



## 上海交通大学学位论文

# 硅基超构多维光场调控

姓 名: 赵耀天  
学 号: 019034910011  
导 师: 郭旭涵  
学 院: 电子信息与电气工程学院  
学科/专业名称: 信息与通信工程  
学位类型: 学术型  
申请学位层次: 博士

2024 年 05 月

**A Dissertation Submitted to**

**Shanghai Jiao Tong University for Doctoral Degree**

**SILICON METAMATERIAL ENABLED**

**MULTIDIMENSIONAL OPTICAL FIELD**

**MANIPULATION**

**Author: Yaotian Zhao**

**Supervisor: Xuhan Guo**

School of Electronic Information and Electrical  
Engineering

Shanghai Jiao Tong University

Shanghai, P.R.China

May, 2024

**上海交通大学**  
**学位论文原创性声明**

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全知晓本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

**上海交通大学**  
**学位论文使用授权书**

本人同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。

本学位论文属于：

公开论文

内部论文，保密1年/2年/3年，过保密期后适用本授权书。

秘密论文，保密\_\_\_\_年（不超过10年），过保密期后适用本授权书。

机密论文，保密\_\_\_\_年（不超过20年），过保密期后适用本授权书。

（请在以上方框内选择打“√”）

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月

## 摘要

随着互连网的普及和应用的增加，人们对通信容量和计算能力的需求不断增长；同时摩尔定律的逐渐放缓使传统的集成电路技术难以满足不断增长的需求。硅基光电子技术提供了一种后摩尔时代的新路径：利用光子而非电子来传输信息，可以减少信号衰减和电磁干扰，实现更高速率的数据传输。多维光复用技术利用光学领域中不同维度的正交性并行传输信号，包括偏振复用、模分复用和波分复用等多个方面，能进一步提高光学系统的容量。

近年来，随着半导体加工技术的成熟，研究人员可以在绝缘体上硅（SOI, Silicon on Insulator）平台加工尺寸远小于光波长的结构。这些人工构造的结构可以在微观尺度上调控波前的强度和相位，实现传统材料无法满足的光学性质，被称为超构材料，为制造更小尺寸，更高性能的多功能光学器件提供了可行方案。

本文围绕片上超构材料对光场的调控机理，设计并加工了一系列超紧凑、低损耗、大带宽的多维光信号调控器件，实现了超紧凑的模式转换器，模式（解）复用器，波长（解）复用器，起偏器，偏振分束器，偏振旋转分束器等多维度光通信关键器件，设计了多维片上光信号复用传输系统芯片，主要研究成果和创新点如下：

### 1. 硅基超构偏振调控器件

本文提出并制备了一系列基于超构材料的片上偏振态控制器件，包括起偏器，偏振分束器，偏振分束旋转器，可以用于不同偏振态之间的滤波，分束和旋转，具体测试结果如下：

1) 起偏器可以滤除入射光中的横电模式（TE, Transverse Electric），同时不影响横磁模式（TM, Transverse Magnetic）的传输。器件的尺寸为  $18 \times 1 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 1 dB，带宽为 100 nm。

2) 偏振分束器可以使入射光中的 TE 和 TM 偏振态的光进入到两个不同的端口。制备的偏振分束器尺寸为  $16 \times 1.1 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 2 dB，带宽为 50 nm。

3) 偏振分束器可以使得入射光中的 TE 和 TM 分量进入到两个不同端口，同时使其中的 TM 偏振态的光旋转为 TE 偏振态的光。制备的片上分束旋转器的尺寸为  $13 \times 1 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 1.3 dB，带宽为 80 nm。

## 2. 硅基超构模式调控器件

本文提出并制备了一系列基于简单电介质槽超构材料的模式转换器和模式（解）复用器，用于不同模式之间的耦合和光信号的复用，具体的测试结果如下：

1) 对于 TE<sub>0</sub> 到 TE<sub>1</sub> 的模式转换器，本文设计并制备了两种器件，第一种器件具有超紧凑的尺寸 ( $1.2 \times 0.8 \mu\text{m}^2$ ) 和较低的损耗 (< 1.2 dB)；而第二种器件具有紧凑的尺寸 ( $2.3 \times 0.88 \mu\text{m}^2$ )，更低的损耗 (< 0.5 dB) 和较大的带宽 (~ 50 nm)。

2) 本文进一步把这种方法推广到了 TE<sub>0</sub> 到 TE<sub>2</sub> 模式转换器，其尺寸为  $2.4 \times 1.4 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 0.3 dB，带宽为 50 nm。本文也通过级联的方法设计了 TE<sub>0</sub> 到 TE<sub>3</sub> 的模式转换器，耦合长度为 7.4 μm。仿真的损耗小于 0.22 dB，带宽为 300 nm。

3) 此外，本文也利用简单电介质槽的超构材料，设计并加工了超紧凑的 TE<sub>0</sub>/TE<sub>1</sub> 模式（解）复用器，其尺寸为  $1.8 \times 1 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 0.5 dB，带宽为 60 nm。

## 3. 硅基超构波长调控器件

本文设计并制备了一系列片上波长（解）复用器，能将不同波长的光分解到不同的通道中，或者将不同通道中的光合并到同一根总线波导里。具体的测试结果如下：

1) 单通道的波长（解）复用器尺寸为  $95 \times 1.5 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 1.5 dB。

2) 双通道的波长（解）复用器的尺寸为  $150 \times 2 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 1.2 dB，通道间串扰小于 -19.2 dB。

3) 四通道的波长（解）复用器的尺寸为  $250 \times 2.5 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 2 dB，通道间串扰小于 -14.3 dB。

进一步，本文通过热光效应改变了器件的工作波长，展示了器件对通信的中心波长的调节能力，测得的热调效率大于 0.15 nm/mW。

综上所述，本论文所提出的设计进一步完善了超构材料对片上光信号调控机理的研究，基于 SOI 工艺平台完成了器件的制备和测试，制备的器件具有超紧凑的尺寸和有竞争力的性能。

在未来的研究计划里，本文设计了片上多维信号通信系统，其具有 160 个通信通道 (2 偏振  $\times$  5 模式  $\times$  16 波长)，可以显著增加片上光通信的容量。本课题组的研究人员已经展示可以通过 16 个通道在单波长上实现 2.162 Tbit/s 的数据传输速度 (Y. He, et al, Adv. Photon. 5, 056008, 2023)，假设其他实验条件相同，本工作预期可以通过 160 个通道实现 21.62 Tbit/s 的数据传输速度。现已完成初步仿真研究，正在进行实验加工。此外，本文研究了计算光谱仪和光学非线性过程的原理，并基于微环对波长的调控作用和双光子吸收的非线性原理，设计演示了基于双光子吸收的微型计算光谱仪。

未来计划基于硅基超构材料的独特性质，设计非线性频率转换器件和高性能光谱仪器件。

**关键词：** 硅基光电子，多维光复用，超构材料，耦合模理论，纳米光子学

## ABSTRACT

With the widespread applications of the internet, there is a growing demand for data communication capacity and computational power. However, the conventional integrated circuit technology may struggle to meet the continuously growing demands. Silicon photonics offers a new path in the post-Moore era. By using photons instead of electrons for data transmission, silicon photonics enables faster on-chip data communication. Moreover, multidimensional optical multiplexing technology is promising to further enhance high-speed data communication by carrying different signals in different dimensions. This approach includes polarization-division multiplexing, wavelength-division multiplexing, and mode-division multiplexing.

In recent years, with the maturity of semiconductor processing technology, the silicon-on-insulator (SOI) platform has allowed the fabrication of nanostructures much smaller than the wavelength. These artificially engineered nanostructures, known as metamaterials, exhibit optical properties beyond natural materials. This method provides a powerful method to control light at the subwavelength-scale, opening possibilities for manufacturing compact and high-performance optical devices, which attracts lots of interest.

This thesis focuses on the manipulation mechanism of on-chip optical signals with metamaterials. We experimentally demonstrated a series of ultra-compact, low-loss, high-bandwidth, and simple-process on-chip multidimensional manipulation devices, including ultra-compact mode converters, mode (de)multiplexers, wavelength (de)multiplexers, polarizers, polarization beam splitters (PBS), and polarization splitter-rotator (PSR), which are key components for on-chip multidimensional optical communication. The main research results and innovations are outlined as follows:

### 1. Metamaterial-enabled On-Chip Polarization Manipulation Devices

In this study, a series of on-chip polarization control devices, including polarizers, polarization beam splitters, and polarization splitter rotators, are demonstrated for filtering, splitting, and rotating between different polarization states. The results are as follows:

1) For the on-chip polarizer, based on a metamaterial with periodic dielectric holes, a polarizer is designed to block the TE mode without affecting the transmission of the TM

mode. We fabricate the polarizers on the SOI platform, with a footprint of  $18 \times 1 \mu\text{m}^2$ , loss of  $< 1 \text{ dB}$ , and bandwidth of 100 nm.

2) For the on-chip PBS, utilizing the ability of metamaterials of the wavefronts manipulation, the PBS divides TE and TM polarized mode into two different ports. The footprint of the fabricated polarization beam splitter is  $16 \times 1.1 \mu\text{m}^2$ , with insertion loss of  $< 2 \text{ dB}$ , and bandwidth of 50 nm.

3) For the on-chip PSR, using dielectric holes and a slot, the PSR divides the TE and TM modes into two different ports while rotating the TM-polarized light to the TE-polarized light. The footprint of the on-chip beam splitter rotator is  $13 \times 1 \mu\text{m}^2$ , with the loss of less than 1.3 dB, and bandwidth of 80 nm.

## 2. Metamaterial-enabled On-Chip Mode Manipulation Devices

In this study, a series of mode converters and mode (de)multiplexers based on metamaterials are demonstrated for the conversion and multiplexing between different modes. The results are as follows:

1) For TE<sub>0</sub>-to-TE<sub>1</sub> mode converters, two kinds of devices are fabricated. The first device has an ultra-compact footprint ( $1.2 \times 0.8 \mu\text{m}^2$ ), low loss ( $< 1.2 \text{ dB}$ ), and large bandwidth ( $\sim 50 \text{ nm}$ ). The second device has a compact footprint ( $2.3 \times 0.88 \mu\text{m}^2$ ), lower loss ( $< 0.5 \text{ dB}$ ), and a larger bandwidth ( $\sim 50 \text{ nm}$ ).

2) This approach can be scaled to higher-order mode converters. The TE<sub>0</sub>-to-TE<sub>2</sub> mode converter has a compact footprint of  $2.4 \times 1.4 \mu\text{m}^2$ , a low insertion loss of  $< 0.3 \text{ dB}$ , and a bandwidth of  $\sim 50 \text{ nm}$ . We also design TE<sub>0</sub>-to-TE<sub>3</sub> mode converters through cascading, with a coupling length of 7.4  $\mu\text{m}$ , simulated loss of  $< 0.22 \text{ dB}$ , and bandwidth of 300 nm.

3) Additionally, using the simple dielectric slot, we fabricated an ultra-compact TE<sub>0</sub>/TE<sub>1</sub> mode (de)multiplexer with a footprint of  $1.8 \times 1 \mu\text{m}^2$ , loss of  $< 0.5 \text{ dB}$ , and bandwidth of 60 nm.

## 3. Metamaterial-enabled On-Chip Wavelength Manipulation Devices

In this study, a series of on-chip wavelength (de)multiplexers based on metamaterials are experimentally demonstrated to couple the light of different wavelengths into different channels or combine the light from different channels into the same bus waveguide. The results are as follows:

1. The footprint of a single-channel wavelength (de)multiplexer is  $95 \times 1.5 \mu\text{m}^2$ , the

loss is less than 1.5 dB.

2. The footprint of a dual-channel wavelength (de)multiplexer is  $150 \times 2 \mu\text{m}^2$ , the loss is less than 1.3 dB, and the crosstalk between different channels is lower than  $-19.2 \text{ dB}$ .

3. The footprint of a four-channel wavelength (de)multiplexer is  $250 \times 2.5 \mu\text{m}^2$ , the loss is less than 2 dB and the crosstalk between different channels is lower than  $-14.3 \text{ dB}$ .

Furthermore, we also fabricated electrodes and heaters on the chip to demonstrate the ability to adjust the operation wavelength through thermal tuning. The tuning efficiency is larger than  $0.15 \text{ nm/mW}$  for all channels.

In summary, we study the metamaterial-enabled on-chip devices for polarization, mode, and wavelength manipulation. These devices were fabricated and tested on the SOI platform. Besides, we further explored on-chip multidimensional signal communication systems, designing a metamaterial-enabled multidimensional multiplexing communication system with 160 channels, significantly increasing on-chip optical communication capacity, which has the potential to reach a data transmission speed of  $21.62 \text{ Tbit/s}$ . Preliminary simulation studies have been completed, and experimental fabrication is underway.

Furthermore, metamaterials can also be utilized to achieve phase-matching conditions for optical nonlinear frequency conversion and control the wavefront propagation for computational spectrometers. We conducted preliminary studies on the principles of computational spectrometers and optical nonlinear processes and demonstrated a miniaturized computational spectrometer based on two-photon absorption. Additionally, it is possible to design nonlinear frequency conversion devices and high-performance spectrometers based on silicon-based metamaterials in the future research.

**Key words:** Silicon Photonics, Multidimensional Multiplexing, Metamaterial, Coupled Mode Theory, Nanophotonics

# 目 录

硅基超构多维光场调控.....	1
摘要.....	I
ABSTRACT .....	IV
第一章 绪论.....	1
1.1 硅基光电子.....	1
1.2 多维调控器件.....	4
1.2.1 偏振调控器件.....	7
1.2.2 模式调控器件.....	8
1.2.3 波长调控器件.....	10
1.3 超构材料光学器件.....	11
1.4 本文的章节安排.....	13
第二章 超构材料的调控机理.....	16
2.1 平板波导模式的求解方法.....	16
2.2 矩形波导模式的求解方法.....	19
2.3 波导模式展开.....	22
2.4 耦合模理论.....	22
2.4.1 耦合模理论的一般数学形式.....	22
2.4.2 耦合模理论的具体应用.....	24
2.5 有效介质理论.....	32
2.6 数值仿真技术.....	34
2.7 本章小结.....	34
第三章 片上超构偏振调控.....	35

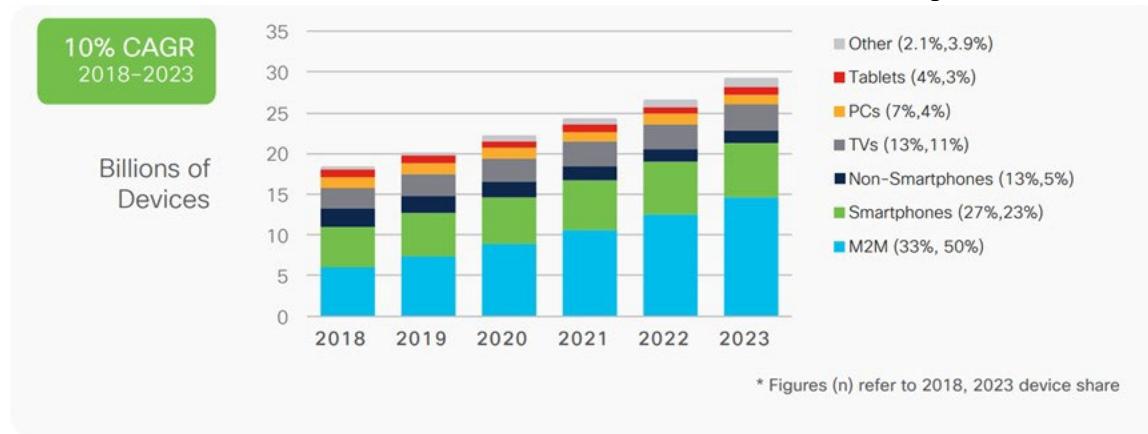
3.1 研究背景 .....	35
3.2 设计和原理 .....	36
3.2.1 基本原理 .....	36
3.2.2 起偏器的设计 .....	40
3.2.3 偏振分束器的设计 .....	42
3.2.4 偏振分束旋转器的设计 .....	46
3.3 加工和测试 .....	50
3.3.1 制备方法 .....	50
3.3.2 测试方法 .....	51
3.4 测试结果 .....	52
3.4 讨论和分析 .....	53
3.4.1 硅基偏振调控器件的性能比较 .....	53
3.4.2 工艺容忍度分析 .....	55
3.5 本章小结 .....	58
<b>第四章 片上超构模式调控.....</b>	<b>60</b>
4.1 研究背景 .....	60
4.2 设计和原理 .....	61
4.2.1 模式转换器的设计 .....	62
4.2.2 模式（解）复用器的设计 .....	63
4.3 加工和测试 .....	65
4.4 讨论和分析 .....	67
4.4.1 工艺容忍度 .....	67
4.4.2 设计的可扩展性 .....	68
4.4.3 器件的性能比较 .....	71
4.5 本章小结 .....	72
<b>第五章 片上超构波长调控.....</b>	<b>74</b>
5.1 研究背景 .....	74

5.2 原理和设计 .....	75
5.3 加工和测试 .....	80
5.4 讨论和分析 .....	82
5.4.1 性能比较 .....	82
5.4.2 超构材料结构对波长（解）复用器性能的影响 .....	83
5.4.3 模式解复用器的设计 .....	86
5.4.4 工作波长的调谐 .....	91
5.4.5 面向 LAN-WDM 设计的级联波长（解）复用器模型 .....	95
5.4.6 超构材料波导作为波长复用器时的性能 .....	97
5.5 本章小结 .....	98
<b>第六章 总结与展望.....</b>	<b>99</b>
6.1 工作总结和创新点 .....	99
6.1.1 基于超构材料的片上偏振态调控器件 .....	99
6.1.2 基于超构材料的片上模式调控器件 .....	99
6.1.3 基于超构材料的片上波长调控器件 .....	100
6.2 工作展望 .....	100
6.2.1 片上超构多维光通信系统 .....	100
6.2.2 片上超构非线性调控 .....	102
6.2.3 片上超构光谱仪 .....	103
<b>参 考 文 献.....</b>	<b>106</b>
<b>附录 缩略语.....</b>	<b>126</b>
<b>攻读博士学位期间已发表或录用的论文 .....</b>	<b>128</b>
<b>攻读博士学位期间参与的科研项目 .....</b>	<b>130</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>131</b>

# 第一章 绪论

## 1.1 硅基光电子

随着信息技术的飞速发展，人类社会需要信息系统具有更大通信容量，更快计算速度，更小功耗和更低成本。图 1.1-1 展示了 Cisco 公司总结的每年全球互连网智能设备的增长量<sup>[1]</sup>，截止到 2023 年，Cisco 估计全球有 53 亿互连网用户，每人平均有 3.6 个连接互连网的智能设备，全球平均固定宽带速度达到 110 Mbps<sup>[2]</sup>。



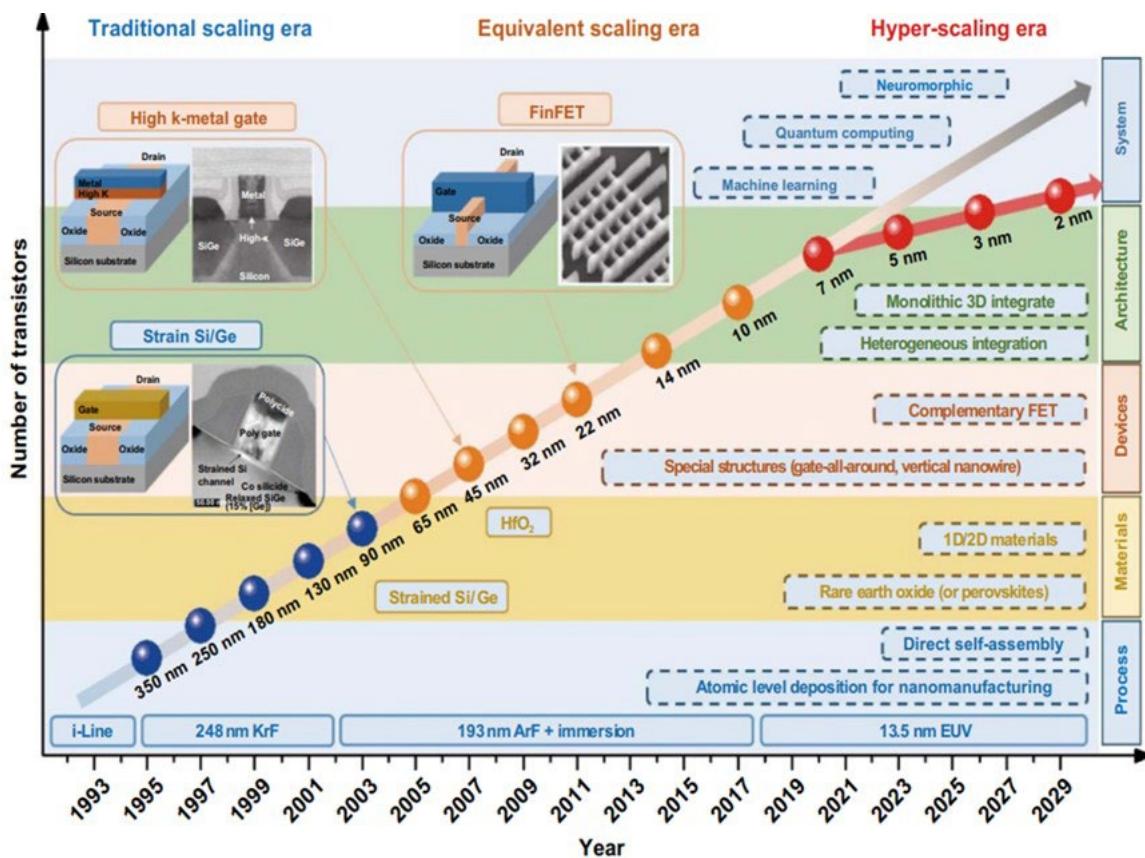
Source: Cisco Annual Internet Report, 2018-2023

图 1.1-1. 每年全球智能设备的增长量<sup>[1]</sup>

Fig. 1.1-1. The annual global growth of Global device and connection growth<sup>[1]</sup>

在过去的五十年，半导体制程工艺的不断进步极大地推动了信息技术的飞速发展。据摩尔定律预测，集成电路上可容纳的晶体管数量每隔约 18 至 24 个月会翻倍，同时成本会减半。如图 1.1-2 所示，随着摩尔定律的发展，为了提高晶体管密度，研究人员采用了高  $k$  栅极介质、鳍式场效应晶体管、极紫外曝光等多种方案来减小晶体管特征尺寸。这使得在同样的芯片面积上可以加工更多的晶体管，从而提高电子芯片的晶体管密度，降低单位计算量所需的成本，更小的晶体管尺寸同时也会加快计算处理的速度，降低芯片的功耗。

然而，随着时间的推移，摩尔定律在过去几十年中已经面临了越来越多的挑战。由于半导体的加工制造受到越来越多的物理限制，制造工艺越来越复杂，继续按照相同的速度增加晶体管数量变得越来越困难<sup>[3,4]</sup>。

图 1.1-2. 随着 CMOS 技术的演进，晶体管数目随时间的增长情况<sup>[4]</sup>Fig. 1.1-2. Scaling of CMOS technology, the insets are electron microscopy images<sup>[4]</sup>

在这一背景下，硅基光电子技术崭露头角，通过利用互补金属氧化物半导体（CMOS, Complementary Metal-Oxide-Semiconductor）工艺，集成光子回路可以在芯片上进行加工，成为解决高性能通信、计算和传感问题的关键技术。硅基光电子技术从诞生以来发展迅速，1969 年，贝尔实验室的 Miller 首次提出光互连的方式代替电互连进行片上的信号传输，用来突破电互连的瓶颈<sup>[5]</sup>，1985 年，马萨诸塞大学的 Soref 和 Lorenzo 进一步提出了集成光子回路<sup>[6]</sup>，他们展示了硅中存在的自由载流子色散效应，通过注入（或耗尽）硅中的载流子，可以改变材料的折射率。因此，通过将 PN 结的结构和波导结构结合在一起的方法，可以实现相位调制器，这可以作为集成光子回路的一个基本组件<sup>[7,8]</sup>。

如图 1.1-3 所示，硅基光电子发展离不开高质量波导的实现，绝缘体上硅（SOI, Silicon on Insulator）晶圆平台的出现是一项关键的使能技术。SOI 能够在垂直方向上对光场进行限制<sup>[9-12]</sup>，并通过进一步的光刻技术来形成波导的几何形状，可以实现低损耗波导<sup>[13]</sup>和紧凑的弯曲波导<sup>[14]</sup>，分束器<sup>[15]</sup>，波导交叉<sup>[16]</sup>，和其他无源器件<sup>[17-20]</sup>。

在高质量波导得以实现后，其他的片上光学组件开始陆续出现，例如，定向耦合器<sup>[21]</sup>，波长复用和解复用器<sup>[22]</sup>，可调微环谐振器等有源器件<sup>[23]</sup>。基于等离子体色散效应的马赫-曾德尔调制器（MZM，Mach-Zehnder modulators）的方案也逐渐发展成熟<sup>[24]</sup>，2004年，Intel公司首次演示了1GHz带宽的调制器<sup>[25]</sup>。与此同时，基于分子束外延生长（MBE，Molecular Beam Epitaxy）的片上锗硅光探测器技术得到了发展，可以实现晶圆级的高质量锗硅生长<sup>[26-28]</sup>。此外，片上激光器仍然是一个重要的难点问题，由于硅是间接带隙半导体，因此很难直接发光。解决片上光源的问题通常有两种方案，一是通过封装的方式把光源集成到SOI芯片上<sup>[29]</sup>，二是更加有挑战的基于硅的激光器<sup>[30]</sup>。前面一种方案已经得到了商用化的验证<sup>[31]</sup>，而后者目前仍然面临着较多的困难，依然是研究领域的一个热点问题<sup>[32,33]</sup>。

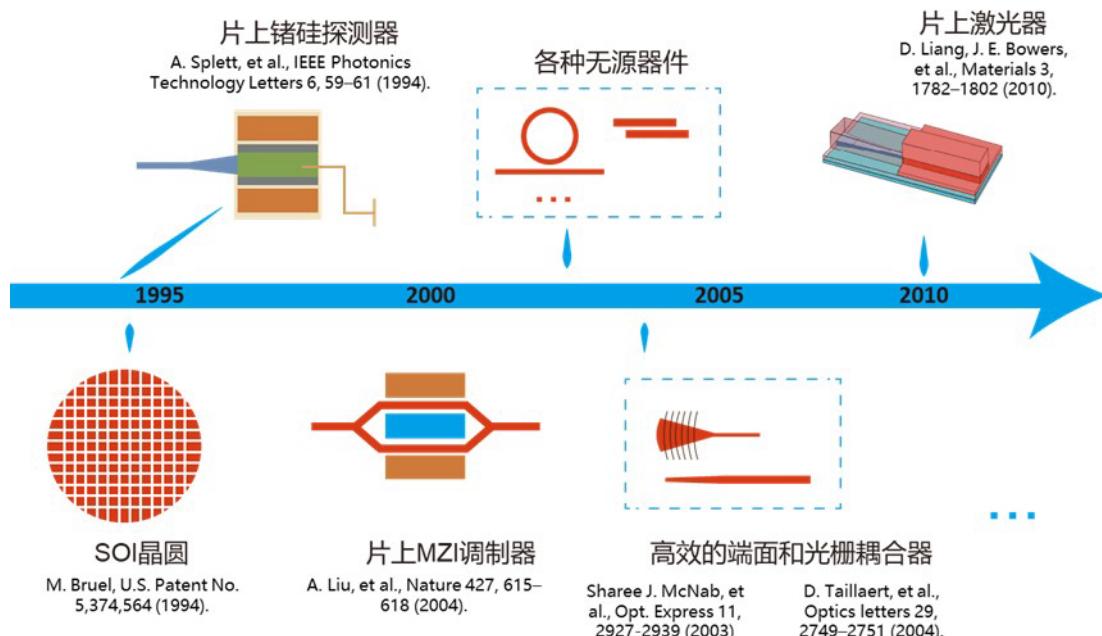


图 1.1-3 硅基光电子技术发展简史

Fig. 1.1-3 A brief history of the development of silicon photonics

硅基光电子封装也快速发展成熟，由于硅具有较高的折射率，芯片和光纤之间模场和折射率有较大的失配，会导致较强的反射和较低的耦合效率。研究表明，采用光栅耦合器<sup>[34,35]</sup>和端面耦合器<sup>[36,37]</sup>可以实现较低的耦合损耗，这种封装技术在近年来发展迅速，有望进一步实现3维（3D）或2.5维（2.5D）的光子封装技术的商业化使用<sup>[38,39]</sup>。

商用化的收发器也逐步成熟，2007年，硅光领域的先驱公司 Luxtera 推出了用于数据通信市场的硅光子学收发器，实现了世界上首个 40G 有源光缆（AOC，Active

Optical Cable), 并实现了 300 m 的传输距离<sup>[40]</sup>。2014 年, Acacia 公司推出了首个 100G 相干接收的硅光子学解决方案, 可以用于城域范围内的应用<sup>[41]</sup>。

近几十年来, 硅基光电子这一新兴的科研成果取得了很大的发展, 被认为是后摩尔时代的关键技术之一。尽管硅光子学目前还处于初级商业阶段, 但已经具有一个健康的生态系统, 得到了许多传统集成电路产业的支持<sup>[42]</sup>。目前硅基光电子技术已经可以在 SOI 平台上加工各种功能器件, 许多代工厂以工艺设计套件 (PDK, Process Design Kit) 的形式提供硅基光电子基本组件的加工。

总的来说, 硅基光电子技术有机结合了成熟的集成电路和光通信、光传感技术, 已经是一个日渐成熟的平台, 在通信、计算和传感领域展露了巨大的发展潜力, 成为后摩尔时代的重要技术路径, 具有很大的研究意义。

## 1.2 多维调控器件

社会的数字化转型、新技术的出现推动了通信需求的不断增长。这些新的发展趋势也对传输速度更快、成本更低、更可靠的通信基础设施提出了新的要求。在信号传输中, 由于光信号的频率远高于电信号, 传输具有极高的带宽, 可以同时传输大量数据, 因此光通信大量应用于需要高速数据传输的场景中。为了使光信号的传输具有更高的集成度, 更好的性能和更低的成本, 硅基光电子的技术手段使在芯片上调控光信号成为了可能, 并逐渐在光信号的传输领域中得到广泛的研究和发展。从骨干网到局域网再到数据中心以及板级和片上光互连, 从长距离传输到短距离传输, 光信号正在逐步取代电信号进行通信<sup>[43]</sup>。

为了进一步增加片上通信系统的通信容量, 多维光信号传输利用多个不同的维度或参数来编码和传输信息, 从而可以数十倍地提高链路中的通信容量和传输速度<sup>[44-46]</sup>。片上的光信号的维度主要包括以下三个方面, 一是偏振复用 (PDM, Polarization-division Multiplexing), 偏振复用利用不同的光偏振状态来同时传输不同的光信号<sup>[47]</sup>。二是模分复用 (MDM, Mode-division Multiplexing), 携带不同信号的光可以以不同的模式进行传播, 由于不同模式之间彼此正交, 在传输过程中他们彼此不会互相干扰<sup>[48]</sup>。三是波分复用 (Wavelength-division multiplexing, WDM), 这是最常见的多维光复用技术, 它利用不同的波长携带不同的光信号, 可以在同一个光波导中同时传输多个信号<sup>[49]</sup>。

基于 SOI 平台的硅基多维 (解) 复用系统近几年来取得了很可观的进展, 如图 1.2-1 所示, 2015 年, 浙江大学的研究人员实验演示了 64 通道的混合 (解) 复用器

<sup>[50]</sup>, 其基于非对称定向耦合器 (ADC, Asymmetric Directional Coupler) 的结构, 设计了 4 个模式通道的(解)复用器, 又通过阵列波导光栅 (AWG, Arrayed Waveguide Grating) 的结构, 设计了 16 个波长通道的波长(解)复用器。同一年, 他们也展示了 18 通道的波长偏振混合复用器件<sup>[50]</sup>。由于 AWG 的尺寸相对较大, 后来的研究人员采用微环谐振腔 (MRR, Micro-ring Resonator) 来设计实现波分复用器件<sup>[51-53]</sup>, 从而可以减小器件的尺寸。2022 年, 浙江大学的研究人员进一步提出了 96 通道的多维混合复用系统<sup>[54]</sup>, 几乎在同一时间段, 来自中国科学院半导体所研究员提出了 64 通道的混合波长模式(解)复用器, 并展示了通过热调可以控制通道的工作波长<sup>[51]</sup>, 2023 年, 他们进一步实验演示了 128 通道混合(解)复用器<sup>[55]</sup>。

总的来说, 片上光信号多维调控器件有着很大的研究意义, 通过这些器件, 可以对光信号进行操控和调整, 为多维片上光信号调控提供了基础元件。接下来分别讨论偏振、模式和波长的调控器件。

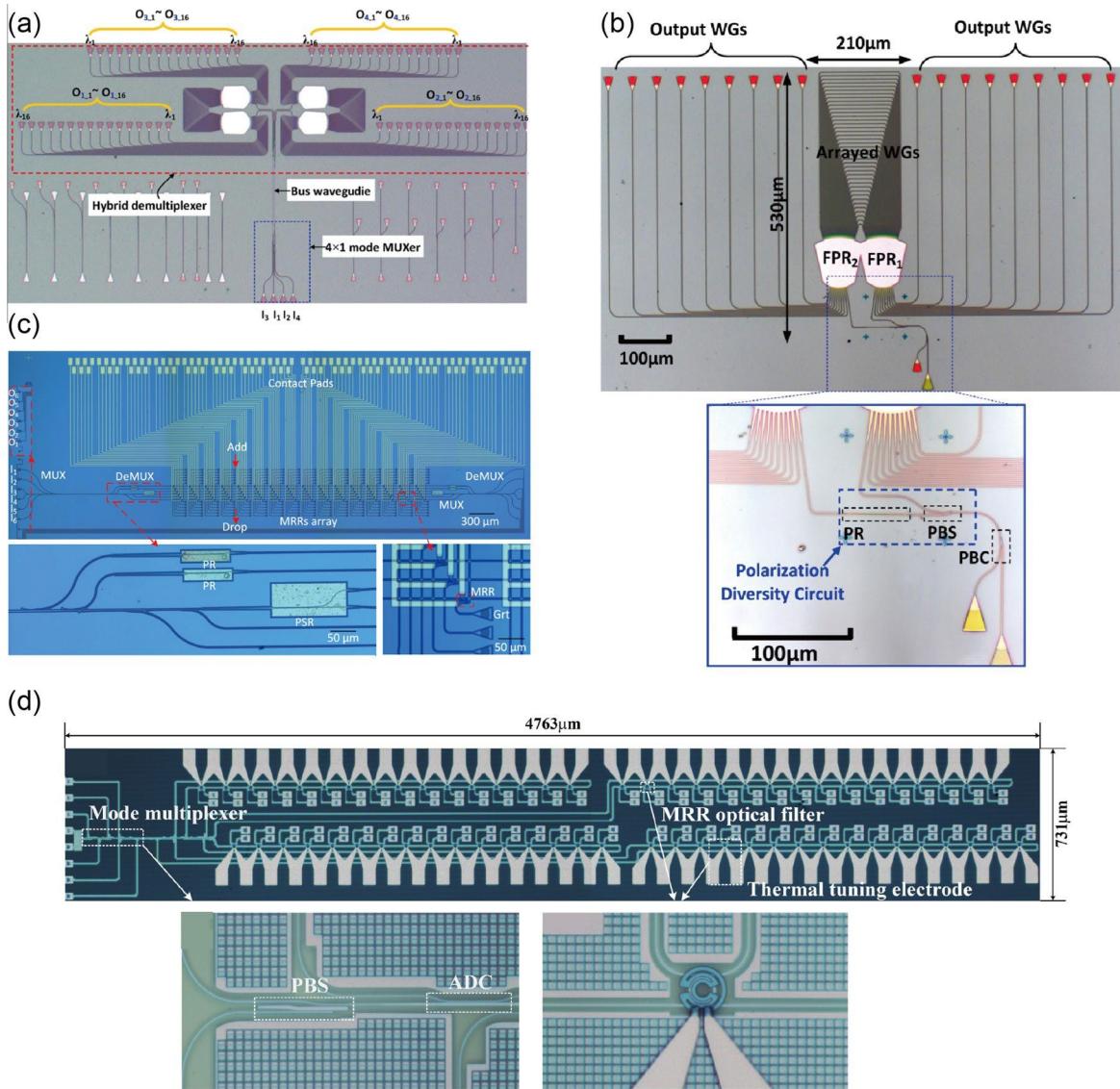


图 1.2-1 近年来基于 SOI 平台的硅基混合（解）复用系统：(a) 基于 AWG 和 ADC 的 64 通道的混合（解）复用器<sup>[50]</sup>，(b) 基于 AWG 和 ADC 的 18 通道的波长偏振混合复用器件<sup>[47]</sup>，(c) 基于 MRR 和 ADC 的 96 通道的多维混合复用系统<sup>[54]</sup>，(d) 基于 MRR 和 ADC 的 128 通道混合（解）复用器<sup>[55]</sup>。

Fig. 1.2-1 Silicon hybrid (de)multiplexers based on SOI platform demonstrated recently:

(a) 64 channel hybrid (de)multiplexers based on AWG and ADC<sup>[50]</sup>, (b) 18-channel hybrid (de)multiplexers based on AWG and ADC<sup>[47]</sup>, (c) 96-channel hybrid (de)multiplexers based on MRR and ADC<sup>[54]</sup>, and (d) 128-channel hybrid (de)multiplexer based on MRR and ADC<sup>[55]</sup>.

### 1.2.1 偏振调控器件

偏振是光的一种特性，用来描述光波振动的方向。在波导中，根据电场和磁场的振动方向可以将其分为两种偏振态：横电（TE, Transverse Electric）模式和横磁（TM, Transverse Magnetic）模式。这两种偏振态彼此正交，在传播过程中彼此互不干扰<sup>[56]</sup>。然而，由于硅波导和二氧化硅包层具有较大的折射率差异，并且波导的高和宽通常并不相等。这使得硅波导具有较强的双折射效应：以 TE 模式传播的光和以 TM 模式传播的光具有不同的传播特性<sup>[57]</sup>。

为了在对波导中的偏振态进行调控，研究人员设计出了多种功能器件，包括起偏器，偏振旋转器，偏振分束器（PBS, Polarization Beam Splitter），偏振旋转分束器（PSR, Polarization Splitter Rotator）等。其中起偏器的功能是使得某一种偏振态的光可以透过去，而另外一种偏振态的光被阻挡；偏振旋转器可以使一种偏振态的光旋转成为另一种偏振态的光；偏振分束器可以把两种不同偏振态的光分开进入两个不同的端口中；偏振分束旋转器把两种不同偏振态的光分开的同时，旋转其中一种偏振态的光，使得最后输出的光处于同一偏振态，以便后续的处理。

由于 SOI 平台具有较高的折射率对比度，这会导致比较强的波导双折射现象，因此大部分硅光器件的性能都和偏振态相关，为了克服器件对偏振态的影响，基于 SOI 平台的片上偏振调控器件有着广泛的应用。

近年来，如图 1.2-2 所示，大量的结构被报道用来控制片上的偏振态，例如，多模干涉耦合器（MMI, Multi-mode Interferometer）<sup>[58]</sup>，马赫-曾德尔干涉仪（MZI, Mach-Zehnder Interferometer）<sup>[59]</sup>，光栅耦合器<sup>[60]</sup>，优化的拓扑结构<sup>[61]</sup>，和非对称定向耦合器<sup>[62-67]</sup>等多种结构被报道用来实现偏振分束器。基于 MMI 和 MZI 结构的偏振分束器可以实现较高的偏振消光比（PER, Polarization Extinction Ratio）（ $PER > 20$  dB），但是器件的长度较大（ $> 100 \mu\text{m}$ ）<sup>[58,59]</sup>。偏振分束的光栅耦合器可以实现较高的 PER，但是插入损耗（IL, Insertion Loss）较大（ $IL > 2 \text{ dB}$ ）<sup>[60]</sup>。通过一些特别的拓扑结构的设计，也可以实现极小尺寸的偏振分束器（ $2.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$ ），但是此种器件的优化比较耗时，并且器件的 PER 可能受限（ $PER < 10 \text{ dB}$ ）<sup>[61]</sup>。

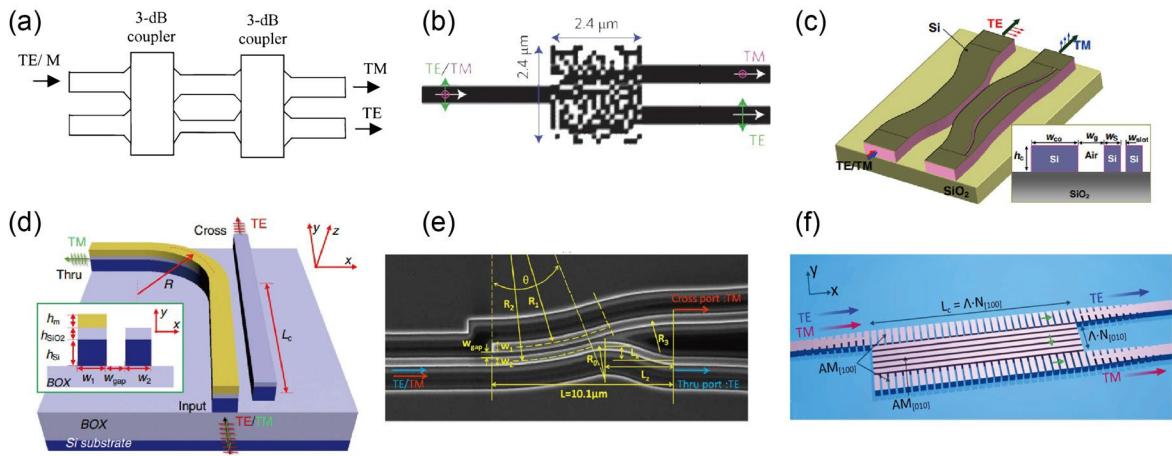


图 1.2-2 用于片上偏振态调控的器件结构: (a) 马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 结构<sup>[59]</sup>, (b) 逆向设计的拓扑结构<sup>[61]</sup>, (c) 槽波导 ADC 结构<sup>[63]</sup>, (d) 等离子体波导 ADC 结构<sup>[64]</sup>, (e) 弯曲波导 ADC 结构<sup>[71]</sup>, 和 (f) 各向异性超构材料 ADC 结构<sup>[68]</sup>。

Fig. 1.2-2 The structure for on-chip polarization manipulation: (a) Mach-Zehnder interferometer (MZI) structure<sup>[59]</sup>, (b) inverse design enabled topologic structure<sup>[61]</sup>, (c) slot waveguide assisted ADC<sup>[63]</sup>, (d) plasmonic waveguide assisted ADC<sup>[64]</sup>, (e) bent waveguide assisted ADC<sup>[71]</sup>, and (f) hetero-anisotropic metamaterials assisted ADC<sup>[68]</sup>.

此外, 偏振分束旋转器器件把偏振旋转和偏振分束的功能有机的结合在一起<sup>[69–72]</sup>, 其通常需要空气包层或者不同深度的刻蚀来打破波导在垂直方向上的对称性, 从而激发混合态的模式。在这些器件中, 基于 ADC 的 PBS 是最常见的, 总的来看, 其能提供了最好的性能<sup>[68]</sup>: 尺寸较小 (耦合长度 $< 20 \mu\text{m}$ ), 插入损耗较低 ( $\text{IL} < 1 \text{ dB}$ ), 偏振消光比较高 ( $\text{PER} > 20 \text{ dB}$ )<sup>[56]</sup>。基于 ADC 的 PBS 通过在耦合区域引入几何不对称性, 可以使得只有特定的偏振态满足相位匹配条件, 从而发生较强的耦合。基于 ADC 的 PBS 可以把常规的矩形波导换成其他的特殊波导, 如多模波导<sup>[62]</sup>, 狹缝波导<sup>[63]</sup>, 混合等离子体波导<sup>[64,65]</sup>, 弯曲波导<sup>[73]</sup>等, 从而进一步提高性能。

通过这些多种多样的器件, 研究人员可以对片上的偏振态进行多种多样地操控和处理, 可以用于片上偏振信号的管理、偏振复用系统中信号的复用与传输、非线性光学中的相位匹配、模拟计算和空间光角动量的生成等多种多样的应用。

## 1.2.2 模式调控器件

在集成光子回路中, 光通常被限制在波导中进行传输。基于波导的几何形状所构

成的边界条件求解麦克斯韦方程组，可以得到离散的本征值和这些本征值对应着的不同模式。每个模式都有其独特的模场分布、传播常数、色散曲线等特性，光以这些特定的模式稳定地在波导中进行传输。在波导中，根据模式的模场分布的不同，可以将同一种偏振态的模式进一步划分出不同的模式阶数，如 TE 偏振态下的  $TE_0$ 、 $TE_1$ 、 $TE_2$ 、…、 $TE_n$ ，等模式和 TM 偏振态下  $TM_0$ 、 $TM_1$ 、 $TM_2$ 、…、 $TM_n$ ，等模式。由于光以模式的形式在波导中进行传播，因此几乎所有的硅基光子学器件都离不开对光学模式的调控<sup>[74]</sup>。

如图 1.2-3 所示，实现模式转换的器件通常有四组种方法<sup>[75]</sup>：相位匹配<sup>[76,77]</sup>、波束赋形<sup>[78,79]</sup>、相干散射<sup>[80,81]</sup>和相位梯度超材料<sup>[82–84]</sup>。这些方法在器件损耗、串扰、加工容差和器件尺寸等之间存在一定的妥协。具体来说，基于相位匹配原理的 ADC 结构可以实现很高阶的模式转换和复用，但是对于高阶模式来说，由于不同模式之间的色散相差较大，相位匹配条件会对加工误差非常敏感，从而难以实现<sup>[77]</sup>。基于波束赋形的器件通常在设计上较为困难，需要分束，移向和合并三个过程，而引入  $\pi$  相移的过程通常需要较大的长度<sup>[78,79]</sup>。对于相干散射的方法，可以通过逆向设计的手段引入大量的自由度，从而可以在很小的尺寸里实现高效的模式转换。但其器件的性能仍然非常依赖于数值优化算法<sup>[85,86]</sup>。此外，非规则纳米结构也要求较高的加工精度。

通过这些器件，研究人员可以对片上的模式进行调控，从而用于片上模式复用系统中信号的复用与传输，非线性光学中的相位匹配<sup>[87]</sup>、模拟计算和空间光角动量的生成等应用。

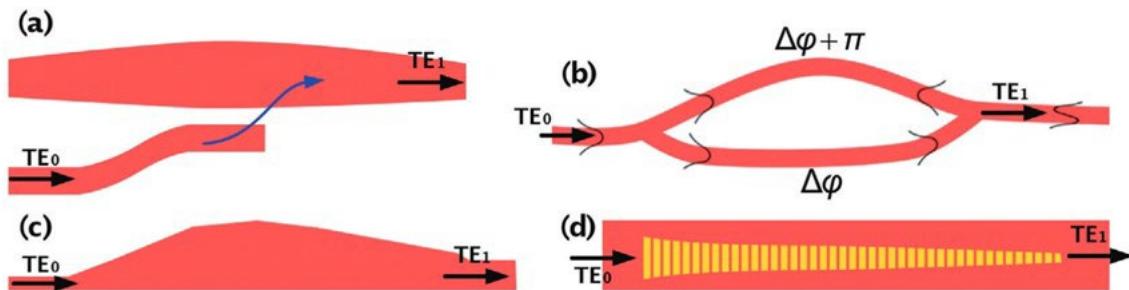


图 1.2-3 实现模式转换的四种方法：(a) 相位匹配，(b) 波束赋形，(c) 相干散射，和 (d) 相位梯度超构材料波导<sup>[75]</sup>

Fig. 1.2-3 Four methods for mode conversion: (a) phase-matching, (b) beam shaping, (c) coherent scattering, and (d) phase-gradient metamaterial<sup>[75]</sup>

### 1.2.3 波长调控器件

波长是用来描述光特性最重要的参数之一，不同波长的光具有不同的颜色，折射，散射和吸收特性。不同波长的光彼此正交，可以互不干扰的同时传输，被广泛应用于在波分复用系统中，用来提升光通信和光计算吞吐量。在波分复用系统中，多个光信号以不同的波长发送到同一根光波导中，这些波长被视为不同的通信通道，每个通道可以传输独立的数据流。在接收端，通过波长解复用器件将这些不同波长的信号分离出来，然后每个信号经过相应的接收器进行解调和处理，从而可以恢复出原始的信号。

为了进一步提高片上集成光学中波长的操控能力，研究人员也设计出了多种功能器件，包括滤波器、波长转换器、波长（解）复用器等。其中滤波器可以选择特定波长的信号，把不需要的波长滤除；波长转换器通过非线性效应，把一种波长的光转换到另一种波长上，从而实现信号在不同通信通道之间的转换；波长（解）复用器使多个不同波长的光信号复用到同一根波导中进行传播，或者把不同波长的光信号解复用到不同的输出端口。

为了在片上实现波长的复用和解复用，研究人员开发设计了不同方案如图 1.2-4 所示，包括 MZI<sup>[88–95]</sup>, MRR<sup>[96–111]</sup>, AWG<sup>[112–128]</sup>, 布拉格光栅波导 (WBG, Waveguide Bragg Grating)<sup>[129–140]</sup>, 反射式阶梯光栅 (EDG, Echelle Diffraction Grating)<sup>[141–143]</sup> 等。通过这些结构，研究人员实现了多种不同通道间隔和通道数目的波分复用滤波器，在这些结构里，AWG 和 EDG 可以实现多个波长通道因此具有很大的吸引力。

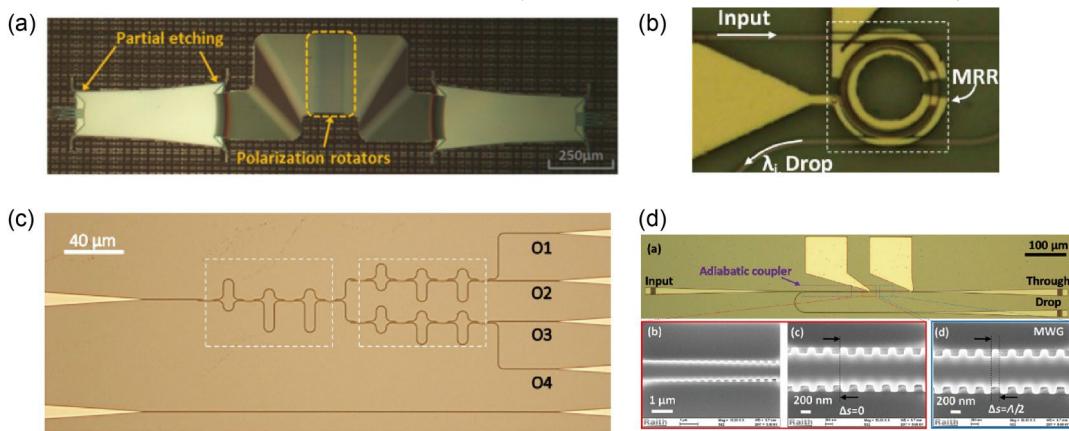


图 1.2-4 用于片上波长调控的结构：(a) AWG<sup>[128]</sup>, (b) MRR<sup>[111]</sup>, (c)

MZI<sup>[89]</sup>, 和 (d) 布拉格光栅波导 (MBG)<sup>[135]</sup>

Fig. 1.2-4 The structure for on-chip wavelength manipulation: (a) AWG<sup>[128]</sup>, (b) MRR<sup>[111]</sup>, (c) MZI<sup>[89]</sup>, and (d) multimode waveguide Bragg grating (MBG)<sup>[135]</sup>

在这些片上的波长调控器件中, MRR 的自由频谱范围(FSR, Free-Spectral Ranges)由谐振腔的长度所确定, 因此微环的 FSR 受限于环的最小弯曲半径。2019 年, 浙江大学的研究人员报告了一种 FSR 为 93 nm 的单个 MRR<sup>[104]</sup>。另一方面, 微环的带宽可以通过改变微环的损耗和耦合系数进行设计。采用 AWG 和 EDG 结构设计的器件通常有着较大的器件尺寸, 其 FSR 取决于相邻阵列波导之间的长度差。基于 AWG 结构和 EDG 结构的波长复用器件的 FSR 通常在 10 nm ~ 100 nm 之间, 而不同的波长通道间隔在 0.8 nm ~ 3.2 nm 之间。当器件尺寸非常大的时候, 实现较大的通道间隔<sup>[114]</sup>和较大的通道数目<sup>[127]</sup>也是可行的。采用 MZI 结构的滤波器可以通过改变 MZI 不同臂之间的分束比和相位差来设计带宽, 其通过多个 MZI 级联来实现多通道的波长(解)复用器的功能<sup>[88]</sup>。采用布拉格光栅结构设计的滤波器可以实现非常大的 FSR, 并且最小的带宽范围 <1 nm, 最大的带宽范围 >100 nm, 此种滤波器可以用于一些需要非常大的通道带宽和 FSR 的应用, 例如片上粗波分复用的应用<sup>[135]</sup>。

通过这些的器件, 研究人员可以在片上对光波长进行多种多样的操控和处理, 可以用于片上波分复用系统中信号的复用与传输, 提高光计算和光通信的容量等的应用。

### 1.3 超构材料光学器件

硅基光子学器件通常是基于波导进行设计的。在传统器件中, 波导仅仅用来传输光, 器件也只能在有限的器件库中进行选择。而片上光学系统希望功能器件具有更小的尺寸, 更大的带宽, 更低的损耗和更丰富的功能。而传统波导器件的设计对进一步提高器件性能有一定的限制<sup>[144]</sup>。

先进的 CMOS 加工技术给集成光子技术提供了新的可能。随着先进加工技术的成熟, 在芯片上可以加工出纳米级别的结构<sup>[145]</sup>。超构材料指的是一种人工设计的材料, 通过改变材料在亚波长尺度上的结构, 可以对光波进行精确的控制, 从而改变材料表现出的折射率、色散、损耗等光学特性, 实现自然材料无法实现的功能, 给功能器件设计提供了新的可能<sup>[146,147]</sup>。

如图 1.3-1 所示, 超构材料光学器件最早被用于空间光系统。比较典型的应用有超透镜<sup>[148]</sup>和隐形材料<sup>[149,150]</sup>的设计: 通过改变结构中不同材料的占空比改变材料的折射率, 进而改变入射光的相位分布。超透镜可以通过调整材料来改变输出光的相位分布, 实现不同的透镜功能。而隐形材料的设计可以通过变换光学的原理, 通过超构材料实现所需要的特定折射率分布, 从而实现光学隐身等功能。

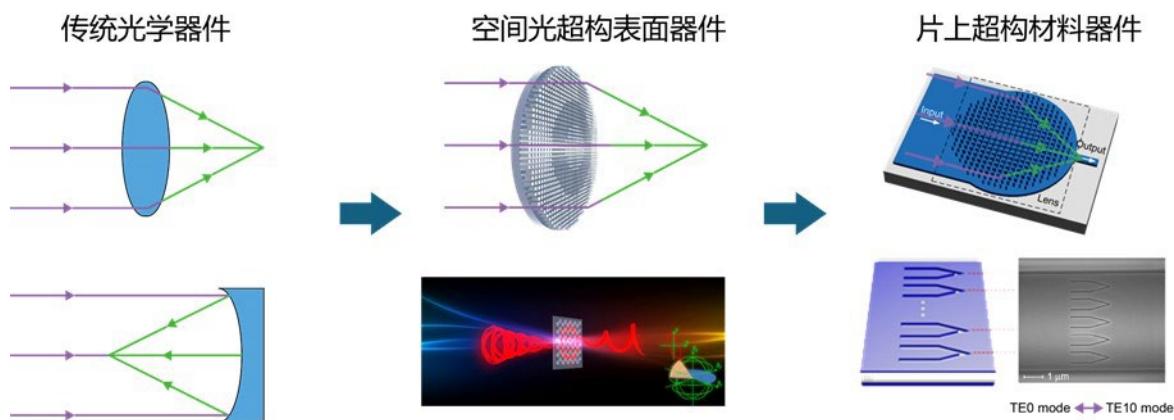


图 1.3-1 超构材料在亚波长尺度上调控光场相位，进而改变光的波前<sup>[74,151,152]</sup>。

Fig. 1.3-1 The metamaterial can manipulate the phase of the light at subwavelength scale, which can further change the wavefronts<sup>[74,151,152]</sup>.

近年来，人们对把以往集中在自由空间中的超构材料光学器件的研究迁移到光波导上，可以极大地增强传统光子器件的能力。例如，利用亚波长光栅波导结构，可以调整波导的色散来实现各种大带宽器件，如模式（解）复用器<sup>[77]</sup>、3 dB 分束器<sup>[153]</sup>、多模弯曲波导<sup>[154]</sup>等；利用片上超透镜结构，可以实现超紧凑的模斑转换<sup>[152,155]</sup>和多模交叉波导<sup>[156]</sup>；利用具有相位梯度的超构材料，可以提供等效的相位梯度，助力模式之间的相位匹配，可以用于模式转换器<sup>[82]</sup>和非线性转换中的相位匹配<sup>[157]</sup>。

为了进一步对超构材料结构进行优化，近年来发展起来了许多数值算法，允许计算机去设计和优化任意的结构超构材料波导结构，提高了设计的自由度并能够最大化器件的性能，这种设计方法也称为“逆向设计”<sup>[158,159]</sup>。有许多器件已经通过逆向设计的方法进行设计和加工实现，具有超紧凑的尺寸和优异的性能，如波分复用器<sup>[85]</sup>、偏振分束器<sup>[61]</sup>、多模光互连器件<sup>[160]</sup>、模式（解）复用器<sup>[161]</sup>等。

通过集成多种亚波长结构，超构材料光学器件可以具有新的功能或提高的器件的性能。与没有亚波长结构的传统光学器件相比，超构材料光学波导不仅可以传播光和限制光，还可以通过亚波长结构实现对光场灵活而强大的控制，具有深远而广泛的潜在应用。图 1.3-2 部分总结了部分通过传统波导器件和超构材料结构对片上光信号的偏振态、模式、波长进行调控的器件。超构材料结构对片上多维信号的调控机理不仅具有很重要的研究意义，也具有广泛的应用价值。

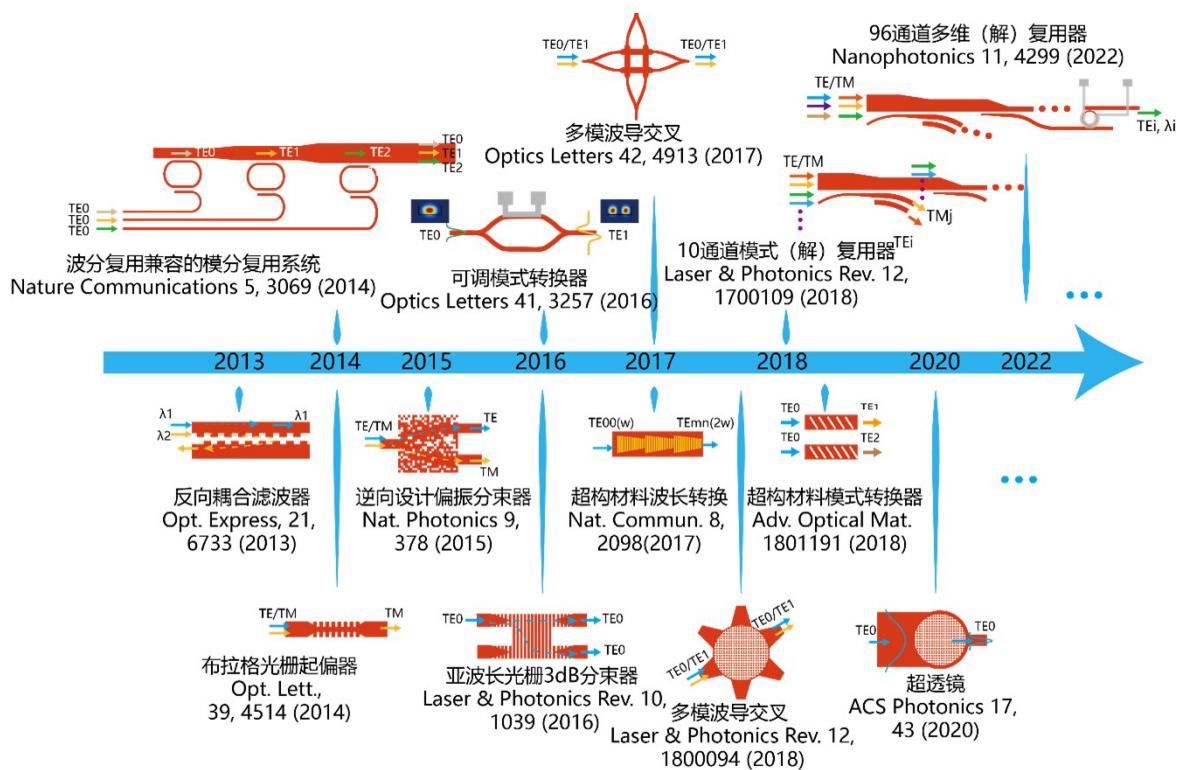


图 1.3-2 近年来基于传统波导结构和超构材料结构调控片上光信号的部分总结

Fig. 1.3-2 The recent work to manipulate on-chip optical signals based on waveguide structure and metamaterial structure

## 1.4 本文的章节安排

图 1.4-1 概述了本论文的主要研究内容，本论文主要探索了超构材料对片上光信号的调控机理，演示了超构材料为片上偏振态、模式和波长调控提供的解决方案。片上的超构材料具有强大的光场调控能力：为了对偏振态做出调控，本文在 SOI 平台上设计并加工了起偏器、偏振分束器和偏振分束旋转器；为了对模式进行调控，本文在 SOI 平台上设计并加工了  $TE_0$ - $TE_1$  模式转换器和  $TE_0$ - $TE_1$  模式（解）复用器，并向高阶模式转换进行了拓展；为了对波长进行调控，本文设计并加工了单通道、双通道和四通道的波长（解）复用器。进一步，本文设计了片上多维光复用系统，有望用于大通量片上光信号的传输。

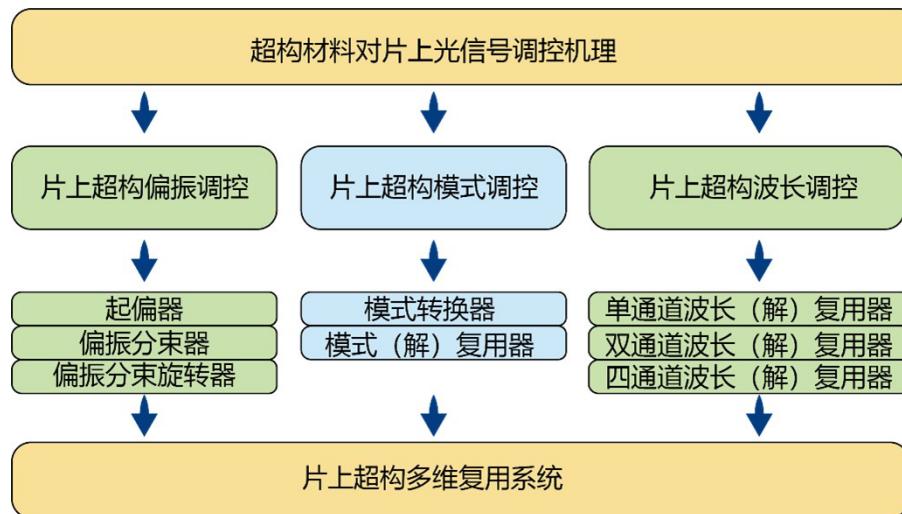


图 1.4-1 本论文的框架内容

Fig. 1.4-1 The schematic of this thesis

本论文所开展的研究工作多数已经在国际主流期刊和会议上发表，论文的章节内容安排如图 1.4-1 所示：

第一章首先介绍了硅基光电子的研究背景，简述了硅基光电子的研究意义和发展历史，然后综述了片上多维光信号调控的器件，包括偏振调控器件、模式调控器件和波长调控器件。进一步阐述了当前光学领域的研究热点问题，超构材料光学器件，并调研了超构材料对片上光场可以起到的调控作用，阐明了研究超构材料片上多维光场调控器件的意义。

第二章主要讨论了超构材料对片上光场的调控机理。首先介绍了光信号的波导模式，进一步阐述了波导模式的计算方法。然后介绍了耦合模理论，以及超构材料对片上传播光场模式的调控效果，接着讨论了超构材料的等效介质理论，最后简要介绍了使用的数值仿真方法。

第三章主要介绍了基于超构材料的片上偏振调控器件，在 SOI 平台上设计并加工了一系列偏振调控器件，包括起偏器，偏振分束器，和偏振分束旋转器，这些偏振调控器件具有非常小的尺寸和有竞争力的性能：其中起偏器的插入损耗小于 1 dB，消光比大于 30 dB，带宽为 100 nm；偏振分束器插入损耗小于 2 dB，消光比大于 30 dB，带宽为 50 nm；偏振分束旋转器的插入损耗小于 1.3 dB，消光比大于 12 dB，带宽为 80 nm。

第四章主要介绍了基于超构材料的片上模式调控器件，在 SOI 平台上设计并加工了一系列模式调控器件，包括 TE<sub>0</sub>-TE<sub>1</sub> 模式转换器，TE<sub>0</sub>-TE<sub>2</sub> 模式转换器，和 TE<sub>0</sub>/TE<sub>1</sub>

模式(解)复用器。这些模式调控器件具有非常小的尺寸和有竞争力的性能: TE<sub>0</sub>-TE<sub>1</sub>模式转换器的尺寸为  $0.8 \times 1.2 \mu\text{m}^2$ , 插入损耗小于 1.2 dB; TE<sub>0</sub>-TE<sub>2</sub> 模式转换器尺寸为  $1.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$ , 插入损耗小于 0.5 dB, 带宽为 50 nm, TE<sub>0</sub>/TE<sub>1</sub> 模式(解)复用器的尺寸为  $1.8 \times 1 \mu\text{m}^2$ , 插入损耗小于 0.5 dB, 串扰小于 -10 dB。

第五章主要介绍了基于超构材料的片上波长调控器件, 在 SOI 平台上设计并加工了一系列波分复用器, 包括单通道、双通道和四通道的波分复用滤波器。其中四通道的波分复用滤波器具有矩形形状的光谱和  $2.5 \times 250 \mu\text{m}^2$  的紧凑尺寸, 器件的插入损耗小于 2 dB, 通道间串扰小于 -14.3 dB。

第六章主要总结了本文的研究工作, 并对在此基础上的后续工作进行了展望, 包括基于超构材料的多维光通信系统、非线性光学转换和计算光谱仪。

## 第二章 超构材料的调控机理

在片上波导系统中，光以模式的形式进行传播，无源线性器件的工作原理在本质上都可以视为模式的转换和分解。因此，讨论片上光场的调控技术离不开对波导模式的研究和分析。接下来首先讨论模式的计算，展开和分解，接着采用耦合模理论的方法，讨论不同模式在超构材料的作用下的相互耦合，和具体场景下耦合模理论的应用。从整体的角度来看，亚波长微扰结构可以被视作一种等效介质，本文将进一步讨论超构材料的有效介质理论方法，最后介绍常用的数值仿真方法。

### 2.1 平板波导模式的求解方法

如图 2.1-1 所示，平板波导是一种最简单的波导结构，由高折射率材料和包围它的低折射率材料共同构成。假设这个平板是无限大的，光沿  $z$  方向进行传播。虽然这种波导是一种理想的波导，但对很多真实的问题具有指导意义。

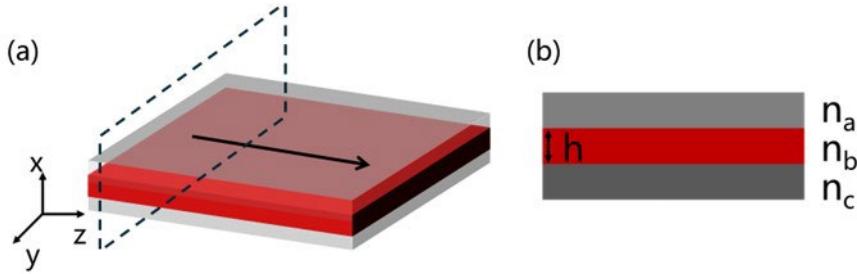


图 2.1-1 平板波导的几何结构 (a) 3D 视图 (b) 截面图<sup>[162]</sup>

Fig. 2.1-1 (a) 3D view and (b) cross-section view of a planar waveguide<sup>[162]</sup>

在电场的偏振为 TE 的情况下，电场沿着  $y$  轴进行偏振，假设波导模式被一个频率为  $\omega_0$  的光场所激发，这个光场对应着的真空波矢为  $k_0 = \frac{\omega_0}{c}$ 。为了求解此波导所支持的波导模式，需要首先在三层电介质平板波导的各层求解麦克斯韦波动方程，然后利用边界条件把这三组方程联系起来，两种材料 ( $n_a, n_b$ ) 的交界面定为  $x = 0$ 。对于频率为  $\omega_0$  的电磁场，在每一层介质波导中的波动方程都可以写成如下的标量的形式<sup>[162,163]</sup>：

$$\nabla^2 E_y + k_0^2 n_i^2 E_y = 0, \quad (2.1-1)$$

其中根据电磁波所在的层， $n_i = n_a, n_b, n_c$ 。 $E_y(x, z)$  电磁场在  $y$  方向上的分量，是关于  $x$  和  $z$  的函数。假设平板波导在  $y$  方向是无限大的，在  $y$  方向上没有限制， $E_y$  不随  $y$  变化。根据电磁场在波导中的传播方式，可以为此微分方程可以找到一个如

下的试探解<sup>[162,163]</sup>:

$$E_y(x, z) = E_y(x)e^{-j\beta z} \quad (2.1-2)$$

其中  $\beta$  是波沿  $z$  方向上的传播常数。

把试探解代入微分方程，并且假设  $\frac{d^2 E_y}{dy^2} = 0$  (假设电磁波在  $y$  方向上不变)，可以得到以下方程<sup>[162,163]</sup>:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (k_0^2 n_i^2 - \beta^2) E_y = 0, \quad (2.1-3)$$

此微分方程的通解取决于  $\beta$  和  $k_0 n_i$  之间的大小关系。对于  $\beta > k_0 n_i$ ，通解会具有一个如下的指数形式<sup>[162,163]</sup>:

$$E_y(x) = E_0 e^{\pm \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_i^2} x}, \quad \beta > k_0 n_i, \quad (2.1-4)$$

其中  $E_0$  是电磁场在  $x = 0$  处（材料的交界面处）的初始场强。为了使得方程的解符合实际的情况（能量是有限的，不可能是无限大的），指数项上会选择负数，表示场强在不断的衰减，对应着在表面处的倏逝波。换言之，当  $\beta > k_0 n_i$ ，通解具有一个指数衰减的形式。

对于  $\beta < k_0 n_i$ ，方程的通解有一个如下的振荡形式:

$$E_y(x) = E_0 e^{\pm j \sqrt{k_0^2 n_i^2 - \beta^2} x}, \quad \beta < k_0 n_i, \quad (2.1-5)$$

综合以上两种情况，对于传播常数  $\beta$  和材料折射率  $n_i$  的不同关系，微分方程的通解有衰减 ( $\beta > k_0 n_i$ ) 和振荡 ( $\beta < k_0 n_i$ ) 两种形式。

对于衰减情况，可以定义一个衰减系数:  $\gamma = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_i^2}$ ，那么  $E_y(x) = E_0 e^{-\gamma x}$ ；

对于振荡情况，可以定义一个横向波矢量:  $\kappa = \sqrt{k_0^2 n_i^2 - \beta^2}$ ，那么  $E_y(x) = E_0 e^{\pm j \kappa x}$ 。

$\beta$  和  $\kappa$  分别是纵向波矢量和横向波矢量，它们的矢量和就是材料中的波矢量  $k_0 n_i$ 。

为了使电磁波能在波导中稳定的进行传播，需要使中间层介质中电磁波的解为振荡情况 ( $\beta < k_0 n_b$ )，两侧层介质中电磁波的解为衰减情况 ( $\beta > k_0 n_{a,c}$ )，这也和对中间层介质折射率高于两侧介质折射率的要求相符合 ( $n_b > n_{a,c}$ )。接下来根据电

磁波在介质边界两侧需要连续的边界条件，可以进一步确定传播常数 $\beta$ 的值。

电场在三层介质波导区域的解可以分别写为<sup>[162,163]</sup>:

$$\begin{aligned} E_y(x) &= Ae^{-\gamma_a x} & 0 < x \\ E_y(x) &= B\cos(\kappa_b x) + C\sin(\kappa_b x) & -h < x < 0, \\ E_y(x) &= De^{\gamma_b(x+h)} & x < -h \end{aligned} \quad (2.1-6)$$

其中 $A, B, C, D$ 是由边界条件所决定的系数，边界条件要求电场和磁场在层与层之间的交界面需要连续。由于磁场分量和电场分量之间有一个关系： $H_z = \frac{j}{\mu\omega} \frac{\partial E_y}{\partial x}$ ，所以需要 $Ey$ 和 $\frac{\partial E_y}{\partial x}$ 都是连续的，对应着以下要求：

对于 $x = 0$ 处的界面，通过对电场( $E_y$ )和磁场分量( $\frac{\partial E_y}{\partial x}$ )的连续性要求，分别可以得到：

$$Ae^{-\gamma_a 0} = B\cos(\kappa_b 0) + C\sin(\kappa_b 0), \quad -A\gamma_a = +C\kappa_b, \quad (2.1-7)$$

进一步可以得到 $B = A$ 和 $C = -A\frac{\gamma_a}{\kappa_b}$ 。

对于 $x = -h$ 处的界面，通过对电场( $E_y$ )的连续性要求，可以得到<sup>[162,163]</sup>:

$$A \left[ \cos(-\kappa_b h) - \frac{\gamma_a}{\kappa_b} \sin(-\kappa_b h) \right] = De^{\gamma_c(h-h)}, \quad (2.1-8)$$

因此 $D = A \left[ \cos(\kappa_b h) + \frac{\gamma_a}{\kappa_b} \sin(\kappa_b h) \right]$ 。

至此， $B, C, D$ 三个系数都可以用 $A$ 来进行表示，最后，通过对 $x = -h$ 处的界面磁场分量的连续性要求，可以得到：

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_y}{\partial x} |_{x=-h} &= A[\kappa_b \sin(\kappa_b h) - \gamma_a \cos(\kappa_b h)] \\ &= A \left[ \cos(\kappa_b h) + \frac{\gamma_a}{\kappa_b} \sin(\kappa_b h) \right] \gamma_c, \end{aligned} \quad (2.1-9)$$

化简此公式，两边同时除以 $\cos(\kappa_b h)$ 可以得到本征值方程：

$$\tan(h\kappa_b) = \frac{\gamma_a + \gamma_c}{\kappa_b \left[ 1 - \frac{\gamma_a \gamma_c}{\kappa_b^2} \right]}, \quad (2.1-10)$$

以上所有参数( $\gamma_a, \gamma_b, \gamma_c$ )都取决于 $\beta$ ，其中 $\gamma_i = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_i^2}$ ， $\kappa_i = \sqrt{k_0^2 n_i^2 - \beta^2}$ 。接下来就可以通过图解法或者数值计算得到 $\beta$ 的值，进一步就可以得到矩形无限大平板波导的模场分布。

如图 2.1-2 所示，在  $n_a = 1$ ,  $n_b = 3.47$ ,  $n_c = 1.44$ ,  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ,  $h = 1 \mu\text{m}$  的情况下，可以分别画出方程的左边和右边的函数图像，其交点就是传播常数的解。可以看出，方程有四个离散的解，分别大约为  $1.38 \times 10^7$ ,  $1.30 \times 10^7$ ,  $1.15 \times 10^7$ ,  $0.92 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 。注意  $\beta$  的取值范围在  $k_0 n_{a,c}$  到  $k_0 n_b$  之间，从而使电磁场的解在包层里为指数衰减的形式而在中间层为振荡的形式。

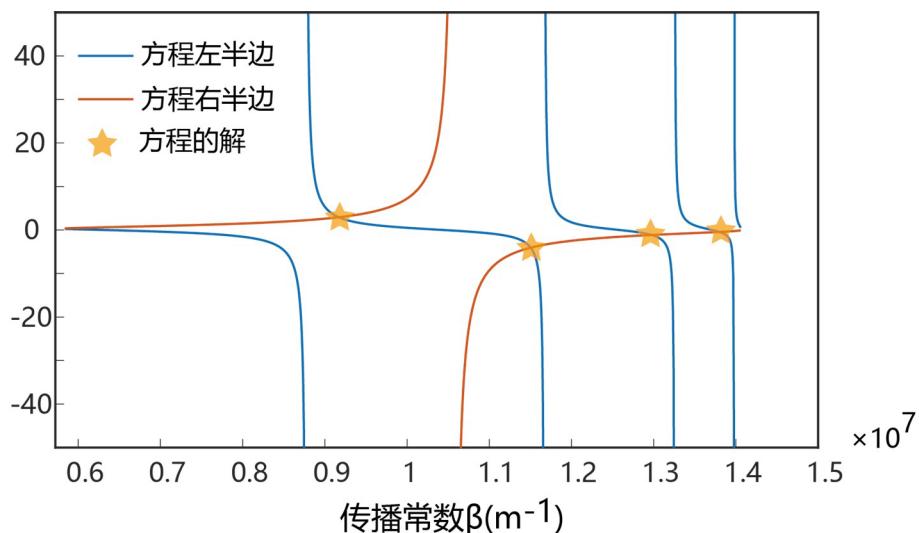


图 2.1-2 用图解法计算无限大平面波导的传播常数

Fig.2.1-2 Propagation constant calculated using graphical method

## 2.2 矩形波导模式的求解方法

在集成光子学领域中，矩形电介质波导是实际可以加工的常见结构。和前面讨论的平板波导不同，由于求解问题的边界条件比较复杂，对于矩形波导通常难以得到准确的解析解。

有效折射率方法 (EIM, Effective Index Method) 提供了一种近似求解矩形波导中模场分布的方法。有效折射率方法通过把一个二维的问题转换为两个一维的问题进行求解。通过前面分析的无限大平板波导的模场分布可以近似得到矩形波导中的模场分布<sup>[162,163]</sup>。

矩形波导的结构如图 2.2-1 所示，可以把矩形波导近似分解成一个沿  $x$  方向和一个沿  $y$  方向无限大的平板波导来进行求解。在平板波导结构中，对特定的偏振态 (TE 或者 TM 模式) 和波长，可以找到允许的传播常数  $\beta$ ，接着可以确定平板波导的有效

折射率 $n_{eff}$  [162,163]:

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0}, \quad (2.2-1)$$

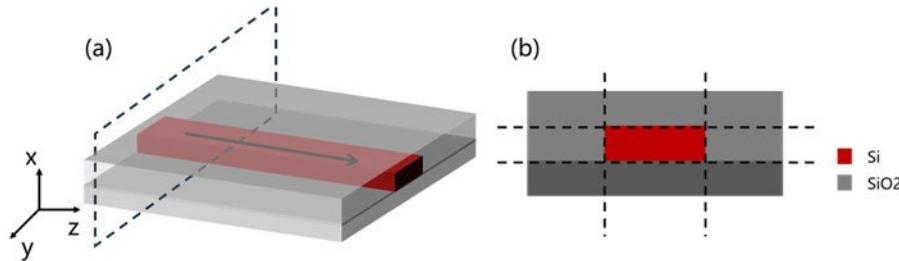


图 2.2-1 矩形波导的几何结构 (a) 3D 视图 (b) 截面图

Fig. 2.2-1 (a) 3D view and (b) cross-section view of a rectangular waveguide

接着可以在另一个方向上进行求解，使用之前所求的有效折射率代替原来的折射率，构成新的三层无限大平板波导，然后可以近似得到矩形波导中模式的传播常数。为了使得近似结果较为准确，矩形波导需要具有较大的长宽比。矩形波导中的模场也可以近似认为是两种无限大平板波导模式的乘积。其电磁场分布可以写成：

$\Psi_m(x, y) = G(y)F(x)$ ，其中  $G(y)$  和  $F(x)$  分别是  $y$  方向上和  $x$  方向上平板波导的电磁场分布。在  $y$  方向上的电磁场分布可以写成<sup>[164,165]</sup>:

$$G(y) = \begin{cases} A \cos\left(\frac{\rho h}{2}\right) e^{\gamma\left(y+\frac{h}{2}\right)} & y < -\frac{h}{2} \\ \{A \cos(\rho y) & |y| \leq \frac{h}{2}, \\ A \cos\left(\frac{\rho h}{2}\right) e^{-\gamma\left(y-\frac{h}{2}\right)} & y > \frac{h}{2} \end{cases} \quad (2.2-2)$$

其中  $A$  是一个常数，而参数  $\rho$  和  $\gamma$  分别可以通过以下公式进行计算：

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{n_{Si}^2 - n_{effg}^2} \\ \gamma &= \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{n_{effg}^2 - n_c^2}, \end{aligned} \quad (2.2-3)$$

这里， $n_{effg}$  是高度为  $h$  的平板波导在  $y$  方向上的有效折射率， $n_c$  是包层波导的折射率， $\lambda_0$  是工作波长。在  $x$  方向上， $m$  阶波导模式的电场分布可以写为  $F_m(x)$ <sup>[165]</sup>:

$$F_m(x) = \begin{cases} \frac{N_{wgm}\eta_0}{n_c^2} C_m \cos\left(\frac{\alpha_m w}{2} + \frac{m\pi}{2}\right) \cdot e^{\sigma_m(x+\frac{w}{2})} & x < -\frac{w}{2} \\ \frac{N_{wgm}^2\eta_0}{n_{eff}^2} C_m \cos\left(\alpha_m x - \frac{m\pi}{2}\right) & |x| \leq \frac{w}{2}, \\ \frac{N_{wgm}\eta_0}{n_c^2} C_m \cos\left(\frac{\alpha_m w}{2} - \frac{m\pi}{2}\right) \cdot e^{-\sigma_m(x-\frac{w}{2})} & x > \frac{w}{2} \end{cases} \quad (2.2-4)$$

其中  $C_m$  是一个常数,  $N_{wgm}$  是波导最后的有效折射率,  $\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$  是自由空间的波阻抗,

其中  $\mu_0$  和  $\epsilon_0$  分别是自由空间的电导率和磁导率。此外,  $a_m$  和  $\delta_m$  分别为<sup>[165]</sup>:

$$\alpha_m = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{n_{effg}^2 - N_{wgm}^2}, \quad \sigma_m = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{N_{wgm}^2 - n_c^2}, \quad (2.2-5)$$

这里常数  $A$  和  $C_m$  的选择需要使  $z$  方向上具有单位能量的能量密度, 另外通过矩形波导中不同模式之间的正交特性, 可以得到:

$$\iint \Psi_n^*(x, y) \Psi_m(x, y) dx dy = \frac{2\eta_0^2 N_{wgm}}{n_{effg}^3} \delta_{nm}, \quad (2.2-6)$$

其中  $\delta_{nm}$  是 Kronecker  $\delta$  函数。

根据公式  $\Psi_m(x, y) = G(y)F(x)$  和公式 (2.2-1) ~ (2.2-6), 可以计算模场的分布情况。当包层为氧化硅材料 ( $n_c = 1.444$ ), 波导为硅 ( $n_{Si} = 3.476$ ), 波导宽度为 0.8  $\mu m$ , 高度为 0.22  $\mu m$  的情况下, 利用有效折射率方法, 采用 MATLAB 软件计算得到的 TE 偏振态下矩形波导的模场分布情况如图 2.2-2 所示。

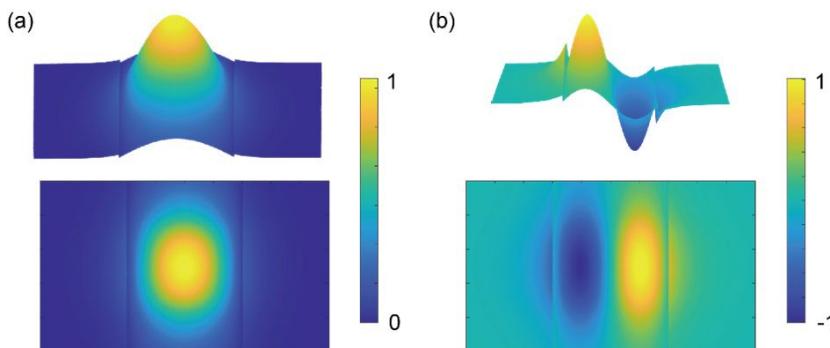


图 2.2-2 采用有效折射率方法计算的模场分布情况: (a) TE<sub>0</sub> 模式 (b) TE<sub>1</sub> 模式

Fig. 2.2-2 The (a) TE<sub>0</sub> mode and (b) TE<sub>1</sub> mode distribution calculated by the effective index method (EIM)

## 2.3 波导模式展开

模式展开方法可以把波导中传输的电磁波分解到不同模式中进行分析和处理。由于波导中的模式是一个正交函数的完备集合，所以波导中传输的任意电磁场可以写成波导模式的线性叠加。假设光信号在波导里进行稳定地传输，当通过前面介绍的有效折射率方法计算出波导所支持的模式和模场分布后，任意输入的电磁场可以用这些已知的模式进行展开<sup>[163]</sup>：

$$\begin{aligned} E_{in}(x, y, z) &= \sum_v a_v E_v(x, y) e^{-i\beta_v z} \\ H_{in}(x, y, z) &= \sum_v a_v H_v(x, y) e^{-i\beta_v z}, \end{aligned} \quad (2.3-1)$$

其中  $a_v$  代表第  $v$  种本征模式的复传输系数，包含了模式的强度和相位信息。为了计算各个模式的复传输系数，首先需要对各个模场进行归一化：

$$\frac{1}{2} \int E_v(x) \times H_u(x) dS = \delta_{vu}, \quad (2.3-2)$$

其中  $\delta_{vu}$  当  $v = u$  时为 1，其他时候等于 0，在这种归一化下各种模式单位长度的能量都是 1 W。

假设使用的是 TE 模式，根据电场和磁场之间的关系，归一化方程也可以写成：

$$\int_{-\infty}^{\infty} E_u(x) E_v(x) dx = \frac{2\omega\mu}{\beta_u} \delta_{uv}, \quad (2.3-3)$$

其中  $\mu$  是介质磁导率。模式的复传输系数可以通过计算输入电场和波导模式的交叠积分得到：

$$a_v = \frac{1}{4} \int (E_{in} \times H_v^* + E_v^* \times H_{in}) dS, \quad (2.3-4)$$

通过这种方式，把波导中所传输光分解到各个模式分量中，可以以本征模式传播系数  $a_v$  的形式来描述和研究光在波导中的传输情况。

## 2.4 耦合模理论

耦合模理论（CMT, Coupled Mode theory）是一种常用的分析模式之间转换和耦合的方法，可以用来分析电介质微扰所引起的模式之间的转换，通过前面所分析的模式分解的方法，可以进一步描述波导中光信号之间互相耦合的行为。这里首先介绍耦合模理论的一般数学形式，接着介绍耦合模理论在一些具体结构中的应用。

### 2.4.1 耦合模理论的一般数学形式

在理想情况下，当光以不同的模式在波导中传播时，由于不同波导模式之间彼此正交，它们在传播过程中彼此不会耦合。而当波导结构在传播方向发生一些变化时，

假设波导模式没有发生变化，波导中传播的光可以用理想波导（不含微扰的波导）中的模式来进行描述。而这些波导结构的变化（微扰）会使得不同模式的复传播系数沿着传播方向  $z$  发生变化，即不同模式之间彼此耦合。

假设  $E^{(0)}$  和  $H^{(0)}$  分别代表在理想波导中支持的模式，理想波导对应着的电介质分布为  $\varepsilon(x, y)$ ，那么对应的麦克斯韦方程组为<sup>[163]</sup>:

$$\begin{aligned}\nabla \times E^{(0)} &= -i\omega\mu_0 H^{(0)}, \\ \nabla \times H^{(0)} &= i\omega\varepsilon E^{(0)},\end{aligned}\quad (2.4.1)$$

对于存在微扰的结构，波导在传播方向上具有一些轻微的变化，对应着的电介质分布可以描述为  $\varepsilon + \Delta\varepsilon = \varepsilon(x, y) + \Delta\varepsilon(x, y)$ ， $\Delta\varepsilon$  是电介质介电常数相对与理想波导发生的变化。在微扰波导中的电磁场  $E$  和  $H$  也需要满足麦克斯韦方程<sup>[163]</sup>:

$$\begin{aligned}\nabla \times E &= -i\omega\mu_0 H \\ \nabla \times H &= i\omega(\varepsilon + \Delta\varepsilon)E,\end{aligned}\quad (2.4.2)$$

值得一提的是，在这里并没有假设  $\Delta\varepsilon$  远小于  $\varepsilon$ 。

可以通过数学变换，把以上方程整理为新的数学形式:

$$\nabla(E \times H^{(0)*} + E^{(0)*} \times H) = -i\omega E^{(0)*} \Delta\varepsilon E,\quad (2.4.3)$$

将其在传输方向上进行积分可以得到（只考虑模场在  $xy$  方向上的分量，忽略模场沿着传播方向  $z$  上的分量）<sup>[163]</sup>:

$$\iint \frac{\partial}{\partial z} [E \times H^{(0)*} + E^{(0)*} \times H]_z dx dy = -i\omega \iint E^{(0)*} \Delta\varepsilon E dx dy,\quad (2.4.4)$$

假设  $E^{(0)}$  和  $H^{(0)}$  代表在理想波导中的  $\mu$  阶模式，那么它们的横向分量具有如下的形式<sup>[163]</sup>:

$$\begin{aligned}E_t^{(0)}(x, y, z) &= E_{\mu t}(x, y) e^{-i\beta_\mu z} \\ H_t^{(0)}(x, y, z) &= H_{\mu t}(x, y) e^{-i\beta_\mu z},\end{aligned}\quad (2.4.5)$$

把这两个方程带入方程(2.5.4)，方程左边会化简为<sup>[163]</sup>:

$$LHS = \sum_v \frac{\partial}{\partial z} \{a_v(z) e^{-i(\beta_v - \beta_\mu)z} \iint [\mathbf{E}_{vt} \times \mathbf{H}_{\mu t}^* + \mathbf{E}_{\mu t}^* \times \mathbf{H}_{vt}]_z dx dy\},\quad (2.4.6)$$

由于模场进行了归一化，不同模式之间彼此正交，方程可以进一步化简为<sup>[163]</sup>:

$$LHS = \pm 4 \frac{\partial a_\mu(z)}{\partial z} = \pm 4 \frac{da_\mu(z)}{dz},\quad (2.4.7)$$

其中正负号取决于光的传播方向。

方程的右边可以化简为:

$$RHS = -i\omega \sum_v a_v e^{-i(\beta_v - \beta_\mu)z} \iint \mathbf{E}_\mu^* \Delta\varepsilon \mathbf{E}_v dx dy,\quad (2.4.8)$$

这样，就可以得到耦合模方程：

$$\pm \frac{da_\mu(z)}{dz} = -i \sum_v \kappa_{\mu v}(z) a_v(z) e^{-i(\beta_v - \beta_\mu)z}, \quad (2.4.9)$$

其中定义了耦合系数  $\kappa_{\mu v}(z)$  [2]：

$$\kappa_{\mu v} \equiv \frac{\omega}{4} \iint \mathbf{E}_\mu^*(x, y) \Delta\varepsilon(x, y, z) \mathbf{E}_v(x, y) dx dy, \quad (2.4.10)$$

单位为  $m^{-1}$ 。

## 2.4.2 耦合模理论的具体应用

### 两根波导之间不同模式的同向耦合过程

两根波导之间同向耦合的结构如图 2.4-1 所示，当两根波导之间距离无限大的时候，它们之间的模场彼此互不影响。假设这种情况下两个波导分别支持  $a$  和  $b$  两个模式，它们对应的模场分布为  $\Psi(a)$  和  $\Psi(b)$ ，对应的传播常数为  $\beta_a$  和  $\beta_b$ ，假设  $\beta_a < \beta_b$ 。当两根波导彼此靠近之后，两个模场之间会彼此影响。对于新的结构来说， $\Psi(a)$  和  $\Psi(b)$  不再是新结构所支持的模式，取而代之的是新结构所支持的  $\Psi_e$  和  $\Psi_o$  模式（也被称为超模），它们对应的传播常数为  $\beta_e$  和  $\beta_o$ ， $\Psi_e$  和  $\Psi_o$  模式在传播的过程中彼此不会干扰。

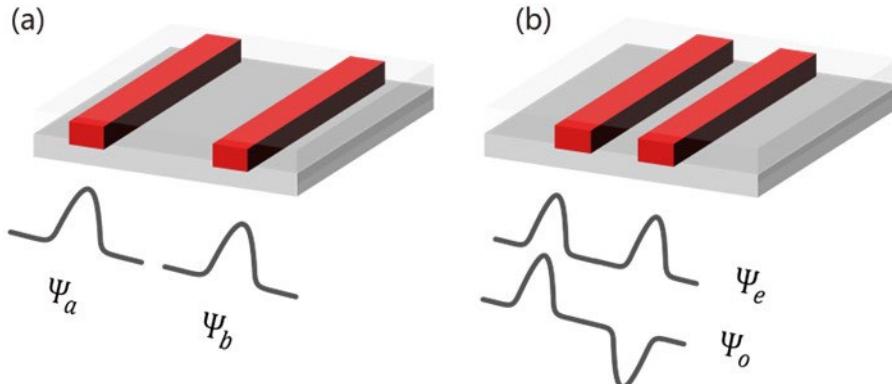


图 2.4-1 两根波导同向耦合的结构 (a) 两根波导之间距离非常大 (b) 两根波导之间距离比较近的情况。

Fig. 2.4-1 The structure of directional coupler (a) the distance between the two waveguides is very large, (b) the distance between the two waveguides is relatively close.

在传播过程中，可以通过模式展开的方法，把光场分解  $\Psi_e$  和  $\Psi_o$  两个模式中。因为  $\Psi_e$  和  $\Psi_o$  两个模式的传播常数不同，因此会出现拍动的现象，看上去就像是两束光在两根波导之间来回拍动，能量在  $\Psi(a)$  和  $\Psi(b)$  之间来回进行转换，拍长为  $2\pi/\Delta\beta$ 。

$(\beta_e - \beta_o)$ 。当两根波导之间的距离很近的时候，两个模式 $\Psi_e$ 和 $\Psi_o$ 之间的传播常数 $\beta_e$ 和 $\beta_o$ 之间的差更大，也因此耦合距离会减小。同样耦合系数  $\kappa_{\mu\nu}$ 会增大，也由此导致耦合距离变小。

通常可以采用波导模式的电场分量来描述单色波在波导中的传播，因此可以用标量方程来描述光的传播<sup>[163]</sup>:

$$\begin{aligned}\Psi_a(x, y, z, t) &= A(z)e^{-i\beta_a z}f_a(x, y)e^{i\omega t} \\ \Psi_b(x, y, z, t) &= B(z)e^{-i\beta_b z}f_b(x, y)e^{i\omega t},\end{aligned}\quad (2.4.11)$$

其中 $f_a(x, y)$ 和 $f_b(x, y)$ 是归一化后的场分布函数。当波导之间的距离无限大时，两种模式是互不干扰的，此时  $A(z)$ 和  $B(z)$ 会退化为常数。

另一方面，当波导之间距离足够近时，两种模式之间会互相耦合，此时  $A(z)$ 和  $B(z)$ 不再是常数，会和距离  $z$  的变化相关。只包含两个波导模式的耦合模方程会退化为如下形式 [2]:

$$\begin{aligned}\pm \frac{dA(z)}{dz} &= -i\kappa_{ab}B(z)e^{-i(\beta_b-\beta_a)z} \\ \pm \frac{dB(z)}{dz} &= -i\kappa_{ba}A(z)e^{+i(\beta_b-\beta_a)z},\end{aligned}\quad (2.4.12)$$

其中 $\kappa_{ab}$ 和 $\kappa_{ba}$ 是模式  $a$  和  $b$  之间的耦合系数。 $e^{-i(\beta_b-\beta_a)z}$ 对应的是模式的相位失配。当耦合系数为 0 时，可以得到  $A(z) = A(0)$ ,  $B(z) = B(0)$ ，以不同模式传播的光会互不干扰地传播。当耦合系数不为 0 时，能量就会在两种模式之间发生耦合。

耦合系数 $\kappa_{ab}$ 可以通过如下公式进行计算:

$$\kappa_{ab} = C \int f_a^* \Delta \varepsilon f_b dx dy,\quad (2.4.13)$$

其中微扰 $\Delta \varepsilon$ 是对于波导  $A$  所感知到的扰动，也就是波导  $B$  所在的区域。参数  $C$  主要取决于模场分布 $\Psi_a$ 和 $\Psi_b$ 之间的归一化方法。

假设 $\kappa_{ab} = \kappa_{ba} = \kappa$ ，那么微分方程的试探解为:

$$\begin{aligned}A(z) &= Ae^{-i\gamma z}e^{-i\Delta z} \\ B(z) &= Be^{-i\gamma z}e^{+i\Delta z},\end{aligned}\quad (2.4.14)$$

其中参数 $2\Delta = \beta_b - \beta_a$ ，用来描述两个模式之间的相位匹配程度。 $\Delta = 0$ 时被称为完美相位匹配。参数 $\gamma = \pm(\kappa^2 + \Delta^2)^{1/2}$ 。并且系数  $A$  和  $B$  之间存在关系 [2]:

$$B/A = \kappa/(\gamma - \Delta),\quad (2.4.15)$$

微分方程最后具有如下的通解<sup>[163]</sup>:

$$\begin{aligned}A(z) &= (A_e e^{-i\gamma z} + A_o e^{+i\gamma z})e^{-i\Delta z} \\ B(z) &= (\frac{\kappa A_e}{\gamma - \Delta} e^{-i\gamma z} - \frac{\kappa A_o}{\gamma + \Delta} e^{+i\gamma z})e^{+i\Delta z},\end{aligned}\quad (2.4.16)$$

进一步可以得到波导内模场的完整表达式<sup>[163]</sup>:

$$\begin{aligned}\Psi_a(x, y, z, t) &= [A_e e^{-i\beta_e z} + A_o e^{-i\beta_o z}] f_a(x, y) e^{i\omega t}, \\ \Psi_b(x, y, z, t) &= [B_e e^{-i\beta_e z} + B_o e^{-i\beta_o z}] f_b(x, y) e^{i\omega t},\end{aligned}\quad (2.4.17)$$

通过对模式的耦合可以得到 $\beta_e$ 和 $\beta_o$ 的表达式 [2]:

$$\begin{aligned}\beta_e &= (\beta_a + \beta_b)/2 + \gamma \\ \beta_o &= (\beta_a + \beta_b)/2 - \gamma'\end{aligned}\quad (2.4.18)$$

图 2.4-2 展示了两根波导之间能量耦合的仿真结果, 仿真波导宽度为 0.45  $\mu\text{m}$ , 两根波导之间的间隔为 100 nm, 可以看出, 光场能量会出现拍动的现象: 两束光在两根波导之间来回转换, 能量在 $\Psi(a)$ 和 $\Psi(b)$ 中来回进行转换, 拍长为 $2\pi/(\beta_e - \beta_o)$ 。

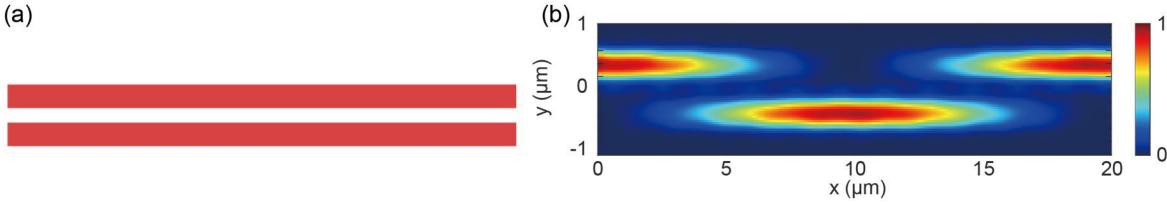


图 2.4-2 (a) 两根平行波导示意图, (b) 仿真模场转换的能量分布情况。

Fig. 2.4-2 The (a) schematic and (b) simulated power distribution of a directional coupler.

### 两根波导之间不同模式的反向耦合过程

两根波导之间反向耦合的结构如图 2.4-3 (a, b) 所示, 当模式耦合发生在沿 $+z$ 方向和 $-z$ 方向传播的两个模式之间时, 模式的传播常数有相反的符号。假设模式  $a$  沿着正方向传播, 那么 $\beta_a > 0$ ; 假设模式  $b$  沿着负方向传播,  $\beta_b = -|\beta_b| < 0$ 。为了使这两个模式之间的反向耦合发生, 需要在两根波导之间引入周期性的微扰。

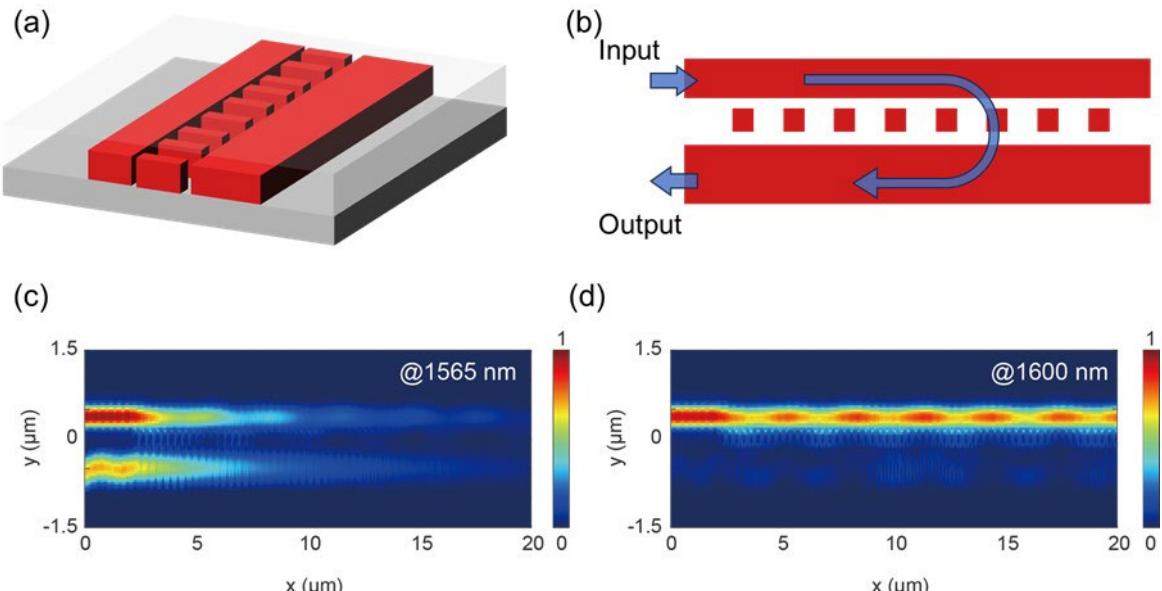


图 2.4-3 (a, b) 波导辅助的两个平行波导之间的反向耦合示意图。 (c, d) 在波长为 1565 nm 和 1600 nm 时，反向耦合的仿真能量分布图。

Fig. 2.4-3 (a, b) The schematic of grating assisted contra-directional coupler (GACDC) of two waveguides. (c, d) The simulated power distribution at 1565 and 1600 nm.

由公式 2.5-10 可以计算介质微扰所引入的耦合系数，周期的介质光栅可以引入的周期性微扰，假设其对应的耦合系数可以被表达为如下的形式<sup>[163]</sup>:

$$\kappa_{ab} = \kappa e^{-i\delta z}, \quad (2.4.19)$$

其中  $\kappa$  是正实数。把耦合系数  $\kappa_{ab}$  代入耦合模方程，可以得到<sup>[163]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{dA(z)}{dz} &= -i\kappa B(z) e^{-i(-|\beta_b| - \beta_a + \delta)z} \\ \frac{dB(z)}{dz} &= +i\kappa A(z) e^{+i(-|\beta_b| - \beta_a + \delta)z}, \end{aligned} \quad (2.4.20)$$

尽管模式  $a$  和模式  $b$  传播常数和传播方向都不相同，但可以通过周期性的微扰使得两种模式发生耦合。在这种情况下，可以定义参数  $\Delta$  来衡量耦合时的相位失配程度 [2]:

$$2\Delta = -|\beta_b| - \beta_a + \delta, \quad (2.4.21)$$

通过求解耦合模微分方程，可以得到方程得到解<sup>[163]</sup>:

$$\begin{aligned} A(z) &= A e^{-i\gamma z} e^{-i\Delta z} \\ B(z) &= B e^{-i\gamma z} e^{+i\Delta z}, \end{aligned} \quad (2.4.22)$$

其中  $\gamma = \pm i\sqrt{\kappa^2 - \Delta^2}$  并且  $B/A = \kappa/(\Delta - \gamma)$ 。

可以得到  $A(z)$  和  $B(z)$  的完整表达式如下:

$$\begin{aligned} A(z) &= (A_+ e^{+\alpha z} + A_- e^{-\alpha z}) e^{-i\Delta z} \\ B(z) &= \left( \frac{\kappa A_+}{\Delta - i\alpha} e^{+\alpha z} + \frac{\kappa A_-}{\Delta + i\alpha} e^{-\alpha z} \right) e^{+i\Delta z}, \end{aligned} \quad (2.4.23)$$

其中参数 $\alpha$ 定义为 $\alpha \equiv -i\gamma = \sqrt{\kappa^2 - \Delta^2}$ ,  $A_+$ 和 $A_-$ 是初始条件。

把这两个方程带入, 最后可以得到光场分布完整的解<sup>[163]</sup>:

$$\begin{aligned} \Psi_a(x, y, z, t) &= [A_+ e^{+\alpha z} + A_- e^{-\alpha z}] e^{-i(\beta_a + \Delta)z} f_a(x, y) e^{i\omega t} \\ \Psi_b(x, y, z, t) &= \left[ \frac{\kappa A_+}{\Delta - i\alpha} e^{+\alpha z} + \frac{\kappa A_-}{\Delta + i\alpha} e^{-\alpha z} \right] e^{-i(\beta_b - \Delta)z} f_b(x, y) e^{i\omega t}, \end{aligned} \quad (2.4.24)$$

在相位匹配或者准相位匹配的条件 ( $|\Delta| \ll \kappa$ ) 下,  $\alpha$ 的值是一个实数。方程的第一项和第二项对应着正向和反向传播的正常模式。这样以后,  $\Psi_a$ 和 $\Psi_b$ , 可以看作传播常数为 $\beta_a + \Delta$ 和 $\beta_b - \Delta$ 的两个波的线性组合。对于整个耦合系统, 存在两个本征模式 $\Psi_1$ 和 $\Psi_2$ , 它们对应的传播常数 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 是两个复数<sup>[163]</sup>:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \beta_a + \Delta \pm i\alpha \\ \beta_2 &= \beta_b - \Delta \pm i\alpha, \end{aligned} \quad (2.4.25)$$

也就是说, 这两个模式在传播过程中会有指数级的衰减或者指数级的增长, 取决于输入光 $A_+$ 和 $A_-$ 的关系。

假设耦合长度的周期是 L, 且 $A(0) = 1, B(L) = 0$ , 即初始条件下只存在以 A 模式正向传播的光。假设 $\kappa > \Delta$ , 那么方程的解为<sup>[163]</sup>:

$$\begin{aligned} A(z) &= e^{-i\Delta z} \frac{\alpha \cosh [\alpha(z-L)] + i\Delta \sinh [\alpha(z-L)]}{\alpha \cosh (\alpha L) - i\Delta \sinh (\alpha L)}, \\ B(z) &= e^{+i\Delta z} \frac{i\kappa \sinh [\alpha(z-L)]}{\alpha \cosh (\alpha L) - i\Delta \sinh (\alpha L)}, \end{aligned} \quad (2.4.26)$$

为了使解的形式更简洁, 定义 $F \equiv \left(\frac{\kappa}{\alpha}\right)^2 = \frac{1}{1 - (\Delta/\kappa)^2}$ , 那么在波导中的能量为<sup>[163]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{|A(z)|^2}{|A(0)|^2} &= \frac{1 + F \sinh^2 [\alpha(z-L)]}{1 + F \sinh^2 (\alpha L)} \\ \frac{|B(z)|^2}{|A(0)|^2} &= \frac{F \sinh^2 [\alpha(z-L)]}{1 + F \sinh^2 (\alpha L)}, \end{aligned} \quad (2.4.27)$$

这两个公式描述了波导中能量的变化, 和同向耦合时能量周期性的涨落不同, 耦合的能量是一个单调的变化。耦合的效率可以被定义为模式 b 和模式 a 中初始能量之比<sup>[163]</sup>:

$$\eta = \frac{|B(0)|^2}{|A(0)|^2} = \left[ \frac{\sinh^2 \alpha L}{\cosh^2 \alpha L - \Delta^2 / |\kappa|^2} \right], \quad (2.4.28)$$

可以看出能量的耦合有一个无限大的周期。对于一个固定长度的耦合来说, 耦合效率在相位匹配时最大 ( $\Delta = 0$ ), 此时 $\gamma = \kappa$ ,  $F = 1$ , 并且耦合效率为:

$$\eta = \frac{|B(0)|^2}{|A(0)|^2} = \tanh^2 (|\kappa|L), \quad (2.4.29)$$

可以看出，当 $L = \pi/|\kappa|$ 时耦合效率大于 0.99，几乎所有的能量会转移到反向传播的模式中。

图 2.4-3 (c, d) 展示了两根波导之间能量反向耦合的仿真结果，仿真波导宽度为  $0.4 \mu\text{m}$  和  $0.6 \mu\text{m}$ ，两根波导之间的间隔为  $200 \text{ nm}$ 。两根波导的宽度设置不同是为了避免产生较强的同向耦合现象。光栅位于两根波导中间，周期为  $320 \text{ nm}$ ，宽度为  $150 \text{ nm}$ 。可以看出，入射光在波长为  $1565 \text{ nm}$  时满足相位匹配条件，能量被耦合到另一个波导反向传输的基模里。反向耦合通常对波长较为敏感，在波长为  $1600 \text{ nm}$  时不满足相位匹配条件，入射光会继续向前传输，这种结构可以用来实现滤波器的功能。

### 同一根波导中不同模式之间的同向耦合过程

同一根波导中不同模式之间的同向耦合的结构如图 2.4-4 所示，当波导中不存在介质微扰时，波导中不同的模式在传播过程中互不影响。如同前面的分析，周期性的介质微扰可以用来控制模式之间的耦合，假设折射率的变化在波导的传播方向上有一个周期性的变化，它在数学上可以被表达为<sup>[163]</sup>:

$$\Delta n(x, z) = \sum \Delta n_q(x) \cos(qKz + \Phi_q), \quad (2.4.30)$$

当扰动比较小的时候，可以做如下的近似 [2]:

$$\varepsilon + \Delta \varepsilon = \varepsilon_0(n + \Delta n)^2 \approx \varepsilon_0(n^2 + 2n\Delta n) \Rightarrow \Delta \varepsilon = 2\varepsilon_0 n \Delta n. \quad (2.4.31)$$

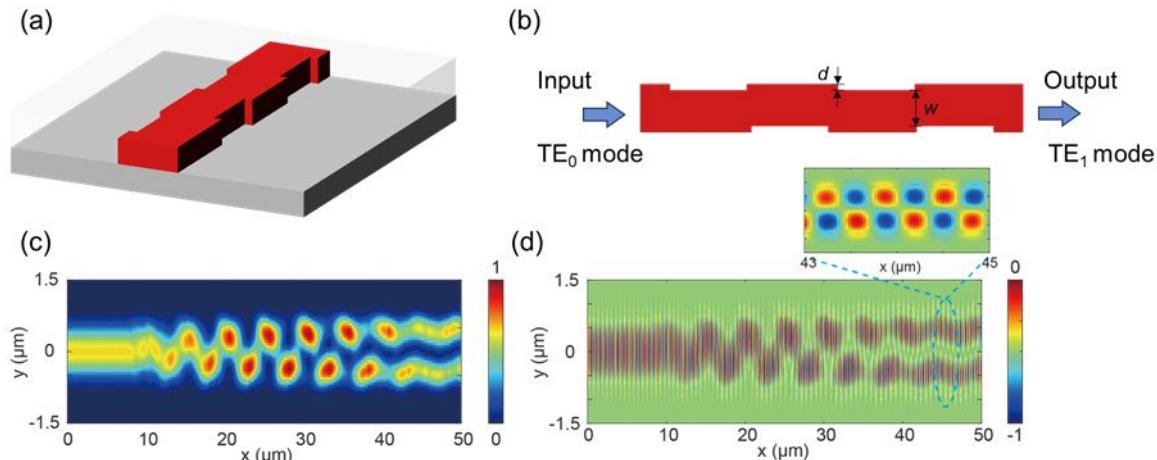


图 2.4-4 (a, b) 光栅辅助在同一根波导中不同模式同向耦合结构的 3D 视图和俯视图，(c, d) 仿真得到的能量和电场  $y$  分量的分布情况。

Fig. 2.4-4 (a, b) The 3D and top view of grating-assisted mode co-directional coupling in the same waveguide, and (c, d) its simulated power and  $E_y$  distribution.

在这里需要考虑到模场的归一化，假设单位长度能量密度为 1 瓦特，那么对于 TE 模式和 TM 模式分别需要<sup>[163]</sup>：

$$\begin{aligned} \frac{\beta}{2\omega\mu_0} \int_{-\infty}^{\infty} |E_{\mu y}|^2 dx &= 1 \quad \text{TE modes} \\ \frac{\beta}{2\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|H_{\mu y}|^2}{\varepsilon(x)} dx &= 1 \quad \text{TM modes} \end{aligned} \quad (2.4.32)$$

对于 TE 模式之间的耦合和 TM 模式之间的耦合系数分别有<sup>[163]</sup>：

$$\begin{aligned} \kappa_{TE_\mu TE_\nu} &\approx \frac{\pi\Delta n_q}{\lambda} \frac{n_f \int_{-d}^0 E_{\mu y}^* E_{\nu y} dx}{\sqrt{N_\mu N_\nu} [\int_{-\infty}^{\infty} |E_{\mu y}|^2 dx \int_{-\infty}^{\infty} |E_{\nu y}|^2 dx]^{1/2}} \\ \kappa_{TM_\mu TM_\nu} &\approx \frac{\pi\Delta n_q}{\lambda} \frac{n_f \sqrt{N_\mu N_\nu} \int_{-d}^0 (H_{\mu y}^*/\varepsilon)(H_{\nu y}/\varepsilon) dx}{[\int_{-\infty}^{\infty} (|H_{\mu y}|^2/\varepsilon) dx \int_{-\infty}^{\infty} (|H_{\nu y}|^2/\varepsilon) dx]^{1/2}} \end{aligned} \quad (2.4.33)$$

其中  $\lambda$  是光波长，  $n_f$  是波导介质的折射率，  $N_{\mu,\nu}$  是模式的有效折射率。

对于远离截至波长的模式，由于模式的正交性<sup>[163]</sup>：

$$\int_{-d}^0 E_{\mu y}^* E_{\nu y} dx \approx \int_{-\infty}^{\infty} E_{\mu y}^* E_{\nu y} dx \approx \frac{2\omega\mu_0}{\beta} \delta_{\mu\nu}, \quad (2.4.34)$$

耦合系数的方程可以进一步被简化为<sup>[163]</sup>：

$$\kappa_{TE_\nu TE_\mu} \approx \kappa_{TM_\nu TM_\mu} \approx \frac{\pi\Delta n_q}{\lambda} \delta_{\mu\nu}, \quad (2.4.35)$$

当介质微扰的周期满足  $\Lambda = \frac{\lambda}{n_1 - n_2}$  时，有效折射率为  $n_1$  和  $n_2$  的两个模式之间会发生耦合。如图 2.4-4 (c, d) 所示，波导的宽度  $w$  为 1 μm，光栅的高度  $d$  为 40 nm，光栅的周期为 5.06 μm。图片展示了仿真的能量和电场  $y$  分量的分布情况，可以看出，当光栅的周期被合适的设置时，入射的  $TE_0$  模式可以完全耦合到  $TE_1$  模式。

### 同一根波导中不同模式之间的反向耦合过程

同一根波导中不同模式之间的同向耦合的结构如图 2.4-5 (a, b) 所示，如同前面的分析，周期性的介质微扰可以用来控制模式之间的耦合，可以通过正负号来表示模式的传播方向，假设模式  $b$  沿着负方向传播， $\beta_b = -|\beta_b| < 0$ 。为了使这两个模式之间的反向耦合发生，需要在两根波导之间引入周期性的微扰。当介质微扰的周期满足  $\Lambda = \frac{\lambda}{n_1 + n_2}$  时，有效折射率为  $n_1$  和  $n_2$  的两个模式之间会发生反向耦合。

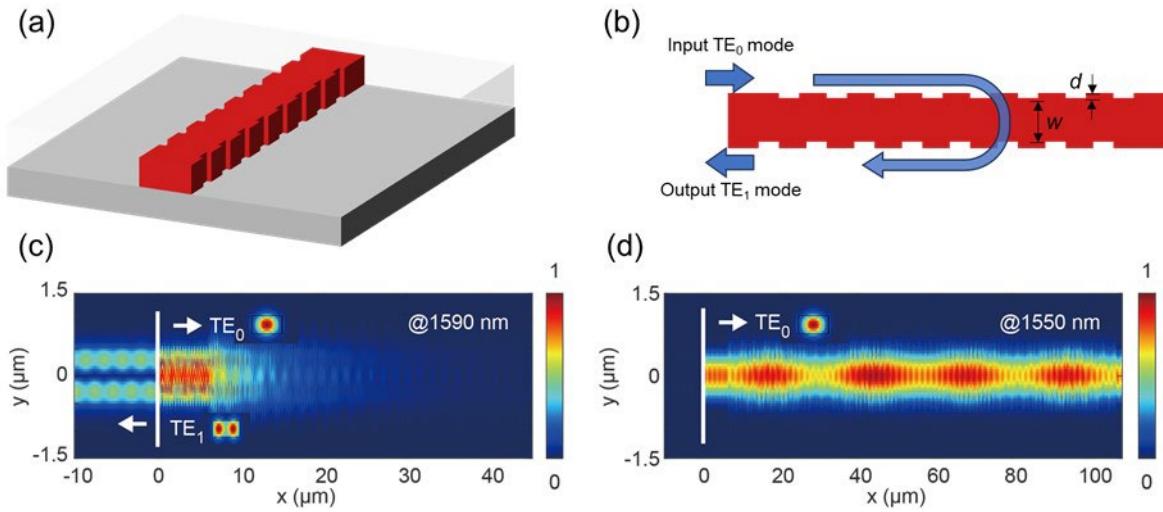


图 2.4-5 (a, b) 光栅辅助在同一根波导中不同模式反向耦合结构的 3D 视图和俯视图, (c, d) 在不同波长仿真得到的能量分布情况。

Fig. 2.4-5 (a, b) The 3D and top view of grating-assisted mode contra-directional coupling in the same waveguide, and (c, d) its simulated power distribution at different wavelength.

如图 2.4-5 (c, d) 所示, 波导的宽度 *w* 为 0.7 μm, 光栅的高度 *d* 为 200 nm, 光栅的周期为 330 nm, 仿真网格划分的精度设置为 3, FDTD 仿真的背景折射率设置为二氧化硅。图片展示了仿真的能量和电场 *y* 分量的分布情况, 可以看出, 当在波长为 1590 nm 时, 入射光满足相位匹配条件, 能量被耦合到反向传输的 TE<sub>1</sub> 模式里。而在波长为 1550 nm 时, 入射光不满足相位匹配条件, 会继续向前传输, 也可以用来实现滤波器的功能。

此外, 根据耦合模理论, 可以确定反向耦合长度的带宽 ( $\Delta\lambda$ ) 和反向耦合的效率 ( $R$ ) 之间的关系<sup>[163]</sup>:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\pi n_g} \sqrt{\kappa^2 + \frac{\pi^2}{L^2}}, R = \tanh^2(\kappa L), \quad (2.4.36)$$

其中 *L* 是反向耦合的长度, *n<sub>g</sub>* 是波导的群折射率。这些方程表明了滤波器带宽和耦合效率主要取决于耦合系数  $\kappa$  和耦合长度 *L*, 并且揭示了耦合长度和耦合带宽之间本质上的制约关系。

根据这两个方程可以计算得到不同带宽和不同耦合长度下的耦合效率, 如图 2.4-6 所示。蓝色区域的反射效率接近于 0, 意味着几乎没有光被反射, 也就是器件不能工作。与此相反, 黄色的区域为反向耦合器件可以工作的区域。这意味着工作带宽和耦合长度之间有一个制约关系。这个制约关系也可以有一个比较直观的解释: 更弱的

反射带宽需要更小的微扰，更小的微扰也会导致更弱的反射强度，以此需要更长的耦合长度来积累足够的反射效率。

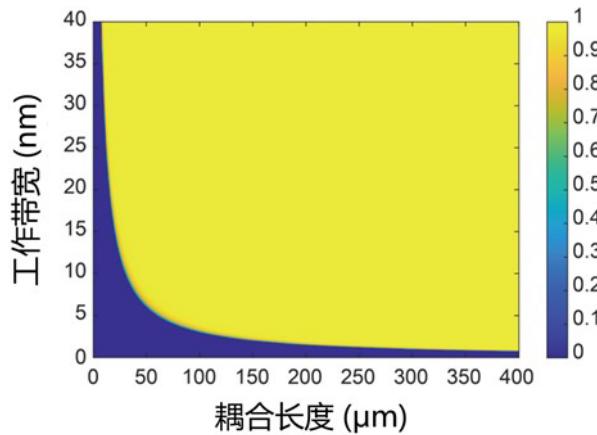


图 2.4-6 反向耦合带宽和反向耦合长度之间的制约关系，颜色刻度条代表了反向耦合效率。

Fig. 2.4-6 The trade-off between bandwidth and coupling length. The color bar represents the reflection efficiency of the contra-directional coupling.

## 2.5 有效介质理论

为了研究光在超构材料中的传播特性，有效介质理论（EMT, Effective Medium Theory）提供了一个简单而有效的方法来描述不同介质构成的复合材料的光学特性<sup>[166,167]</sup>。有效介质理论最早可以追溯到电磁学发展的早期阶段。1837 年，法拉第提出了金属-绝缘体复合介电材料的早期模型<sup>[168]</sup>。在 1870 年和 1904 年，麦克斯韦和加内特进一步发展了描述复合介质材料和混合介质材料的模型<sup>[168,169]</sup>。

如图 2.5-1 所示，本文的研究主要关注的是超构材料在 SOI 平台上的应用，包括含有亚波长光栅结构的矩形波导和平板波导。当亚波长结构的尺寸和周期足够小的时候，尽管在光的传播方向上波导存在很多不连续的地方，但是光依然可以被限制在波导中，并且没有辐射和布拉格反射的损耗<sup>[144,147]</sup>。这些亚波长的结构表现出来的光学特性类似于由普通均一介质构成的光学波导，其中这种波导的是由一种人工可控制的材料构成。

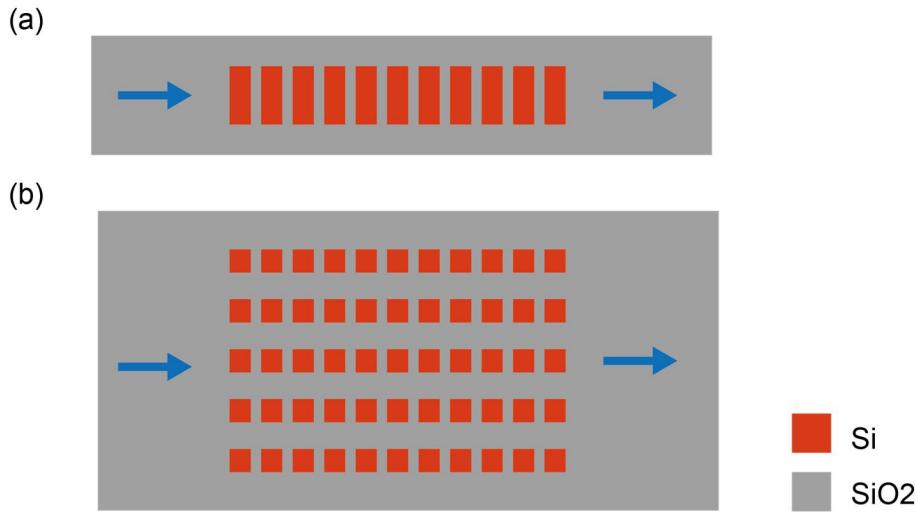


图 2.5-1 SOI 平台上含亚波长微扰的 (a) 一维矩形波导和 (b) 二维平板波导结构

Fig. 2.5-1 subwavelength structure assisted (a) 1D strip waveguide and (b) 2D planar waveguide based on SOI platform

最简单的亚波长光栅 (SWG, Subwavelength Grating) 波导结构如图 2.5-1 (a) 所示, 亚波长光栅波导是一种由波导材料和包层介质材料构成的一种复合材料波导。两种不同材料形成的波导结构有周期性的重复, 其中每一段的周期结构小于介质中波长。本文的研究主要基于绝缘体上硅平台, 波导材料通常是硅, 而包层材料通常是二氧化硅。

Rytov 最早在 1950 年代研究了这种亚波长光栅波导, 提出这种结构可以被等效认为是一种具有均一折射率的双折射材料。根据有效介质理论, 材料的等效折射率在亚波长光栅波导的垂直方向和平行方向上可以用 Rytov 公式近似为<sup>[170]</sup>:

$$\begin{aligned} n_{\parallel}^2 &= f n_{\text{Si}}^2 + (1 - f) n_{\text{clad}}^2 \\ \frac{1}{n_{\perp}^2} &= f \frac{1}{n_{\text{Si}}^2} + (1 - f) \frac{1}{n_{\text{clad}}^2}, \end{aligned} \quad (2.5-1)$$

其中  $f = \frac{a}{\lambda}$  是光栅结构的周期,  $n_{\text{Si}}$  和  $n_{\text{clad}}$  分别是硅和包层材料的折射率。通过这种方法, 可以把亚波长结构等效为一种均匀的介质材料, 进一步可以用于分析新材料所构成波导的有效折射率、色散、双折射等特性。

有效介质理论提供了一种非常简单的物理模型, 可以将亚波长周期结构等效为具有统一折射率的均匀材料进行分析, 从而用来计算微纳结构的光学特性。有效介质理论常常被用于估算结构参数的大致范围, 可以加速硅光超构材料器件的设计优化。

## 2.6 数值仿真技术

在集成光子学中，分析和仿真光子器件中电磁波的传播是非常基础的要求。对于一些简单的结构，可以直接求得数值解。但是对于一些复杂的情况，通常需要数值仿真的方法来进行求解。常用的求解方法主要有波传播方法（BPM, Beam Propagation Method）和时域有限差分法（FDTD, Finite-Difference Time Domain method）。近年来，由于计算资源越来越丰富，时域有限差分法成为当下流行的仿真方法。

本文的研究工作主要采用了 FDTD 仿真方法。需要仿真解决的问题可以有如下的定义：对于一个任意的折射率分布  $n(x, y, z)$ ，对于任意一个输入的平面场分布  $E_0(x, y, z)$ ，求解任意空间处的光场分布  $E(x, y, z)$ 。通过将空间划分为离散的网格，通过在时间和空间节点上交替迭代电场和磁场，并在时间轴上逐步计算求解，以得到任意时刻全空间的电磁场分布。该方法能够精确描述材料的色散特性，并具备模拟任意三维形状波导的能力。通过内嵌高速、高性能计算引擎，FDTD 能够一次计算获得宽波段多波长的仿真结果。

本文的研究中主要使用 Ansys 公司的 Lumerical 光学仿真套件提供的解决方案进行器件的仿真。使用 MODE 解算器来求解特定几何结构支持的模式，使用 FDTD 解算器来求解光在结构中传播的特性，使用 DEVICE 解算器来求解多物理场的仿真，例如温度和电场对光传播的影响。

## 2.7 本章小结

本章主要讨论了超构材料对光的调控机理。首先介绍了如何用模式的形式来描述光在波导中的传播，包括模场分布的计算方法和把波导中的光场分解到各个模式的方法。接着利用耦合模理论，将超构材料视为一系列电介质微扰，描述模式在传播过程中互相耦合的机理，进而解释超构材料对片上光场调控的机理，并具体分析了耦合模理论在不同情况下的应用形式。接着，根据有效介质理论，介绍了如何将周期亚波长电介质微扰等效为均匀介质进行估算，最后简单介绍了常用的数值仿真技术。

### 第三章 片上超构偏振调控

对于光子集成回路来说，片上偏振控制是至关重要的。偏振控制在光通信、非线性光学、量子光学等领域有着广泛的应用。近年来，先进的微纳加工技术使在光波导上集成各种亚波长的微纳结构成为了可能，这些亚波长的结构在灵活的调控光学信号方面具有传统波导结构所难以达到的能力。本章将介绍采用超构材料来进行片上的偏振态调控的方法，通过使用纳米孔和纳米槽的超构材料，对整个偏振态空间进行完全调控。

#### 3.1 研究背景

在片上光子集成回路中，偏振控制系统有着广泛的应用领域<sup>[31,171]</sup>。如图 3.1-1 所示，偏振控制可以使通信系统中的传输数据流提高<sup>[172]</sup>，有效地提高光计算和处理系统中的吞吐量<sup>[173,174]</sup>，辅助非线性波长转换中的相位匹配过程<sup>[175,176]</sup>，在光学传感系统中提高信号的探测<sup>[177]</sup>，并且在轨道角动量的生成中辅助进行波前调整<sup>[178]</sup>。

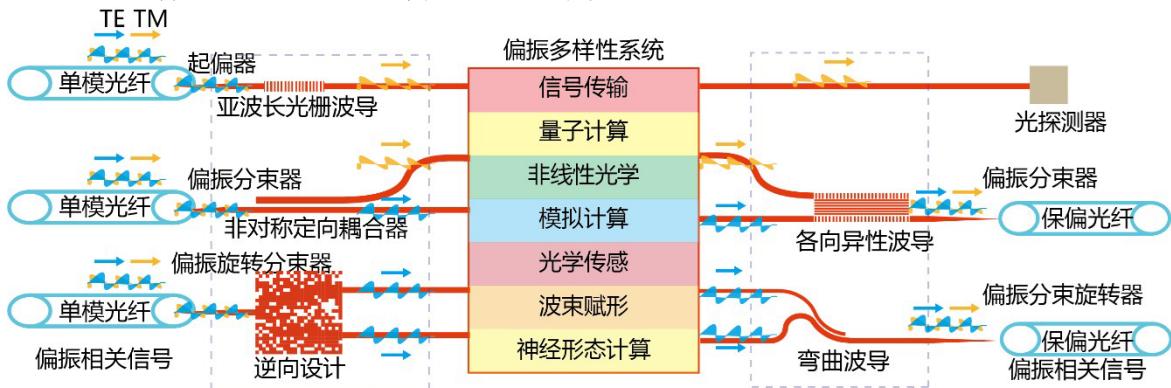


图 3.1-1 片上偏振调控技术及偏振多样性系统应用

Fig. 3.1-1 On-chip polarization manipulation techniques and polarization-diversity circuit scenarios

近年来，有许多中片上的结构被报道可以实现高性能的片上偏振控制器件。例如，非对称定向耦合器是一种用来控制偏振态的常见方法，它通过匹配相邻的两根波导之间的 TE 和 TM 模式来进行工作<sup>[70,73,179–192]</sup>。总体来看，这种结构可以实现最好的性能，然而这种结构通常需要很高的加工精度。绝热耦合是另一种实现偏振转换的常见方式，在纵向非对称的结构中可以通过偏振态的混合过程实现偏振的转换。这种方式可以实现鲁棒的偏振旋转，但是通常器件具有较大的尺寸，并且非对称的纵向结构会增加工艺的复杂度<sup>[193]</sup>。

在传统的基于波导的硅光器件以外，超构材料结构在亚波长尺度上具有前所未有的光学调控能力。例如，亚波长光栅超构材料的折射率和色散可以被进行人工设计，将其引入偏振控制系统中可以使器件具有更大的带宽和更好的工艺容忍度<sup>[194]</sup>。最近，基于逆向设计的超构材料器件也被广泛用来实现片上的功能器件，这种优化加工的过程可能比较耗时，一些自由设计的器件结构可能在加工上会提出新的挑战<sup>[61,195–198]</sup>。另一方面，具有梯度折射率的介质超构材料也提供了一种正向设计方法来调控波导中的模式转换<sup>[83,145,199–201]</sup>。通过提供理想的相位梯度的分布，可以满足不同模式之间的相位匹配条件，从而实现高效的模式转换。

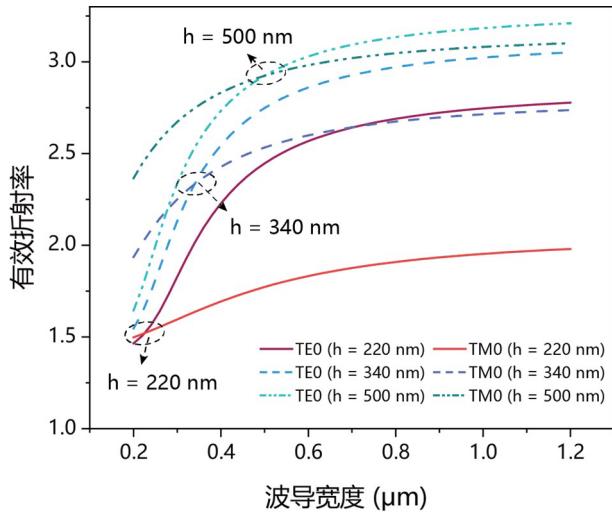
本文的研究进一步拓展了折射率梯度电介质超构材料的功能，并且实现了全空间的偏振调控。一方面，在矩形波导上的超构材料结构可以用来满足不同偏振态之间的相位匹配条件，从而使选定的模式之间可以发生高效的耦合。另一方面，电介质微扰相对位置可以用来控制不同模式的相对相位，进一步可以用来调控光在波导中的空间分布。本文接下来会演示各种偏振调控器件，包括起偏器、偏振分束器和偏振分束旋转器。其中起偏器具有一个较大的消光比(>35 dB)，小的损耗(<1 dB)和紧凑的尺寸( $18 \times 1 \mu\text{m}^2$ )；偏振分束器也同样具有较低的串扰(>30 dB)，较小的损耗(<2 dB)和紧凑的尺寸( $16 \times 1.1 \mu\text{m}^2$ )；偏振分束旋转器也具有较小的损耗(<1.3 dB)和紧凑的尺寸( $13 \times 1 \mu\text{m}^2$ )。

## 3.2 设计和原理

本小节将首先简单介绍片上偏振态调控的基本原理，接着介绍使用这些原理设计片上偏振调控器件的流程，并提供器件的仿真分析结果。

### 3.2.1 基本原理

在光子集成回路中，双折射是广泛存在的，这会导致 TE 偏振态和 TM 偏振态的光具有不同的传播特性。由于硅波导和包层二氧化硅具有较大的折射率对比度，双折射现象在硅基光子学器件中较为明显。图 3.2-1 中展示了采用了有限元方法(FDM, finite difference method)，计算了不同波导结构所对应的 TE<sub>0</sub> 和 TM<sub>0</sub> 的有效折射率。可以看出在不同的波导宽度下，TE 偏振态和 TM 偏振态的有效折射率会有一定的差别，这些差别会导致偏振相关的损耗(PDL, Polarization-dependent Losses)和偏振相关色散(PMD, Polarization Mode Dispersion)等影响。

图 3.2-1 计算得到的不同宽度硅波导支持的  $TE_0$  模式和  $TM_0$  模式的有效折射率Fig. 3.2-1 The calculated effective indices of the  $TE_0$  and  $TM_0$  modes supported by a silicon waveguide

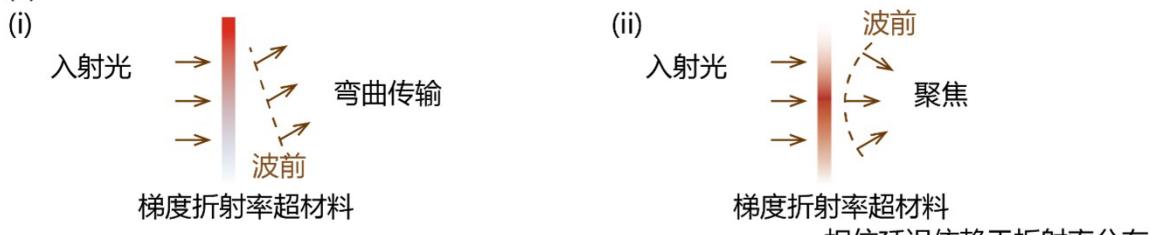
超构材料可以用来控制传播光场的相位分布情况，进一步控制片上集成光回路中的偏振态。总的来说，超构材料提供了一种手段来调整透过它们或者在它们表面进行反射的光场特性，从而可以实现多种光学功能。超构材料最早在空间光领域被广为研究，通过把不同的微纳结构按空间分布加工在表面上，可以对光场施加一个和空间位置相关的相位移动。如图 3.2-2 所示，为了实现和空间位置相关的相位控制，一种直接的方法是改变表面折射率的分布，这样透过该表面的光就会有相应的相位改变。通过纳米加工技术，可以改变硅材料的厚度或者材料的占比，从而使等效折射率可以在背景材料的折射率和硅的折射率之间变化。这种超构材料的结构就可以改变通过它的光场的相位分布，从而改变光传播的波前，实现光束的偏转或者聚焦。

这种折射率梯度超构材料的想法后来就被迁移到片上光的调控中，可以用来控制片上的模式。在这种方式中，超构材料被加工在波导上，从而可以改变波导中的折射率分布。当光在波导中进行传播时，和空间位置相关的折射率分布可以在不同位置影响光场传播的相位延迟，进而将输出的相位分布塑造成为理想中的模式。超构材料不仅可以改变传播经过材料的相位分布，也可以改变反射光的相位。如图 3.2-2 所示，通过在不同位置加工介质微扰，在不同位置入射的光会有不同的光学路径长度从而有不同的相位延迟。因此，通过改变反射光的相位分布，从而将它们塑造成为理想的模式也是可能的。

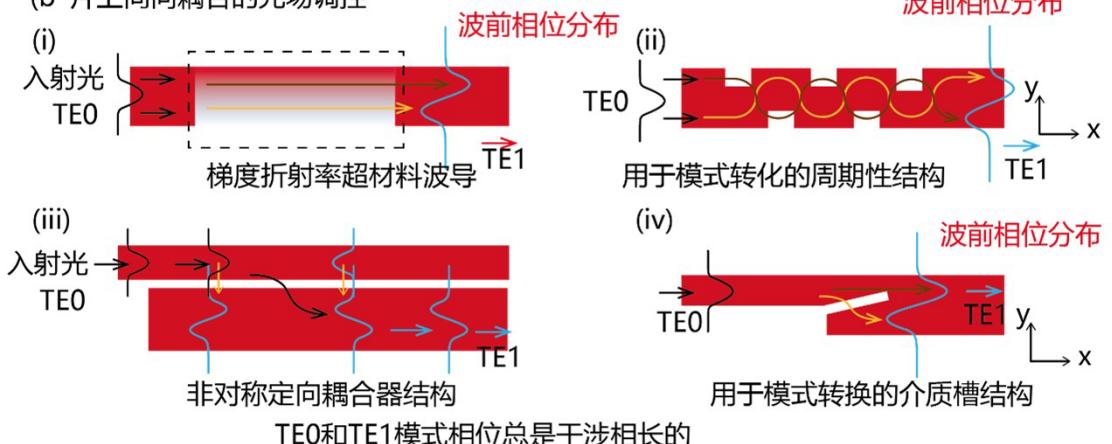
从以上分析可以看出，通过超构材料可以精确的控制光的相位分布，理想的相位

分布可以进一步控制光的偏振态，和光的传输方向。通过利用超构材料，对传播光场的相位进行精确的控制是可能的，并且可能实现理想的偏振控制和引导光的传播。

(a) 自由空间光场调控



(b) 片上同向耦合的光场调控



(c) 片上反向耦合的光场调控

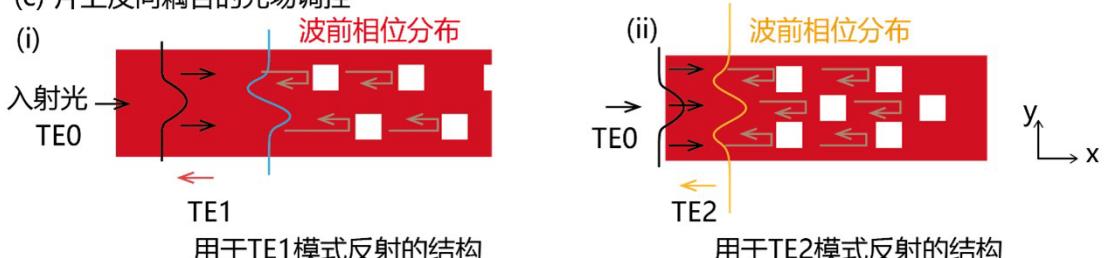
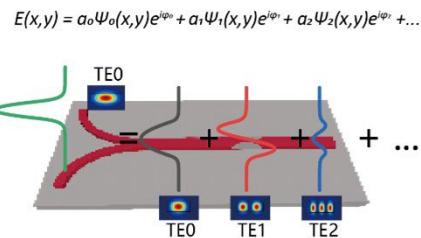


图 3.2-2 超构材料可以用于调整光场波前的相位分布，从而实现多种功能：(a) 自由空间光场调控，(b) 片上同向耦合光场调控，(c) 片上反向耦合光场调控。

Fig. 3.2-2 The phase distribution in metasurface with gradient index. (a) For free-space light manipulation, the gradient metasurface can control the phase distribution of the light depending on the refractive index change. (b, c) The gradient metasurface waveguide can also control the phase distribution in the waveguide, and shape the light into different modes for the co-directional coupling and contra-directional coupling.

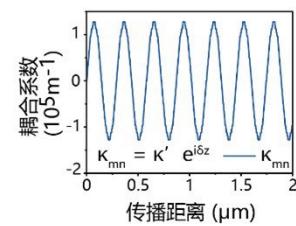
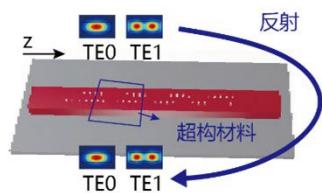
另一方面，如图 3.2-3 所示，通过模式展开、模式耦合和偏振旋转的原理分析，基于耦合模理论，可以提供一个描述超构材料对光场调控能力的数学模型，前面的第二章详细描述了其理论分析。假设光场以模式的形式沿着  $z$  方向进行传播， $m$  阶模式的模场分布可以表示为  $\Psi_m$ 。通过有效折射率方法或者有限元分析的方法可以获得模场分布，进而可以用耦合模理论进行分析和计算<sup>[165]</sup>。

(a) 模式展开：



(b) 反向耦合：

$$dA_m/dz = -ik_{mn}(z)A_n e^{-i(\delta m + \delta n)z}, K_{mn} = k' e^{i\delta z} (\delta = \delta_m - \delta_n).$$



(c) 同向耦合（偏振旋转）：

$$dA_m/dz = -ik_{mn}(z)A_n e^{-i(\delta m - \delta n)z}, K_{mn} = k' e^{i\delta z} (\delta = \delta_m - \delta_n).$$

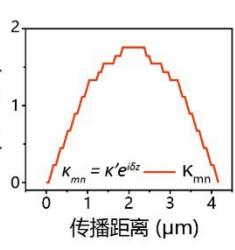
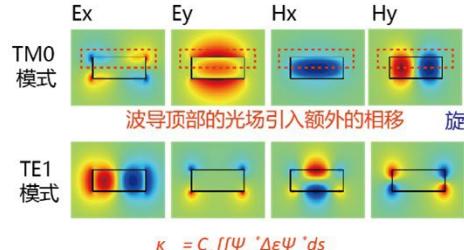
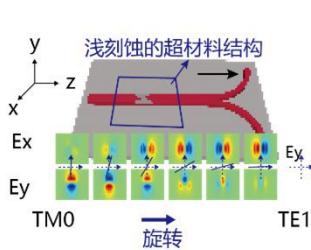


图 3.2-3 超构材料的偏振控制机理：(a) 模式展开，(b) 模式的反向耦合，(c) 模式的同向耦合（偏振旋转过程）。

Fig. 3.2-3 fundamental principles of the metamaterial enabled polarization manipulation:

(a) The propagating field within the waveguide is depicted as a superposition of all possible eigenmodes supported by the waveguide, with specific amplitudes and phases. (b) The metamaterial provides periodic coupling coefficients and enables contra-directional coupling. (c) The shallow-etched meta-structure on the top surface of the waveguide induces phase delays for achieving polarization rotation. The metamaterial also induces suitable coupling coefficients for efficient polarization rotation.

模式展开过程如图 3.2-3 (a) 所示，其使用所有可能的模式的加权和的形式来描述电磁波在波导中的能量分布。进一步，通过将电介质微扰加工在波导上的方式，可以实现不同模式之间的耦合，并且可以通过数学方法进行分析和计算<sup>[163]</sup>。反向耦合的过程如图 3.2-3 (b) 所示，两种反向传播的模式之间可以互相耦合。耦合过程是通

过引入的周期性耦合系数实现的。周期为 $\Lambda$ 的耦合系数可以补偿相位失配，使得选定的模式被反射到另一种理想的模式。

偏振的旋转过程可以如图 3.2-3 (c) 所示，偏振的旋转可以通过在波导上表面浅刻蚀的超结构来实现。浅刻蚀的多边形结构可以对传输的光引入额外的相位延迟，使得通过超结构的光的相位分布被改变。通过重新塑造出射光的相位分布，可以把入射的  $TM_0$  模式旋转为  $TE_1$  模式。这个旋转过程也可以通过耦合模理论来进行分析，由于硅波导的宽度是有限的，因此  $TE$  模式还有着一些  $E_x$  分量， $TM$  模式还有着一些  $E_y$  的分量。这些分量使得在计算耦合系数的时候，在浅刻蚀微扰的情况下，可以计算出一个非零的耦合系数。非零的耦合系数也就意味着  $TE$  和  $TM$  模式之间可以发生耦合。

通过将模式展开、模式耦合和偏振旋转的过程结合起来，利用超构材料独特的光学特性，可以在一个紧凑的尺寸中构造出精细而高效的工具来控制光的偏振态。接下来将介绍，如何使用这种方法基于 SOI 平台设计偏振控制器件，包括起偏器，偏振分束器和偏振分束旋转器。其中 SOI 晶圆包括 220 nm 的顶层硅，3  $\mu m$  厚的埋层二氧化硅。

### 3.2.2 起偏器的设计

起偏器的设计是用来选择性地阻挡向前传播的  $TE$  模式并且使  $TM$  模式的光直接通过。本文设计的起偏器如图 3.2-4 所示，其包含了周期性全刻蚀介质孔的多模波导。超构材料使  $TE_0$  模式的光会被反射到反向传播的  $TE_1$  模式的光，同时不会影响  $TM$  模式的传播。

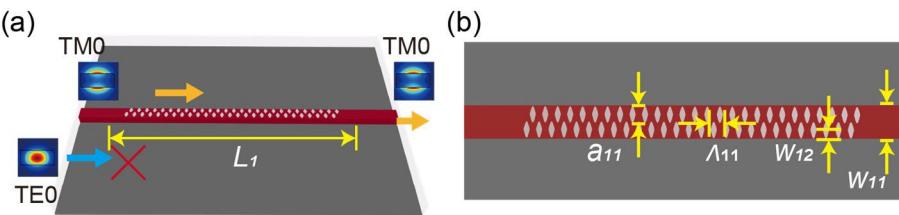


图 3.2-4 起偏器的 3D 视图和俯视图

Fig. 3.2-4 The (a) 3D and (b) top view of the proposed polarizer

每一个介质孔的上下弧线都被定义为半正弦函数，波导宽度设置为 1  $\mu m$ ，这样的波导宽度可以支持  $TE_0$  和  $TE_1$  模式。介质孔纵向的直径  $a_1$  设置为 500 nm 从而实现一个较大的耦合系数，从而使反向耦合具有较大的带宽和消光比。同时也需要注意更大的介质孔直径可能导致更大的插入损耗。耦合长度设置为 18  $\mu m$ ，从而在耦合长度

和消光比之前取得一个平衡。介质孔阵列的周期 $\Lambda$ 设置为 390 nm 从而满足 TE<sub>0</sub> 和 TE<sub>1</sub> 模式之间的相位匹配条件,  $\Lambda = \lambda / (n_0 + n_1)$ , 其中 $n_0$  和  $n_1$  分别是 TE<sub>0</sub> 和 TE<sub>1</sub> 模式的有效折射率。

三维时域有限差分算法 (3D-FDTD, Three-dimensional Finite-Difference Time-Domain) 可以用来仿真入射光场在器件中传输的情况, 从而验证理论分析的结果。图 3.2-5 分别展示了对于 TE<sub>0</sub> 输入和 TM<sub>0</sub> 输入的归一化能量分布, 和理论预测的相同, 以 TM<sub>0</sub> 模式输入的光会直接通过波导, 而以 TE<sub>0</sub> 模式输入的光会被有效的阻挡住。图中也展示了 TE<sub>0</sub> 输入的光会快速地消散掉, 也可以证明 TE<sub>0</sub> 的光在超构材料波导中会快速被反射。仿真结果也展示了在波长为 1550 nm 处, 器件有一个较小的插入损耗 (0.64 dB) 和一个较大消光比 (38 dB)。在从 1410 nm 到 1690 nm 之间的波长范围内, 器件具有的插入损耗小于 1.2 dB 并且消光比大于 30 dB。

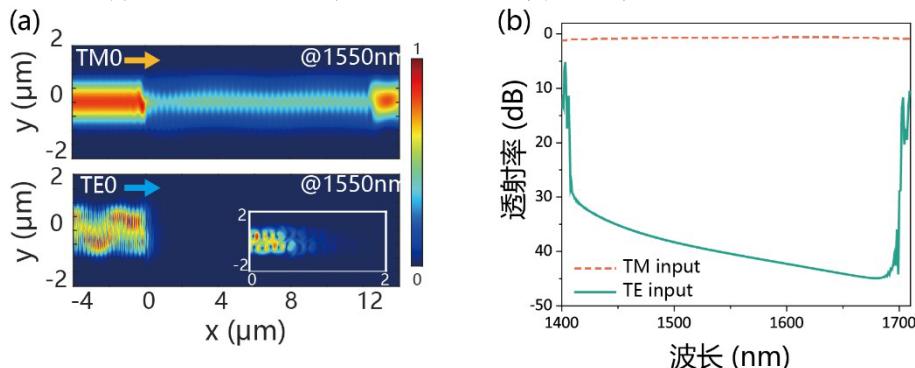


图 3.2-5 起偏器的仿真结果: (a) 仿真能量分布情况, (b) 仿真光谱响应。

Fig. 3.2-5 (a) The simulated power distribution and (b) spectrum responses of the proposed polarizer.

起偏器的设计也遵循耦合模理论。图 3.2-6 展示了刻蚀孔直径对器件串扰和损耗的影响。当刻蚀孔直径更大时, TE 偏振态模式的反射也会更强, 从而有更低的串扰。同时, TM 偏振态在传输过程中的散射损耗也会更大, 同时也会导致更大的插入损耗。如下图所示, 刻蚀孔的大小同样会影响器件的带宽和中心工作波长, 其中器件的带宽可以用如下公式描述<sup>[163]</sup>:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\pi n_g} \sqrt{\kappa^2 + \frac{\pi^2}{L^2}}, \quad (3.2-1)$$

其中 $\Delta\lambda$ 代表了通道带宽,  $\lambda$ 是工作的中心波长,  $n_g$ 是群折射率 $\kappa$ 是向前传输的基本模和反射回的模式之间的耦合系数,  $L$ 是耦合长度, 也是超构材料波导的长度。更大的介质孔直径会导致更大的耦合系数 $\kappa$ , 从而导致更大的带宽。

另一方面，因为介质孔直径会影响模式的有效折射率，也会影响器件工作的中心波长。器件的中心波长 $\lambda$ 可以被表达为 $\lambda = \Lambda * (n_m + n_n)$ ，材料可以看作是硅和二氧化硅介质孔的混合状态，其等效折射率介于硅和二氧化硅折射率之间。更大的介质孔直径会导致波导具有更低的等效材料折射率，从而模式的有效折射率 $n_m$ 和 $n_n$ 也会较小，使器件的中心工作波长向左移动。

综合考虑，最后选择了刻蚀孔直径为 500 nm。

而介质孔的周期 $\Lambda$ 会影响器件的中心工作波长， $\lambda = \Lambda * (n_m + n_n)$ ，模式的有效折射率可以由有限元分析的方法来计算（可采用 Ansys Lumerical Mode 计算），接着可以通过时域有限差分方法进一步仿真优化。耦合长度最后被设置为 18  $\mu\text{m}$  来平衡损耗、串扰和器件尺寸。

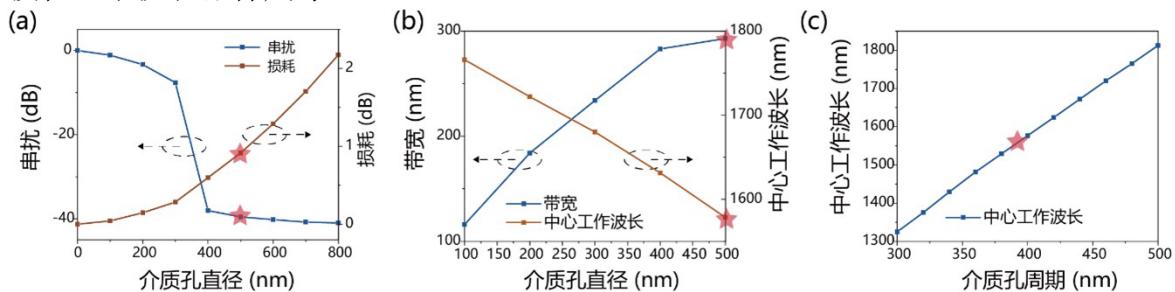


图 3.2-6 起偏器的设计参数和性能之间的关系 (a) 损耗和串扰与介质孔直径的关系；(b) 带宽和中心工作波长与介质孔直径的关系；(c) 中心工作波长和介质孔周期的关系。

Fig. 3.2-6 The relationship between the design parameter and the performance of the polarizer. (a) The insertion loss and crosstalk as a function of hole diameter. (b) The bandwidth and central operation wavelength as a function of hole diameter. (c) The central operation wavelength as a function of the hole period.

### 3.2.3 偏振分束器的设计

本文设计的偏振分束器可以用来把输入的 TE<sub>0</sub> 和 TM<sub>0</sub> 模式分开，将他们路由到不同的输出端口。图 3.2-7 展示了偏振分束器的示意图，它由四个弯曲波导和连接着的总线多模波导共同构成，总线多模波导上有五排周期性的全刻蚀介质孔阵列。介质刻蚀孔可以调控正向和反向传播的模式能量和相位，进一步可以影响波导中的电磁场分布。当电磁波在器件中进行传播时，主要分为以下三个过程：

i) 当 TE<sub>0</sub> 模式从单模弯曲波导耦合进入多模波导时，输入的光场可以分解到多模波导所支持的本征模式当中。这里，由于波导宽度和模式交叠的限制，只有 TE<sub>0</sub>,

TE<sub>1</sub> 和 TE<sub>2</sub> 模式会被激发。

ii) 当这些被激发的 TE<sub>0</sub>, TE<sub>1</sub> 和 TE<sub>2</sub> 模式在多模波导中进行传播时, 通过三组不同的介质孔阵列, 会被分别反射回后传播的 TE<sub>0</sub>, TE<sub>1</sub> 和 TE<sub>2</sub> 模式。三组不同的介质孔阵列具有不同的周期  $\Lambda_1 = \lambda/2n_0$ ,  $\Lambda_2 = \lambda/2n_1$ ,  $\Lambda_3 = \lambda/2n_2$ , 其中  $n_i$  是  $i$  阶模式的有效折射率。三组不同的介质孔阵列可以帮助满足不同模式之间的相位匹配。

iii) 反射模式之间的相位差可以通过不同介质孔阵列之间的相对位置来控制, 将 TE<sub>1</sub> 模式反射的介质孔阵列被设置在 220 nm 后, 通过这种方式, 可以在反射的 TE<sub>1</sub> 模式中引入一个额外的  $\pi$  相位延迟。由于结构和模场分布的对称性, 设计好的相位延迟可以使得反射回的光耦合到另一个波导中。

而对于输入的 TM<sub>0</sub> 模式, 超材料波导表现的类似于均一介质, 输入的光首先会在多模波导中激发处 TM<sub>0</sub> 和 TM<sub>1</sub>。由于不同模式之间存在模间色散, 所以 TM<sub>0</sub> 和 TM<sub>1</sub> 模式之间的相位差可以通过耦合长度来控制。在经过几个拍长之后, 光场会被耦合到输出端口。

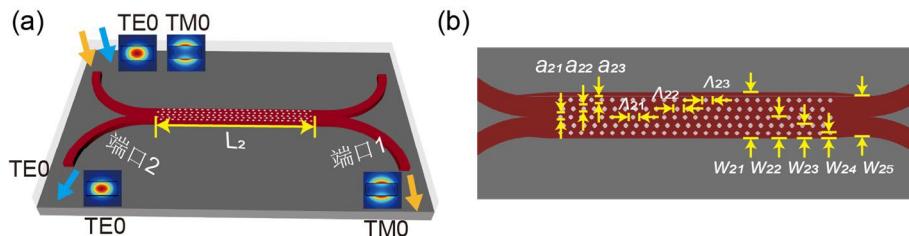


图 3.2-7 偏振分束器的 3D 视图和俯视图

Fig. 3.2-7 The (a) 3D and (b) top view of the proposed polarization beam splitter (PBS)

图 3.2-8 展示了偏振分束器的仿真能量分布和光谱响应。可以看出, 以 TM<sub>0</sub> 模式输入的光会直接通过超构材料波导并且耦合到 1 端口, 而以 TE<sub>0</sub> 模式输入的光会被反射并且耦合到 2 端口。图中也展示了以 TE<sub>0</sub> 模式输入的光在超构材料波导里迅速的反射。仿真的光谱响应表明, 当波长在 1530 nm 到 1570 nm 的范围内时, 器件的损耗小于 1 dB 并且消光比大于 30 dB, 在 1550 nm 处, 器件的损耗为 0.39 dB, 消光比为 38.8 dB。对于以 TM<sub>0</sub> 的模式输入的光来说, 在 1500 nm 到 1600 nm 的波长范围内, 器件损耗小于 0.6 dB, 消光比大于 28 dB, 在 1550 nm 处, 器件的损耗为 0.47 dB, 消光比为 42.5 dB。

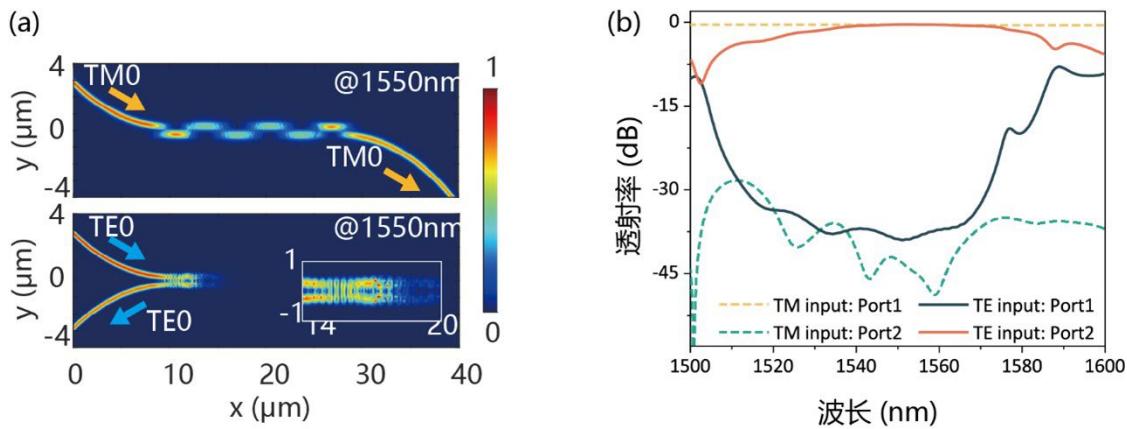


图 3.2-8 偏振分束器的仿真结果：(a) 仿真能量分布情况，(b) 光谱响应。

Fig. 3.2-8 (a) The simulated power distribution and (b) spectrum responses of the proposed PBS.

偏振分束器可以把输入的  $TE_0$  和  $TM_0$  耦合到不同的输出端口。纳米介质孔阵列是用来同时控制反射的模式和相位的。当  $TE_0$ ,  $TE_1$  和  $TE_2$  模式在多模波导中进行传播时, 它们会被反射回  $TE_0$ ,  $TE_1$  和  $TE_2$  模式, 为了使这些反射的光谱具有类似的形式, 并且工作的中心波长在 1550 nm 附近, 和前面的分析一样, 可以通过改变介质孔的周期和大小来调整反射的光谱, 最后调整出的光谱如图 3.2-9 (a) 所示。

介质刻蚀孔的位置如图 3.2-9 (b) 所示, 分别被设置为  $w_{22} = 550$  nm,  $w_{23} = 360$  nm,  $w_{24} = 200$  nm,  $w_{25} = 1000$  nm, 这些参数是通过考虑  $TE_0$ ,  $TE_1$  和  $TE_2$  模式的模场分布而得到的。如图所示, 设计的介质孔对于所需要的模式具有最大的交叠, 而和其他模式具有最小的交叠。通过这种方式, 需要的模式之间的耦合系数会具有一个最大值, 同时其他模式之间的耦合系数较小。

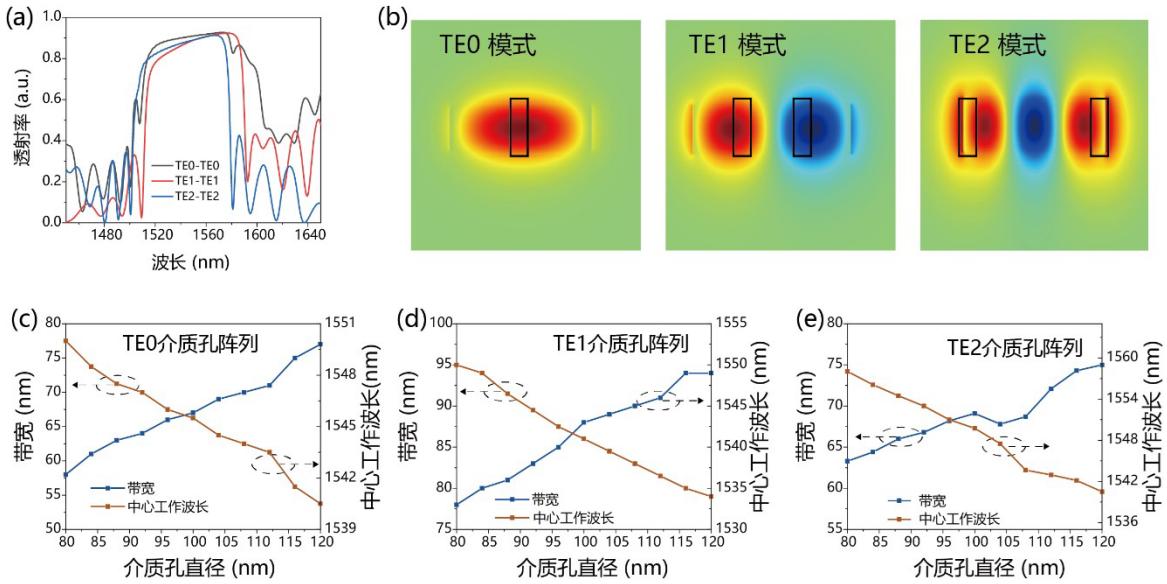


图 3.2-9 (a) 当光以  $\text{TE}_0$ ,  $\text{TE}_1$  或  $\text{TE}_2$  模式入射时, 分别对应的反射光谱。 (b) 波导支持的  $\text{TE}_0$ ,  $\text{TE}_1$  和  $\text{TE}_2$  模式的电场  $y$  分量分布情况, 黑色方框代表着介质孔刻蚀的位置。 (c-e) 当三组介质孔直径变化时, 反射光谱的带宽和中心工作波长变化情况。

Fig. 3.2-9 (a) The reflected spectra of the metamaterial waveguide when the  $\text{TE}_0$ ,  $\text{TE}_1$  or  $\text{TE}_2$  mode input. (b) The  $E_y$  distribution of the  $\text{TE}_0$ ,  $\text{TE}_1$  and  $\text{TE}_2$  modes supported by the waveguide, and the black box shows the position of the nanoholes. (c-e) The bandwidth and central operation wavelength of the reflected spectra as the hole diameter changes for the  $\text{TE}_0$ -to- $\text{TE}_0$  reflection,  $\text{TE}_1$ -to- $\text{TE}_1$  mode reflection, and  $\text{TE}_2$ -to- $\text{TE}_2$  mode reflection.

介质刻蚀孔的直径被设置为  $a_{21} = 100 \text{ nm}$ ,  $a_{22} = 80 \text{ nm}$ ,  $a_{23} = 120 \text{ nm}$ , 这些参数主要会影响器件反射光谱的带宽, 同时也会影响到光谱的中心波长。图 3.2-9 (c-e) 展示了不同模式反射光谱的带宽和中心波长随着介质孔直径大小的变化情况。更大的介质孔直径会带来更大的耦合系数, 从而产生更大的工作带宽。与此同时, 更大的介质孔直径也会使模式有效折射率减少, 由于工作的中心波长可以通过  $\lambda = 2n_i\Lambda$  来计算, 更大的介质孔直径也会导致更小的工作中心波长。

介质孔阵列的周期被设计为  $\Lambda_{21} = 328 \text{ nm}$ ,  $\Lambda_{22} = 370 \text{ nm}$ ,  $\Lambda_{23} = 446 \text{ nm}$ , 这些参数可以首先通过公式  $\Lambda_{2i} = \lambda / 2n_i$  进行计算, 接着通过时域有限差分法进行仿真迭代优化。介质孔阵列的周期会影响模式耦合的中心工作波长, 更大的周期会带来更大的中心工作波长。

$TE_1$  模式的介质孔阵列的相对位置  $\Delta L$  被设置为落后  $220\text{ nm}$ 。这个参数被用来对反射的  $TE_1$  模式引入一个额外的  $\pi$  相位延迟。这个参数可以首先通过  $\Delta L = \pi / \beta_1$  来进行计算，其中  $\beta_1$  是  $TE_1$  模式的传播常数，并且  $\beta_1 = 2\pi n_1 / \lambda$ 。此参数可以进一步通过时域有限差分法进行迭代优化。

### 3.2.4 偏振分束旋转器的设计

设计的偏振分束旋转器要实现的功能是把以  $TE_0$  和  $TM_0$  模式输入的光分开，同时把以  $TM_0$  模式进行传输的光旋转成  $TE_0$  模式。通过这种方式，可以使输出的光具有同样的光学性质。如图 3.2-10 所示，设计的偏振分束旋转器包含了两根弯曲波导和与此连接的总线波导，总线波导上刻蚀了一根全刻蚀的介质槽和  $70\text{ nm}$  浅刻蚀的超结构。图中展示了设计的偏振分束旋转器的示意图，浅刻蚀的超结构和光栅耦合器具有同样的深度，可以帮助简化加工流程。

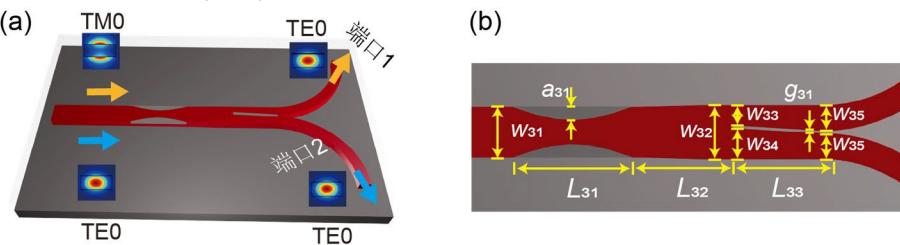


图 3.2-10 偏振分束器的 3D 视图和俯视图

Fig. 3.2-10 The (a) 3D and (b) top view of the proposed polarization splitter rotator (PSR)

偏振分束旋转器的设计包含两个部分，第一个部分中的超构材料结构可以对  $TM_0$  模场上方的光引入一个额外的相位延迟，从而导致模式的旋转。从耦合模理论的角度来看，对于输入的  $TM_0$  模式来说，这些浅刻蚀的超结构和  $TM_0$  和  $TE_1$  模式的模场之间有交叠，从而会引入一个耦合系数，这个耦合系数可以补偿不同模式之间的相位失配，使  $TM_0$  模式可以逐渐转换为  $TE_1$  模式。而对于输入的  $TE_0$  模式来说，由于模场分布和微扰结构所具有的对称性，计算出的耦合系数会一直为 0，意味着模式之间并没有发生耦合，输入的  $TE_0$  模式并没有受到超构材料结构的影响。而在器件的第二个部分，通过一个全刻蚀的介质槽， $TE_0$  和  $TE_1$  模式被解复用到不同的端口中。

图 3.2-11 展示了设计的器件在  $1550\text{ nm}$  处仿真的电场分布情况。输入的  $TM_0$  模式首先被转化为  $TE_1$  模式然后被解复用到上面的端口中，而输入的  $TE_0$  模式会保持为  $TE_0$  模式然后被耦合到下面的波导中。下图也展示了仿真结构的光谱响应。仿真的光谱展示了器件在 TE 模式入射的情况下，在  $1500\text{ nm}$  到  $1600\text{ nm}$  之间，具有一个较低的损耗 ( $< 0.8\text{ dB}$ ) 和一个较大的消光比 ( $> 10\text{ dB}$ )，而在  $1550\text{ nm}$  处的损耗为

0.37 dB，消光比为 22 dB。对于器件在  $\text{TM}_0$  模式输入的情况下，在 1500 nm 到 1600 nm 之间，器件具有一个较低的损耗 ( $< 0.7 \text{ dB}$ ) 和一个较大的消光比 ( $> 10 \text{ dB}$ )，而在 1550 nm 处的损耗为 0.43 dB，消光比为 16 dB。在输出端口，TE 偏振态的光仿真展现的模式纯度也大于 98%。

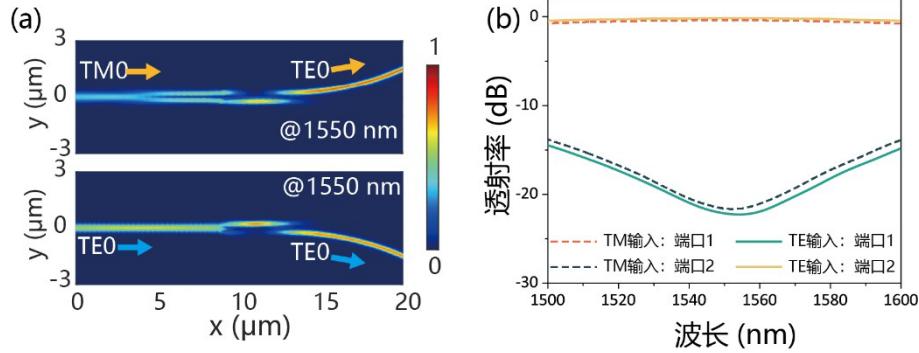


图 3.2-11 偏振分束旋转器仿真结果：(a) 仿真能量分布，(b) 光谱响应。

Fig. 3.2-11 (a) The simulated power distribution and (b) spectrum of the PSR.

偏振分束旋转器会在把以  $\text{TE}_0$  和  $\text{TM}_0$  模式输入的光分开的同时，使入射的  $\text{TM}_0$  模式进行旋转。偏振分束旋转器包含两个部分，第一部分对  $\text{TM}_0$  偏振态进行旋转为  $\text{TE}_1$  模式，第二部分对两种不同的模式进行分离。

在偏振分束器的偏振旋转部分中，如图 3.2-12 (a) 所示，考虑到模式的电磁场分布，介质刻蚀孔的直径设置为 150 nm。超构材料结构的位置被设置在波导的边缘，从而可以引起一个更大的  $\text{TE}_1$  和  $\text{TM}_0$  之间的模场交叠。而微扰的长度  $L_{31}$  可以通过耦合模理论进行计算： $L_{31} = \lambda / 2 (n_{\text{TE}1} - n_{\text{TM}0})$ ，并且后续可以通过时域有限差分法仿真方法进行迭代优化，如图 3.2-12 所示。

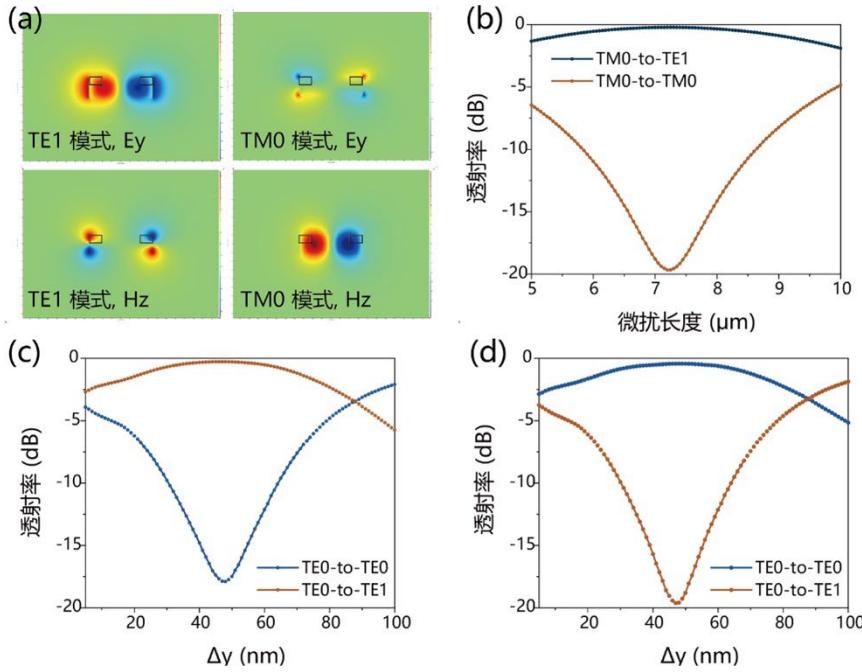


图 3.2-12 偏振旋转器中偏振旋转部分的设计原理：(a) 波导中所支持  $TE_1$  和  $TM_0$  模式  $E_y$  和  $H_z$  分量的电磁场分布，图中的黑线代表了纳米介质刻蚀孔的位置。(b) 器件的转换损耗和串扰随纳米介质刻蚀孔长度的变化。转换损耗被定义为输入的  $TM_0$  模式耦合到  $TE_1$  模式中的透射率，串扰被定义为还没有被转换的  $TM_0$  模式的透射率。

Fig. 3.2-12 (a) The electromagnetic field distributions of  $E_y$  and  $H_z$  for the  $TE_1$  and  $TM_0$  modes supported by the waveguide, and the black box shows the positions of the nanoholes. (b) The conversion loss and crosstalk for the proposed device as the perturbation length changes.

偏振分束旋转器的第二部分可以通过一个全刻蚀的电介质槽将  $TE_0$  和  $TE_1$  两种不同模式解复用到不同的端口中。总线波导的宽度是  $1 \mu\text{m}$ ，用来支持  $TE_0$  和  $TE_1$  模式低损传播。考虑到加工工艺的限制，电介质槽的宽度设置为  $100 \text{ nm}$ 。器件的原理如图 3.2-13 所示，电介质槽可以将总线波导分为两束宽度不同的锥形波导，由于两个不同的波导具有不同的宽度，两个波导的传播常数不同，因此导致光在传输过程中具有不同的相位差。这里需要注意到由于倏逝波耦合产生的新的光场的相位总是延后  $90^\circ$ 。由波导宽度而引起的相位差会有一个额外的  $90^\circ$ ，这样最后会导致两束光之间由  $0^\circ$  或者是  $180^\circ$  的相位差，从而会分别生成  $TE_0$  和  $TE_1$  模式。为了满足这个要求，

首先需要通过倏逝波耦合将一半的能量耦合到下面的波导中，下图展示了当 $\Delta y = 0$ 时的能量分布，这时候器件表现的和定向耦合器相同。首先选择耦合长度为  $4.3 \mu\text{m}$  从而使一半的能量耦合到下面的波导中。值得一提的是，第一次一半能量耦合到下面波导时的长度为  $1.8 \mu\text{m}$ ，这个长度也可以使用。这里选择  $4.3 \mu\text{m}$  可以使得器件具有更好的工艺容忍度。接着可以通过扫描 $\Delta y$ 来提供额外的相位延迟。耦合模理论也可以用来解释这个器件的工作原理。表格 3.2-1 总结最后总结了设计的片上超构偏振态调控器件的具体参数。

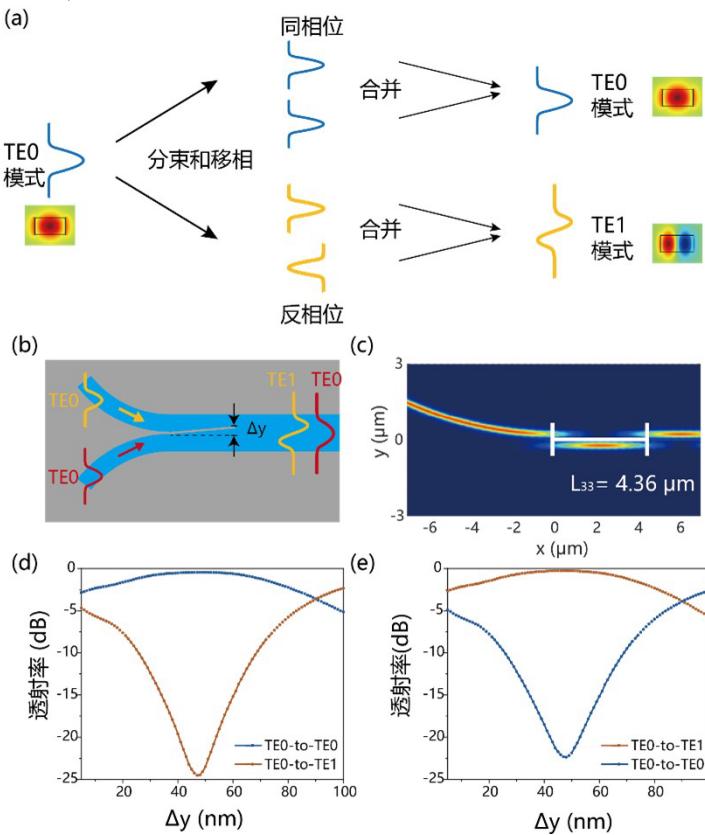


图 3.2-13 偏振旋转器中模式解复用部分的设计原理：(a) 模式 (解) 复用器的原理 (b) 模式解复用器的设计示意图 (c) 当 $\Delta y = 0$  时的能量分布 (d, e) 当 $\Delta y$  改变时器件上下两个端口的转换损耗和串扰。

Fig. 3.2-13 (a) The principle for the proposed mode (de)multiplexer, (b) the structure schematic for the mode (de) multiplexer and (c) the power distribution for the slot structure when  $\Delta y = 0$ . The conversion losses and crosstalk as  $\Delta y$  changes for light input from the (d) bottom waveguide and (e) up waveguide.

表 3.2-1 设计的电介质微扰片上偏振态调控器件的具体参数

Table 3.2-1. Parameters of the Metamaterial-assisted Polarization-handling Devices.

参数名称: 长度 [单位]

起偏器	$a_{11}$ : 500 nm	$\Lambda_{11}$ : 390 nm	$w_{11}$ : 1 $\mu\text{m}$	$w_{12}$ : 250 nm	$L_1$ : 18 $\mu\text{m}$
偏振分束器	$a_{21}$ : 100 nm $w_{24}$ : 200 nm	$a_{22}$ : 80 nm $w_{25}$ : 1 $\mu\text{m}$	$a_{23}$ : 120 nm $\Lambda_{21}$ : 328 nm	$w_{21}$ : 1.1 $\mu\text{m}$ $\Lambda_{22}$ : 370 nm	$w_{22}$ : 550 nm $\Lambda_{23}$ : 446 nm
偏振分束旋转器	$a_{31}$ : 150 nm $w_{33}$ : 300 nm	$L_{31}$ : 7.06 $\mu\text{m}$ $w_{34}$ : 400 nm	$L_{32}$ : 1.4 $\mu\text{m}$ $w_{35}$ : 350 nm	$L_{33}$ : 4.36 $\mu\text{m}$ $g_{31}$ : 100 nm	$w_{31}$ : 700 nm $w_{32}$ : 800 nm

### 3.3 加工和测试

#### 3.3.1 制备方法

含超构材料的片上器件可以通过以下方式进行制备：首先需要准备合适的 SOI 晶圆。本工作选择的 SOI 晶圆由 220 nm 的顶层硅，3  $\mu\text{m}$  的埋层二氧化硅和 720  $\mu\text{m}$  的衬底硅三层结构构成。通过划片的方式，把 SOI 晶圆划分成 1.5 cm  $\times$  1.5 cm 的芯片，用来进行后续的加工，加工流程如图 3.3-1 所示。首先对芯片表面进行清洁，在丙酮和异丙醇（IPA, Isopropyl Alcohol）溶液中分别对芯片进行超声波清洗 5 分钟，然后使用去离子水进行冲洗。接着使用氮气枪吹干表面，并在氧气等离子体环境中进行 3 分钟的表面处理，确保芯片表面的清洁。然后把光刻胶旋涂在芯片表面，光刻胶的型号是 AR-P 6200.09。然后在热板上进行前烘，在 180°C 的条件下烘烤 2 分钟。接着采用电子束曝光（EBL, Electron Beam Lithography）的方式进行光刻，使用的仪器是 Vistec EBPG 5200+。然后在甲基异丁基酮（MIBK, Methyl Isobutyl Ketone）溶液中进行显影，显影时间是 75 秒。然后使用氮气枪将表面吹干，接着采用电感耦合等离子体（ICP, Inductively Coupled Plasma）干法刻蚀的方法，把图形转移到顶层硅上，采用的仪器是 SPTS DRIE-I。加工的结构通过两次套刻来实现不同的刻蚀深度，第一次通常刻蚀波导结构，刻蚀深度是 220 nm，刻蚀深度通过反应时长进行控制。然后采用等离子体去胶机，在氧气等离子体的环境中处理 5 分钟，以去除表面剩余的光刻胶。接着重复清洗、涂胶、光刻、显影的过程，然后进行光栅的刻蚀，刻蚀深度是 70 nm。下一步可以采用光学显微镜和扫描电子显微镜（SEM, Scanning Electron Microscope）对加工出的结构进行观察，扫描电子显微镜的型号是 SEM Zeiss Ultra Plus。最后，采用等离子体增强化学气相沉积（PECVD, Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition）的方法在芯片上沉积 1  $\mu\text{m}$  厚的氧化硅作为保护层，采用的仪器是 Oxford Plasmalab System 100。

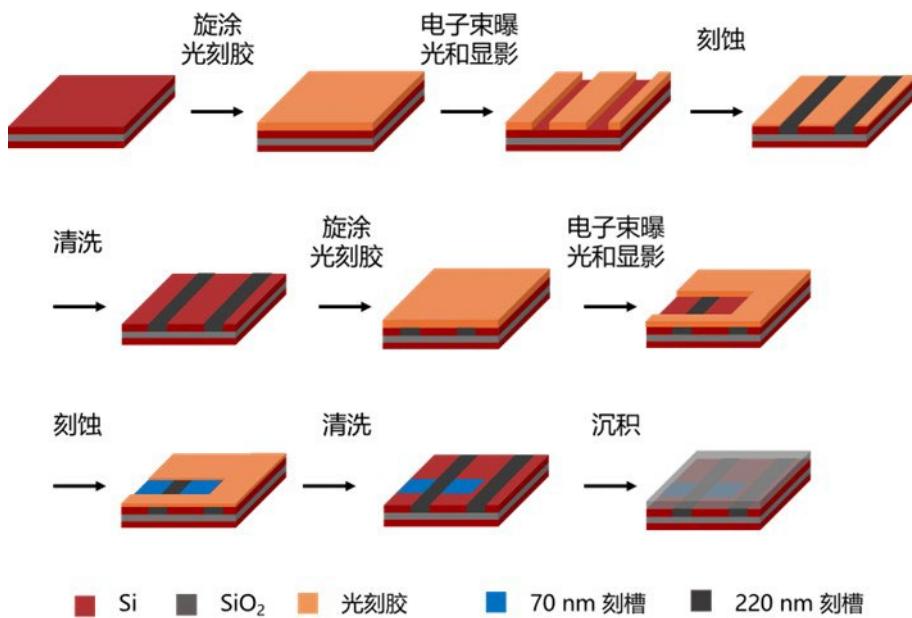


图 3.3-1 含超构材料的片上器件制备方法示意图

Fig. 3.3-1 Schematic illustration of the fabrication process of the on-chip metamaterial-assisted components

### 3.3.2 测试方法

光芯片可以通过如图 3.3-2 的方法进行测试，通过波长可调的半导体激光器(TSL, Tunable Semiconductor Laser) 和光探测器(PD, Photodetector) 可以测试功能器件的光谱信息<sup>[171]</sup>。单波长的光首先从激光器(Santec TSL-770) 中发射到光纤里，然后通过光纤偏振控制器(FPC, Fiber Polarization Controller) 对光的偏振态进行调控。然后芯片上加工的光栅结构可以把光纤中的光耦合到芯片上待测的器件。在光学显微镜的辅助下，通过 6 维调节台和可以把光纤和光栅耦合器进行对准。通过调整加工的光栅结构的周期，可以控制进入到器件中的偏振态；也可以通过调整光纤的角度和光栅的周期来调整光栅的工作波长。最后通过一个光功率计可以检测接收到的光功率，并且通过接收到的光功率信号进一步对光栅和光纤之间的耦合进行对准。通过激光器对波长进行扫描，可以在光探测器上记录不同波长下的器件的光谱响应情况。



图 3.3-2 含超构材料的片上器件测试方法示意图

Fig. 3.3-2 Experimental setup for the measurement

### 3.3.3 测试结果

图 3.3-3 展示了所加工的器件结构的光学显微镜和扫描电子显微镜照片。这些器件是通过光功率计(Santec MPM210)和波长可调激光器(Santec TSL770)来进行测试的。通过光栅耦合器来进行光纤和片上硅波导之间的光场耦合。硅波导中激发模式的偏振态通过光栅的周期和占空比来进行控制，具体测试流程可以参考第三章第二小节。两套具有同样参数的器件在芯片上进行加工，两个器件之间距离很近但是采用不同种类的光栅来把光耦合进入波导中，这样可以分别测试波导中激发不同模式的光源时器件的性能。

本文设计的起偏器可以阻碍 TE 偏振态光的传播而不影响 TM 偏振态光的传播，器件在 1500 nm 到 1600 nm 波长范围之间工作时，损耗低于 1 dB 而消光比大于 30 dB；而器件在 1550 nm 处的损耗为 0.8 dB，消光比为 40 dB。

本文设计的偏振分束器可以将 TE 偏振态的光反射并引导进入端口 1，而将 TM 偏振态的光引导至端口 2。对于 TE 偏振态的光来说，在 1540 nm 到 1590 nm 的波长范围内，器件的插入损耗小于 2 dB，消光比大于 30 dB；而器件在 1550 nm 处的损耗为 1.5 dB，消光比为 32 dB；对于 TM 偏振态的光来说，在 1540 nm 到 1590 nm 的波长范围内，插入损耗低于 1.4 dB，消光比大于 33 dB；而器件在 1550 nm 处的损耗为 0.8 dB，消光比为 45 dB。

本文设计的偏振分束旋转器可以旋转 TM 偏振态的光并且将其耦合到 1 端口，并且将 TE 偏振态的光引导到 2 端口。对于 TE 和 TM 两种偏振态的光，器件在 1500 nm 到 1580 nm 的波长范围里损耗小于 1.3 dB，消光比大于 12 dB；而 1550 nm 处器件的损耗小于 1 dB，消光比大于 13 dB。

器件测试的损耗略大于仿真的结果，这可能是由于在仿真中没有考虑到波导的粗糙度和加工的误差。而偏振分束旋转器的器件整个光谱存在一定的蓝移，这里的误差可能是由于加工的波导比仿真的结果要窄，本文后面也会进一步讨论器件的工艺容忍度。

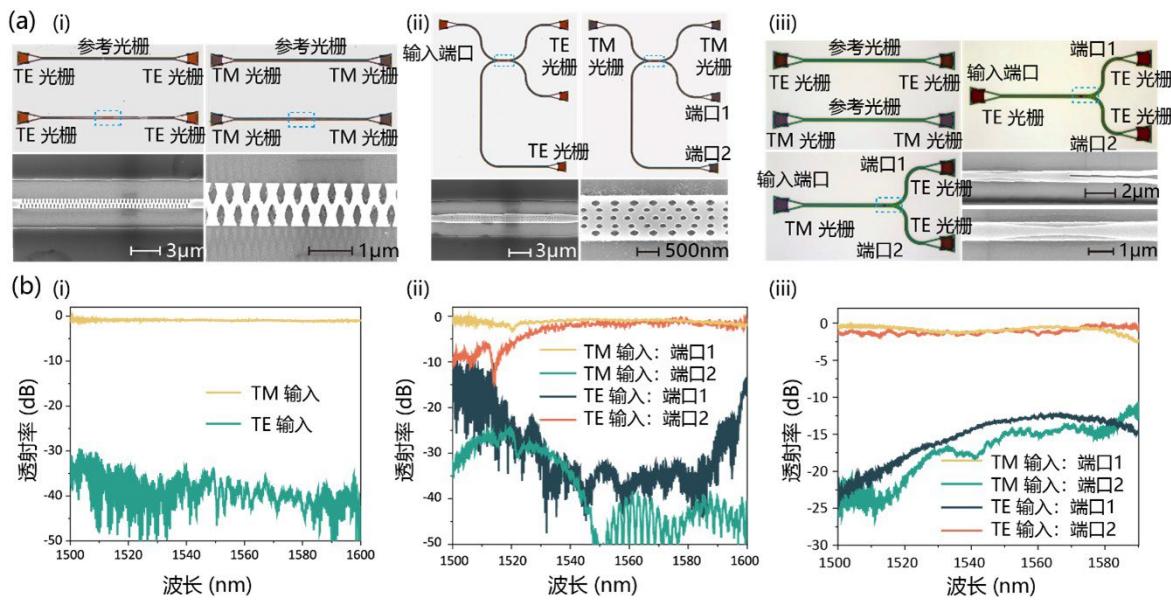


图 3.3-3. 加工的器件结构和测试结果。 (a) 加工的起偏器、偏振分束器、偏振分束旋转器的光学显微镜和扫描电子显微镜照片。不同种类的光栅耦合器可以用来耦合不同偏振态的模式。 (b) 起偏器、偏振分束器、偏振分束旋转器中不同端口测试的传输光谱。

Fig. 3.3-3 Fabricated structures and measured results. (a) The optical microscope and scanning electron microscope (SEM) images of the fabricated metamaterial-based (i) polarizer, (ii) PBS and (iii) PSR. Different kinds of grating couplers are employed for the coupling of different polarized modes. (b) Measured transmission at different ports for the fabricated (i) polarizer, (ii) PBS and (iii) PSR.

## 3.4 讨论和分析

### 3.4.1 硅基偏振调控器件的性能比较

表 3.4-1 展示和比较了各种之前被报道过的偏振控制器件。比较的表格展现了本文所设计的超构材料辅助的配置控制器件具有有竞争力的性能，并且可以实现全空间的偏振控制，同时保持一个较小的器件尺寸。

表 3.4-1 硅基偏振调控器件的性能比较

Table 3.4 -1. Performance Comparison of Silicon Polarization-handling Components

器件功能	结构原理	耦合区域面积 [ $\mu\text{m}^2$ ]	损耗 [dB]	消光比 [dB]	带宽 [nm]	实验或仿真结果
起偏器:	非对称定向耦合器 <sup>[179]</sup>	$6.6 \times 1.8$	< 0.7	> 15	80	实验结果
	绝热弯曲波导 <sup>[193]</sup>	$63 \times 9.5$	< 0.4	> 27	100	实验结果
	各向异性亚波长光栅弯曲波导 <sup>[194]</sup>	$13 \times 6.5$	< 1	> 20	415	实验结果
	亚波长光栅波导 <sup>[202]</sup>	$9 \times 0.6$	< 1	> 20	60	实验结果
	亚波长光栅波导 <sup>[203]</sup>	$60 \times 1.1$	< 0.4	> 30	100	实验结果
	布拉格光栅 <sup>[204]</sup>	$30 \times 1$	< 0.13	> 30	61	仿真结果
	周期结构的波导 <sup>[205]</sup>	$21 \times 0.5$	< 1	> 30	90	实验结果
	一维光子晶体 <sup>[206]</sup>	$4 \times 0.7$	< 1	> 20	50	实验结果
<b>本工作</b>		<b>18 × 1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&gt; 35</b>	<b>100</b>	<b>实验结果</b>
偏振分束器	桥接非对称定向耦合器 <sup>[180]</sup>	$29.4 \times 2$	< 1	> 25	60	实验结果
	亚波长光栅非对称定向耦合器 <sup>[181]</sup>	$4 \times 2.5$	< 2.8	> 15	60	实验结果
	光栅辅助反向耦合器 <sup>[182]</sup>	$27.5 \times 1.1$	< 1	> 30	21	实验结果
	弯曲定向耦合器 <sup>[183]</sup>	$20 \times 6.9$	< 0.5	> 30	70	实验结果
	亚波长光栅波导非对称定向耦合器 <sup>[186]</sup>	$6.45 \times 1.5$	< 1	> 20	100	仿真结果
	弯曲非对称定向耦合器 <sup>[73]</sup>	$8.7 \times 3$	< 1	> 18	41	实验结果
	绝热非对称定向耦合器 <sup>[192]</sup>	$11 \times 1.2$	< 1	> 25	120	实验结果
	亚波长光栅波导桥接非对称定向耦合器 <sup>[68]</sup>	$33.6 \times 1.9$	< 1	> 20	220	实验结果
	各向异性亚波长光栅波导定向耦合器 <sup>[207]</sup>	$12.3 \times 1.9$	< 1	> 25	175	实验结果
	亚波长光栅多模干涉仪 <sup>[208]</sup>	$14.6 \times 1.5$	< 1	> 15	40	仿真结果
	逆向设计非对称定向耦合器 <sup>[195]</sup>	$48 \times 2.3$	< 0.58	> 15	250	仿真结果
	逆向设计结构 <sup>[61]</sup>	$2.4 \times 2.4$	< 1.6	> 10	32	实验结果
	多模干涉仪 <sup>[209]</sup>	$600 \times 7$	< 3	> 20	20	实验结果
<b>本工作</b>		<b>16 × 1.1</b>	<b>&lt; 2</b>	<b>&gt; 30</b>	<b>50</b>	<b>实验结果</b>

续表 3.4-1

器件功能	结构原理	耦合区域面积 [ $\mu\text{m}^2$ ]	损耗 [dB]	消光比 [dB]	带宽 [nm]	实验或仿真结果
偏振分束 旋转器:	绝热非对称定向耦合器 <sup>[70]</sup>	70 × 1.3	<1.5	>15	80	实验结果
	弯曲脊形波导 <sup>[188]</sup>	10.74 × 5	<0.4	>18	100	实验结果
	锥形耦合器和非对称定向耦合器 <sup>[189]</sup>	47.5 × 1.5	<1	>20	85	实验结果
	锥形耦合器和反向非对称定向耦合器 <sup>[190]</sup>	313.5 × 1.5	<1.21	>12.1	110	实验结果
	锥形非对称定向耦合器 <sup>[191]</sup>	375 × 1.5	<1	>10	85	实验结果
	两次刻蚀的非对称定向耦合器 <sup>[187]</sup>	27 × 1.4	<0.5	>20	30	实验结果
	亚波长光栅波导锥形非对称定向耦合器 <sup>[207]</sup>	171 × 1.6	<1.4	>15	70	实验结果
本工作		13 × 1	<1.3	>12	80	实验结果

### 3.4.2 工艺容忍度分析

对于超构材料偏振调控器件，接下来进一步分析器件的工艺容忍度。为了验证器件的工艺容忍度，首先通过仿真的方法验证了器件在设计参数变化时性能的变化。具体来说，本文分析了当波导宽度、介质刻蚀孔深度和大小变化时器件损耗和串扰的变化。

对于起偏器来说，如图 3.4-1 所示，当波导宽度在 ±100 nm 的范围内变化，介质刻蚀孔深度变化 0 ~ -20 nm 的范围内，或者介质刻蚀孔直径在 ±100 nm 的范围内变化时，起偏器的损耗小于 1 dB 并且消光比大于 30 dB。

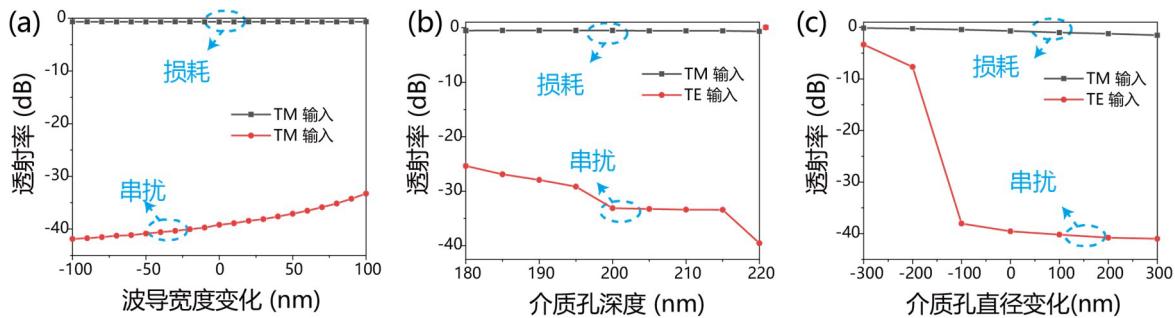


图 3.4-1 在波长为 1550 nm 时, 当 (a) 波导宽度, (b) 介质刻蚀孔深度和 (c) 介  
质刻蚀孔直径变化时, 起偏器的传输损耗和串扰。

Fig. 3.4-1 The simulated transmission of the polarizer at 1550 nm when the (a) waveguide width, (b) hole depth and (c) hole diameter change.

对于偏振分束器来说, 如图 3.4-2 所示, 当波导宽度的变化范围在  $\pm 40$  nm 内, 介质刻蚀孔深度变化 0~20 nm 的范围内, 或者介质刻蚀孔直径变化范围在  $\pm 10$  nm 的范围内, 偏振分束器的损耗小于 1 dB 并且消光比大于 30 dB。

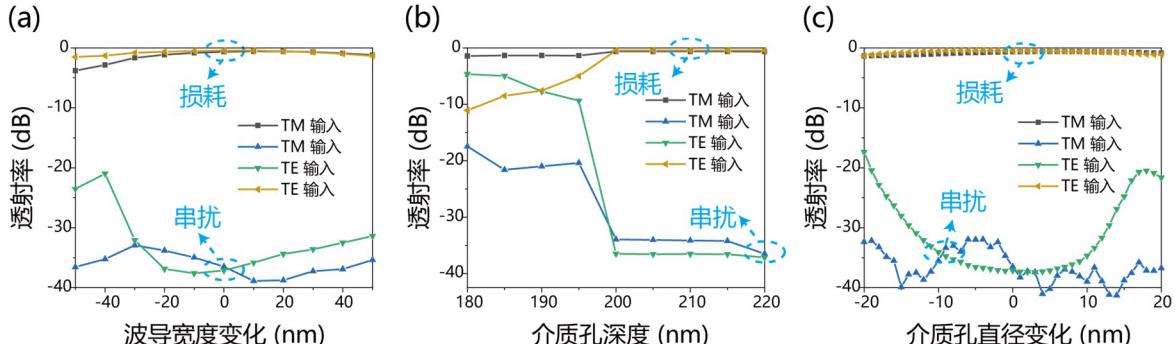


图 3.4-2 在波长为 1550 nm 时, 当 (a) 波导宽度, (b) 介质刻蚀孔深度和 (c) 介  
质刻蚀孔直径变化时, 偏振分束器的传输损耗和串扰。

Fig. 3.4-2 The simulated transmission of the PBS at 1550 nm when (a) waveguide width, (b) hole depth, and (c) hole diameter change.

对于偏振分束旋转器来说, 如图 3.4-3 所示, 当波导宽度在  $\pm 15$  nm 的范围内, 介质刻蚀孔深度变化  $-20$  nm ~  $+10$  nm 的范围内, 介质刻蚀孔直径变化范围在  $\pm 20$  nm 的范围内, 或者介质槽宽度的变化范围在  $\pm 20$  nm 内, 偏振分束旋转器的损耗小于 1 dB 并且消光比大于 15 dB。

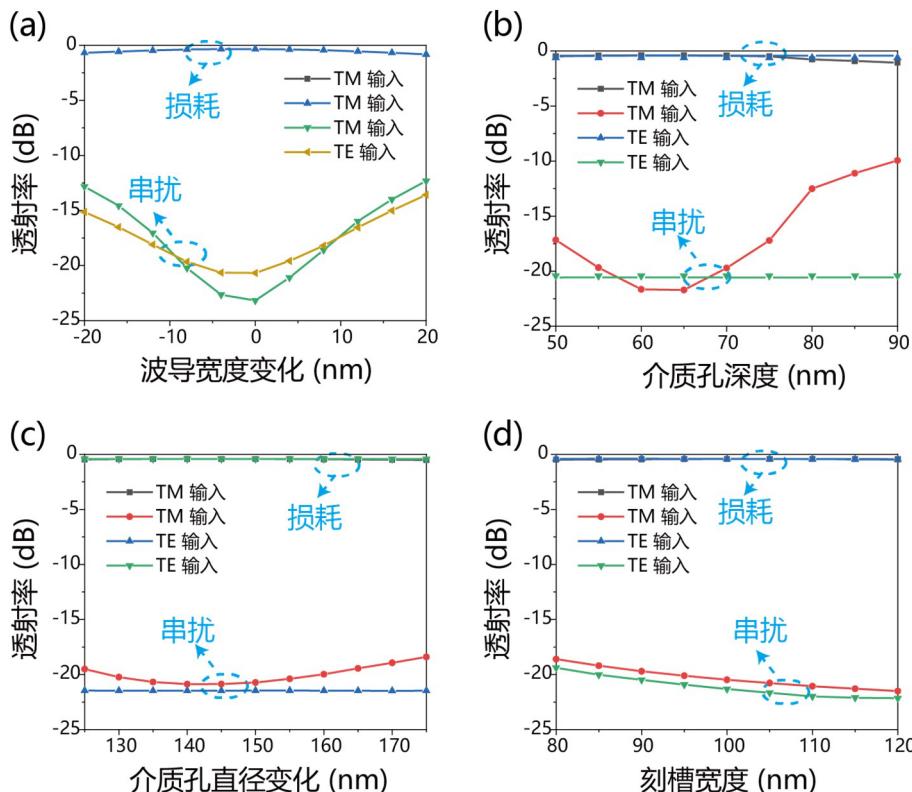


图 3.4-3. 在波长为 1550 nm 时, 当 (a) 波导宽度, (b) 介质刻蚀孔深度, (c) 介质刻蚀孔直径, (d) 介质槽宽度变化时, 偏振分束旋转器的传输损耗和串扰。

Fig. 3.4-3 The simulated transmission of the PSR at 1550 nm when (a) waveguide width, (b) hole depth, (c) hole diameter, and (d) slot width change.

对偏振分束旋转器来说, 和仿真结果相比, 测试到的光谱有一定的蓝移。实验和仿真的结果差异可能是加工时波导宽度的误差所导致的。加工时的刻蚀步骤可能会导致波导宽度稍窄: 通常来说, 需要略微过刻蚀来保证波导结构完成全刻蚀。根据以往的加工经验, 设计的波导宽度  $x$  和实际加工的波导宽度  $y$  之间的关系可以被表达为:  $y = ax + b$ , 其中  $a = 1.0032$ ,  $b = -36.6433$  nm。如图 3.4-4 所示, 波导宽度所存在的差异可能会导致偏振分束器的光谱发生移动。

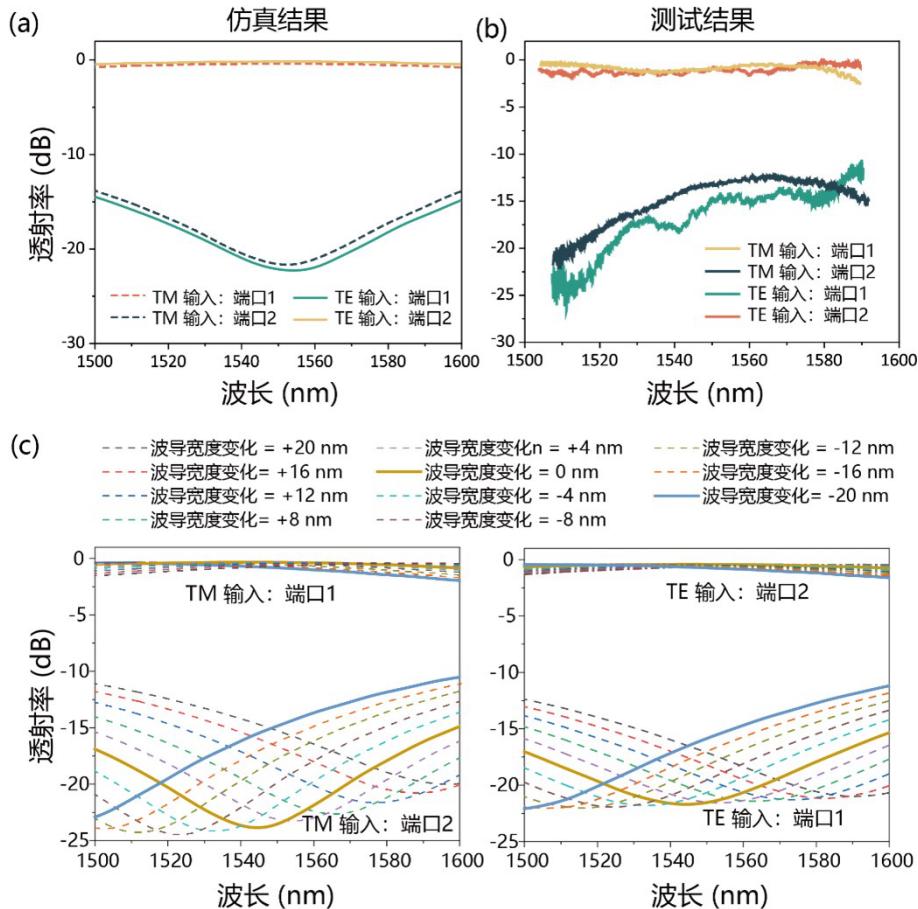


图 3.4-4 偏振分束旋转器 (a) 仿真结果和 (b) 实验测试结果的比较; (c) 偏振分束器的响应光谱随波导宽度变化产生的影响。

Fig. 3.4-4 Comparison of (a) simulated result and (b) experimentally measured result for the polarization-splitter-rotator (PSR). (c) The simulated spectra of the PSR with waveguide width deviation.

### 3.5 本章小结

在这一章节, 本文展示了超构材料辅助调控的偏振控制器件。这些偏振控制器件展示了全空间的偏振操控能力, 并且保持了有竞争力的性能和超紧凑的尺寸, 在片上光场控制的能力上提供了新的经验。设计的超构材料可以在不同偏振态的模式之间提供理想的耦合系数, 并且在不同的位置对光场施加不同的相位延迟。通过这种方式, 设计了起偏器, 偏振分束器, 偏振分束旋转器, 这些器件具有超紧凑的耦合长度 (分别为  $18 \mu\text{m}$ ,  $16 \mu\text{m}$  和  $13 \mu\text{m}$ ) 和较低的插入损耗 (分别小于  $1 \text{ dB}$ ,  $2 \text{ dB}$  和  $1.3 \text{ dB}$ ) 和较高的消光比 (分别大于  $35 \text{ dB}$ ,  $30 \text{ dB}$  和  $12 \text{ dB}$ )。这种超构材料辅助的设计

方法可以进一步为逆向设计提供合适的初始状态，并且有潜力在其他包括偏振多样系统，非线性光学，光学模拟计算等领域提供助力。本项工作作为封面文章发表在光学高水平期刊 *Laser & Photonics Reviews* 上。

## 第四章 片上超构模式调控

此章节展示了在 SOI 平台上设计和加工的超紧凑的模式转换器和模式（解）复用器。通过简单的电介质刻蚀槽的方式设计了模式转换器和模式解复用器。设计的模式转换器可以将  $TE_0$  模式转换成  $TE_1$  模式，并具有一个超紧凑的尺寸 ( $0.8 \times 1.2 \mu\text{m}^2$ )，测试损耗在 1520 nm 到 1570 nm 之间的损耗小于 1.2 dB。为了进一步减少器件的损耗，通过对器件结构的优化，设计出的模式转换器可以把  $TE_0$  模式耦合到  $TE_1$  模式，测试的损耗小于 0.5 dB，尺寸为  $0.88 \times 2.3 \mu\text{m}^2$ ；设计的模式转换器可以把  $TE_0$  模式转换到  $TE_2$  模式，测试的损耗也小于 0.5 dB。设计的模式转换器也可以向更高阶模式转换进行拓展。此外，本文设计了模式（解）复用器，从不同端口输入的光可以分别耦合为  $TE_0$  和  $TE_1$  模式，损耗小于 0.5 dB，串扰小于 -10 dB，尺寸为  $1.8 \times 1 \mu\text{m}^2$ 。这种设计方法进一步探索了利用超构材料的手段对片上模式调控的方法。

### 4.1 研究背景

由于 SOI 平台具有优秀的材料特性和成熟的加工工艺，已经在许多应用领域取得了广泛的发展<sup>[31]</sup>。多模调控技术是用来满足不断增长的通信容量最有希望的技术之一，也因此吸引了越来越多的注意。通过在硅基光电子芯片上引入高阶模式可以有效地增加多模波导传输中的通信通道数目，从而进一步增加芯片上的通信容量<sup>[210]</sup>。为了实现模分复用系统，研究人员设计了大量的多模器件，例如模式（解）复用器<sup>[77,211,212]</sup>，多模弯曲波导<sup>[213]</sup>，多模波导交叉<sup>[214]</sup>和可重构的多模器件<sup>[215]</sup>。模式转换器是模分复用系统中的核心器件，可以将一种模式转换为另一种模式，从而实现不同模式通道之间的信号转换。而模式（解）复用器可以把携带不同信号的光复用到一根多模波导的不同模式中，或者把多模波导中不同模式的光解复用到不同输出端口。调控模式的方法可以被大致归类为三种<sup>[75]</sup>：相位匹配<sup>[77,211]</sup>、波束塑形<sup>[212]</sup>和相干干涉<sup>[215,216]</sup>。例如，基于相位匹配的方法，非对称定向耦合器可以把一根波导中的模式高效的耦合到另一根波导中的指定模式。这种方式设计的器件可以拓展到非常高阶模式的耦合，但目前为止这种类型器件设计的主要挑战是想要实现严格的相位匹配条件需要两根波导的宽度加工相对精确，从而工艺容忍度较低<sup>[77,217]</sup>。另一方面，通过波束塑形的方法，模式之间的转换可以通过马赫曾德尔干涉仪的结构来实现。这种方式实现的模式转换器具有较好的工艺容忍度和较大的带宽，但是这种结构较难实现更紧凑的尺寸，因此难以满足高密度集成的要求<sup>[215]</sup>。

近年来，超构材料结构也被提出用来实现模式之间的转换。因为这种方式可以实

现高效的模式转换并且具有超紧凑的尺寸，近年来这种结构被广为研究并迅速发展 [82,86,165,218–223]。然而，尽管这种方式有潜力可以实现更小的尺寸和更好的性能，但是这种方式设计和实现的模式解复用器的理论还没有被完全探讨。

此章节介绍了基于电介质全刻蚀槽的模式转换器和模式（解）复用器。电介质刻蚀槽可以同时控制波导中传输的模式的相位和强度，从而将输入的光转换成理想的模式。其中从  $TE_0$  模式向  $TE_1$  模式的转换可以在  $1.2 \mu\text{m}$  的长度内完成。通过调整介电刻蚀槽的形状可以进一步减小器件的损耗，但模式转换所需要的长度同时也会相对增长。作为设计的实例演示了两种模式转换器，它们的耦合长度分别为  $2.3 \mu\text{m}$  和  $2.4 \mu\text{m}$ ，测试的插入损耗都要小于  $0.5 \text{ dB}$ 。另外也分析了通过两级的模式转换器的设计，可以直接将  $TE_0$  模式耦合到  $TE_3$  模式，从而验证了此种方式的模式转换器的可扩展性。另一方面，本文设计了超紧凑低损耗的  $TE_0/TE_1$  的模式（解）复用器，由于电介质刻蚀槽可以控制不同模式之间的耦合，从上面端口输入的  $TE_0$  基模可以耦合到多模波导中的  $TE_0$  模式，而从下面端口输入的  $TE_0$  基模会被耦合到多模波导中的  $TE_1$  模式。整个两种模式的模式复用可以在一个  $1.8 \mu\text{m}$  长的电介质刻蚀波导中实现，模式（解）复用器是由两个模式解复用器镜像来进行测试的，其中测试的插入损耗小于  $0.5 \text{ dB}$  并且串扰小于  $-10 \text{ dB}$ 。

## 4.2 设计和原理

这些器件的工作原理和基于马赫-曾德尔的模式转换器类似，这种原理也被称为波束塑形的方法。以  $TE_0$  向  $TE_1$  的模式转换为例，如图 4.2-1 所示，两个相位相反的  $TE_0$  模式和  $TE_1$  模式由于具有相似的模场分布，具有最大的模场交叠，因此可以高效发生转换。两个相位相反的  $TE_0$  模式可以进行合束，并且生成一个  $TE_1$  模式。模式转换过程的原理如图 4.2-1 所示，输入的  $TE_0$  模式首先被分成两束具有相同能量的光束，然后通过设计移相器来在两束光在传播过程中引入一个  $\pi$  的相位差。最后，两个相位相反的  $TE_0$  模式可以重新合并生成一个  $TE_1$  模式。下面分别具体介绍模式转换器和模式（解）复用器的设计和仿真结果。

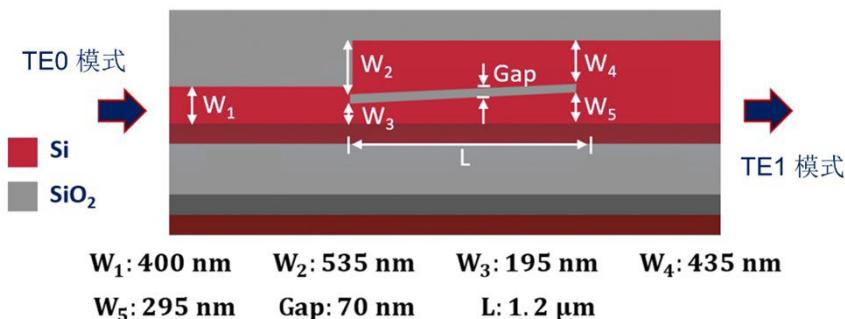


图 4.2-1 在模式转换过程中，波束塑形方法的原理示意图

Fig. 4.2-1 Schematic diagram of the beam shaping method

#### 4.2.1 模式转换器的设计

图 4.2-2 展示了设计的模式转换器的示意图，模式转换器是基于 SOI 平台进行设计的，包括 220 nm 厚的顶层硅和 3  $\mu\text{m}$  厚的埋层二氧化硅。电介质槽是在硅波导上进行的全刻蚀，然后使用二氧化硅进行了填充。这个结构可以被看成是一个分束器和移相器的结合。介质槽结构类似于一个 Y 形分束器，把入射光分成了两部分。分束的比例可以通过改变介质槽的中心位置来进行调整。同时，锥形的波导结构可以被用来当作移相器，由于两根波导的宽度不同，其中传输的模式有效折射率会发生改变。因此，光在其中传输时的传播常数和相速度不同，会产生一个相位差。通过调整介质槽的位置，可以使两个输出的模态具有同样的能量并且相位差为  $\pi$ ，之后两束光可以重新合并产生一个 TE<sub>1</sub> 模式。

图 4.2-2 超紧凑 TE<sub>0</sub>-TE<sub>1</sub> 模式转换器的示意图Fig. 4.2-2 Schematic diagram of the ultra-compact TE<sub>0</sub>-to-TE<sub>1</sub> mode converter

通过以上的分析，输入波导宽度设置为 400 nm，从而可以很好的支持 TE<sub>0</sub> 模式的低损传输；多模波导的宽度设置为 800 nm，从而可以很好的支持 TE<sub>0</sub> 和 TE<sub>1</sub> 模式的传输。模式之间的耦合长度设置为 1.2  $\mu\text{m}$ ，在这个长度下，两种模式之间可以实现较为完全的转换。考虑到可行的加工分辨率，介质刻蚀槽的宽度被设置为 70 nm。通过对介质槽中心位置 ( $w_2, w_3$ ) 和上下两个锥形波导宽度的参数扫描 ( $w_4, w_5$ )，可以实现对耦合系数的控制，从而最后生成 TE<sub>1</sub> 模式。优化后的参数结果如图 4.2-2 中所示。接着通过 MATLAB，参考前面第二章介绍的原理，对耦合模理论进行了建模。

仿真，图 4.2-3 (a) 展示了耦合系数  $\kappa_{01}$  和在传播过程中的变化情况，并且可以进一步计算出模式之间的转换情况。通过耦合模理论的计算， $TE_0$  和  $TE_1$  模式之间的转换效率可以大于 90%。

接着通过三维时域有限差分方法（3D-FDTD）对器件进行了仿真，进一步验证器件的理论分析结果。图 4.2-3 (a) 展示了通过 3D-FDTD 方法仿真中每个模式传播时的归一化能量变化。通过 FDTD 仿真的结果和采用耦合模理论计算的结果大致相同，采用 FDTD 方法计算得到的转换效率较低，这可能是因为在进行耦合模理论计算时忽略了转换过程中光的损耗。图 4.2-3 (b) 展示了仿真得到的电场  $y$  分量的分布情况，可以看到输入的  $TE_0$  模式逐渐完全转换成  $TE_1$  模式，和前面的理论分析符合的很好。

图 4.2-3 (c) 展示了仿真得到的  $TE_0$ - $TE_1$  模式转换器件传输谱，在 100 nm 的带宽范围内，器件的插入损耗小于 1.2 dB 而串扰小于 -16.5 dB。器件的工作带宽覆盖了整个 C 波段。

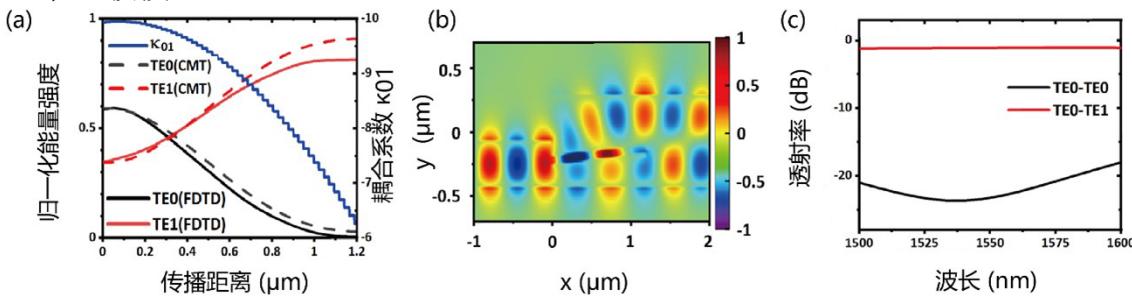


图 4.2-3 (a) 通过耦合模理论 (CMT) 和时域有限差分方法 (FDTD)，计算出的传播过程中不同模式之间的耦合系数  $\kappa_{01}$  和不同模式的归一化能量。(b) FDTD 仿真得到的归一化电场 ( $E_y$ ) 分布情况和 (c) 光谱响应情况。

Fig. 4.2-3 (a) The coupling coefficient  $\kappa_{01}$  and the normalized power of each mode along the propagation calculated by the CMT equations or the 3D-FDTD method, (b) simulated electric field ( $E_y$ ) distribution and (c) spectrum response.

#### 4.2.2 模式（解）复用器的设计

对于模式（解）复用器的设计来说，图 4.2-4 展示了设计的  $TE_0/TE_1$  模式（解）复用器的原理及其示意图。模式（解）复用器也是基绝缘体上硅的平台进行设计的，原理可以解释如下：

全刻蚀的槽把波导分为了两部分，上面的宽波导和下面的窄波导，当光从上面的

端口入射进入槽波导时，两种现象会同时发生。一是由于倏逝波耦合的效果，光会逐渐向下面的窄波导进行耦合；二是由于两根波导的宽度不同，在光传播时会引入一个相位差。另外要注意到由于倏逝波耦合而产生的光场总是会延后  $90^\circ$ ，因此，在设计时使两根宽度不同的波导引入另一个额外的  $90^\circ$  相位差，可以使得输出光的模场之间的相位差为  $0^\circ$ （即  $90^\circ - 90^\circ$ ）或者  $180^\circ$ （即  $90^\circ + 90^\circ$ ），从而最后分别产生以  $\text{TE}_0$  或者  $\text{TE}_1$  模式传输的光。当在两根波导中的光具有同样的能量并且彼此之间的相位相同，那么会在多模波导中产生以  $\text{TE}_0$  模式传输的光。而与此相似，当光从下面的端口入射进入槽波导时，会产生两个相位相反的光束，最后会生成  $\text{TE}_1$  模式。可以通过迭代优化来确认  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  和  $w_4$  的位置，来使得器件具有最好的效果。最后  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  和  $w_4$  被分别设置为  $475 \text{ nm}$ ,  $475 \text{ nm}$ ,  $640 \text{ nm}$  和  $310 \text{ nm}$ ；全刻蚀的介质槽的宽度被设置为  $50 \text{ nm}$ 。另一方面，全刻蚀的介质槽可以在不同的模式之间引入一个较强的耦合系数，因此可以在较短的距离内完成模式之间的耦合。

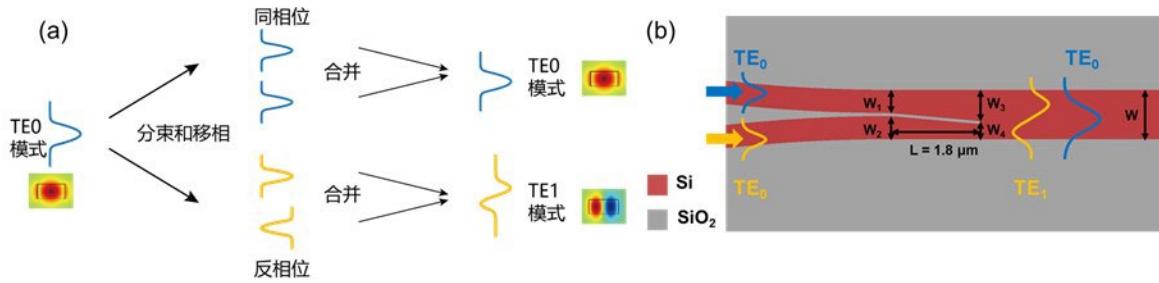


图 4.2-4 (a) 在模式（解）复用器中，波束塑形方法的原理示意图，(b) 模式（解）复用器结构示意图。

Fig. 4.2-4 Schematic diagram of (a) the beam shaping method and (b) the proposed  $\text{TE}_0$  and  $\text{TE}_1$  mode (de)multiplexers.

同样的，本文对模式（解）复用器也进行了 FDTD 仿真，从而评估和优化设计器件的性能。图 4.2-5 展示了在波长为  $1550 \text{ nm}$  时，仿真的器件电场分布情况（展示的是电场的  $y$  分量， $E_y$ ）。可以看到，当以基模传输的光从上面的波导中输入时，输入的  $\text{TE}_0$  模式的光会逐渐耦合到下面的波导中，由于波导宽度不同，会导致相位差不断积累，最后两个模斑相位相同，最后在多模波导中以  $\text{TE}_0$  模式继续进行传播。与此类似，当光从下面的波导中输入时，由于相位差的积累，最后会产生两个反向的模斑，从而最后在多模波导中以  $\text{TE}_1$  模式继续传播。图 4.2-5 (c, d) 也分别展示了当入射光从上方和下方端口入射时的光谱响应。通过使用模式展开的方法，可以计算出选定模式的传输光谱。具体来说，当光从上方的端口输入时，从弯曲波导的  $\text{TE}_0$  模式

转换到多模波导中的  $TE_0$  模式转换损耗小于 0.5 dB，而从  $TE_0$  模式转换到  $TE_1$  模式的串扰在从 1450 nm 到 1650 nm 的 200 nm 的波长范围里都小于 12 dB（在 1550 nm 处损耗小于 0.29 dB，串扰小于 -31 dB）。当光从下方的端口输入时，从弯曲波导的  $TE_0$  模式转换到多模波导中的  $TE_1$  模式转换损耗小于 0.64 dB，而从  $TE_0$  模式转换到  $TE_0$  模式的串扰在从 1450 nm 到 1650 nm 的 200 nm 的波长范围里都小于 -11.5 dB（在 1550 nm 处损耗小于 0.23 dB，串扰小于 -23 dB）。

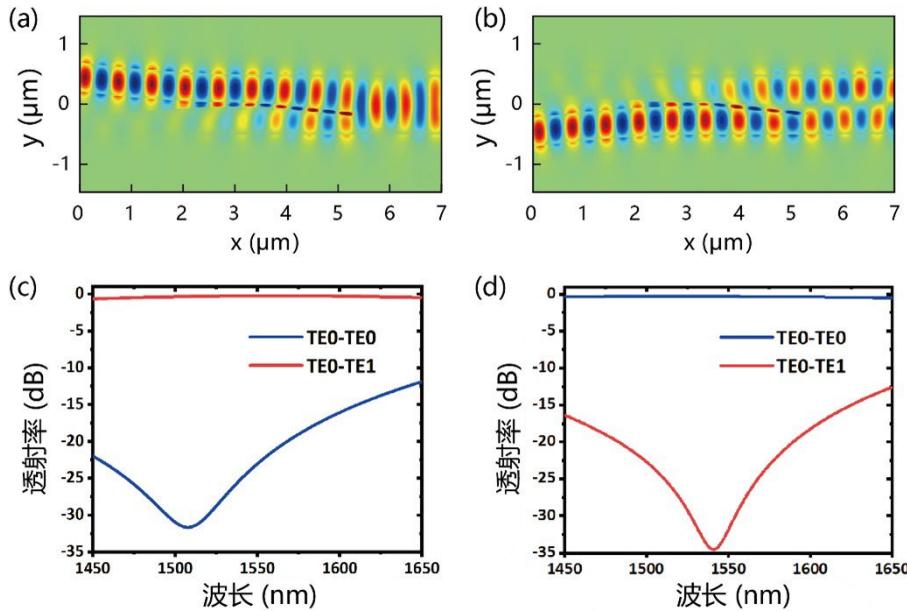


图 4.2-5. 在波长为 1550 nm 时，仿真电场的  $y$  分量分布情况。 (a) 当光从上方的波导中入射时， (b) 当光从下方的波导中入射时。 (c) 当光从上方波导入射时， (d) 当光从下方波导入射时，仿真的传输谱。

Fig. 4.2-5 Simulated electric field ( $E_y$ ) distributions at 1550 nm when (a) light launched from the upper waveguide and (b) from the lower waveguide. Simulated transmission spectra of selected modes when (c) light launched from the upper waveguide and (d) from the lower waveguide.

### 4.3 加工和测试

本文所设计的器件在 SOI 工艺平台上进行了加工，SOI 晶圆的顶层硅厚度为 220 nm，埋层二氧化硅厚度为 3  $\mu$ m。通过电子束曝光（Vistec EBPG 5200+）和电感耦合等离子体刻蚀（SPTS，DRIE-I）在硅上转移了设计的结构。最后采用等离子体增强化学气相沉积（PECVD，Oxford）在结构上沉积了厚度为 1  $\mu$ m 的氧化硅。器件通过

光功率计 (Keysight, N7744A) 和可调连续光激光器 (Keysight, 81960A) 进行测试。通过光栅耦合器可以把光从光纤耦合到器件中，同时也在同一个芯片上加工了参考光栅来进行光谱的归一化，具体的加工和测试方法可以参见第三章。

对于模式转换器件，片上的 ADC 结构可以产生所需要的模式，或者将生成的模式耦合到不同的端口进行测试。我们在同一个芯片上加工了参考模式（解）复用器来进行光谱的归一化。图 4.3-1 (a) 展示了加工的超紧凑模式转换器的结构，输入的 TE<sub>0</sub> 模式会首先通过光栅耦合到芯片中的波导中，接着通过设计的器件把 TE<sub>0</sub> 模式转换成 TE<sub>1</sub> 模式，然后 TE<sub>1</sub> 会通过 ADC 结构的模式（解）复用器进入到 O<sub>1</sub> 端口，然后通过光栅耦合到另一根光纤中进行测量。而没有转换成 TE<sub>1</sub> 模式的光会耦合到 O<sub>0</sub> 端口，并被视为串扰。之后对测到的传输谱进行归一化处理，减去参考的光栅损耗和模式转换的损耗。图 4.3-1 (b) 展示了测得的归一化之后的传输谱。在 1540 nm 到 1560 nm 的波长范围内，测得的器件损耗小于 1.2 dB 而串扰小于 -6.3 dB。由于基于 ADC 结构的模式（解）复用器对加工工艺比较敏感，因此对测试结果产生了影响。所以测试的结果和仿真结果有一定的误差。

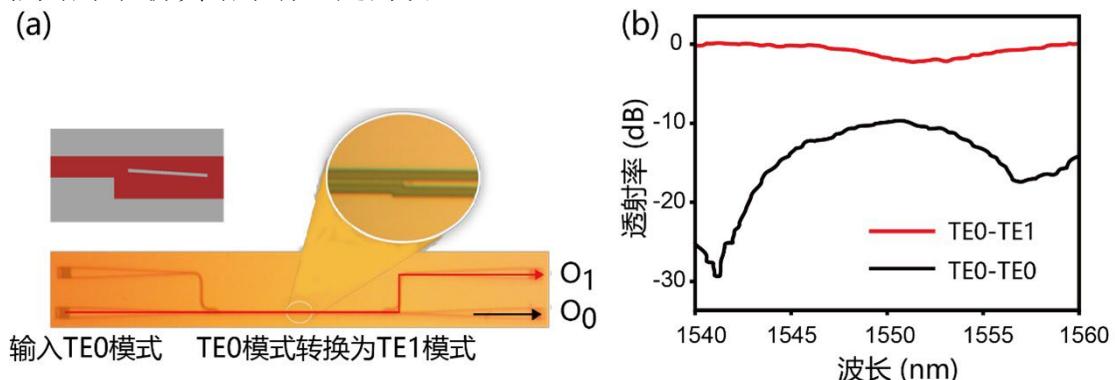


图 4.3-1. 超紧凑 TE<sub>0</sub>-TE<sub>1</sub> 模式转换器的 (a) 显微镜照片和 (b) 归一化传输光谱。

Fig. 4.3-1 (a) optical microscope photo and (b) measured transmission spectra of the ultra-compact TE<sub>0</sub>-to-TE<sub>1</sub> mode converter.

对于模式（解）复用器件，前面已经展示了简单电介质槽可以用来实现模式转换的功能。因此，可以采用如图 4.3-2 (a) 所示的自镜像方式对加工的器件结构进行测量。测试的器件传输谱如图 4.3-2 (b) 所示，其中图注“ $i - j$ ”代表光从  $i$  端口入射，从  $j$  端口出射的情况。传输的光谱展示了在 1510 nm 到 1570 nm 的波长范围内，整体的插入损耗小于 1 dB（单端的插入损耗小于 0.5 dB），串扰小于 -10 dB。测试的带宽受到光源的带宽和光栅耦合器的带宽限制。

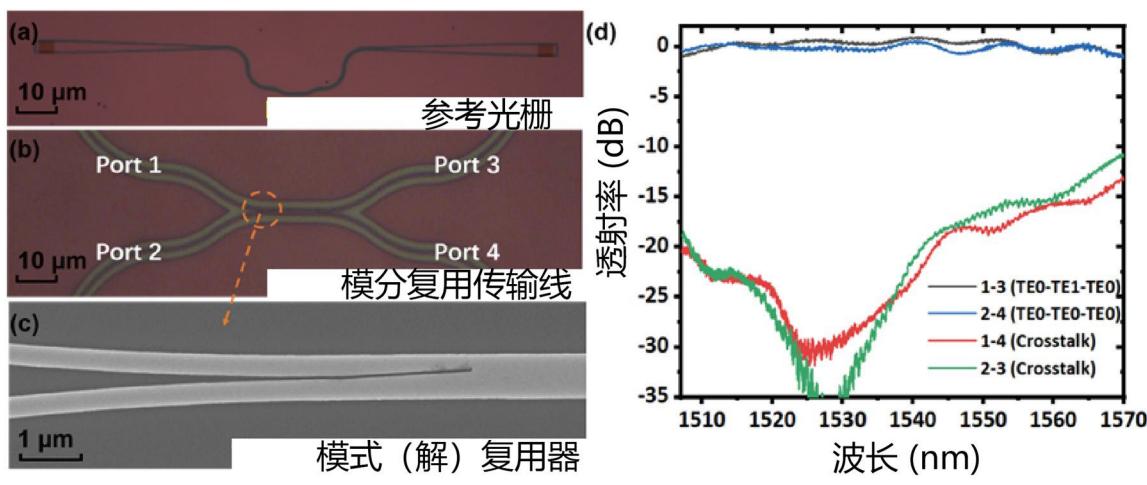


图 4.3-2. (a) 参考光栅和 (b) 加工的模分复用传输线的光学显微镜照片和 (c) 单独的基于电介质槽的模式 (解) 复用器的扫描电子显微镜照片 (d) 归一化后的测试光谱。

Fig. 4.3-2 Optical microscope photos of (a) reference grating couplers, (b) the fabricated MDM link consisting of two mode (de)multiplexers. (c) SEM photo of the single dielectric slot mode (de)multiplexer. (d) Measured transmission spectra normalized by the grating couplers.

## 4.4 讨论和分析

### 4.4.1 工艺容忍度

对于介质槽波导模式转换器，这里分析了其工艺容忍度。如图 4.4-1 所示，当介质槽宽度在  $\pm 10 \text{ nm}$  的范围里变化时，器件在  $1550 \text{ nm}$  波长下的插入损耗始终低于  $1.2 \text{ dB}$ ，并且串扰始终低于  $-20 \text{ dB}$ 。然而，由于介质刻蚀槽的宽度为  $70 \text{ nm}$ ，因此依然需要较高的光刻分辨率。

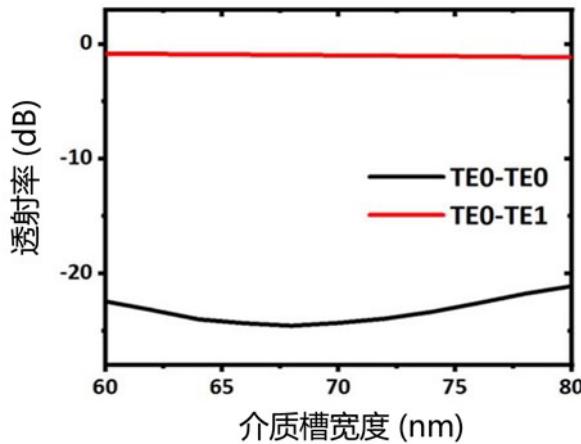


图 4.4-1 当介质槽宽度的在±10 nm 之间时，超紧凑  $\text{TE}_0$ - $\text{TE}_1$  模式转换器的损耗和串扰。

Fig. 4.4-1 Insertion loss and crosstalk for the ultra-compact  $\text{TE}_0$ -to- $\text{TE}_1$  mode converter with the gap width of ±10 nm.

#### 4.4.2 设计的可扩展性

除了前面所展示的  $\text{TE}_0$  和  $\text{TE}_1$  模式之间的耦合，本文也提出了一种可行的方法来设计低损耗的模式转换器，但可能会导致耦合长度变长。这里首先展示了一种低损耗的  $\text{TE}_0$ - $\text{TE}_1$  模式转换器。如图 4.4-2 所示，可以通过倏逝波耦合来实现波束分束的功能，从而降低器件的损耗。通过 FDTD 仿真对器件的性能进行了验证，图 4.4-2(b) 展示了仿真的电场分布。器件也同样在 SOI 平台上进行了加工，加工的光学显微镜的照片如图 4.4-2(c) 所示，测试的方式和前面的方法相同，通过基于 ADC 的模式解复用器对器件进行了测试。图 4.4-2(d) 展示了仿真和实验的测得的归一化传输光谱，可以看到在 1520 nm 到 1580 nm 的波长范围内，仿真的器件损耗小于 0.15 dB，串扰小于 -20 dB；而在实验中传输的损耗小于 0.5 dB，串扰小于 -7 dB。

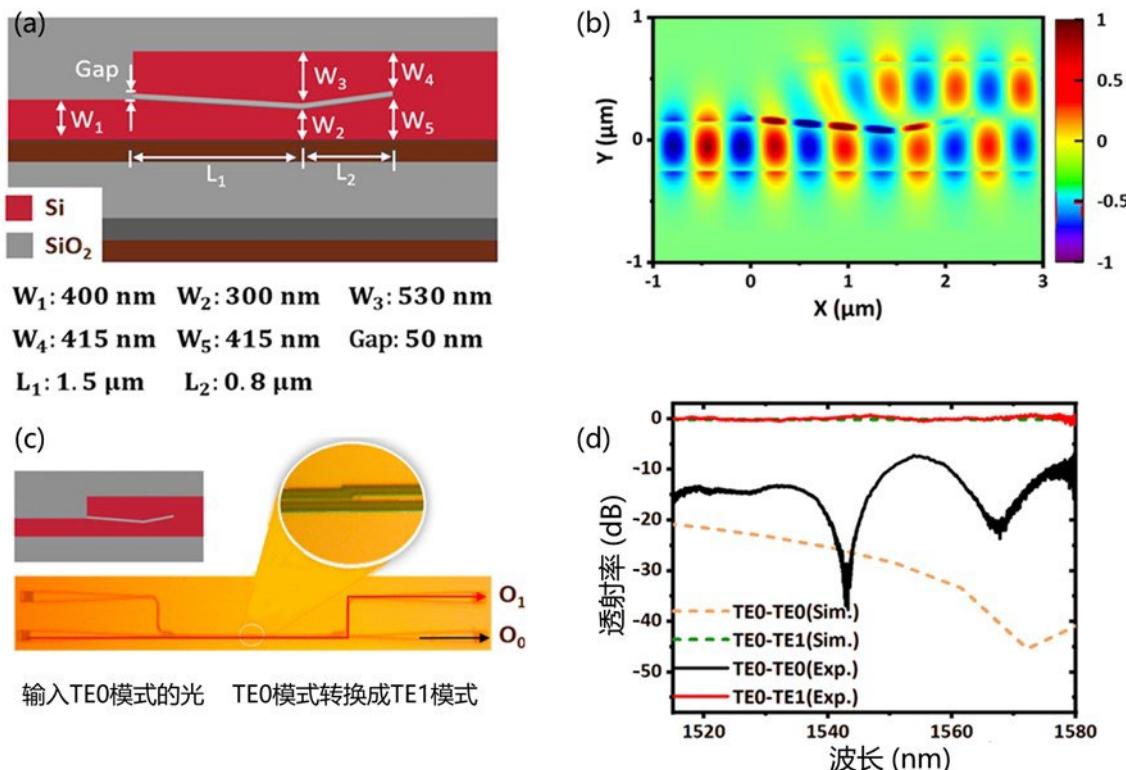


图 4.4-2 低损耗的  $\text{TE}_0$ - $\text{TE}_1$  模式转换器的 (a) 示意图, (b) 仿真电场  $y$  分量的分布情况, (c) 光学显微镜照片和 (d) 仿真和实验结果。

Fig. 4.4-2 The low loss  $\text{TE}_0$ -to- $\text{TE}_1$  mode converter (a) schematic diagram, (b) simulated electric field ( $E_y$ ) distribution, (c) optical microscope photo and (d) simulation and experimental transmission spectra.

此外, 这种设计也可以向更高阶的模式转换进行拓展, 图 4.4-3 (a, b) 展示了设计的  $\text{TE}_0$ - $\text{TE}_2$  模式转换器的示意图和 3D-FDTD 仿真的电场分布。图 4.4-3 (c) 展示了加工结构的光学显微镜示意图, 级联的模式(解)复用器可以把输出的  $\text{TE}_0$ ,  $\text{TE}_1$  和  $\text{TE}_2$  模式分别耦合到  $O_0$ ,  $O_1$  和  $O_2$  端口来进行测试。图 4.4-3 (d) 展示了仿真和实验测得的器件传输光谱, 可以看到在 1520 nm 到 1580 nm 的波长范围内, 仿真的器件损耗小于 0.22 dB, 串扰小于 -18 dB; 而在实验中传输的损耗小于 0.3 dB, 串扰小于 -9 dB。

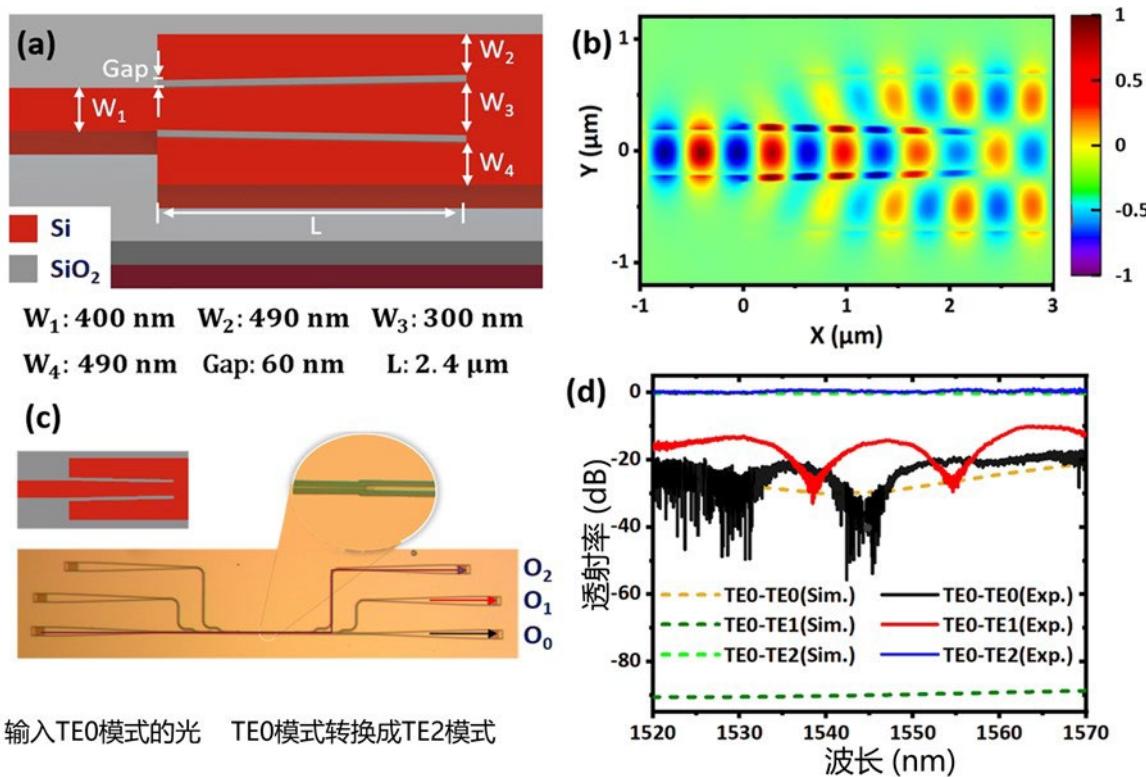


图 4.4-3 低损耗的  $\text{TE}_0$ - $\text{TE}_2$  模式转换器的 (a) 示意图, (b) 仿真电场  $y$  分量的分布情况, (c) 光学显微镜照片和 (d) 仿真和实验结果。

Fig. 4.4-3 The low loss  $\text{TE}_0$ -to- $\text{TE}_2$  mode converter (a) schematic diagram, (b) simulated electric field ( $E_y$ ) distribution, (c) optical microscope photo and (d) simulation and experimental transmission spectra.

进一步可以通过器件的级联来实现高阶模式的转换。图 4.4-4 展示了设计的双级  $\text{TE}_0$ - $\text{TE}_3$  模式转换器。由于两个反向的  $\text{TE}_1$  模式也可以合并产生一个  $\text{TE}_3$  模式, 一个类似的结构也可以级联在  $\text{TE}_0$ - $\text{TE}_1$  模式转换器之后来实现  $\text{TE}_0$ - $\text{TE}_3$  的模式转换。模式转换的总长度为  $7.4 \mu\text{m}$ 。通过 3D-FDTD 的方法仿真得到的电场分布结果如图 4.4-4 (b) 所示, 在器件的第一级, 输入的  $\text{TE}_0$  模式可以转换成  $\text{TE}_1$  模式; 而在器件的第二级, 输入的  $\text{TE}_1$  模式逐渐被塑形为两个反向的  $\text{TE}_1$  模式, 接着可以产生一个  $\text{TE}_3$  模式。仿真所得到的传输谱如图 4.4-4 (c) 所示, 可以看到器件在  $300 \text{ nm}$  的带宽范围内, 损耗和串扰分别小于  $0.83 \text{ dB}$  和  $-10 \text{ dB}$ 。由此可见, 这种方法可以有效地用于高阶模式转换器的设计。

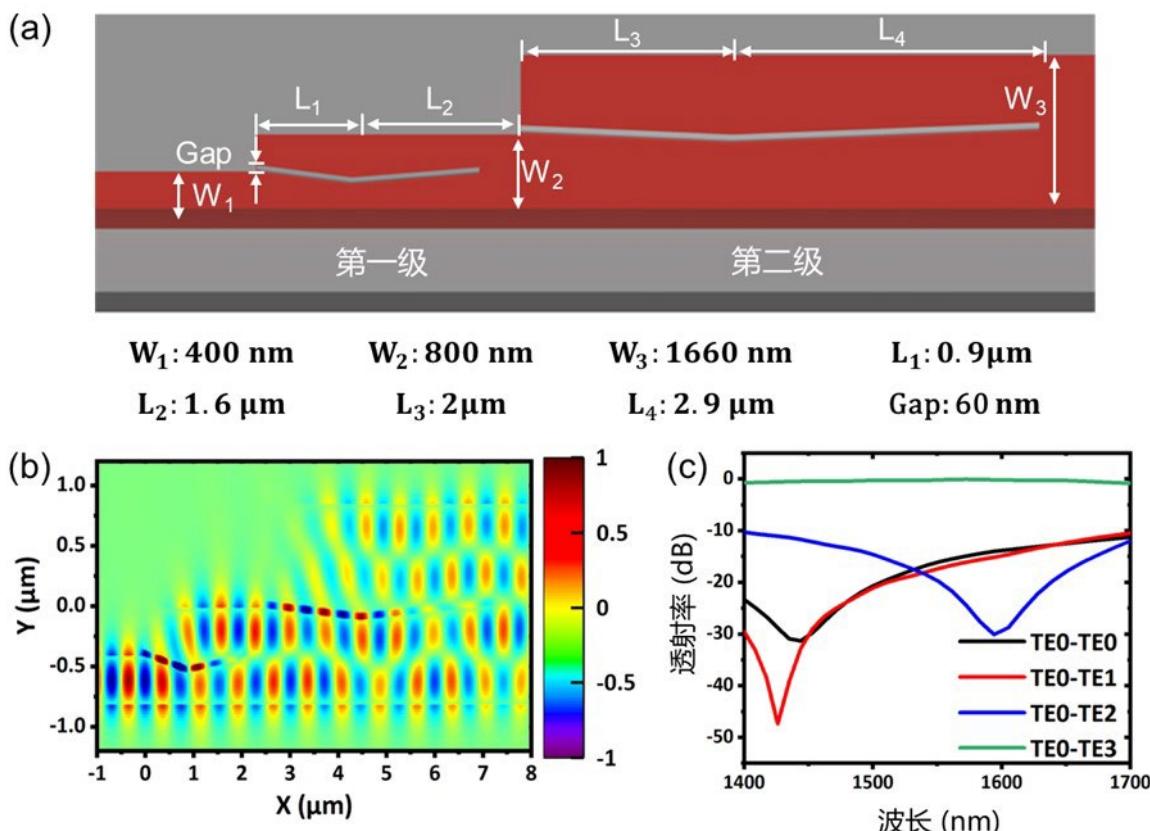


图 4.4-4 两级 TE<sub>0</sub>-TE<sub>3</sub> 模式转换器的 (a) 示意图, (b) 仿真电场  $E_y$  分量的分布情况, (c) 仿真频谱响应。

Fig. 4.4-4 The two-stage TE<sub>0</sub>-to-TE<sub>3</sub> mode converter (a) Schematic diagram, (b) simulated electric field ( $E_y$ ) distribution and (c) simulated transmission spectra.

#### 4.4.3 器件的性能比较

表 4.4-1 和表 4.4-2 分别比较了本文所设计的模式转换器、模式(解)复用器和其他文章报告器件的性能, 可以看出本文所设计的器件极大地减小了模式转换器的尺寸。这种超紧凑的器件设计对于高集成度的模分复用系统是重要的。测试得到的相对较大的串扰可能是由于加工误差所导致的谐振等因素所引起。

表 4.4-1 硅基片上模式转换器的性能比较

Table 4.4-1. Comparison of Some Experimentally Demonstrated Mode Converters

器件结构	耦合长度 ( $\mu\text{m}$ )	损耗 (dB)	串扰 (dB)	带宽 (nm)	器件功能
亚条形介质波导 <sup>[165]</sup>	2.635/2.27	2.1/1.37	-13.4/-12.6	45	TE <sub>0</sub> -to-TE <sub>1</sub> /TE <sub>2</sub>
相位梯度超构材料 <sup>[82]</sup>	5.75/6.736	<1	<-10	20	TE <sub>0</sub> -to-TE <sub>1</sub> /TE <sub>2</sub>
拓扑优化逆向设计 <sup>[223]</sup>	6.3	2	-12	43	TE <sub>0</sub> -to-TE <sub>1</sub>
逆向设计结构 <sup>[86]</sup>	4	<2.3	<-11.5	40	TE <sub>0</sub> -to-TE <sub>1</sub> & TM <sub>0</sub> -to-TM <sub>1</sub>
本工作	<b>2.3/2.4</b>	<b>0.5/0.3</b>	<b>-7/-9</b>	<b>50</b>	<b>TE<sub>0</sub>-to-TE<sub>1</sub>/TE<sub>2</sub></b>
本工作	<b>1.2</b>	<b>1.2</b>	<b>-6.3</b>	<b>20</b>	<b>TE<sub>0</sub>-to-TE<sub>1</sub></b>

表 4.4-2 硅基片上模式(解)复用器的性能比较

Table 4.4-2. Comparison of Some Experimentally Demonstrated Mode (De)Multiplexers

器件结构	尺寸 ( $\mu\text{m}^2$ )	损耗(dB)	串扰(dB)	带宽 (nm)
Y 形分束器 <sup>[224]</sup>	180 × 2	1.5	-19	90
亚波长光栅绝热耦合器 <sup>[225]</sup>	55 × 3	2.6	-18.8	130
非对称定向耦合器 <sup>[211]</sup>	50 × 1.3	0.3	-16	100
多模干涉仪 <sup>[226]</sup>	7.24 × 1.5	2	-15	50
逆向设计 <sup>[161]</sup>	3 × 2.4	1	-24	60
本工作	<b>1.8 × 1</b>	<b>0.5</b>	<b>-10</b>	<b>60</b>

## 4.5 本章小结

综上所述，本章节介绍了超紧凑模式转换器和模式(解)复用器的设计，并通过实验演示了器件尺寸仅为  $0.8 \times 1.2 \mu\text{m}^2$  的超紧凑的模式转换器和尺寸为  $1 \times 1.8 \mu\text{m}^2$  的模式(解)复用器，这是迄今为止尺寸最小的模式转换器和模式(解)复用器。此外，可以通过调整器件的结构来设计低损耗的模式转换器，本文通过实验演示了低损耗的 TE<sub>0</sub>-TE<sub>1</sub> 模式转换器和 TE<sub>0</sub>-TE<sub>2</sub> 模式转换器，他们具有较短的耦合长度 ( $<2.4 \mu\text{m}$ )，较低的损耗 ( $<0.5 \text{ dB}$ ) 和较大的带宽 ( $>50 \text{ nm}$ )。本文同时也验证了这种设计方法的可拓展性，通过仿真的方法，本文设计了一个两级的 TE<sub>0</sub>-TE<sub>3</sub> 模式转换器。本文所提出的设计方法可以提供一种设计多模光子学器件的有效方法，并且可以进

一步促进模分复用系统的发展，可以用于片上的通信。本章的两项主要工作分别收录在光学领域重要期刊 *Optics Letters* 和 2020 年国际顶级光通信会议“欧洲光通信会议”(ECOC, *European Conference on Optical Communications*) 中。

## 第五章 片上超构波长调控

波分复用技术可以为大容量通信系统提供可观的并行传输通道。尽管目前已经有很多方法来实现波分复用系统，但是器件潜在的实际应用可能由于器件较大的尺寸或有所妥协的性能而被忽视。近年来，超构材料辅助设计的硅基光电子器件不断地涌现，可以用来在亚波长尺度上控制控制片上的光传输，从而实现传统波导器件难以达到的紧凑的尺寸和丰富功能。在本章节中，通过实验的方法，使用亚波长尺度的超构材料结构，演示了超紧凑的波长（解）复用器。

### 5.1 研究背景

波分复用技术是进一步提高通信容量的最竞争力和最有效的方法之一。波分复用技术通过使用不同波长的光同时携带不同的信号，从而可以极大的提高系统的通信容量<sup>[227]</sup>。波长（解）复用器是波分复用系统的核心器件之一，主要用来复用和解复用信号<sup>[228]</sup>。

超构材料可以实现自然界中材料所不具备的光学特性，可以为硅基光电子器件领域提供一种变革性的技术手段<sup>[146]</sup>。成熟的硅基纳米加工技术可以在光子芯片上大规模地加工亚波长结构和器件，为控制波导中传导的电磁波提供了有效的手段<sup>[145]</sup>。

这一章节介绍了一种利用二维介质超构材料波导的方式来实现多通道波长（解）复用器的方法。设计的超构材料赋能的波长（解）复用器在多模波导上刻蚀了多排浅刻蚀的阵列介质孔，并且设计了沿传播过程的相位梯度。这些设计好的介质孔可以在不同波长处，把输入的基模反射到各个高阶模式中，然后通过级联的模式（解）复用器，把各个波长的光（解）复用到各个通道中。为了证明这种方法的有效性，本文首先演示了具有两排介质孔的器件可以在特定的波长通道把输入的 TE<sub>0</sub> 模式耦合到反向传输的 TE<sub>1</sub> 模式中，然后为了验证这种方法的可扩展性，演示了两个和四个波长通道的（解）复用器。通过增加介质孔阵列的排数，可以增加反射的高阶模式数目，从而可以在设计的通道实现高阶模式的控制。通过这种方法，本文提出了一种新颖的超构材料赋能的多通道波长（解）复用器设计方法。和基于传统波导设计的方法相比，这种方法提供了一个超紧凑的器件设计路径，在提高通道数目的同时可以不增加耦合长度。最后，设计的单通道、双通道和四通道波长（解）复用器的尺寸分别为  $1.5 \times 95 \mu\text{m}^2$ 、 $2 \times 150 \mu\text{m}^2$  和  $2.5 \times 250 \mu\text{m}^2$ 。这些器件的性能也具有竞争力，尤其是其具有方形的光谱形状，可以自由设计的工作波长和带宽，这为片上高密度多功能波分复用光学系统提供了一种可行的方案。

## 5.2 原理和设计

图 5.2-1 展示了设计的(解)复用器的原理示意图, 以及器件的俯视图和侧视图。器件是基于 SOI 平台进行的设计, 具有 220 nm 厚的顶层硅。每一个结构都包括一个多模波导、多模波导上装饰的超构材料, 以及基于非对称定向耦合器设计的模式(解)复用器。设计的超构材料可以给反射的光提供干涉相长的条件以及沿传播方向上合适的相位梯度, 从而可以在特定的波长激发出特定的模式。对于如图 (a, i) 的结构来说, 输入的以 TE<sub>0</sub> 模式传输的光会在特定的波长上被反向耦合到 TE<sub>1</sub> 模式中, 然后通过后续的模式(解)复用器被耦合到 O<sub>1</sub> 端口上。与此类似, 对于图 (a, ii) 的结构来说, 输入的光会在两个不同的波长上反射为 TE<sub>1</sub> 和 TE<sub>2</sub> 模式, 然后耦合到两个不同的端口; 对于图 (a, iii) 中的结构来说, 输入的光会在四个不同的波长上分别反射为 TE<sub>1</sub>、TE<sub>2</sub>、TE<sub>3</sub> 和 TE<sub>4</sub> 模式, 然后分别耦合到 O<sub>1</sub>、O<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 和 O<sub>4</sub> 端口, 从而实现多波长(解)复用器的效果。

根据第二章所介绍的耦合模理论, 电介质微扰可以等效的使用耦合系数  $\kappa$  来描述, 假设引入  $\kappa$  的数学表达式为:

$$\kappa_{mn}(z) = \kappa'_{mn} e^{-i\delta z}, \quad (5.2-1)$$

其中  $\kappa_{mn}$  是  $m$  阶模式和  $n$  阶模式之间的耦合系数,  $\delta$  取决于介质微扰的周期, 其数学表达式为  $\delta = 2\pi/\Lambda$ 。当参数  $\delta$  可以补偿前向传输的  $m$  阶模式和向后传输的  $n$  阶模式时, 这两个模式之间就可以彼此发生耦合。这个状态也被称为“相位匹配条件”, 其数学表达式为<sup>[162]</sup>:

$$\beta_m - (-|\beta_n|) - \delta = 0, \quad (5.2-2)$$

简言之, 为了实现模式之间的转换, 需要引入特定的超构材料的设计, 这种超构材料可以通过耦合系数和超构材料折射率分布之间的映射来进行设计。

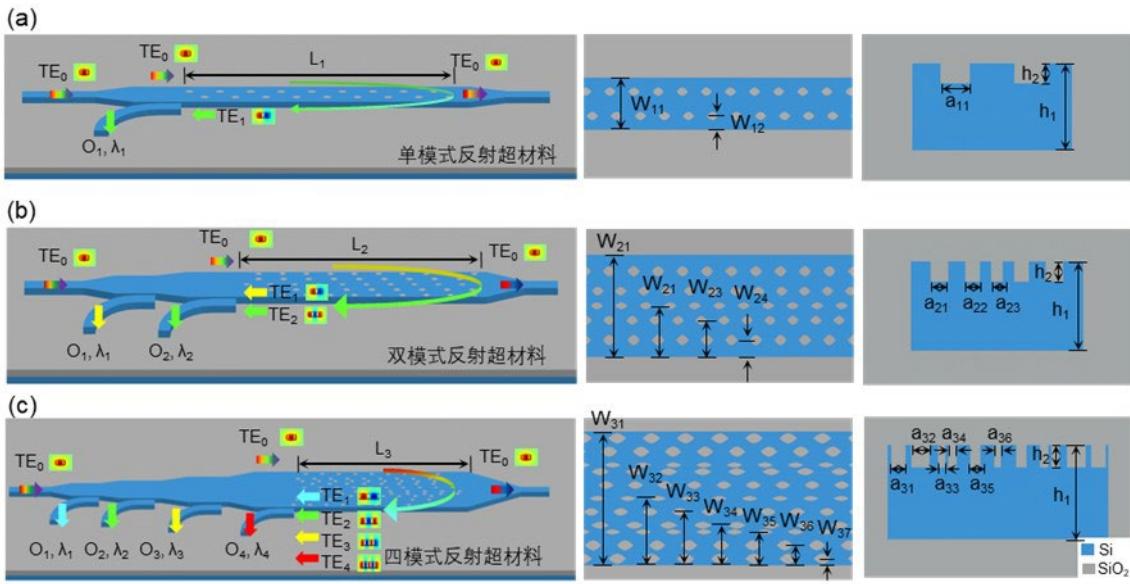


图 5.2-1 波长 (解) 复用器的 (a) 原理示意图, (b) 俯视图和 (c) 侧视图。其中 (i) ~ (iii) 代表了超构材料赋能的单通道、双通道和四通道的波长 (解) 复用器。

Fig. 5.2-1 (a) Schematics of the wavelength (de)multiplexers composed of a perturbed waveguide and a cascaded mode (de)multiplexer. (b) Top and (c) lateral views of the metamaterials composed of parallel dielectric hole arrays patterned on multimode waveguides. Panel (i)~(iii) represent the metamaterial-enabled one-, two-, and four-channel wavelength (de)multiplexers.

图 5.2-2 展示了电介质超构材料的俯视图和对应的计算得到的耦合系数, 图中的标注  $\kappa_{ij}$  代表了  $TE_i$  模式和  $TE_j$  模式之间的耦合系数。对于如图 5.2-2 (a) 所示的只有一种模式反射的情况,  $\kappa_{01}$  是一个沿传播方向上周期为  $\Lambda_{11}$  的周期函数。当点介质孔引入的耦合系数满足相位匹配条件时, 向前传输的  $TE_0$  模式会完全地耦合到向后传输的  $TE_1$  模式中。此外, 基于反向耦合的滤波器通常会具有较强的旁瓣, 为了抑制这些旁瓣, 可以使用基于纵向偏移的切趾方法。具体来说, 就是对这些微扰在纵向上提供一个交错位移, 将上下两种微扰之间的交叠调制为沿着传播方向  $z$  上的高斯函数<sup>[229]</sup>。切趾指数为  $c_{11}$  的纵向交错位移  $\Delta s_{11}$  具有如下的数学表达式:

$$\Delta s_{11} = \frac{\Lambda_{11}}{2} \exp(-c_{11}(z - 0.5L_1)^2/L_1^2), \quad (5.2-3)$$

由于这种切趾方法在纵向上是彼此互补的, 因此可以避免相位的错误, 从而可以维持反射的中心波长不变, 使得反射的光谱会具有较陡峭的曲线<sup>[230,231]</sup>。

接着把这种方式拓展到了多个波分复用通道的设计中。这里，多种周期的介质刻蚀孔可以映射到多种周期的耦合系数曲线上，从而同时满足多种模式的相位匹配条件。

图 5.2-2 (b) 展示了用于两种高阶模式反射的超构材料的俯视图，以及其对应的模式耦合系数  $\kappa_{01}$  和  $\kappa_{02}$ 。可以看到，两周不同的耦合系数是两个彼此独立的周期函数，具有不同的周期  $\Lambda_{21}$  和  $\Lambda_{22}$ ，它们分别决定了 TE<sub>1</sub> 模式和 TE<sub>2</sub> 模式反向耦合的工作波长。在这里，两种不同的周期孔阵列被用来构造此种超构材料，一种是具有两排介质刻蚀孔的整列，具有周期  $\Lambda_{21}$ ，可以用于 TE<sub>1</sub> 模式的反射。另一种是具有三排介质孔阵列的结构，具有周期  $\Lambda_{22}$ ，可以用于 TE<sub>2</sub> 模式的反射。TE<sub>1</sub> 模式和 TE<sub>2</sub> 模式的耦合可以分别通过调整这两种不同的超构材料介质微扰来进行调控。此外也采用了类似的切趾方法，其纵向交错  $\Delta S_{21}$  和  $\Delta S_{22}$  被分别调控，且切趾指数分别为  $c_{21}$  和  $c_{22}$ ，具有如下的数学表达式：

$$\begin{aligned}\Delta S_{21} &= \frac{\Lambda_{21}}{2} \exp(-c_{21}(z - 0.5L_2)^2/L_2^2) \\ \Delta S_{22} &= \frac{\Lambda_{22}}{2} \exp(-c_{22}(z - 0.5L_2)^2/L_2^2),\end{aligned}\quad (5.2-4)$$

这些结构和计算得到对应的耦合系数也同样可以用于四种模式同时的反射。

对于四模式反射超构材料波导来说，其包括了四组电介质刻蚀孔阵列，四种介质孔阵列的周期分别是  $\Lambda_{31}$ ,  $\Lambda_{32}$ ,  $\Lambda_{33}$ , 和  $\Lambda_{34}$  可以分别用来支持 TE<sub>1</sub>, TE<sub>2</sub>, TE<sub>3</sub> 和 TE<sub>4</sub> 的模式反射。根据耦合模理论，其计算出的耦合系数如图 5.2-2 (c) 所示，尽管计算出的耦合系数并不是严格的周期函数，多模反射的相位匹配条件依然可以被满足。

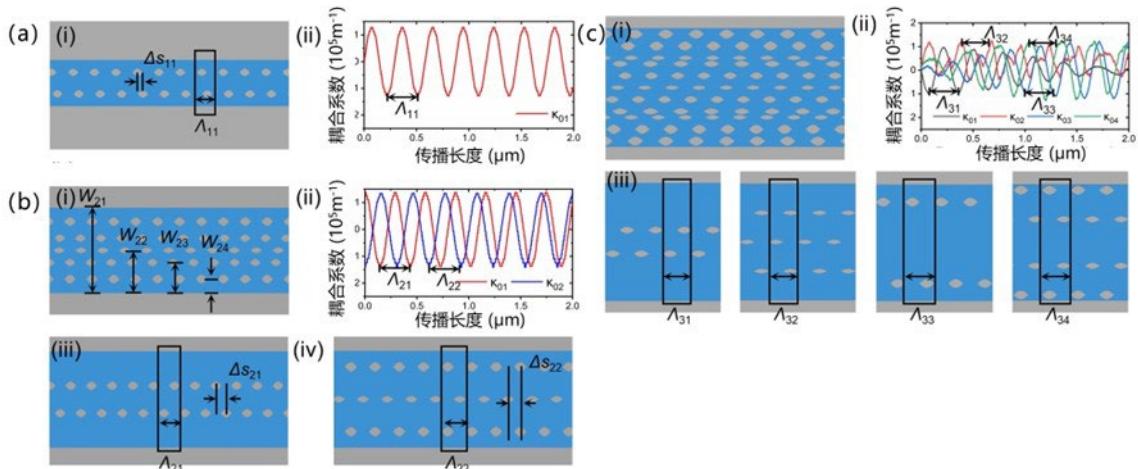


图 5.2-2 超构材料波导结构的俯视图及对应的耦合系数：(a) 超构材料赋能的单通道波长（解）复用器，(b) 双通道波长（解）复用器和(c) 四通道波长（解）复用器。

Fig. 5.2-2 (a) (i) The top view and (ii) corresponding calculated coupling coefficients of the metamaterial for one-mode reflection. (b) (i) The top view and (ii) coupling coefficients for two-mode reflections, which consists of the hole arrays for (iii) the TE<sub>1</sub> mode reflection, and (iv) the TE<sub>2</sub> mode reflection. (c) (i) The top view and (ii) coupling coefficients for four-mode reflections, which consists of (iii) four groups of hole arrays for TE<sub>1</sub>, TE<sub>2</sub>, TE<sub>3</sub>, and TE<sub>4</sub> mode reflections respectively.

接着使用了三维的时域有限差分法（3D-FDTD）来对器件的结构进行仿真，器件不同通道的工作波长可以通过改变不同组介质孔的周期来分别进行控制，器件工作的带宽可以通过介质孔的大小和深度分别进行控制。这里设计依据 ITU-T G.694.2，参考了粗波分复用的标准，不同通道之间的间隔为 20 nm。在设计中，顶层硅的厚度为 220 nm，浅刻蚀的介质孔的深度为 40 nm，从而可以实现一个合适的耦合强度。这些器件的波导宽度分别为 0.85 μm, 1.2 μm 和 2 μm，从而支持所需的多种高阶模式。其中每个刻蚀槽的上下弧被设置为半正弦函数的形状，从而可以提供一个合适的耦合系数的形状。表格 5.2-1 展示了设计的超构材料波导结构的参数。

表 5.2-1 设计的超构材料波导的几何参数

Table 5.2-1. Geometric parameters of the designed metamaterials

参数的图例名称（见图 5.2-1）：参数的长度 [参数的单位]

$L_1:$ 188 $\mu\text{m}$	$w_{11}:$ 0.85 $\mu\text{m}$	$w_{12}:$ 225nm	$a_{11}:$ 150nm	$h_1:$ 220nm	$h_2:$ 40nm	$\Lambda_{11}:$ 314nm		
$L_2:$ 100 $\mu\text{m}$	$w_{21}:$ 1.2 $\mu\text{m}$	$w_{22}:$ 600nm	$w_{23}:$ 430nm	$w_{24}:$ 200nm	$a_{21}:$ 120nm	$a_{22}:$ 125nm	$a_{23}:$ 80nm	$\Lambda_{21}:$ 296nm
$L_3:$ 200 $\mu\text{m}$	$w_{31}:$ 2 $\mu\text{m}$	$w_{32}:$ 1 $\mu\text{m}$	$w_{33}:$ 800nm	$w_{34}:$ 600nm	$w_{35}:$ 500nm	$w_{36}:$ 300nm	$w_{37}:$ 100nm	$a_{31}:$ 150nm
	$a_{33}:$ 70nm	$a_{34}:$ 70nm	$a_{35}:$ 110nm	$a_{36}:$ 70nm	$\Lambda_{31}:$ 275nm	$\Lambda_{32}:$ 284nm	$\Lambda_{33}:$ 298nm	$\Lambda_{34}:$ 318nm

图 5.2-3 和图 5.2-4 分别展示了光在设计的超构材料波导中传输的能量分布和反射光谱。图 5.2-3 (a) 展示了对于只有一种模式反射的条件下，不同波长下的能量分布情况。在波长为 1550 nm 时，此时相位匹配条件满足，输入的 TE<sub>0</sub> 模式会耦合到反向传播的 TE<sub>1</sub> 模式中。而在其他的波长下，如波长为 1570 nm 时，此时相位匹配条件未满足，输入的光会直接通过超构材料波导。图 5.2-4 (a) 展示了其反射光谱的情况，它具有较平的顶部并且损耗小于 0.25 dB，并且旁瓣抑制比 (SLSR, Sidelobes Suppress Ratio) 大约为 20.9 dB，切趾指数  $c_{11}$  为 15。

图 5.2-3 (b) 和图 5.2-4 (b) 展示了对于有两种高阶模式被反射时，光场的传播情况和对应的反射光谱。输入的 TE<sub>0</sub> 模式的光会在 1570 nm 处传播通过超构材料波导，而在波长为 1550 nm 和 1530 nm 时分别被反射耦合到 TE<sub>1</sub> 和 TE<sub>2</sub> 模式中。器件的切趾指数  $c_{21} = c_{22} = 10$ ，仿真损耗小于 1 dB 而旁瓣抑制比大于 19 dB，通道间串扰小于 -30 dB。

类似地，图 5.2-3 (c) 和图 5.2-4 (c) 展示了四模式反射超构材料波导中的光场能量分布情况和光谱响应，当输入的光波长为 1510 nm 时，其直接通过超构材料波导；而当输入的光波长为 1530 nm, 1550 nm, 1570 nm 和 1590 nm 时，输入的光会分别反射到 TE<sub>1</sub>, TE<sub>2</sub>, TE<sub>3</sub> 和 TE<sub>4</sub> 模式中，反射光谱显示器件的损耗小于 0.8 dB，通道间串扰小于 -25 dB。

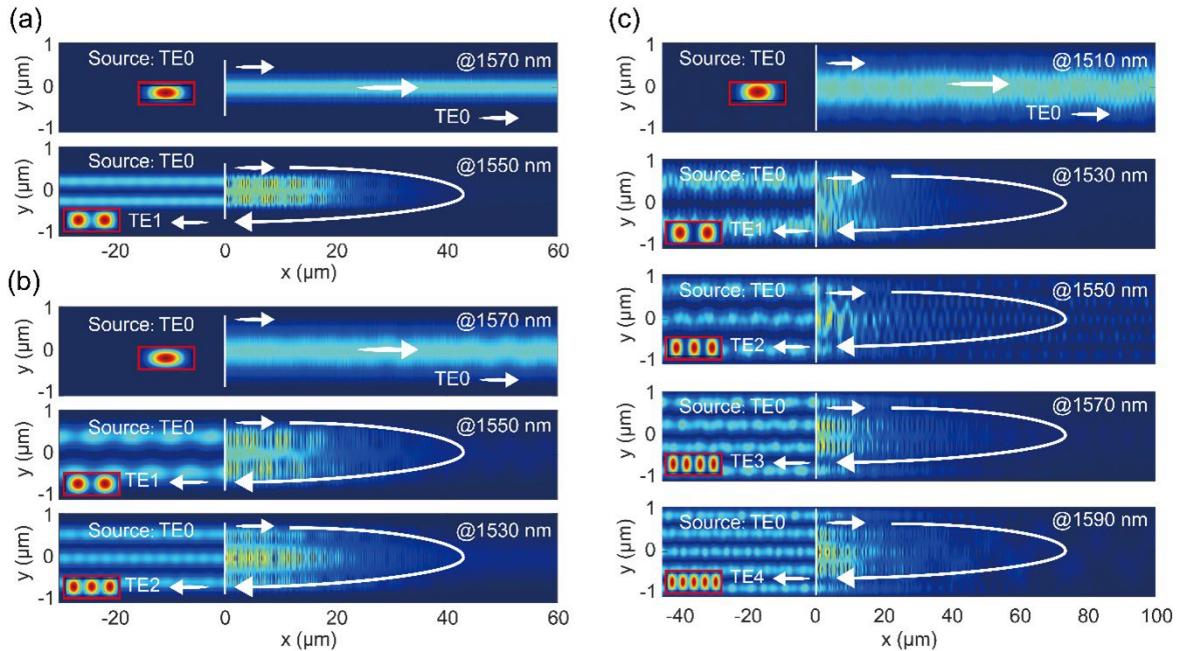


图 5.2-3 单模式, 双模式和四模式的超构材料波导, 不同波长下仿真光场分布图。

Fig. 5.2-3 Simulated light propagation at different wavelengths of the metamaterial-enabled (a) one-mode, (b) two-mode, and (c) four-mode reflections in the wavelength (de)multiplexers.

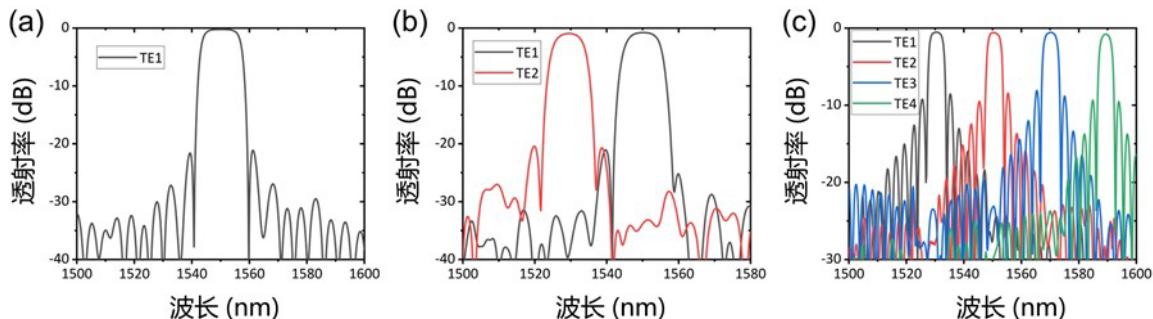


图 5.2-4 (a) 单模式、(b) 双模式、(c) 四模式反射超构材料仿真光谱响应。

Fig. 5.2-4 Simulated reflection spectra of the metamaterial-enabled (a) one-mode, (b) two-mode, and (c) four-mode reflections in the wavelength (de)multiplexers.

### 5.3 加工和测试

所设计的超构材料赋能的波分复用器件在标准的 SOI 平台进行了加工, 器件具有 220 nm 的顶层硅。芯片通过电子束曝光和电感耦合等离子体刻蚀的方法进行了加工, 并且通过电感耦合等离子体化学气象沉积的方法覆盖了 1 μm 厚的氧化硅层。接

着采用了光功率计（Santec MPM210）和波长可调激光器（Santec TSL770）对器件进行了测试。我们采用了光栅耦合器的方式，将光从光纤中耦合到波导里面，然后通过级联的模式（解）复用器把反向传播的模式耦合到不同的波导通道中。

图 5.3-1 展示了所加工的器件的显微镜照片和在不同输出端口所测量得到的光谱信号。其中光谱信号通过加工在同一个芯片上的光栅耦合器进行了归一化。图 5.3-1 (a, i) 展示了超构材料赋能的单通道波长（解）复用器的结构，在中心波长为 1550 nm 的附近，可以看到，输入的 TE<sub>0</sub> 模式被反射并耦合到 Ch1 端口。在 Thru 端口测试到的光谱信号如图 5.3-1 (b, i) 所示。器件的插入损耗小于 1.5 dB，这个损耗大于仿真的 0.2 dB，这是由于所级联的模式（解）复用器会引入额外的损耗。器件测试得到的 3 dB 带宽为 18.1 nm，旁瓣抑制比为 21 dB。

图 5.3-1 (a, ii) 展示了双通道的波长（解）复用器器件。输入的 TE<sub>0</sub> 模式的光在 1520 nm 和 1540 nm 处分别耦合到 TE<sub>1</sub> 和 TE<sub>2</sub> 模式，通道间隔为 20 nm。器件的带宽大约为 13.2 nm 而插入损耗小于 1.2 dB。其中不同通道间的串扰大约为 -19.2 dB 而旁瓣抑制比大于 16.5 dB。对于如图 5.3-1 (a, iii)，具有四种反射模式的超构材料来说，输入的 TE<sub>0</sub> 模式可以在 1520 nm, 1540 nm, 1560 nm 和 1580 nm 处分别被反射到 TE<sub>1</sub>, TE<sub>2</sub>, TE<sub>3</sub> 和 TE<sub>4</sub> 模式中，接着被耦合到 Ch1, Ch2, Ch3 和 Ch4 四个不同的端口，器件的损耗小于 2 dB 并且通道间的串扰小于 -14.3 dB。这些实验结果和仿真结果符合的较好，除了器件的带宽和工作的中心波长有所偏移，这可能是由于加工过程中介质刻蚀孔的深度和波导宽度出现了偏移。这些器件的性能可以通过进一步优化加工工艺得到提高。

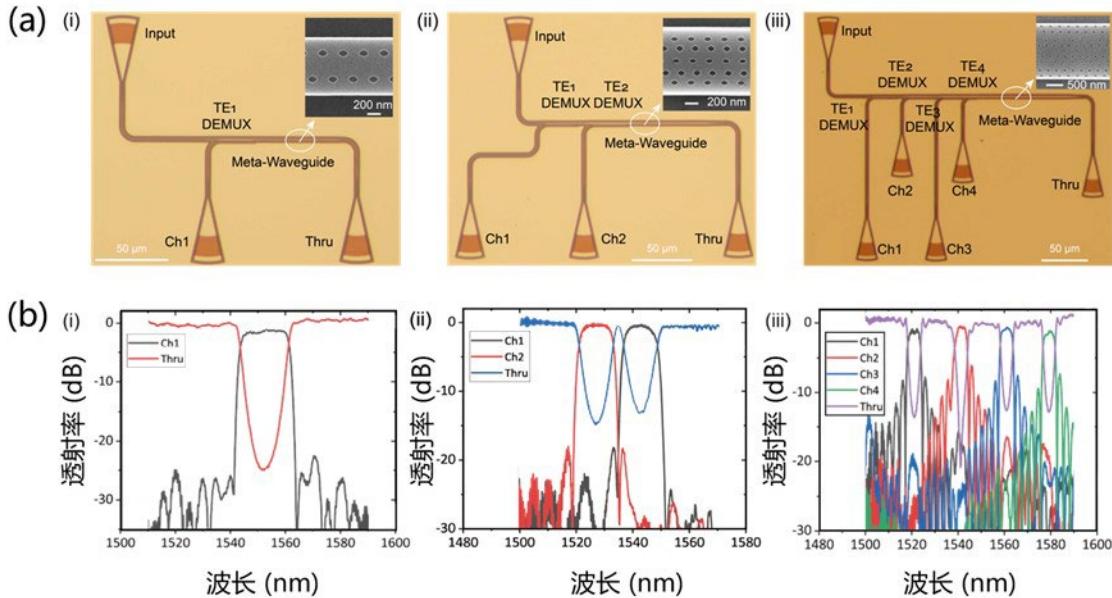


图 5.3-1 (a) 加工器件的光学显微镜和扫描电子显微镜照片和 (b) 不同端口测试的光谱响应。

Fig. 5.3-1 (a) The optical microscope and scanning electron microscope (SEM) photos of the fabricated devices and (b) the measured responses at different ports. Panel (i)~(iii) represents the metamaterial-enabled one-, two-, and four-channel wavelength (de)multiplexers.

## 5.4 讨论和分析

### 5.4.1 性能比较

表 5.4-1 总结了现今报道的实验验证的粗波分复用滤波器的主要性能指标。从中可以看出本文的工作可以在并不过多影响器件性能的前提下，极大地减小器件的尺寸。本文的实验结果展示了一个超紧凑的四通道波分复用滤波器，其尺寸为  $2.5 \times 250 \mu\text{m}^2$ ，通道带宽为 5.6 nm，突破了器件尺寸受到的带宽和耦合长度制约关系的限制。此种波分复用的方案可以通过引入更多的点介质刻蚀孔更高阶的模式，来进一步的扩展到更多的信道。此外，此种超构材料赋能的波分（解）复用器可以通过级联的方式来实现更多的通道数目。

表 5.4-1 CWDM 波长（解）复用器的性能比较

Table 5.4-1. Performance of some state-of-the-art CWDM (de)multiplexers.

参考文献	结构	通道数	损耗 [dB]	串扰 [dB]	面积 [ $\mu\text{m}^2$ ]	带宽 [nm]
[112]	阵列波导光栅	4	~5	~25	$550 \times 3900$	~5
[232]	多模干涉仪	4	~2	~15	$12 \times 1210$	~8.5
[89]	马赫-曾德尔干涉仪	4	~1	~18	$100 \times 300$	~16
[136]	光栅辅助反向耦合器	4	~1	~11	$2 \times 600$	~12
[135]	多模波导布拉格光栅	4	~1	~18	$40 \times 600$	~15
本工作	超构材料波导	1	1.5	-	<b>1.5 × 95</b>	<b>18.1</b>
本工作	超构材料波导	2	1.2	19.2	<b>2 × 150</b>	<b>13.2</b>
本工作	超构材料波导	4	2	14.3	<b>2.5 × 250</b>	<b>5.6</b>

#### 5.4.2 超构材料结构对波长（解）复用器性能的影响

##### 通道工作波长

这里讨论超构材料对通道中心波长的影响。电介质刻蚀孔的周期可以分别独立地控制通道的工作波长:  $\Lambda = \lambda/(n_m + n_n)$ 。这里以超构材料赋能的四通道波长解复用器为例, 四模式反射超构材料包括了四组介质孔, 每组的周期分别为  $\Lambda_{31}$ 、 $\Lambda_{32}$ 、 $\Lambda_{33}$ 、 $\Lambda_{34}$ , 分别用来反射不同的模式。这里, 为了演示电介质刻蚀孔周期对波长（解）复用器的影响, 分析了  $\Lambda_{32}$  的变化对波长解复用器通道 2 的影响。将  $\Lambda_{32}$  分别设置为 284 nm, 287 nm, 290 nm, 293 nm 和 296 nm, 并固定其他参数。图 5.4-1 展示了不同参数下的仿真光谱, 可以看出通道 2 的中心波长随着  $\Lambda_{32}$  的变化而随之改变, 通道 2 的中心波长分别大约在 1540 nm, 1551 nm, 1562 nm 和 1573 nm, 和 1584 nm 处。工作波长随着  $\Lambda_{32}$  的增大而展现出红移的特性, 并且其他的通道保持没有移动。同时值得一提的是, 当两个通道之间存在一定程度的交叠时, 如图 5.4-1 (c-e) 所示, 输入的基模会根据输入光的波长以不同的比例被反射到这些高阶模式中。这一特性有助于抑制旁瓣, 相比传统的级联方法, 可以减小邻近通道之间的串扰。以图 5.4-1 (c) 中的情况为例, 更多的功率耦合到 1560 nm 处的 TE<sub>2</sub> 通道, 留给 TE<sub>3</sub> 通道的剩余功率就越少。因此, 在目标波长 (1560 nm) 处抑制了 TE<sub>3</sub> 通道的旁瓣, 从而降低了通道 2 和通道 3 之间的通道串扰。

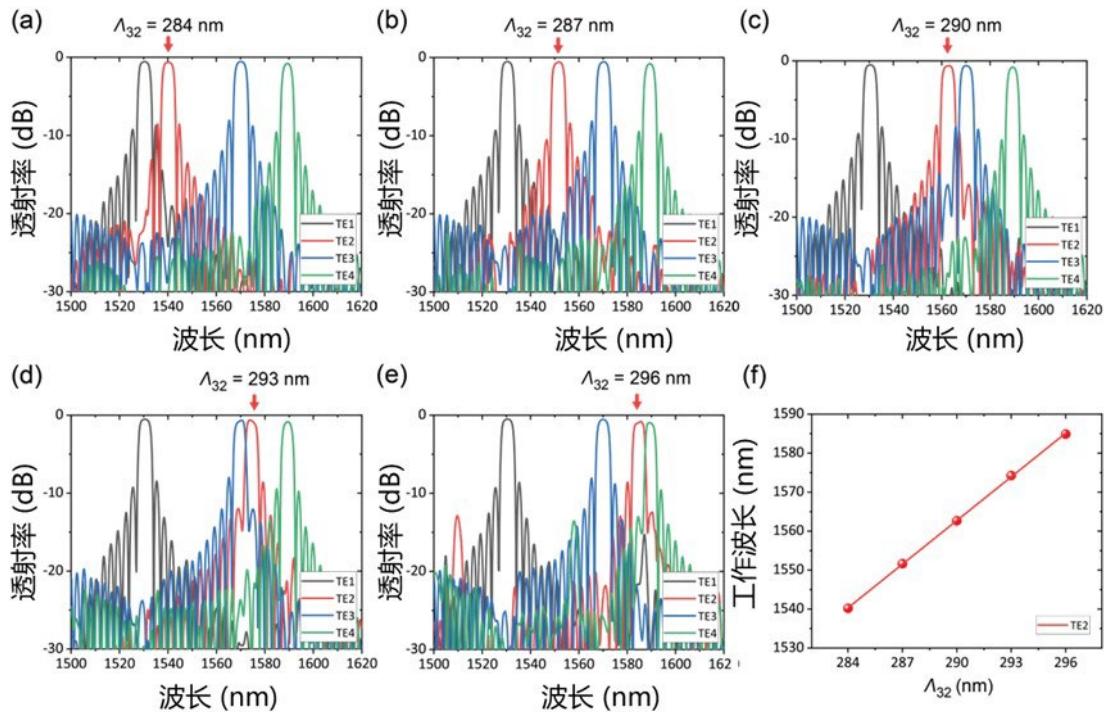


图 5.4-1 (a ~ e) 当其他参数固定, 改变  $\Lambda_{32}$  时各反向传播模式的仿真光谱, (f) 通道中心波长随微扰周期  $\Lambda_{32}$  的变化情况。

Fig. 5.4-1 Simulated spectra of each backward-propagating modes with fixed other parameters and different  $\Lambda_{32}$ , i.e., (a)  $\Lambda_{32} = 284$  nm, (b)  $\Lambda_{32} = 287$  nm, (c)  $\Lambda_{32} = 290$  nm, (d)  $\Lambda_{32} = 293$  nm, and (e)  $\Lambda_{32} = 296$  nm. (f) Central wavelength shift with the perturbation period  $\Lambda_{32}$ .

### 通道带宽

这里讨论超构材料(刻蚀深度和介质孔直径)如何影响通道的工作带宽。电介质刻蚀孔的分布可以通过耦合系数来描述其对工作带宽的影响, 其工作带宽可以被表达为:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\pi n_g} \sqrt{\kappa^2 + \frac{\pi^2}{L^2}}, \quad (5.4-1)$$

以四通道波长(解)复用器为例, 将刻蚀孔的深度设置为 10 nm 至 60 nm 的范围内分别进行仿真, 耦合系数  $\kappa$  逐渐增加, 从而使所有通道的操作带宽增加。每个反向传播模式的模拟光谱响应如图 5.4-2 所示。当蚀刻孔更深时, 耦合系数会更大, 从而导致更宽的带宽。不同蚀刻深度的通道带宽分别约为 1.5 nm、3.3 nm、4.9 nm、5.4 nm、7.3 nm 和 9.4 nm。由于较小的蚀刻孔也会导致反射强度较弱, 因此需要更长的耦合

长度以确保足够的反射效率。所以这里的耦合长度分别为 400  $\mu\text{m}$ 、300  $\mu\text{m}$ 、125  $\mu\text{m}$ 、100  $\mu\text{m}$  和 60  $\mu\text{m}$ 。

此外还可以通过改变介质刻蚀孔直径来操控通道带宽，这种方法可以用于单独控制通道的操作带宽。例如，四通道波长（解）复用器由四组刻蚀孔组成，每个单独的刻蚀孔的顶部和底部弧被定义为半正弦函数，从而对应着具有适当的振幅和周期的耦合系数。在这里仅改变 TE<sub>2</sub> 模式反射的蚀刻孔直径，保持其他参数不变，每个反向传播模式的仿真光谱显示在图 5.4-3 中。TE<sub>2</sub> 通道的操作带宽将根据蚀刻孔直径的增大而增加，而其他通道的带宽将保持不变。对于直径  $a_2$  设置为 50 nm、70 nm、90 nm 和 110 nm 时，通道 2 的 3 dB 带宽分别为 3.9 nm、5.2 nm、6.1 nm 和 6.4 nm。

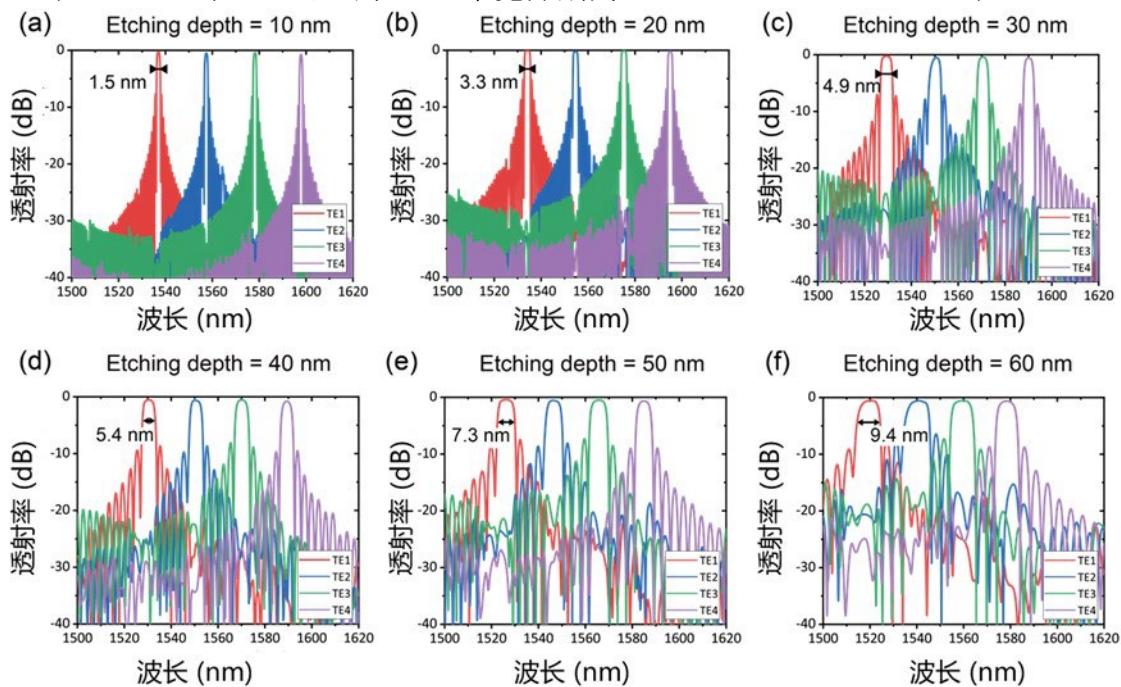


图 5.4-2 当其他参数固定，改变刻蚀孔深度时各反向传播模式的仿真光谱。

Fig. 5.4-2 Simulated responses of the metamaterial-enabled four-mode reflections with different perturbation depths and perturbed waveguide lengths: (a) etching depth = 10 nm, coupling length = 400  $\mu\text{m}$ ; (b) etching depth = 20 nm, coupling length = 300  $\mu\text{m}$ ; (c) etching depth = 30 nm, coupling length = 125  $\mu\text{m}$ ; (d) etching depth = 40 nm, coupling length = 100  $\mu\text{m}$ ; (e) etching depth = 50 nm, coupling length = 80  $\mu\text{m}$  and (f) etching depth = 60 nm, coupling length = 60  $\mu\text{m}$ .

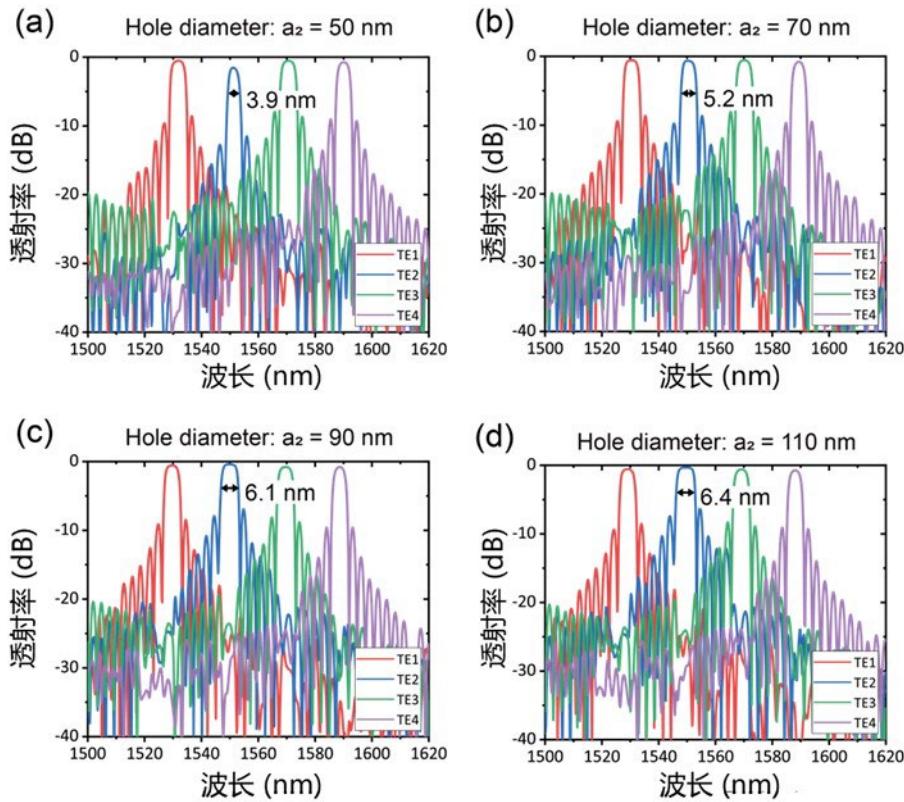


图 5.4-3 当其他参数固定，改变刻蚀孔直径  $a_2$  时各反向传播模式的仿真光谱。

Fig. 5.4-3 Simulated spectra of each backward-propagating mode with different hole diameters of the etching holes for TE<sub>2</sub> mode reflection.

### 5.4.3 模式解复用器的设计

这里提供设计级联模式（解）复用器的具体方法。图 5.4-4 展示了基于非对称定向耦合器的模式解复用器的示意图，器件用于将以不同模式在多模波导中传输的光耦合到不同的波导通道中。图 5.4-5 展示了当波导宽度变化时，TE<sub>0</sub>~TE<sub>4</sub> 模式有效折射率的变化。为了进一步实现高效的模式耦合，需要满足不同波导之间的相位匹配条件：在多模波导中的高阶模式和在子波导中基模的有效折射率需要相等。在这种情况下，如果高阶模式的信号在多模波导中传播时，一个高效的 TE<sub>0</sub> 模式的信号会在子波导中生成。TE<sub>1</sub>, TE<sub>2</sub>, TE<sub>3</sub> 模式解复用器基于传统的非对称定向耦合器的结构，而 TE<sub>4</sub> 模式解复用器基于亚波长光栅波导的结构。由于 TE<sub>4</sub> 模式有效折射率对波导宽度的依赖和基模对波导宽度的依赖关系有所不同，也由此波导宽度的变化对器件性能的影响较大，从而两个模式之间的耦合可能会较容易不满足相位匹配关系。这也是采用传统非对称定向耦合器来实现高阶模式的解复用器较为困难的原因。为了解决

这一问题，一种解决方案是采用亚波长光栅波导来取代传统的矩形波导。亚波长光栅波导是一种周期性的结构，工作时类似于具有均匀折射率的材料。亚波长光栅波导的折射率可以通过调整光栅的占空比进行控制。通过改变亚波长光栅波导的宽度和占空比，能够控制传播模式的有效折射率和其对波导宽度的依赖关系。接着计算了占空比为 0.68 的情况下，波导宽度和模式有效折射率之间的关系，如图 5.4-5 所示。可以看出，由矩形波导所支持的 TE<sub>4</sub> 模式和由亚波长光栅波导所支持的 TE<sub>0</sub> 模式具有相似的波导宽度依赖关系，这也意味着，当波导宽度发生轻微变化时，两个波导模式之间的有效折射率变化的速度是一样的，从而可以继续满足相位匹配条件。

此外，两个不同波导之间的间隔和他们之间的耦合长度可以通过 3D-FDTD 的迭代方法来进行优化。绝热耦合的锥形波导具有 0.8° 的角度，被用来缓慢连接不同的多模波导。亚波长光栅波导的周期被设置为 300 nm，从而满足亚波长条件，初始波导的宽度被设置为 0.45 μm，从而满足单模传输的条件，并且保持一个较低的传输损耗。

设计的模式（解）复用器通过 3D-FDTD 进行了仿真，仿真得到的能量分布如图 5.4-6 所示。子图展示了入射和出射的模场分布情况。这里耦合损耗定义为：

$$\text{Coupling loss} = 10 \log \frac{P_o}{P_i}, \quad (5.4-2)$$

其中  $P_o$  是在子波导出射端口的能量，而  $P_i$  是在多模波导入射端口的能量，不同模式的耦合损耗如图 5.4-6 (b) 所示。

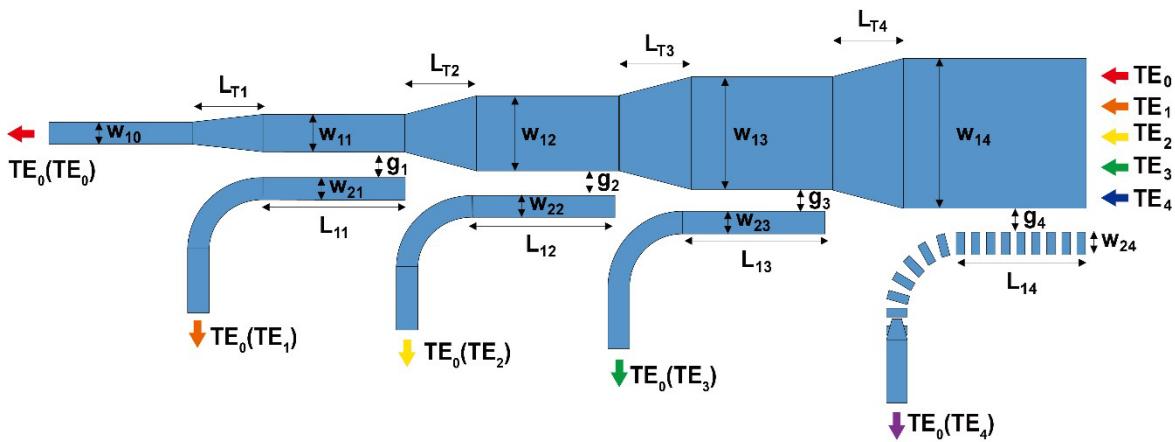


图 5.4-4 设计的基于非对称定向耦合器结构的模式 (解) 复用器。在总线波导中以不同模式传输的光可以耦合到邻近波导的基模。

Fig 5.4-4 Schematics of the ADC-based mode (de)multiplexer. Different modes in the bus waveguide can be coupled into the fundamental modes in different access waveguides depending on their mode order.

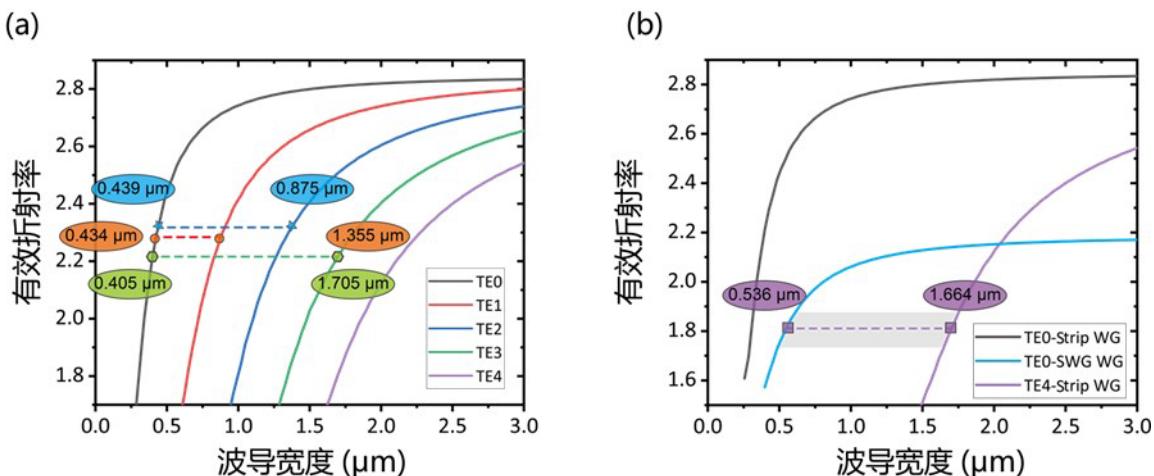


图 5.4-5 (a) 计算得到的不同宽度的矩形波导所支持的本征模式的有效折射率。  
(b) 亚波长光栅波导所支持的布洛赫模式和矩形波导所支持的模式直径有效折射率之间的比较。

Fig. 5.4-5 Calculated effective indices of eigenmodes supported by strip waveguides. (b) Comparison of the effective indices of Bloch mode supported by SWG waveguides and TE<sub>0</sub>, TE<sub>4</sub> modes supported by strip waveguides.

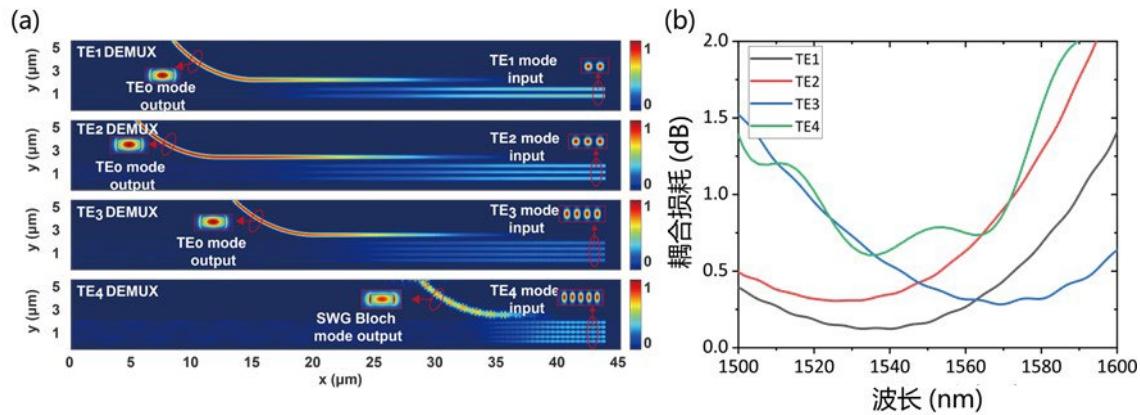


图 5.4-6 仿真得到的模式解复用器的 (a) 能量分布情况和 (b) 耦合损耗。

Fig. 5.4-6 Simulated (a) power distributions and coupling losses of the ADC-based mode (de)multiplexers for the TE<sub>1</sub>, TE<sub>2</sub>, TE<sub>3</sub>, TE<sub>4</sub> modes respectively.

设计的模式（解）复用器在 SOI 晶圆平台上进行了加工，SOI 晶圆具有 220 nm 厚的顶层硅和 1 μm 厚的二氧化硅覆盖层。在版图设计中我们扫描了多模波导宽度土 50 nm，槽宽度土 5 nm 来补偿加工误差。加工结构的显微镜照片如图 5.4-7 (a) 所示，使用两个同样的模式（解）复用器的结构来计算耦合损耗，图 5.4-7 (b) 展示了测试得到的耦合损耗结果。耦合损耗通过在同一个晶圆上加工制造的光栅耦合器进行了归一化。对于 TE<sub>0</sub>, TE<sub>1</sub>, TE<sub>2</sub> 和 TE<sub>3</sub> 模式来说，耦合损耗在 1550 nm 处低于 1.5 dB。在 TE<sub>4</sub> 模式（解）复用器中观察到了一些不理想的谐振，这些谐振可能是由于亚波长光栅波导中加工误差而形成的谐振腔。幸运的是，设计的 TE<sub>4</sub> 模式滤波器的工作波长在 1570 nm~1590 nm，在此工作波长下的器件依然具有较低的损耗。器件的设计参数也总结如表格 5.4-2 所示。

表格 5.4-2 模式解复用器的几何参数

Table 5.4-2. Parameters of the fabricated mode (de)multiplexers.

Mode order	$W_{\text{bus}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$W_{\text{access}}$ ( $\mu\text{m}$ )	Gap (nm)	耦合长度 ( $\mu\text{m}$ )	锥形波导长度 ( $\mu\text{m}$ )
$\text{TE}_0$	$W_{10}:0.450$	-	-	-	-
$\text{TE}_1$	$W_{11}:0.875$	$W_{21}:0.439$	$g_1:190$	$L_{11}:18.5$	$L_{T1}:16.5$
$\text{TE}_2$	$W_{12}:1.355$	$W_{22}:0.434$	$g_2:190$	$L_{12}:23.0$	$L_{T2}:16.8$
$\text{TE}_3$	$W_{13}:1.705$	$W_{23}:0.405$	$g_3:190$	$L_{13}:20.0$	$L_{T3}:12.9$
$\text{TE}_4$	$W_{14}:1.664$	$W_{24}:0.536$	$g_4:140$	$L_{14}:4.5$	$L_{T4}:1.4$

为了进一步分析设计的模式(解)复用器的工艺容忍度, 大量的模式(解)复用器在同一个晶圆上进行了加工。通过改变不同模式(解)复用器槽的宽度和多模波导的宽度, 测试的结果如图 5.4-8 所示。

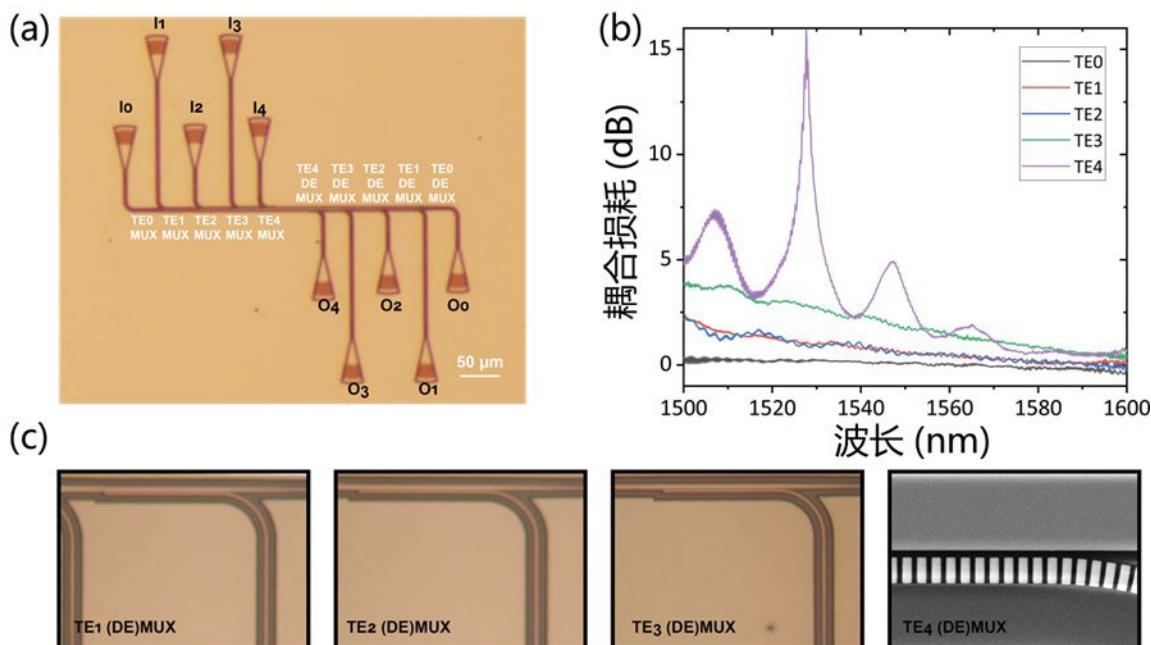


图 5.4-7 (a, b) 加工的模式(解)复用器结构的光学和电子显微镜照片 (c) 不同模式的测试损耗。

Fig. 5.4-7 (a) The microscope and (b) scanning electron microscope photos of fabricated mode (de)multiplexers. (c) The measured coupling losses of the modes.

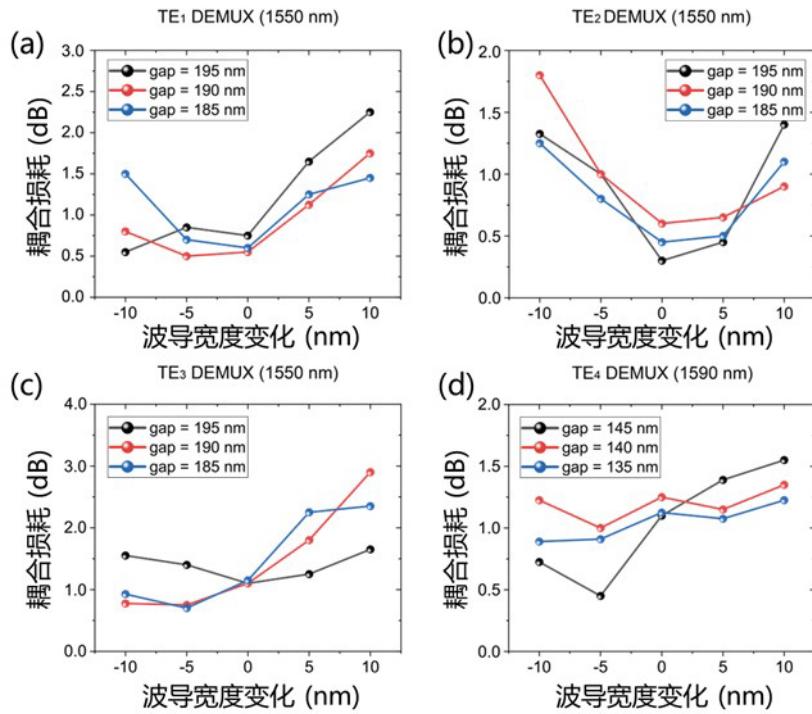


图 5.4-8 加工测得的模式解复用器损耗和随波导宽度和刻蚀槽宽度的变化情况。

Fig. 5.4-8 The measured coupling losses are measured with the variation of the bus waveguide and gap, and different gaps for the (a) TE<sub>1</sub>, (b) TE<sub>2</sub>, (c) TE<sub>3</sub> and (d) TE<sub>4</sub> mode (de)multiplexers.

#### 5.4.4 工作波长的调谐

尽管大多数主流的粗波分(解)复用器是无源器件, 不涉及到波长通道的调节。波长可调和通道可切换的波长(解)复用器也有着很多的应用, 可以用于其他无网格和动态调整的体系里。由于硅具有很大的热光系数( $\sim 1.86 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ )和较大的热导率( $\sim 149 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), 因此可以实现高效的热调波长(解)复用器。这里通过仿真和实验的方式分别演示了波长热调谐的过程。

在仿真中, 可以采用 Lumerical 软件支持的方法进行仿真。设置的仿真模型如图 5.4-9 (a) 所示, 仿真的最下层是衬底硅, 衬底硅上是一层  $3 \mu\text{m}$  的埋层二氧化硅, 上面是  $220 \text{ nm}$  厚的顶层波导, 通过在波导两侧刻蚀  $2 \mu\text{m}$  宽度的刻槽形成波导结构, 使光能在波导中传播不被泄露。波导结构上覆盖了  $1 \mu\text{m}$  厚的氧化硅, 在氧化硅上进而覆盖了一层  $2 \mu\text{m}$  宽,  $100 \text{ nm}$  厚的钛金属线。钛金属线上覆盖了一层  $200 \text{ nm}$  厚的铜导线, 并且连接到金属平板上。在金属平板上施加不同的电压边界条件来模拟热调过程, 热调会产生电流进而使电阻丝发热。仿真区域的背景材料被设置为空气, 而仿

真区域的边界条件被设置固定温度的边界条件，温度固定为室温（300 K）。这里设置了一个三维的温度监视器，可以获取波导中的温度分布情况，并且可以进一步将其导出为三维数组。这个三维数组可以进一步用于 FDTD 来计算仿真的光谱响应。图 5.4-9（a）也展示了当电压边界条件为 5 V 时的温度分布情况。

在通过热学解算器得到不同电压下的温度情况后，三维温度监视器就会捕获波导和其周围的温度分布情况，可以进一步把温度分布情况加载到 Lumerical FDTD 解算器中的温度网格属性对象中，其可以进一步生成材料由于受到温度影响的折射率分布情况。接着可以使用频监视器来收集 FDTD 仿真结果中的模场分布情况，并进一步通过模式展开监视器将其分解到前向或反向传输的模式分量中。通过这种方法，就可以得到不同电压（或功率）下单模式、双模式和四模式反射波长（解）复用器的光谱信息的仿真结果。图 5.4-9（b - d）分别展示了这些仿真结果。波长（解）复用器的所有通道都在施加外部电压时同时产生了红移，这可以被进一步用于校正不同通道的工作波长。对于单通道、双通道和四通道的波长（解）复用器来说，加热器的电阻分别为  $200 \Omega$ ,  $200 \Omega$  和  $333 \Omega$ ，进一步可以计算出其对应的热调效率。热调效率的计算如图 5.4-9(e) 所示，单通道波长（解）复用器的热调效率大约为  $0.159 \text{ nm/mW}$ ，双通道的波长（解）复用器的  $\text{TE}_1$  和  $\text{TE}_2$  反射通道的热调效率大约分别为  $0.158 \text{ nm/mW}$  和  $0.154 \text{ nm/mW}$ 。四通道波长（解）复用器的四个通道的热调效率大约分别为  $0.104 \text{ nm/mW}$ ,  $0.105 \text{ nm/mW}$ ,  $0.105 \text{ nm/mW}$  和  $0.105 \text{ nm/mW}$ 。

这里进一步对这一过程进行了实验验证，在超构材料波导上加工了钛电阻丝和铜金属线，并且通过探针来施加电压。图 5.4-10（a）展示了加工的结果的显微镜照片。这里加工了  $2 \mu\text{m}$  宽的金属加热器，包括  $100 \text{ nm}$  厚的金属钛电阻层和  $100 \text{ nm}$  厚的金属铜导线层。图 5.4-10（b - d）展示了测得的不同波长下的光谱响应情况。接着在加热器上施加不同的功率来实现热调的效果，通过连续地改变金属平板上的电压，器件工作的中心波长也会不断改变，并且保持类似的方形光谱形状。

对于单通道波长（解）复用器来说，图 5.4-10（b - d）展示了其工作的中心波长可以被调节，热调效率大约为  $0.200 \text{ nm/mW}$ 。对于双通道波长（解）复用器来说， $\text{TE}_1$  和  $\text{TE}_2$  模式通道的热调效率分别为  $0.176 \text{ nm/mW}$  和  $0.174 \text{ nm/mW}$ 。对于四通道的波长（解）复用器来说，四个通道的热调效率分别为  $0.148 \text{ nm/mW}$ ,  $0.150 \text{ nm/mW}$ ,  $0.157 \text{ nm/mW}$ ，和  $0.151 \text{ nm/mW}$ 。热调效率降低可能是由于耦合长度更长。测试的实验结果和仿真结果大致符合，热调效率之间略有差异。这些差别可能来自加热器厚度的加工误差和温度变化情况。

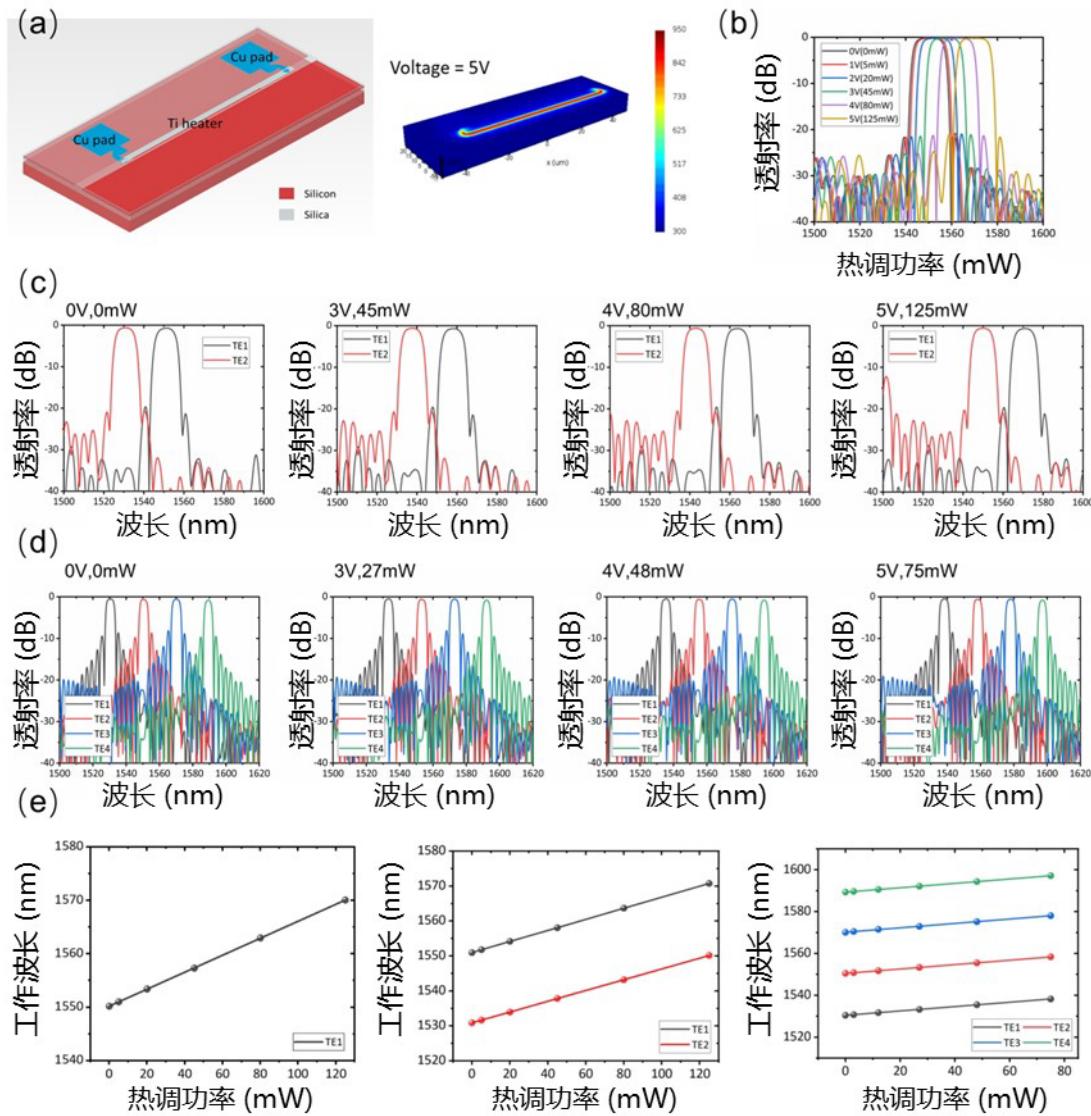


图 5.4-9 热调过程的仿真模型：(a) 仿真结构和温度分布 (b - d) 不同热调功率下 超构材料波导的反射光谱 (e) 中心波长随热调功率的变化。

Fig. 5.4-9 (a) Simulation model and simulated temperature distribution of the thermal tuning process. (b)~(d) The simulated reflection response under different voltage for the metamaterial-enabled (b) one-mode reflection (c) two-mode reflections and (d) four-mode reflections. (e) Central wavelength shift with the electrical power for one-, two- and four-channel wavelength (de)multiplexers.

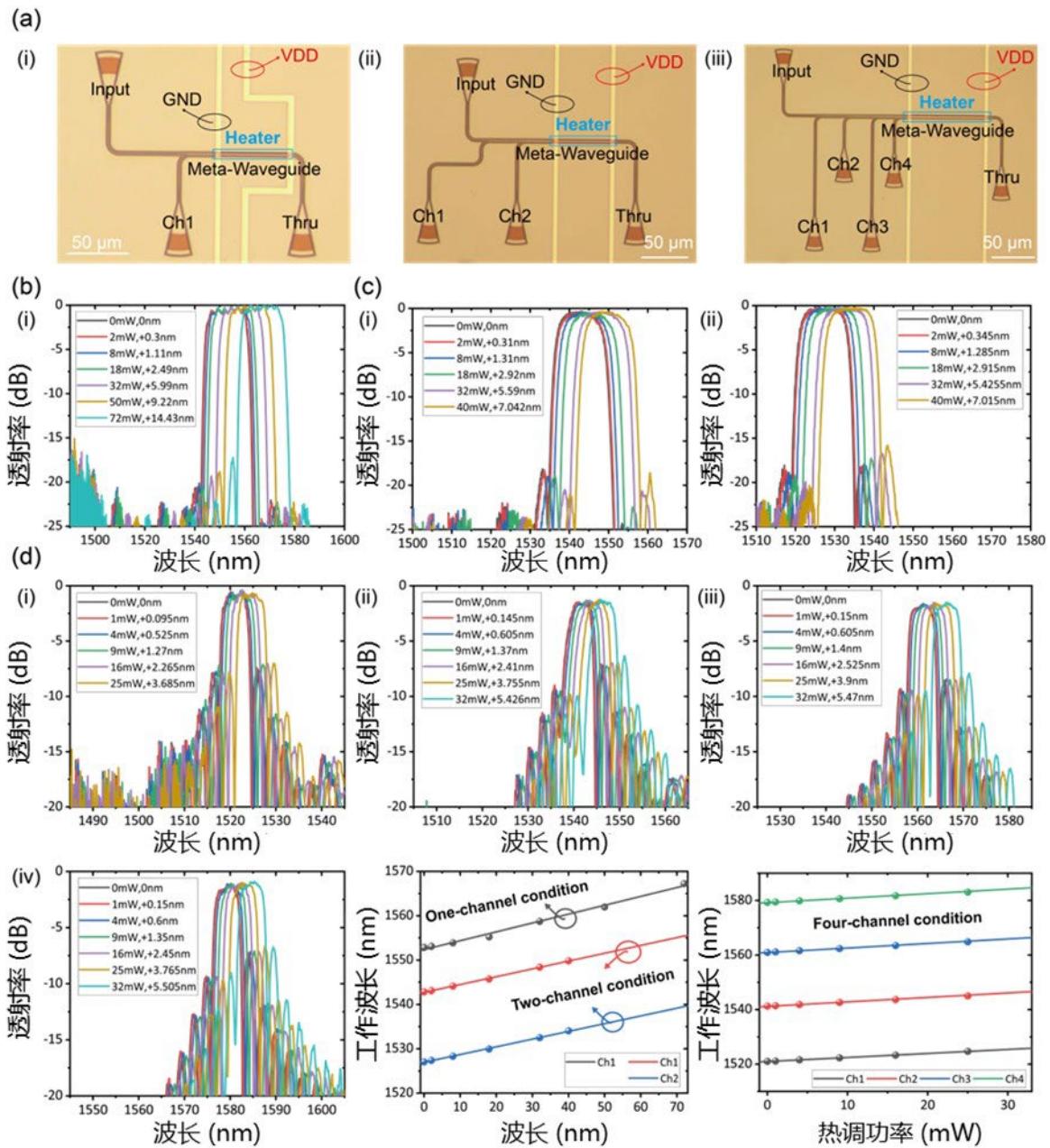


图 5.4-10 热调过程的实验测试结果：(a) 加工结构的显微镜照片 (b - d) 不同热调功率下的超构材料波导光谱响应 (e) 通道中心波长随热调功率的变化情况。

Fig. 5.4-10 (a) The optical microscope photos of the fabricated heaters. The measured spectra for the (b) one- (c) two- and (d) four-channel wavelength (de)multiplexers. The panel (i)~(iv) represents channel 1~4 respectively. (e) The central wavelength shift with electrical power.

### 5.4.5 面向 LAN-WDM 设计的级联波长（解）复用器模型

这里进一步通过级联将此设计扩展到 12 通道，参考了局域网波分复用（LAN-WDM, Local-area-network Wavelength-division Multiplexing) 标准 (ITU G.694.1)，通道带宽为 1.5 nm，通道间隔为 5 nm，并通过仿真对此结构进行了验证。图 5.4-12 展示了设计的四模式反射超构材料波导的结构和参数设计。其中超构材料结构包含了四组刻蚀深度为 20 nm 的介质孔和一根多模波导。超构材料波导的宽度为 2  $\mu\text{m}$  而长度为 250  $\mu\text{m}$ 。输入的 TE<sub>0</sub> 模式的光会在超构材料波导中反向耦合到四种高阶模式里。

图 5.4-13 进一步展示了超构材料波导结构的反射光谱。如图所示，反射的光谱具有一个较大的自由光谱范围，而图 5.4-13 (b) 展示了反射的光谱放大后的结果。可以看出，器件工作的中心波长分别位于 1286.6 nm, 1291.1 nm, 1295.6 nm 和 1300.1 nm 处。仿真的光谱同样具有较好的平顶性，较大的通道隔离度 ( $> 20 \text{ dB}$ )，较低的损耗 ( $< 1 \text{ dB}$ ) 和较低的串扰 ( $\sim -22 \text{ dB}$ )。

如图 5.4-14 所示，面向 LAN-WDM 的应用，可以将三组四通道波长（解）复用器进行级联，构成 12 通道的波长（解）复用器，其尺寸为  $1200 \times 2.5 \mu\text{m}^2$ 。

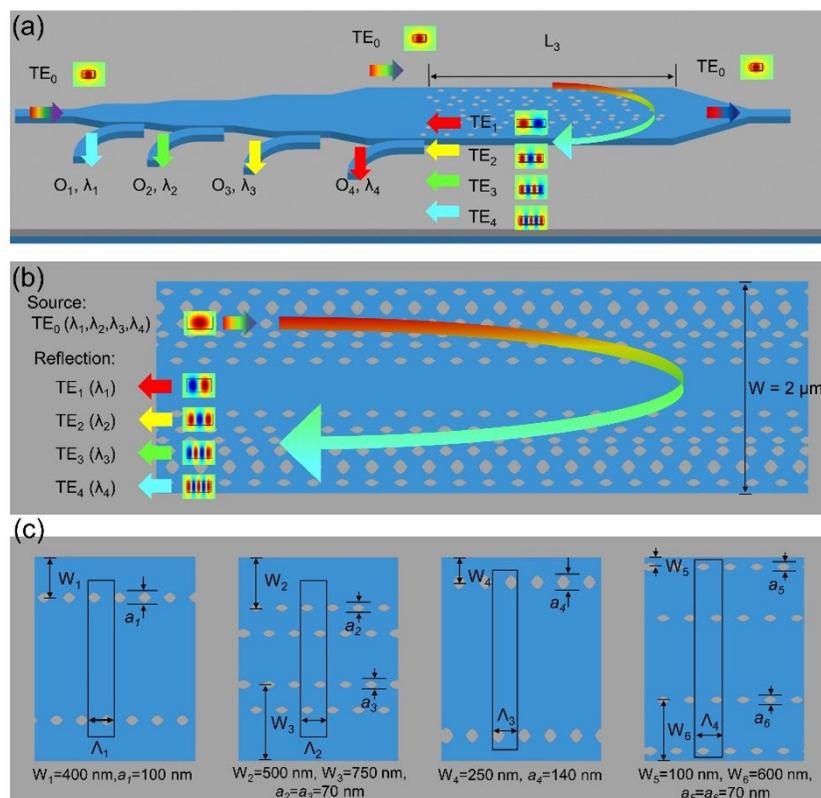


图 5.4-12.面向 LAN-WDM 应用设计的超构材料波导结构示意图

Fig. 5.4-12 (a) Schematic configurations of the metasurfaces enabled four-mode reflections for LAN-WDM. (b) The zoomed-in perturbed waveguide contains four groups of perturbations; (c) The dielectric perturbation etches that reversely couple the input  $\text{TE}_0$  mode into  $\text{TE}_1$  mode,  $\text{TE}_2$  mode,  $\text{TE}_3$  mode,  $\text{TE}_4$  mode

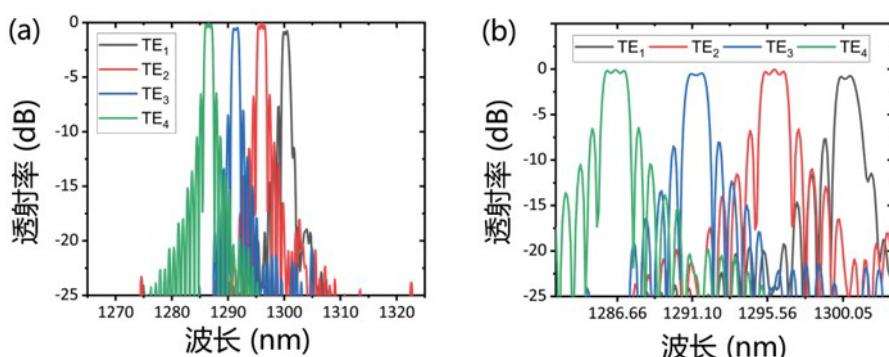


图 5.4-13 面向 LAN-WDM 应用设计的超构材料波导的反射光谱响应

Fig. 5.4-13 (a) The simulated reflection spectra of the metasurfaces-enabled four-mode reflections for LAN-WDM. (b) zoomed-in spectra

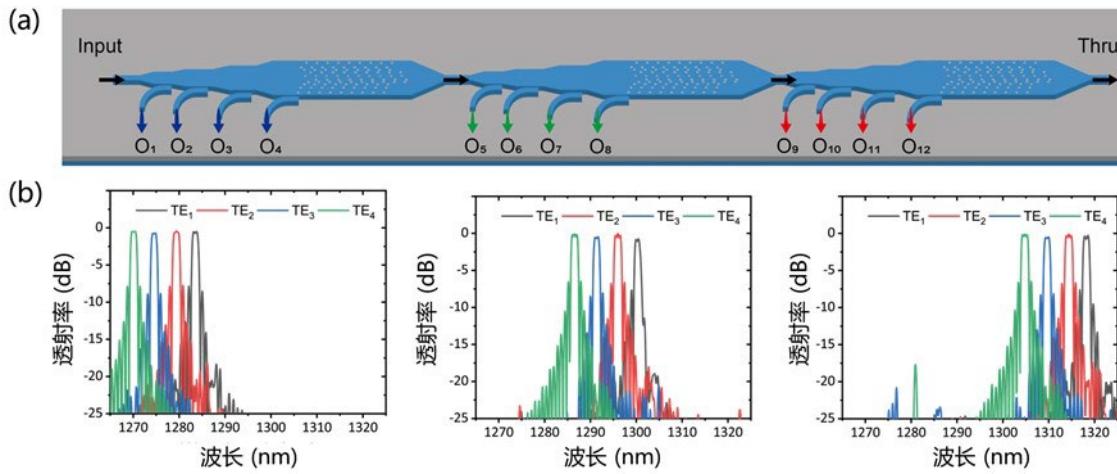
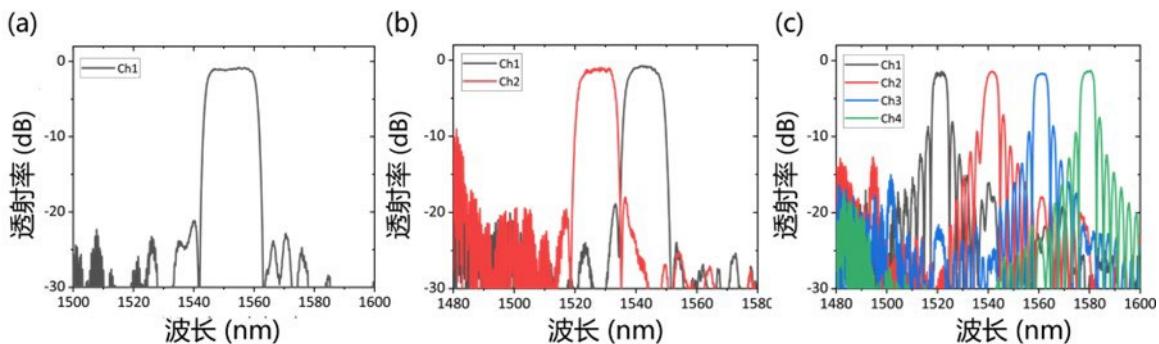


图 5.4-14 基于超构材料波导，面向 LAN-WDM 设计的级联的波长（解）复用器

Fig. 5.4-14 (a) Schematic configurations of the cascaded wavelength (de)multiplexers for 12-channel LAN-WDM and (b) the separately simulated spectra of each stage of the wavelength (de)multiplexers

#### 5.4.6 超构材料波导作为波长复用器时的性能

为了展示所提出的超构材料结构作为波长复用器时的性能，本文也从输出端口 Ch1~Ch4 输入信号进行了测试。图 5.4-15 展示了不同端口输入信号后，在总线波导中检测到的光谱信息。可以看出，当信号从不同端口输入时，会在总线多模波导中激发处不同波长的信号。由于光路的可逆性，测试的结果和作为解复用器件时类似。



5.4-15 器件作为波长复用器时测试的光谱响应

Fig. 5.4-15 Measured spectra of the fabricated metamaterials for (a) one-, (b) two-, and (c) four-mode reflections as multiplexers

## 5.5 本章小结

在本章节，基于二维超构材料结构，演示了一种新颖的多通道波分(解)复用器。器件具有有竞争力的性能和紧凑的尺寸。超构材料波导的长度分别为  $60 \mu\text{m}$ ,  $60 \mu\text{m}$  和  $100 \mu\text{m}$  用来实现单通道，双通道和四通道的波分(解)复用器，器件的尺寸分别为  $1.5 \times 95 \mu\text{m}^2$ ,  $2 \times 150 \mu\text{m}^2$  和  $2.5 \times 250 \mu\text{m}^2$ ，器件的插入损耗分别小于  $1.5 \text{ dB}$ ,  $1.2 \text{ dB}$  和  $2 \text{ dB}$ 。器件的工作带宽和中心波长可以通过改变超构材料的结构来灵活的进行设计。本章节也展示了通过热光效应对工作波长的调节作用。本章节设计的超构材料展现了一种新的方法来设计多功能的片上空间光模式和波长的调控方案，进一步为在混合复用系统、非线性光学、光学模拟计算等领域中实现新颖的功能提供可能。本章的主要研究工作发表在光学高水平期刊 *Laser & Photonics Reviews* 上，得到了同行专家的认可。

## 第六章 总结与展望

### 6.1 工作总结和创新点

目前硅基光子学正在快速发展，基于波导结构的硅基光电子器件已得到广泛的研究，而采用超构材料来设计新型的光电子器件的方法为硅基光子学注入了新的活力，有望使硅基光电子器件具有超紧凑的尺寸和更大的带宽。然而如何实现基于超构材料的硅基光电子器件，仍然是一个亟待探索的可行问题。本文围绕着片上超构材料对光场的调控机理，设计和加工了一系列模式、偏振、波长调控器件，此外，本文进一步设计了模式、偏振、波长多维混合复用片上通信系统。主要研究成果和创新点如下：

#### 6.1.1 基于超构材料的片上偏振态调控器件

在超构材料对片上光场的偏振态的调控方面，本文提出并加工了一系列的片上超构材料使能的偏振态调控器件，用于控制片上传播光场的偏振状态，具体结果如下：

1) 对于片上的起偏器，本文基于具有周期性刻蚀孔的超构材料，在 SOI 平台上加工了片上的起偏器，器件的尺寸为  $18 \times 1 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 1 dB，带宽为 100 nm。

2) 对于片上的偏振分束器，本文利用超构材料对波前的进行操控，设计的偏振分束器使以不同偏振态传播的光进入到不同的端口。本文制备的偏振分束器的尺寸为  $16 \times 1.1 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 2 dB，串扰小于 -30 dB，带宽为 50 nm。

3) 对于片上的偏振分束旋转器，本文利用周期性介质孔和介质槽微扰，使不同偏振态分量进入到两个不同端口的同时，使其中的 TM 偏振态的光旋转为 TE 偏振态的光。本文制备的片上分束旋转器的尺寸为  $13 \times 1 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 1.3 dB，带宽为 80 nm。

#### 6.1.2 基于超构材料的片上模式调控器件

在超构材料对片上光场的模式调控方面，本文提出并制备了一系列基于简单电介质槽的模式转换器和模式(解)复用器，用于不同模式之间的耦合和不同光信号之间的复用，具体的测试结果如下：

1) 对于 TE<sub>0</sub> 到 TE<sub>1</sub> 的模式转换器，本文设计并制备了两种超紧凑的器件，第一种器件具有超紧凑的尺寸 ( $1.2 \times 0.8 \mu\text{m}^2$ ) 和较低的损耗 (< 1.2 dB)；而第二种器件

具有紧凑的尺寸 ( $2.3 \times 0.88 \mu\text{m}^2$ )，更低的损耗 (< 0.5 dB) 和较大的带宽 (~ 50 nm)。

2) 本文进一步把这种方法推广到了 TE<sub>0</sub> 到 TE<sub>2</sub>，其中 TE<sub>0</sub> 到 TE<sub>2</sub> 的模式转换器的尺寸为  $2.4 \times 1.4 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 0.3 dB，带宽为 50 nm。本文也通过级联的方法设计了 TE<sub>0</sub> 到 TE<sub>3</sub> 的模式转换器，仿真结果表明其耦合长度为 7.4 μm，损耗小于 0.22 dB，带宽为 300 nm。

3) 此外，本文也利用简单电介质槽的方法，设计并加工了超紧凑的 TE<sub>0</sub>/TE<sub>1</sub> 模式的（解）复用器，其尺寸为  $1.8 \times 1 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 0.5 dB，带宽为 60 nm。

### 6.1.3 基于超构材料的片上波长调控器件

在超构材料对片上光场的波长调控方面，本文设计并制备了一系列基于超构材料的片上波长（解）复用器，从而可以将不同波长的光分解到不同的通道中，或者将不同通道中的光合并到同一根总线波导里。具体的测试结果如下：

- 1) 单通道的波长（解）复用器尺寸为  $95 \times 1.5 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 1.5 dB。
- 2) 双通道的波长（解）复用器的尺寸为  $150 \times 2 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 1.2 dB，通道间串扰小于 -19.2 dB。
- 3) 四通道的波长（解）复用器的尺寸为  $250 \times 2.5 \mu\text{m}^2$ ，损耗小于 2 dB，通道间串扰小于 -14.3 dB。

进一步，在芯片上加工了电极和加热器，通过热调的方式，展示了对通信的中心波长的调节能力，测得的热调效率大于 0.15 nm/mW。

通过多维复用的方式，可以进一步增加片上光学系统通信容量，本文的研究进一步阐释了超构材料对于片上光信号在模式、偏振和波长方面的调控作用。设计的器件具有超紧凑的尺寸，较大的带宽和较低的损耗，完全兼容 CMOS 工艺，并可以拓展应用到氮化硅、铌酸锂等平台，为实现高性能片上光通信器件提供了有效的解决方案。

## 6.2 工作展望

前面主要研究介绍了超构材料对片上光信号的调控能力，这里进一步介绍如何通过超构材料赋能更多的应用领域。

### 6.2.1 片上超构多维光通信系统

这里进一步讨论超构材料在多维光通信系统的研究展望。对于更高的通信容量的需求推动了整个光互连技术的发展，然而由于香农极限的理论限制和掺铒激光放大器 (EDFA, Erbium-doped Fiber Amplifiers) 的带宽限制，常用的波分复用技术已

经遇到了瓶颈<sup>[233]</sup>。而近些年逐渐发展的多维复用技术为进一步提高通信容量提供了一个新的方案，其中模分复用技术采用不同的模式来作为通信的不同信道<sup>[210,234,235]</sup>，偏振复用技术采用不同的偏振来作为不同信道，波分复用技术采用不同的波长作为不同的信道。通过结合  $m$  个模式通道，两个偏振通道和  $n$  个波长通道，可以使通信的信道数目提升到  $2 \times m \times n$  个<sup>[236,237]</sup>。

在多维光通信系统的前期研究中，已经设计了一个 160 通道的多维光通信系统芯片的整体架构图。如图 6.2-1 所示，整个系统包含了 10 个混合模式偏振通道和 16 个波长通道，一共 160 个通道。它包含一个同时支持 10 个模式的多模偏振复用器，分别支持 TE 模式和 TM 模式的  $1 \times 5$  模式解复用器，可以把 TM 模式旋转为 TE 模式的偏振旋转器，和 16 个通道的波长解复用器。通过这样的系统，不同的光信号可以在不同的偏振、模式或偏振态下进行传播，从而数百倍的增加同一根总线波导中的通信容量。上海交通大学课题组的研究人员之前展示了通过 16 个模式通道，传输 40-GBaud 16 位正交振幅调制信号（16 QAM，16-ary Quadrature Amplitude Modulation）时的前向纠错（FEC，Forward Error Correction）阈值低于 15%，可以在单波长上实现 2.162 Tbit/s 的数据传输速度 [ $40 \text{ GBaud} \times 4 \text{ bits per symbol} \times 16 \text{ modes} \times 97.1\% / (1 + 15\%)$ ]<sup>[238]</sup>。假设其他条件一样，本工作预期可以通过 160 个通道实现 21.62 Tbit/s 的数据传输速度 [ $40 \text{ GBaud} \times 4 \text{ bits per symbol} \times 160 \text{ Channels} \times 97.1\% / (1 + 15\%)$ ]。

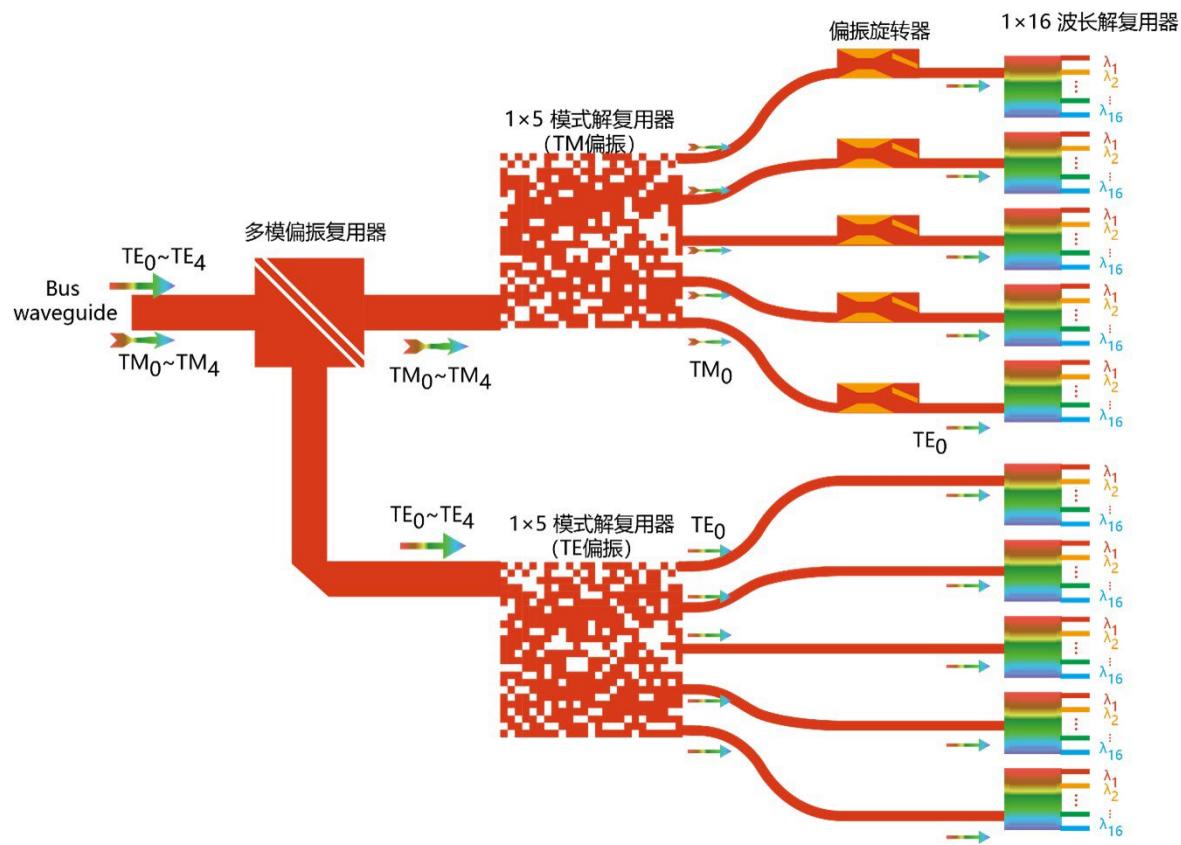


图 6.2-1. 多维光通信系统芯片的整体架构图

Fig. 6.2-1. The schematic of hybrid on-chip multidimensional communication system

## 6.2.2 片上超构非线性调控

这里进一步讨论超构材料在非线性领域的研究展望。对于非线性过程来说，相位匹配是一个非常重要的过程。通常来说，相位匹配可以通过采用波导模式色散调控，或周期极化非线性晶体来实现，这些方式可以使得在非线性转换过程中的光子满足动量守恒定律。然而这些过程通常需要仔细的设计色散关系，并且通常只能工作在一个较窄的带宽下。近年来，如图 6.2-2 所示，上海交通大学的研究人员提出了可以使用纳米孔超构材料提高波导中四波混频的转换效率<sup>[239]</sup>，哈佛大学和哥伦比亚大学的研究人员提出了通过密集光学相位天线构成的超构材料可以提供一个等效的光学相位梯度，从而可以满足非线性过程中的相位匹配条件<sup>[157]</sup>。悉尼大学的研究人员指出通过超构材料中的慢光效应可以增强绿光发射<sup>[240]</sup>，马里兰大学的研究人员通过超构材料来实现在精确的波长上的非线性转换<sup>[241]</sup>，而本文提供的超构材料设计方法就有望用于各种非线性过程的相位匹配中。

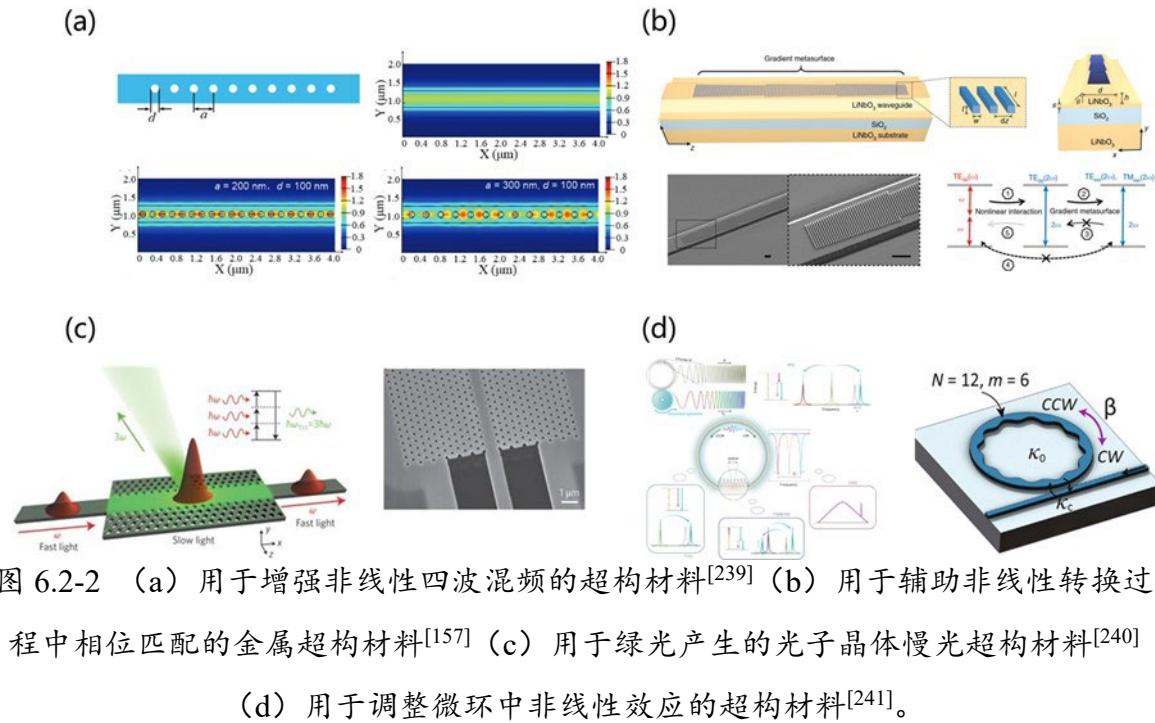
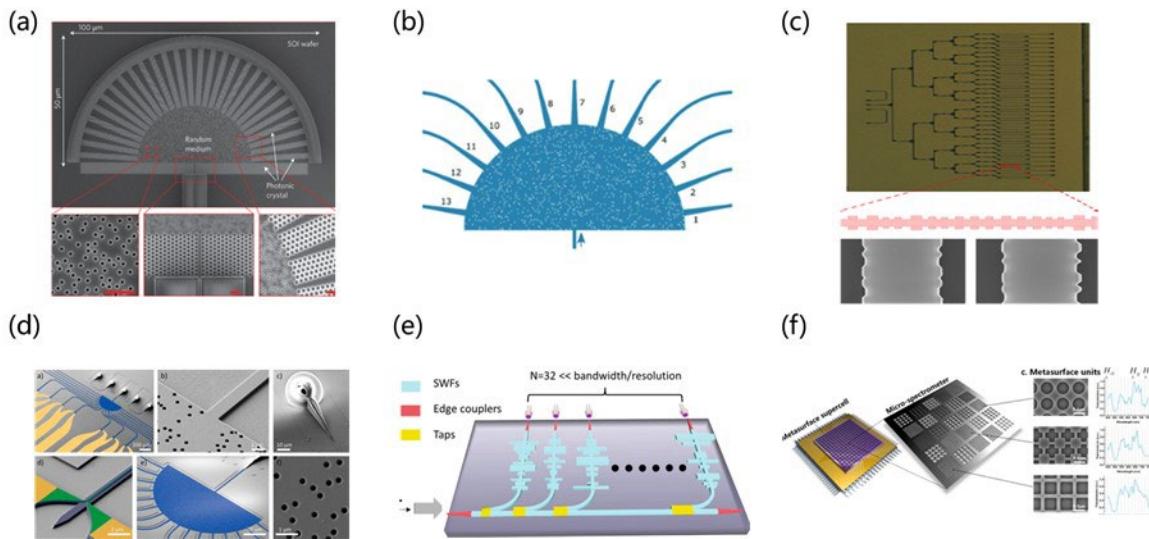


图 6.2-2 (a) 用于增强非线性四波混频的超构材料<sup>[239]</sup> (b) 用于辅助非线性转换过程中相位匹配的金属超构材料<sup>[157]</sup> (c) 用于绿光产生的光子晶体慢光超构材料<sup>[240]</sup> (d) 用于调整微环中非线性效应的超构材料<sup>[241]</sup>。

Fig. 6.2-2 The metasurface that is utilized to (a) enhance four wave mixing<sup>[239]</sup>, (b) assist phase-matching condition<sup>[157]</sup>, (c) achieve slow light for green light emission<sup>[240]</sup> and (d) adjust the dispersion for nonlinear effect in MRRs<sup>[241]</sup>.

### 6.2.3 片上超构光谱仪

这里进一步讨论超构材料在光传感领域的研究展望。在光传感领域中，对光谱的信号分析具有很多的应用，例如粒子监测，生物医疗等等。然而，传统的光谱检测手段通常采用时域或者空间域的扫描，并不能同时实现快速和强大的时域，空间域和频域分辨率。超构材料可以对不同波长的波前实现不同的调控作用，近年来，如图 6.2-3 所示，来自耶鲁大学和明斯特大学的研究人员分别报道了通过无序点阵的超构材料，可以将含有光谱信息的入射光散射到不同的通道中，进而重构入射的光谱，展示出了很好的性能和应用前景<sup>[242-244]</sup>。而来自加利福尼亚大学和苏州大学的研究人员报告了一种利用片上波导和超构材料结合，在不同通道实现多种光谱响应的计算光谱仪<sup>[245,246]</sup>。来自清华大学的研究人员也报告了一种利用空间光超构表面实现的计算光谱相机<sup>[247]</sup>。本文提供的超构材料设计方法也有望用于调控器件的光谱响应，从而进一步提高基于超构材料的光谱仪性能。

图 6.2-3 利用各种片上超构材料实现的计算光谱仪<sup>[242-247]</sup>Fig. 6.2-3 On-chip spectrometer based on various kinds of metamaterials<sup>[242-247]</sup>

总的来说，超构材料对于片上光场具有强大的调控能力，具体的机理和应用仍需要进一步探索。这些研究可以较大的提高现有硅基光电子器件的带宽、降低器件的尺寸、丰富器件的功能，在各个研究领域都具有很大的探索价值和应用前景。

此外，在对非线性和计算光谱仪的前期研究过程中，已经发现非线性和光谱仪可以有机地结合在一起。如图 6.2-4 所示，可以利用非线性效应中的双光子吸收 (TPA, Two-Photon Absorption) 效应来替代传统的光探测器来实现计算光谱仪，实现光谱响应的构建。这里提出的超微型计算光谱仪采用微环谐振器来完全实现“光响应”的功能，无需外部光电检测器。在 TPA 过程中，两个光子可以同时被吸收以产生自由载流子。为了感知 TPA 信号，可以使 TPA 过程发生在反向偏置 PN 结的耗尽区域，然后通过电流信号来感知产生的自由载流子。MRR 设计为以全通方式运行，并掺杂以创建 PN 结。两个电极接触到掺杂区域，并提供反向电压偏置以感知 TPA 电流。在环的顶部还包括一个微加热器来调节工作温度。另外两个电极接触到另一金属层上的加热器。当光在 MRR 中共振时，更多的自由载流子由 TPA 效应产生，而反向 PN 结中的电流响应可以通过数字源表进行测量。在不同温度下工作的 MRR 充当不同的传感通道，提供了多个线性代数方程来确定输入光谱，从而可以通过解线性方程组的方法来重构得到未知的入射光谱。

此设备在仅  $16 \times 16 \mu\text{m}^2$  的超紧凑尺寸内实现了 10 nm 的带宽和 0.4 nm 的分辨率。相较于传统光探测器方法，此新型设备不仅体积更小，而且成本更低。此项研究成果已经发表在光学高水平期刊 *Optica* 上<sup>[248]</sup>，得到了同行专家的认可，未来可以将

超构材料应用于此种计算光谱仪来进一步提高性能。

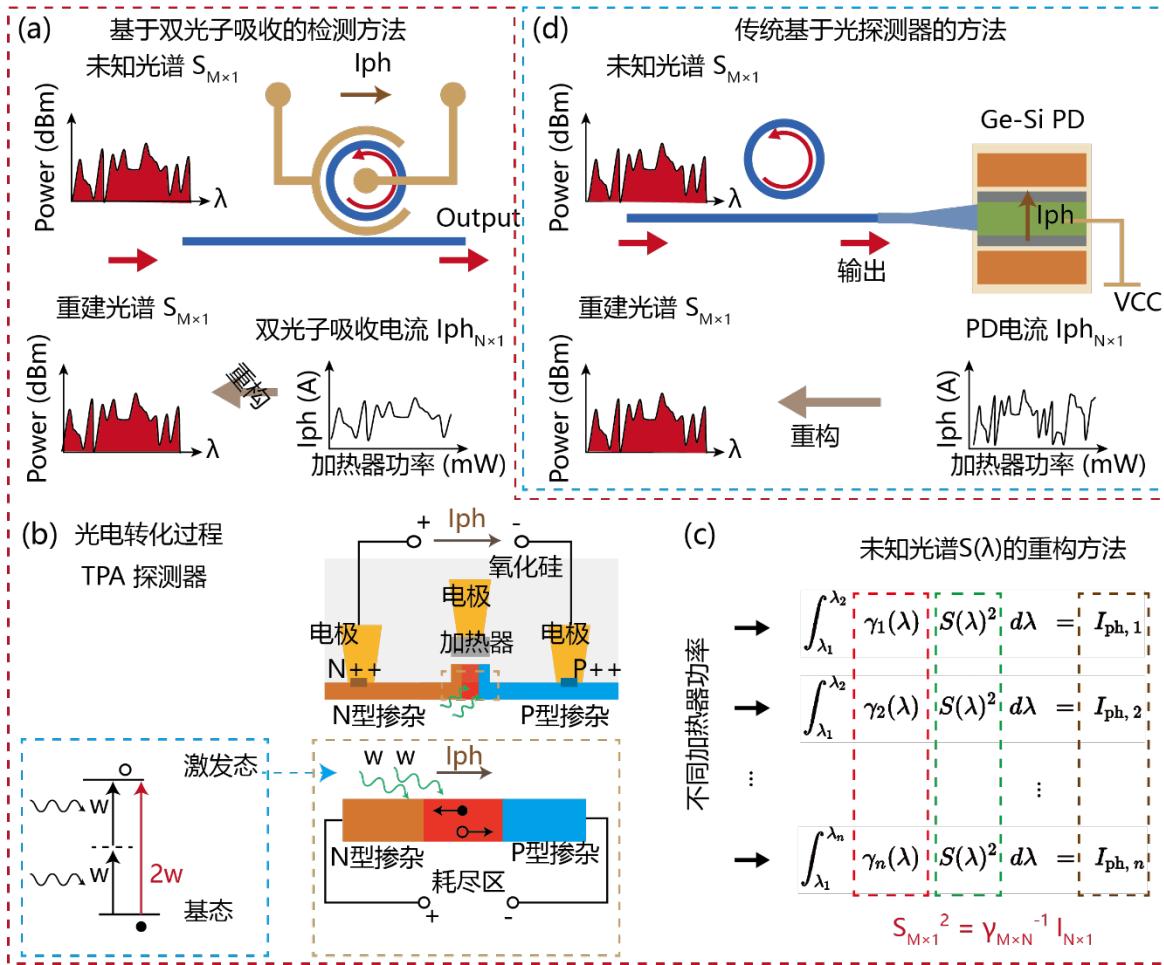


图 6.2-4 (a) 基于双光子吸收的计算光谱仪的示意图，采用探测到的双光子吸收电流来重建未知的输入光谱；(b) 在 SOI 平台上脊波导掺杂的 PN 结横截面图；(c) 用于重构光谱的算法原理 (d) 传统基于光探测器的计算光谱仪示意图<sup>[248]</sup>。

Fig. 6.2-3 (a) Schematic of the spectrometer based on MRR; the TPA current is employed to reconstruct the unknown input spectrum. (b) Cross-section of the PN junction rib waveguide on a  $n$ -SOI substrate, which is used to sense the TPA current. (c) Principles behind computational spectrometers based on TPA responses that encode spectral response characteristics. (d) Conventional spectrometers based on PDs<sup>[248]</sup>.

## 参 考 文 献

- [1] Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper[EB/OL]. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. /2024-01-02. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>.
- [2] Cisco Annual Internet Report[EB/OL]. /2024-01-02. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/executive-perspectives/annual-internet-report/index.html>.
- [3] Markov I L. Limits on fundamental limits to computation[J]. Nature, 2014, 512(7513): 147–154.
- [4] Chen R, Li Y-C, Cai J-M, et al. Atomic level deposition to extend Moore’s law and beyond[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2020, 2(2): 022002.
- [5] Miller S E. Integrated optics: An introduction[J]. The Bell System Technical Journal, Nokia Bell Labs, 1969, 48(7): 2059–2069.
- [6] Soref R, Bennett B. Electrooptical effects in silicon[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, IEEE, 1987, 23(1): 123–129.
- [7] Zhao C, Li G, Liu E, et al. Silicon on insulator Mach–Zehnder waveguide interferometers operating at 1.3 μm[J]. Applied Physics Letters, American Institute of Physics, 1995, 67(17): 2448–2449.
- [8] Tang C, Reed G. Highly efficient optical phase modulator in SOI waveguides[J]. Electronics Letters, IET, 1995, 31(6): 451–452.
- [9] Bruel M. Process for the production of thin semiconductor material films[J]. Google Patents, 1994.
- [10] Rickman A, Reed G, Namavar F. Silicon-on-insulator optical rib waveguide loss and mode characteristics[J]. Journal of Lightwave Technology, IEEE, 1994, 12(10): 1771–1776.
- [11] Dumon P, Bogaerts W, Wiaux V, et al. Low-loss SOI photonic wires and ring resonators fabricated with deep UV lithography[J]. IEEE Photonics Technology Letters, IEEE, 2004, 16(5): 1328–1330.
- [12] Cardenas J, Poitras C B, Robinson J T, et al. Low loss etchless silicon photonic waveguides[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2009, 17(6): 4752–4757.
- [13] Lee K K, Lim D R, Kimerling L C, et al. Fabrication of ultralow-loss Si/SiO<sub>2</sub> waveguides by roughness reduction[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2001, 26(23): 1888–1890.
- [14] Sakai A S A, Hara G H G, Baba T B T. Propagation characteristics of ultrahigh-Δ optical waveguide on silicon-on-insulator substrate[J]. Japanese Journal of Applied Physics, IOP

- Publishing, 2001, 40(4B): L383.
- [15] Sakai A, Fukazawa T, Baba T. Low loss ultra-small branches in a silicon photonic wire waveguide[J]. IEICE Transactions on Electronics, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 2002, 85(4): 1033–1038.
  - [16] Fukazawa T, Hirano T, Ohno F, et al. Low loss intersection of Si photonic wire waveguides[J]. Japanese Journal of Applied Physics, IOP Publishing, 2004, 43(2R): 646.
  - [17] Fukazawa T, Ohno F, Baba T. Very compact arrayed-waveguide-grating demultiplexer using Si photonic wire waveguides[J]. Japanese Journal of Applied Physics, IOP Publishing, 2004, 43(5B): L673.
  - [18] Almeida V R, Panepucci R R, Lipson M. Nanotaper for compact mode conversion[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2003, 28(15): 1302–1304.
  - [19] Shoji T, Tsuchizawa T, Watanabe T, et al. Low loss mode size converter from 0.3  $\mu\text{m}$  square Si wire waveguides to singlemode fibres[J]. Electronics Letters, IET, 2002, 38(25): 1669–1670.
  - [20] Xu D-X, Schmid J H, Reed G T, et al. Silicon photonic integration platform—have we found the sweet spot?[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE, 2014, 20(4): 189–205.
  - [21] Trinh P, Yegnanarayanan S, Jalali B. Integrated optical directional couplers in silicon-on-insulator[J]. Electronics Letters, IET, 1995, 31(24): 2097–2098.
  - [22] Trinh P, Yegnanarayanan S, Coppinger F, et al. Silicon-on-insulator (SOI) phased-array wavelength multi/demultiplexer with extremely low-polarization sensitivity[J]. IEEE Photonics Technology Letters, IEEE, 1997, 9(7): 940–942.
  - [23] Xu Q, Schmidt B, Pradhan S, et al. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator[J]. Nature, Nature Publishing Group UK London, 2005, 435(7040): 325–327.
  - [24] Liao L, Samara-Rubio D, Morse M, et al. High speed silicon Mach-Zehnder modulator[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2005, 13(8): 3129–3135.
  - [25] Liu A, Jones R, Liao L, et al. A high-speed silicon optical modulator based on a metal–oxide–semiconductor capacitor[J]. Nature, Nature Publishing Group UK London, 2004, 427(6975): 615–618.
  - [26] Presting H, Kibbel H, Jaros M, et al. Ultrathin SimGen strained layer superlattices—a step towards Si optoelectronics[J]. Semiconductor Science and Technology, IOP Publishing, 1992, 7(9): 1127.
  - [27] Splett A, Zinke T, Petermann K, et al. Integration of waveguides and photodetectors in SiGe for

- 1.3  $\mu\text{m}$  operation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, IEEE, 1994, 6(1): 59–61.
- [28] Luan H-C, Lim D R, Lee K K, et al. High-quality Ge epilayers on Si with low threading-dislocation densities[J]. Applied physics letters, American Institute of Physics, 1999, 75(19): 2909–2911.
- [29] Liang D, Roelkens G, Baets R, et al. Hybrid integrated platforms for silicon photonics[J]. Materials, Molecular Diversity Preservation International, 2010, 3(3): 1782–1802.
- [30] Rong H, Jones R, Liu A, et al. A continuous-wave Raman silicon laser[J]. Nature, Nature Publishing Group UK London, 2005, 433(7027): 725–728.
- [31] Carroll L, Lee J-S, Scarella C, et al. Photonic packaging: transforming silicon photonic integrated circuits into photonic devices[J]. Applied Sciences, MDPI, 2016, 6(12): 426.
- [32] Takahashi Y, Inui Y, Chihara M, et al. A micrometre-scale Raman silicon laser with a microwatt threshold[J]. Nature, Nature Publishing Group UK London, 2013, 498(7455): 470–474.
- [33] Otterstrom N T, Behunin R O, Kittlaus E A, et al. A silicon Brillouin laser[J]. Science, American Association for the Advancement of Science, 2018, 360(6393): 1113–1116.
- [34] Taillaert D, Bienstman P, Baets R. Compact efficient broadband grating coupler for silicon-on-insulator waveguides[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2004, 29(23): 2749–2751.
- [35] Vermeulen D, Selvaraja S, Verheyen P, et al. High-efficiency fiber-to-chip grating couplers realized using an advanced CMOS-compatible silicon-on-insulator platform[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2010, 18(17): 18278–18283.
- [36] Wang J, Xuan Y, Lee C, et al. Low-loss and misalignment-tolerant fiber-to-chip edge coupler based on double-tip inverse tapers[A]. Optical Fiber Communication Conference[C]. Optica Publishing Group, 2016: M2I-6.
- [37] Lianxi J, Tsung-Yang L, Chao L, et al. High efficient suspended coupler based on IME's MPW platform with 193nm lithography[A]. 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)[C]. IEEE, 2017: 1–3.
- [38] Takahashi S, Horiuchi K, Tatsukoshi K, et al. Development of through glass via (TGV) formation technology using electrical discharging for 2.5/3D integrated packaging[A]. 2013 IEEE 63rd electronic components and technology conference[C]. Ieee, 2013: 348–352.
- [39] Zhang X, Lin J K, Wickramanayaka S, et al. Heterogeneous 2.5 D integration on through silicon interposer[J]. Applied physics reviews, AIP Publishing, 2015, 2(2): 021308.
- [40] Li B, Siew S Y, Gao F, et al. The Last Mile Technology of Silicon Photonics Toward Productions

- and Emerging Applications[J]. Integrated Nanophotonics: Platforms, Devices, and Applications, Wiley Online Library, 2023: 53–73.
- [41] Wang H, Fang Y, others. The history of Acacia introductions to China.[A]. ACIAR Proceedings Series[C]. Australian Centre for International Agricultural Research, 1991(35): 64–66.
- [42] Rahim A, Spuesens T, Baets R, et al. Open-access silicon photonics: Current status and emerging initiatives[J]. Proceedings of the IEEE, IEEE, 2018, 106(12): 2313–2330.
- [43] Winzer P J, Neilson D T, Chraplyvy A R. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2018, 26(18): 24190–24239.
- [44] Li C, Wu H, Tan Y, et al. Silicon-based on-chip hybrid (de) multiplexers[J]. Science China Information Sciences, Springer, 2018, 61: 1–14.
- [45] Khonina S N, Kazanskiy N L, Butt M A, et al. Optical multiplexing techniques and their marriage for on-chip and optical fiber communication: a review[J]. Opto-Electronic Advances, Opto-Electronic Advances, 2022, 5(8): 210127–1.
- [46] Chen P, Shen Z-X, Xu C-T, et al. Simultaneous realization of dynamic and hybrid multiplexed holography via light-activated chiral superstructures[J]. Laser & Photonics Reviews, Wiley Online Library, 2022, 16(5): 2200011.
- [47] Chen S, Shi Y, He S, et al. Compact monolithically-integrated hybrid (de) multiplexer based on silicon-on-insulator nanowires for PDM-WDM systems[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2015, 23(10): 12840–12849.
- [48] Dai D, Wang J, Shi Y. Silicon mode (de) multiplexer enabling high capacity photonic networks-on-chip with a single-wavelength-carrier light[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2013, 38(9): 1422–1424.
- [49] Patki P G, Guan P, Li L, et al. Recent progress on optical regeneration of wavelength-division-multiplexed data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE, 2020, 27(2): 1–12.
- [50] Dai D, Wang J, Chen S, et al. Monolithically integrated 64-channel silicon hybrid demultiplexer enabling simultaneous wavelength-and mode-division-multiplexing[J]. Laser & Photonics Reviews, Wiley Online Library, 2015, 9(3): 339–344.
- [51] Yin Y, Yu H, Tu D, et al. A Silicon-Based On-Chip 64-Channel Hybrid Wavelength-and Mode-Division (de) Multiplexer[A]. Photonics[C]. MDPI, 2023, 10(2): 183.

- [52] Yu H, Yin Y, Huang X, et al. A 32-Channel C-Band Hybrid wavelength/polarization Division (de) multiplexer on Silicon[J]. IEEE Photonics Journal, IEEE, 2023, 15(3): 7900306.
- [53] Tan Y, Wu H, Dai D. Silicon-based hybrid (de) multiplexer for wavelength-/polarization-division-multiplexing[J]. Journal of Lightwave Technology, IEEE, 2018, 36(11): 2051–2058.
- [54] Zhao W, Peng Y, Cao X, et al. 96-Channel on-chip reconfigurable optical add-drop multiplexer for multidimensional multiplexing systems[J]. Nanophotonics, 2022, 11(18): 4299–4313.
- [55] Yu H, Tu D, Yin Y, et al. Monolithically integrated 128-channel hybrid mode/polarization/wavelength (de) multiplexer on silicon-on-insulator[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2023, 31(25): 41034–41045.
- [56] Dai D. Advanced passive silicon photonic devices with asymmetric waveguide structures[J]. Proceedings of the IEEE, IEEE, 2018, 106(12): 2117–2143.
- [57] Fukuda H, Yamada K, Tsuchizawa T, et al. Silicon photonic circuit with polarization diversity[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2008, 16(7): 4872–4880.
- [58] Hong J M, Ryu H H, Park S R, et al. Design and fabrication of a significantly shortened multimode interference coupler for polarization splitter application[J]. IEEE Photonics Technology Letters, IEEE, 2003, 15(1): 72–74.
- [59] Liang T K, Tsang H K. Integrated polarization beam splitter in high index contrast silicon-on-insulator waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, IEEE, 2005, 17(2): 393–395.
- [60] Wang Z, Tang Y, Wosinski L, et al. Experimental demonstration of a high efficiency polarization splitter based on a one-dimensional grating with a Bragg reflector underneath[J]. IEEE Photonics Technology Letters, IEEE, 2010, 22(21): 1568–1570.
- [61] Shen B, Wang P, Polson R, et al. An integrated-nanophotonics polarization beamsplitter with  $2.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$  footprint[J]. Nature Photonics, 2015, 9(6): 378–382.
- [62] Dano L B, Lee S-L, Fang W-H. Simplified Approach for Optimizing Optical Asymmetric Curved Waveguides of Broadband Directional Couplers[J]. Fiber and Integrated Optics, Taylor & Francis, 2019, 38(5): 285–303.
- [63] Dai D, Wang Z, Bowers J E. Ultrashort broadband polarization beam splitter based on an asymmetrical directional coupler[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2011, 36(13): 2590–2592.
- [64] Guan X, Wu H, Shi Y, et al. Ultracompact and broadband polarization beam splitter utilizing the evanescent coupling between a hybrid plasmonic waveguide and a silicon nanowire[J]. Optics

- Letters, Optica Publishing Group, 2013, 38(16): 3005–3008.
- [65] 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, Optica Publishing Group, 2014, 39(2): 259–262.
- [66] Wang J, Liang D, Tang Y, et al. Realization of an ultra-short silicon polarization beam splitter with an asymmetrical bent directional coupler[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2013, 38(1): 4–6.
- [67] Ong J R, Ang T Y, Sahin E, et al. Broadband silicon polarization beam splitter with a high extinction ratio using a triple-bent-waveguide directional coupler[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2017, 42(21): 4450–4453.
- [68] Xu H, Dai D, Shi Y. Ultra-Broadband and Ultra-Compact On-Chip Silicon Polarization Beam Splitter by Using Hetero-Anisotropic Metamaterials[J]. Laser & Photonics Reviews, 2019, 13(4): 1–7.
- [69] Dai D, Bowers J E. Novel concept for ultracompact polarization splitter-rotator based on silicon nanowires[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2011, 19(11): 10940–10949.
- [70] Dai D, Wu H. Realization of a compact polarization splitter-rotator on silicon[J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2346–2349.
- [71] He Y, Zhang Y, Wang X, et al. Silicon polarization splitter and rotator using a subwavelength grating based directional coupler[A]. 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)[C]. IEEE, 2017: 1–3.
- [72] Ding Y, Liu L, Peucheret C, et al. Fabrication tolerant polarization splitter and rotator based on a tapered directional coupler[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2012, 20(18): 20021–20027.
- [73] Zhang Y, He Y, Jiang X, et al. Ultra-compact and highly efficient silicon polarization splitter and rotator[J]. APL Photonics, AIP Publishing LLC, 2016, 1(9): 091304.
- [74] Xiang J, Tao Z, Li X, et al. Metamaterial-enabled arbitrary on-chip spatial mode manipulation[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 168.
- [75] Su Y, Zhang Y, Qiu C, et al. Silicon Photonic Platform for Passive Waveguide Devices: Materials, Fabrication, and Applications[J]. Advanced Materials Technologies, 2020, 5(8): 1901153.
- [76] Dai D, Li C, Wang S, et al. 10-Channel Mode (de) multiplexer with dual polarizations[J]. Laser & Photonics Reviews, Wiley Online Library, 2018, 12(1): 1700109.

- [77] He Y, Zhang Y, Zhu Q, et al. Silicon high-order mode (De)multiplexer on single polarization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(24): 5746–5753.
- [78] Huang Y, Xu G, Ho S T. An ultracompact optical mode order converter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(21): 2281–2283.
- [79] Park J B, Yeo D-M, Shin S-Y. Variable optical mode generator in a multimode waveguide[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, 2006, 18(20): 2084–2086.
- [80] Liu V, Miller D A, Fan S. Ultra-compact photonic crystal waveguide spatial mode converter and its connection to the optical diode effect[J]. *Optics Express*, Optica Publishing Group, 2012, 20(27): 28388–28397.
- [81] Chen D, Xiao X, Wang L, et al. Low-loss and fabrication tolerant silicon mode-order converters based on novel compact tapers[J]. *Optics Express*, Optica Publishing Group, 2015, 23(9): 11152–11159.
- [82] Wang H, Zhang Y, He Y, et al. Compact silicon waveguide mode converter employing dielectric metasurface structure[J]. *Advanced Optical Materials*, Wiley Online Library, 2019, 7(4): 1801191.
- [83] Li Z, Kim M H, Wang C, et al. Controlling propagation and coupling of waveguide modes using phase-gradient metasurfaces[J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(7): 675–683.
- [84] Ohana D, Desiatov B, Mazurski N, et al. Dielectric metasurface as a platform for spatial mode conversion in nanoscale waveguides[J]. *Nano Letters*, ACS Publications, 2016, 16(12): 7956–7961.
- [85] Jia H, Zhou T, Fu X, et al. Inverse-design and demonstration of ultracompact silicon meta-structure mode exchange device[J]. *ACS Photonics*, ACS Publications, 2018, 5(5): 1833–1838.
- [86] Jia H, Chen H, Yang J, et al. Ultra-compact dual-polarization silicon mode-order converter[J]. *Optics Letters*, Optica Publishing Group, 2019, 44(17): 4179–4182.
- [87] Zhao Y, Ji X, Kim B Y, et al. Visible nonlinear photonics via high-order-mode dispersion engineering[J]. *Optica*, Optica Publishing Group, 2020, 7(2): 135–141.
- [88] Horst F, Green W M, Assefa S, et al. Cascaded Mach-Zehnder wavelength filters in silicon photonics for low loss and flat pass-band WDM (de-) multiplexing[J]. *Optics Express*, Optica Publishing Group, 2013, 21(10): 11652–11658.
- [89] Hongnan Xu Y S. Flat-Top CWDM (De)Multiplexer Based on MZI With Bent Directional Couplers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, 2018, 30(2): 169–172.

- [90] Xu H, Liu L, Shi Y. Polarization-insensitive four-channel coarse wavelength-division (de) multiplexer based on Mach-Zehnder interferometers with bent directional couplers and polarization rotators[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2018, 43(7): 1483–1486.
- [91] Xing P, Viegas J. Broadband CMOS-compatible SOI temperature insensitive Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2015, 23(19): 24098–24107.
- [92] Deng Q, Liu L, Zhang R, et al. Athermal and flat-topped silicon Mach-Zehnder filters[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2016, 24(26): 29577–29582.
- [93] Korai U A, Bermello A H, Strain M J, et al. Design of an athermal interferometer based on tailored subwavelength metamaterials for on-chip microspectrometry[J]. IEEE Photonics Journal, IEEE, 2019, 11(6): 1–11.
- [94] Jeong S-H, Shimura D, Simoyama T, et al. Si-nanowire-based multistage delayed Mach-Zehnder interferometer optical MUX/DeMUX fabricated by an ArF-immersion lithography process on a 300 mm SOI wafer[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2014, 39(13): 3702–3705.
- [95] Munk D, Katzman M, Kaganovskii Y, et al. Eight-channel silicon-photonic wavelength division multiplexer with 17 GHz spacing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE, 2019, 25(5): 1–10.
- [96] Bogaerts W, De Heyn P, Van Vaerenbergh T, et al. Silicon microring resonators[J]. Laser & Photonics Reviews, Wiley Online Library, 2012, 6(1): 47–73.
- [97] Little B E, Chu S T, Haus H A, et al. Microring resonator channel dropping filters[J]. Journal of Lightwave Technology, IEEE, 1997, 15(6): 998–1005.
- [98] Xia F, Rooks M, Sekaric L, et al. Ultra-compact high order ring resonator filters using submicron silicon photonic wires for on-chip optical interconnects[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2007, 15(19): 11934–11941.
- [99] Chen P, Chen S, Guan X, et al. High-order microring resonators with bent couplers for a box-like filter response[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2014, 39(21): 6304–6307.
- [100] Nawrocka M S, Liu T, Wang X, et al. Tunable silicon microring resonator with wide free spectral range[J]. Applied Physics Letters, AIP Publishing, 2006, 89 (7): 071110.
- [101] Xu Q, Fattal D, Beausoleil R G. Silicon microring resonators with 1.5- $\mu\text{m}$  radius[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2008, 16(6): 4309–4315.
- [102] Prabhu A M, Tsay A, Han Z, et al. Ultracompact SOI microring add-drop filter with wide bandwidth and wide FSR[J]. IEEE Photonics Technology Letters, IEEE, 2009, 21(10): 651–653.

- [103] Prabhu A M, Tsay A, Han Z, et al. Extreme miniaturization of silicon add-drop microring filters for VLSI photonics applications[J]. *IEEE Photonics Journal*, IEEE, 2010, 2(3): 436–444.
- [104] Liu D, Zhang C, Liang D, et al. Submicron-resonator-based add-drop optical filter with an ultra-large free spectral range[J]. *Optics Express*, Optica Publishing Group, 2019, 27(2): 416–422.
- [105] Papaioannou S, Fitsios D, Dabos G, et al. On-chip dual-stream DWDM eight-channel-capable SOI-based MUX s/DEMUX s with 40-GHz channel bandwidth[J]. *IEEE Photonics Journal*, IEEE, 2014, 7(1): 1–10.
- [106] Xiao S, Khan M H, Shen H, et al. Multiple-channel silicon micro-resonator based filters for WDM applications[J]. *Optics Express*, Optica Publishing Group, 2007, 15(12): 7489–7498.
- [107] Park S, Kim K-J, Kim I-G, et al. Si micro-ring MUX/DeMUX WDM filters[J]. *Optics Express*, Optica Publishing Group, 2011, 19(14): 13531–13539.
- [108] Dahlem M S, Holzwarth C W, Khilo A, et al. Reconfigurable multi-channel second-order silicon microring-resonator filterbanks for on-chip WDM systems[J]. *Optics Express*, Optica Publishing Group, 2011, 19(1): 306–316.
- [109] Tan Y, Chen S, Dai D. Polarization-selective microring resonators[J]. *Optics Express*, Optica Publishing Group, 2017, 25(4): 4106–4119.
- [110] Tan Y, Dai D. Silicon microring resonators[J]. *Journal of Optics*, IOP Publishing, 2018, 20(5): 054004.
- [111] Wang S, Feng X, Gao S, et al. On-chip reconfigurable optical add-drop multiplexer for hybrid wavelength/mode-division-multiplexing systems[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(14): 2802–2805.
- [112] Pan P, An J, Wang Y, et al. Compact 4-channel AWGs for CWDM and LAN WDM in data center monolithic applications[J]. *Optics and Laser Technology*, Elsevier, 2015, 75: 177–181.
- [113] Pathak S, Dumon P, Van Thourhout D, et al. Comparison of AWGs and echelle gratings for wavelength division multiplexing on silicon-on-insulator[J]. *IEEE Photonics Journal*, IEEE, 2014, 6(5): 1–9.
- [114] Zou J, Jiang X, Xia X, et al. Ultra-compact birefringence-compensated arrayed waveguide grating triplexer based on silicon-on-insulator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, 2013, 31(12): 1935–1940.
- [115] Zhang J, An J, Zhao L, et al. Ultra compact triplexing filters based on SOI nanowire AWGs[J]. *Journal of Semiconductors*, IOP Publishing, 2011, 32(4): 044009.
- [116] Chen S, Fu X, Wang J, et al. Compact dense wavelength-division (de) multiplexer utilizing a

- bidirectional arrayed-waveguide grating integrated with a Mach-Zehnder interferometer[J]. Journal of Lightwave Technology, IEEE, 2015, 33(11): 2279–2285.
- [117] Dai D, Fu X, Shi Y, et al. Experimental demonstration of an ultracompact Si-nanowire-based reflective arrayed-waveguide grating (de) multiplexer with photonic crystal reflectors[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2010, 35(15): 2594–2596.
- [118] Dumon P, Bogaerts W, Van Thourhout D, et al. Wavelength-selective components in SOI photonic wires fabricated with deep UV lithography[A]. First IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2004.[C]. IEEE, 2004: 28–30.
- [119] Sasaki K, Ohno F, Motegi A, et al. Arrayed waveguide grating of  $70 \times 60 \mu\text{m}^2$  size based on Si photonic wire waveguides[J]. Electronics Letters, The Institution of Engineering & Technology, 2005, 41(14): 1.
- [120] Dai D, Liu L, Wosinski L, et al. Design and fabrication of an ultrasmall overlapped AWG demultiplexers based on  $\alpha$ -Si nanowire waveguides[J]. Electronics Letters, 2006, 42(7): 400–402.
- [121] Bogaerts W, Dumon P, Van Thourhout D, et al. Compact wavelength-selective functions in silicon-on-insulator photonic wires[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE, 2006, 12(6): 1394–1401.
- [122] Dumon P, Bogaerts W, Van Thourhout D, et al. Compact wavelength router based on a silicon-on-insulator arrayed waveguide grating pigtailed to a fiber array[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2006, 14(2): 664–669.
- [123] Fang Q, Liow T-Y, Song J F, et al. WDM multi-channel silicon photonic receiver with 320 Gbps data transmission capability[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2010, 18(5): 5106–5113.
- [124] Fu X, Dai D. Ultra-small Si-nanowire-based 400 GHz-spacing  $15 \times 15$  arrayed-waveguide grating router with microbends[J]. Electronics Letters, The Institution of Engineering & Technology, 2011, 47(4): 1.
- [125] Kyotoku B B, Chen L, Lipson M. Broad band 1 nm channel spacing silicon-on-insulator wavelength division multiplexer[A]. 2009 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2009 Conference on Quantum electronics and Laser Science Conference[C]. IEEE, 2009: 1–2.
- [126] Cheung S, Guan B, Djordjevic S, et al. Low-loss and high contrast silicon-on-insulator (SOI) arrayed waveguide grating[A]. 2012 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)[C]. IEEE, 2012: 1–2.

- [127] Cheung S, Su T, Okamoto K, et al. Ultra-compact silicon photonic 512×512 25 GHz arrayed waveguide grating router[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE, 2013, 20(4): 310–316.
- [128] Guerber S, Alonso Ramos C, Le Roux X, et al. Polarization independent and temperature tolerant AWG based on a silicon nitride platform[J]. Optics Letters, 2020, 45(23): 6559–6562.
- [129] Simard A D, LaRochelle S. Complex apodized Bragg grating filters without circulators in silicon-on-insulator[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2015, 23(13): 16662–16675.
- [130] Wang J, Chen L R. Low crosstalk Bragg grating/Mach-Zehnder interferometer optical add-drop multiplexer in silicon photonics[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2015, 23(20): 26450–26459.
- [131] Shi W, Wang X, Lin C, et al. Silicon photonic grating-assisted, contra-directional couplers[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2013, 21(3): 3633–3650.
- [132] Naghdi B, Chen L R. Silicon photonic contradirectional couplers using subwavelength grating waveguides[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2016, 24(20): 23429–23438.
- [133] Jiang J, Qiu H, Wang G, et al. Silicon lateral-apodized add–drop filter for on-chip optical interconnection[J]. Applied Optics, Optica Publishing Group, 2017, 56(30): 8425–8429.
- [134] Qiu H, Jiang J, Hu T, et al. Silicon add-drop filter based on multimode Bragg sidewall gratings and adiabatic couplers[J]. Journal of Lightwave Technology, IEEE, 2017, 35(9): 1705–1709.
- [135] Liu D, Zhang M, Shi Y, et al. Four-Channel CWDM (de)Multiplexers Using Cascaded Multimode Waveguide Gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(4): 192–195.
- [136] Shi W, Yun H, Lin C, et al. Ultra-compact, flat-top demultiplexer using anti-reflection contra-directional couplers for CWDM networks on silicon[J]. Optics Express, OSA, 2013, 21(6): 6733–6738.
- [137] Liu D, Zhang M, Dai D. Low-loss and low-crosstalk silicon triplexer based on cascaded multimode waveguide gratings[J]. Optics Letters, OSA, 2019, 44(6): 1304–1307.
- [138] Liu D, Dai D. Silicon-based polarization-insensitive optical filter with dual-gratings[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2019, 27(15): 20704–20710.
- [139] Naghdi B, Chen L R. Silicon Photonic Four-Channel Optical Add-Drop Multiplexer Enabled by Subwavelength Grating Waveguides[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4): 1–10.
- [140] Mu D, Qiu H, Jiang J, et al. A four-channel DWDM tunable add/drop demultiplexer based on silicon waveguide Bragg gratings[J]. IEEE Photonics Journal, IEEE, 2019, 11(1): 1–8.

- [141] Brouckaert J, Bogaerts W, Dumon P, et al. Planar concave grating demultiplexer fabricated on a nanophotonic silicon-on-insulator platform[J]. *Journal of Lightwave Technology, IEEE*, 2007, 25(5): 1269–1275.
- [142] Brouckaert J, Bogaerts W, Selvaraja S, et al. Planar concave grating demultiplexer with high reflective Bragg reflector facets[J]. *IEEE Photonics Technology Letters, IEEE*, 2008, 20(4): 309–311.
- [143] Horst F. Silicon integrated waveguide devices for filtering and wavelength demultiplexing[A]. 2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference[C]. IEEE, 2010: 1–3.
- [144] Cheben P, Halir R, Schmid J H, et al. Subwavelength integrated photonics[J]. *Nature, Springer US*, 2018, 560(7720): 565–572.
- [145] Meng Y, Chen Y, Lu L, et al. Optical meta-waveguides for integrated photonics and beyond[J]. *Light: Science & Applications, Nature Publishing Group UK London*, 2021, 10(1): 235.
- [146] Staude I, Schilling J. Metamaterial-inspired silicon nanophotonics[J]. *Nature Photonics, Nature Publishing Group*, 2017, 11(5): 274–284.
- [147] Sun L, Zhang Y, He Y, et al. Subwavelength structured silicon waveguides and photonic devices[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(6): 1321–1340.
- [148] Hunt J, Tyler T, Dhar S, et al. Planar, flattened Luneburg lens at infrared wavelengths[J]. *Optics Express, Optica Publishing Group*, 2012, 20(2): 1706–1713.
- [149] Valentine J, Li J, Zentgraf T, et al. An optical cloak made of dielectrics[J]. *Nature Materials, Nature Publishing Group UK London*, 2009, 8(7): 568–571.
- [150] Gabrielli L H, Cardenas J, Poitras C B, et al. Silicon nanostructure cloak operating at optical frequencies[J]. *Nature Photonics, Nature Publishing Group UK London*, 2009, 3(8): 461–463.
- [151] Zhao R, Huang L, Wang Y. Recent advances in multi-dimensional metasurfaces holographic technologies[J]. *PhotoniX, Springer*, 2020, 1: 1–24.
- [152] Zhang Y, He Y, Wang H, et al. Ultra-broadband mode size converter using on-chip metamaterial-based Luneburg lens[J]. *ACS Photonics, ACS Publications*, 2020, 8(1): 202–208.
- [153] Ye C, Dai D. Ultra-compact broadband 2×2 3 dB power splitter using a subwavelength-grating-assisted asymmetric directional coupler[J]. *Journal of Lightwave Technology, IEEE*, 2020, 38(8): 2370–2375.
- [154] Xu H, Shi Y. Ultra-sharp multi-mode waveguide bending assisted with metamaterial-based mode

- converters[J]. *Laser & Photonics Reviews*, Wiley Online Library, 2018, 12(3): 1700240.
- [155] Luque-González J M, Halir R, Wangüemert-Pérez J G, et al. An ultracompact GRIN-lens-based spot size converter using subwavelength grating metamaterials[J]. *Laser & Photonics Reviews*, Wiley Online Library, 2019, 13(11): 1900172.
- [156] Xu H, Shi Y. Metamaterial-based maxwell's fisheye lens for multimode waveguide crossing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, Wiley Online Library, 2018, 12(10): 1800094.
- [157] Wang C, Li Z, Kim M H, et al. Metasurface-assisted phase-matching-free second harmonic generation in lithium niobate waveguides[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 2098.
- [158] Molesky S, Lin Z, Piggott A Y, et al. Inverse design in nanophotonics[J]. *Nature Photonics*, Nature Publishing Group UK London, 2018, 12(11): 659–670.
- [159] Wiecha P R, Arbouet A, Girard C, et al. Deep learning in nano-photonics: inverse design and beyond[J]. *Photonics Research*, Optica Publishing Group, 2021, 9(5): B182–B200.
- [160] Liu B, Wan Y, Liu Y. Ultracompact Polarization-Insensitive Waveguide Crossing Based on Dielectric Metasurface[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2024, 36(1): 39–42.
- [161] Chang W, Lu L, Ren X, et al. Ultra-compact mode (de) multiplexer based on subwavelength asymmetric Y-junction[J]. *Optics Express*, Optica Publishing Group, 2018, 26(7): 8162–8170.
- [162] Pollock C, Lipson M. Integrated photonics[M]. Springer, 2003, 20.
- [163] Lifante G. Integrated photonics: fundamentals[M]. John Wiley & Sons, 2003.
- [164] Chiang K S. Analysis of the effective-index method for the vector modes of rectangular-core dielectric waveguides[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, IEEE, 1996, 44(5): 692–700.
- [165] Abu-Elmaaty B E, Sayed M S, Pokharel R K, et al. General silicon-on-insulator higher-order mode converter based on substrip dielectric waveguides[J]. *Applied Optics*, Optica Publishing Group, 2019, 58(7): 1763–1771.
- [166] Choy T C. Effective medium theory: principles and applications[M]. Oxford University Press, 2015, 165.
- [167] Zhang X, Wu Y. Effective medium theory for anisotropic metamaterials[J]. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group UK London, 2015, 5(1): 7892.
- [168] Lalanne P, Lemercier-Lalanne D. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures[J]. *Journal of Modern Optics*, Taylor & Francis, 1996, 43(10): 2063–2085.
- [169] Slovick B A, Yu Z G, Krishnamurthy S. Generalized effective-medium theory for

- metamaterials[J]. Physical Review B, APS, 2014, 89(15): 155118.
- [170] Rytov S. Electromagnetic properties of a finely stratified medium[J]. Soviet Physics JEPT, 1956, 2: 466–475.
- [171] Siew S Y, Li B, Gao F, et al. Review of Silicon Photonics Technology and Platform Development[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(13): 4374–4389.
- [172] Dong P, Xie C, Chen L, et al. 112-Gb/s monolithic PDM-QPSK modulator in silicon[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2012, 20(26): B624–B629.
- [173] Feng L-T, Zhang M, Zhou Z-Y, et al. On-chip coherent conversion of photonic quantum entanglement between different degrees of freedom[J]. Nature Communications, Nature Publishing Group, 2016, 7(1): 11985.
- [174] Sychev D V, Ulanov A E, Tiunov E S, et al. Entanglement and teleportation between polarization and wave-like encodings of an optical qubit[J]. Nature Communications, Nature Publishing Group, 2018, 9(1): 3672.
- [175] Osgood R M, Panoiu N C, Dadap J I, et al. Engineering nonlinearities in nanoscale optical systems: Physics and applications in dispersion-engineered silicon nanophotonic wires[J]. Advances in Optics and Photonics, 2009, 1(1): 162–235.
- [176] Leuthold J, Koos C, Freude W. Nonlinear silicon photonics[J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 535–544.
- [177] Dai D, 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: Science & Applications, Nature Publishing Group, 2012, 1(3): e1.
- [178] Fang B, Wang Z, Gao S, et al. Manipulating guided wave radiation with integrated geometric metasurface[J]. Nanophotonics, 2021, 11(9): 1923–1930.
- [179] Xu H, Shi Y. On-chip silicon TE-pass polarizer based on asymmetrical directional couplers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, IEEE, 2017, 29(11): 861–864.
- [180] Kim Y, Lee M H, Kim Y, et al. High-extinction-ratio directional-coupler-type polarization beam splitter with a bridged silicon wire waveguide[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2018, 43(14): 3241–3244.
- [181] Li C, Dai D. Compact polarization beam splitter for silicon photonic integrated circuits with a 340-nm-thick silicon core layer[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2017, 42(21): 4243–4246.

- [182] Zhang Y, He Y, Wu J, et al. High-extinction-ratio silicon polarization beam splitter with tolerance to waveguide width and coupling length variations[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2016, 24(6): 6586–6593.
- [183] Wu H, Tan Y, Dai D. Ultra-broadband high-performance polarizing beam splitter on silicon[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2017, 25(6): 6069–6075.
- [184] Wang X, Quan X, Zhang W, et al. Ultra-Small and Fabrication-Tolerant Silicon Polarization Beam Splitter Using Sharp Bent[J]. IEEE Photonics Journal, IEEE, 2018, 10(5): 1–7.
- [185] Li C, Zhang M, Bowers J E, et al. Ultra-broadband polarization beam splitter with silicon subwavelength-grating waveguides[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2020, 45(8): 2259–2262.
- [186] Dai S, Xiao J. Compact and broadband silicon-based polarization beam splitter using asymmetric directional couplers embedded with subwavelength gratings and slots[J]. Applied Optics, Optica Publishing Group, 2022, 61(1): 126–134.
- [187] Guan H, Novack A, Streshinsky M, et al. CMOS-compatible highly efficient polarization splitter and rotator based on a double-etched directional coupler[J]. Optics Express, Optical Society of America, 2014, 22(3): 2489–2496.
- [188] Tan K, Huang Y, Lo G-Q, et al. Experimental realization of an O-band compact polarization splitter and rotator[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2017, 25(4): 3234–3241.
- [189] Xu H, Shi Y. Ultra-broadband silicon polarization splitter-rotator based on the multi-mode waveguide[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2017, 25(15): 18485–18491.
- [190] Zhao Y, Qiu C, Wu A, et al. Broadband polarization splitter-rotator and the application in WDM receiver[J]. IEEE Photonics Journal, IEEE, 2019, 11(1): 1–10.
- [191] Melikyan A, Dong P. Adiabatic mode converters for silicon photonics: Power and polarization broadband manipulators[J]. APL Photonics, AIP Publishing LLC, 2019, 4(3): 030803.
- [192] Tian Y, Qiu J, Liu C, et al. Compact polarization beam splitter with a high extinction ratio over S+ C+ L band[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2019, 27(2): 999–1009.
- [193] Zafar H, Moreira P, Taha A M, et al. Compact silicon TE-pass polarizer using adiabatically-bent fully-etched waveguides[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2018, 26(24): 31850–31860.
- [194] Xu H, Dai D, Shi Y. Anisotropic metamaterial-assisted all-silicon polarizer with 415-nm bandwidth[J]. Photonics Research, 2019, 7(12): 1432–1439.

- [195] Fu P H, Huang T Y, Fan K W, et al. Optimization for ultrabroadband polarization beam splitters using a genetic algorithm[J]. *IEEE Photonics Journal*, IEEE, 2019, 11(1): 1–11.
- [196] Chang W, Xu S, Cheng M, et al. Inverse design of a single-step-etched ultracompact silicon polarization rotator[J]. *Optics Express*, Optica Publishing Group, 2020, 28(19): 28343–28351.
- [197] Yu Z, Cui H, Sun X. Genetic-algorithm-optimized wideband on-chip polarization rotator with an ultrasmall footprint[J]. *Optics Letters*, Optica Publishing Group, 2017, 42(16): 3093–3096.
- [198] Liu Y, Wang S, Wang Y, et al. Subwavelength polarization splitter-rotator with ultra-compact footprint[J]. *Optics Letters*, Optica Publishing Group, 2019, 44(18): 4495–4498.
- [199] Zhao Y, Xiang J, He Y, et al. Ultra-Compact Silicon Mode (De)Multiplexer Based on Single Dielectric Slot[J]. European Conference on Optical Communications (ECOC), 2020: 1–4.
- [200] Zhao Y, Guo X, Zhang Y, et al. Ultra-compact silicon mode-order converters based on dielectric slots[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3797–3800.
- [201] Zhao Y, Xiang J, He Y, et al. On-Chip Metamaterial Enabled Wavelength (De)Multiplexer[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(7): 2200005.
- [202] Guan X, Chen P, Chen S, et al. Low-loss ultracompact transverse-magnetic-pass polarizer with a silicon subwavelength grating waveguide[J]. *Optics Letters*, Optica Publishing Group, 2014, 39(15): 4514–4517.
- [203] Xiong Y, Xu D X, Schmid J H, et al. High Extinction Ratio and Broadband Silicon TE-Pass Polarizer Using Subwavelength Grating Index Engineering[J]. *IEEE Photonics Journal*, IEEE, 2015, 7(5): 1–7.
- [204] Wu S, Hao J, Zhao Z, et al. Low loss and high extinction ratio all-silicon TM-pass polarizer with reflection removal enabled by contra-mode conversion Bragg-gratings[J]. *Optics Express*, Optica Publishing Group, 2021, 29(17): 27640–27652.
- [205] Zafar H, Odeh M, Khilo A, et al. Low-loss broadband silicon TM-pass polarizer based on periodically structured waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, 2020, 32(17): 1029–1032.
- [206] Kim D W, Lee M H, Kim Y, et al. Ultracompact transverse magnetic mode-pass filter based on one-dimensional photonic crystals with subwavelength structures[J]. *Optics Express*, Optica Publishing Group, 2016, 24(19): 21560–21565.
- [207] Xu Y, Xiao J. Compact and high extinction ratio polarization beam splitter using subwavelength grating couplers[J]. *Optics Letters*, Optica Publishing Group, 2016, 41(4): 773–776.

- [208] Liu L, Deng Q, Zhou Z. Manipulation of beat length and wavelength dependence of a polarization beam splitter using a subwavelength grating[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2016, 41(21): 5126–5129.
- [209] Huang Y, Tu Z, Yi H, et al. Polarization beam splitter based on cascaded step-size multimode interference coupler[J]. Optical Engineering, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2013, 52(7): 077103.
- [210] Li C, Liu D, Dai D. Multimode silicon photonics[J]. Nanophotonics, 2018, 8(2): 227–247.
- [211] Ding Y, Xu J, Da Ros F, et al. On-chip two-mode division multiplexing using tapered directional coupler-based mode multiplexer and demultiplexer[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2013, 21(8): 10376–10382.
- [212] Li Y, Li C, Li C, et al. Compact two-mode (de)multiplexer based on symmetric Y-junction and Multimode interference waveguides[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5781–5786.
- [213] Jiang X, Wu H, Dai D. Low-loss and low-crosstalk multimode waveguide bend on silicon[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2018, 26(13): 17680–17689.
- [214] Chang W, Lu L, Ren X, et al. An Ultracompact Multimode Waveguide Crossing Based on Subwavelength Asymmetric Y-Junction[J]. IEEE Photonics Journal, IEEE, 2018, 10(4): 1–8.
- [215] Sun C, Yu Y, Chen G, et al. On-chip switch for reconfigurable mode-multiplexing optical network[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2016, 24(19): 21722–21728.
- [216] Lee B-T, Shin S-Y. Mode-order converter in a multimode waveguide[J]. Optics Letters, 2003, 28(18): 1660–1662.
- [217] Wang J, He S, Dai D. On-chip silicon 8-channel hybrid (de) multiplexer enabling simultaneous mode-and polarization-division-multiplexing[J]. Laser & Photonics Reviews, Wiley Online Library, 2014, 8(2): L18–L22.
- [218] Hao L, Xiao R, Shi Y, et al. Efficient TE-Polarized Mode-Order Converter Based on High-Index-Contrast Polygonal Slot in a Silicon-on-Insulator Waveguide[J]. IEEE Photonics Journal, IEEE, 2019, 11(2): 1–10.
- [219] Ohana D, Levy U. Mode conversion based on dielectric metamaterial in silicon[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2014, 22(22): 27617–27631.
- [220] Liu L, Xu Y, Wen L, et al. Design of a compact silicon-based TM-polarized mode-order converter based on shallowly etched structures[J]. Applied Optics, Optica Publishing Group, 2019, 58(33): 9075–9081.

- [221] Cheng Z, Wang J, Yang Z, et al. Sub-wavelength grating assisted mode order converter on the SOI substrate[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2019, 27(23): 34434–34441.
- [222] Greenberg Y, Karabchevsky A. Spatial eigenmodes conversion with metasurfaces engraved in silicon ridge waveguides[J]. Applied Optics, Optica Publishing Group, 2019, 58(22): F21–F25.
- [223] Frandsen L H, Elesin Y, Frellsen L F, et al. Topology optimized mode conversion in a photonic crystal waveguide fabricated in silicon-on-insulator material[J]. Optics Express, Optica Publishing Group, 2014, 22(7): 8525–8532.
- [224] Zhang Z, Yu Y, Fu S. Broadband On-Chip Mode-Division Multiplexer Based on Adiabatic Couplers and Symmetric Y-Junction[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 1–6.
- [225] Xu L, Jacques M, Plant D V, et al. Ultra-Broadband and Compact Two-Mode Multiplexer Based on Subwavelength-Grating-Slot-Assisted Adiabatic Coupler for the Silicon-on-Insulator Platform[J]. Journal of Lightwave Technology, IEEE, 2019, 37(23): 5790–5800.
- [226] Wang Z, Yao C, Zhang Y, et al. Ultra-Compact and Broadband Silicon Two-Mode Multiplexer Based on Asymmetric Shallow Etching on a Multi-Mode Interferometer[J]. 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, OFC 2020 - Proceedings, 2020, 1: 5–7.
- [227] Liu A, Liao L, Chetrit Y, et al. Wavelength division multiplexing based photonic integrated circuits on silicon-on-insulator platform[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE, 2009, 16(1): 23–32.
- [228] Liu D, Xu H, Tan Y, et al. Silicon photonic filters[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2021, 63(9): 2252–2268.
- [229] Qiu H, Jiang J, Yu P, et al. Silicon band-rejection and band-pass filter based on asymmetric Bragg sidewall gratings in a multimode waveguide[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2016, 41(11): 2450–2453.
- [230] Qiu H, Lin L, Yu P, et al. Narrow-Band Add-Drop Filter Based on Cladding-Modulated Apodized Multimode Bragg Grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(21): 5542–5547.
- [231] Qiu H, Niu J, Liang X, et al. Flat-top, sharp-edge add-drop filters using complementary-misalignment-modulated grating-assisted contradirectional couplers[J]. Journal of Lightwave Technology, IEEE, 2021, 39(18): 5896–5901.
- [232] Hu Y, Jenkins R M, Gardes F Y, et al. Wavelength division (de)multiplexing based on dispersive self-imaging[J]. Optics Letters, OSA, 2011, 36(23): 4488–4490.
- [233] Morioka T, Awaji Y, Ryf R, et al. Enhancing optical communications with brand new fibers[J].

- IEEE Communications Magazine, IEEE, 2012, 50(2): s31–s42.
- [234] Li G, Bai N, Zhao N, et al. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication[J]. Advances in Optics and Photonics, Optica Publishing Group, 2014, 6(4): 413–487.
- [235] Fazea Y, Mezhuyev V. Selective mode excitation techniques for mode-division multiplexing: A critical review[J]. Optical Fiber Technology, Elsevier, 2018, 45: 280–288.
- [236] Dai D, Bowers J E. Silicon-based on-chip multiplexing technologies and devices for Peta-bit optical interconnects[J]. Nanophotonics, De Gruyter, 2014, 3(4–5): 283–311.
- [237] He Y, Zhang Y, Wang H, et al. Design and experimental demonstration of a silicon multi-dimensional (de) multiplexer for wavelength-, mode-and polarization-division (de) multiplexing[J]. Optics Letters, Optica Publishing Group, 2020, 45(10): 2846–2849.
- [238] He Y, Li X, Zhang Y, et al. On-chip metamaterial-enabled high-order mode-division multiplexing[J]. Advanced Photonics, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2023, 5(5): 056008.
- [239] Yang Y, Sun L, Zhang Y, et al. Efficient and Broadband Four-Wave Mixing in a Compact Silicon Subwavelength Nanohole Waveguide[J]. Advanced Optical Materials, Wiley Online Library, 2019, 7(21): 1900810.
- [240] Corcoran B, Monat C, Grillet C, et al. Green light emission in silicon through slow-light enhanced third-harmonic generation in photonic-crystal waveguides[J]. Nature Photonics, 2009, 3(4): 206–210.
- [241] Stone J R, Lu X, Moille G, et al. Wavelength-accurate nonlinear conversion through wavenumber selectivity in photonic crystal resonators[J]. Nature Photonics, Nature Publishing Group UK London, 2024, 18(2): 192–199.
- [242] Redding B, Liew S F, Sarma R, et al. Compact spectrometer based on a disordered photonic chip[J]. Nature Photonics, Nature Publishing Group, 2013, 7(9): 746–751.
- [243] Hartmann W, Varytis P, Gehring H, et al. Waveguide-integrated broadband spectrometer based on tailored disorder[J]. Advanced Optical Materials, Wiley Online Library, 2020, 8(6): 1901602.
- [244] Hartmann W, Varytis P, Gehring H, et al. Broadband Spectrometer with Single-Photon Sensitivity Exploiting Tailored Disorder[J]. Nano Letters, 2020, 20(4): 2625–2631.
- [245] Li A, Bao F, Wu Y, et al. An Inversely Designed Reconstructive Spectrometer on SiN Platform[J]. Laser & Photonics Reviews, 2024: 2301107.

- 
- [246] Li A, Fainman Y. On-chip spectrometers using stratified waveguide filters[J]. *Nature Communications*, Nature Publishing Group UK London, 2021, 12(1): 2704.
  - [247] Yang J, Cui K, Cai X, et al. Ultraspectral imaging based on metasurfaces with freeform shaped meta-atoms[J]. *Laser & Photonics Reviews*, Wiley Online Library, 2022, 16(7): 2100663.
  - [248] Zhao Y, Guo X, Xiang J, et al. Miniaturized computational spectrometer based on two-photon absorption[J]. *Optica*, Optica Publishing Group, 2024, 11(3): 399–402.

## 附录 缩略语

ADC	Asymmetric Directional Coupler	非对称定向耦合器
AOC	Active Optical Cable	有源光缆
AWG	Arrayed-Waveguide-Grating	阵列波导光栅
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor	互补金属氧化物半导体
CMT	Coupled Mode theory	耦合模理论
EBL	Electron Beam Lithography	电子束曝光
ECOC	European Conference on Optical Communications	欧洲光通信会议
EDFA	Erbium-doped Fiber Amplifiers	掺铒激光放大器
EDG	Echelle Diffraction Grating	反射式阶梯光栅
EIM	Effective Index Method	有效折射率方法
EMT	Effective Medium Theory	有效介质理论
FDTD	Finite Difference Time Domain	时域有限差分法
FEC	Forward Error Correction	前向纠错
FPC	Fiber Polarization Controller	光纤偏振控制器
FSR	Free-Spectral Range	自由频谱范围
GACDC	Grating Assisted Contra-Directional Coupler	光栅辅助反向耦合器
GPU	Graphics Processing Unit	图像处理单元
ICP	Inductively Coupled Plasma	电感耦合等离子体
IL	Insertion Loss	插入损耗
IPA	Isopropyl Alcohol	异丙醇
LAN-WDM	Local-area-network Wavelength-division Multiplexing	局域网波分复用
MBE	Molecular Beam Epitaxy	分子束外延
MBG	Multimode Waveguide Bragg grating	多模布拉格光栅波导
MDM	Mode-division Multiplexing	模分复用
MIBK	Methyl Isobutyl Ketone	甲基异丁基酮

MMI	Multi-mode Interferometer	多模干涉耦合器
MRR	Microring Resonator	微环谐振腔
MZI	Mach-Zehnder Interferometer	马赫-曾德尔干涉仪
OSA	Optical Spectrum Analyzer	光谱分析仪
PBS	Polarization Beam Splitter	偏振分束器
PD	Photodetector	光探测器
PDK	Process Design Kit	工艺设计套件
PDL	Polarization Dependent Loss	偏振依赖损耗
PDM	Polarization-division Multiplexing	偏振复用
PECVD	Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition	等离子体增强化学气相沉积
PER	Polarization Extinction Ratio	偏振消光比
PICs	Photonic Integrated Circuits	光子集成芯片
PMD	Polarization Mode Dispersion	偏振相关色散
PR	Polarization Rotator	偏振旋转器
PSR	Polarization Splitter Rotator	偏振分束旋转器
SEM	Scanning Electron Microscope	扫描式电子显微镜
SOI	Silicon on Insulator	绝缘体上硅
SWG	Subwavelength Grating	亚波长光栅
TE	Transverse Electric	横电
TM	Transverse Magnetic	横磁
TSL	Tunable Semiconductor Laser	可调半导体激光器
WBG	Waveguide Bragg Grating	布拉格光栅波导
WDM	Wavelength-division Multiplexing	波分复用
16 QAM	16-ary Quadrature Amplitude Modulation	16 位正交振幅调制

## 攻读博士学位期间已发表或录用的论文

- [1] **Yaotian Zhao**,<sup>†</sup> Xuhan Guo,<sup>†,\*</sup> Jinlong Xiang, Zhenyu Zhao, Yujia Zhang, Xi Xiao,\* Jia Liu, Daigao Chen, and Yikai Su, "Miniaturized computational spectrometer based on two-photon absorption," *Optica*, vol. 11, no. 3, 2024, pp. 399-402.
- [2] **Yaotian Zhao**, Jinlong Xiang, An He, Yu He, Xuhan Guo,\* and Yikai Su, "Metamaterial-enabled fully on-chip polarization-handling devices," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 17, no. 11, 2023, pp. 2300320.
- [3] **Yaotian Zhao**, Jinlong Xiang, Yu He, An He, Yong Zhang, Xuhan Guo,\* Zongyin Yang, and Yikai Su, "On-chip metamaterial enabled wavelength (de)multiplexer," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 16, no. 7, 2022, pp. 2200005.
- [4] **Yaotian Zhao**, Xuhan Guo,\* Yong Zhang, Jinlong Xiang, Kangnian Wang, Hongwei Wang, and Yikai Su, "Ultra-compact silicon mode-order converters based on dielectric slots," *Optics Letters*, vol. 45, no. 13, 2020, pp. 3797-3800.
- [5] **Yaotian Zhao**, Jinlong Xiang, Yu Based He, Xuhan Guo,\* and Yikai Su, "Ultra-Compact Silicon Mode (De)Multiplexer on Single Dielectric Slot," in *Proc. ECOC*, 2020, pp. 1-4
- [6] **Yaotian Zhao**, Xuhan Guo,\* and Yikai Su, "Multi-Channel WDM (De)Multiplexer Based on Multimode Contra-Directional Coupling Using Dielectric etches," in *Proc. ACP*, 2020, M4A.178.
- [7] **Yaotian Zhao**, Xuhan Guo,\* Kangnian Wang, Hongwei Wang, and Yikai Su, "Ultra-Compact Silicon TE-Polarized Mode Converters Combining a Directional Coupler and a Phase Shifter," in *Proc. ACP*, 2019, M3D.4.
- [8] Jinlong Xiang, Zhiyuan Tao, Xingfeng Li, **Yaotian Zhao**, Yu He, Xuhan Guo,\* and Yikai Su,\* "Metamaterial enabled arbitrary on-chip spatial mode manipulation," *Light: Science & Applications*, vol. 11, no. 168, 2022, pp. 1-11.

- [9] Jinlong Xiang, Yujia Zhang, **Yaotian Zhao**, Xuhan Guo,\* and Yikai Su, "All-optical silicon microring spiking neuron," *Photonics Research*, vol. 10, no. 4, 2022, pp. 939-946.
- [10] Yuan Wang, **Yaotian Zhao**, Jinlong Xiang, Xuhan Guo,\* Jianji Dong, Xinliang Zhang, and Yikai Su, "Ultra-compact band-pass and band-stop tunable filters based on loop-cascaded nanobeam structure," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 33, no. 19, 2021, pp. 1109-1112.
- [11] Jinlong Xiang, Zhiyuan Tao, **Yaotian Zhao**, Xuhan Guo,\* and Yikai Su, "Scalable Metasurface Building Blocks for Arbitrary On-chip High-order Mode Manipulation," in *Proc. ECOC*, 2020, pp. 1-4.
- [12] Yuan Wang, **Yaotian Zhao**, Kangnian Wang, Xuhan Guo,\* and Yikai Su, "Ultra-Compact Bandwidth Tunable Filter via Subwavelength Grating-Assisted Contra-Directional Coupler Employing Double Grating Arrays Perturbations," in *Proc. ACP*, 2020, M4A.159, Best Poster Award.
- [13] Jinlong Xiang, **Yaotian Zhao**, Xuhan Guo,\* and Yikai Su, "Integrated Neuromorphic Information Processing with Electrically-injected Microring Spiking Neuron," in *Proc. OFC*, 2024.
- [14] An He, Jinlong Xiang, **Yaotian Zhao**, Yuchen Yin, Yvja Zhang, Xuhan Guo,\* and Yikai Su, "Broadband and Low-Loss Metamaterial Silicon Nitride Edge Coupler," in *Proc. OFC*, 2024.

## 攻读博士学位期间参与的科研项目

- [1] 科技部重点研发计划：可编程光子滤波芯片研究(2019YFB2203101), 2020-2022.
- [2] 国家自然科学基金委：面向片上光互连的硅基亚波长光栅器件研究(61835008), 2019-2024.

## 致 谢

我想要由衷地感谢所有在攻读博士期间给予支持和帮助的人，无论是在学术上、生活中还是情感上，你们的支持都是我前进的动力！

首先，我要特别感谢我的导师郭旭涵老师。郭老师对我的耐心指导和谆谆教诲使我能够在科研道路上稳步前行。从一个刚刚本科毕业，对科研懵懵懂懂的小孩子，逐渐成长为可以独当一面的博士生，这一路的成长离不开郭老师的悉心栽培与引导。在科研方面，郭老师对我进行了耐心的教导，为我的论文把好每一道关，在许多深夜和凌晨帮我修改论文，和我讨论课题。在生活方面，郭老师注重我们的身心健康，带着我们一起跑步，带着我们一起聚餐娱乐，给我们设立运动基金。在为人处世方面，郭老师是一个非常绅士友好的人，为我提供了一直以来学习的榜样，也为我就业择业提供了丰富的人生经验。

感谢郭老师给我提供的平台，让我有机会接触最前沿的科研领域，充足的研究经费，舒适的生活保障，张弛有度的科研生活，融洽的实验室氛围，这让我攻读博士的这五年生活过的非常开心，也取得了不错的成果。

感谢课题组里的小伙伴们，一路走来教会了我很多事情，分担了我许多的烦恼和快乐，留下了许多共同的回忆。感谢何安师兄，教会了我很多为人处世的道理，为我提供了很多学业上的指导，带着我吃吃喝喝，过得开心愉快。感谢王康年师兄教会了我具体的实验方法。感谢王远师兄和徐锦师兄，带我了解研究生的快乐，让我见识了很多学习之外的有趣事情。感谢金龙，在我们一起攻读博士学位的日子里，不仅在科研上给我提供了很多灵感和支持，也不断督促着我戒骄戒躁，持续不断的努力。金龙身上的踏实、聪慧、耐心、靠谱、友善一直持续不断的影响着我。感谢金龙帮我一起完善实验方案，帮我检查论文和提出修改意见。感谢振宇，不仅在代码软件上帮助我很多，身上的实干精神和对研究的专注与热爱也一直不断地影响着我。感谢钰嘉，给我们工科生的科研生活中融入许多人文主义的关怀，让我在科研之外去思考人生的追求和社会的公义。感谢我们组里的法国人 Axel 和 Gulliver，帮我检查论文和画图渲染。感谢胡璇师妹和澍辰师弟，提高了我对如何带师弟师妹的认知，也帮我完成了很多任务。感谢课题组的每一位成员，张沛、殷宇琛、徐祎辰、陈有略、肖杰、孙建飞、吴伟璐、徐超俊，有你们的共同努力和付出才会有这么优秀的课题组。

感谢实验室里的其他老师和同学，也是我人生路上学习的榜样。感谢 OTIP 的苏

翼凯老师，感谢苏老师为我们实验室提供的充足的实验设备、丰厚的科研经费和张弛有度的科研氛围，苏老师的科研品味和学术追求也是我学习的榜样。感谢实验室的邱辞源老师、张永老师、孙璐老师以及 AEMD 平台的工艺老师，感谢他们在实验设备、加工测试等方面提供的帮助。感谢实验室的谢卫强、纪幸辰老师，在他们身上我学到了先进的科研理念、技术和精神。感谢我好室友杜宇晗，一起操持寝室里的装修卫生，也陪我在寝室度过了疫情。感谢张一博好兄弟，陪我一起吃吃喝喝，运动锻炼。感谢张子涵，告诉我人生不是线性成长的，给我很多启发。感谢朱庆民师兄，安韶华师兄，给我提供了很多人生经验。感谢何宇博士、王洪炜博士，为我提供了很多学习经验，在模式复用技术上为我提供了很多指导，也带着我吃吃喝喝，见识了很多以前没接触过的事情。

感谢我的女朋友郑超，在我攻读博士期间一直陪伴着我，给予我无尽的理解、支持和鼓励，让我感到无比幸福和坚定。不仅带着我一起学习科研，也带着我一起吃喝玩乐，身上踏实耐心认真温柔可爱的性格也一直影响着我。

最后要感谢我的家人，是你们在我需要的时候给予我最无私的支持和鼓励。你们的爱是我永远的动力！