用微球腔在实验上实现了光机械非互易方案。2016 年 Ruesink 等^[30]在微环腔中利用光机械耦合实现了非互易传输并在 2018 年利用光机械耦合实现了循环器^[31]。2019 年 Xia 等^[32]在理论上利用双腔光机械系统实现了理想的隔离器。基于光机械的非互易器件可以在微结构中实现,这有利于实现非互易器件的小型化、集成化。

2.3 手性系统方案

手性是指光的传播方向与其自旋角动量相互关联^[57],因此可以通过对光子自旋角动量敏感的介质实现不对称的 ϵ 。手性系统方案的出现依赖于纳米光学波导及光学腔的发展,如锥型纳米光纤、纳米尺寸的回音壁微腔等,它们在横向上的尺寸(在波长或亚波长量级)比较小,使得光场的分布在该方向上受到限制,部分光场会以倏逝波的形式在空气与波导的交界面附近传播。由于空气与波导的折射率相差较大,因此光不能以完美的横波向前传输,会在传输方向上形成电场偏振的纵向分量。该分量的存在使得光在波导的表面形成圆偏振且其偏振方向与传播方向相关,这就使纳米波导或纳米光学腔具有了手性的特征^[53]。

原子磁子能级的跃迁对光子的自旋角动量敏感,通过人为挑选和制备的方法可使之与不同角动量光子的耦合不同,从而实现光子的非互易传输^[33-38]。该方案实现非互易时需要利用外场制备原子态,因此也属于有源方案。2014 年 Xia 等^[33]提出基于手性腔和波导的单光子隔离器和循环器方案。当光在手性波导或者腔中传播时,正向光的自旋角动量为 σ^+ ,反向光的自旋角动量为 σ^- ;使波导或腔中的模式与制备在特定能级上的原子相互作用,该能级与 σ^+ 光的耦合强度是 σ^- 光的 $\sqrt{45}$ 倍;该原子对正向光的吸收比反向光强,从而实现非互易的传输。2015—2016 年维也纳量子科技中心 Arno 教授小组在实验上实现了基于手性相互作用的单原子隔离器和循环器^[34-35],将原子的叠加态与非互易的叠加态相联系,提出了该结构用于量子网络的可能性。2021 年,You 等^[36]利用磁子能级手性电磁诱导透明(EIT)实现了非互易传输,该方法放宽了对上述耦合强度不对称度的高要求。为拓展非互易的工作带宽,增加多个空间分离的原子、将原子介质换成量子点等方案被不断提出,这些方案在理论上将工作带宽拓展到 GHz 量级^[37-38]。

2.4 宏观多普勒效应方案

多普勒效应是指当波源与接收器有相对运动时,接收器接收到的频率与波源发出的频率不同,其频率移动的大小和正负依赖于波源与接收器相对运动的大小和方向。因此,当介质向一定的方向运动时,其感受到同向传播光和反向传播光的频率是不同的。如果介质对不同频率光的响应不同,则对于固定频率的光来说,该运动介质的 ϵ 是非对称的,因此可以用于构建非互易。2013 年 Horsley 等^[39]提出了移动布拉格镜的方案,利用宏观的多普勒效应实现了非互易。通过远失谐的驻波场构成的周期性势阱实现原子层布拉格镜。当构成驻波的两束光有

一定的频率差,势阱就会随驻波的波峰运动。被势阱束缚住的冷原子排列成的多层布拉格镜也会随着势阱的运动而运动,这就形成了移动的布拉格镜。该结构在理论上可以实现光场的非互易传输。与该方案类似的还有同年 Wang 等^[40]利用移动的光子晶体实现的非互易方案。与之不同的是,文献[39]提到的移动布拉格镜是真正通过原子层的运动来实现的,而此方案中产生的移动光子晶体是通过单纯地控制物质场驻波波峰的运动实现的,所以不需要真正控制原子的运动,这大大降低了实验的难度。利用两束具有一定频率差的控制光形成有一定移动速度的驻波,信号场在驻波波峰的位置形成 EIT,而在波谷位置则没有形成 EIT,于是便形成了移动的光子晶体。此时该光子晶体对与其运动方向同向传输的光和反向传输的光的响应是不同的。2018 年 Ramezani 等^[41]利用此方法从理论上研究了光子的非互易局域。

2.5 微观多普勒效应方案

在第 2.4 节基于宏观多普勒效应实现非互易的方案中,必须人为构造出一种宏观的运动。而在室温下,原子本身就在永不停息地做无规则的热运动。虽然在量子效应的观测和器件的研制中,热运动常扮演破坏者的角色。但是,若能将这种自然存在的热运动利用起来去实现对光场非互易传输的操控,必将大幅降低非互易实现的难度。

2.5.1 原子随机热运动诱导光场非互易传输的原理

2018 年,本团队首次揭示了原子热运动诱导光场非互易传输的全新原理(图 3)^[42]。众所周知,原子热运动也会引起多普勒效应。以单个原子为例,当光的传播方向与该原子的运动方向相同时,原子感受到的光的频率减小;当光的传播方向与该原子的运动方向相反时,原子感受到的频率增大。因此,原子的极化率和光场的传输方向有关,形成极化率-动量锁定。

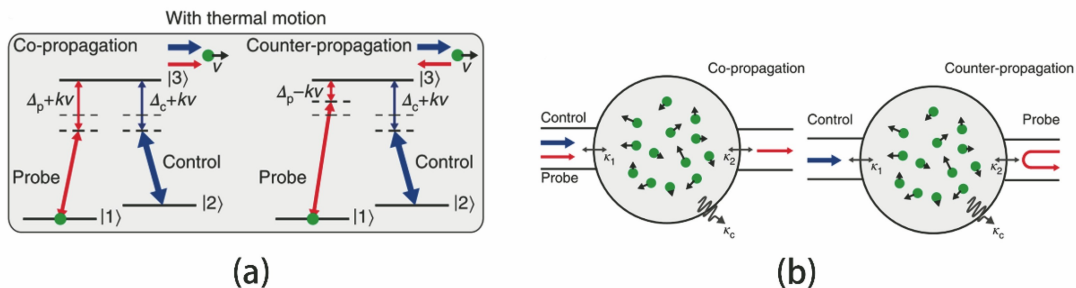


图 3 原子热运动诱导非互易^[42]。(a)原子能级结构图;(b)实验原理图

Fig. 3 Nonreciprocity induced by thermal motion of atoms^[42]. (a) Energy level structure of atoms; (b) experimental schematic diagram

本团队在热原子-环形腔系统中开展了原理实验:同向传输的信号光与控制光形成腔内暗态偶极子(EIT),因此可以低损耗地通过腔;而反向传输的信号光在多普勒效应的影响下,暗态条件被破坏,形成真空拉比分裂,信号光被腔反射。由于热原子系综中单光子 EIT 在实验上已经被验证^[58],因此该方案可以实现单光子水平的光学非互易,在量子光学、量子信息领域具有很大的潜在应用价值。此外,该非互易原理具有普适性,可以推广到其他量子体系;该方案不需要对系统进行冷却,可以在室温下实现,为实验提供了极大便利。另外,还可通过将原子气体充入一维波导、原子包层波导等方式进行集成,实现集成化的非互易器件。

2.5.2 低插入损耗、可重构和多波长的非互易

上述非互易方案中利用的是 EIT 对频率的敏感性。而 EIT 是一种共振的量子相干效应,频率范围比较窄,且透过率受制于环境的退相干。本团队将热原子多普勒效应分别与远失谐拉曼吸收和非相干泵浦效应相结合,实现了低插入损耗、可重构和多

波长的无磁光学隔离器^[43-45]。

原子的共振过程一般有较强的吸收,因此将远失谐的拉曼过程和原子热运动相结合可以构造低插入损耗、可调谐的隔离器^[43]。相应的 Lambda 型三能级结构与图 3(a)所示的相同,只是控制场和信号场均处在单光子远失谐 $[\Delta_c(\Delta_p) \gg \Omega_c]$,其中 Δ_c 和 Δ_p 分别为控制场和探测场的失谐, Ω_c 为控制场拉比频率]的位置。在 Lambda 型三能级热原子系综中,当两束光同向传输时,多普勒频移抵消,形成双光子共振。该远失谐三能级系统可等效为共振的二能级系统,因此信号场被强烈吸收。当两束光反向传输时,多普勒频移相反,信号光远失谐地与二能级相互作用,此时原子系综对信号场的吸收非常小,所以插入损耗非常低。另外,信号场吸收的频率取决于控制场的频率,因此可以通过控制场来调谐信号光的工作频率,从而在铷原子实验中实现了 0.07 dB 的插入损耗和 30 dB 的隔离度,并且工作频率在 1.2 GHz 范围内可调,如图 4 所示。

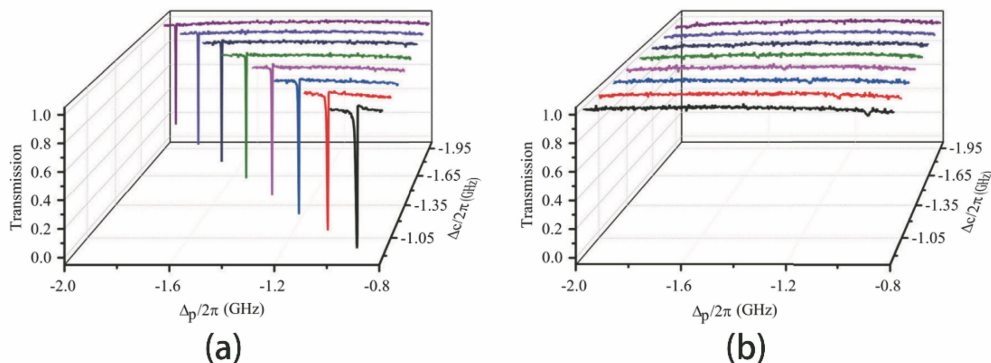


图 4 实验结果图^[43]。(a)正向传输光谱;(b)反向传输光谱

Fig. 4 Experimental results^[43]. (a) Forward transmission spectra; (b) backward transmission spectra

非互易除了可利用光和原子的相干相互作用构造外,还可以利用非相干过程来构造。相比于相干过程,非相干过程实现的非互易频率带宽更宽且更加灵活。用非相干泵浦的方法分别在二能级和三能级系统中实现了可重构和多波长的非互易,能级如图 5 所示。

泵浦场作用在基态 $|g\rangle$ 和激发态 $|e\rangle$ 之间时,会将基态 $|g\rangle$ 上的原子泵浦到其他能级。足够强的泵浦场可以将所有基态原子都转移走,此时和泵浦场同频的信号光作用在两个能级之间,由于基态的原子被完全转移,信号光不再被吸收,便会出现高透射现象。图 5(a)中泵浦场的失谐量为 δ_p ,信号场的失

谐量为 δ_s 。实验结果如图 6 所示,当泵浦场的失谐为 $\delta_p = -115$ MHz 时,速度为 $v = \delta_p/k_p$ 的原子群被泵浦场饱和吸收,所以其对失谐量为 $\delta_s = -115$ MHz 的同向信号场表现为透明;此频率处的反向信号光与另一个速度群的原子相互作用,不受泵浦场的影响,此时仍存在较强的吸收。同时可以看到,失谐量为 $\delta_s = 115$ MHz 的反向信号场与此速度群的原子相互作用,所以在 $\delta_s = 115$ MHz 处反向信号场表现为透明。当泵浦光的失谐量变为 $\delta_p = 115$ MHz 时,前后向透明的频率发生交换。因此通过改变泵浦场的频率可以实现隔离器允许通过的的光的重构,如图 6(a)和(c)所示。

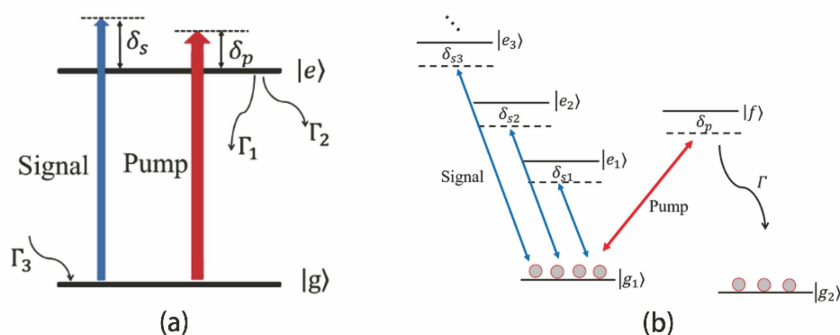


图 5 基于非相干泵浦实现非互易能级图。(a)二能级泵浦结构^[44]; (b) V 型泵浦结构^[45]

Fig. 5 Energy level structure of nonreciprocity realized by incoherent pump. (a) Two-level pump structure^[44]; (b) V-type pump structure^[45]

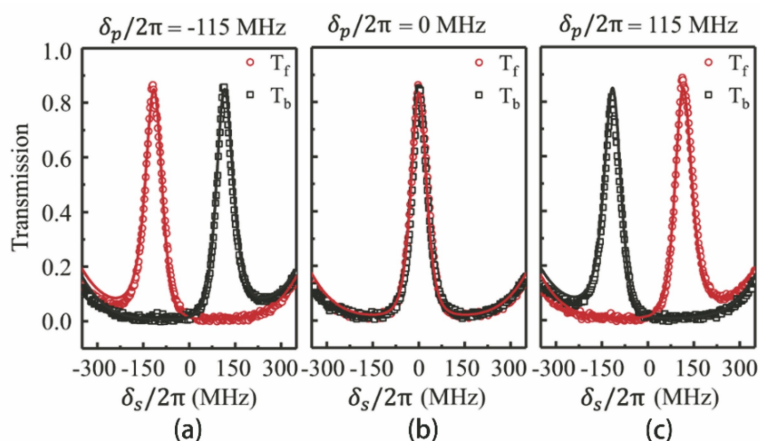


图 6 不同频率泵浦光的非互易传输光谱(图中的圆圈和正方形代表实验数据,实线是理论拟合结果)^[44]。

(a) $\delta_p/2\pi = -115$ MHz; (b) $\delta_p/2\pi = 0$ MHz; (c) $\delta_p/2\pi = 115$ MHz

Fig. 6 Nonreciprocal transmission spectra of pumped light at different frequencies (circles and squares in figure are experimental data and solid lines are theoretical fitting results)^[44]. (a) $\delta_p/2\pi = -115$ MHz; (b) $\delta_p/2\pi = 0$ MHz; (c) $\delta_p/2\pi = 115$ MHz

实现的对多波长同时进行光隔离的三能级结构如图 5(b)所示。泵浦场和信号场作用在不同的能级,构成 V 型的光泵浦结构。与二能级系统相比,该结构的不同之处在于可以同时允许多个激发态能

级 $|e\rangle$ 参与相互作用,因此可以同时实现多个波长信号光的非互易传输。这也是原子内部自身的多能级特性带来的优势。如图 7 所示,实验上采用铷原子的 D1 线,泵浦光的波长为 795 nm,此时,能与 $|g_1\rangle$

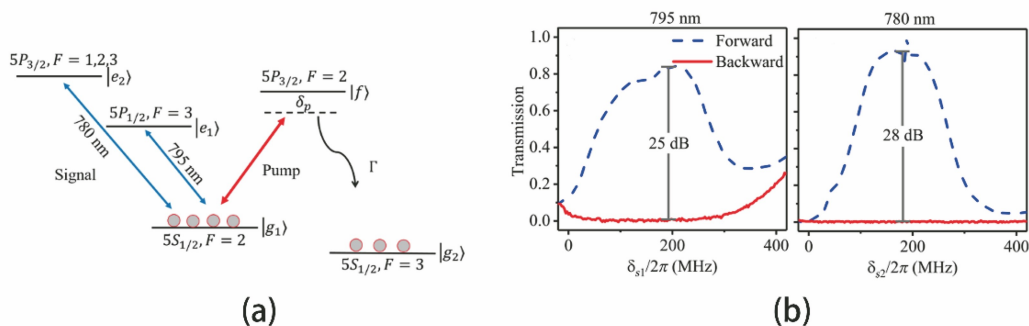


图 7 原子能级与实验结果图^[45]。(a) Rb^{85} 原子中多能级的 V 型结构; (b) 同时实现 795 nm 和 780 nm 信号光的非互易传输谱

Fig. 7 Atomic energy levels and experimental results^[45]. (a) V-type structure with multiple energy levels in Rb^{85} atom; (b) nonreciprocal transmission spectra of 795 nm and 780 nm signal light

发生近共振相互作用的所有激发态能级对应波长的信号光都可以同时实现非互易传输。将实验室现有的 780 nm 和 795 nm 两个波长的信号光同时入射,得到了两个信号光高于 80% 的透过率和高于 25 dB 的隔离对比度。

2.5.3 高性能的光循环器

除了光隔离器,光学非互易元件还包括光循环器、移相等,在光通信和量子信息处理中都起着至关重要的作用。光循环器是一种多端口的器件,信号在各个端口之间以单旋转方式通过,光循环器可以分离相反的信号流或作为隔离器运行。目前无磁的光循环器研究较少,主要有基于原子与手性腔耦合的系统和光机械系统两类方案。2020 年,本团队继续基于原子热运动,结合 MZI 干涉在室温下实现了高性能的循环器^[46],降低了对系统冷却、对高品质腔等的要求。此循环器的构建基于远失谐的拉曼过程,如图 8(a)所示。在双光子共振时,在一定的

原子数密度下,前向光和后向光经过原子系综产生的相位差可以达到 π 且透过率均接近于 1,这是构成循环器的关键因素。将此非互易相位差与 MZI 干涉相结合,便构成了循环器,如图 8(b)所示。1 端口入射的光经分束器分成两束并且这两束光分别经过干涉仪的上、下两个臂。调节干涉仪的下臂,使上、下两个臂的相位差为零。光在 2 端口处产生相长干涉,在 4 端口处产生相消干涉,于是 1 端口入射的光从 2 端口出射;同时,从 2 端口入射的光由于反向通过干涉仪的上臂,其经历的相位与正向经过时相差 π ,此时上、下两个臂的相位差为 π ,通过经典光学干涉过程分析可得,此时光在 3 端口干涉相长而在 1 端口干涉相消,即光从 2 端口入射、从 3 端口出射,最终实现 1→2→3→4 端口的循环。实验结果如图 8(c)所示,循环器的平均光子存活率为 0.85,保真度为 0.98。

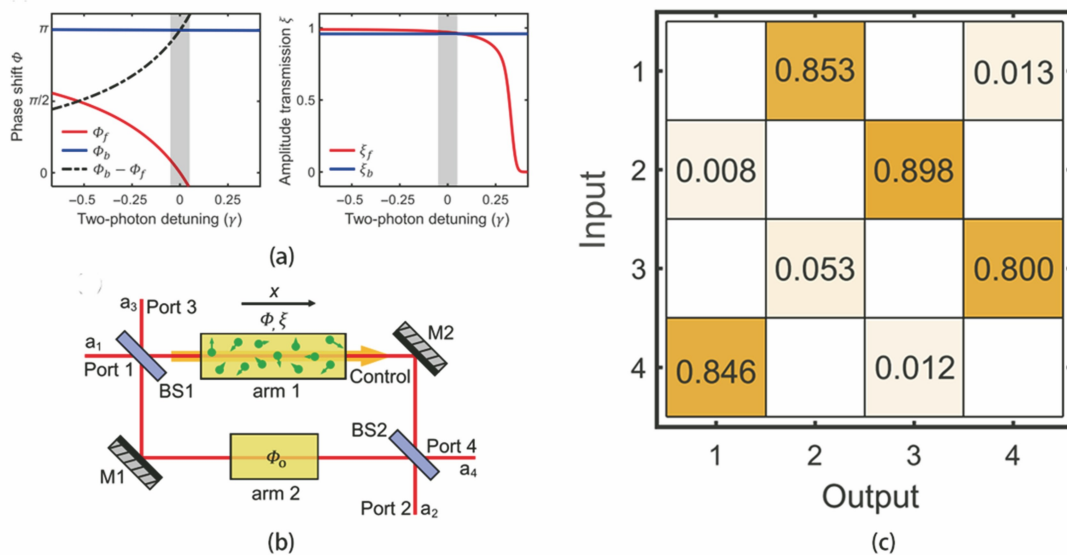


图 8 基于热原子的光循环器^[46]。(a)前后向信号光的色散和吸收谱;(b)实验结构图;(c)循环器实验结果
Fig. 8 Circulators based on hot atoms^[46]. (a) Dispersion and absorption spectra of forward and backward signals; (b) experimental structure diagram; (c) experimental results of circulator

2.5.4 单向放大

单向放大器是指只对一个方向的光信号进行放大、阻止相反方向的光传输的非互易器件。它能够保护信号源不受外来噪声的影响,在通信、信号处理、精密测量等领域必不可少。尤其是高增益、低噪声的单向放大器,它是量子信息处理的重要器件,可以保护敏感的量子系统不受过量噪声的干扰。目前,无磁的单向放大方案大多是基于光机械系统实现的^[29]。2019 年,本团队进一步将原子热运动与拉曼增益结合,在自由空间实现了超强的单向放大

(图 9)^[47]。如图 9(a)所示,在前述三能级光隔离方案的基础上^[42],通过引入泵浦场打开增益通道。当信号场与控制场同向传输时,原子布居经历 $|2\rangle \rightarrow |4\rangle \rightarrow |1\rangle \rightarrow |3\rangle$,因此信号光得到放大。当信号场与控制场反向传输时,由于原本的 Λ 三能级有吸收作用,而且泵浦场引入的放大也因为失谐而非常小,因此最终信号场被介质强烈吸收,从实验上实现了前向 26 dB 增益和反向 30 dB 隔离度的超强单向放大指标。如果适当提高原子数密度,优化控制光场和泵浦光场的强度,上述指标还可以得到进一步提升。

由于上述基于原子热运动的非互易方案具有常温可操作、指标好、适用于单光子、可集成等优点,国内其他课题组也相继开展了基于原子热运动实现非互易的理论和实验工作。2018 年, Xia 等^[48]利用交叉 Kerr 调制在理论上讨论了隔离器和循环器的实现。2020 年, Li 等^[49]采用类似的能级结构在实验

上测出了非互易的相位。同年,清华大学 Liang 等^[50]结合原子热运动和碰撞展宽实现了带宽达 1.2 GHz 的光隔离器。2021 年, Dong 等^[51]在实验上将信号光强度降低到了单光子水平,实现了单光子水平的非互易。这些工作无疑进一步推动了以微观热运动实现非互易这一机理的快速进展。

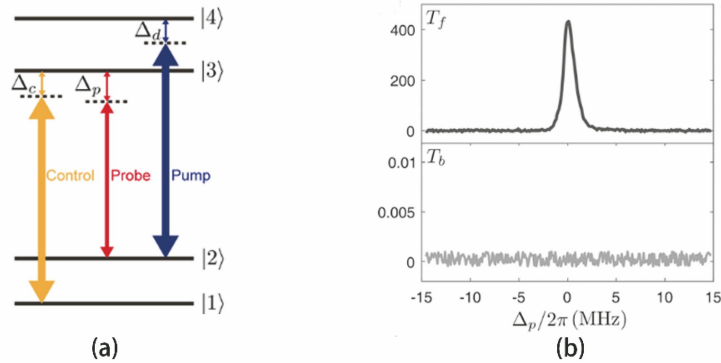


图 9 基于热原子的单向放大^[47]。(a)能级结构图;(b)实验结果图

Fig. 9 Unidirectional amplification based on hot atoms^[47]. (a) Energy level structure; (b) experimental results

3 无磁非互易——无源方案

在光学系统中,有源器件往往会增加系统的复杂性和功耗,因此人们更加倾向于使用无源的光学器件。对于非互易器件来说,当前成熟商用的磁光非互易器件就是无源的器件。而要实现无源的无磁非互易,一般利用介质的自 Kerr 非线性。但是,研究发现^[59-60],基于自 Kerr 非线性的非互易器件受到动态互易和功率范围的限制。因此如何增大功率范围、克服动态互易成为了研究无源无磁非互易器件的关键。下面先介绍已有的两种实现无源无磁非互易的方案。

3.1 基于热光和光学双稳效应的无源非互易方案

2012 年,美国普渡大学的 Fan 等^[52]在 *Science* 上报了利用热光自 Kerr 非线性效应实现无源无磁光二极管的研究结果。如图 10 所示,该无源器件由一个凹陷滤波器(NF)和一个上传-下载器(ADF)

组成且两者具有相同的共振波长 λ_0 。上传-下载器与两个波导之间的间隔不同,因此从不同波导耦合进上传-下载器的信号在腔内积累的光强不同。当波长为 λ_0 的光从端口 1 入射时,光在 NF 腔内积累引起的光热效应使该腔的共振波长发生改变,所以光会透过 NF 腔并通过间隔 G2 耦合进入 ADF 腔。由于间隔 G2 较大,所以在腔 ADF 中积累的光强较弱,无法造成 ADF 腔共振频率的改变。因此, λ_0 波长的光与 ADF 腔共振耦合后经 G3 耦合到端口 2 并由端口 2 输出。当此波长的光从端口 2 输入时,由于 G3 间隔较小,耦合进 ADF 腔的光功率较大,在腔内积累的功率较强,所以 ADF 腔的共振频率发生改变,该波长的光无法耦合到腔内,只有极弱的光通过 G2 耦合到上面的波导。由于凹陷滤波器(NF)对该频率的光进行了过滤,信号光几乎无法从端口 1 输出。正反向隔离度达到了 20 dB,且该方案具有与 CMOS 集成技术兼容的巨大优势,但是其

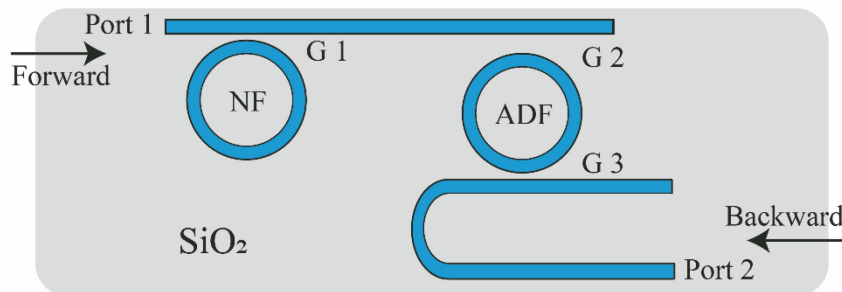


图 10 光热非线性效应实现非互易

Fig. 10 Nonreciprocity realized by photothermal nonlinear effect

插入损耗较大。2013 年, 尽管 Fan 等^[53]对上述方案进行了改进, 但是插入损耗也高于 15 dB。

2014 年, Xia 等^[54]借助原子的光学双稳态这一自 Kerr 非线性效应, 将二能级原子与非对称腔相结合, 利用前向光和后向光耦合到腔内的光强不同所导致的双稳态条件不同的特点, 在理论上实现了非互易传输。2019 年, Yang 等^[55]基于该理论方案, 在实验上实现了少光子水平的无源无磁光二极管效应。原子与腔处于强耦合状态, 在较低的功率下即可获得较强的自 Kerr 非线性, 从而在腔内形成双稳态。由于正向光耦合进入腔的镜子耦合效率更高, 因此从正向耦合进入腔的光具有更强的非线性, 正向入射的光随着入射功率的增加更早地进入双稳态, 而反向光较晚进入双稳态。光强处在两者之间的信号光便可以形成非互易传输。

对于无源无磁非互易的自 Kerr 非线性实现方案, Khanikaev 等^[59]在 2015 年指出了其中存在动态互易的内在局限, Sounas 等^[60]在 2018 年发现了插入损耗和功率范围的相互制约现象。对于第二个制约问题, Sounas 等^[61]提出利用多个非线性腔耦合的方案予以解决。2020 年, Yang 等^[62]利用串联 Fano 环和 Lorentzian 环的方法, 实现了低插入损耗和宽功率范围的光隔离器。而第一个动态互易的内在局限一直存在。

3.2 动态互易的内在局限

利用自 Kerr 非线性效应实现无源非互易, 当正、反向信号光分别入射到介质中时, 正向光可以透射, 反向光可以被隔离。这是通常意义上的光场非互易传输。但如果反向信号光通过介质时正向信号光仍然存在, 此时反向信号也会透过, 而不能像正向信号光不存在时那样被隔离。这就是区别于光场互易或者非互易传输的动态互易^[59]。也就是说, 该无源非互易器件能工作的前提是正、反向信号光同时存在。因此, 上述无源的非互易方案实际不能实现真正意义上的光隔离。这也限制了无源非互易方案的继续往前推进。

当无源无磁光隔离受动态互易的局限性被提出之后^[59], 也有研究者认为采用四波混频等方法可以避免非线性隔离器中的动态互易问题^[63-64], 但实际上这些方案需要外加泵浦光, 是有源的方案, 本身就不存在动态互易的问题。

3.3 克服动态互易的无源非互易方案

根据 Khanikaev 等^[59]的理论, 之所以出现动态

互易, 是因为正、反向信号光作用于同一个非线性介质, 这导致正向信号光在为自身打开透射通道的同时, 也会为反向信号光打开透射通道。基于这一思想, 如果正、反向信号光能够分别和两个不同的非线性介质相互作用, 那么不管反向信号光进来时正向信号光是否存在, 都不会影响其被隔离。幸运的是, 我们发现, 原子热运动产生的多普勒效应可以将一个非线性介质自然分成两个, 即热原子存在对正向和反向信号光具有独立非线性响应的机制。2021 年, 利用热原子介质的这种“速度选择非线性”, 本团队首次在真正意义上克服了动态互易, 实现了不受限于动态互易的无磁无源光隔离^[56]。

利用室温下二能级原子的饱和吸收作为 Kerr 非线性效应(图 11 中以 NL 表示), 将二能级原子放在不对称的腔结构内($t_1 > t_2$, t_1, t_2 分别为两面腔镜的耦合效率)。如果没有原子热运动, 正、反向的信号光会和同一团原子相互作用[图 11(a)], 因此动态互易仍然存在。继续考虑具有热运动的原子系综, 当和原子的失谐量为 Δ_s 的信号光正入射时, 与其发生共振作用的原子团具有速度 v ; 而当该信号光反向入射时, 与其发生共振相互作用的原子团则具有速度 $-v$ 。如图 11(b)所示, 正、反向信号光的传输相当于二者分别和两种非线性介质 NL1 和 NL2 相互作用, 即存在“速度选择非线性”。这种把一个非线性介质分成两个的过程得益于原子自然热运动和多普勒效应的存在, 并没有进行人为操纵。在实现非互易的过程中, 正向强信号光只饱和吸收与其匹配的子系综(速度为 v 的原子团), 为自己打开透射通道; 但很显然, 这个通道并不对反向信号光开放, 反向弱信号光被另一个子系综(速度为 $-v$ 的原子团)。

本团队在室温铷原子气体中进行了上述原理的实验验证。图 12(a)和(b)分别为不考虑原子热运动时, 正、反向信号光单独入射、同时入射两种情形。可以发现, 当单独入射时, 正向透射和反向隔离效果显著。但是, 一旦正、反向信号光同时存在, 原本被隔离的反向信号变得透明。这就是前面所述的动态互易。在引入热原子导致的“速度选择非线性”后, 由图 12(d)可见, 反向的信号光即使在正向信号光存在时仍然能被隔离。图 12(c)和(d)的实验结果表明, 利用原子热运动诱导的“速度选择非线性”可以实现真正意义上的无源无磁光隔离。

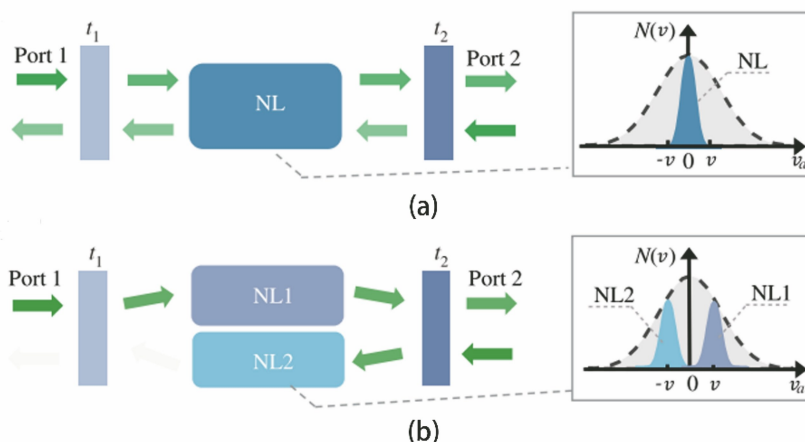


图 11 利用原子热运动克服动态互易的原理^[56]。(a)正向和反向信号光作用在无热运动的原子上时,存在动态互易;(b)前向和反向信号光作用在有热运动的原子上时,二者作用的原子群不同,相当于分别和两个非线性介质相互作用,此时动态互易被打破

Fig. 11 Principle of overcoming dynamic reciprocity by atomic thermal motion^[56]. (a) Dynamic reciprocity exists when forward and backward signals interact with atoms without thermal motion; (b) when forward and backward signals interact with atoms with thermal motion, atomic groups of the two are different, which is equivalent to two signals interacting with two nonlinear media respectively, and the dynamic reciprocity is broken

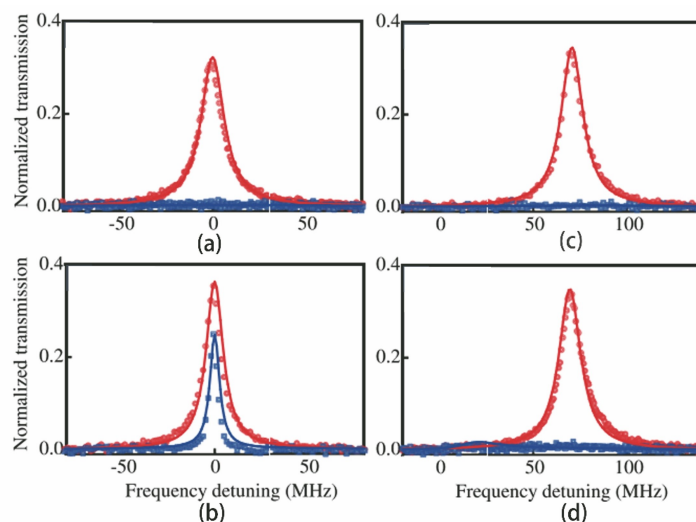


图 12 有无“速度选择非线性”时的透射谱(圆圈+实线代表正向信号,正方形+实线代表反向信号)^[56]。无“速度选择非线性”时正向和反向信号光(a)分开入射与(b)同时入射;有“速度选择非线性”时正向和反向信号光(c)分开入射与(d)同时入射

Fig. 12 Transmission spectra with and without "velocity selection nonlinearity" (circle + solid line represents forward signal, and square + solid line represents backward signal)^[56]. In the absence of "velocity selection nonlinearity", forward and backward signals are (a) separately and (b) simultaneously incident; with "velocity selection nonlinearity", forward and backward signals are (c) separately and (d) simultaneously incident

4 结 论

磁光和无磁非互易两个方向的研究人员都在积极探索高性能、可集成非互易器件的实现方案。近几年,研究人员对于磁光非互易领域的研究主要围绕集成工艺和磁场偏置产生等方面展开,磁光材料集成技术的探索仍是该方向的重点和难点,器件性能的进一步提升需要同时从磁光材料的异质异构集

成和非互易器件的设计及制备两方面进行优化。无磁非互易可以从根源上消除对磁场的依赖,因此也吸引了诸多研究者的兴趣。但是目前无磁方案基本仍在原理探索的实验室阶段,还需要研究者们更多的、长期的投入。

参 考 文 献

[1] Aplet L J, Carson J W. A Faraday effect optical

- isolator[J]. *Applied Optics*, 1964, 3(4): 544-545.
- [2] Shoji Y, Mizumoto T. Magneto-optical non-reciprocal devices in silicon photonics[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2014, 15(1): 014602.
- [3] Yu R L, Li J, Chen W W, et al. Silicon-based all-optical Fredkin gate using cross-phase modulation effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0913001.
虞若兰, 李军, 陈伟伟, 等. 基于交叉相位调制效应的硅基全光 Fredkin 门[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0913001.
- [4] Wang J L, Huangpu L G, Chen H M. Design of polarization-insensitive multimode interference 1×3 optical power splitter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0713001.
汪静丽, 皇甫利国, 陈鹤鸣. 偏振无关多模干涉型 1×3 光功分器的设计[J]. *光学学报*, 2021, 41(7): 0713001.
- [5] Pan W L, Chen H M, Zhuang Y Y, et al. Hybrid demultiplexer for mode-wavelength division based on nanowire waveguides and one-dimensional photonic crystal nanobeam cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0413001.
潘万乐, 陈鹤鸣, 庄煜阳, 等. 基于纳米线波导和一维光子晶体纳米梁腔的模分-波分混合解复用器[J]. *光学学报*, 2021, 41(4): 0413001.
- [6] Levy M. The on-chip integration of magneto-optic waveguide isolators [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(6): 1300-1306.
- [7] Chen R Y, Jiang G M, Hao Y L, et al. Enhancement of nonreciprocal phase shift by using nanoscale air gap [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(9): 1335-1337.
- [8] Takei R, Yoshida K, Mizumoto T. Effects of wafer precleaning and plasma irradiation to wafer surfaces on plasma-assisted surface-activated direct bonding [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(8): 086204.
- [9] Mizumoto T, Shoji Y, Takei R. Direct wafer bonding and its application to waveguide optical isolators[J]. *Materials*, 2012, 5(5): 985-1004.
- [10] Huang D N, Pintus P, Shoji Y, et al. Integrated broadband Ce:YIG/Si Mach-Zehnder optical isolators with over 100 nm tuning range[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(23): 4901-4904.
- [11] Sounas D L, Alù A. Non-reciprocal photonics based on time modulation[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(12): 774-783.
- [12] Yu Z F, Fan S H. Complete optical isolation created by indirect interband photonic transitions[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(2): 91-94.
- [13] Lira H, Yu Z F, Fan S H, et al. Electrically driven nonreciprocity induced by interband photonic transition on a silicon chip [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(3): 033901.
- [14] Fang K J, Yu Z F, Fan S H. Realizing effective magnetic field for photons by controlling the phase of dynamic modulation[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(11): 782-787.
- [15] Kinkhabwala A, Yu Z F, Fan S H, et al. Large single-molecule fluorescence enhancements produced by a bowtie nanoantenna [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(11): 654-657.
- [16] Yu Z F, Fan S H. Optical isolation based on nonreciprocal phase shift induced by interband photonic transitions [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(17): 171116.
- [17] Fang K J, Yu Z F, Fan S H. Photonic Aharonov-Bohm effect based on dynamic modulation [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(15): 153901.
- [18] Tzuan L D, Fang K J, Nussenzeig P, et al. Non-reciprocal phase shift induced by an effective magnetic flux for light [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(9): 701-705.
- [19] Li E B, Eggleton B J, Fang K J, et al. Photonic Aharonov-Bohm effect in photon-phonon interactions [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3225.
- [20] Fleury R, Sounas D L, Sieck C F, et al. Sound isolation and giant linear nonreciprocity in a compact acoustic circulator [J]. *Science*, 2014, 343(6170): 516-519.
- [21] Estep N A, Sounas D L, Soric J, et al. Magnetic-free non-reciprocity and isolation based on parametrically modulated coupled-resonator loops[J]. *Nature Physics*, 2014, 10(12): 923-927.
- [22] Sounas D L, Alù A. Angular-momentum-biased nanorings to realize magnetic-free integrated optical isolation[J]. *ACS Photonics*, 2014, 1(3): 198-204.
- [23] Sounas D L, Caloz C, Alù A. Giant non-reciprocity at the subwavelength scale using angular momentum-biased metamaterials [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2407.
- [24] Trainiti G, Ruzzene M. Non-reciprocal elastic wave propagation in spatiotemporal periodic structures[J]. *New Journal of Physics*, 2016, 18(8): 083047.
- [25] Wang J H, Herrmann J F, Witmer J D, et al. Photonic modal circulator using temporal refractive-index modulation with spatial inversion symmetry [J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(19): 193901.
- [26] Poulton C G, Pant R, Byrnes A, et al. Design for

- broadband on-chip isolator using stimulated Brillouin scattering in dispersion-engineered chalcogenide waveguides[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21235-21246.
- [27] Kang M S, Butsch A, Russell P S J. Reconfigurable light-driven opto-acoustic isolators in photonic crystal fibre[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(9): 549-553.
- [28] Hafezi M, Rabl P. Optomechanically induced non-reciprocity in microring resonators [J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7672-7684.
- [29] Shen Z, Zhang Y L, Chen Y, et al. Experimental realization of optomechanically induced non-reciprocity[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(10): 657-661.
- [30] Ruesink F, Miri M A, Alù A, et al. Nonreciprocity and magnetic-free isolation based on optomechanical interactions[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13662.
- [31] Ruesink F, Mathew J P, Miri M A, et al. Optical circulation in a multimode optomechanical resonator [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1798.
- [32] Xia C C, Yan X B, Tian X D, et al. Ideal optical isolator with a two-cavity optomechanical system[J]. *Optics Communications*, 2019, 451: 197-201.
- [33] Xia K Y, Lu G W, Lin G W, et al. Reversible nonmagnetic single-photon isolation using unbalanced quantum coupling[J]. *Physical Review A*, 2014, 90(4): 043802.
- [34] Scheucher M, Hilico A, Will E, et al. Quantum optical circulator controlled by a single chirally coupled atom[J]. *Science*, 2016, 354(6319): 1577-1580.
- [35] Sayrin C, Junge C, Mitsch R, et al. Nanophotonic optical isolator controlled by the internal state of cold atoms[J]. *Physical Review X*, 2015, 5(4): 041036.
- [36] You Y, Hu Y Q, Lin G W, et al. Quantum nonreciprocity based on electromagnetically induced transparency in chiral quantum-optical systems [J]. *Physical Review A*, 2021, 103(6): 063706.
- [37] Yan W B, Ni W Y, Zhang J, et al. Tunable single-photon diode by chiral quantum physics[J]. *Physical Review A*, 2018, 98(4): 043852.
- [38] Tang L, Tang J S, Zhang W D, et al. On-chip chiral single-photon interface: isolation and unidirectional emission [J]. *Physical Review A*, 2019, 99(4): 043833.
- [39] Horsley S A R, Wu J H, Artoni M, et al. Optical nonreciprocity of cold atom Bragg mirrors in motion [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(22): 223602.
- [40] Wang D W, Zhou H T, Guo M J, et al. Optical diode made from a moving photonic crystal [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(9): 093901.
- [41] Ramezani H, Jha P K, Wang Y, et al. Nonreciprocal localization of photons[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(4): 043901.
- [42] Zhang S C, Hu Y Q, Lin G W, et al. Thermal-motion-induced non-reciprocal quantum optical system[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(12): 744-748.
- [43] Hu Y Q, Liu L F, Zhang S C, et al. Low insertion loss optical isolator with widely tunable frequency [J]. *Optics Communications*, 2021, 489: 126861.
- [44] Hu Y Q, Zhang S C, Kuang X Y, et al. Reconfigurable nonreciprocity with low insertion loss using a simple two-level system[J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 38710-38717.
- [45] Hu Y Q, Zhang S C, Qi Y H, et al. Multiwavelength magnetic-free optical isolator by optical pumping in warm atoms[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(5): 054004.
- [46] Zhang S C, Lin G W, Hu Y Q, et al. Cavity-free circulator with low insertion loss using hot atoms[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(2): 024032.
- [47] Lin G W, Zhang S C, Hu Y Q, et al. Nonreciprocal amplification with four-level hot atoms[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(3): 033902.
- [48] Xia K Y, Nori F, Xiao M. Cavity-free optical isolators and circulators using a chiral cross-Kerr nonlinearity[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(20): 203602.
- [49] Li E Z, Ding D S, Yu Y C, et al. Experimental demonstration of cavity-free optical isolators and optical circulators [J]. *Physical Review Research*, 2020, 2(3): 033517.
- [50] Liang C, Liu B, Xu A N, et al. Collision-induced broadband optical nonreciprocity[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(12): 123901.
- [51] Dong M X, Xia K Y, Zhang W H, et al. All-optical reversible single-photon isolation at room temperature [J]. *Science Advances*, 2021, 7(12): eabe8924.
- [52] Fan L, Wang J, Varghese L T, et al. An all-silicon passive optical diode[J]. *Science*, 2012, 335(6067): 447-450.
- [53] Fan L, Varghese L T, Wang J, et al. Silicon optical diode with 40 dB nonreciprocal transmission [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(8): 1259-1261.
- [54] Xia X W, Xu J P, Yang Y P. Controllable optical bistability of an asymmetric cavity containing a single two-level atom [J]. *Physical Review A*, 2014, 90(4): 043857.
- [55] Yang P F, Xia X W, He H, et al. Realization of

- nonlinear optical nonreciprocity on a few-photon level based on atoms strongly coupled to an asymmetric cavity[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(23): 233604.
- [56] Hu Y Q, Qi Y H, You Y, et al. Passive nonlinear optical isolators bypassing dynamic reciprocity [J]. *Physical Review Applied*, 2021, 16: 014046.
- [57] Lodahl P, Mahmoodian S, Stobbe S, et al. Chiral quantum optics[J]. *Nature*, 2017, 541(7638): 473-480.
- [58] Höckel D, Benson O. Electromagnetically induced transparency in cesium vapor with probe pulses on the single-photon level [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(15): 153605.
- [59] Khanikaev A B, Alù A. Nonlinear dynamic reciprocity[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(6): 359-361.
- [60] Sounas D L, Alù A. Fundamental bounds on the operation of Fano nonlinear isolators [J]. *Physical Review B*, 2018, 97(11): 115431.
- [61] Sounas D L, Soric J, Alù A. Broadband passive isolators based on coupled nonlinear resonances [J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(2): 113-119.
- [62] Yang K Y, Skarda J, Cotrufo M, et al. Inverse-designed non-reciprocal pulse router for chip-based LiDAR [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6): 369-374.
- [63] Wang K, Gao S T, Wang Y, et al. Four-wave-mixing-based silicon integrated optical isolator with dynamic non-reciprocity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(16): 1739-1742.
- [64] Hua S Y, Wen J M, Jiang X S, et al. Demonstration of a chip-based optical isolator with parametric amplification [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13657.