



硅集成磁光非互易光学器件技术

Silicon Integrated Magneto-Optical Nonreciprocal Photonic Devices

摘要: 基于磁光非互易移相原理,采用硅基异质沉积磁性氧化物薄膜的技术路线,在绝缘体上硅(SOI)晶圆上,制备了基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构的宽带磁光隔离器和微环结构的窄带磁光隔离器件。两个器件在 1 550 nm 波长下的隔离度分别达到了 30 dB 和 40 dB,插损分别为 5 dB 和 3 dB,性能接近分立器件水平。这些工作为硅基单片集成非互易材料和器件提供了可行的技术途径。

关键词: 硅基光电子;磁光;非互易;光隔离器

Abstract: Based on the magneto-optical nonreciprocal phase shift effect, Mach-Zehnder interferometer (MZI) broadband optical isolators and microring narrowband optical isolators on silicon on insulator (SOI) substrate are monolithically integrated by using the technique of hetero deposition of magnetic oxide film on silicon substrate. The devices achieve high isolation ratios of 30 dB and 40 dB at 1 550 nm, and insertion loss of 5 dB and 3 dB respectively, which are close to the performance of discrete isolator devices. Our work provides a feasible technical way for silicon integration of nonreciprocal materials and devices.

Keywords: silicon photonics; magneto-optics; nonreciprocal; optical isolator

刘书缘/LIU Shuyuan

邓龙江/DENG Longjiang

毕磊/BI Lei

(电子科技大学,中国 成都 611054)
(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611054, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202006012

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200407.1516.002.html>

网络出版日期: 2020-04-07

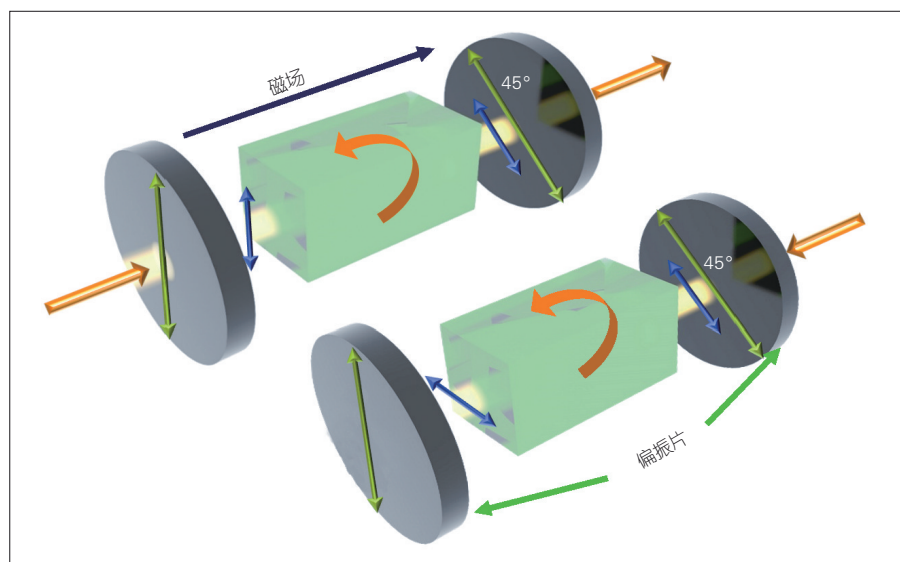
收稿日期: 2020-02-20

非互易光学器件包括光隔离器、光环行器等,是光学系统中不可或缺的核心器件。以光隔离器为例,非互易光学器件的主要作用是实现光的单向通过。该器件可阻止远端反射光进入激光器谐振腔或放大器,以避免由反射光造成的相对强度噪声(RIN)和相位噪声。这对确保光学系统的稳定工作具有非常重要的意义。在中国,光隔离器的需求量每年高达数千万甚至上亿只。光隔离器不仅被广泛应用于骨干网、城域网、接入网等光纤通信系统中,还被大量用于光互连模块等数据通信系统中,具有不可替代的作用。

目前,商用的非互易光学器件主要是基于磁光材料[稀土掺杂钇铁石榴石(RIG)]的法拉第旋光效应制备

的,如图1所示^[1]。其工作原理是:利用光在磁性介质中的法拉第旋光效应,先使正向传播的线偏振激光偏振方向旋转45°,然后再通过检偏器;由于法拉第旋光效应的光学非互易性,反射光的偏振状态不会回到入射光的偏振方向,而会继续旋转45°与起

偏器偏振方向正交,从而实现消光。这一器件的核心材料是实现法拉第旋光的磁光晶体厚膜RIG。这一材料主要采用液相外延方法在钆镓石榴石(GGG)基片上生长。由于实现45°旋光需要生长数百微米厚的RIG薄膜材料,工艺难度和材料成本都很



▲图1 基于法拉第旋光原理的磁光隔离器^[1]

基金项目:国家重点基础研究专项基金(2018YFE0201200、2017YFA0206401、2018YFA0704402、2018YFB2201801)、国家自然科学基金(61975065)

高,且目前只有美国(II-VI)和日本(Granopt/信越)的少数公司掌握这种技术,这导致中国相关材料和元器件长期依赖美、日进口,已成为光电子领域的一个“卡脖子”问题。

近年来,随着集成光模块、硅基光电子芯片技术的进步,光通信/光互连系统均逐渐向更小尺寸、更低成本、更高性能的光电集成芯片发展。其中一个迫切的需求是实现非互易光学材料和器件的平面集成化、小型化和低成本化。围绕这一难题,尽管全球开展了30余年的研究,但仍没有完全攻克这一难题。虽然近年来有学者提出了一些非磁性的解决方案,如非线性效应^[2-4]、时空调制^[5-6]等,但是器件带宽、功耗、功率依赖等科学问题尚在基础研究层面,离实际应用还有一定的距离。因此,基于磁光效应的集成非互易器件仍是目前最接近实际应用的技术方向。这一领域的研究面临的主要困难在于3个方面:(1)高性能磁光材料难以实现半导体集成。RIG等磁光薄膜材料与Si等半导体材料晶格的失配(钇铁石榴石(YIG):12.4 Å;Si:5.4 Å)、热失配(YIG:约 10^{-5} K^{-1} ;Si:约 $2.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$),导致材料难以实现硅基外延,材料磁光效应弱,损耗高。(2)法拉第旋光效应难以应用于磁光波导器件。由于波导器件对于横电模(TE)/横磁模(TM)存在不同的传播常数,即器件造成的双折射,使磁光波导无论多长都不能实现 45° 的旋光^[7]。(3)工艺兼容困难。磁光材料需要高温,并且存在Fe等半导体前端工艺不兼容的元素,这造成了芯片制备过程工艺整合的困难。这些问题导致了非互易光学器件较少能够实现半导体集成的光学器件,被称为集成光学的根本性难题之一^[5]。

世界各国在集成磁光非互易器

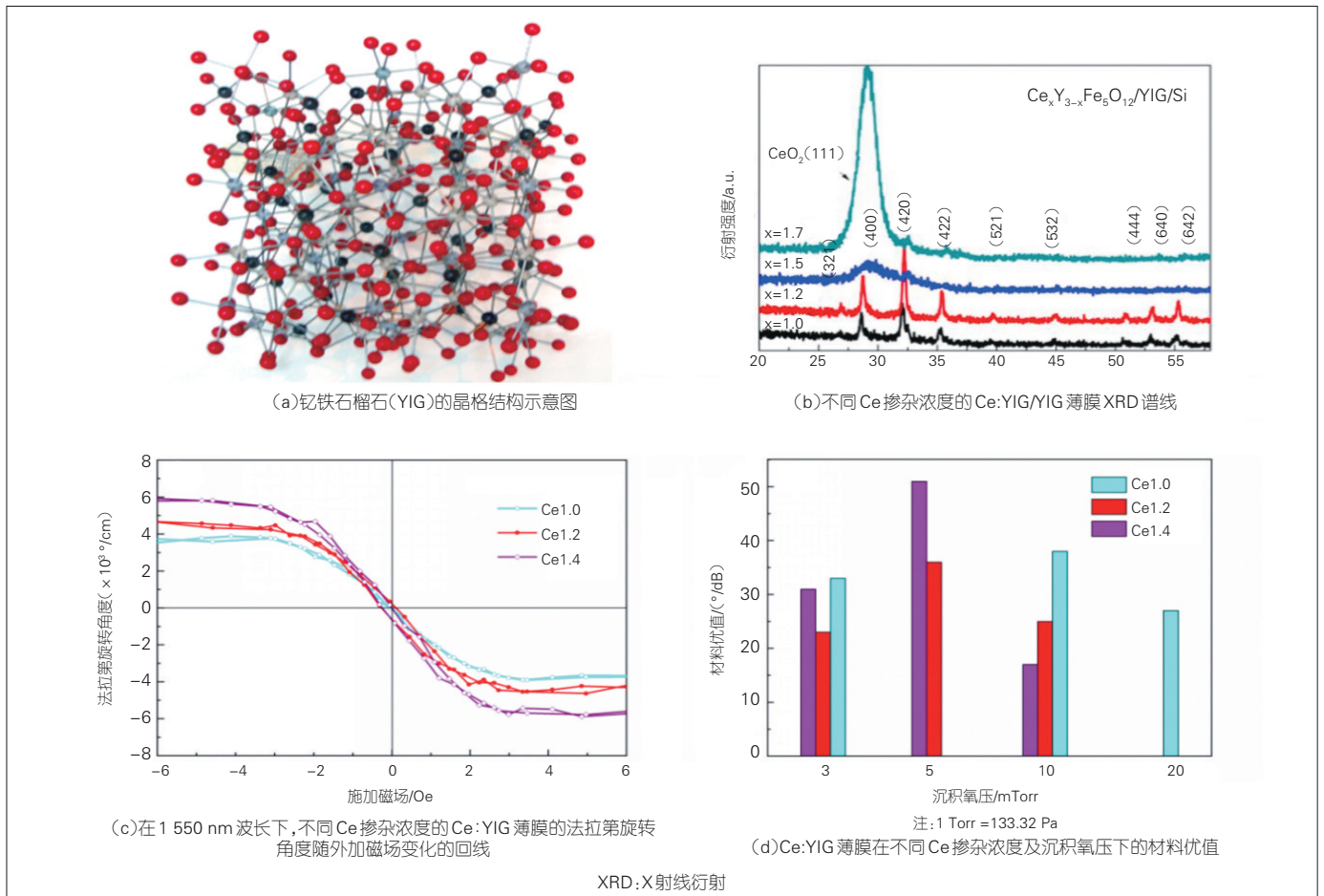
件领域的研究取得了长足的进展。东京工业大学MIZUMOTO T.教授是这一领域的先驱。他首先采用磁光非互易移相原理解决波导器件中法拉第旋光效应弱的问题,并采用晶圆键合的方法克服高性能磁光薄膜材料的半导体集成困难,实现了TM和TE模式宽带磁光隔离器的硅基集成,并使器件隔离度达到了30 dB,插损为8~10 dB^[8]。美国加州大学圣芭芭拉分校(UCSB)的BOWERS J. E.教授也采用这一方法研究隔离器集成技术。他采用金属电极的电流来提供局域磁场,避免了外加偏置磁场的问题,使器件性能与MIZUMOTO T.教授小组的相当^[9]。另外,欧洲微电子中心(IMEC)的研究者也采用晶圆键合的方法研究隔离器的硅基集成技术。其区别是采用苯并环丁烯(BCB)作为键合媒质。由于BCB减少了模式在磁光材料中的限制因子,他们实现的器件相对更大一些,性能也略低于东京工业大学和UCSB研究小组的器件性能^[10]。采用晶圆键合技术路线的优势,在于可以利用高性能的外延单晶RIG薄膜,在工艺兼容上也相对容易处理。然而,RIG与硅波导界面质量难以控制(实际上造成了6 dB左右的插损),并且器件尺寸大,结构设计受限,同时无法满足隔离器需求量大产能需求。采用单片集成,即直接在硅上沉积磁光材料的方法,可以解决上述问题。开展这一方面研究的小组,主要有中国电子科技大学的毕磊教授小组、美国麻省理工学院的ROSS C. A.教授和HU J. J.教授小组。这些小组主要采用在硅基光波导中沉积Bi掺杂YIG或Ce掺杂YIG薄膜的方式,实现材料和器件集成。目前这些小组已实现宽带和窄带光隔离器的硅基单片集成^[11-13]。美国明尼苏达大学的STADLER B.教授小组和英

国格拉斯哥大学的HUTCHINGS D.教授小组,也都采用沉积方法制备硅基集成磁光薄膜。他们采用准相位匹配的方法,制备了波导法拉第旋光器件,并克服了结构双折射带来的旋光小的问题^[14]。然而目前还没有完整的隔离器研制和性能报道。虽然采用单片集成可以实现大规模并行制备,使成本显著降低,但仍存在的几个难点:(1)材料性能比单晶外延薄膜较差,限制了器件的整体性能;(2)仍须发展新的器件设计并解决损耗、偏振依赖和带宽问题;(3)还须解决材料沉积与模块制成工艺的兼容整合问题。

本文中,我们主要综述本小组近5年来在这一领域的研究情况。通过材料缺陷结构-性能关系的理论分析和工艺控制,我们研制接近单晶质量的硅基集成磁光薄膜。基于磁光非互易移相原理,我们设计并制备了TE/TM模式的磁光隔离器件。研制的硅基集成光隔离器件的尺寸、成本都显著优于分立器件,性能接近分立器件水平。我们认为,单片集成磁光薄膜和非互易光学器件都可以获得较高性能,有望在不久的将来应用在光电子芯片中。

1 硅基集成高价值磁光薄膜材料

作为磁光非互易器件的材料基础,磁光材料很大程度上决定了磁光非互易光学器件的最终性能,因此磁光材料的生长是制备磁光非互易光学器件的关键技术。以铈(Ce)和铋(Bi)为代表的稀土金属掺杂的YIG,在通信波段有较高的透过率和较强的磁光效应。它们是制备磁光非互易光学器件的理想材料体系。YIG的晶格结构如图2(a)所示,其1个晶胞由8个 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 单元组成,存在十二面体(c位)、八面体(a位)、四面体(d



▲ 图2 YIG晶格及其掺杂物性能

位)3种空位类型。其中,c位间隙最大,由稀土金属离子占据;a位和d位由Fe离子占据。研究表明,通过在十二面体间隙位置引入Ce离子,可以大幅提高材料的磁光性能。在目前已开展的 $Ce_1Y_2Fe_5O_{12}$ 薄膜的研究基础上,我们基于理论计算和工艺优化,探索了提高材料优值的途径。

铈掺杂钇铁石榴石(Ce:YIG)薄膜的磁光效应,强烈依赖于 Ce^{3+} 在钇铁石榴石晶格中的离子浓度。为了优化器件性能,使材料达到更高旋光, Ce^{3+} 的固溶度需要提高,然而,实际上提高YIG晶格中 Ce^{3+} 离子的浓度是较为困难的,这是因为 Ce^{3+} 离子的半径远大于 Y^{3+} 离子,从而造成 Ce^{3+} 离子倾向于析出形成热力学更稳定但对磁光无贡献的 CeO_2 相。

针对上述问题,我们首先采用密度泛函理论(DFT+U)的方法,来计算氧空位效应对磁光特性的影响。我们发现, $Ce(4f)-Fe(3d)$ 的电荷转移是Ce:YIG在近红外产生吸收的主要原因,同时氧空位的存在会使 Ce^{3+} 离子的晶格场发生改变。提高 Ce^{4+} 离子的生成焓,抑制 Ce^{3+} 转化为 Ce^{4+} ,可以避免 CeO_2 和 Ce^{4+} 离子的生成。在较低氧气压下,虽然Ce:YIG薄膜结晶性良好,但是由于薄膜中氧空位浓度较高,由第一性原理计算可知,氧空位可导致邻近 Fe^{3+} 离子被还原成 Fe^{2+} ,从而增强了薄膜的光学吸收。当氧气压过高时,Ce、Fe元素倾向于形成更加稳定的 CeO_2 和 Fe_2O_3 相,导致材料磁光效应减弱。这说明氧分压对材料的磁光和光学性能有重要

影响^[15]。

基于上述分析,我们采用激光脉冲沉积技术,分别在硅基底上生长不同组分的 $Ce_xY_{3-x}Fe_5O_{12}/YIG$ 薄膜,并通过X射线衍射仪(XRD)表征其结晶性,如图2(b)所示。当Ce含量为1.0及1.2时,薄膜可以结晶为石榴石相。当Ce含量达到1.5时,较大的非晶衍射鼓包会出现;进一步增加Ce含量至1.7时,主要衍射峰将对应 CeO_2 相,此时薄膜无法完全结晶为石榴石相。随后,通过改变外加磁场,在1 550 nm的波长下,测试我们Ce掺杂浓度分别为1.0、1.2、1.4样品的法拉第旋转角度。测试结果如图2(c)所示。在此波长下, $Ce_{1.4}Y_{1.6}Fe_5O_{12}$ 材料在磁化到饱和的情况下具有 $-6\ 000$ ($^\circ$)/cm的法拉第旋转角度。因此, $Ce_{1.4}Y_{1.6}Fe_5O_{12}$ 是

构建硅基集成磁光非互易器件较为理想的掺杂材料。

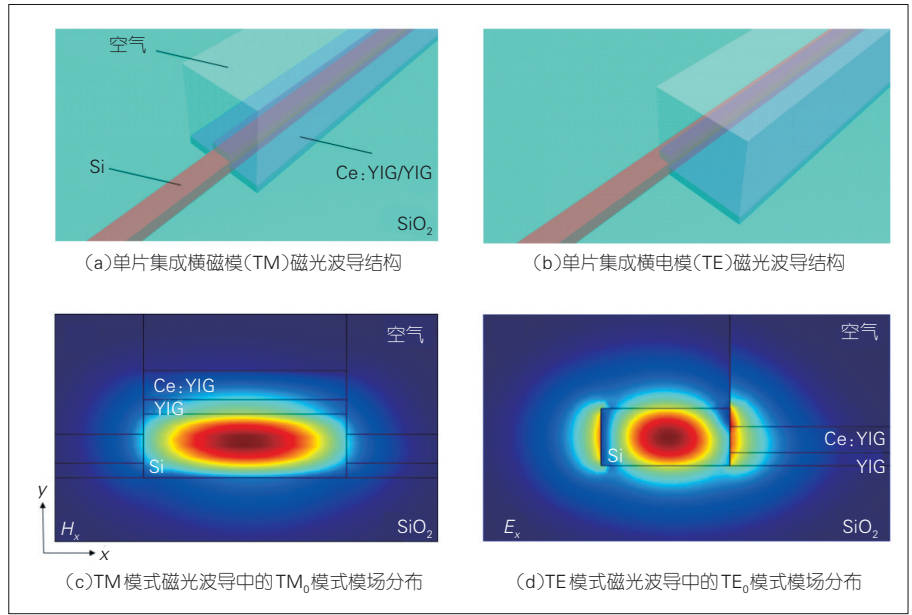
我们进一步研究氧分压对材料优值的影响。图2(d)给出了Ce:YIG薄膜在不同Ce掺杂浓度及沉积氧分压下的材料优值。从图中可以看出,同一Ce掺杂浓度的Ce:YIG薄膜存在一个最优的沉积氧分压。当小于该氧分压时材料损耗增加,大于该氧分压时材料法拉第旋光降低。通过寻找 $Ce_{1.4}Y_{1.6}Fe_5O_{12}$ 最佳氧压值,我们在666.6 kPa氧压下得到 $Ce_{1.4}Y_{1.6}Fe_5O_{12}$ 薄膜最大材料优值为 $51 (^{\circ})/dB$,该值优于 $Ce_1Y_2Fe_5O_{12}$ 薄膜的 $37.5 (^{\circ})/dB$ 。以 $Ce_{1.4}Y_{1.6}Fe_5O_{12}$ 为基础,可以设计制备损耗更低、尺寸更小的磁光非互易光学器件。

2 集成磁光隔离器的设计

基于磁光非互易移相效应可以构建高性能的集成光隔离器。这一效应是指,在与磁光波导中光传播方向垂直的方向施加磁场,使光在正反向传输时的传播常数不同。通过波导构建马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构、微环谐振器(MR)结构或多模干涉仪(MMI)器件结构等,可以利用这一效应实现低损耗、高隔离度的集成磁光隔离器。

2.1 单片集成磁光波导结构

基于单片集成技术路线设计的TM及TE模式磁光波导结构如图3(a)和图3(b)所示。TM模式磁光波导是由硅波导及沉积在波导上表面的磁光材料薄膜(YIG/CeYIG)组成的。波导中的 TM_0 模式模场分布如图3(c)所示。在磁光材料层,由于存在沿y方向梯度分布的 H_x 场分量,在施加外磁场后,波导中正反向传播的 TM_0 模式传播常数会不同,即能够实现TM模式的非互易相移。其非互易



▲图3 单片集成磁光波导结构及其模场分布

相移数值可由微扰理论公式计算得到:

$$\Delta\beta(TM) = \frac{2\beta^{TM}}{\omega\epsilon_0 N} \iint \frac{\gamma}{n_0^4} H_x \partial_y H_x dx dy, \quad (1)$$

其中, ω 是光的频率, ϵ_0 是真空介电常数, γ 是磁光材料介电常数张量的非对角元, n_0 是磁光材料的折射率。而TE模式的非互易相移计算公式为:

$$\Delta\beta(TE) = \frac{2\omega\epsilon_0}{\beta^{TE} N} \iint \gamma E_x \partial_x E_x dx dy. \quad (2)$$

公式(2)不为0的条件是,磁光材料中存在沿x方向梯度分布的 E_x 场分量,即需要面内方向磁光材料分布的不对称性。因此,磁光材料只能沉积于磁光波导单侧侧壁,波导中支持的 TE_0 模式模场分布如图3(d)所示。在完成磁光波导基本单元的设计后,我们还可以进一步进行磁光非互易器件的设计及优化。

2.2 MZI型磁光隔离器设计

MZI型磁光隔离器由两个3 dB耦合器和包含非互易波导及互易波导的两波导臂组成,其工作原理如图

4(a)所示。在光正向传输时,互易波导造成的两波导臂相位差为 $\pi/2$,同时非互易波导造成的两波导臂相位差为 $-\pi/2$,总相位差为0,两束光干涉相长可以正向透过;在光反向传输时,互易波导造成的两波导臂相位差仍为 $\pi/2$,但由于磁光非互易效应,此时非互易波导造成的两波导臂相位差为 $+\pi/2$,总相位差为 π ,两束光干涉相消导致反向截至。传统MZI型磁光隔离器为使两臂磁光非互易相移相叠加,通常需要在两臂施加反向磁场。这增加了磁场集成的难度。此外,传统MZI型磁光隔离器还存在磁光波导长度较长、器件尺寸较大等问题。

基于上述问题,我们提出如图4(b)的优化设计^[12]。使用S型臂波导结构的好处包括两方面:一方面,S型臂波导结构可以使器件结构更为紧凑,大大减小器件的尺寸;另一方面,这一特殊的波导结构也使两波导臂中同时存在 $+z$ 方向和 $-z$ 方向传播的波导段,通过在两臂不对称的波导位置沉积磁光材料,在x方向上施加单向磁场即可实现两波导臂中磁光非

互易相的叠加,大大降低了施加磁场的难度。

2.3 TM 模式微环型磁光隔离器设计

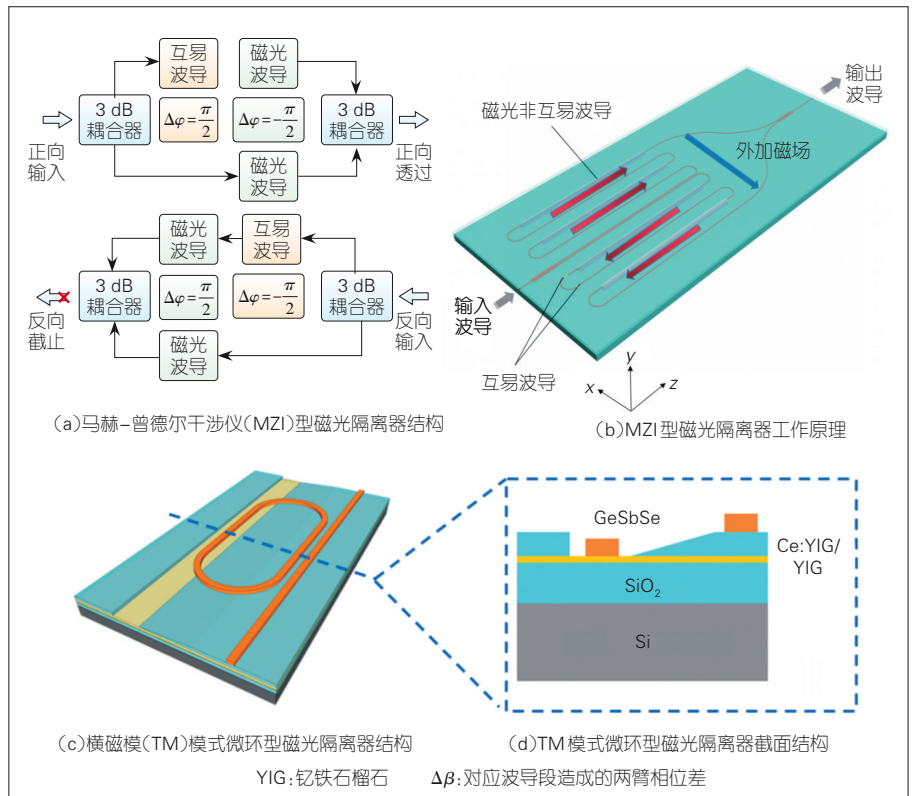
微环型隔离器是根据在正反向传输时,微环的谐振波长不同所构建的。正向传输时,由于相位不匹配,能量不能耦合进微环,光可以正向透过;反向传输时,满足微环的谐振条件,能量进入微环并通过散射及材料吸收耗散,导致光反向截止。通过对单片集成的TM模式微环型磁光隔离器进行损耗分析,我们发现器件损耗的两大主要来源:(1)沉积于磁光波导侧壁的Ce:YIG/YIG磁光材料,相较于在波导上表面结晶性较差,不仅不能增强磁光非互易移相效应,反而会造成相当大的吸收损耗;(2)单模波导与磁光波导连接处的模式失配,会造成大量的耦合损耗。

为消除上述两大损耗来源,我们设计了如图4(c)所示的TM模式微环型磁光隔离器^[13]。在Ce:YIG材料上生长GeSbSe材料,并通过微细工艺将其图形化作为波导芯层,可使磁光材料仅出现在特定位置波导的下表面,进而消除侧壁磁光材料带来的吸收损耗。同时,我们采用灰度曝光,构建如图4(d)所示的垂直绝热渐变结构,以匹配单模波导与磁光波导中的模式,从而消除由于模式失配造成的耦合损耗。

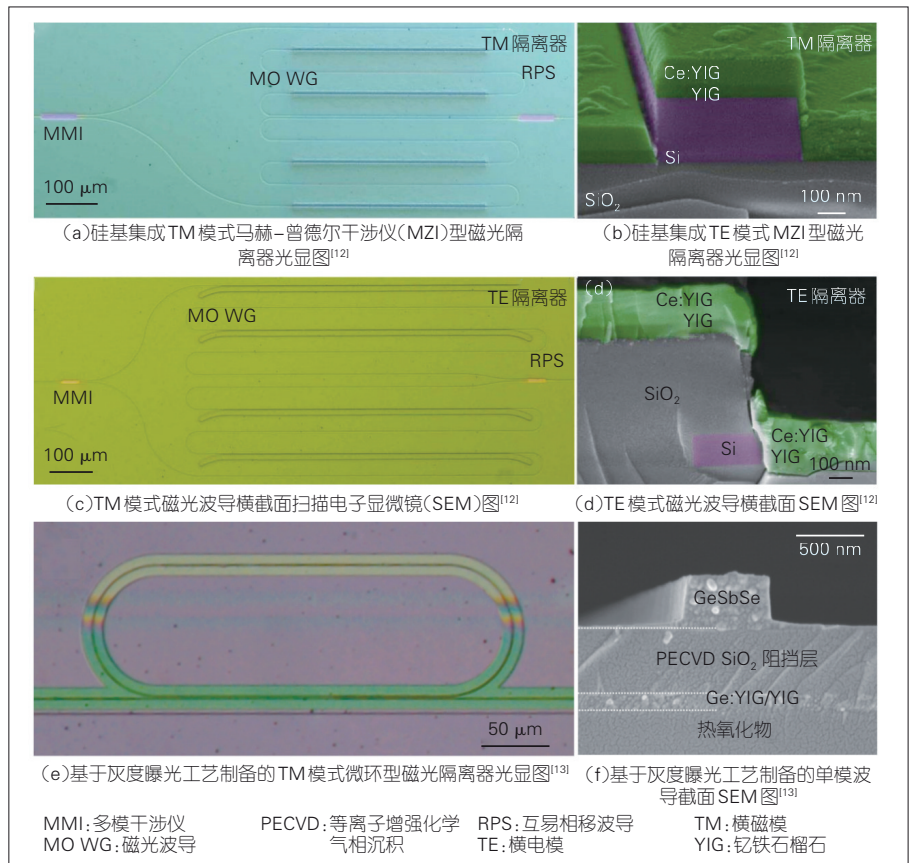
3 硅集成磁光隔离器性能

3.1 硅集成磁光隔离器结构表征

TM及TE模式MZI型器件光显图如图5(a)和图5(c)所示。器件两端使用基于多模干涉原理的3 dB耦合器,其中长条形区域为磁光材料沉积窗口结构。图5(b)和图5(d)为TM及TE模式磁光波导截面的扫描电子显



▲图4 优化设计的MZI型磁光隔离器和TM模式微环型磁光隔离器结构^[13]



▲图5 硅集成磁光隔离器的结构表征

MMI:多模干涉仪 MO WG:磁光波导 PECVD:等离子增强化学气相沉积 RPS:互易相移波导 TE:横电模 TM:横磁模 YIG:钇铁石榴石

显微镜(SEM)图,其中紫色为Si波导结构,绿色为磁光材料薄膜。磁光波导实际结构与仿真模型相吻合^[12]。

图5(e)为基于灰度曝光工艺制备的TM模式微环型磁光隔离器光显图,其中绿色区域SiO₂下包层,黄色区域对应Ce:YIG下包层,两层通过垂直渐变结构过渡连接。图5(f)为SiO₂下包层区域波导横截面示意图^[13]。

3.2 硅集成磁光隔离器性能表征

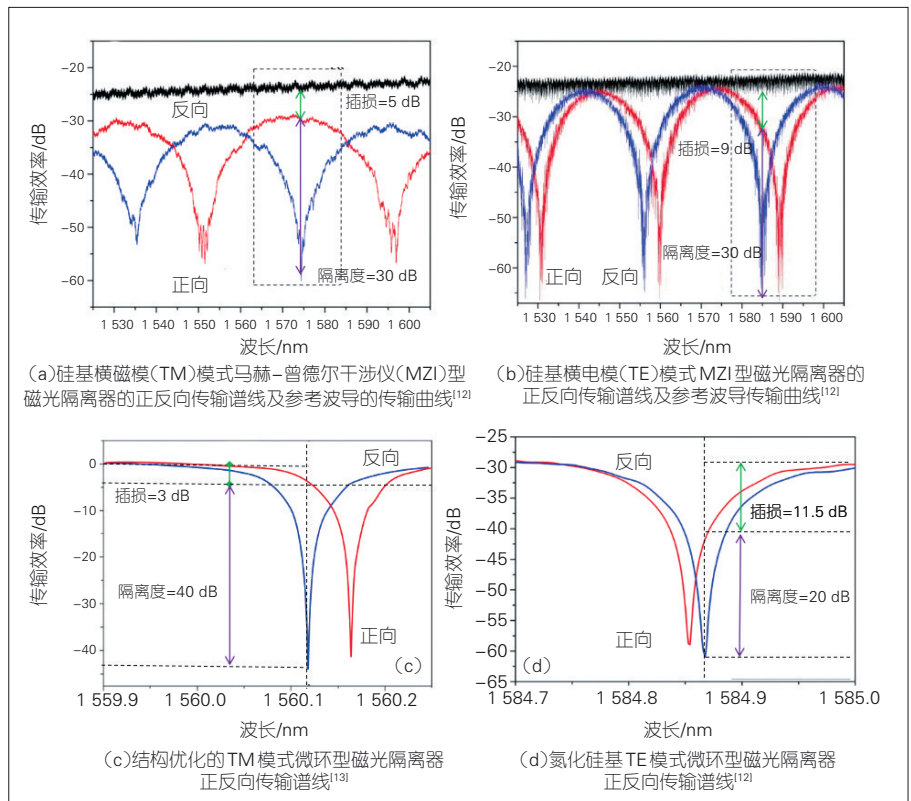
在完成器件制备后,我们进行硅基集成的TM及TE模式MZI型和微环型磁光隔离器的性能表征。

对于MZI型磁光隔离器的优化设计,我们给出了在红外波段测试TM及TE模式器件的正向及反向传输曲线,如图6(a)和图6(b)所示。其中,黑色曲线为用于判断插入损耗的直波导传输曲线,红、蓝曲线分别代表器件的正向及反向传输谱线。TM模式器件在1574.5 nm波长处,插入损耗约为5 dB,隔离度约为30 dB。TE模式器件在1588 nm波长处插入损耗约为9 dB,隔离度约为30 dB。由于器件加工误差,器件的正向传输最高点与反向传输最低点不在同一波长,因此引入了额外的插入损耗^[12]。对于采用基于灰度曝光工艺的TM模式微环型磁光隔离器,传输

谱线如图6(c)所示,其中,红色、蓝色曲线分别代表器件的正向及反向传输谱线。器件在谐振波长工作时,相应的插入损耗仅为3 dB,隔离度高达40 dB^[13]。同样地,通过侧壁沉积的工艺路线,我们在氮化硅基底上制备TE模式微环型磁光隔离器,其性能如图6(d)所示。该器件在谐振波长工作时,插入损耗约为11.5 dB,隔离度为20 dB^[12]。

3.3 同类型器件间的性能对比

表1给出了本工作与其他同类宽带磁光隔离器的性能对比。对于TM模式宽带磁光隔离器,我们证明了单片集成的可行性,并获得了不错的器件性能。TE模式宽带磁光隔离器目前仍存在较高的插入损耗,这主要是由器件加工误差造成的。因此,急需进一步的设计和工艺优化,以进一步提高相关器件的性能。



▲图6 硅集成磁光隔离器的性能表征

▼表1 红外波段宽带磁光隔离器性能对比

单位	隔离器类型	制备工艺	工作偏振	器件尺寸/mm	隔离度/dB	插入损耗/dB
东京工业大学 ^[16]	硅基马赫-曾德尔干涉仪型	晶圆键合	TM	1.5 × 1.5	27	13
根特大学 ^[10]	硅基马赫-曾德尔干涉仪型	晶圆键合	TM	4 × 4	25	8
根特大学 ^[17]	硅基马赫-曾德尔干涉仪型	晶圆键合	TE	4 × 4	32	22
加州大学圣芭芭拉分校 ^[9]	硅基马赫-曾德尔干涉仪型	晶圆键合	TM	1.7 × 0.3	30	8
格拉斯哥大学 ^[14]	硅基法拉第旋转器	直接沉积	TE/TM	4 (一维)	11	4
电子科技大学 ^[12]	硅基马赫-曾德尔干涉仪型	直接沉积	TM	0.94 × 0.33	30	5
电子科技大学 ^[12]	硅基马赫-曾德尔干涉仪型	直接沉积	TE	0.87 × 0.34	30	9

TE: 横电模 TM: 横磁模

4 结束语

硅基磁光非互易器件的集成是硅基光电子技术中的重点和难点。器件性能的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。提高 Ce:YIG 磁光材料薄膜中 Ce 的掺杂比,同时控制材料沉积过程中的氧压,可以进一步提高材料优值,这将为设计小型化、高性能的集成磁光非互易器件提供材料基础。在器件设计中,尽量避免器件结构带来的模式失配和不必要的磁光材料吸收,可以大幅减小器件整体插入损耗。此外,合理优化器件结构可以有效减小器件尺寸。未来面临的最大挑战是磁光器件的工艺兼容性问题,因此需要发展后端兼容的材料单片集成方法。基于这一技术的发展现状,我们相信,低成本、小型化、高性能的硅基集成磁光隔离器,有望在不久的将来走向实际应用。

参考文献

- [1] BI L. Materials for nonreciprocal photonics [J]. MRS bulletin, 2018, 43(6): 408–412. DOI: 10.1557/mrs.2018.120
- [2] FAN L, WANG J, VARGHESE L T, et al. An all-silicon passive optical diode [J]. Science, 2012, 335(6067): 447–450. DOI: 10.1126/science.1214383
- [3] SHI Y, YU Z F, FAN S H. Limitations of nonlinear optical isolators due to dynamic reciprocity [J]. Nature photonics, 2015, 9(6): 388–392. DOI: 10.1038/nphoton.2015.79
- [4] PENG B, ÖZDEMİR Ş K, LEI F C, et al. Parity-time-symmetric whispering-gallery microcavities [J]. Nature physics, 2014, 10(5): 394–398. DOI: 10.1038/nphys2927
- [5] YU Z F, FAN S H. Complete optical isolation created by indirect interband photonic transitions [J]. Nature photonics, 2009, 3(2): 91–94. DOI: 10.1038/nphoton.2008.273
- [6] SOUNAS D L, ALÙ A. Non-reciprocal photonics based on time modulation [J]. Nature photonics, 2017, 11(12): 774–783. DOI: 10.1038/s41566-017-0051-x
- [7] LIU Q, GROSS S, DEKKER P, et al. Competition of Faraday rotation and birefringence in femtosecond laser direct written waveguides in magneto-optical glass [J]. Optics express, 2014, 22(23): 28037–28051. DOI: 10.1364/oe.22.028037
- [8] SHOJI Y, MIZUMOTO T. Magneto-optical non-reciprocal devices in silicon photonics [J]. Science and technology of advanced materials, 2014, 15(1): 014602. DOI: 10.1088/1468-6996/15/1/014602
- [9] 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. DOI: 10.1364/ol.42.004901
- [10] GHOSH S, KEYVANINIA S, VAN ROY W, et al. Ce: YIG/silicon-on-insulator waveguide optical isolator realized by adhesive bonding [J]. Optics express, 2012, 20(2): 1839–1848. DOI: 10.1364/oe.20.001839
- [11] BI L, HU J 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
- [12] 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. DOI: 10.1364/optica.6.000473
- [13] 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. DOI: 10.1021/acsp Photonics.8b01257
- [14] ZHANG C, DULAL P, STADLER B J H, et al. Monolithically-integrated TE-mode 1D silicon-on-insulator isolators using seedlayer-free garnet [J]. Scientific reports, 2017, 7: 1–8. DOI: 10.1038/s41598-017-06043-z
- [15] LIANG X, XIE J L, DENG L J, et al. First principles calculation on the magnetic, optical properties and oxygen vacancy effect of $Ce_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$ [J]. Applied physics letters, 2015, 106(5): 52401. DOI: 10.1063/1.4907413
- [16] SHOJI Y, SHIRATO Y, MIZUMOTO T. Silicon Mach-Zehnder interferometer optical isolator having 8 nm bandwidth for over 20 dB isolation [J]. Japanese journal of applied physics, 2014, 53(2): 22202. DOI: 10.7567/jjap.53.022202
- [17] 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 journal, 2013, 5(3): 6601108–6601108. DOI: 10.1109/jphot.2013.2264275

作者简介



刘书缘, 电子科技大学在读硕士研究生; 主要研究领域为集成非互易器件结构优化及新型集成非互易器件的设计; 发表论文 1 篇, 申请中国发明专利 2 项。



邓龙江, 电子科技大学国家电磁辐射控制材料工程技术研究中心主任、长江学者特聘教授; 主要从事新型电磁波吸收剂及吸波材料、红外低发射率及可变发射率薄膜、微波磁性材料等方面的研究工作; 发表论文 237 篇, 获授权中国发明专利 4 4 项。



毕磊, 电子科技大学教授、博士生导师, 国家自然科学基金委优秀青年基金获得者; 研究领域为微纳尺度下光与材料的相互作用机理、新型功能光电薄膜材料及器件集成技术; 在《Nature Photonics》《ACS Nano》《Optica》等期刊发表学术论文 90 余篇; 获授权美国专利 2 项、中国发明专利 5 项。