

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

片上集成光隔离器的研究进展

杨宗麒, 李文秀, 孙鑫, 黄馨瑶, 杨合, 张浩, 黄安平, 肖志松

引用本文:

杨宗麒, 李文秀, 孙鑫, 等. 片上集成光隔离器的研究进展[J]. 光电工程, 2025, 52(2): 240285.

Yang Z Q, Li W X, Sun X, et al. Research progress on on-chip integrated optical isolators[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(2): 240285.

<https://doi.org/10.12086/oe.2025.240285>

收稿日期: 2024-12-05; 修改日期: 2025-02-13; 录用日期: 2025-02-13

相关论文

逆向设计的硅基片上功率分束器

马汉斯, 杜特, 姜鑫鹏, 杨俊波

光电工程 2023, 50(7): 230086 doi: [10.12086/oe.2023.230086](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230086)

Spatio-temporal isolator in lithium niobate on insulator

Haijin Huang, Armandas Balčytis, Aditya Dubey, Andreas Boes, Thach G. Nguyen, Guanghui Ren, Mengxi Tan, Arnan Mitchell

Opto-Electronic Science 2023, 2(3): 220022 doi: [10.29026/oes.2023.220022](https://doi.org/10.29026/oes.2023.220022)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal



Website

片上集成光隔离器的研究进展

杨宗麒¹, 李文秀¹, 孙鑫¹, 黄馨瑶², 杨合^{3*},
张浩^{4*}, 黄安平², 肖志松^{2,5}

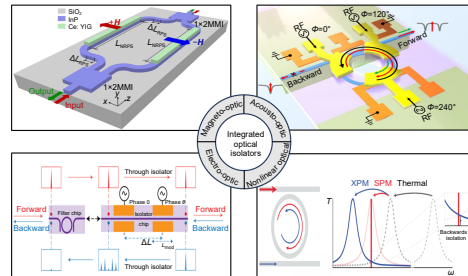
¹北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191;

²北京航空航天大学物理学院, 北京 100191;

³北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

⁴北京航空航天大学空间与地球科学学院, 北京 100191;

⁵北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100192



摘要: 随着信息时代的快速发展, 光子集成芯片在光通信、量子精密测量、人工智能光计算、微波光子学等领域中的应用需求不断增长。光隔离器作为光子集成芯片的重要组成部分, 能够有效地防止光信号的反向传播, 保证系统的稳定性和可靠性, 广泛应用于光纤通信、量子通信和激光系统等关键技术。本文综述了片上集成光隔离器的研究进展, 重点讨论了基于磁光、声光、电光和光学非线性效应的片上集成光隔离器的不同实现方式, 探讨了各自的优势与挑战, 展望了未来的发展方向和应用前景。

关键词: 硅光子学; 光隔离器; 非互易效应

中图分类号: TN256

文献标志码: A

杨宗麒, 李文秀, 孙鑫, 等. 片上集成光隔离器的研究进展 [J]. 光电工程, 2025, 52(2): 240285

Yang Z Q, Li W X, Sun X, et al. Research progress on on-chip integrated optical isolators[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(2): 240285

Research progress on on-chip integrated optical isolators

Yang Zongqi¹, Li Wenxiu¹, Sun Xin¹, Huang Xinyao², Yang He^{3*}, Zhang Hao^{4*},
Huang Anping², Xiao Zhisong^{2,5}

¹School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

²School of Physics, Beihang University, Beijing 100191, China;

³School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

⁴School of Space and Earth Sciences, Beihang University, Beijing 100191, China;

⁵School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China

Abstract: As the information age progresses rapidly, the demand for silicon photonic integrated circuits in optical communication, quantum precision measurement, artificial intelligence optical computing, and microwave photonics continues to grow. As an essential component of silicon photonic integrated circuits, optical isolators effectively

收稿日期: 2024-12-05; 修回日期: 2025-02-13; 录用日期: 2025-02-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB3900701); 中央高校基本科研业务费专项资金 (501XYGG2024117011)

*通信作者: 张浩, haozhang@buaa.edu.cn; 杨合, yanghe@buaa.edu.cn

版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

prevent the backpropagation of optical signals, ensuring system stability and reliability. They are widely used in key technologies such as optical fiber communication, quantum communication, and laser systems. This paper reviews the research progress on on-chip integrated optical isolators, focusing on different implementation methods based on magneto-optic, acousto-optic, electro-optic, and nonlinear optical effects, discussing the advantages and challenges associated with each type. Finally, the paper explores future development directions and potential applications.

Keywords: silicon photonics; optical isolator; non-reciprocal effect

1 引言

随着信息时代的爆炸性发展,为了更好地实现高质量信息传输,高性能、低成本的硅光子集成电路(silicon photonic integrated circuits, PICs)在光通信、微波光子学、光计算、量子信息处理、光传感等方面的需求越来越大^[1-4]。非互易光子器件是PICs中重要的组成部分,其中,光隔离器是只允许一个方向的光通过且阻挡相反方向光通过的器件^[5-6],在PICs系统中的多个场合中具有不可或缺的应用,例如阻挡反射光进入激光器影响光源信号甚至损坏激光器;减轻光通信系统中的多路径干扰;提高系统的可设计性,避免不同设备之间的串扰等。光隔离器的主要性能指标有插入损耗、隔离度和隔离带宽。正向传播时,隔离器输出端口与输入端口的透射率之差为插入损耗;同

频下正向和反向透射光谱的最大透射率差为最大隔离度;隔离度大于某一值的波长范围为该值的隔离带宽(如隔离度大于10 dB的波长范围为10 dB隔离带宽)。发展高隔离度、宽隔离带宽和低插入损耗特性的光隔离器是研究发展的主要趋势。为了满足PICs系统的高度集成特性,利用不同原理与效应的片上集成光隔离器已经被提出,可分为基于磁光(magneto-optic, MO)效应^[7-9]、声光(acousto-optic, AO)效应^[10-12]、电光(electro-optic, EO)效应^[13-15],以及光学非线性效应^[16-18]等,如图1所示。磁光隔离器具有宽带宽、鲁棒性的优点,但面临着磁光材料难以集成、需外加磁场和高插入损耗等困境;基于声光效应的隔离器需要基于窄带光学谐振腔^[11-12,19]来增强非互易性,限制了其隔离带宽;电光隔离器性能优异,但功耗高、需要高精度加工;非线性光隔离器依赖于额外的光泵浦和

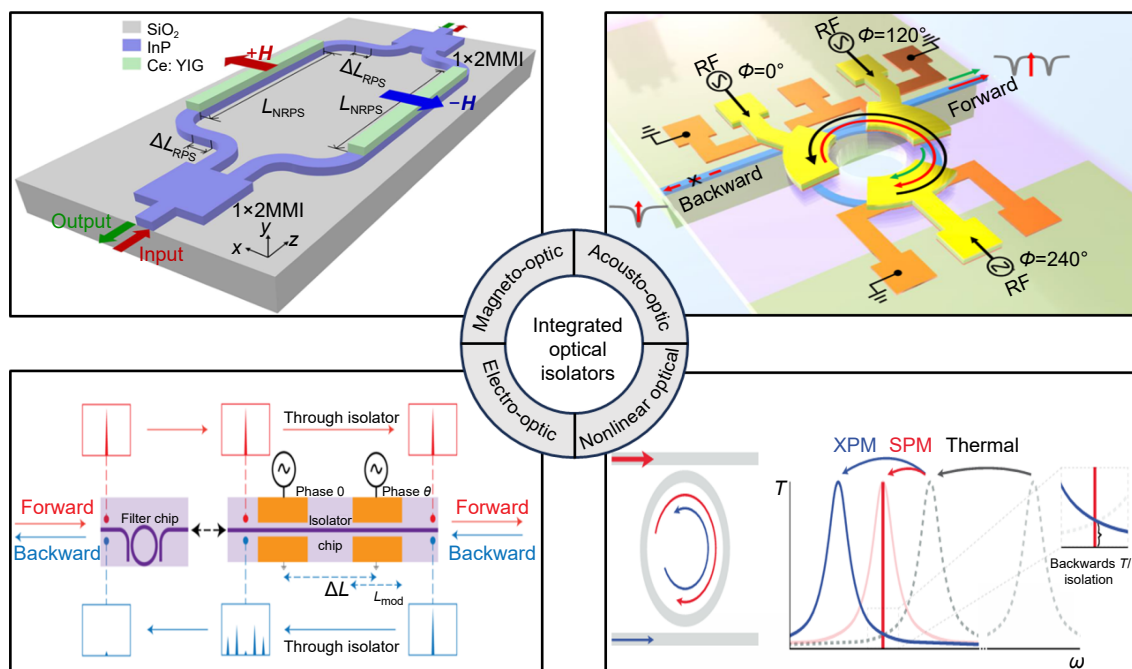


图1 基于不同效应的片上集成光隔离器^[12,15,18,21]

Fig. 1 On-chip integrated optical isolators based on different effects^[12,15,18,21]

滤波器^[15,19-20], 不能有效隔离连续波长。本文讨论了基于不同方式制备片上集成光隔离器的研究进展, 对未来机遇和挑战进行了展望。

2 非互易传输原理

互易性是光学系统中的一个重要原理, 它要求在激励源与端口互换位置时, 传输信号的响应是相同的^[22]。端口 1 的电磁场分量为 E_1 、 H_1 , 端口 2 的电磁场分量为 E_2 、 H_2 。在无源情况下端口 1 的麦克斯韦方程组^[5]为

$$\begin{cases} \nabla \times E_1 = -j\omega\mu H_1 \\ \nabla \times H_1 = j\omega\varepsilon E_1 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: ω 为电磁场角频率; μ 为介质磁导率; ε 为介质介电常数; ∇ 为哈密顿算子。式 (1) 上式点乘 H_2 , 式 (1) 下式点乘 E_2 相加得

$$H_2 \cdot \nabla \times E_1 + E_2 \cdot \nabla \times H_1 = j\omega(E_2 \varepsilon E_1 - H_2 \mu H_1), \quad (2)$$

交换输入、输出端口, 同理得

$$H_1 \cdot \nabla \times E_2 + E_1 \cdot \nabla \times H_2 = j\omega(E_1 \varepsilon E_2 - H_1 \mu H_2), \quad (3)$$

式 (2)、式 (3) 相减得

$$\nabla \cdot (E_1 \times H_2 - E_2 \times H_1) = j\omega(E_2 \varepsilon E_1 - E_1 \varepsilon E_2 - H_2 \mu H_1 + H_1 \mu H_2), \quad (4)$$

当 ε 和 μ 是标量或者对称张量, 式 (4) 右侧为零, 得到洛伦兹互易定理:

$$\nabla \cdot (E_1 \times H_2 - E_2 \times H_1) = 0. \quad (5)$$

对于端口数有限的线性器件而言, 该定理要求器件的散射矩阵具有对称性。

$$S = S^T, \quad (6)$$

式中: S 的元素定义为 $S_{ji} = b_j/a_i$, a_i 和 b_j 分别为端口 i 和端口 j 的输入信号幅值和输出信号幅值。

光隔离器要求打破同一路径上不同传播方向的光

的互易性, 实现非互易传输。单模波导双端口隔离器及其散射矩阵如图 2 所示, 其散射矩阵表明该隔离器只允许一个方向上的光进行传输。为了打破洛伦兹互易性, 具有非对称张量介电常数的磁光材料^[23-24]首先被应用于光隔离器的研发, 本文在第三节中对磁光隔离器进行详细介绍。随着光隔离器小型化、集成化的趋势发展, 磁光材料难以集成的劣势也逐渐展现, 研究人员开始探索片上可集成的非磁光隔离器。

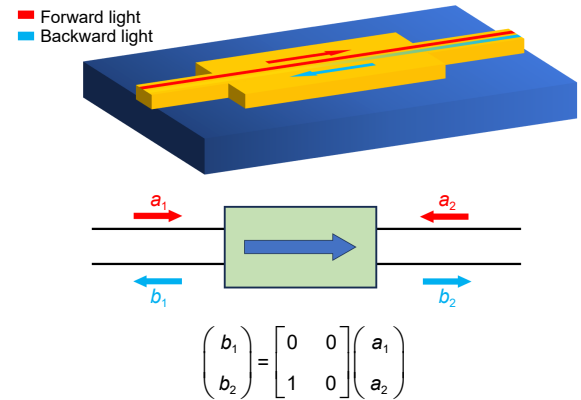


图 2 单模波导双端口隔离器及其散射矩阵
Fig. 2 Single-mode waveguide two-port isolator and its scattering matrix

3 磁光隔离器

传统磁光隔离器是基于法拉第旋光效应来实现的, 通常需要一个法拉第旋光器、两个偏振器和一个永磁铁来实现光隔离^[25], 如图 3 所示。偏振光经过磁光材料时其偏振面会发生旋转, 旋转的角度方向与磁化方向和传输方向相关。两个偏振器在不同的传输方向互为起偏器、检偏器, 因此通过两个光轴成 45° 夹角的偏振片即可实现反向光隔离的功能。体型磁光隔离器在 1550 nm 波长下可实现大于 30 dB 的隔离度, 小

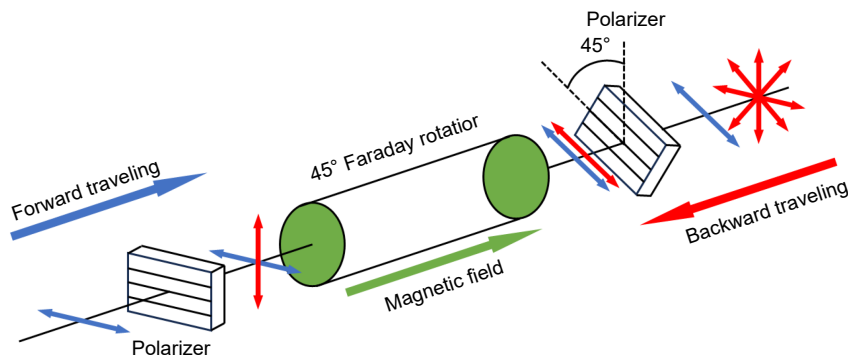


图 3 传统块状磁光隔离器装置图
Fig. 3 Diagram of traditional bulk magneto-optical isolator device

于 1 dB 的插入损耗。然而, 磁光材料与半导体基片材料间存在很大的晶格失配和热失配, 导致集成困难^[26-27]。

随着集成技术的不断成熟以及 Ce: YIG^[28]、Bi: YIG^[29] 等高法拉第旋光系数材料的出现, 不同结构、不同衬底的片上磁光隔离器被研发出来, 包括马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 结构^[7,30-31]、微环谐振腔 (micro-ring, MR) 结构^[32-34] 和多模干涉 (multimode interference, MMI) 结构^[35-36]。

3.1 磁光 MZI 结构

MZI 作为磁光隔离器常用的结构之一, 最早可以追溯到 1975 年。Auracher 等^[37] 提出的一种基于非互易相移的干涉型磁光隔离器, 但受到当时的集成技术和材料制备工艺的限制, 无法进行实验验证。随着晶圆键合 (wafer bonding, WB)、溅射沉积 (sputter deposition, SD)、激光脉冲沉积 (pulsed laser deposition, PLD) 等集成技术的不断发展, Ghosh 等^[38] 在 2012 年使用晶圆间接键合技术制备了 Si/MO-MZI 隔离器, 其原理如图 4(a) 和图 4(b) 所示, 该隔离器对 TM 偏振光的隔离比为 25 dB(图 4(c)), 插入损耗为 9.7 dB。针对

TE 偏振光的隔离, Ghosh 等^[39] 在每个 Si/MO 波导的两端集成了 8 个偏振旋转器 (polarization rotator, PR), 如图 4(d) 所示。图 4(e) 展示了该器件在 1540 nm 处实现了 32 dB 的隔离度, 但由于 PR 的额外损耗, 该器件的插入损耗达到了 22 dB。

2014 年, Shoji 等^[7] 采用晶圆直接键合的方法制备 MO-MZI 隔离器, 其绝缘衬底上硅 (silicon-on-insulator, SOI) 波导光隔离器的结构如图 5(a) 所示。该器件对 TM 偏振光的隔离比为 30 dB, 插入损耗为 13 dB, 图 5(b) 展示了其显微镜图像, 长度仅为 1.5 mm。Shoji 等在 TM 隔离器的一端设计 TE-TM 模式转换结构, 在进入 MZI 之前, 来自端口 1 的 TE 输入光首先被转换成 TM 偏振光, 然后通过 TM 隔离器进行正向传输 (如图 5(d) 所示)。该器件在 1553 nm 波长处的隔离比达到 26.7 dB (如图 5(f) 所示), 由于耦合损耗较大, 测量到的光纤到光纤传输损耗为 33.4 dB^[31]。

近年来, 利用沉积技术制备 MO-MZI 器件也取得了进展。在 2019 年, 电子科技大学张燕在 SOI 衬底上利用 PLD 技术实现了 MZI 型 TM 与 TE 两种模式的隔离器, 两种隔离器的光学显微俯视图如图 6(a, b)

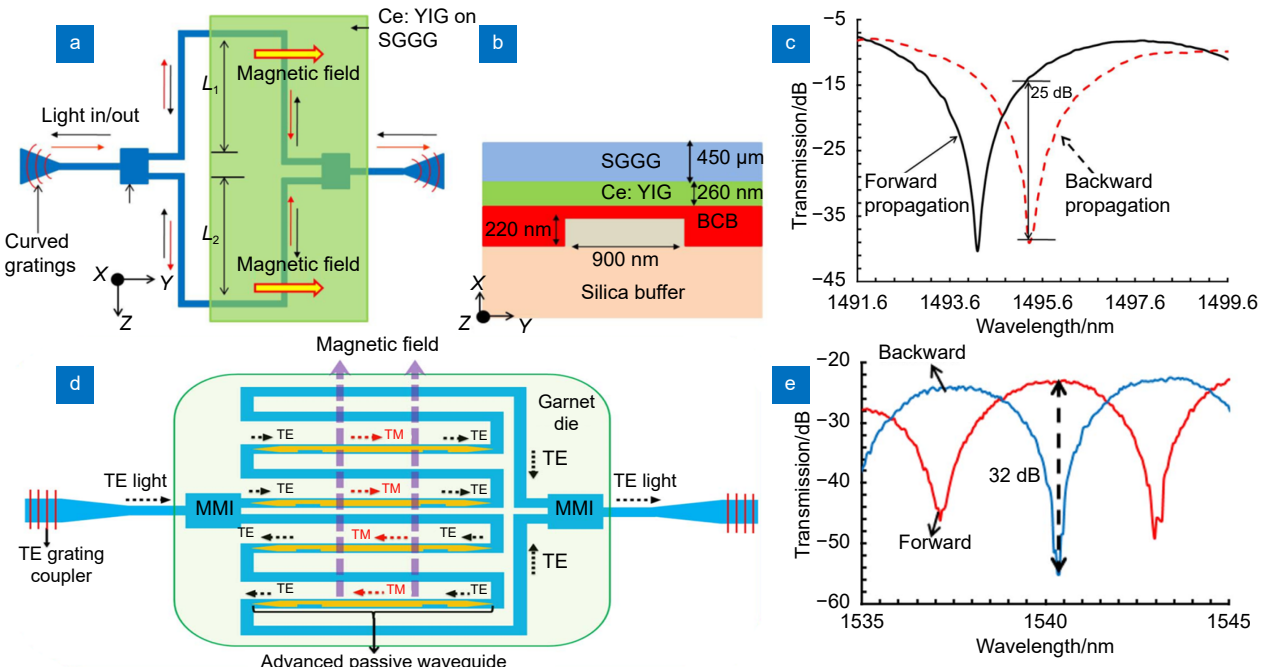


图 4 晶圆间接键合制备 MO-MZI 隔离器^[38-39]。(a) 由 Ce: YIG 覆盖的 MZI 组成的光隔离器原理图俯视图; (b) 横切面视图; (c) 正反向传输的传输谱; (d) 添加 PR 后的结构原理图; (e) 外加磁场下的传输谱

Fig. 4 Wafer-level indirect bonding for the preparation of MO-MZI isolator^[38-39]. (a) Schematic top view of the optical isolator composed of a MZI covered with Ce: YIG; (b) Cross-sectional view; (c) Transmission spectra for forward and backward transmission; (d) Schematic of the structure after the addition of PR; (e) Transmission spectra under an applied magnetic field

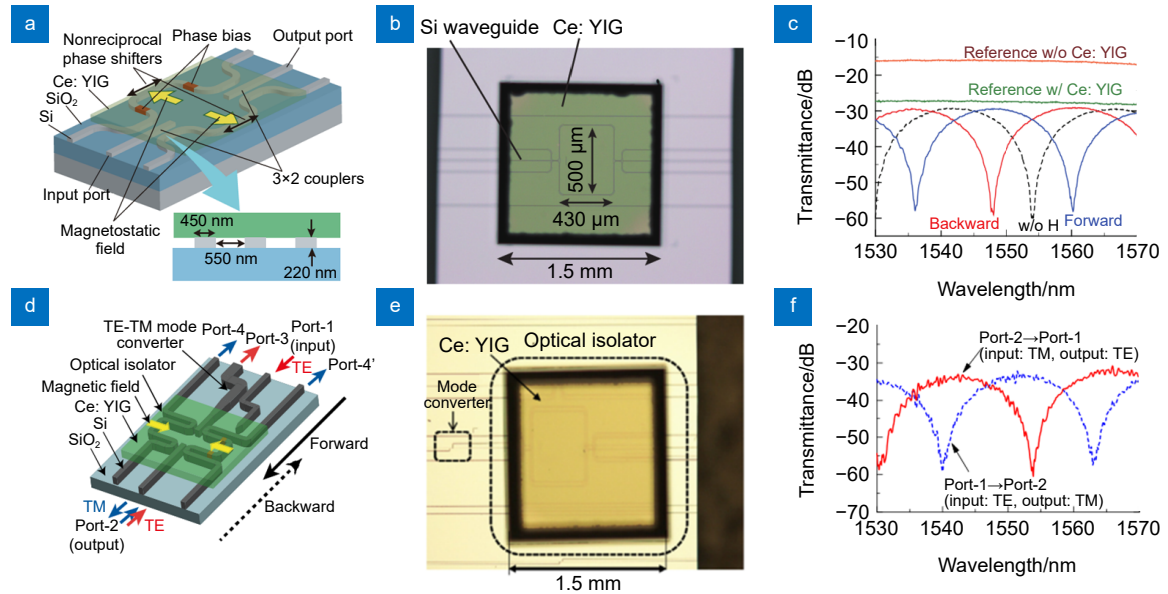


图 5 晶圆直接键合制备 MO-MZI 隔离器^[7,31]。(a) 基于 MZI 的 SOI 波导光隔离器原理图；(b) 制备的 MZI 硅波导光隔离器的显微镜图像；(c) 正反向传输的传输谱；(d) 集成 TE-TM 模式转换器的光隔离器原理图；(e) 在 Si 平台上的显微镜图像；(f) 集成光隔离器端口 1 和端口 2 之间的透射率

Fig. 5 Wafer-level direct bonding for the fabrication of MO-MZI isolator^[7,31]. (a) Schematic diagram of an SOI waveguide optical isolator based on MZI; (b) Microscope image of the fabricated MZI silicon waveguide optical isolator; (c) Transmission spectra for forward and backward transmission; (d) Schematic diagram of the optical isolator integrated with a TE-TM mode converter; (e) Microscope image of the integrated optical isolator on the Si platform; (f) Transmittance between port 1 and port 2 of the integrated optical isolator

所示。TM 模式隔离器在 1574 nm 波长处具有 30 dB 的最大隔离度以及 5 dB 的插入损耗，其 10 dB 的隔离带宽为 9 nm；TE 模式隔离器在 1588 nm 波长处具有 30 dB 的最大隔离度以及 9 dB 的插入损耗，其 10 dB 的隔离带宽为 2 nm^[32]。2020 年，电子科技大学的严巍在氮化硅 (Si₃N₄) 平台同样实现了两种模式的 MZI 型隔离器，图 6(e) 显示了制作的 Si₃N₄/MO 波导的截面扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 图像，其波导 TM 基模的 E_y 分量模拟如图 6(f) 所示。TM 模式隔离器在 1555 nm 波长具有 32 dB 的最大隔离度以及 2.3 dB 的插入损耗，其 20 dB 隔离带宽为 4 nm，10 dB 隔离带宽为 13 nm；TE 模式隔离器在 1558 nm 波长具有 30 dB 的最大隔离度以及 3 dB 的插入损耗，其 20 dB 隔离带宽为 5 nm，10 dB 隔离带宽为 16 nm^[40]。Chen 等在 2024 年通过仿真展示了基于 MZI 结构的片上磁光隔离器，该器件在 1550 nm 波长下实现了高达 50 dB 的隔离度和 72 nm 的 30 dB 隔离带宽^[21]，设计了两种磁光波导结构，并评估了制备精度对器件性能的影响。

基于 MZI 结构的磁光隔离器的优势在于其高隔离度、较大的隔离带宽和设计灵活性，可以通过相移实现精确的光信号处理，且对温度变化不太敏感，具

有更好的温度稳定性。然而，额外的 PR 等导致结构复杂，MZI 隔离器可能会引入较高的插入损耗，影响传输效率。相比于微环谐振腔，MZI 结构尺寸较大，不利于小型化集成。

3.2 磁光 MR 结构

微环谐振腔因其高品质因子 (quality factor, Q)、小尺寸、易于集成等特点，在光滤波器、光调制器、激光器、光子集成电路等领域中得到了广泛应用。将磁光材料沉积到微环谐振腔或耦合波导上，通过外加磁场 (通常是垂直于光传播方向的静磁场) 诱导磁光效应，产生非互易相移。对于正向传播，光信号可以在特定波长处耦合进入微环并传输；而对于反向传播，相移不同导致不满足微腔谐振条件，光信号无法耦合或会被部分反射，从而实现隔离效应^[41]，其原理如图 7(a) 所示。

2011 年，Bi 等^[8]通过 PLD 技术制备 Ce: YIG 薄膜，并成功在硅基底上实现了单片集成的 MO-MR 隔离器，如图 7(b) 所示。该器件在 1541.6 nm 波长下表现出 19.5 dB 的隔离比和 18.8 dB 的插入损耗 (图 7(c))。2016 年，Huang 等^[33]展示了通过晶圆键合 Ce: YIG 薄膜的 MO-MR 隔离器，其装置原理和显微镜图像分

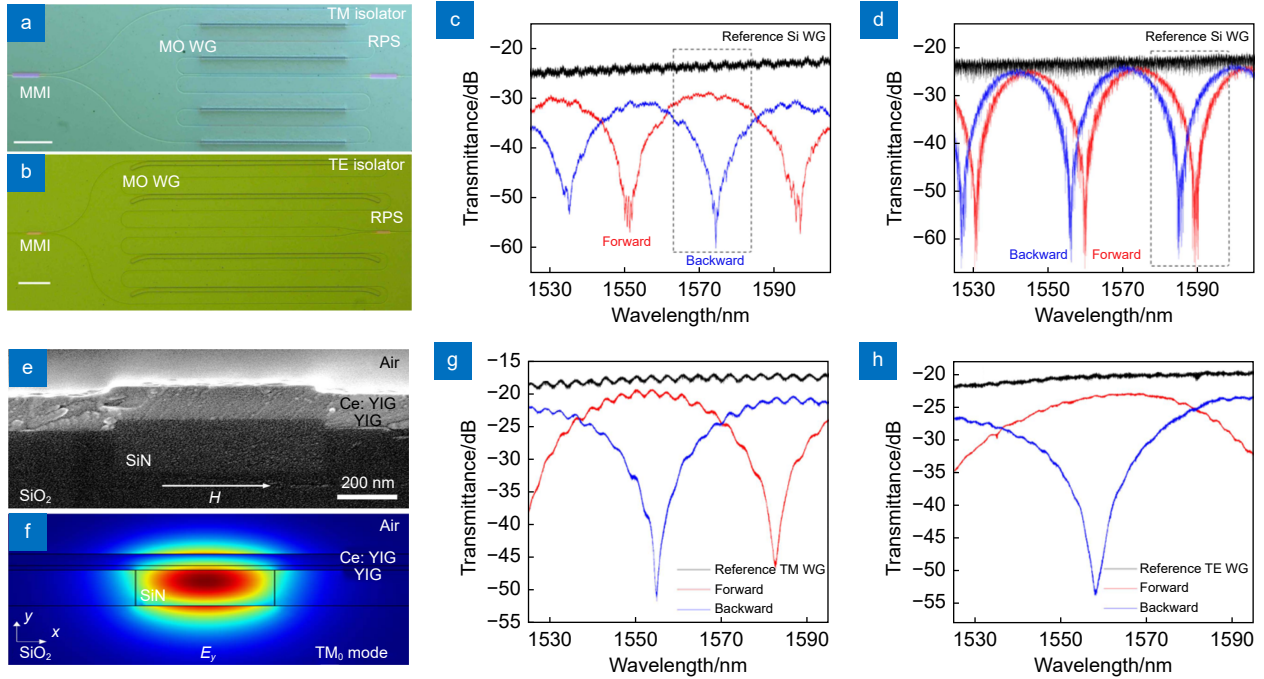


图 6 沉积技术制备 MO-MZI 隔离器^[32,40]。(a) TM 和 (b) TE 隔离器的光学显微镜和扫描电镜图像, 标尺为 100 μm ; (c) TM 和 (d) TE 模式隔离器的透射光谱; (e) 制备的 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{MO}$ 波导截面的 SEM 图像; (f) 模拟 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{MO}$ 波导基模 TM 的 E_y 场分布; (g) TM 和 (h) TE 模式隔离器的透射光谱

Fig. 6 MO-MZI isolator fabricated by deposition technology^[32,40]. Optical microscope and scanning electron microscope (SEM) images of (a) TM and (b) TE isolators, respectively, with a scale bar of 100 μm ; Transmission spectra of (c) TM and (d) TE mode isolators, respectively; (e) SEM image of the cross-section of the fabricated $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{MO}$ waveguide; (f) Simulation of the E_y field distribution of the fundamental TM mode in the $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{MO}$ waveguide; Transmission spectra of (g) TM and (h) TE mode isolators, respectively

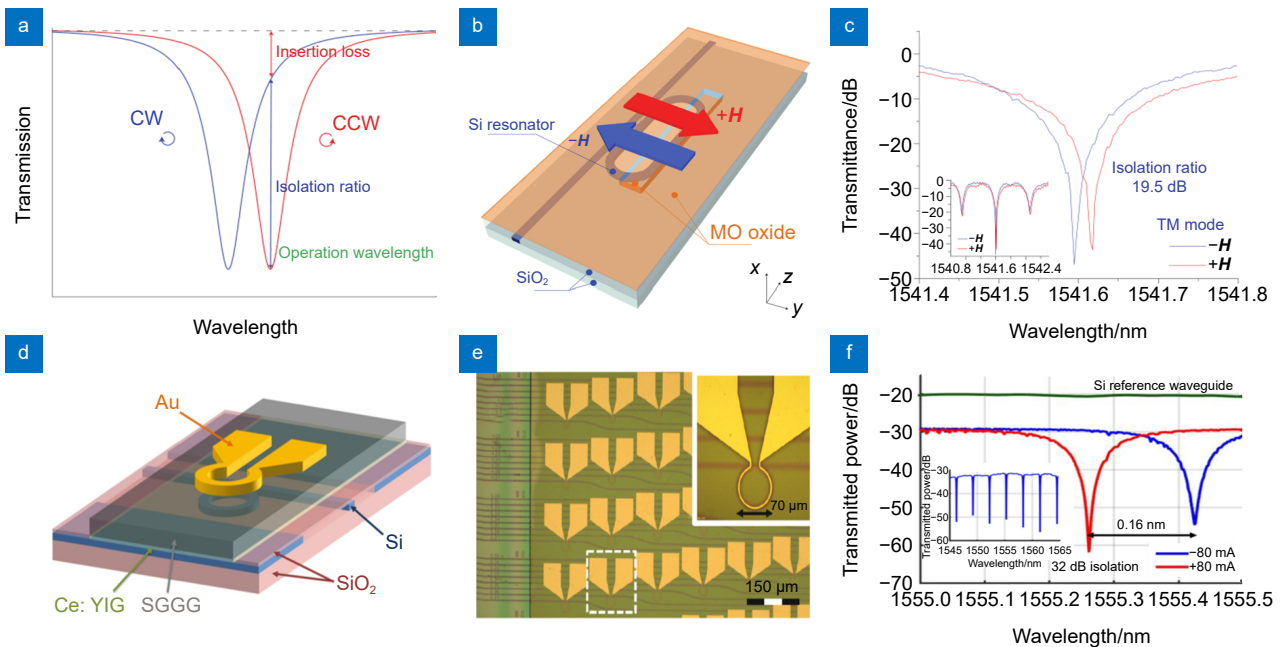


图 7 MO-MR 隔离器^[8,33]。(a) MO-MR 光隔离的工作原理; (b) 非互易光谐振腔结构示意图; (c) TM 模式透射光谱; (d) 隔离器装置透视图; (e) 片上隔离器装置显微镜图像; (f) TM 模式透射光谱

Fig. 7 MO-MR isolator^[8,33]. (a) Working principle of MO-MR optical isolation; (b) Schematic diagram of the non-reciprocal optical resonator structure; (c) Transmission spectra for the TM mode; (d) Perspective view of the isolator device; (e) Microscope image of the on-chip isolator device; (f) Transmission spectra for the TM mode

别为图 7(d, e)。在 1555 nm 波长处, 他们首先测得 TM 模式隔离器的隔离比为 32 dB(图 7(f)), 插入损耗为 2.3 dB。此外, 通过在波导的两端引入 PR, 制备了 TE 模式 MO-MR 隔离器, 测得其隔离比为 25 dB, 插入损耗为 6.5 dB^[42]。

Du 等^[34]在 2018 年提出了一种具有高隔离比的 MO-MR 隔离器, 图 8(a, b) 分别为装置原理图和显微镜图像, 在 1560.1 nm 波长处, TM 偏振光的隔离比高达 40 dB, 插入损耗为 3 dB, 如图 8(c) 所示。为了降低插入损耗, 严巍等^[40]报道了一种基于标准硅光子制造工艺的 TM 模式 Si_3N_4 /MO-MR 隔离器, 其光学显微镜图像如图 8(d) 所示, 由于 Si_3N_4 波导固有的低传输损耗, 该器件在 1570.3 nm 波长处实现了 1 dB 的插入损耗和 28 dB 的隔离度, 如图 8(e) 所示。通过进一步优化微环结构, 在 1579.25 nm 波长处插入损耗可达到 0.5 dB。

基于 MR 结构的磁光隔离器具有高隔离度和低插入损耗的优势, 相较于 MZI 结构尺寸更小, 适用于高密度集成光子电路的应用。然而, MR 谐振结构导致其带宽较窄, 且谐振频率对温度变化敏感, 容易漂移, 因此需要额外的热调控措施来稳定工作波长^[43]。

随着微纳加工工艺技术的提高, 可以进一步提升基于 MR 结构的磁光隔离器的工作性能。

3.3 磁光 MMI 结构

基于多模干涉仪 (MMI) 结构的磁光隔离器的概念首次于 2000 年由 Zhuromskyy 等提出^[44]。MMI 中的入射光会激发多个模式, 这些模式的干涉会在一定距离处形成自成像, 由于磁光效应, 正向和反向传播的模式波数会发生非对称变化, 成像距离产生差异。通过调整 MMI 波导的长度, 使得正向传播光在输出端形成清晰的自成像, 而反向传播光的破坏性干涉导致成像模糊, 从而实现光隔离。

2005 年, Yang 等^[9]使用晶圆键合技术在 InP 基底上制造了 Ce: YIG/InGaAsP/MMI 隔离器。由于键合界面的不理想, 实验结果显示隔离比仅为 2.9 dB。2016 年, Shui 等^[35]提出了一种基于 TM₀ 和 TM₁ 模式的硅基 TM 模式 MMI 磁光隔离器, 其结构原理如图 9(a) 所示。由于非互易相移效应, 这两种模式在正向和反向传播光中表现出 $2m\pi$ 和 $(2m+1)\pi$ (m 为整数) 的相位差, 反向光与正向光干涉相消实现光隔离。模拟结果表明, 310.42 μm 长的器件实现了 0.817 dB 的插入损耗和 1.6 nm 的 20 dB 隔离带宽。Yamaguchi 等^[36]

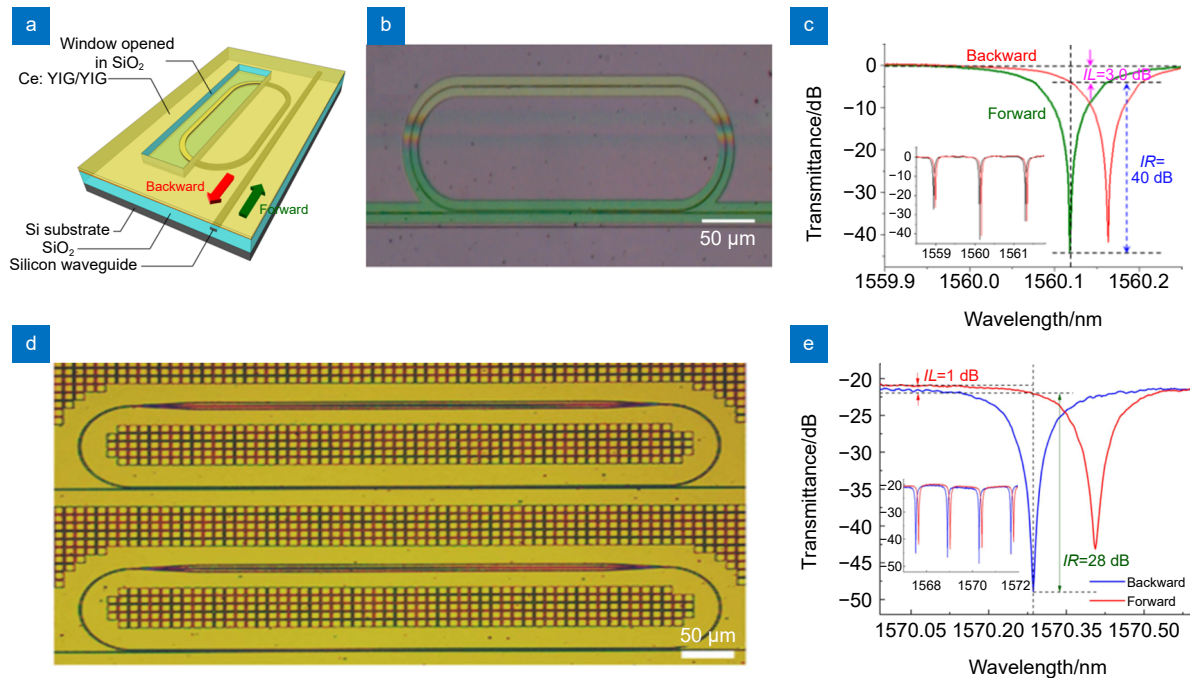


图 8 MO-MR 隔离器^[34,40]。(a) 非互易光谐振腔结构示意图; (b) MO-MR 隔离器的俯视图光学显微镜图; (c) 隔离器的透射光谱; (d) 基于 Si_3N_4 赛道谐振腔的 TM 模式光隔离器的光学显微镜图像; (e) 隔离器的透射光谱

Fig. 8 MO-MR isolator^[34,40]. (a) Schematic diagram of a non-reciprocal optical resonator; (b) Top-view optical micrograph of an MO-MR isolator; (c) Transmission spectrum of the isolator; (d) Optical microscope image of a TM-mode optical isolator based on Si_3N_4 waveguide resonators; (e) Transmission spectrum of the isolator

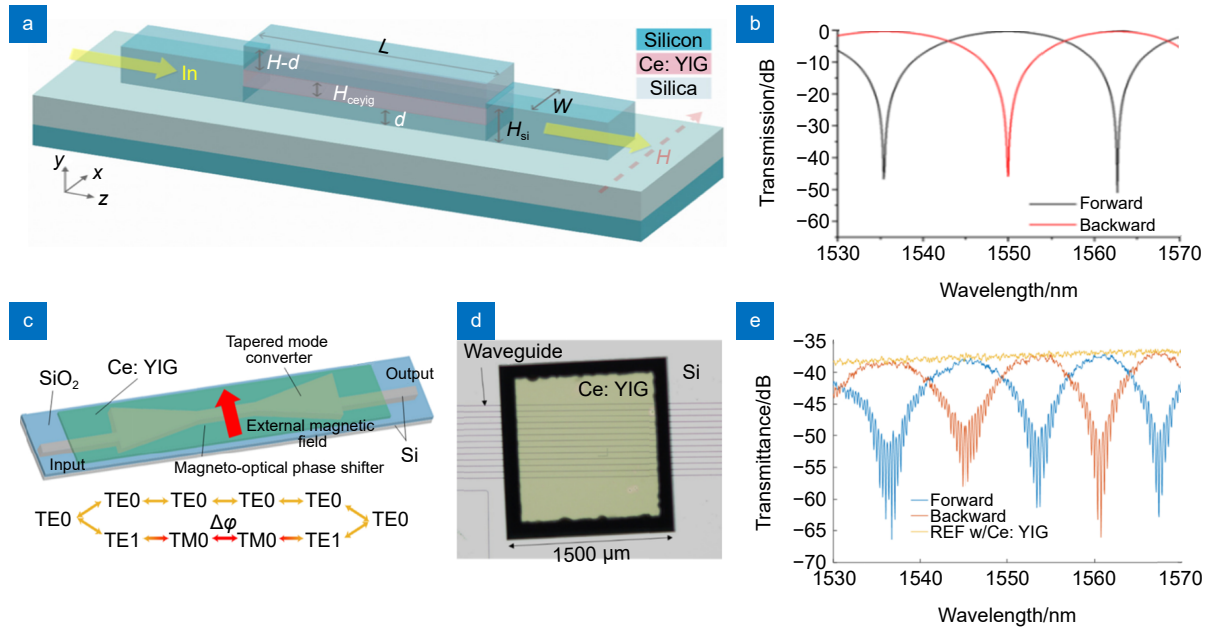


图 9 MO-MMI 隔离器^[35-36]。(a) SOI/MMI 磁光隔离器结构原理图；(b) 隔离器的透射光谱；(c) 基于 TE 模式的 MO-MMI 隔离器示意图；(d) MO-MMI 隔离器的俯视光学显微图；(e) 隔离器的透射光谱

Fig. 9 MO-MMI isolator^[35-36]. (a) Schematic diagram of SOI/MMI magneto-optical isolator structure; (b) Transmission spectra of the isolator; (c) Schematic diagram of MO-MMI isolator based on TE mode; (d) Top-view optical micrograph of MO-MMI isolator; (e) Transmission spectra of the isolator

于 2018 年展示了一种基于 MMI 结构的 TE 模式磁光隔离器，其结构原理如图 9(c) 所示。输入的 TE0 模式激发了 TE0 和 TE1 模式。通过基于模式演化的 PR，将 TE1 模式转换为 TM0 模式。由于非互易相移效应，Ce: YIG 薄膜在正向和反向传播中对 TM0 模式引入 π 相位差。再将其转换回 TE1 模式后，TE0 和 TE1 模式在正向和反向传播方向上分别产生相长或相消干涉，实现光隔离。该器件长度大小为 1.5 mm，如图 9(d) 所示，在 1561 nm 波长处显示了 16 dB 的隔离比和 3.4 dB 的插入损耗。

基于 MMI 结构的磁光隔离器具有结构简单、隔离带宽宽和插入损耗低的优点，但由于不同模式的吸收损耗差异，MMI 结构的隔离比受到限制；相比于 MR 结构，MMI 结构的尺寸较大；在实现非互易传输时，需要精确控制不同模式之间的干涉，增加了设计和制造的复杂性。基于 MMI 结构的磁光隔离器目前主要停留在模拟仿真阶段，实际制造的器件性能与 MZI 结构和 MR 结构的磁光隔离器相比还有较大差距。

3.4 磁光隔离器所面临的困境

表 1 汇总了基于磁光效应的片上集成光隔离器的工作性能、集成平台及其结构特征。如前所述，总结

片上集成磁光隔离器存在的问题有：1) 需要外加磁场使材料磁化完全饱和，实现最佳的非互易相移，使用传统的大块永磁铁会增加集成装置的体积，通过在波导上方制造金属微线圈集成电磁铁是目前解决方法之一^[42]；2) 磁光材料的吸收损耗较大，磁光材料和硅基材料的折射率不匹配导致的模场突变，使得磁光隔离器的插入损耗较大；3) 由于制造工艺的误差，光波导的长度加工误差使得工作中心波长发生偏移；4) 磁光材料的非互易相移效应在特定波长范围内最为显著，超出该范围性能下降明显，限制了磁光隔离器工作带宽的增大，尽管基于 MMI 结构的一些磁光隔离器能达到较大的带宽，但仅停留在仿真阶段；5) 器件性能受温度变化影响，需要额外的温控措施以稳定工作波长^[45]。针对上述问题，铌酸锂 (LiNbO₃) 平台或许能够发挥较大的优势。LiNbO₃ 和磁光材料的折射率相近，可以避免不必要的模式突变和损耗，以达到降低插入损耗的目的。其次，由于 LiNbO₃ 具有较高的电光系数，可以通过外加电场的方式来调控光波导的有效折射率，从而调控工作中心波长，但外加电场也会引入额外功耗。

4 声光隔离器

声光调制器 (Acousto-optic modulators, AOMs) 是

表 1 基于磁光效应的片上集成光隔离器性能比较

Table 1 Performance comparison of on-chip integrated optical isolators based on magneto-optic effects

Device type	Year	Isolation ratio/dB	Insertion loss/dB	Isolation bandwidth/nm	Polarization	Platform	Structure	Ref
MO-MZI	2000	4.90@1550 nm	—	—	TM	GaInAsP	Waveguide	[46]
	2004	9.90@1550 nm	25.0	—	TM	HfO ₂	Waveguide	[47]
	2008	21.0@1559 nm	8.00	10@10 dB	TM	Si	Waveguide	[48]
	2012	25.0@1495 nm	9.70	0.40@20 dB	TM	Si	Waveguide	[38]
	2013	32.0@1540 nm	22.0	0.50@21 dB	TE	Si	Waveguide	[39]
	2014	30.0@1548 nm	13.0	1.0@20 dB	TM	Si	Waveguide	[7]
	2016	26.7@1553 nm	33.4	—	TE	Si	Waveguide	[31]
	2017	17.9@1562 nm	10.0	2.0@10 dB	TE	a-Si:H	Waveguide	[49]
	2017	29.0@1523 nm	9.00	18@20 dB	TM	Si	Waveguide	[50]
	2019	30.0@1574 nm	5.00	9.0@10 dB	TM	Si	Waveguide	[32]
		30.0@1588 nm	9.00	2.0@10 dB	TE	Si	Waveguide	
	2020	32.0@1555 nm	2.30	4.0@20 dB	TM	Si ₃ N ₄	Waveguide	[40]
		30.0@1558 nm	3.00	5.0@20 dB	TE	Si ₃ N ₄	Waveguide	
	2024	50.0@1550 nm	0.687	72@30 dB	TM	InP	Waveguide	[21]
MO-MR	2011	19.5@1541.6 nm	18.8	0.040@10 dB	TM	Si	Ring	[8]
	2011	9.00@1550 nm	—	0.040@5 dB	TM	Si	Ring	[41]
	2016	32.0@1555 nm	2.30	0.60@20 dB	TM	Si	Ring	[33]
	2017	11.0@1558 nm	9.70	0.16@5 dB	TM	Si	Ring	[51]
	2017	32.0@1555 nm	—	3.0@20 dB	TM	Si	Ring	[43]
	2018	25.0@1550 nm	6.50	40@20 dB	TE	Si	Ring	[42]
	2018	40.0@1560.1 nm	3.00	—	TM	GeSbSe	Ring	[34]
	2019	20.0@1584.8 nm	11.5	—	TE	Si ₃ N ₄	Ring	[32]
	2020	28.0@1570.3 nm	1.00	—	TM	Si ₃ N ₄	Ring	[40]
MO-MMI	2005	2.9@1550 nm	—	—	TM	InGaAsP	Waveguide	[9]
	2016	45@1550 nm	0.800	1.60@20 dB	TM	Si	Waveguide	[35]
	2018	16@1561 nm	3.40	—	TE	Si	Waveguide	[36]
	2021	15@1537.3 nm	5.00	2.00@10 dB	TE	Si	Waveguide	[52]
	2024	45@1550 nm	2.59	53.5@35 dB	TM	GaAs	Waveguide	[53]
		45@1550 nm	2.25	70.0@35 dB	TM	GaAs	Waveguide	

集成光子学中的重要器件^[54-56]。基于声光效应的 AOMs 将声波与光波导介质相结合, 具有低损耗、低功耗、高调制效率和高工作频率等特点^[57]。先前的研究已经证明了使用表面声波 (surface acoustic wave, SAW) 谐振器^[54]、体声波 (bulk acoustic wave, BAW) 谐振器^[55]和 λ 波谐振器 (lamb wave resonators, LWR)^[56]进行声光调制的有效性。LiNbO₃和氮化铝 (AlN) 具有大压电系数、高光弹性常数、宽透明窗口等优点, 是实现 PICs 声光调制的新兴材料。然而, 当时的互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 工艺加工低损耗、高性

能的薄膜 LiNbO₃ 难度大, 而 AlN 薄膜具有与 CMOS 兼容和异质结构集成的优势, 首先被应用于实现片上光子-声子相互作用^[58]。在此基础上, 声光效应不仅在调制方面显示出显著优势, 还被广泛研究用于实现光隔离。2018 年, Sohn 等^[59]首次使用声子泵浦制造出在千兆赫兹带宽上实现时间反演对称破缺的集成非互易纳米光子器件。在该器件中, 谐振腔同时支持两个不同的模式, TE₁₀(ω_1, k_1)和 TE₀₀(ω_2, k_2)(正常情况下, TE₀₀模式的动量大于 TE₁₀模式的动量, 即 $k_2 > k_1$)。声子泵浦(Ω, q)需要满足相位匹配条件 ($\Omega = \omega_2 - \omega_1, q = k_2 - k_1$), 才能有效地调制耦合两个波

导模式^[60], 其原理如图 10(a) 所示。模式转换只能在一个传播方向上进行, 在相反的方向上, 波导模式具有相反的波数($-k_1$, $-k_2$), 因此它们不满足相位匹配条件。如图 10(c) 所示, 满足相位匹配条件时, 谐振腔内只有一个方向上的光被吸收, 达到隔离的目的。实验表明, 该器件具有 15 dB 的隔离度和超过 1 GHz 的带宽。该器件作为移频声光隔离器, 其声子-光子相互作用区域和提供声波的叉指式换能器 (interdigital transducer, IDT) 的器件结构如图 10(b) 所示。

这种方法称为时空调制, 即通过主动调制耦合两种光模式并规定相位匹配条件, 打破了互易性, 几乎不受限于材料的选择。同时, 这种方法与低损耗的 PICs (例如, AlN 和 Si_3N_4) 兼容, 但受限于产生表面声波的叉指式换能器的调制效率和功率处理能力。Sohn 等^[61] 于 2019 年提出了一种新型的交叉指型叉指换能器 (cross-finger interdigital transducer, CFIDT), 其示意图如图 11(a) 所示。不同于 IDT 一旦制成就固定

了非互易性的方向, 它允许非互易效应的动态方向可重构性, 非互易的方向和大小只需通过调整射频刺激的时间相位来控制。该器件实现了 8 dB 的隔离度和 1.1 GHz 的 3 dB 带宽。随着工艺水平的提升, Sohn 使用 LiNbO_3 作为赛道型谐振腔的波导材料进一步增强声光相互作用, 利用其高压电系数的优势有效地驱动表面声波, 其声光相互作用区域的横截面如图 11(b) 所示。此外, LiNbO_3 可以实现高 Q 的赛道型谐振腔, 提供低插入损耗和高隔离度的光学隔离器性能。该器件通过声子介导的光子 Autler-Townes 分裂, 实现了高达 39.3 dB 的隔离度、0.65 dB 的插入损耗和 200 MHz 的 10 dB 带宽^[10], 如图 11(c) 所示。除了 LiNbO_3 波导, 2020 年, Tian 等^[62] 首次在 Si_3N_4 上实现了基于 AOMs 的片上集成光学隔离器, 如图 11(d) 所示。三个 AlN 压电驱动器沿 Si_3N_4 微环谐振腔等距放置, 产生高谐波体声共振 (high-overtone bulk acoustic resonances, HBAR), 通过精确调整这些驱动

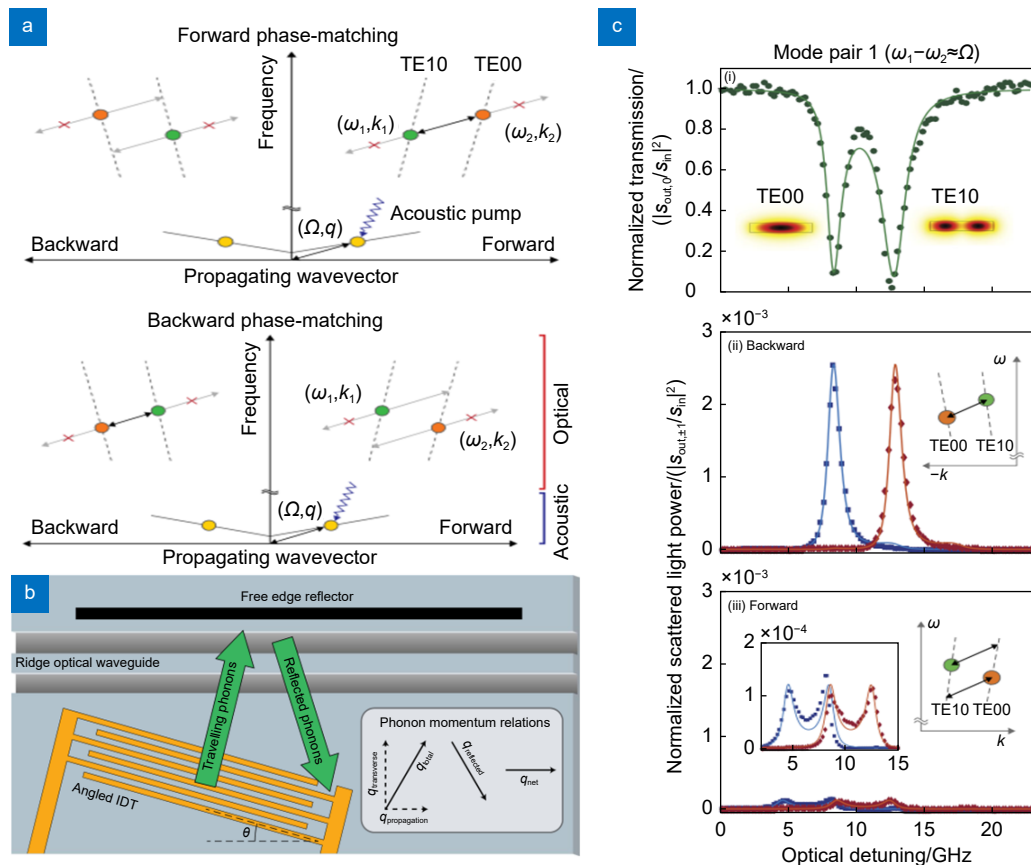


图 10 声光隔离器^[59]。(a) 用频率-动量空间表示相位匹配条件; (b) 声子-光子相互作用区域示意图; (c) 完美的相位匹配条件下的正向反向透射光谱

Fig. 10 Acousto-optic isolator^[59]. (a) Representation of phase matching conditions in frequency-momentum space; (b) Schematic diagram of the phonon-photon interaction region; (c) Forward and backward transmission spectra under perfect phase matching conditions

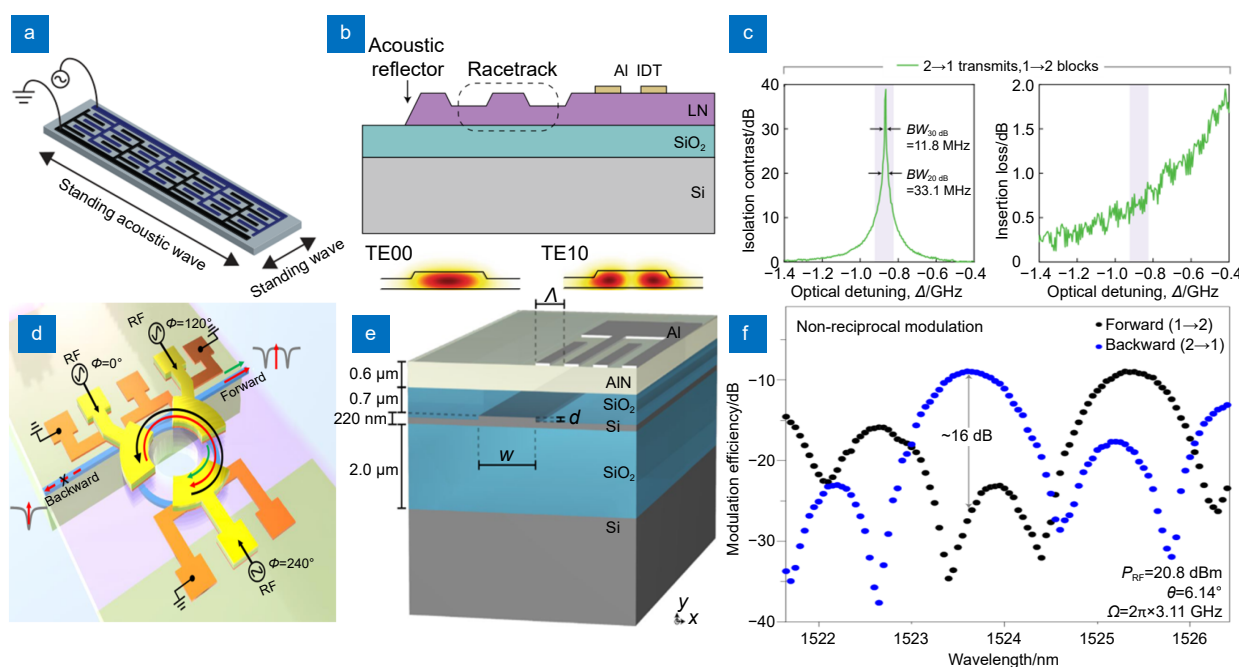


图 11 声光隔离器^[10-12,61]。(a) CFIDT 示意图；(b) 声光相互作用区域的横截面；(c) 隔离度和插入损耗随频率失谐量的变化图；(d) 隔离器装置示意图；(e) 隔离器装置横截面图；(f) 隔离器的透射光谱

Fig. 11 Acousto-optic isolator^[10-12,61]. (a) Schematic diagram of the CFIDT; (b) Cross-section view of the acousto-optic interaction region; (c) Variation graph of isolation and insertion loss with frequency detuning; (d) Schematic diagram of the isolator device; (e) Cross-sectional view of the isolator device; (f) Transmission spectra of the isolator

器之间的相对驱动相位, HBAR 模式产生有效的旋转声波, 在动量偏置方向上耦合两个光学模式。该器件在 20 dBm 射频功率下实现了最大隔离比 (10 dB), 隔离带宽达到了 700 MHz^[12]。在临界耦合状态下设计和操作 Si_3N_4 微环谐振腔, 可以进一步提高器件性能。由于 Si_3N_4 波导的固有低损耗, 实现了极低的插入损耗, 仅为 0.1 dB。

在所有上述器件中, 微环谐振腔的介入导致隔离器线宽受限于微环谐振腔的固有线宽。Kittlaus 等^[11]利用电驱动表面声波在硅波导内进行直接声光调制, 突破谐振腔线宽的限制, 其装置横截面如图 11(e) 所示。该器件在中心工作波长下实现了 16 dB 的隔离度, 同时插入损耗小于 0.6 dB, 在 0.8 nm (100 GHz) 的宽带范围内仍能保持 12 dB 的光隔离 (图 11(f)), 显著提升了其在高速光通信中的应用潜力。

声光隔离器的优异性能为非磁片上隔离器的集成提供了一条新的技术路线。与磁光隔离器相比, 声光隔离器不严格依赖于磁性材料, 且通过增强声光耦合、优化谐振腔 Q 值等方式可进一步提升性能。然而, 声光隔离器的隔离度通常较低, 且其带宽受到微环谐振腔光学模式线宽的限制: 光学模式的线宽越窄, 满

足相位匹配条件的频率范围越小, 导致目前实现的声光隔离器隔离带宽大多局限在 MHz 范围。表 2 汇总了基于声光效应的片上集成光隔离器的工作性能、集成平台及其结构特征。未来, 声光隔离器的发展应聚焦于提高隔离度和扩展隔离带宽。由于谐振腔的 Q 值对性能有重要影响, 高 Q 值利于提高隔离度, 低 Q 值利于扩大带宽, 在实际应用中需根据具体需求进行权衡。此外, 通过宽带声光耦合、谐振腔阵列设计以及引入超快调制技术, 有望将声光隔离器的带宽扩展至 GHz 甚至 THz 范围, 从而满足高速光通信和量子信息处理的需求。

5 光电隔离器

基于电光效应的波导器件具有克服声光隔离器限制的巨大潜力, 波导材料的折射率在电场的作用下的产生变化, 从而影响了波导内光波的相位。 LiNbO_3 材料由于其卓越的电光性质^[63], 被广泛应用于电光波导器件中。2005 年, Bandare 等^[64]通过实验证明, 当使用两个相互正交的射频 (radio frequency, RF) 信号驱动两个行波马赫-曾德尔调制器 (Mach-Zehnder modulator, MZM) 产生单侧带调制时, 可以实现 30 dB

表 2 基于声光效应的片上集成光隔离器性能比较

Table 2 Performance comparison of on-chip integrated optical isolators based on acousto-optic effects

Device type	Year	Isolation ratio/dB	Insertion loss/dB	Isolation bandwidth/nm	Polarization	Platform	Structure	Ref
AO	2018	15.0@1550 nm	—	0.0088@3 dB	TE	AlN	Ring	[59]
	2019	8.00@1540 nm	—	0.0080@3 dB	TE	AlN	Ring	[61]
	2021	12.0@1523.7 nm	0.6	0.80@16 dB	TE	Si	Waveguide	[11]
	2021	39.3@1538 nm	1	0.0016@10 dB	TE	LiNbO ₃	Ring	[10]
	2021	10.0@1545.55 nm	0.1	0.0056@8 dB	TE	Si ₃ N ₄	Ring	[12]

的宽带光隔离。然而, 这种配置具有 6 dB 的本征损耗, 并且至少需要两个正交的 RF 驱动信号, 功耗高且不易控制。随后, Dong^[13] 提出并实验证明了单行波 MZM 可以有效地作为光隔离器, 对正向传输的光没有残留调制, 装置原理如图 12(a) 所示。光的相位变化为

$$\varphi(t) = \frac{\pi}{LV_{\pi}} \int_{z=0}^L V \left(t - \frac{L}{c_0} \cdot \frac{1 \pm 1}{2} + \left(\pm \frac{1}{c_0} - \frac{1}{c_e} \right) z \right) dz, \quad (7)$$

式中: +和-分别代表电信号与光信号的反向传输和共传输; L 为电极长度; c_0 为光波群速度; c_e 为 RF 信号相速度; V_{π} 为半波电压; $V(t)$ 为随时间变化的输入电压。该方法通过合理设置方波信号的周期 ($2nT = L/c_0 + L/c_e$) (n 为整数) 和幅值 V , 并使波导中的光波群速度与电极中的 RF 信号相速度相匹配 ($c_0 = c_e$), 正向传播的光波与 RF 信号传输方向相反,

光波相位变化为 0, 反射光波与 RF 信号共传播, 光波相位变化与 RF 信号的电压值有关 ($\varphi(t) = \pi(V/V_{\pi})(t - (L/c_0))$), 仿真模拟如图 12(c) 所示。最终, 在 11.3 THz 的带宽上实现了大于 12.5 dB 的隔离, 插入损耗为 5.5 dB。

该器件的隔离度主要受到所施加方波的高低电压之间切换产生的过渡尖峰的限制, 如果切换时间短于 MZM 的响应时间, 则可以大大减少尖峰。为了达到更好的隔离效果, 2023 年 Yu 等^[14] 利用单频正弦信号替换方波信号, 在 LiNbO₃ 薄膜上建立了电光隔离器, 如图 13(a) 所示。光波相位变化变为

$$\varphi(t) = \frac{V_{pk}\pi}{LV_{\pi}} \int_{z=0}^L \exp\left(-\frac{\alpha z}{2}\right) \cos\left(2\pi f_{RF}\left(\frac{z}{c}n_0 \pm \frac{z}{c}n_e - t\right)\right) dz, \quad (8)$$

式中: V_{pk} 为峰值电压; α 为 RF 信号衰减常数; c 为

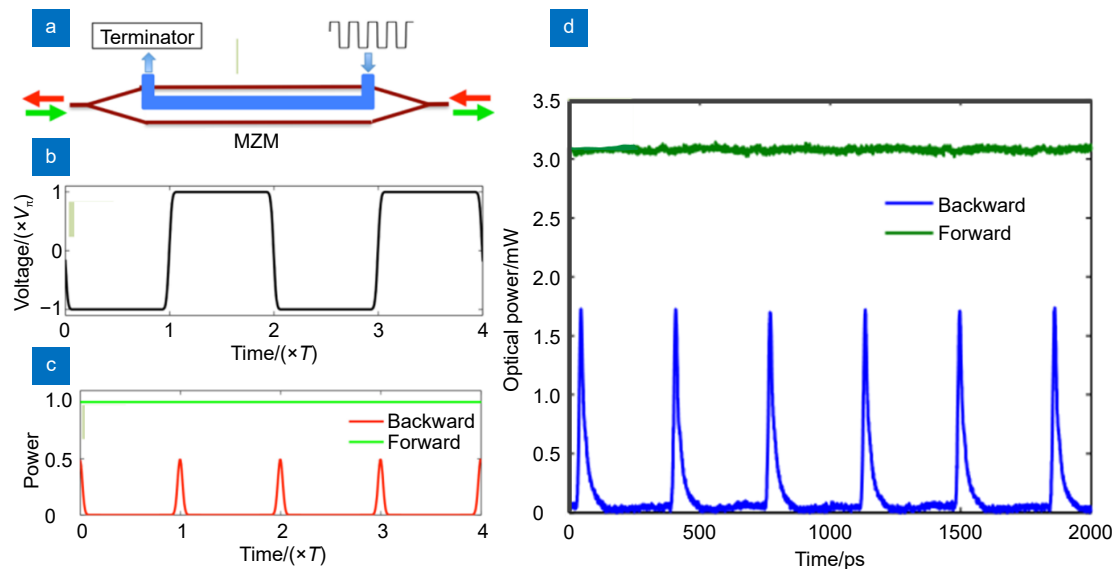


图 12 电光隔离器^[13]. (a) 基于 MZM 的隔离器工作原理图; (b) 方波电压信号; (c) 拟用 (b) 所示电压调制 MZM 时的正向和反向传输; (d) 在 2.75 GHz 驱动频率下的正反向传输

Fig. 12 Electro-optic isolator^[13]. (a) Working principle diagram of the MZM-based isolator; (b) Square-wave voltage signal; (c) Forward and backward transmission when modulating the MZM with the voltage shown in Fig. (b); (d) Forward and backward transmission under the driving frequency of 2.75 GHz

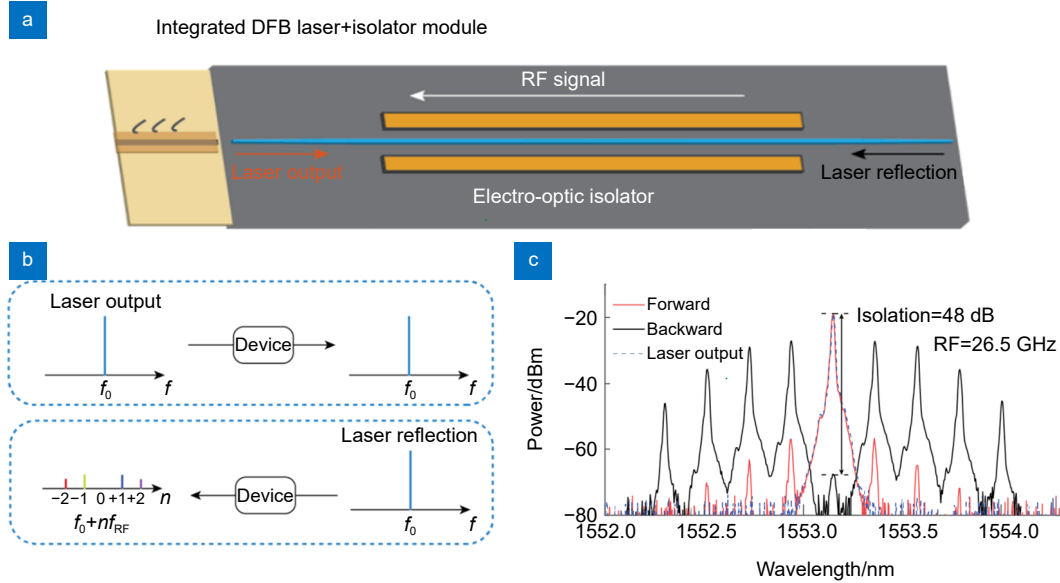


图 13 电光隔离器^[14]。(a) 隔离器装置示意图；(b) 隔离器原理的频域图解；(c) 隔离器的透射光谱
Fig. 13 Electro-optic isolator^[14]. (a) Schematic of the isolator; (b) The illustration of the isolator in frequency domain; (c) Transmission spectra of the isolator

真空光速； n_0 为光波群折射率； n_e 为 RF 介质有效折射率。当 RF 信号频率 $f_{RF} = mc / (2Ln_0)$ ，RF 信号衰减常数 $\alpha = 0$ 。将光场按照贝塞尔函数展开，得到反射光波为

$$E = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \exp(i(2\pi f_0 t + 2n\pi f_{RF} + \varphi_0)), \quad (9)$$

式中：调制深度 $\beta = \pi (V_{pk}/V_{\pi}) = 0.765\pi$ ，满足 $J_0(\beta) = 0$ (J_0 为 0 阶贝塞尔函数) 时，光场原有的频率分量 f_0 强度为 0，达到隔离的目的，其频域图解如图 13(b) 所示。可看出光场不仅包括原有的频率分量 f_0 ，同时还携带各个阶次的谐波分量 $f_0 \pm n f_{RF}$ 。

依据此原理，Yu 等^[14]在薄膜铌酸锂 (thin film Lithium Niobate, TFLN) 上实现了基于 EO 的非互易行波隔离器，在 21 dBm 射频功率下使用单频微波驱动器，实现了 48 dB 的最大光隔离和 0.5 dB 的片内插入损耗，在 1510 nm 至 1630 nm 的可调谐波长范围内，隔离比大于 37 dB，为现今性能最好的集成光学隔离器。然而，使用行波调制仍然需要满足严格的相位匹配条件。

Shah 等^[15]在 TFLN 上，展示了基于驻波调制的串联结构的集成光隔离器，其原理如图 14(a) 所示。由于不需要严格的相位匹配，隔离器的宽带可调性仅受调制器波长范围的限制，可跨越可见光和近红外光谱，实现超过 15 dB 的片上隔离，低于 0.5 dB 的插入损耗，同时实现高达 100 nm 的 10 dB 隔离带宽，不

仅如此，该隔离器还可以实现双波段隔离，如图 14(c) 所示。虽然相比于文献 [14] 的工作隔离度有所下降，但该隔离器提供的灵活性和可调性使在 TFLN 上实现宽带隔离成为可能。

电光隔离器利用电光效应，通过施加电场精确控制材料的折射率，进而实现对光信号相位的精确调制。这种精确的相位控制有助于在一个方向上保持光信号的传输，同时在相反方向上有效地抑制光信号，从而实现高隔离度。表 3 汇总了基于电光效应的片上集成光隔离器的工作性能、集成平台及其结构特征。电光隔离器的优势有：1) 由于电光效应的固有特性，电光隔离器能够在宽频率范围内工作，突破了声光和磁光隔离器在带宽上的限制；2) 不需要依赖磁性材料和外部磁场，简化了器件设计，避免了磁光材料难以集成的技术难题；3) 电光隔离器利用电场调控相对简单且响应速度快，可以实现快速动态调制，适合高频应用；4) 电光隔离器体积小，且 LiNbO_3 等电光材料与现有的 CMOS 工艺兼容，易于集成到现有的光子集成电路中，提高了系统的集成度和制造效率。但电光隔离器也存在着劣势，其通常需要较高的驱动电压，导致功耗较高，高功耗可能引发散热问题，需要有效的热管理措施，这在大规模集成电路中可能成为瓶颈。另外，电光隔离器的制造过程复杂，特别是高精度的电极和波导结构，需要先进的制造技术和设备。未来的发展将聚焦于降低功耗、提升集成度和优化带宽与损耗，通过材料创新、器件优化和应用扩展，推动电光

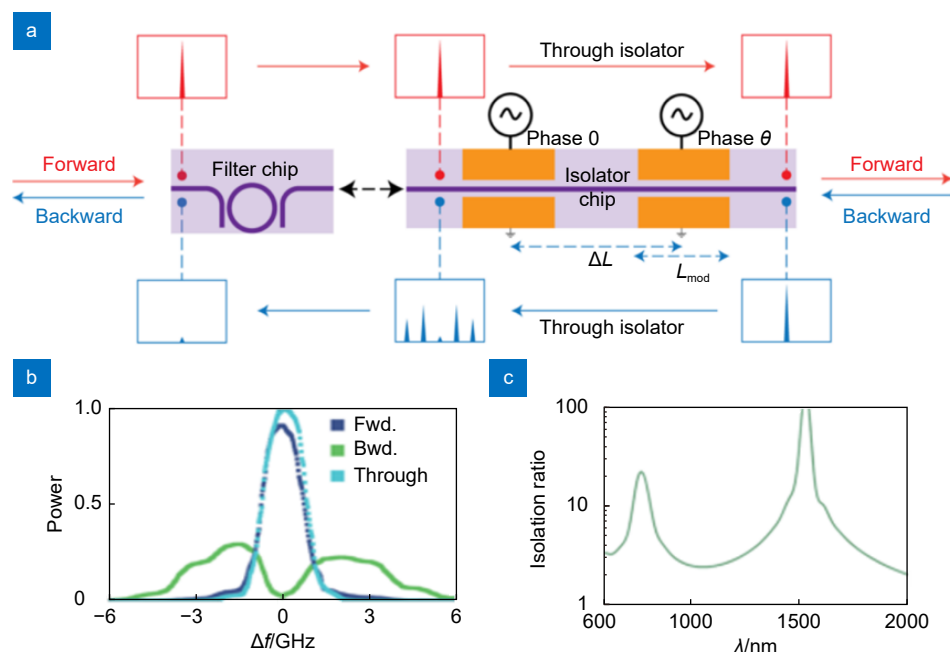


图 14 电光隔离器^[15]。(a) 电光隔离器原理图；(b) 隔离器正向和反向的透射光谱；
(c) 针对不同波长的指定参数计算出的隔离比

Fig. 14 Electro-optic isolator^[15]. (a) Schematic of the electro-optic isolator; (b) Transmission spectra of the isolator in forward and backward directions; (c) Calculated isolation ratio for specified parameters at different wavelengths

表 3 基于电光效应的片上集成光隔离器性能比较

Table 3 Performance comparison of on-chip integrated optical isolators based on electro-optic effects

Device type	Year	Isolation ratio/dB	Insertion loss/dB	Isolation bandwidth/nm	Polarization	Platform	Structure	Ref
EO	2005	30.0@1550 nm	8.0	—	—	GaAs/AlGaAs	Waveguide	[64]
	2015	12.5@1500 nm	5.5	90.0@12.5 dB	—	LiNbO ₃	Waveguide	[13]
	2016	—	5.3	90.0@7 dB	—	LiNbO ₃	Waveguide	[65]
	2021	13@1556 nm	18	0.0160@3 dB	—	Si	Ring	[66]
	2023	48.0@1553.2 nm	0.50	120@37 dB	TE	LiNbO ₃	Waveguide	[14]
	2023	15.0@1550 nm	0.50	100@10 dB	TE	LiNbO ₃	Waveguide	[15]

隔离器在光子集成电路中的广泛应用。

6 非线性光隔离器

洛伦兹互易性适用于任何具有对称介电常数和磁导率张量的线性时不变系统。非磁性光非互易性可以通过打破线性或时不变条件来实现。这一节综述了通过光学非线性效应(二阶 $\chi^{(2)}$ 和三阶 $\chi^{(3)}$ 非线性)来打破互易性的工作。

2013 年, Saha 等^[16]首次在硅纳米波导中利用布拉格散射(Bragg scattering, BS)四波混频(four wave mixing, FWM)来实现宽带硅片光隔离。当两个泵浦光和信号光在硅波导中共传播时,有效的相位匹配确保了信号波的能量传递到闲频光。在理想的条件下,闲频光的出现会导致信号光完全消光,随后通过滤波

器,滤除泵浦光和闲频光。相反,当泵浦光与信号光反向传播时,由于没有相位匹配,没有发生频率转换,从而使信号光未衰减地通过器件,其非互易原理如图 15(a, b)所示。通过实验测得,该装置隔离带宽为 8 nm (~1 THz),隔离度为 4 dB。同时,还使用高非线性光纤(highly nonlinear fiber, HLNF)进行基于 BS 的光隔离,隔离度大于 11 dB,验证了可以通过提高 BS 的效率来提高该装置的隔离度方法的可行性。

为了进一步提高隔离器的性能,可以使用非线性系数更高的材料。由于铌酸锂晶体具有相当高的非线性系数($d_{33}=30$ pm/V), Abdelsalam 等^[20]利用周期性极化薄膜铌酸锂(periodically poled Lithium Niobate, PPLN)波导作为二阶非线性元件,当满足相位匹配条件时,通过差频产生(different frequency generation,

DFG) 非线性频率转换过程产生闲频光, 并将其与外部滤波器相结合, 以实现高隔离比, 其原理如图 15(c) 所示。实验验证隔离器的工作范围从 1490 nm 覆盖到 1640 nm, 仅受所用设备带宽的限制, 并且对闲频光和信号光的隔离高达 18 dB。在信号波长上, 正向传播和反向传播的透射率之差为 40 dB。PPLN 器件自身的损耗约为 1 dB/cm。该方法不限于非线性 $\chi^{(2)}$, 也可以考虑三阶非线性 $\chi^{(3)}$ 过程, 如 FWM。

上述的方案都是在光波导中实现的, Bino 等^[67]从理论上预测了基于克尔非线性诱导的相反传播光波之间的非线性相互作用, 并在实验上证明了在非线性微谐振腔中, 通过顺时针和逆时针方向均匀泵浦光学微谐振腔, 可以观察到相反传播光波之间的自发对称性破缺, 其原理如图 16(a) 所示。

随后, 在 2017 年, Bino 等^[17]提出了一种基于克尔效应诱导的熔融硅微腔非互易隔离器, 其装置如图 16(b) 所示, 该装置具有简单、无源、可集成的关键优势。以足够大的功率向相反方向泵浦微腔会导致对称性破缺, 泵浦诱导分裂了顺时针和逆时针的共振频率, 当这种分裂足够大时, 使得光只在一个传播方向上选择性地共振。图 16(c) 说明, 当输入功率越高,

隔离器的隔离度越高, 并在实验中实现了大于 20 dB 的隔离度。

为了进一步实现片上集成的目的, White 等^[18]于 2023 年提出了一种集成的薄膜 Si_3N_4 环形谐振腔连续波隔离器, 其显微镜图像如图 16(d) 所示, 利用克尔效应打破了环形谐振腔中顺时针和逆时针模式之间的简并, 导致非互易传输。除了被隔离的激光, 不需要其他泵浦源。通过改变环形谐振腔的耦合, 调整器件的插入损耗和隔离度。如图 16(e) 所示, 在 90 mW 的功率下, 既可以实现隔离度为 23 dB, 插入损耗为 4.6 dB, 也可以实现隔离度为 17 dB, 插入损耗为 1.3 dB。

表 4 汇总了基于光学非线性效应的片上集成光隔离器的工作性能、集成平台及其结构特征。利用非线性效应的光隔离器与基于声光效应的隔离器相比, 可以实现宽带宽操作, 同时具有高度的灵活性, 通过调节输入光功率和相位实现动态调节, 适应不同的应用需求。隔离器件可以在 CMOS 兼容的平台上实现, 适用于大规模 PICs, 但基于非线性效应的光隔离器也存在着一些问题: 1) 与其它类型的隔离器相比, 隔离度不够高, 需要通过优化结构设计来提高隔离度; 2) 基于 FWM、DFG 等方式的隔离原理, 需要额外的

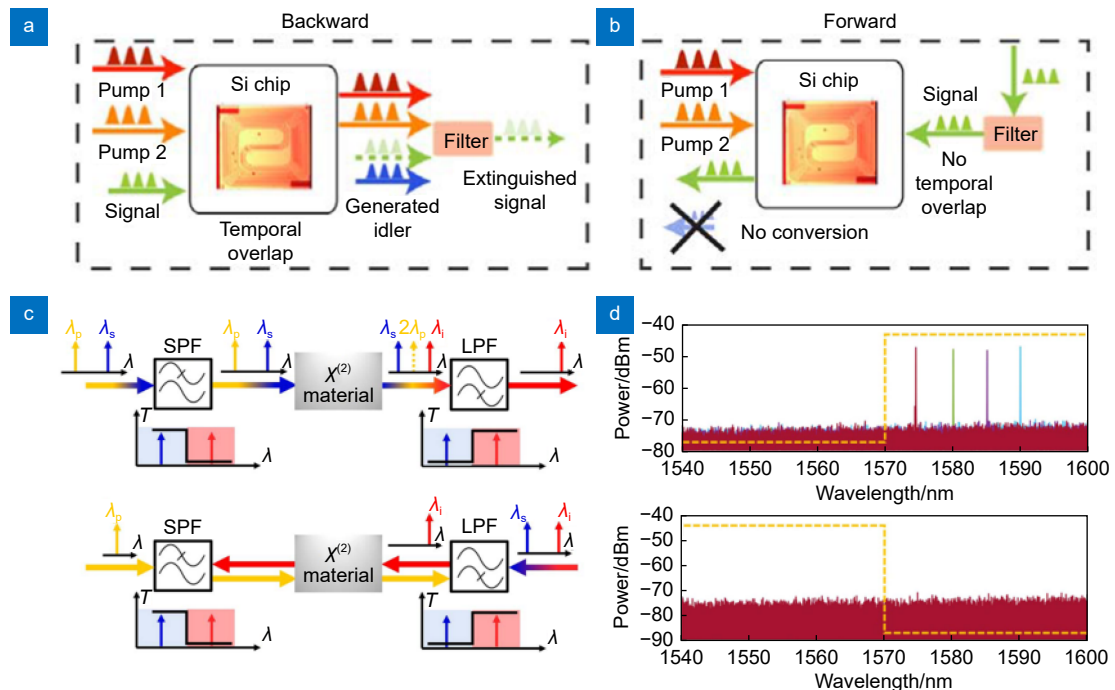


图 15 非线性光隔离器^[16,20]。(a) 正向传播的光通过布拉格散射进行光隔离的原理图; (b) 反向传播的情况; (c) 光隔离器原理图。SPF: 短通滤波器, LPF: 长通滤波器; (d) 隔离器的透射光谱图, 上图为正向传播, 下图为反向传播

Fig. 15 Nonlinear optical isolator^[16,20]. (a) Schematic diagram of light isolation through Bragg scattering for forward-propagating light; (b) Case of backward propagation light; (c) Schematic diagram of the optical isolator. SPF: short-pass filter, LPF: long-pass filter; (d) Transmission spectra of the isolator, with the upper plot for forward-propagating light and the lower plot for backward-propagating light

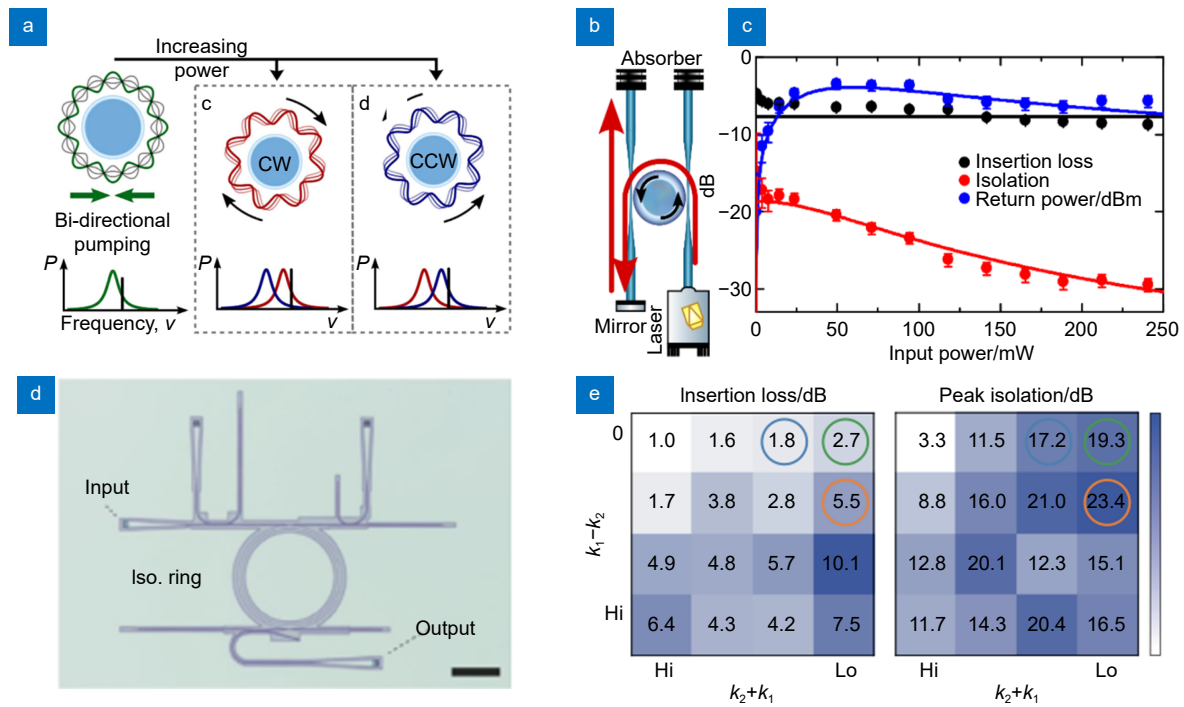


图 16 非线性光隔离器^[17-18,65]。(a) 微腔中产生自发对称性破缺的原理图；(b) 基于克尔效应诱导的熔融硅微腔非互易隔离器装置图；(c) 隔离器的特性与输入功率之间的函数关系图；(d) 基于 Si₃N₄ 隔离器的显微镜图像，标尺：100 μm；(e) 不同耦合率 κ_1 和 κ_2 下测量到的插入损耗和隔离峰值

Fig. 16 Nonlinear optical isolator^[17-18,65]. (a) Schematic of spontaneous symmetry breaking in a microcavity; (b) Device diagram of a nonreciprocal isolator based on Kerr effect-induced fused silica microring; (c) Graph of the isolator's characteristics as a function of input power; (d) Microscope image of a Si₃N₄ isolator, scale bar: 100 μm; (e) Measured insertion loss and isolation peak under different coupling rates κ_1 and κ_2

表 4 基于光学非线性效应的片上集成光隔离器性能比较

Table 4 Performance comparison of on-chip integrated optical isolators based on nonlinear optical effects

Device type	Year	Isolation ratio/dB	Insertion loss/dB	Isolation bandwidth/nm	Polarization	Platform	Structure	Ref
Kerr	2013	4.0@1582.3 nm	—	8.00@4 dB	—	Si	Waveguide	[16]
	2017	30@1550 nm	7.0	—	—	Fused silica	Ring	[17]
	2022	23@1550 nm	4.6	—	—	Si ₃ N ₄	Ring	[18]
		17@1550 nm	1.3	—	—	Si ₃ N ₄	Ring	
$\chi^{(2)}$	2020	40@1570 nm	6.6	150@18 dB	—	LiNbO ₃	Waveguide	[20]

泵浦源和滤波器，这不仅增加了装置整体的损耗，也提高了功耗；3) 基于克尔效应打破非互易传播的方式需要高功率激光的支持，实现高隔离度需要大功率的激光。如上所述，非线性光隔离器需要开发低吸收、高非线性系数的新型材料，减少内在损耗；优化谐振腔和波导设计，提高相位匹配精度和模式转换效率等措施。

7 总结与展望

本文综述了基于磁光、声光、电光和光学非线性

效应的片上集成光隔离器的最新进展。磁光隔离器通过外加磁场实现高隔离度和宽带宽，但由于磁光材料的集成困难和高插入损耗，其应用受到一定限制。此外，磁光隔离器的响应速度受限于外加磁场的响应时间，通常较慢，这限制了其在高速动态调制场景中的应用。声光隔离器利用声波调制实现非互易性，具有低损耗和高效率的特点，响应速度较快，适合应用于高速光通信和微波光子学，但其工作带宽相对较窄，限制了实际应用。电光隔离器通过电光效应实现精确的相位控制，能够在宽频率范围内工作，具有高集成

度和快速响应的优势, 适合应用于高速光通信和光子计算, 但需要解决高功耗和制造复杂性的问题。非线性光隔离器展示了宽带宽和高灵活性的特点, 其执行速度取决于非线性响应的弛豫时间, 例如基于克尔效应的隔离器响应时间较快, 而基于四波混频的隔离器响应时间较慢, 目前仍面临功耗高、隔离度较低和插入损耗较大的挑战。针对不同的集成平台, 硅波导能够有效地将光场限制在波导内, 增强光与磁光材料的相互作用, 且由于硅光子技术工艺成熟、易于大规模集成, 在最早发展起来的磁光隔离器中广受青睐。然而, 硅波导的传输损耗较大, 导致磁光隔离器的插入损耗偏高, 因此具有低损耗特性的 Si_3N_4 波导逐渐受到更多关注。高 Q 值的 Si_3N_4 微腔是声光隔离器和非线性光隔离器优化隔离性能的关键。 AlN 因其低声学和光学本征损耗、较高的压电系数以及与 CMOS 兼容的优势, 在早期声光隔离器的研究中被广泛应用。随着集成工艺日趋成熟, 高质量的薄膜 LiNbO_3 ^[68] 因其低传输损耗、大压电系数、卓越的电光性质以及大非线性系数, 成为集成高性能声光、电光隔离器以及非线性光隔离器的理想材料平台。

我们认为未来集成光隔离器的发展将聚焦于以下几个方面:

1) 通过材料创新开发超紧凑、低功耗片上光隔离器。二维材料在理论上展现出动态可调磁光效应与强非线性响应的潜力, 但其实际应用仍面临实验瓶颈。当前已实现室温磁有序的二维材料(如 CrI_3 、 Fe_3GeTe_2) 饱和磁化强度普遍较弱, 且磁性易受层数、界面缺陷和环境扰动影响, 导致磁光效应的调控幅度受限。尽管如此, 二维材料的原子级厚度、强光-物质相互作用及可扩展集成特性, 为开发超紧凑、低功耗光隔离器提供了独特机遇。

2) 通过技术创新推动光隔离器小型化、高性能化。异质集成技术通过将 LiNbO_3 的高电光系数、强非线性效应与 Si_3N_4 的超低光学损耗结合, 实现高效隔离与长距离传输的平衡; 三维集成与多层堆叠技术通过垂直堆叠多层波导结构, 显著提高光子集成电路的集成密度和功能多样性, 适用于多通道光通信系统; 微纳加工与光子晶体设计在亚波长尺度实现光场的局域化和增强, 为紧凑型光隔离器提供新思路。

3) 扩展光隔离器的应用领域。量子通信依赖超低损耗隔离器保护量子态免受退相干干扰, 拓扑光隔离器为量子计算的手性边界态提供抗散射保障; 6G 太

赫兹通信依托于超构材料实现紧凑宽带隔离, 而激光雷达与自动驾驶系统则需要非线性隔离器的动态可调能力以抑制环境的回波噪声; 此外, 生物医学成像与高精度传感通过声光可调谐器件提升信噪比, 推动无创诊断与微纳尺度检测的发展。未来挑战聚焦于异质集成的材料兼容性、功耗优化及规模化制造标准, 而跨学科融合将推动光隔离器向“智能自适应、超高性能、全场景兼容”演进, 成为下一代光通信、量子计算与智能传感的核心技术。

参考文献

- [1] Pérez D, Gasulla I, Crudgington L, et al. Multipurpose silicon photonics signal processor core[J]. *Nat Commun*, 2017, 8(1): 636.
- [2] Yun B F, Hu G H, Shi S Q, et al. Research progress in integrated microwave photonic chips (Invited)[J]. *Acta Opt Sin*, 2024, 44(15): 1513029.
恽斌峰, 胡国华, 史清, 等. 微波光子集成芯片研究进展 (特邀)[J]. *光学学报*, 2024, 44(15): 1513029.
- [3] Bogaerts W, Pérez D, Capmany J, et al. Programmable photonic circuits[J]. *Nature*, 2020, 586(7828): 207–216.
- [4] Chi Y L, Yu Y, Gong Q H, et al. High-dimensional quantum information processing on programmable integrated photonic chips[J]. *Sci China Information Sci*, 2023, 66(8): 180501.
- [5] Jalas D, Petrov A, Eich M, et al. What is—and what is not—an optical isolator[J]. *Nat Photonics*, 2013, 7(8): 579–582.
- [6] Zhang Z J, Yan W, Qin J, et al. Integrated nonreciprocal photonic devices (Invited)[J]. *Acta Opt Sin*, 2024, 44(15): 1513020.
张子健, 严巍, 秦俊, 等. 集成非互易光学器件 (特邀)[J]. *光学学报*, 2024, 44(15): 1513020.
- [7] Shoji Y, Mizumoto T. Magneto-optical non-reciprocal devices in silicon photonics[J]. *Sci Technol Adv Mater*, 2014, 15(1): 014602.
- [8] Bi L, Hu J J, Jiang P, et al. On-chip optical isolation in monolithically integrated non-reciprocal optical resonators[J]. *Nat Photonics*, 2011, 5(12): 758–762.
- [9] Yang J S, Roh J W, Ok S H, et al. An integrated optical waveguide isolator based on multimode interference by wafer direct bonding[J]. *IEEE Trans Magn*, 2005, 41(10): 3520–3522.
- [10] Sohn D B, Örsel O E, Bahl G. Electrically driven optical isolation through phonon-mediated photonic Autler–Townes splitting[J]. *Nat Photonics*, 2021, 15(11): 822–827.
- [11] Kittlaus E A, Jones W M, Rakich P T, et al. Electrically driven acousto-optics and broadband non-reciprocity in silicon photonics[J]. *Nat Photonics*, 2021, 15(1): 43–52.
- [12] Tian H, Liu J Q, Siddharth A, et al. Magnetic-free silicon nitride integrated optical isolator[J]. *Nat Photonics*, 2021, 15(11): 828–836.
- [13] Dong P. Travelling-wave Mach-Zehnder modulators functioning as optical isolators[J]. *Opt Express*, 2015, 23(8): 10498–10505.
- [14] Yu M J, Cheng R, Reimer C, et al. Integrated electro-optic isolator on thin-film lithium niobate[J]. *Nat Photonics*, 2023, 17(8): 666–671.
- [15] Shah M, Briggs I, Chen P K, et al. Visible-telecom tunable dual-band optical isolator based on dynamic modulation in thin-film

- lithium niobate[J]. *Opt Lett*, 2023, **48**(8): 1978–1981.
- [16] Saha K, Okawachi Y, Kuzucu O, et al. Chip-scale broadband optical isolation via Bragg scattering four-wave mixing[C]//*CLEO: 2013*, 2013: 1–2.
https://doi.org/10.1364/CLEO_QELS.2013.QF1D.2.
- [17] Del Bino L, Silver J M, Zhao X, et al. Isolators and circulators based on Kerr nonreciprocity in microresonators[C]//*2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference*, 2017: 1.
<https://doi.org/10.1109/CLEOE-EQEC.2017.8086519>.
- [18] White A D, Ahn G H, van Gasse K, et al. Integrated passive nonlinear optical isolators[J]. *Nat Photonics*, 2023, **17**(2): 143–149.
- [19] Herrmann J F, Ansari V, Wang J H, et al. Mirror symmetric on-chip frequency circulation of light[J]. *Nat Photonics*, 2022, **16**(8): 603–608.
- [20] Abdelsalam K, Li T F, Khurgin J B, et al. Linear isolators using wavelength conversion[J]. *Optica*, 2020, **7**(3): 209–213.
- [21] Chen W T, Liu L, Zhao J, et al. On-chip broadband, compact TM mode Mach–Zehnder optical isolator based on InP-on-insulator platforms[J]. *Nanomaterials*, 2024, **14**(8): 709.
- [22] Potton R J. Reciprocity in optics[J]. *Rep Prog Phys*, 2004, **67**(5): 717–754.
- [23] Adam J D, Davis L E, Dionne G F, et al. Ferrite devices and materials[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 2002, **50**(3): 721–737.
- [24] Dötsch H, Bahlmann N, Zhuromskyy O, et al. Applications of magneto-optical waveguides in integrated optics: review[J]. *J Opt Soc Am B*, 2005, **22**(1): 240–253.
- [25] Karki D, Stenger V, Pollick A, et al. Broadband bias-magnet-free on-chip optical isolators with integrated thin film polarizers[J]. *J Lightwave Technol*, 2020, **38**(4): 827–833.
- [26] Yan W, Yang Y C, Yang W H, et al. On-chip nonreciprocal photonic devices based on hybrid integration of magneto-optical garnet thin films on silicon[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2022, **28**(3): 6100515.
- [27] Liang X, Xie J L, Deng L J, et al. First principles calculation on the magnetic, optical properties and oxygen vacancy effect of $\text{Ce}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [J]. *Appl Phys Lett*, 2015, **106**(5): 052401.
- [28] Zaki A M, Blythe H J, Heald S M, et al. Growth of high quality yttrium iron garnet films using standard pulsed laser deposition technique[J]. *J Magn Magn Mater*, 2018, **453**: 254–257.
- [29] Gomi M, Furuyama H, Abe M. Strong magneto-optical enhancement in highly Ce-substituted iron garnet films prepared by sputtering[J]. *J Appl Phys*, 1991, **70**(11): 7065–7067.
- [30] Mizumoto T, Naito Y. Nonreciprocal propagation characteristics of YIG thin film[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1982, **30**(6): 922–925.
- [31] Shoji Y, Fujie A, Mizumoto T. Silicon waveguide optical isolator operating for TE mode input light[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2016, **22**(6): 4403307.
- [32] Zhang Y, Du Q Y, Wang C T, et al. Monolithic integration of broadband optical isolators for polarization-diverse silicon photonics[J]. *Optica*, 2019, **6**(4): 473–478.
- [33] Huang D N, Pintus P, Zhang C, et al. Electrically driven and thermally tunable integrated optical isolators for silicon photonics[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2016, **22**(6): 4403408.
- [34] Du Q Y, Wang C T, Zhang Y F, et al. Monolithic on-chip magneto-optical isolator with 3 dB insertion loss and 40 dB isolation ratio[J]. *ACS Photonics*, 2018, **5**(12): 5010–5016.
- [35] Shui K Y, Nie L X, Zhang Y, et al. Design of a compact waveguide optical isolator based on multimode interferometers using magneto-optical oxide thin films grown on silicon-on-insulator substrates[J]. *Opt Express*, 2016, **24**(12): 12856–12867.
- [36] Yamaguchi R, Shoji Y, Mizumoto T. Low-loss waveguide optical isolator with tapered mode converter and magneto-optical phase shifter for TE mode input[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(16): 21271–21278.
- [37] Auracher F, Witte H H. A new design for an integrated optical isolator[J]. *Opt Commun*, 1975, **13**(4): 435–438.
- [38] Ghosh S, Keyvavinia S, Van Roy W, et al. Ce: YIG/Silicon-on-Insulator waveguide optical isolator realized by adhesive bonding[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(2): 1839–1848.
- [39] Ghosh S, Keyvaninia S, Shirato Y, et al. Optical isolator for TE polarized light realized by adhesive bonding of Ce: YIG on silicon-on-insulator waveguide circuits[J]. *IEEE Photonics J*, 2013, **5**(3): 6601108.
- [40] Yan W, Yang Y C, Liu S Y, et al. Waveguide-integrated high-performance magneto-optical isolators and circulators on silicon nitride platforms[J]. *Optica*, 2020, **7**(11): 1555–1562.
- [41] Tien M C, Mizumoto T, Pintus P, et al. Silicon ring isolators with bonded nonreciprocal magneto-optic garnets[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(12): 11740–11745.
- [42] Huang D N, Pintus P, Bowers J E. Towards heterogeneous integration of optical isolators and circulators with lasers on silicon [Invited][J]. *Opt Mater Express*, 2018, **8**(9): 2471–2483.
- [43] Pintus P, Huang D N, Zhang C, et al. Microring-based optical isolator and circulator with integrated electromagnet for silicon photonics[J]. *J Lightwave Technol*, 2017, **35**(8): 1429–1437.
- [44] Zhuromskyy O, Lohmeyer M, Bahlmann N, et al. Analysis of nonreciprocal light propagation in multimode imaging devices[J]. *Opt Quantum Electron*, 2000, **32**(6): 885–897.
- [45] Furuya K, Nemoto T, Kato K, et al. Athermal operation of a waveguide optical isolator based on canceling phase deviations in a Mach–Zehnder interferometer[J]. *J Lightwave Technol*, 2016, **34**(8): 1699–1705.
- [46] Yokoi H, Mizumoto T, Shinjo N, et al. Demonstration of an optical isolator with a semiconductor guiding layer that was obtained by use of a nonreciprocal phase shift[J]. *Appl Opt*, 2000, **39**(33): 6158–6164.
- [47] Yokoi H, Shoji Y, Shin E, et al. Interferometric optical isolator employing a nonreciprocal phase shift operated in a unidirectional magnetic field[J]. *Appl Opt*, 2004, **43**(24): 4745–4752.
- [48] Shoji Y, Mizumoto T, Yokoi H, et al. Magneto-optical isolator with silicon waveguides fabricated by direct bonding[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **92**(7): 071117.
- [49] Ishida E, Miura K, Shoji Y, et al. Amorphous-Si waveguide on a garnet magneto-optical isolator with a TE mode nonreciprocal phase shift[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(1): 452–462.
- [50] 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]. *Opt Lett*, 2017, **42**(23): 4901–4904.
- [51] Huang D N, Pintus P, Zhang C, et al. Dynamically reconfigurable integrated optical circulators[J]. *Optica*, 2017, **4**(1): 23–30.
- [52] Liu S Y, Shoji Y, Mizumoto T. Mode-evolution-based TE mode magneto-optical isolator using asymmetric adiabatic tapered

- waveguides[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(15): 22838–22846.
- [53] Liu L, Chen W T, Zhao J, et al. Two structural designs of broadband, low-loss, and compact TM magneto-optical isolator based on GaAs-on-insulator[J]. *Nanomaterials*, 2024, **14**(5): 400.
- [54] Tadesse S A, Li M. Sub-optical wavelength acoustic wave modulation of integrated photonic resonators at microwave frequencies[J]. *Nat Commun*, 2014, **5**(1): 5402.
- [55] Liu J Q, Tian H, Lucas E, et al. Monolithic piezoelectric control of soliton microcombs[J]. *Nature*, 2020, **583**(7816): 385–390.
- [56] Tadesse S A, Li H, Liu Q Y, et al. Acousto-optic modulation of a photonic crystal nanocavity with Lamb waves in microwave K band[J]. *Appl Phys Lett*, 2015, **107**(20): 201113.
- [57] Luo Z F, Zhang A X, Huang W X, et al. Aluminum nitride thin film based reconfigurable integrated photonic devices[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2023, **29**(3): 9300119.
- [58] Shao L B, Yu M J, Maity S, et al. Microwave-to-optical conversion using lithium niobate thin-film acoustic resonators[J]. *Optica*, 2019, **6**(12): 1498–1505.
- [59] Sohn D B, Kim S, Bahl G. Time-reversal symmetry breaking with acoustic pumping of nanophotonic circuits[J]. *Nat Photonics*, 2018, **12**(2): 91–97.
- [60] Kuhn L, Heidrich P F, Lean E G. Optical guided wave mode conversion by an acoustic surface wave[J]. *Appl Phys Lett*, 1971, **19**(10): 428–430.
- [61] Sohn D B, Bahl G. Direction reconfigurable nonreciprocal acousto-optic modulator on chip[J]. *APL Photonics*, 2019, **4**(12): 126103.
- [62] Tian H, Liu J Q, Dong B, et al. Hybrid integrated photonics using bulk acoustic resonators[J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 3073.
- [63] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. *Nature*, 2018, **562**(7725): 101–104.
- [64] Bhandare S, Ibrahim S K, Sandel D, et al. Novel nonmagnetic 30-dB traveling-wave single-sideband optical isolator integrated in III/V material[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2005, **11**(2): 417–421.
- [65] Dong P, Gui C C. Observation of nonreciprocal transmission in binary phase-shift keying modulation using traveling-wave Mach–Zehnder modulators[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(12): 2723–2726.
- [66] Dostart N, Gevorgyan H, Onural D, et al. Optical isolation using microring modulators[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(3): 460–463.
- [67] Del Bino L, Silver J M, Stebbings S L, et al. Symmetry breaking of counter-propagating light in a nonlinear resonator[J]. *Sci Rep*, 2017, **7**(1): 43142.
- [68] Cheng Y. Thin film lithium niobate electro-optic devices and ultralarge-scale photonic integration (Invited)[J]. *Chin J Lasers*, 2024, **51**(1): 0119001.
- 程亚. 薄膜铌酸锂光电器件与超大规模光子集成 (特邀)[J]. *中国激光*, 2024, **51**(1): 0119001.

作者简介



杨宗麒 (2001-), 男, 硕士研究生, 主要从事集成光学器件方面的研究。

E-mail: yang718@buaa.edu.cn



【通信作者】张浩 (1984-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要长期从事微纳光电子器件的研究工作。

E-mail: haozhang@buaa.edu.cn



【通信作者】杨合 (1987-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事光子及光电子器件的前沿基础研究及其在集成化工程应用领域的探索。

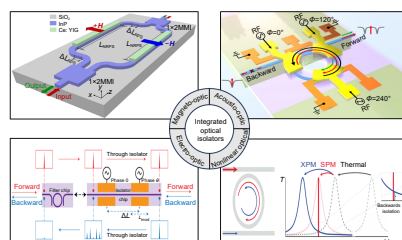
E-mail: yanghe@buaa.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Research progress on on-chip integrated optical isolators

Yang Zongqi¹, Li Wenxiu¹, Sun Xin¹, Huang Xinyao², Yang He^{3*},
Zhang Hao^{4*}, Huang Anping², Xiao Zhisong^{2,5}



On-chip integrated optical isolators based on different effects

Overview: The rapid development of information technology has fueled increasing demand for high-performance, low-cost photonic integrated circuits (PICs) in applications like optical communication, microwave photonics, quantum information processing, optical sensing, and artificial intelligence-driven optical computing. In these systems, non-reciprocal photonic devices, particularly optical isolators, are crucial components. Optical isolators allow light to pass in only one direction, blocking back-reflected light that can interfere with optical sources or even damage lasers. In optical communication systems, they help release multi-path interference and enhance system design flexibility by preventing crosstalk between devices. As the need for highly integrated PICs systems grows, the development of efficient, compact, and scalable on-chip optical isolators has become a key research focus. Several implementation methods for on-chip integrated optical isolators have been proposed, based on magneto-optical (MO), acousto-optical (AO), electro-optical (EO), and nonlinear optical effects. Each approach presents unique advantages and faces specific challenges. Magneto-optical isolators achieve non-reciprocal transmission through the Faraday effect. These devices typically consist of a magneto-optical material, such as Ce: YIG and Bi: YIG, combined with Mach-Zehnder interferometer (MZI), micro-ring (MR) or multimode interference (MMI) structures. While MO isolators offer high isolation ratio and robustness, their integration is limited by material mismatches with semiconductors and high insertion loss due to material absorption. AO isolators rely on the interaction between phonon and photon in a waveguide. These isolators are efficient and compatible with low-loss materials like AlN and LiNbO₃ but have limited bandwidth due to their narrow optical resonance. Electro-optical isolators control light propagation through the Pockels effect. In an EO isolator, an external electric field modifies the refractive index of the waveguide material, such as LiNbO₃, to induce phase changes in the transmitted light. EO isolators are promising due to their fast response times and wide isolation bandwidth but face high power consumption and thermal issues, limiting large-scale integration. Nonlinear optical isolators break reciprocity through effects like Kerr nonlinearity or Four-Wave Mixing, offering broadband operation. However, they require high power levels to achieve strong isolation, making them unsuitable for low-power applications. Additionally, they are complex due to the need for extra pump sources and filters. Future advancements in on-chip optical isolators will focus on optimizing performance while maintaining compactness, scalability, and compatibility with semiconductor processes. Hybrid solutions combining different non-reciprocal effects, improved acoustic wave generation, reduced driving voltages, and the development of new materials with higher nonlinear coefficients will drive the next generation of high-performance isolators.

Yang Z Q, Li W X, Sun X, et al. Research progress on on-chip integrated optical isolators[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(2): 240285; DOI: 10.12086/oe.2025.240285

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2021YFB3900701), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (501XYGG2024117011)

¹School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; ²School of Physics, Beihang University, Beijing 100191, China; ³School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; ⁴School of Space and Earth Sciences, Beihang University, Beijing 100191, China; ⁵School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China

* E-mail: haozhang@buaa.edu.cn; yanghe@buaa.edu.cn