



# 新型硅基集成光隔离器的研究进展

## Research Progress of New Silicon-Based Integrated Optical Isolators

**摘要:** 光隔离器是保障光通信系统稳定运行的重要核心器件。目前,光通信器件在单个芯片上的集成是必然趋势,但光隔离器的集成仍然存在损耗高、隔离度差、集成工艺困难等诸多问题,复杂有源光通信器件片上集成的发展也因此受到了阻碍。概述了实现光隔离的几种有效方案,介绍了硅基集成光隔离器的最新研究进展,并对其未来的发展态势进行了展望。

**关键词:** 光学器件;硅基集成;非互易器件;光隔离器;波导结构

**Abstract:** Optical isolators are core devices to ensure the stable operation of optical communication systems. At present, the integration of optical communication devices on a single chip is an inevitable trend, but there are still some serious problems in the integration of isolators such as high loss, poor isolation, and difficult integrating process, which have hindered the development of on-chip integration of complex active optical communications devices. In this paper, several effective solutions for optical isolation and the latest research progress of silicon-based integrated optical isolators are introduced, and its future development is forecasted.

**Key words:** optical device; silicon-based integration; non-reciprocal device; optical isolators; waveguide structure

李明轩/LI Mingxuan<sup>1,2</sup>, 于丽娟/YU Lijuan<sup>1</sup>,  
刘建国/LIU Jianguo<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院半导体研究所,北京 100083;  
2. 中国科学院大学,北京 100049)  
(1. Institution of Semiconductors, Chinese  
Academy of Sciences, Beijing 100083, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100049, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905011  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20191011.1425.002.html>

网络出版日期: 2019-10-11  
收稿日期: 2019-07-16

随着信息时代的发展,为了更好地满足其“爆炸式增长”的信息传输需要,人们对光纤通信模块、链路和系统的性能要求也在逐步提升。在光路中,由于种种原因会产生与正向传输光方向相反的反射光。例如,当光耦合进入光纤时,由于连接器和熔接点的存在,将会在这些端面 and 点处产生与原传输方向相反的反射光。反射波的光子回到器件之中时,会与半导体材料进行二次作用。这将干扰发光材料的正常载流子分布,导致光路系统间产生自耦合效应和自激励效应,造

成其他波长和模式光的产生,同时会破坏传输稳定性并给器件带来各种不良影响。这些不良影响包括:(1)对于直调激光器,反射波会给激光带来啁啾,导致光源信号的剧烈波动,调制带宽下降,十分不利于高速信号的长距离传输,严重时甚至会烧毁激光器;(2)对于光纤放大器,反射波的存在会增加噪声强度,从而使传输信噪比降低;(3)对于模拟信号传输系统,本身抗电磁波干扰能力就较差,反射波会严重影响通信质量;(4)对于相干光通信系统而言,反射波会增加载波信号的光

谱宽度并带来频率漂移,使系统无法满足外差法的条件从而不能正常工作。

光隔离器是使光信号只允许沿一个方向传播并能阻挡反射光的器件,又叫光单向器。它类似于电路中的“二极管”,能够用来防止光路中由于各种原因产生的反射光给正向传输光带来的不良影响。因此,光通信系统需要在这些端口处加入隔离器,这样能够有效地稳定系统的正常工作,从而保证信号的传输质量。衡量光隔离器性能的指标包括插入损耗、反向隔离度、回波损

耗、3 dB隔离度带宽、通带带宽、偏振相关损耗、温度特性等。为了能够使光隔离器在系统中发挥更好的效果,高反向隔离度、高工作带宽、高回波损耗、高稳定性和可靠性、低插入损耗等特性是光隔离器的主要发展方向。

近年来,硅基光电子学的进步和绝缘层上硅(SOI)波导的出现,使光电子器件正朝着小型化和集成化的方向发展。这更让人们看到了光通信系统在片上集成方面的发展前景,实现光电融合这一目标指日可待。与体型隔离器相比,集成光隔离器体积更小。特别是硅基集成的器件通过设计可以与其他器件一同进行流片生产,十分适用于集成光路中且有望进行大规模的生产。不仅如此,硅基集成的器件使用时不需要与光源进行对准,具有可靠性较高的特点。对于磁光隔离器而言,集成型磁光隔离器还具有所需的外加磁场强度更小等一系列优点;但由于缺乏一种有效且实用的光隔离器的集成方法,目前复杂的有源器件在光子集成芯片上的集成也受到了一些阻碍。

## 1 光隔离的实现原理

### 1.1 非互易传输

要实现光隔离的效果,需要打破光波在同一路径不同传播方向上的传播可逆性,使反向传输光具有与正向传输光不同的物理性质,即实现光的非互易传输。

对于一个双端口器件,假设左

端的电磁场分量为 $E_1, H_1$ ,右端的电磁场分量为 $E_2, H_2$ 。根据无源情况下的麦克斯韦方程,如式(1)所示:

$$\begin{cases} \nabla \times E = -j\omega\mu H \\ \nabla \times H = J + j\omega E \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $\nabla$ 为哈密顿算子, $E$ 为电场强度, $H$ 为磁场强度, $j$ 为虚数单位, $\omega$ 为正弦电场的圆频率, $\mu$ 为磁导率, $J$ 为传导电流。

结合矢量公式,如式(2)所示:

$$\nabla \cdot (E \times H) = H \cdot (\nabla \times E) - E \cdot (\nabla \times H), \quad (2)$$

当电磁场的介电常数张量 $\hat{\epsilon}$ 和磁导率张量 $\hat{\mu}$ 满足如下公式时,如式(3)所示:

$$\begin{cases} \hat{\epsilon} \cdot E = E \cdot \hat{\epsilon} \\ \hat{\mu} \cdot H = H \cdot \hat{\mu} \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)化简,即可得到洛伦兹互易定理:

$$\nabla \cdot (E_2 \times H_1 - E_1 \times H_2) = 0. \quad (4)$$

通过推导洛伦兹互易定理可知,对于线性的非时变传输系统而言,破坏互易定理成立的条件使上述方程不为零,即可得到非互易的光传输,实现反向光的隔离。因此,可以从破坏对称性、破坏线性性以及破坏非时变性这3个角度去破坏互易定理,再根据物理性质不同的正反向光在同一种材料或结构中的传播特性不同,最终可实现隔离反向光的效果。光隔离器的研究最初源于磁光材料及其法拉第旋光效应的发现,根据有无磁光材料可将光隔离器分为磁光隔离器或非磁光隔离器。

### 1.2 磁光隔离器

使用磁光材料的隔离器为磁

光隔离器。磁光材料的介电常数张量是非对称的,因此采用磁光方法可以从破坏对称性的角度来打破洛伦兹互易定理,这也是光隔离重点研究的方向。衡量磁光材料隔离效果的物理参数为法拉第旋光系数。除此之外,材料的光学损耗也会影响到器件的最终性能。因此,较为理想的磁光材料需要同时具有比较大的法拉第旋光系数和比较低的光学吸收损耗,这种物理特性在铁石榴石这种材料中较为常见。

1958年,DILLON JR. J. F.等人首次发现钇铁石榴石材料 $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)对于红外光具有较好的传递性和较低的传输损耗,可用于磁光隔离器的制造<sup>[1]</sup>。但由于当时材料的制备技术不成熟,在器件的实际制造方面几乎没有应用价值。20世纪70年代,液相外延(LPE)、射频溅射技术的进步促进了薄膜材料的广泛应用,磁光薄膜材料应运而生<sup>[2-4]</sup>。同时期,科学家们发现YIG中的 $Y^{3+}$ 离子在由少量抗磁性的 $Bi^{3+}$ 离子取代之后得到Bi:YIG,能够在通信波长1300 nm和1550 nm附近具有高出之前磁光材料几个数量级的法拉第旋光系数,且随着 $Bi^{3+}$ 离子含量的增加线性增大。1988年,GOMI M.等人发现了利用 $Ce^{3+}$ 离子取代YIG材料中的 $Y^{3+}$ 离子得到Ce:YIG<sup>[5]</sup>,对于相同波长的光波,相比Bi:YIG有其5~6倍的法拉第旋光系数,且温度系数更小。此后,产生了许多利用LPE和射频溅射制备的Bi:YIG和Ce:YIG薄膜材料制成的磁光隔离器,为隔离器的

小型化打开了局面。

传统体型光隔离器为法拉第旋光型隔离器,由2个偏振器和中间的磁光材料组成。光的非互易性传播通过磁光效应实现,即磁光材料在外加磁场下会产生法拉第旋光效应,原理如图1所示。假设光从左到右为正向传输,垂直方向的线偏振光经过左侧偏振器进入磁光材料,由于法拉第旋光效应使偏振方向从正向看过去逆时针旋转了 $45^\circ$ ,之后恰好通过 $45^\circ$ 放置的右侧偏振器输出。当反向光进入隔离器时,斜 $45^\circ$ 的线偏振光经过右侧偏振器进入磁光材料,由于法拉第旋光效应的非互易性会产生沿反向看过去的顺时针 $45^\circ$ 旋光,此时光的偏振方向和左侧偏振器的偏振方向垂直从而无法通过,由此可以实现对反向光的良好隔离。

上述体型隔离器要求进入隔离器的光波偏振方向是确定的,称为偏振相关型磁光隔离器。还有偏振无关型的光隔离器,即不要求光波的初始偏振态,这种隔离器能够适

用于更广泛的情况。

### 1.3 非磁光隔离器

非磁光方法的研究主要是为了解决磁光材料难以小型化和集成的弊端,除了打破对称性角度之外,还可以从破坏线性性和非时变性角度来打破洛伦兹互易定理。线性材料的物理特性是不随光的强度发生变化的;但对于一些非线性材料而言,不同的光强会导致材料的折射率随之变化。因此,对于正反向的传输光,非线性材料的折射率分布不同,从而实现非互易传输。另外,正反向的光在波导中传播还具有非时变性,即时间对称性,因此也可以考虑打破这种性质来制成隔离器。

## 2 光隔离器的集成

目前,商用的体型磁光隔离器具有相对良好的隔离性能,但是不能满足光通信器件小型化的需求,因此人们开始研究波导型的隔离器件。早期的研究者尝试用在石榴石衬底上的石榴石器件去研究波导器

件,涌现出了许多方法,包括:(1)利用模转换的方法改变反向传输光的传播模式;(2)利用非对称马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型波导和多模干涉型波导;(3)注入电流增大铁磁材料对反向光的吸收系数等<sup>[6]</sup>。其中某些方法也可以达到30 dB以上的隔离度和1 dB以下的损耗;但这些以磁光材料作为波导或以石榴石材料作为衬底制成的器件,还存在如相位匹配条件难以实现、具有形状诱导的双折射效应、传播损耗较大等缺点。

随着硅基光子学的发展,尤其是SOI波导的出现,硅已经成为实现光电融合的首选材料。SOI损耗很小,目前的工艺技术允许其实现复杂和多变的光子集成回路,同时与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容,加之调制器、放大器、探测器等器件均在硅衬底上进行集成制成光子集成芯片;因此,光隔离器在硅基平台上的集成是未来发展的重要方向。YIG材料的磁光特性良好,尤其是掺杂稀土离子 $\text{Bi}^{3+}$ 和 $\text{Ce}^{3+}$ 之后具有较高的法拉第旋光系数,目前也被广泛应用于光隔离器等磁光器件的制造。但石榴石材料难以集成在硅基光学芯片上,因为得到石榴石相需要进行热退火,会带来衬底之间的不匹配。因此,人们开始寻找各种无磁的硅基集成光隔离器的实现方法,同时也尝试在石榴石材料的集成工艺上进行突破。

### 2.1 键合磁光薄膜的光隔离器

2008年,日本学者MIZUMOTO

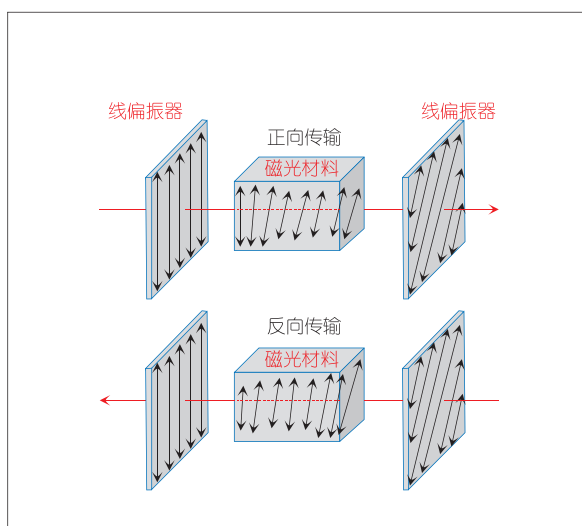


图1 法拉第旋光型隔离器原理

T. 等人首次采用直接键合的方法将 Ce:YIG 薄膜集成到具有 MZI 结构的 SOI 波导上, 其结构如图 2 所示<sup>[7]</sup>。在给 Ce:YIG 薄膜施加反向平行磁场的情况下, 光在器件中传播时具有非互易相移, 2 臂中的反向光由于 2 种相移相差奇数倍而干涉相消, 从而达到了隔离反向光波的效果。制成的器件在波长 1 559 nm 处达到最大隔离度 21 dB, 具有较大的工作带宽。

2011 年, TIEN M. C. 等人首次用键合磁光石榴石的方法实现了硅光环形隔离器, 结构如图 3 所示<sup>[8]</sup>。该隔离器包括 1 个环形谐振器、1 条直耦合波导和键合的薄膜 Ce:YIG。通过给磁光薄膜施加以环形谐振器为中心的径向磁场, 产生的非互易效应打破了环形谐振器的对称性,

使光波在顺时针 (CW) 和逆时针 (CCW) 传播时具有不同的传播常数, 因此有不同的谐振波长。如果正向和反向的透射光谱偏移了自由光谱范围的一半, 则可以实现和优化光学隔离。正向光传输为 CW 模式且为非谐振波长, 不会耦合进入环形谐振腔而直接从直波导的另一端输出; 反向光传输为 CCW 模式且为谐振波长下, 因此大部分光耦合进入环形腔内产生谐振最终实现光隔离。测得该隔离器的在 1 550 nm 处具有 9 dB 的隔离度, 并且因为波导结构相对简单, 附加的波导损耗较低。

之后 BI L. 等人在此基础上进行了改进, 将环形谐振器改为跑道型环形谐振器, 如图 4 所示<sup>[9]</sup>。相比环形的方案, 跑道型谐振器的优点

在于增大了直波导与谐振腔波导的耦合长度, 让光更容易在谐振波长耦合进入谐振腔; 因此, 隔离度得到了提高, 在波长 1 550 nm 附近实现了 19.5 dB 的隔离效果。

2017 年, PINTUS P. 等人测出了环形谐振器结构的磁光隔离器的隔离性能: 在波长 1 558.35 nm 附近达到最大隔离度 32 dB, 插入损耗为 10 dB 左右, 顺时针和逆时针传播模式之间的带宽之差为 0.2 nm<sup>[10]</sup>。该器件采用同样直接键合的方法制成, 适用于横磁 (TM) 模。将制成的隔离器芯片输入、输出端口分别与可调谐激光器以及光功率计相接, TM 模的光利用带有透镜的保偏光纤接入芯片, 光斑大小为 2.5 μm。还测出了 MZI 结构的磁光隔离器的参数: 最大隔离度大于 10 dB, 插入损耗小于 4 dB, 工作带宽为 20 nm 左右。

对比 2 种结构的隔离器的性能可以发现, MZI 结构的隔离器的最大隔离度较低, 但是具有较大的工作带宽。2 种隔离器结构的插入损耗都较大 (插入损耗主要由 Ce:YIG 薄膜的吸收引起), 而且在环形谐振器结构中的吸收要更大一些, 因为这种结构键合的芯片尺寸要更长。额外损耗可以通过缩短被覆盖的直波导的长度, 或改变波导宽度以减少光学模式与 Ce:YIG 之间的重叠来减小。在应用方面, 由于环形谐振器结构的隔离器 2 种传播模式之间的带宽很窄, 因此可以应用于对单波长激光器的隔离中; MZI 结构的隔离器工作带宽较大, 更适用于波分复用系统和高速数字信号的传

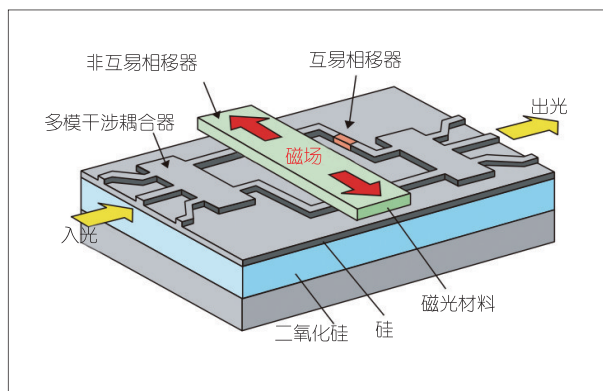


图2 键合磁光材料的马赫-曾德尔干涉仪型隔离器结构图

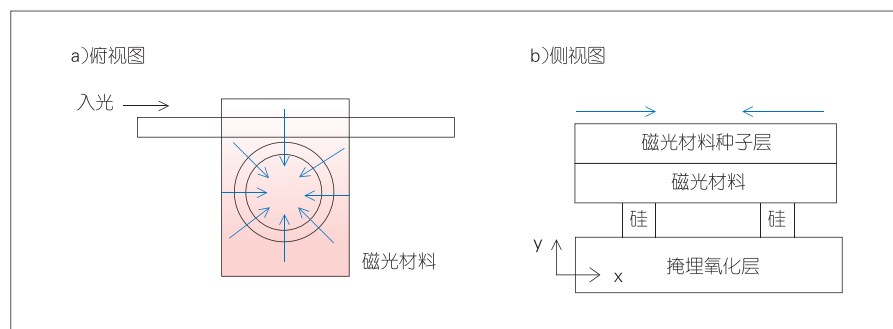


图3 键合磁光薄膜的环形谐振器型隔离器结构图



输系统中。

## 2.2 带有闭锁性磁光薄膜的法拉第旋光型光隔离器

在以往关于片上集成的磁光隔离器研究工作中,人们大多在改进波导结构等方面做出努力,例如采用法拉第旋光器结构、MZI结构、环形谐振器结构等等;但是关于减小器件尺寸以及去除磁化元件(如永磁铁或电磁铁)的问题还没有得到广泛关注。DOLENDRA K. 等人采用晶体离子切片技术(如图5所示),制成了高隔离度、低插入损耗的集成磁光隔离器<sup>[11]</sup>。通过这种技术制成的3种厚度(300 μm、50 μm

和11 μm)的薄膜材料,测试出隔离度消光比均大于20 dB,插入损耗均小于0.1 dB。先利用LPE生长出高质量的块状材料,再利用基于离子注入的晶体离子切片技术,从高质量的块状材料中获得微米级厚度的磁光薄膜样品。这样制造磁光材料的好处在于成功避免了在光波导上进行晶格外延生长的需要。此外,能够将器件尺寸减小的重点在于这种磁光材料,不需要在器件内部放置磁体来产生磁场,即实现无磁体器件的制造。要达到这种效果,关键在于设计石榴石的组成成分。通过最大限度地引入铈(Eu)来实现没有偏置磁体的饱和磁性状态,以

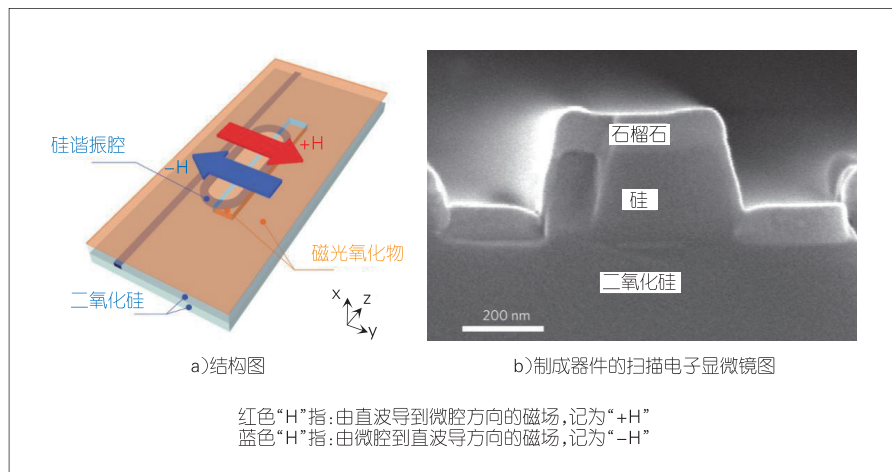
便在不产生补偿点的情况下减小石榴石的饱和磁化强度。制成的这种磁光材料被称为闭锁型法拉第旋光铁石榴石材料,材料内部存在预先锁住的磁化场;因此,在应用时不需要加偏磁磁铁,这样可以大大缩小器件的尺寸。

## 2.3 基于马赫-曾德尔行波调制器实现的光隔离器

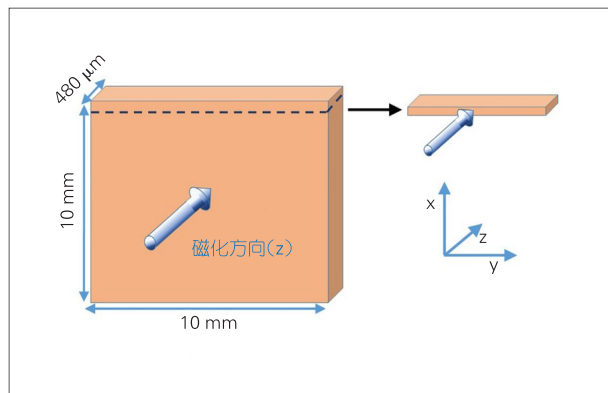
2017年,SONG B. H. 等人在对一种商用的马赫-曾德尔调制器(MZM)加载射频(RF)调制信号时,调制器能够呈现出“时间门”的效果,即能够阻挡任何反向传输的光波,但同时允许正向传输的周期性脉冲信号通过,结构及原理图如图6所示<sup>[12]</sup>。这个特定的功能是利用光波、电信号的共同传播和逆向传播在调制器中光信号、电信号的相互作用。反向传播产生的调制器输出等于输入电信号的时间积分形式,积分窗口长度是调制器传播延迟的2倍。当输入电信号是周期性的RF频率并且积分窗口是其周期的整数倍时,积分结果是恒定的零,输入RF信号对于调制器反向传输光的输出没有影响。因此,当调制器偏置为零传输时,只要仔细选择调制频率,就可以阻挡与调制波相位无关的反向传输光波。正向传输光受RF驱动信号的常规调制。这样,正弦周期中的每个RF信号峰值驱动调制器远离零传输状态,并且打开了前向光波的传输时间门。

## 2.4 实现光隔离的其他方法

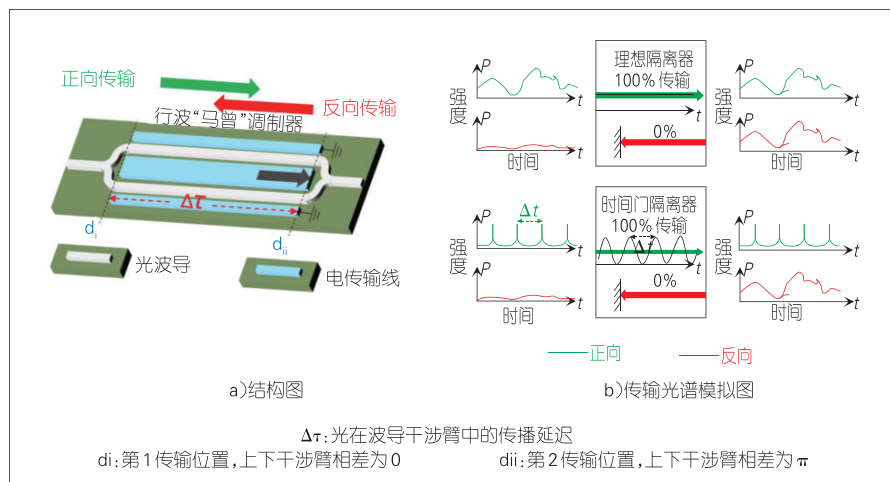
除上述方法之外,人们还进行



▲图4 环形跑道谐振器型隔离器



◀图5 闭锁性磁化薄膜及磁化方向示意图



▲图6 基于马赫-曾德尔行波调制器实现的光隔离器

了其他无磁方法的探索。例如,利用带有半畴结构的奇数个电畴的周期性极化铌酸锂晶体(O&HPPLN)构成一种新的非磁光隔离器<sup>[13]</sup>;利用二维光子晶体结构实现非线性光子晶体隔离器<sup>[14]</sup>;利用波导中的光子转化能够在相反的传播模式中产生非互易相位响应的特点,提出了一种MZI结构来构成光隔离器<sup>[15]</sup>;采用硅基集成的纳米光子环谐振器利用角动量诱导来实现非互易性传播<sup>[16]</sup>;利用四波混频(FWM)效应,采用具有级联滤波器的硅基集成光学隔离<sup>[17]</sup>等。这些方法都从非磁光材料的角度来实现光隔离,但普遍处于理论验证阶段。同时,方法中采用的光学调制、非线性效应等均需要较大功率的输入光,普遍存在结构复杂、正向光透过率低、损耗较大、实用性不强等弊端,但为实现集成光隔离的探索开辟了新的思路。

### 3 结束语

实现光隔离的基本方法是实现光在介质中的非互易性传输,可以

借助磁光方法和非磁光方法来完成。磁光方法主要依靠磁光材料介电常数的不对称性,通过法拉第旋光、非互易相移等具体方式来实现;而非磁光方法主要利用特殊的波导结构,改变介质折射率的分布或系统的非时变性来实现。总体来讲,磁光方法较为成熟并具有良好的隔离性能,但磁光材料和磁化元件的集成较为困难,损耗较高;非磁光方法虽然无需利用磁光材料,容易集成,但是隔离性能较差,大多数方法仍处于理论研究阶段。

对SOI波导器件的结构进行设计,产生了各类磁光以及非磁光隔离器件,且具有较高的集成度。磁光隔离器采用直接键合的方法将磁光薄膜材料贴合在SOI波导上;非磁光隔离器则利用光子跃迁、行波调制等方法。而马赫-曾德尔结构和环形谐振器结构的集成光隔离器在2种方法中均较为常见。2种结构相比,马赫-曾德尔结构具有较大的工作带宽,更适用于多波长传输;但结构相对复杂,不仅带来较高

的弯曲波导损耗,更要求工艺容差小,需要较高的工艺精度。微环结构隔离度较大,结构简单,损耗较低;但工作带宽窄,实用性偏低。其他方法如具有行波调制的方法,也为隔离器的发展提供了新的思路。随着工艺的不断进步,隔离器会逐渐突破结构和材料的限制,实现高隔离度、低插入损耗、大工作带宽、小尺寸、超紧凑的硅基光隔离器的集成。

### 参考文献

- [1] DILLON JR J F. Observation of Domains in the Ferrimagnetic Garnets by Transmitted Light[J]. Journal of Applied Physics, 1958, 29(9): 1286-1291. DOI: 10.1063/1.1723427
- [2] FRATELLO V J, WOLFE R. Epitaxial Garnet Films for Nonreciprocal Magneto-Optic Devices[J]. Handbook of Thin Films, 2000, 4: 93-141. DOI: 10.1016/B978-012265320-9/50095-7
- [3] GOA P E, HAUGLIN H, BAZILJEVICH M, et al. Real-Time Magneto-Optical Imaging of Vortices in Superconducting NbSe<sub>2</sub>[J]. Superconductor Science and Technology, 2001, 14(9): 729-731. DOI: 10.1088/0953-2048/14/9/320
- [4] AICHELE T, LORENZ A, HERGT R, et al. Garnet Layers Prepared by Liquid Phase Epitaxy for Microwave and Magneto-Optical Applications - a Review[J]. Crystal Research

- and Technology: Journal of Experimental and Industrial Crystallography, 2003, 38(7–8): 575–587. DOI: 10.1002/crat.200310071
- [5] GOMI M, SATOH K, ABE M. Giant Faraday Rotation of Ce-Substituted YIG Films Epitaxially Grown by RF Sputtering[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1988, 27(8A): L1536–L1538. DOI: 10.1143/jjap.27.L1536
- [6] 曾维友, 谢康, 蒋向东. 集成磁光隔离器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(10): 47–52
- [7] MIZUMOTO T, SHOJI Y. Optical Isolator for Silicon-on-Insulator Circuits[C]//2008 34th European Conference on Optical Communication. IEEE, 2008: 1–4. DOI: 10.1109/ECOC.2008.4729243
- [8] TIEN M C, MIZUMOTO T, PINTUS P, et al. Silicon Ring Isolators with Bonded Nonreciprocal Magneto-Optic Garnets[J]. Optics Express, 2011, 19(12): 11740–11745. DOI: 10.1364/OE.19.011740
- [9] BI L, HU J, JIANG P, et al. On-Chip Optical Isolation in Monolithically Integrated Non-Reciprocal Optical Resonators[J]. Nature Photonics, 2011, 5(12): 758–762. DOI: 10.1038/nphoton.2011.270
- [10] PINTUS P, HUANG D, SHOJI Y, et al. Heterogeneous Silicon Optical Isolators and Circulators[C]//Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics. Optical Society of America, 2017: ITh2A. 2. DOI: 10.1364/IPRSN.2017.ITh2A.2
- [11] KARKI D, STENGER V, POLLICK A, et al. Thin-Film Magnetless Faraday Rotators for Compact Heterogeneous Integrated Optical Isolators[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(23): 233101. DOI: 10.1063/1.4986237
- [12] SONG B, ZHUANG L, LOWERY A J. Travelling-Wave Mach-Zehnder Modulator as a Temporal Integrator and a Time-Gate Isolator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(13): 1101–1104. DOI: 10.1109/LPT.2017.2703299
- [13] LI J, SHI L, CHEN X. Optical Isolation Based on Faraday-Like Effect in Periodically Poled Lithium Niobate with Odd Number of Domains Tailed with a Semi-Domain[J]. JOSAB, 2014, 31(4): 730–734. DOI: 10.1364/josab.31.000730
- [14] CHEN C T, WANG G L, WANG X Y, et al. Deep-UV Nonlinear Optical Crystal KBe<sub>2</sub>B<sub>0</sub>3F<sub>2</sub> – Discovery, Growth, Optical Properties and Applications[J]. Applied Physics B, 2009, 97(1): 9–25. DOI: 10.1007/s00340-009-3554-4
- [15] YU Z, FAN S. Optical Isolation Based on Nonreciprocal Phase Shift Induced by Interband Photonic Transitions[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(17): 171116. DOI: 10.1063/1.3127531
- [16] SOUNAS D L, ALÙ A. Angular-Momentum-Biased Nanorings to Realize Magnetic-Free Integrated Optical Isolation[J]. ACS Photonics, 2014, 1(3): 198–204. DOI: 10.1021/ph400058y
- [17] WANG K, WANG Y, GAO S, et al. Silicon Integrated Optical Isolator with Dynamic Non-Reciprocity[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(15): 1261–1264. DOI: 10.1109/LPT.2017.2718110

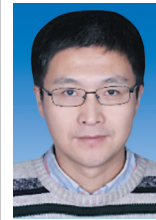
## 作者简介



李明轩, 中国科学院半导体研究所读博士生; 主要研究方向为硅光集成。



于丽娟, 中国科学院半导体研究所副研究员; 主要研究方向为半导体光电子器件和光电混合集成技术; 已发表SCI论文30余篇。



刘建国, 中国科学院半导体研究所研究员, 中国科学院大学特聘教授、博士生导师, 军委科技委创新特区主题专家; 主要研究方向为高速光电子器件、光通信与微波光子技术; 曾获得国家杰出青年基金; 已发表SCI论文120余篇, 获得授权国家发明专利30余项。