

弯曲波导研究进展及其应用

高峰^{1,2}, 秦莉¹, 陈泳屹^{1*}, 贾鹏¹, 陈超¹, 梁磊¹, 陈红^{1,2}, 张星¹, 宁永强¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室, 吉林长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文主要分析了弯曲波导损耗机理, 包括传输损耗、辐射损耗、模式转换损耗。重点综述了设计低损耗弯曲波导的方法, 包括波导材料、弯曲波导的曲线形状、波导种类、脊型波导的宽度、脊高、弯曲半径、模场分布、弯曲波导曲线形状和其他新型波导结构等。简要概括了近年来设计和制备低损耗弯曲波导的代表性工作。介绍了弯曲波导在集成光学中的应用。通过对弯曲波导的损耗及耦合机理理论不断完善, 实现光在较小弯曲半径的低损耗传输, 从而提高集成光学的集成度是弯曲波导今后的发展趋势。

关键词: 弯曲波导; 集成光学; SOI; 低损耗波导

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20171002.0176

Research progress of bent waveguide and its applications

GAO Feng^{1,2}, QIN Li¹, CHEN Yong-yi^{1*}, JIA Peng¹, CHEN Chao¹,
LIANG Lei¹, CHEN Hong^{1,2}, ZHANG Xing¹, NING Yong-qiang¹

(1. *State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail: chenyy@ciomp.ac.cn*

Abstract: The loss mechanism of bent waveguide including the bending loss, propagation loss, radiation loss and the loss of mode conversion are theoretically analysed in this paper. It focuses on the review of the design of low loss bent waveguide, including materials, the shape of bent waveguide, strip or rib waveguide, the width, height and radius of the bent waveguide, the mismatch of mode, the shape of the curve and other new

收稿日期: 2016-10-12; **修订日期:** 2016-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61234004, No. 11404327, No. 61306086, No. 11404327); 国家科技重大专项资助项目 (No. 2014ZX04001151); 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20150203007GX, No. 20140101172JC, No. 20140520132JH); 长春市重大科技攻关计划资助项目 (No. 14KG006); 长春市科技局计划资助项目 (No. 15SS02)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61234004, No. 11404327, No. 61306086, No. 11404327); National Science and Technology Major Project of China (No. 2014ZX04001151); Jilin Province Science and Technology Development Plan Project of China (No. 20150203007GX, No. 20140101172JC, No. 20140520132JH); Changchun City Major Scientific Research Project of China (No. 14KG006); Changchun Science and Technology Bureau Project (No. 15SS02)

structures. The representative works on the design and fabrication of low loss bent waveguides are summarized. The development status of the low loss bent waveguide is analysed and its applications in integrated optical are introduced. The future developing trend of bent waveguide is to develop the theory of the loss characterization and wave coupling, and to realize low bending loss with very small bending radii for high density integration in Photonics Integrated Circuits(PICs).

Key words: bent waveguide;integrated optical;Silicon-on-insulator(SOI);low-loss-waveguide

1 引言

集成光学(Integrated Optical)是研究光学元件集成化的一门科学,实现同一芯片上集成不同功能的光学元件(System On a Chip SOC)^[1]。集成光学分为光-光集成(Photonic Integrated Circuit, PIC)和光-电集成(Opto-Electronic Integrated Circuit, OEIC)^[2]。相比传统的光学系统体积大、稳定性不好、光束准直难等缺点,集成光学在同一芯片集成不同功能的器件,具有体积小、结构紧凑、抗干扰能力强,稳定性强、寿命长等优势^[3]。集成光学在100G网络、光互连、波分复用系统等领域有着重要应用前景^[4-6]。

在集成光学中,波导连接不同的光学组件,实现光传递。依据波导的几何形状,波导可分为弯曲波导和直波导。弯曲波导可以实现连接非共线光学组件,改变光束的传播方向^[7],特别是小尺寸、低损耗的弯曲波导,可提高集成光学的集成度并降低器件尺寸和成本^[8]。

目前,在集成光学中制备器件所用材料有不同的体系,主要有SOI(silicon-on-insulator)^[9]、InP^[10]、SiO₂^[11]、聚合物^[12]等。这些材料各具特色,制备的器件各具优势。基于InP材料的集成光学器件,具有折射率差值大,器件尺寸小、易实现有源器件和无源器件的集成的优势,但是由于其波导侧壁损耗比较大并且晶圆成本较高不利于大规模制备;基于SiO₂的集成光学器件,具有传输损耗小,和光纤模式匹配好的优点,但是其与空气折射率差较小不利于制备弯曲波导,并且不能用于制备有源器件,限制了其在光学集成中的发展。基于聚合物的集成光学器件,具有低损耗、双折射率小、色散小、高热光系数等优点,但是其易老化不利于集成光学器件的稳定性。

随着SOI材料的传输损耗进一步降低(0.1 dB/m)^[13-16],SOI材料成为制备弯曲波导热点材料^[17]。相比其他材料,SOI材料的优势^[18-21]:(1)芯层材料和盖层材料折射率相差大(High Index Contrast, HIC)($n_{\text{Si}} = 3.45$ 、 $n_{\text{SiO}_2} = 1.46$, $\Delta n \approx 2$),光限制能力强,可减少弯曲部分辐射损耗,实现结构紧凑的光波导器件^[22-23];(2)具有优良的电学性质和光学性质;(3)与集成电路CMOS工艺兼容,易实现规模化生产^[24-25];(4)硅产量丰富、价格便宜。基于上述优势,SOI材料为光学集成提供了良好的平台^[26-27]。因此,本文主要围绕基于SOI材料的低损耗弯曲波导设计方案进行综述。

弯曲波导是提高集成光学集成度的重要组件。当传输损耗低于一定阈值时,其他形式的损耗将起主导作用。因此,实现小尺寸、低损耗的弯曲波导,需要分析光束在弯曲波导部分的模式传输特性和损耗特性,降低其他形式损耗。

本文主要分析了弯曲波导的损耗机理以及重点综述了低损耗弯曲波导部分损耗的设计方案和发展现状。简要概括了近年来设计制备低损耗弯曲波导的代表性工作,介绍了弯曲波导在集成光学中重要作用及其应用。对弯曲波导在集成光学中的发展趋势和应用前景进行了展望。

2 弯曲波导损耗机理

弯曲波导部分损耗主要可归纳为3种形式^[28-29],即传输损耗(Propagation Loss)、辐射损耗(Radiation Loss)、模式转换损耗(Loss of Mode Conversion)。

2.1 传输损耗

波导是将光限制在波导层中传播的光学组件。光在理想波导材料的中传播,不会产生能量

损失。但由于材料本身特性和生长缺陷以及工艺等原因,光在传输过程中将会出现一定损耗,即传输损耗。传输损耗主要有两个方面因素:吸收损耗和散射损耗。

吸收损耗主要是由三部分组成:由材料缺陷引起的损耗,带边吸收损耗和自由载流子损耗。由材料缺陷引起的损耗主要是由于材料的生长过程中,产生一定程度缺陷(点缺陷、面缺陷等),将会导致光被吸收而引起损耗。带边吸收损耗是由于半导体材料能带并非完全简并状态而产生的吸收损耗。自由载流子吸收损耗是基于双光子吸收现象,产生光生载流子,从而引起自由载流子吸收作用产生的损耗。

自由载流子吸收是吸收损耗主要原因,特别是对电注入方式控制光强的电光调制器件。器件在稳定工作下,光生载流子寿命变大,载流子浓度越大,自由载流子吸收损耗越大,调制深度越大,相应速度较慢。因此,减少自由载流子寿命是减少自由载流子吸收损耗的有效方式^[30-31]。

目前,通过减少自由载流子寿命方式降低波导损耗的主要两种方式:(1)减少波导尺寸。2005年,Dimitropoulos. D 等人^[32]分析载流子寿命与波导尺寸的关系,即减少波导宽度,会减少载流子寿命,降低吸收损耗。但当波导宽度减少时,引起散射损耗增大和耦合效率降低,增加其他损耗。因此,此方式不能单一有效减少波导损耗。(2)在材料能带结构中引入复合中心能级。2006年,Liu, Y 等人^[33]将 He 离子注入 SOI 脊形波导的脊形区域,通过引入杂质离子复合中心,有效减少载流子寿命,降低吸收损耗。Hewitt. P. D. 等人^[34]分析含有金材料的波导结构,由于金在半导体材料中形成深能级,有效缩短载流子的寿命,降低波导的非线性损耗。

散射损耗(Scattering Loss)也是引起传输损耗重要原因。由于波导表面不平整或晶体材料中非点阵粒子作用,导致光在波导中传播时偏离原传播方向,从而引起光的能量损耗,即散射损耗。通常情况下,散射损耗主要分为两种:体散射损耗和表面散射损耗。体散射损耗,主要与材料缺陷(杂质原子、原子空位等点缺陷)相关。表面散射损耗主要是由于波导表面的不平整引起的光的散

射从而引发损耗。体散射损耗主要与材料制备过程相关,由于材料缺陷的产生具有随机性,通过优化生长手段可制备高质量的外延波导芯片,体散射损耗在散射损耗中作用可忽略不计。因此,散射损耗主要是由于表面散射损耗引起。

表面散射损耗主要与波导几何形状和波导的表面粗糙度相关。Grillot. F. 等人^[35]基于文献^[36]中平面波导散射损耗理论:波导宽度越大,波导的散射损耗越小。波导的表面粗糙度与制备工艺相关,如光刻版精细度、波导表面残留物、波导端面的光滑度、图形转移精确度、刻蚀精度和侧壁光滑程度等。目前,改善硅基波导表面粗糙度的有 3 种方法:(1)热氧化方法^[37]。热氧化处理后的硅基波导的散射损耗明显降低(< 0.1 dB/cm)。(2)氢气氛围下退火处理的方法。J. W. Lee 等人^[38]在氢氛围下对硅基波导热退火,其散射损耗降低到 0.8 dB/cm;(3)工艺优化。Liu. H. C. 等人^[39]优化刻蚀工艺,将波导表面粗糙度降低到 9.11 nm 以下;F. Gao 等人^[40]采用热氧化和氢氟酸处理方式,将波导表面粗糙度降低为 3 nm;Chabloz M. 等人^[41]采用多步制备宽深比大的波导,其表面粗糙度降低为 8 nm。通过研究单一波导结构变化,散射损耗与吸收损耗变化趋势相反。因此,为了获得低损耗单模波导,在满足单模条件前提下,需综合考虑两种损耗影响。

2.2 辐射损耗

光波导的辐射损耗理论体系已比较完善^[42-47]。通常情况下,辐射损耗(Radiation loss)的原因有 3 种:(1)光在波导传输过程中,由于光限制变弱,向周围盖层辐射能量而引起能量损耗,即模式泄露损耗或平板泄露损耗(Slab Leakage Loss)^[48];(2)当波导端面耦合时,引起的能量损耗;(3)由于波导偏折或弯曲,光不能完全被限制在波导中而引起的能量损耗^[49]。

光在波导中的传输模式可分为导模和辐射模。导模是指大部分光限制在波导的芯层中,形成导波;辐射模是指光不能被完全限制在芯层中,不断向包层辐射,形成辐射波。波导的芯层有效折射率 n ,当有效折射率 n 大于波导两侧的包层折射率时,导模能够在波导中传输;当 n 小于等于包层折射率的时候,导模不能够被包层完全限制

住,光能量分散到包层中,辐射模将会产生,此时称之为导模截止。当光线入射角在芯层的上界面发射全发射而下界面没有发生全反射,这时光在传输过程中不断向下包层辐射,称之为平板泄露损耗。平板泄露损耗是由于波导芯层的光限制能力变弱,导致光向包层泄露引起的损耗。平板泄露损耗主要存在于脊形波导结构。有效减少平板泄露损耗的方式是增大包层与芯层的折射率差值,即采用高折射率对比材料(如SOI)。在SOI材料中,当缓冲层的二氧化硅厚度大于500 nm时,可有效地阻止光向衬底中泄露。

波导端面耦合时,由于反射等原因,会引起波导界面的模式辐射,通过镀抗反射涂层可有效降低辐射损耗。当波导出现弯曲或偏折,光不能完全被限制在波导中,导模可能会转化成辐射模从而引起辐射损耗^[47]。

由于在波导弯曲处偏折较大,光不能完全限制在波导中,将会引起很大程度的辐射损耗。因此,弯曲损耗(Bending Loss)主要是由于辐射损耗引起^[43]。降低弯曲波导辐射损耗对减少弯曲波导损耗具有重要研究意义。

2.3 模式转换损耗

模式转换损耗(Loss of Mode Conversion)是指由于传播常数的改变,即传播常数的虚部的相位常数(phase constant)改变引起的损耗。在多模波导中,不同的模式具有不同传播常数,由于不同的传播常数的存在,导致光波导的光场限制能力变弱,导致辐射损耗增加。由于高阶模式的倏逝场衰减速度较慢,也造成其结构的体积较大。因此,在集成光学中多采用单模波导。模式转换损耗主要来自于模场之间的不匹配引起的损耗。在弯曲波导和直波导连接部分,由于模场之间的不匹配将会引起一定程度的损耗。在集成光学中,采用不同芯层厚度的材料制备器件,它们之间也存在严重的模场不匹配问题,为了减少模式转化之间的损耗,通常采用锥形光斑转换器^[50](spot-size-converters),其模式转换损耗可忽略不计^[51]。弯曲波导部分将会出现基模和高阶模之间耦合现象。由于模式之间耦合,会引起一定程度的损耗。

3 弯曲波导设计

1969年,Marcatili. E. A. J.^[52]第一次理论提出弯曲波导相关理论,随后关于弯曲波导损耗计算方法不断出现。目前,采用较为广泛的计算方法是保角变换法。1975年,Heiblum. M.和Harris. J. H.^[53]提出的保角变换的方法,即将弯曲波导转化成直波导后分析其传输特性。由于传输矩阵^[54]能够分析光束的透射率和反射率情况,1987年,Thyagarajan. K.等人^[55]将其引入,并与保角变换方法结合,分析弯曲波导的透射率。目前,计算弯曲波导损耗的主要算法是有限差分法(Finite-difference method, FDM)^[56]、有限元法(Finite-Element Method FEM)^[57]、模式匹配法(Mode-matching method, MOL)^[58]、光束传播法(Beam Propagation Method, BPM)^[59-61]。随着仿真软件和计算机软硬件的发展,对弯曲波导三维仿真更接近弯曲波导实际损耗情况。戴道铨等人^[60]采用全矢量有限差分法(full-vectorial finite-difference method, FV-FDM)方法分析弯曲波导损耗和波导宽度关系,对弯曲波导部分损耗估算误差小,为优化弯曲波导设计方案提供了有力的支持。

本小节将对降低弯曲波导损耗的设计方案综述,从波导材料,弯曲形状,波导种类,脊形波导的宽度、脊高、弯曲半径,模场分布,弯曲波导曲线形状和其他新型波导结构等七个方面分析降低弯曲波导损耗的方法。

3.1 波导材料

为提高弯曲波导部分的包层与芯层的折射率对比度,降低弯曲波导的辐射损耗,通常采用高折射率对比材料(High index contrast, HIC),如SOI^[62]、氮化硅/二氧化硅^[63]、有机物/二氧化硅^[64]等。与低折射率对比材料(如二氧化硅/空气)相比,HIC材料优势是制备的波导具有较薄的波导芯层厚度和较小的弯曲半径等^[62],劣势是传输损耗大(0.1 dB/cm^[65]),在光功率较高时,容易出现非线性效应。但通过采用高质量的波导材料和优化波导结构设计可减少非线性效应。

3.2 弯曲形状选择

弯曲波导的形状有直角 Z 形和弯曲 S 形(如图 1)。直角 Z 字形结构是在 90° 直角波导外侧刻蚀空气槽,既可以改变光的传输方向又可以增加折射率对比减少损耗。此种波导称为全内反射镜面(Total Internal Reflection Mirrors, TIR)^[66]。此方案可有效减少弯曲波导损耗,但劣势是需增加工艺步骤,限制其他角度在集成光学中应用。因此,弯曲 S 形的弯曲波导在集成光学中具有更重要的研究价值。

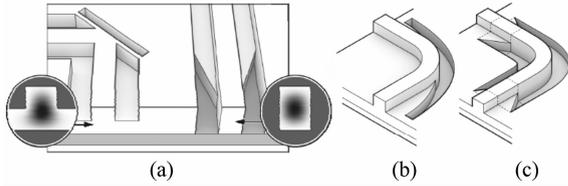


图 1 (a) TIR 形弯曲波导的单模脊形波导,弯曲部分损耗 $0.3 \text{ dB}/90^\circ$ 。也可以通过低损耗的锥形转换器与矩形波导相连接。(b) 带有沟槽部分的 90° 弯曲脊形波导。(c) 优化后的多模弯曲波导,从而减少弯曲波导尺寸和损耗^[67]

Fig. 1 Micron-scale silicon photonics platform. (a) single mode rib waveguides can be tightly bent by TIR mirrors with $0.3 \text{ dB}/90^\circ$ loss; they can be also be turned into strip waveguides by almost lossless converters; (b) a 90° ridge waveguide bend with a groove structure; (c) suitably designed bends of multimode strip waveguides to dramatically reduce bend size and losses^[67]

3.3 波导种类

相比多模波导,单模波导具有更小的泄漏损耗和弯曲损耗^[68-69]。通常情况下,依据矩形波导的单模条件,SOI 材料波导芯层厚度需小于 $1 \mu\text{m}$ ^[70]。但由于芯层尺寸过小,与光纤耦合过程中,由于尺寸不匹配,引起过大的耦合损耗,并且其传输损耗较大。当芯层厚度 220 nm 时,其传输损耗约为 $2 \text{ dB}/\text{cm}$ 。但当芯层厚度为 $3 \mu\text{m}$ 时,其传输损耗降低为 $0.1 \text{ dB}/\text{cm}$ 。更重要的是,当芯层厚度较大时,其偏振依赖性较小^[71],有利于制备宽响应的低损耗弯曲波导。因此,为了减少弯曲波导部分损耗,可适当增加芯层厚度^[72]。文

献[73]表明,当 SOI 材料芯层厚度为 $10 \mu\text{m}$ 时,对波导宽度和脊高设计仍满足单模传输条件。但当 SOI 芯层较厚时,为了满足单模条件,会增加波导宽度和减少脊形波导脊高,会增加弯曲半径,不利于提高集成度。并且在弯曲部分采用浅刻蚀脊形波导,光场限制较弱,产生较大的弯曲损耗^[74]。因此,需要根据实际情况选择合理芯层厚度的 SOI 材料,为了避免在弯曲部分耦合产生高阶模式的振荡和减少弯曲损耗,在满足单模波导的条件下,尽量增加脊形波导的宽度和脊高,增加弯曲波导的光限制能力。

目前,为了减少弯曲部分损耗,采用在脊形波导外侧刻蚀一定宽度的空气槽。其目的:(1) 增加弯曲波导部分的水平的折射率差,增强对光场限制,减少模式泄露损耗;(2) 防止弯曲波导模场中心位置的侧向偏移。M. Harjanne 等人^[70]通过实验和理论验证了脊形外侧空气槽可以有效减少弯曲波导的辐射损耗和模式失配损耗(如图 2、图 3)。为了实现低损耗光学回路,文献[75-76]报道在不同波导部分采用不同芯层厚度,即在直波导部分采用较厚芯层厚度,可保证低损耗单模波导;在弯曲波导部分采用薄芯层厚度,保证低损耗弯曲波导;它们之间通过高效率三维锥形光斑转换器连接,实现了低损耗弯曲波导。

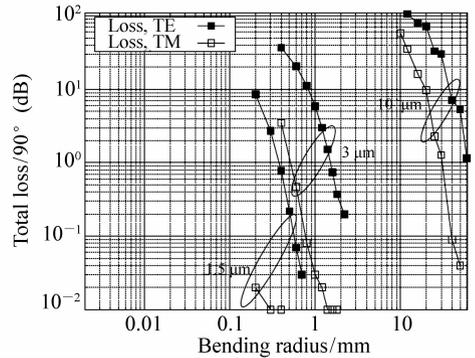


图 2 90° 脊形弯曲波导损耗(辐射损耗和模式失配损耗)^[70]

Fig. 2 Total loss (Radiation loss and Mode mismatch loss) in a 90° ridge waveguide bend^[70]

3.4 脊形波导的宽度、脊高、弯曲半径

文献[56,70]通过实验和仿真分析了脊形弯曲波导的宽度、脊高、弯曲半径对弯曲损耗影响。

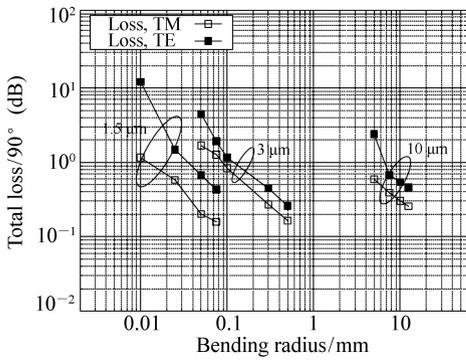


图3 带有沟槽的90°脊形弯曲波导损耗(辐射损耗和模式失配损耗)^[70]

Fig. 3 Total loss (Radiation loss and Mode mismatch loss) in a 90° ridge waveguide bend with a groove structure^[70]

结果表明(如图4):(1)波导宽度越大,弯曲损耗越小;(2)脊形波导的脊高越大,弯曲损耗越少;(3)在弯曲半径 > 100 nm 时,脊形波导的弯曲半径越大,弯曲损耗越少。但弯曲半径 < 100 nm 时,弯曲半径增加,弯曲部分损耗有先减少后有增加趋势,当弯曲半径大于一定数值后,弯曲损耗将持续减少^[49]。

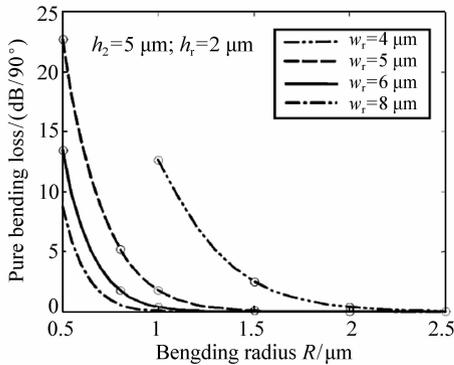


图4 SOI 脊形弯曲波导的弯曲损耗在不同半径和脊宽的变化情况^[56]

Fig. 4 Bending loss as the bending radius varies for SOI rib waveguides with different rib widths^[56]

当波导宽度增加和脊高增加时,弯曲波导部分有效折射率增加,在波导中导模相速度不易接近光在限制层的相速度,可在一定程度上减少弯曲部分损耗。但如果单一增加波导宽度和脊高,出现高阶模式,将不满足脊形波导单模条件^[58]。当弯曲半径较小时,单一增加波导宽度也会引起

波导之间的耦合现象。因此,通过单一增加波导宽度方式降低弯曲波导部分损耗,其应用前景受到了局限^[77]。为了制备损耗小的单模弯曲波导,可优化波导宽度和脊高,但不能有效减少弯曲波导部分损耗。

脊形波导的弯曲波导部分损耗主要是由于辐射损耗和散射损耗构成。在辐射损耗中,由于偏振引起的损耗随着弯曲半径的减少而增大(如图4),而向平板波导泄露损耗的变化趋势与其相反。在弯曲波导的弯曲半径 < 100 μm 时,两种损耗对弯曲波导的损耗贡献相当,因此,导致随着弯曲半径的减少,弯曲波导部分损耗出现先减少后增加的现象(如图5)^[49]。当弯曲波导的弯曲半径大于一定范围后,由于偏折引起的损耗是主要弯曲波导部分损耗主要原因,导致弯曲波导部分损耗随着弯曲半径增加而降低。

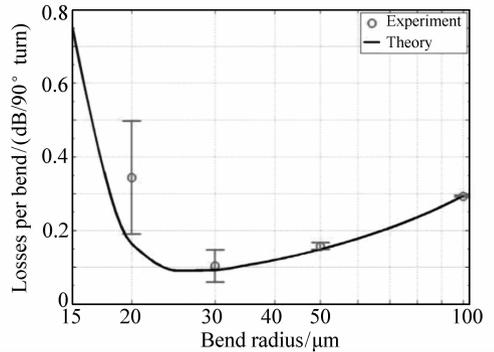


图5 当弯曲半径小于 100 nm 时,弯曲部分损耗随弯曲半径变化^[49]

Fig. 5 Evolution of the loss per bend versus the bend radius at $R < 100 \text{ nm}$ ^[49]

目前,为了实现低损耗脊形弯曲波导,弯曲半径通常是百微米级^[78],优势是具有较小的双折射现象、低的界面损耗、工艺容忍度较大、与标准光纤耦合损耗较小、制造成本低。当弯曲半径小于 100 μm 时,通常选用高折射率对比材料,可有效减少弯曲波导部分损耗^[79]。但是为了提高集成度,需要进一步降低弯曲波导半径。在降低弯曲波导半径到亚微米尺寸时,具有强烈的偏振的敏感度,对于沿着不同轴向的光的偏振具有不同响应^[80],并且有背景反射,串扰现象;需要昂贵的制造设备^[81]和较小的工艺误差^[82]。因此,低损耗、宽响应、小弯曲半径的弯曲波导是研究重点。

3.5 模场分布

弯曲波导与直波导连接实现光束的偏折。由于直波导和弯曲波导连接处的曲率半径不同,直波导的模场中心位置与弯曲波导的模场中心位置不重合,模场中心位置发生一定程度的向外偏移。因此,如果在直波导和弯曲波导直接对接相连,会

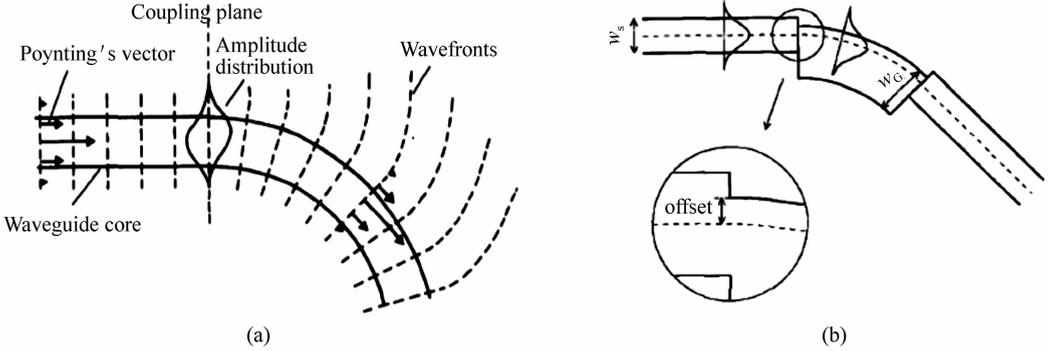


图 6 (a)在直波导和弯曲波导部分的基模的振幅分布、波前和坡印廷矢量^[83]; (b)带有偏移部分的弯曲波导和直波导^[84]

Fig. 6 (a) Amplitude distribution, wavefronts and time averaged Poynting's vector of the fundamental modes on a straight and a bent dielectric waveguide section^[83]; (b) a curved and a straight waveguide section with offset^[84]

Pennings. E. C. M.^[85]在其博士毕业论文中采用有效折射率方法分析了模式失配的原因,得到模式失配与波导宽度相关并优化了 off-set 结构的波导宽度。Off-set 结构可以有效减少因为模式不匹配引起的损耗^[86],但是对光刻和刻蚀精度具有较高的要求。2012 年, Tong Chen^[87]提出一种采用曲率半径渐变的弯曲波导。此方案由于弯曲波导与直波导相连接部分曲率半径相同,避免了由于模式失配问题引起的损耗,解决了 off-set 结构对于工艺的要求较高的缺点。并且可通过仿真软件对曲线形状不断优化,从而进一步减少弯曲波导部分损耗。

3.6 弯曲波导曲线形状

传统弯曲波导曲线形状通常采用通常圆形^[88]和正弦曲线^[89]。其曲率是常数 ($1/R$) 而直波导部分的曲率是零。当直波导和弯曲波导相互连接时,由于曲率半径不同,导致中心模场分布不匹配,引起模式转换损耗。Andrea Melloni 等人^[90]提出一种采用不同弯曲半径和弯曲角度组成弯曲波导,可以减少弯曲波导损耗,此方法称之为 matched bend approach。文献^[91]在理论上分析了采用此方法设计曲线的损耗。文献^[92]采

引起模式转换损耗。Neumann^[83]等人分析了中心模场不匹配现象,提出在直波导和弯曲波导在连接处设计具有一定偏移的结构 (off-set) (如图 6),目的是减少由于直波导和弯曲波导模场中心位置模式不匹配引起传输损耗^[84]。

用此方法,设计此曲线形状的弯曲波导并应用在激光器上。Hansuek Lee 等人^[93]在设计制备低损耗光学延时线时,在弯曲波导部分采用阿基米德螺线,通过弯曲波导形状的优化,在一定程度上减少弯曲波导损耗。Kerry J. Vahala 等人^[94]在制备耳语回廊弯曲波导 (whispering-gallery spiral waveguides) 时,同样采用阿基米德螺线降低弯曲波导损耗。芬兰 VTT 实验室^[67]采用欧拉螺线曲线设计曲率渐变的弯曲波导,得到了目前最小损耗的弯曲波导。通过采用改变曲线形状,设计曲率渐变的弯曲波导曲线形状,在一定程度上可以减少弯曲波导损耗^[95-96]。采用缓和曲线,既可以减少在上文 3.5 节中提到的中心模场不匹配引起的损耗,减少制备工艺的复杂程度,又可以实现相同转弯条件下,弯曲半径由大变小,并在一定程度上减少弯曲波导部分损耗。尽管改变曲线形状可以在一定程度上减少弯曲波导部分损耗,但是并不会有很大程度的减少,需要与上述影响弯曲波导的因素相互结合从而实现低损耗、小弯曲半径的弯曲波导。

3.7 其他新型波导结构

特殊设计的多模波导,既可以减少基模在弯

曲波导中损耗又可以实现实现基模在弯曲波导高效传输。在弯曲部分,浅刻蚀脊型波导虽然会减少传输损耗但是会增加弯曲波导损耗,这部分损耗主要是由于模式泄露到平板产生。在满足单模条件时,增加脊高将会减少弯曲波导损耗。当不满足单模条件的时候,TE模式的基模损耗减少程度小于第一阶模式损耗。因此,通过多模波导的合理设计,可以作为一个模式过滤器(mode filter),仅保留基模而高阶模被损耗而忽略^[74]。在集成光学中存在弯曲波导的优势是,在恰好满足单模波导条件时,如果出现制备工艺误差将会出现多模波导,光学回路中大弯曲波导可起到滤波器作用,仍然会保持单模特性。文献[97]报道,设计特殊多模弯曲波导结构,其高阶模式损耗比基模损耗大,保证基模高效传递。采用此设计方案的优势是针对不同模式损耗不同(如图7,图8),即基模在弯曲部分损耗较小,高阶模的损耗较大,实现在小弯曲半径下,基模的高效传输。Michael Krause等人^[98]通过实验和理论得到TM比TE在弯曲部分损耗小结论,可在弯曲波导中利用TM模式高效传输,进一步减少弯曲半径,增加集成度。此设计方案既可以保证在较小弯曲半径下基模的高效传输,又可以在多模波导中仅保留基模,作为滤波结构应用于集成光学中。

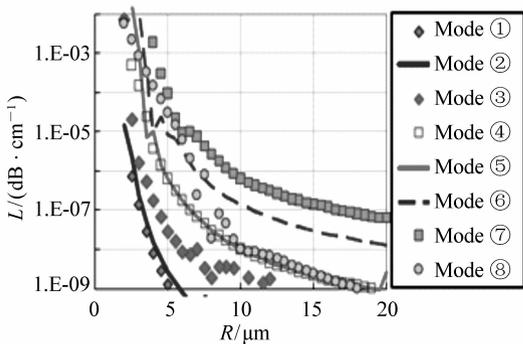


图7 在多模弯曲波导中,不同模式的弯曲损耗随弯曲半径变化情况^[97]

Fig. 7 Normalized effective indices of the eigen-modes supported in the bent multimode waveguide as the bending radius R decreases^[97]

与低折射率对比材料不同,高折射率对比材料(如SOI)制备在亚波长尺寸的弯曲波导将会出现不同的性质。如采用SOI材料制备弯曲波导,

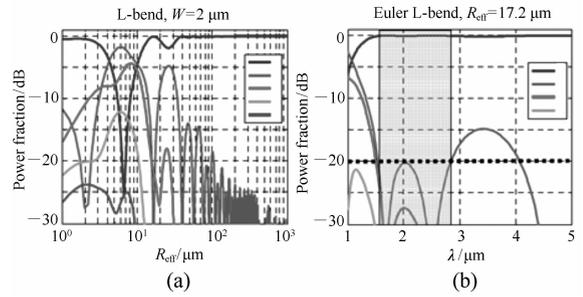


图8 欧拉螺线L形多模脊形波导弯曲波导仿真模拟^[101](a)不同模式的功率随着弯曲半径变化(b)不同模式的功率随着波长变化

Fig. 8 Simulated performances of an Euler L-bend multimode rib waveguide^[101](a) power fraction of different modes versus the bend radius at $W = 2 \mu\text{m}$; (b) power fraction of different modes versus the wavelength at $R_{\text{eff}} = 17.2 \mu\text{m}$

由于波导截面不对称并且材料具有极高的双折射现象,在模式耦合和模式转换上呈现特殊的性质^[99-100]。因此,可设计锥形光斑转换器,实现脊型波导与矩形波导的高转换效率($\sim 100\%$)^[99]。芬兰VTT实验室^[101]采用欧拉螺线形状弯曲波导,其中直波导部分为脊形波导,弯曲部分采用多模矩形波导。结合基模比高阶模损耗小原理,通过锥形光斑转换器连接脊形波导和矩形波导结构,实现小弯曲半径下低能量损耗。

新型波导设计应用于弯曲波导,实现光束在小弯曲半径下高效光传输。光子晶体波导^[102-103]可实现在亚微米级弯曲半径下低损耗高效光束转弯。但光子晶体波导的制备需要较精密的仪器,不利于大规模制备。狭缝波导(slot waveguide),可在低折射率对比材料(如 SiO_2)上制备纳米级宽度的波导,实现强光限制和提高集成度^[104-105]。表面等离子体波导^[106-108]是利用表面等离子体作用制备的亚波长量级尺寸波导。当其波导损耗较大,可以与新型材料石墨烯等结合^[109-110],由于石墨烯可在一定程度上减少弯曲波导部分损耗,实现在小尺寸下较低损耗的弯曲波导。悬空波导^[111],由于其特殊结构设计,其折射率对比比较大,光在芯层限制作用较强,泄露模式较少,可实现低损耗、小弯曲半径的弯曲波导。

4 弯曲波导研究进展

集成光学,是 21 世纪的前沿研究方向。随着材料和工艺技术的快速发展,集成光学已经取得了突破性进展。随着对亚微米尺寸的波导的基本性质研究不断深化,集成光学的集成度将进一步增加,而弯曲波导是主要组成部分。本小节对弯曲波导的发展现状进行简要梳理。

2002 年,浙江大学 Y. Z. Tang 等人^[66]优化 Z 字直角弯曲波导结构,即集成波导转弯镜面结构(Integrated waveguide turning mirror IWTM)。优化后波导结构,增大折射率比对、降低了侧壁的粗糙度,其弯曲损耗为损耗 0.5 dB/mirror,并将其应用在 1×2 分束器上。

2003 年,美国奥拉巴马大学 Lixia Li 等人^[112]在 Z 字直角弯曲波导结构制备多个分离空气槽,进一步减少转弯部分损耗,其中 TE 模式的透射率为 95.2%, TM 模式的透射率为 97.2%。

2003 年,意大利米兰理工大学 Andrea Melloni 等人^[70]提出一种采用不同弯曲半径和弯曲角度组成的弯曲波导,以此来减少弯曲波导损耗,称之为 matched bend approach。此方法避免在弯曲波导的末端发生泄露模式激发,并且可以有效抑制单模波导的二阶模式激发,有效改善器件性能。在掩埋波导、脊形波导、条形波导等弯曲波导结构上,证明了此理论的正确性。

2004 年,美国 IBM 实验室 Y. A. Vlasov 等人^[23]优化波导制备工艺,采用标准 200 nm CMOS 制造工艺制备弯曲波导,减少弯曲波导的侧壁粗糙度。当弯曲半径为 $1 \mu\text{m}$ 时,弯曲损耗为 (0.086 ± 0.005) dB/turn;当弯曲半径为 $2 \mu\text{m}$ 时,弯曲损耗为 (0.013 ± 0.005) dB/turn。

2004 年,芬兰 VTT 实验室^[70]在单模脊形弯曲波导外侧刻蚀空气槽方式减少弯曲波导损耗。当弯曲半径为 $75 \mu\text{m}$ 时,弯曲损耗为 0.7 dB/ 90° 。

2004 年,法国 Eric Cassan 等人^[113]设计制备对偏振不敏感的单模脊形弯曲波导,从而避免 SOI 材料双折射现象,使弯曲波导在 C 波段应用更广泛。

2005 年,芬兰 VTT 实验室^[72]采用多步刻蚀方式(Multi-step processing),在脊形波导两侧刻蚀空气槽。在 SOI 的芯层厚度为 $10 \mu\text{m}$,弯曲半径为 $5 \mu\text{m}$ 时,通过刻蚀空气槽的,弯曲部分损耗降低 1 dB。

2006 年,美国杨百翰大学 Yusheng Qian 等人^[114]优化直角 Z 形弯曲波导内侧形状及外侧槽型结构,将弯曲波导的损耗降低到 (0.32 ± 0.02) dB/bend。

2007 年,美国普渡大学 Shijun Xiao 等人^[115]优化测试弯曲波导损耗的测试方法。此方案将弯曲波导制作成插分微环谐振腔部分结构,与以往需制备数量多弯曲波导相比,制备更加简单,测试更便利并且测试精度提高。采用 SOI 材料,在弯曲半径为 $4.5 \mu\text{m}$ 时,弯曲损耗为 $(0.06 \text{ dB} \pm 0.006)$ dB/turn。

2008 年,Robert N. Sheehan 等人^[95]采用曲率变化的特殊曲线形状制备弯曲波导,并利用 FD-BPM 对其仿真(如图 9)。结果表明:弯曲波导采用曲率变化曲线在相同转弯尺寸下,其损耗比单一曲率曲线的损耗小。

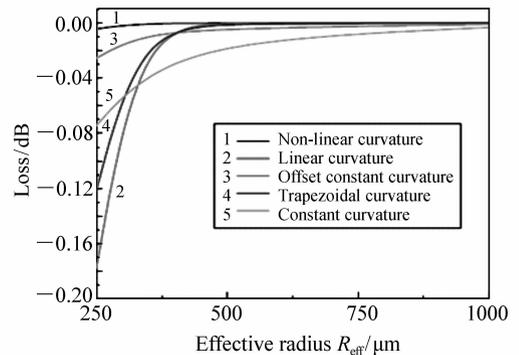


图 9 4 个 90° 单模弯曲波导损耗随有效曲率半径变化示意图^[95]

Fig. 9 Loss in a $\pi/2$ single mode waveguide bend versus effective radius of curvature for four waveguide bend design schemes^[95]

2009 年,浙江大学戴道铎等人^[116]在设计特殊材料结构方式减少弯曲波导损耗。采用二氧化硅波导,在衬底结构上采用经过设计后的硅和二氧化硅间隔的多层材料结构,目的是为了减少衬底泄露损耗,降低弯曲波导部分损耗。

2012年,浙江大学戴道铎等人^[111]采用悬空SiO₂矩形波导设计方案。当波导宽度为1 μm,弯曲半径100 μm时,传输损耗为0.385 dB/cm,弯曲损耗为0.037 dB/90°。

2012年,苏州大学Huanyang Chen等人^[117]采用零折射率材料(zero index metamaterials, ZIMs)实现高传输效率的弯曲波导(透射率>95%)。

2012年,美国Tong Chen^[87]提出一种曲率渐变的弯曲波导,实现低损耗弯曲波导。此结构可以减少模式失配损耗,与offset结构弯曲波导相比,不依赖于光刻和刻蚀精度。

2013年,芬兰VVT实验室^[67]针对文献[61]和文献[95]单一改变弯曲波导形状不能完全减少弯曲波导部分损耗的劣势,设计了一种新结构:在弯曲波导部分采用欧拉螺线弯曲形状的多模矩形波导,在直波导部分采用单模波导。它们之间通过锥形光斑转换器相互连接。在弯曲部分可以保证高折射率对比,加强光的限制,进一步减少了弯曲部分的辐射损耗。引入脊形单模波导可以保证在输出端单模输出。通过综合设计,有效减少了弯曲部分损耗。当SOI材料的芯层厚度为4 μm,弯曲半径小于10 μm,基模损耗小于0.02 dB/90°。

2015年,苏州大学Huanyang Chen等人^[118]利用梯度渐变金属材料(Gradient Index Metamaterials, GIMs)实现波导模式和表面波无能量损耗转换,在弯曲波导部分利用表面波传播可实现小弯曲波导尺寸的光波高效传输并且具有偏振独立性和宽光谱响应。

2016年, Antoine Brimont等人^[49]采用理论和实验分析浅刻蚀脊形波导弯曲损耗随弯曲半径变化的趋势。在弯曲半径<100 nm时,当弯曲半径变大,弯曲波导部分损耗呈现先减少后增加的趋势。当大于一定弯曲半径后,弯曲部分损耗随着弯曲半径的增加而降低。采用芯层厚度为220 nm厚的SOI材料,波导宽度为400 nm,刻蚀深度为70 nm,当弯曲半径为25~30 nm,其固有的弯曲波导损耗最小,其损耗小于0.1 dB/90°。

5 弯曲波导在集成光学器件应用

光的应用范围已经从传统意义上的长距离通信,应用到了毫米级甚至芯片内部连接,实现芯片级的光互连。当摩尔定律发展遇到瓶颈,利用光子作为信息载体,可延续摩尔定律,实现体积小、功能全、性能稳定的光集成器件。在集成光学中,弯曲波导具有重要作用,既可以作为波导连接非共线器件又可以作为器件某一部分结构实现某些特殊作用,如延时线^[119-120]、耳语回廊腔^[77]、长波导传感器(Waveguide sensors)^[121]、陀螺仪^[122]等。本小节将总结弯曲波导在集成光学的应用并展望。

作为连接非共线的光学元件的波导,实现光束分离和提高集成度。利用弯曲波导制备的Y型波导,实现单光束和多光束的相互传输^[123-124,119-120]。2014年,芬兰VTT实验室^[125]采用文献[67]中弯曲波导方案结合多模干涉耦合器(Multimode Interference, MMI)和马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometers, MZIs)在SOI平台上制备了弯曲波导,实现了微米级别的滤波器,并将其应用在RAM单元器件中。

作为环形谐振腔的部分组件^[125-128],如插分滤波器(add-drop filter, ADF),2008年,Shijun Xiao等人^[127]优化了弯曲波导形状,制备了弯曲半径为2.5 μm的环形谐振腔插分滤波器(add-drop filter, ADF)(如图10),在小尺寸下实现了宽光谱

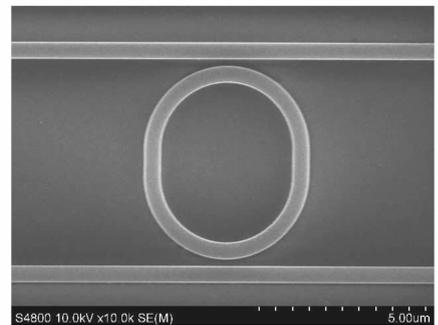


图10 插分微环滤波器的扫描电镜示意图^[115]
Fig. 10 Scanning electron micrographs of two fabricated add-drop micro-resonator^[115]

响应范围的插分滤波器。2014 年, Zhiping Zhou 等人^[128]采用半环形腔结构制备高 Q 值、低损耗、高速单模谐振腔。

弯曲波导可构成有源器件的部分组件。2003 年, Bin Liu 等人^[129]制备环形 InP 基环形腔激光器, 其边模抑制比大于 50 dB, 光谱线宽在 3 ~ 500 KHz 之间。2010 年, Kyoung Chan Kim 等人^[130]在量子点激光器中, 在芯片中心采用弯曲波导结构, 目的是为了减少高阶模式, 保证单横模激光器。2011 年, Douglas C. Hall 等人^[92]弯在单腔面泪滴型半导体激光器中应用弯曲波导(如图 11)。2015 年, Tomohiro Kita 等人^[17]在单片集成外腔半导体激光器的半导体光学增益放大区域(SOA)的出光一端, 采用弯曲波导结构(如图 12), 防止端面反射光对增益芯片的影响。2015 年, Mickaël Faugeron 等人^[131]在高亮度锥形半导体激光器中采用弯曲波导结构, 目的是减少端面反馈对种子光源的影响。

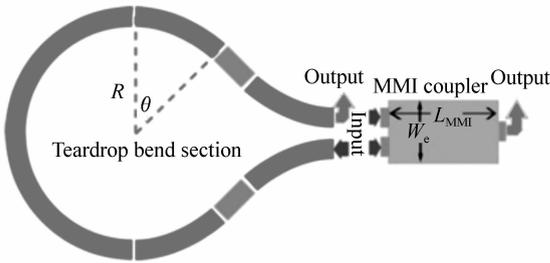


图 11 单腔面泪滴型半导体激光器^[92]

Fig. 11 Single-Facet Teardrop semiconductor Laser^[92]

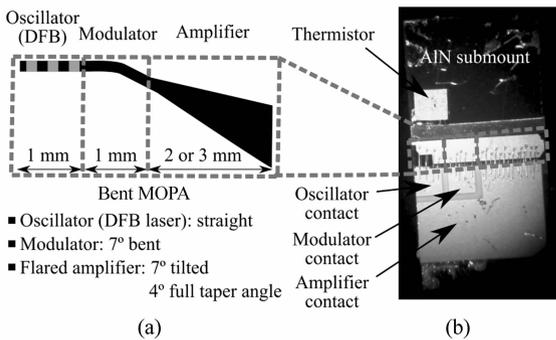


图 12 (a) 弯曲锥形半导体激光器的结构; (b) 封装后器件^[131]

Fig. 12 (a) Schematics of a bent MOPA; (b) mounted device^[131]

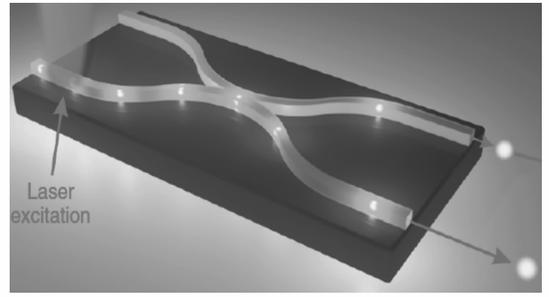


图 13 单片集成半导体波导, 分束器和单光子光源^[136]

Fig. 13 Monolithic on-chip integration of semiconductor waveguides, beamsplitters and single-photon sources^[136]

弯曲波导作为分束器的结构, 利用倏逝场耦合功能, 实现偏振分束^[132]、能量分束^[133]、方向耦合^[134-135]等功能。2015 年, Klaus D Jöns 等人^[136]将弯曲波导作为多模耦合分束器, 制备了单光子捕获器件。

6 结束语

目前, 集成光学研究处于快速发展时期, 其对国民经济的发展, 特别在国防、信息、航天等领域将起着重要的作用。弯曲波导是集成光学的重要组成部分, 是研究热点之一。经过多年发展, 弯曲波导的传输效率不断提高, 并在集成光学某些领域有了重要的应用。

本文介绍了弯曲波导在集成光学中作用的基础上, 主要分析了弯曲波导损耗机理, 包括传输损耗、辐射损耗、模式转换损耗。从波导材料、弯曲形状、波导种类、脊形波导的参数(宽度、脊高、弯曲半径)、模场分布、弯曲波导曲线形状和其他新型波导结构等 7 个方面, 综述减少弯曲波导部分损耗的设计方案。综述了弯曲波导在集成光学的应用并展望了其应用。

为了获得高传输效率的弯曲波导, 可从以下几个方面入手:

- (1) 分析弯曲波导部分模式之间耦合机理, 研究亚波长尺寸弯曲波导的基本性质;
- (2) 分析不同曲线形状对于弯曲波导损耗影响, 结合弯曲波导损耗机理, 进一步设计低损耗小

弯曲半径结构的弯曲波导;

(3)发展新型波导结构。通过与新波导材料结合,设计尺寸小、低损耗、新功能的弯曲波导;

(4)在InP基衬底上制备增益弯曲波导,分析弯曲波导对于载流子分布影响,研究增益补偿和弯曲损耗之间关系,实现弯曲波导在有源器件上的应用。

总之,随着互联网、云计算和物联网技术的快速发展,集成光学是光通信的重要研究热点,是未

来发展的主要方向。但集成光学器件,仍处于实验室开发阶段,没有达到规模化商用的条件。实现不同功能光学器件集成于同一芯片有很多难点,如不同功能器件对材料要求不同,利用同一种材料实现多功能器件难度较大;高密度光子器件集成易导致损耗较大并且容易出现串扰现象等。在集成光学中,在降低弯曲波导损耗的同时解决小尺寸的串扰问题,提高成品率和系统稳定性,降低生产成本,有利于集成光学的规模化商用。

参考文献:

- [1] CHEN R, NG K W, KO W S, *et al.*. Nanophotonic integrated circuits from nanoresonators grown on silicon[J]. *Nature Communications*, 2014, 5:1-9.
- [2] DAI D, WU H, GUAN X. SOI (Silicon-on-insulator)-compatible hybrid nanoplasmonics: waveguiding, polarization-handling, and thermal-tuning[J]. *Nanophotonics and Micro/Nano Optics II*, 2014:9277.
- [3] DAI D X, BAUTERS J, BOWERS J E. Passive technologies for future large-scale photonic integrated circuits on silicon: polarization handling, light non-reciprocity and loss reduction[J]. *Light-Sci. Appl.*, 2012, 1:12.
- [4] BOEUF F, CREMER S, VULLIET N, *et al.*. A multi-wavelength 3D-compatible silicon photonics platform on 300 mm SOI wafers for 25 Gb/s applications[C]. *IEDM*, 2013:13. 13. 11-13. 13. 14.
- [5] WELCH DF, KISH FA, MELLE S, *et al.*. Large-Scale InP photonic integrated circuits: enabling efficient scaling of optical transport networks[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(1):22-31.
- [6] NICHOLAS S C, MASANOVIC M L, JEVREMOVIC B, *et al.*. An 8 × 8 InP Monolithic Tunable Optical Router (MOTOR) packet forwarding chip[J]. *J. Lightwave Technology*, 2010, 28(4):641-650.
- [7] TAYLOR H F. Power loss at directional change in dielectric waveguides[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(3):642-647.
- [8] LADOUCEUR F, LABEYE P. A new general-approach to optical wave-guide path design[J]. *J. Lightwave Technology*, 1995, 13(3):481-492.
- [9] SUBBARAMAN H, XU X, HOSSEINI A, *et al.*. Recent advances in silicon-based passive and active optical interconnects[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3):2487-2510.
- [10] SMIT M K. InP photonic integrated circuits[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 16(5):1113-1125.
- [11] KAWACHI M. Recent progress in silica-based planar lightwave circuits on silicon[J]. *Optoelectronics, IEE Proceedings*, 1996, 143(5):257-262.
- [12] ZHANG X, HOSSEINI A, LIN X, *et al.*. Polymer-based hybrid integrated photonic devices for silicon on-chip modulation and board-level optical interconnects[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 19(6):3401115.
- [13] LEE H, CHEN T, LI J, *et al.*. Ultra-low-loss optical delay line on a silicon chip[J]. *Nature Communications*, 2012, 3:7.
- [14] BAUTERS J F, HECK M J R, JOHN D, *et al.*. Ultra-low-loss high-aspect-ratio Si₃N₄ waveguides[J]. *Optics Express*, 2011, 19(4):3163-3174.
- [15] BAUTERS J F, HECK M J, JOHN D D, *et al.*. Planar waveguides with less than 0.1 dB/m propagation loss fabricated with wafer bonding[J]. *Optics Express*, 2011, 19(24):24090-24101.
- [16] ADAR R, SERBIN M R, MIZRAHI V. Less than 1 dB per meter propagation loss of silica wave-guides measured using a ring resonator[J]. *J. Lightwave Technology*, 1994, 12(8):1369-1372.
- [17] KOBAYASHI N, SATO K, NAMIWAKA M, *et al.*. Silicon photonic hybrid ring-filter external cavity wavelength tunable lasers[J]. *J. Lightwave Technology*, 2015, 33(6):1241-1246.
- [18] SOREF R A, LARENZO J. All-silicon active and passive guided-wave components for $\lambda = 1.3$ and $1.6 \mu\text{m}$ [J]. *IEEE J.*

- Quantum Electronics*, 1986, 22(6) : 873-879.
- [19] SOREFF R A. Silicon-based optoelectronics[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1994, 23(12) : 1687-1706.
- [20] JALALI B, TRINH P D, YEGNANARAYANAN S, *et al.* . Guided-wave optics in silicon-on-insulator technology[J]. *IEEE Proceedings-optoelectronics*, 1996, 143(5) : 307-311.
- [21] JALALI B, YEGNANARAYANAN S, YOON T, *et al.* . Advances in silicon-on-insulator optoelectronics[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1998, 4(6) : 938-947.
- [22] LIBERTINO S, COFFA S, SAGGIO M. Design and fabrication of integrated Si-based optoelectronic devices[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2000, 3(5) : 375-381.
- [23] VLASOV Y A, MCNAB S J. Losses in single-mode silicon-on-insulator strip waveguides and bends[J]. *Optics Express*, 2004, 12(8) : 1622-1631.
- [24] YONGBO T, HUI-WEN C, SIDDHARTH J, *et al.* . 50 Gb/s hybrid silicon traveling-wave electroabsorption modulator [J]. *Optics Express*, 2011, 19(7) : 5811-5816.
- [25] QIANFAN X, BRADLEY S, SAMEER P, *et al.* . Micrometre-scale silicon electro-optic modulator[J]. *Nature*, 2005, 435(7040) : 325-327.
- [26] JONES R, LIU A S, RONG H S, *et al.* . Lossless optical modulation in a silicon waveguide using stimulated Raman scattering[J]. *Optics Express*, 2005, 13(5) : 1716-1723.
- [27] LIU A S, JONES R, LIAO L, *et al.* . A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor[J]. *Nature*, 2004, 427(6975) : 615-618.
- [28] RICKMAN A G, REED G T, NAMAVAR F. Silicon-on-insulator optical rib waveguide loss and mode characteristics[J]. *J. Lightwave Technology*, 1994, 12(10) : 1771-1776.
- [29] MELLONI A, CARNIEL F, COSTA R, *et al.* . Determination of bend mode characteristics in dielectric waveguides[J]. *J. Lightwave Technology*, 2001, 19(4) : 571-577.
- [30] SINGH A. Influence of carrier transport on Raman amplification in silicon waveguides [J]. *Optics Express*, 2010, 18(12) : 12569-12580.
- [31] RICARDO C, RAGHUNATHAN V, DIMITROPOULOS D, *et al.* . Influence of nonlinear absorption on Raman amplification in Silicon waveguides[J]. *Optics Express*, 2004, 12(12) : 2774-2780.
- [32] DIMITROPOULOS D, FATHPOUR S, JALALI B. Limitations of active carrier removal in silicon Raman amplifiers and lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(26) : 261108-3.
- [33] LIU Y, TSANG H K. Nonlinear absorption and Raman gain in helium-ion-implanted silicon waveguides[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(11) : 1714-1716.
- [34] HEWITT P D, REED G T. Improving the response of optical phase modulators in SOI by computer simulation[J]. *J. Lightwave Technology*, 2000, 18(3) : 443-450.
- [35] GRILLOT F, VIVIEN L, CASSAN E, *et al.* . Influence of waveguide geometry on scattering loss effects in submicron strip silicon-on-insulator waveguides[J]. *IET Optoelectronics*, 2008, 2(1) : 1-5.
- [36] PAYNE F P, LACEY J P R. A theoretical analysis of scattering loss from planar optical waveguides[J]. *Optical & Quantum Electronics*, 1994, 26(10) : 977-986.
- [37] PAFCHEK R, TUMMIDI R, LI J, *et al.* . Low-loss silicon-on-insulator shallow-ridge TE and TM waveguides formed using thermal oxidation[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(5) : 958-963.
- [38] LEE K K, LIM D R, KIMERLING L C, *et al.* . Fabrication of ultralow-loss Si/SiO₂ waveguides by roughness reduction [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(23) : 1888-1890.
- [39] LIU H C, LIN Y H, HSU W. Sidewall roughness control in advanced silicon etch process[J]. *Microsystem Technologies*, 2003, 10(1) : 29-34.
- [40] GAO F, WANG Y, CAO G, *et al.* . Improvement of sidewall surface roughness in silicon-on-insulator rib waveguides[J]. *Applied Physics B*, 2005, 81(5) : 691-694.
- [41] CHABLOZ M, SAKAI Y, MATSUURA T, *et al.* . Improvement of sidewall roughness in deep silicon etching[J]. *Microsys-*

tem Technologies,2000,6(3):86-89.

- [42] SNYDER A W. Radiation losses due to variations of radius on dielectric or optical fibers[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*,1970,18(9):608-614.
- [43] LEWIN L. Radiation from curved dielectric slabs and fibers[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*,1974,22(7):718-727.
- [44] KUESTER E F,CHANG D C. Surface-wave radiation loss from curved dielectric slabs and fibers[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*,1975,11(11):903-907.
- [45] MARCUSE D. Curvature loss formula for optical fibers[J]. *J. Optical Society of America*,1976,66(3):216-220.
- [46] MIYAGI M,NISHIDA S. Bending losses of dielectric rectangular waveguides for integrated optics[J]. *J. Optical Society of America*,1978,68(68):316-319.
- [47] WHITE I A. Radiation from bends in optical waveguides;the volume-current method[J]. *IEEE J. Microwaves*,1979,3(5):186-188.
- [48] COLLIN R. *Field Theory of Guided Waves*[M]. McGraw-Hill,1960.
- [49] BRIMONT A,HU X,CUEFF S,*et al.*. Low-loss and compact silicon rib waveguide bends[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,2016,28(3):299-302.
- [50] MITOMI O,KASAYA K,MIYAZAWA H. Design of a single-mode tapered waveguide for low-loss chip-to-fiber coupling [J]. *IEEE J. Quantum Electronics*,1994,30(8):1787-1793.
- [51] ALMEIDA V R,PANEPUCCI R R,MICHAL L. Nanotaper for compact mode conversion[J]. *Optics Letters*,2003,28(15):1302-1304.
- [52] MARCATILI E A J. Bends in optical dielectric guides[J]. *Bell System Technical Journal*,1969,48(7):2103-2132.
- [53] HEIBLUM M,HARRIS J H. Analysis of curved optical-waveguides by conformal transformation[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*,1975,11(2):75-83.
- [54] CHILWELL J,HODGKINSON I. Thin-films field-transfer matrix theory of planar multilayer waveguides and reflection from prism-loaded waveguides[J]. *J. Optical Society of America A Optics & Image Science*,1984,1(7):742-753.
- [55] THYAGARAJAN K,RAMADAS M R,SHENOY M R. Beat-length measurement of birefringent optical fibers[J]. *Optics Letters*,1987,12(11):935-937.
- [56] DAI D X,SAILING H. Analysis of characteristics of bent rib waveguides[J]. *J. Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*,2004,21(1):113-121.
- [57] YAMAMOTO T,KOSHIBA M. Numerical analysis of curvature loss in optical waveguides by the finite-element method [J]. *J. Lightwave Technology*,1993,11(10):1579-1583.
- [58] GU J S,BESSE P A,MELCHIOR H. Method of lines for the analysis of the propagation characteristics of curved optical rib waveguides[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*,1991,27(3):531-537.
- [59] FENG N N,ZHOU G R,XU C,*et al.*. Computation of full-vector modes for bending waveguide using cylindrical perfectly matched layers[J]. *J. Lightwave Technology*,2002,20(11):1976-1980.
- [60] DAI D X,SHI Y C. Deeply etched SiO₂ ridge waveguide for sharp bends[J]. *J. Lightwave Technology*,2006,24(12):5019-5024.
- [61] HU Z,LU Y Y. Computing optimal waveguide bends with constant width[J]. *J. Lightwave Technology*,2007,25(10):3161-3167.
- [62] CHERCHI M,YLINEN S,HARJANNE M,*et al.*. Low-loss spiral waveguides with ultra-small footprint on a micron scale SOI platform[J]. *Silicon Photonics IX*,2014,8990.
- [63] ZHUANG L M,MARPAUNG D,BURLA M,*et al.*. Low-loss, high-index-contrast Si₃N₄/SiO₂ optical waveguides for optical delay lines in microwave photonics signal processing[J]. *Optics Express*,2011,19(23):23162-23170.
- [64] HU R,DAI D,HE S. A small polymeric ridge waveguide with a high index contrast[J]. *J. Lightwave Technology*,2008,26(13-16):1964-1968.
- [65] FISCHER U,ZINKE T,KROPP J R,*et al.*. 0.1 dB/cm waveguide losses in single-mode SOI rib waveguides[J]. *IEEE*

Photonics Technology Letters, 1996, 8(5) : 647-648.

- [66] TANG Y Z, WANG W H, LI T, *et al.* Integrated waveguide turning mirror in silicon-on-insulator[J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2002, 14(1) : 68-70.
- [67] CHERCHI M, YLINEN S, HARJANNE M, *et al.* . Dramatic size reduction of waveguide bends on a micron-scale silicon photonic platform[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15) : 17814-17823.
- [68] ERIC D, FENGNIAN X, LAURENT S, *et al.* . Group index and group velocity dispersion in silicon-on-insulator photonic wires[J]. *Optics Express*, 2006, 14(9) : 3853-3863.
- [69] MUSA S, BORREMAN A, KOK A A M, *et al.* . Experimental study of bent multimode optical waveguides[J]. *Annals of Surgery*, 1984, 200(2) : 153-158.
- [70] HARJANNE M, AALTO T. Design of tight bends in silicon-on-insulator ridge waveguides[J]. *Physica Scripta*, 2004, T114 : 209-212.
- [71] AALTO T, CHERCHI M, HARJANNE M, *et al.* . Launching of multi-project wafer runs in ePIXfab with micron-scale silicon rib waveguide technology[J]. *Silicon Photonics IX*, 2014, 8990.
- [72] SOLEHMAINEN K, AALTO T, DEKKER J, *et al.* . Development of multi-step processing in silicon-on-insulator for optical waveguide applications[J]. *J. Optics a-Pure and Applied Optics*, 2006, 8(7) : S455-S460.
- [73] SOREF R A, SCHMIDTCHEN J, PETERMANN K. Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂ [J]. *Quantum Electronics IEEE J.*, 1991, 27(8) : 1971-1974.
- [74] DULLO F T, TINGUELY J C, SOLBO S A, *et al.* . Single-mode limit and bending losses for shallow rib Si₃N₄ waveguides [J]. *IEEE Photonics J.*, 2015, 7(1) : 2700511-10.
- [75] DAY I E, EVANS I, KNIGHTS A, *et al.* . Tapered silicon waveguides for low insertion loss highly-efficient high-speed electronic variable optical attenuators[C]. Optical Fiber Communications Conference, 2003. OFC 2003, 2003 : 249-251.
- [76] ANITA S, THOMAS D, JANUSZ M, *et al.* . Fabrication and characterization of three-dimensional silicon tapers[J]. *Optics Express*, 2003, 11(26) : 3555-3561.
- [77] SMIT M K, PENNINGS E C M, BLOK B. Normalized approach to the design of low-loss optical waveguide bends[J]. *J. Lightwave Technology*, 1993, 11(11) : 1737-1742.
- [78] NGUYEN T G, TUMMIDI R S, KOCH T L, *et al.* . Lateral leakage of TM-like mode in thin-ridge silicon-on-insulator bent waveguides and ring resonators[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7) : 7243-7252.
- [79] ZHANG X M, HARRISON M, HARKER A, *et al.* . Serpentine low loss trapezoidal silica waveguides on silicon[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20) : 22298-22307.
- [80] MANOLATOU C, JOHNSON S G, FAN S, *et al.* . High-density integrated optics[J]. *J. Lightwave Technology*, 1999, 17(9) : 1682-1692.
- [81] HOCHBERG M, BAEHRJONES T. Towards fabless silicon photonics[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(8) : 492-494.
- [82] PO D, WEI Q, HONG L, *et al.* . Low power and compact reconfigurable multiplexing devices based on silicon microring resonators[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10) : 9852-9858.
- [83] NEUMANN E G. Curved Dielectric Optical Waveguide with Reduced Transition Losses[J]. *Microwaves Antennas & Propagation*, 1982, 129(5) : 278-280.
- [84] SMIT M K, PENNINGS E C M, BLOK H. A normalized approach to the design of low-loss optical waveguide bends [J]. *J. Lightwave Technology*, 1993, 11(11) : 1737-1742.
- [85] PENNINGS E C M. Bends in optical ridge waveguides: modeling and experiments[D]. Netherland: Delft University of Technology, 1990.
- [86] FAN G, SANG W, LIU X, *et al.* . Silicon waveguide racetrack resonators with 1.5 μm radius using junction offsets[J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2012, 54(6) : 1470-1471.
- [87] CHEN T, LEE H, LI J, *et al.* . A general design algorithm for low optical loss adiabatic connections in waveguides[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20) : 22819-22829.
- [88] CAI D P, LU J H, CHEN C C, *et al.* . High Q-factor microring resonator wrapped by the curved waveguide[J]. *Scientific*

Reports,2015,5.

- [89] LAI C H, CHANG T, YEH Y S. Characteristics of bent terahertz antiresonant reflecting pipe waveguides[J]. *Optics Express*,2014,22(7):8460-8472.
- [90] MELLONI A, MONGUZZI P, COSTA R, *et al.*. Design of curved waveguides: the matched bend[J]. *J. Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision*,2003,20(1):130-137.
- [91] YUAN W, HALL D C. A General Scaling Rule for Matched Bend Waveguides[J]. *J. Lightwave Technology*,2011,29(24):3786-3796.
- [92] YUAN W, SEIBERT C S, HALL D C. Single-facet teardrop laser with matched-bends design[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*,2011,17(6):1662-1669.
- [93] LEE H, CHEN T, LI J, *et al.*. Chemically etched ultrahigh-Q wedge-resonator on a silicon chip[J]. *Nature Photonics*,2012,6(6):369-373.
- [94] CHEN T, LEE H, VAHALA K J. Design and characterization of whispering-gallery spiral waveguides[J]. *Optics Express*,2014,22(5):5196-5208.
- [95] SHEEHAN R N, HORNE S, PETERS F H. The design of low-loss curved waveguides[J]. *Optical and Quantum Electronics*,2008,40(14-15):1211-1218.
- [96] BAETS R, LAGASSE P E. Loss calculation and design of arbitrarily curved integrated-optic waveguides[J]. *J. Optical Society of America*,1983,73(2):177-182.
- [97] DAI D X. Multimode optical waveguide enabling microbends with low inter-mode crosstalk for mode-multiplexed optical interconnects[J]. *Optics Express*,2014,22(22):27524-27534.
- [98] KRAUSE M, RENNER H, BRINKMEYER E. Polarization-dependent curvature loss in silicon rib waveguides[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*,2006,12(6):1359-1362.
- [99] DAOXIN D, BOWERS J E. Novel concept for ultracompact polarization splitter-rotator based on silicon nanowires[J]. *Optics Express*,2011,19(11):10940-10949.
- [100] VERMEULEN D, ACOLEYEN K V, GHOSH S, *et al.*. Efficient tapering to the fundamental quasi-TM mode in asymmetrical waveguides[C]. 15th European conference on Integrated Optics(ECIO 2010),2010.
- [101] CHERCHI M, YLINEN S, HARJANNE M, *et al.*. The Euler bend:paving the way for high-density integration on micron-scale semiconductor platforms[J]. *Silicon Photonics IX*,2014,8990.
- [102] MEKIS A, CHEN J C, KURLAND I I, *et al.*. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides[J]. *Physical Review Letters*,1996,77(18):3787-3790.
- [103] BOGAERTS W, BAETS R, DUMON P, *et al.* Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology[J]. *J. Lightwave Technology*,2005,23(1):401-412.
- [104] ALMEIDA V R, QIANFAN X, BARRIOS C A, *et al.*. Guiding and confining light in void nanostructure[J]. *Optics Letters*,2004,29(11):1209-1211.
- [105] KOOS C, VORREAU P, VALLAITIS T, *et al.*. All-optical high-speed signal processing with silicon-organic hybrid slot waveguides[J]. *Nature Photonics*,2009,3(4):216-219.
- [106] JUNG E J, LEE W J, KIM M J, *et al.*. Design of hybrid optical waveguide with a 90 degrees bend structure for high density photonics integrated circuits[J]. *Optical and Quantum Electronics*,2013,45(7):721-726.
- [107] CLAUDIO D, THEO L, MARTIN O J F, *et al.*. Simulation of complex plasmonic circuits including bends[J]. *Optics Express*,2011,19(20):18979-18988.
- [108] 管小伟,吴昊,戴道铨.硅基混合表面等离子体纳米光波导及集成器件[J]. *中国光学*,2014,(2):181-195.
GUAN X W, WU H, DAI D X. Silicon hybrid surface plasmonic nano-optics-waveguide and integration devices[J]. *Chinese Optics*,2014,(2):181-195.
- [109] ZHOU X, ZHANG T, CHEN L, *et al.*. A Graphene-based hybrid plasmonic waveguide with ultra-deep subwavelength confinement[J]. *J. Lightwave Technology*,2014,32(21):4199-4203.
- [110] DAOXIN D, SAILING H. A silicon-based hybrid plasmonic waveguide with a metal cap for a nano-scale light confine-

- ment[J]. *Optics Express*,2009,17(19):16646-16653.
- [111] CHEN P X,ZHU Y P,SHI Y C,*et al.*. Fabrication and characterization of suspended SiO₂ ridge optical waveguides and the devices[J]. *Optics Express*,2012,20(20):22531-22536.
- [112] LI L X,NORDIN G P,ENGLISH J M,*et al.*. *Integrated Optics:Devices, Materials, and Technologies VII*[M]. SPIE, 2003.
- [113] CASSAN E,VIVIEN L,LAVAL S. Polarization-independent 90 degrees-turns in single-mode micro-waveguides on silicon-on-insulator wafers for telecommunication wavelengths[J]. *Optics Communications*,2004,235(1-3):83-88.
- [114] QIAN Y,KIM S,SONG J,*et al.*. Compact and low loss silicon-on-insulator rib waveguide 90 degrees bend[J]. *Optics Express*,2006,14(13):6020-6028.
- [115] XIAO S J,KHAN M H,SHEN H,*et all.* Modeling and measurement of losses in silicon-on-insulator resonators and bends[J]. *Optics Express*,2007,15(17):10553-10561.
- [116] DAI DX. Subwavelength silica-based optical waveguide with a multilayered buffer for sharp bending[J]. *Jl Lightwave Technology*,2009,27(13):2489-2494.
- [117] LUO J,XU P,CHEN H,*et al.* Realizing almost perfect bending waveguides with anisotropic epsilon-near-zero metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*,2012,100(22):221903-221903-221905.
- [118] FU Y,XU Y,CHEN H. Applications of gradient index metamaterials in waveguides[J]. *Scientific Reports*,2015,5.
- [119] 李浩,宋玲玲,张立钧等.4 通道交叉型二氧化硅光波导延迟线阵列的设计与制备[J]. *中国光学*,2014,(3):435-441.
- LI H,SONG L L,ZHANG L J,*et al.*. Design and fabrication of 4 channels silica cross optical waveguide delay line array [J]. *Chinese Optics*,2014,(3):435-441.
- [120] RASRAS M S,MADSEN C K,CAPPUZZO M A,*et al.*. Integrated resonance-enhanced variable optical delay lines[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,2005,17(4):834-836.
- [121] DENSMORE A,XU D X,JANZ S,*et al.*. Spiral-path high-sensitive silicon photonic wire molecular sensor with temperature-independent response[J]. *Optics Letters*,2008,33(6):596-598.
- [122] CIMINELLI C,DELLOLIO F,ARMENISE M N. High-Q spiral resonator for optical gyroscope applications: numerical and experimental investigation[J]. *IEEE Photonics J.*,2012,4(4):1844-1854.
- [123] CHAN H P,CHENG S Y,CHUNG P S. Low loss wide-angle symmetric Y-branch waveguide[J]. *Electronics Letters*, 1996,32(7):652-654.
- [124] QIAN W,JUN L,SAILING H. Optimal design method of a low-loss broadband Y branch with a multimode waveguide section[J]. *Applied Optics*,2003,41(36):7644-7649.
- [125] CHERCHI M,YLINEN S,HARJANNE M,*et al.*. Fabrication-tolerant optical filters for dense integration on a micron-scale SOI platform[J]. *Silicon Photonics IX*,2014:8990.
- [126] XIAO S J,KHAN M H,SHEN H,*et al.*. Compact silicon microring resonators with ultra-low propagation loss in the C band[J]. *Optics Express*,2007,15(22):14467-14475.
- [127] XIAO S,KHAN M H,SHEN H,*et al.*. Silicon-on-insulator microring add-drop filters with free spectral ranges over 30 nm[J]. *J. Lightwave Technology*,2008,26(2):228-236.
- [128] LI X B,DENG Q Z,ZHOU Z P. Low loss, high-speed single-mode half-disk resonator[J]. *Optics Letters*,2014,39(13):3810-3813.
- [129] BIAN Z X,LIU B,SHAKOURI A. InP-based passive ring-resonator-coupled lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 2003,39(7):859-865.
- [130] KIM K C,HAN I K,LEE J I,*et al.*. High power single-lateral-mode operation of InAs quantum dot based ridge type laser diodes by utilizing a double bend waveguide structure[J]. *Applied Physics Letters*,2010,96(26):261103-261106.
- [131] FAUGERON M,VILERA M,KRAKOWSKI M,*et al.*. High power three-section integrated master oscillator power amplifier at 1.5 μm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,2015,27(13):1449-1452.
- [132] GUAN X,WU H,SHI Y,*et al.*. Extremely small polarization beam splitter based on a multimode interference coupler

with a silicon hybrid plasmonic waveguide[J]. *Optics Letters*,2014,39(2):259-262.

- [133] UEMATSU T, KITAYAMA T, ISHIZAKA Y, *et al.*. Ultra-broadband silicon-wire polarization beam combiner/splitter based on a wavelength insensitive coupler with a point-symmetrical configuration[J]. *IEEE Photonics J.*,2014,6(1):1-8.
- [134] SHRESTHA V R, LEE H S, LEE Y G, *et al.*. Silicon nitride waveguide router enabling directional power transmission [J]. *Optics Communications*,2014,331(22):64-68.
- [135] ZHOU K, WEI W, ZHANG C. Simulation on a novel SOI optical waveguide directional coupler[J]. *SPIE*,2003,5253:897-900.
- [136] JONS K D, RENGSTL U, OSTER M, *et al.*. Monolithic on-chip integration of semiconductor waveguides, beamsplitters and single-photon sources[J]. *J. Physics D-Applied Physics*,2015,48(8):7-20.

作者简介:



高峰(1990—),男,吉林磐石人,博士研究生,主要从事窄线宽半导体激光器方面的研究。E-mail:summit1990@163.com



陈泳屹(1986—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,主要从事表面等离子体与半导体激光器方面的研究。E-mail:chenyy@ciomp.ac.cn