



中山大學  
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

# 博士学位论文

## 遗传算法优化的光子器件

作者姓名： 许鹏飞

指导教师： 余思远 教授 中山大学

\_\_\_\_\_

学位类别： 工学博士

学科专业： 光学工程

培养单位： 中山大学电子与信息工程学院

2019 年 6 月

**Genetic Algorithm Optimized Photonic devices**

A dissertation submitted to the  
Sun Yat-sen University  
in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of  
Doctor of Engineering  
in Optical Engineering  
By  
Pengfei Xu  
Supervisor: Professor Siyuan Yu

School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen  
University.

**June, 2019**

## 中山大学 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。尽我所知，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研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

## 中山大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中山大学有关保存和使用学位论文的规定，即中山大学有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

## 摘要

随着计算机性能的不断发展和微加工工艺和精度的不断提升，人们意识到，可以摆脱常规的解析和经验方法的局限，在纯粹数值计算的更高自由度的舞台上进行光子器件设计。通过逆向思维进行物质场设计，如调整介质材料的结构和位置分布，进行精确的光场操控，可以得到需要的器件功能。通过纯粹数值计算的光子器件，可以在满足器件功能的情况下，极大的减小光子器件的尺寸，缩小芯片的面积并降低成本等，具有现实意义。

计算机的整体浮点计算性能呈“摩尔定律”式增长，然而由于微处理器的铜导线的物理带宽限制，微处理器的单核心性能已经出现难以逾越的瓶颈。纯粹粗暴的数值计算将难以满足尺寸越来越大、功能越来越复杂的电磁场求解。需要通过精妙、高效、低能耗、低时间周期的光子器件的设计和优化算法，来充分调用不断发展的分布式的性能资源。本论文的主要工作，是通过在光子器件设计中引入遗传算法优化，实现了三种紧凑高效的光子器件。有一步刻蚀的下置硅光栅反射镜的氮化硅光栅耦合器、超材料硅波导的硅—氮化硅层间耦合器、以及基于超材料电磁响应的长通滤波器等。

1、一步刻蚀的下置硅光栅反射镜的氮化硅光栅耦合器：在借鉴下置硅光栅反射镜的氮化硅光栅耦合器的高性能方案下，通过加工复杂度和器件性能的权衡折中，提出了一种一步刻蚀的光栅耦合器设计方案。通过简单的光栅耦合器制备流程，实现了-2.5dB的耦合效率和65nm的1dB带宽的变迹光栅耦合器性能，以及-3.6dB耦合效率和70nm的1dB带宽的均匀光栅耦合器的性能。

2、超材料硅波导的硅—氮化硅层间耦合器：通过遗传算法优化，实现超材料硅波导与氮化硅波导之间的差拍层间耦合。还采用了创新的双层氮化硅波导，既解决了硅波导与氮化硅波导之间的高容差度层间耦合，也满足了足够大的层间间隔和足够小的层间串扰。最终实现了-0.6dB的层间耦合损耗，且1dB带宽覆盖了1530-1570nm的40nm波段。

3、基于超材料电磁响应的长通滤波器：受周期晶格超材料的米氏谐振的长通滤波特性的启发，通过遗传算法优化了一个紧凑的超材料的长通光子滤波器，在 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ 的器件面积下实现了长通滤波功能。而且还研究了通过器件版图缩放和器件级联，实现了长通滤波器过渡带波长偏移和过渡带斜率增强的特性。最终，在长波长1550nm处实现-0.5851dB的低插入损耗和短波长1450nm处>20dB的

功率衰减。

通过遗传算法优化的上述三个光子器件，说明了遗传算法在光子集成器件设计中具有广泛的应用前景和潜力，在阿姆达尔定律推动下的多核心时代，遗传算法将在光子集成器件设计中发挥更加重要的作用。

**关键词：** 遗传算法，光子器件设计，光栅耦合器，层间耦合器，长通滤波器

## Abstract

With the fast development of the computer performance and the precision of CMOS fabrication, people realize that, we can overcome the restrictions from traditional analytical and empirical photonic design methods. By numerical optimization methods, we can reversely design the material field, adjust the material structures and distributions to precisely control the electromagnetic field of light and achieve versatile functions. Numerically optimized photonic devices can not only fulfill the desired functions, but greatly reduce the device footprint, and then reduce the cost of the photonic chips and push forward the applications.

Guided by the Moore's Law, the computer flop rates had been improving exponentially in the past decades, however, due to the limitation of the copper wire bandwidth within integrated circuits, the microprocessors are facing an insurmountable bottleneck of clock rate and the single core performance. Simple and crude numerical algorithms are not competent for the larger footprint and complex electromagnetic computations. While a smart, efficient, low power and time consuming photonic device design algorithms are required to use the multi-core resources.

In this dissertation, the genetic algorithm is introduced into the photonic device design and three compact and high performance photonic devices are designed: one-step-etched silicon nitride grating coupler with beneath silicon grating reflector, metamaterial silicon waveguide interlayer coupler with double silicon nitride layers, and silicon metamaterial longpass filters :

1、the silicon nitride grating coupler with bottom silicon grating reflector scheme is proved to be excellent in improving the coupling performance. By balancing the performance and fabrication complexity, we proposed a one-step-etch grating coupler design, and can be fabricated by convenient fabrication process. And finally we achieved a apodized grating coupler with -2.5dB efficiency and 65nm 1dB bandwidth, and a uniform grating coupler with -3.6dB efficiency and 70nm 1dB bandwidth.

2、gradient index metamaterial silicon waveguide is employed to match with silicon nitride waveguide refractive index. By using a double layer of silicon nitride waveguide, not only ensure a robust silicon-silicon nitride interlayer coupling, but

ensure a large silicon nitride and silicon layer spacing to reduce the crosstalk. And a metamaterial interlayer coupler is achieved with -0.6dB layer transition and the 1dB bandwidth cover the 1530-1570nm band.

3、inspired by the longpass features of the Mie-resonance in the metamaterial rod lattices, a compact longpass filter is designed by genetic algorithms to achieve the on-chip photonic longpass filtering. And transition band shifting and roll-off enhancement features are also studied by device layout scaling and device cascading. And the longpass filter is fabricated and tested with insertion loss about -0.5851dB at longpass band 1550mn and a >20dB power attenuation at stopband 1450nm.

Three photonics devices are designed by genetic algorithm in this dissertation, indicating that the genetic algorithms are useful and universal methods in the photoinc device designing and optimizations. Moreover, in the multi-core era driven by Amdahl' d law, the genetic algorithm will gradually become a significant tool in the photonic device design and application.

**Keywords:** genetic algorithm, photonic devices, grating couplers, interlayer couplers, longpass filters

## 目 录

<b>第1章 基于数值计算的光子集成器件的发展趋势</b>	1
1.1 光子集成与挑战	1
1.2 计算机运算能力突飞猛进?	2
1.3 光子器件的仿真趋势	5
<b>第2章 遗传算法的基础和应用</b>	12
2.1 遗传算法的思想和简易流程	12
2.2 遗传算法的标准化工具包	15
2.3 遗传算法的应用案例和启发	16
<b>第3章 下置硅光栅反射镜的氮化硅光栅耦合器</b>	18
3.1 光栅耦合器的理论基础	18
3.2 高性能光栅耦合器的调研	22
3.3 基于一次刻蚀的高性能光栅耦合器	27
3.3.1 器件设计方案	27
3.3.2 器件仿真	28
3.3.3 仿真结果	31
3.3.4 器件加工与测试	36
3.4 小结	44
<b>第4章 超材料的层间耦合器</b>	45
4.1 三维混合集成简介	45
4.2 硅与氮化硅层间耦合器的文献调研	46
4.3 基于拍频的超材料层间耦合器	51
4.3.1 方案理念	51
4.3.2 二维仿真	52
4.3.3 三维仿真	54
4.3.4 器件加工与测试	61
4.4 小结	65
<b>第5章 超材料的长通滤波器</b>	66
5.1 超材料的米氏能隙和长通滤波	66
5.2 超材料长通滤波器器件	68
5.3 超材料长通滤波器的制备与测试	77
5.4 小结	81

第6章 总结和展望 .....	82
附录 A 论文相关代码 .....	84
参考文献 .....	85
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果 .....	91
致谢 .....	93

## 图形列表

1.1 光子集成目的，是将原本复杂繁多的光学实验器件(a)，集成到紧凑的光子集成芯片(b)上，像电子集成电路一样，大规模普及应用，推动人类社会的发展。[ <a href="#">图片来源(a) Hau Laboratory (b)Dominick Reuter/MIT</a> ] .....	1
1.2 评测结构TOP500统计的全球前500强超级计算机的浮点性能的发展规律，其中超算的浮点性能以每12年翻1000倍的速率指数增长，为光子集成器件的纯数值设计提供了可能。[ <a href="#">图片来源：TOP500</a> ] .....	3
1.3 摩尔定律驱动下，晶体管数量呈现指数式增长，是依靠逻辑核心数量的提升。随着集成电路铜导线的物理带宽的限制，处理器的时钟频率提升趋于平缓，单线程性能趋于饱和，迫切需要研究更加高效的光学优化算法。[ <a href="#">图片来源：Karl Rupp</a> ] .....	4
1.4 较为主流的光学设计方法，有依靠大样本学习拟合的人工神经网络(a)、通过计算演化梯度的共轭办法（Adjoint method）(b)、以及通过自适应、自学习寻优的进化算法(c)。[ <a href="#">图片来源(b) IAC Publishing (c) Yablonovitch Group, UC Berkeley</a> ] .....	5
1.5 通过光学优化算法，可以在一维、二维、三维的光学上进行优化设计。如通过深度神经网络优化氧化硅/氮化硅的一维光学薄膜(a)；通过共轭办法优化的二维衍射元件，形成用于加速文字和图像识别的衍射深度网络(b)；通过目标优先(objective-first)的共轭方法设计的三维1310/1550nm波长复用集成光子器件。本论文中，三维光子集成器件为研究的重点。[ <a href="#">1–3</a> ] .....	7
1.6 两个简单案例，说明了超材料光子器件的尺寸优势。(a) 斯坦福大学设计的三通道40nm间隔粗波分复用(CWDM)光子集成器件，器件尺寸为 $4 \times 5 \mu\text{m}^2$ 。(b) IBM设计的传统的基于级联马赫-曾德尔八通道5nm间隔的CWDM器件，器件尺寸为 $400 \times 500 \mu\text{m}^2$ 。(c) 希伯来大学设计的波导集成TE0-TE1模式转换器，器件长度仅 $20 \mu\text{m}$ 。(d) 中科院上海微系统与信息技术研究所设计的传统基于方向耦合器的TE0-TE1模式转换器，器件长度为 $260 \mu\text{m}$ 。[ <a href="#">4–7</a> ] .....	8
1.7 超材料集成光子器件的案例，可以实现丰富的功能。如(a)折射率工程、(b)波导模式转换、(c)波长复用、(d)群速度工程、(e)偏振复用、(f)特殊波束表面发射等[ <a href="#">3, 8–12</a> ] .....	11
2.1 遗传算法的树状概念图，遗传算法通过在进化算法的基础上，引入类生物的算法操作，实现了更为直观有效的目标函数优化。生物种群的个体独立，天然具有并行计算的便利，据有现实的应用意义。 ..	12

2.2 遗传算法中，从筛选出的适应度更高的个体中，通过染色体的交叉，形成一部分新的子代染色体。通过染色体上变量的突变，形成另一部分新的子代染色体。子代染色体通过重新组合，拥有了父系染色体的许多优异特性；也通过变异生成的新的染色体，丰富了多样性。	13
2.3 遗传算法的基础程序框图。程序的主体是个迭代的循环，像是生物繁衍的生生不息。通过个体筛选、交叉、变异等生物操作，实现了个体平均适应度的逐步提升，并最终改善、解决问题。 ······	14
2.4 开源的遗传算法工具包。(a) 基于python的deap工具包。(b)MATLAB内置的optimtool工具包。(c)GEATbx工具包。(d) GAOT工具包。[13–16] ···	15
2.5 遗传算法优化器件的案例。 ······	16
 3.1 单模光纤的纤芯尺寸与光子波导的尺寸相差一个数量级，光从单模光纤很难直接耦合到光波导中，常用透镜光纤、倒锥模斑转换器或光栅耦合器来辅助耦合。(b) 常见的光栅耦合器的结构示意图，通过光栅的衍射，改变光的传播方向，实现单模光纤与光波导之间的光耦合。[17] ······	18
3.2 (a) 一般的光栅界面衍射，光栅的上下两端具有不同折射率，倾斜角度入射的光发生光栅衍射时光波矢满足的布拉格条件。(b) 一般光栅界面衍射的特殊情况，当入射的光平行于光栅表面时的衍射情况。当光栅调制的波矢等于入射的光波导模式的有效传播常数 $\beta$ 时，可实现垂直光栅表面的一阶衍射。[17] ······	19
3.3 光栅耦合器的高性能的关键。光从波导中传输到光栅处，受光栅衍射作用向上辐射和向下辐射。均匀光栅的辐射光场近似为能量指数衰减的光场，其中只有匹配单模光纤高斯模式的部分可以实现耦合。	21
3.4 SiNx光栅耦合器的文献调研 (a) 华中科技大学的硅光栅反射镜+氮化硅光栅耦合器方案。(b) 浙江大学的阶梯状光栅和远距离辐射角度映射方案。(c) 多伦多大学的硅光栅反射镜+氮化硅光栅耦合器方案。(d)华中科技大学的倒锥浅刻蚀方案。(e) 新加坡A*STAR的下置DBR反射镜方案。[18–22] ······	24
3.5 已发表的高性能氮化硅光栅耦合器的设计方案简图。(a)通过交替生长高折射率和低折射率材料的下置DBR反射镜方案、(b)通过多次对准刻蚀形成的增强向上辐射的特殊光栅方案、(c)通过沉积高反射率金属形成的下置金属反射镜方案、(d)通过沉积高折射率光栅覆盖层代替氮化硅光栅的方案、(e)通过下置的高反射率亚波长硅光栅的方案。 ······	25
3.6 下置硅光栅反射镜的光栅耦合器的复杂加工流程。(a)选用商用的SOI晶片。(b)通过电子束光刻EBL和等离子体刻蚀制备硅光栅反射镜。(c)沉积二氧化硅氧化层。(d) 化学机械抛光CMP，形成平整的表面。(e)沉积氮化硅。(f) 通过高精度的对准曝光，刻蚀制备氮化硅光栅。 ······	26

3.7 一步刻蚀的下置硅光栅反射镜的氮化硅光栅耦合器。电场插图展示了从波导左端输入光模式的情况下，可以实现较好的向上辐射并匹配单模光纤的模式。 .....	27
3.8 有限元仿真的建模示意图。左端的红色端口设置为电磁波的模式激励端口Port1，右端的红色端口设置为模式端口Port2，黑色的边界设置为阻抗边界条件，并离仿真区域10微米以上。在光栅的上方设置一个蓝色的Cutline，用于积分求解向上辐射的功率和提取向上辐射的电场的分布。 .....	28
3.9 光栅耦合器模型进行遗传算法优化的大致程序流程。将待优化的结构变量，代入中进行仿真运算，再通过提取辐射光场和模式重叠度计算，计算光栅的耦合效率。并通过遗传算法进行循环迭代优化，实现效率的提升。 .....	30
3.10 均匀光栅的仿真结果。(a) 均匀光栅的结构，在光栅优化过程中，考虑两个最主要的结构参数，光栅周期 $\Lambda$ 和上氧化硅层的厚度H <sub>SiO<sub>2</sub></sub> 。(b)通过穷举仿真得到当光栅周期为0.95μm和上氧化硅层的厚度为1.6μm时，光栅耦合器的效率最高，为-3.52dB。 .....	31
3.11 在光栅耦合器仿真时，之所以选择-8°的负数耦合角度，是因为在一步刻蚀的三层光栅结构中，光从波导输入近似于遭遇了垂直于芯片表面的DBR结构，因此形成“反射”比形成“透射”要更强烈。仿真结果也证明了负数角度的耦合效率更高。 .....	32
3.12 非均匀光栅的仿真结果。 $\Lambda=965\text{nm}$ , FF=51.3%, H <sub>SiO<sub>2</sub></sub> =1.6μm。(a) 波长扫描得到的光栅向上辐射效率、光栅辐射光场与单模光纤模式的匹配度和光栅波导的反射率。(b) 波长扫描得到的光栅耦合器偶和效率，可见峰值的耦合效率为-3.4dB，波长为1570nm，且1dB带宽超70nm。 .....	33
3.13 非均匀光栅的仿真结果，器件的结构变量见表3-2。(a) 非均匀非均匀光栅的变量定义。(b) 波长扫描得到的光栅向上辐射效率、光栅辐射光场与单模光纤模式的匹配度和光栅波导的反射率。(c) 波长扫描得到的光栅耦合器偶和效率，可见峰值的耦合效率为-2.1dB，波长为1568nm，且1dB带宽超65nm。 .....	35
3.14 光栅耦合器的容差分析图。(a) 光栅齿的尺寸偏移对器件耦合效率的影响。(b)光纤摆放位置z轴偏移导致的耦合效率影响。(c)上氧化硅层厚度变化对器件耦合效率的影响。 .....	37
3.15 器件加工后的SEM和显微镜图。(a)选用220nm硅层的SOI晶片。(b)在SOI晶片上沉积1600nm氧化硅和600nm氮化硅层。(c)旋涂PMMA光刻胶并光刻显影得到PMMA掩膜。(d)通过电子束蒸镀，镀上200nm的金属铬。(e) lift-off得到200nm厚的铬金属掩膜。(f)通过等离子体刻蚀，一步刻蚀氮化硅、氧化硅、硅层，完成光栅制备。 .....	38

3.16 (a) (b) 制备后的光栅耦合器在光学显微镜下的图。 (c)(d) 制备后的光栅耦合器在电子显微镜下的图，可以清晰的看到硅光栅反射镜和氮化硅的衍射光栅结构。 .....	40
3.17 (a) 光栅耦合器的大致测试装置。 (b) 光从断面的锥形光纤输入，到光栅处衍射后，通过垂直的平端面单模光纤接收。 (c) 测试链路的大致装置示意图。通过Keysight 8164B激光器进行波长扫描，完成器件测试。 .....	41
3.18 器件的测试结果图。 (a)均匀光栅下测试样品的耦合效率和仿真的耦合效率。 (b) 非均匀光栅下测试样品的耦合效率和仿真的耦合效率。 (c) 最优的器件测试结果。 .....	42
4.1 典型的氮化硅三维集成的应用前景。 (a) 三维多层氮化硅集成的任意波束发射器。 (b)复杂的片上拓扑。 (c) 氮化硅与硅或三五族半导体材料有源无源混合集成。 [23–25] .....	45
4.2 已报道的硅-氮化硅层间耦合器的层间耦合方案。 (a) 简单有效的缓变倒锥方案。 (b) 类似于光栅耦合器的布拉格光栅方案。 (c) 通过双层的氮化硅的缓变倒锥层间耦合，实现了双倍的超大层间间隔和可忽略不计的交叉损耗。 [23, 26, 27] .....	47
4.3 倒锥的工作原理示意图，通过倒锥的光限制减弱，光逐步从强限制波导中通过倏逝波的形式弥散到氧化硅的包层中。此时通过另一个相反的缓变倒锥，通过逐步增大波导的模式体积限制，就能耦合到另一层的波导中。 [17, 28] .....	48
4.4 (a) 氮化硅-硅的三维层间耦合过程中，主要的器件指标有硅-氮化硅层间耦合损耗、氮化硅输入交叉损耗、硅输入插入交叉损耗、层间串扰。 (b) (c)美国桑迪亚国家实验室的Adam M. Jones等人总结的基于倒锥的三维层间耦合光交叉的层间耦合损耗，交叉损耗和交叉层间串扰随着倒锥长度、层间间隔的关系。 [23] .....	50
4.5 基于拍频的超材料层间耦合器的基本原理。通过亚波长光栅的超材料的硅波导，等效为稀释折射率的光波导，实现硅波导和氮化硅波导的折射率匹配。 .....	51
4.6 拍频层间耦合和层厚度之间的关系。 (a) 假想的二维氮化硅平板波导与超材料平板硅波导之间的差拍耦合过程。间隔层厚度和耦合区长度已标注。 (b) 不同的硅波导占空情况下，通过超模差拍理论计算的耦合区长度。可见当间隔层厚度越小时，耦合区长度随占空比变化较小。 (c)当间隔层厚度为50nm时，可以在占空比24%-34%的范围内保持耦合区长度不变，提供稳定可靠的差拍耦合。 .....	52

4.7 双层氮化硅的层间耦合方案, 一方面, 满足了图4.6中硅-氮化硅层间间隔应该越小越好的要求。另一方面, 也满足了图4.4中氮化硅、硅的层间距离要足够大的要求。光从超材料硅波导中耦合到下层氮化硅层, 再进一步耦合到上层氮化硅层, 使氮化硅和硅层足够的分离, 减少交叉损耗和层间串扰。 .....	54
4.8 (a) 二维无限宽平板光波导的TE模式。(b)三维光波导的TE模式。(c)不同宽度的硅波导和氮化硅波导的有效折射率的情况, 当波导宽度大于 $5\mu\text{m}$ 时, 三维波导的有效折射率接近于二维光波导的有效折射率, 可视作准二维的光波导。 .....	55
4.9 一维+二维亚波长光栅双层超材料的层间耦合器方案图, 通过一维+二维的亚波长光栅超材料, 在实现硅波导和氮化硅波导之间的折射率匹配的情况下, 使超材料光波导的最小特征尺寸足够大。 .....	56
4.10 超材料层间耦合器的详细结构图, 以及与层间耦合器相关的所有结构变量。(a)层间耦合器的整体结构外观, 有双层氮化硅的波导层, 可以实现光从硅波导 $\rightarrow$ 下层氮化硅波导 $\rightarrow$ 上层氮化硅波导 $\rightarrow$ 下层氮化硅波导 $\rightarrow$ 硅波导的耦合过程。(b)层间耦合器的主视图。(c) 硅波导与氮化硅波导之间的极薄的50nm氧化硅间隔层。(d) 层间耦合器的俯视图。(e) 层间耦合器超材料硅波导对应的占空比分布图。(f)层间耦合器的一维+二维超材料光波导的详细结构图, 超材料光波导可以划分为用于渐变过渡的一维光栅区域、一维二维的过渡区域、用于较大占空比的椭圆形二维光栅区域、以及较小占空比的圆形二维光栅区域。 .....	57
4.11 (a) 层间耦合器的三维交叉对应的四个端口1, 2, 3, 4。(b) 通过Lumerical 3D-FDTD在1端口输入TE模式的光后, 得到层间耦合器电场分布, 可以看到光从硅波导逐步向上耦合至上层的氮化硅波导中, 越过下端的硅波导后, 逐步向下耦合, 从端口2的硅波导中输出, 与设计的光路径一致。(c) 通过3D-FDTD仿真得到的S21dB插入损耗, 中心波长1550nm处损耗仅为0.52dB。(d)仿真得到的S31dB三维交叉层间串扰, 整体的串扰水平在-52dB以下。(e) 仿真得到的S43dB硅输入交叉损耗, 通信波段交叉损耗的整体在-0.1dB以内。 .....	59
4.12 层间耦合三维交叉的关键结构的加工容差分析。(a)超材料硅波导的占空比偏移-5%到+5%的插入损耗S21dB变化趋势。(b) 超材料硅波导的占空比偏移-5%到+5%的三维交叉层间串扰S31dB变化趋势。(c) 超材料硅波导的占空比偏移-5%时的结构版图示意图。(d) 超材料硅波导的占空比偏移+5%时的结构版图示意图。(e) 关键的纵向参数, 如硅和氮化硅波导间隔 $h_1$ , 氮化硅波导之间间隔 $h_2$ , 氮化硅波导厚度 $h_{SiN}$ 在分别偏差30nm, 50nm和50nm时的插入损耗S21dB的变化趋势。(f) 关键的纵向参数在偏差时的三维交叉层间串扰S31dB变化趋势。 .....	60

4.13 器件加工步骤图。(a) 通过商用的220nm的SOI晶片。(2)通过EBL曝光和等离子体刻蚀超材料硅波导。(3)沉积二氧化硅间隔层，并通过CMP进行二氧化硅表面抛光至 $h_1=50\text{nm}$ 。(d)依次沉积420nm, 250nm, 420nm的氮化硅、氧化硅和氮化硅层。(e) 电子束对准曝光并等离子体刻蚀氮化硅、氧化硅、氮化硅双层波导。(f) 在刻蚀完的氮化硅波导上沉积二氧化硅包层，保护波导结构。 . . . . .	62
4.14 (a)制备后的三维交叉层间耦合器在光学显微镜下的结果图。(b) 超材料硅波导上的氮化硅波导层。(c) 制备后的超材料硅波导在电子显微镜下的结果图。 . . . . .	63
4.15 测试结果图。(a)通过对比S21dB和S31dB的测试数据，可得三维层间交叉的层间串扰大于-45dB。(b) 通过器件测试得到1、3、5个三维层间交叉器件的光纤到光纤投射谱。(c)通过线性拟合不同个数的三维交叉的功率，得到的单个交叉的损耗为-1.206dB。 . . . . .	64
5.1 (a)超材料中米氏谐振分为两种主要的类型，第一种是以环形电场谐振模式的磁偶极子型谐振模式。(b) 另一种是以环形电场谐振模式的电偶极子型谐振模式。(c) 俄罗斯约飞研究所的Mikhail V. Rybin等人通过研究二维方形晶格超材料中的晶格单元的谐振模式时，计算得到的米氏谐振TE模式对应的归一化频率。(d) 通过计算布洛赫模式得到的二维方形晶格超材料的能带结构，其中最低阶的TE米氏谐振产生了米氏能隙。(e)二维方形超晶格材料的电磁波透射谱中可以看到，由于米氏能隙的存在，产生了明显的高频截断现象。(f)二维方形晶格超材料示意图，圆形阵列为高介电常数的介质材料，间隔为空气。 [29, 30] . . . . .	67
5.2 超材料长通滤波器的概念图，其中滤波器由一个与单模硅波导相连的亚波长的超材料组成。其中短波长的光，由于超材料结构的电磁响应而不能通过，反射回原波导中。而长波导的光由于偏离了超材料的电磁响应频率，可以通过亚波长的超材料区域。 . . . . .	68
5.3 超材料长通滤波器的优化第一步，通过遗传算法优化的二值化的像素图案，其中每个像素的尺寸为 $100\times 100\text{nm}$ ，黑色像素代表了高折射率的硅，白色像素代表低折射率的空气。 . . . . .	69
5.4 (a)在遗传算法优化超材料像素图案过程中，通过四轴折叠对称，可以得到需要独立优化的变量个数仅为像素图案的八分之一。(b) 351个独立的像素变量分布示意图。(c)通过对351个二值化变量进行遗传算法优化，可以得到最终的超材料像素图案如图5.5所示。 . . . . .	71
5.5 遗传算法的优化过程，算法的优化从一个简答你的四轴折叠对称的普通光交叉开始，逐步变化像素点的结构分布，最终形成超材料的像素结构。 . . . . .	72

5.6 长通滤波器设计的遗传算法优化第二步。(a)通过优化中间波导上的波导剖面宽度和中间的方形孔的位置，通过优化8个波导剖面宽度和8个挖孔位置变量，减少在长通波段下的插入损耗，增大器件的性能。(b)第二步优化之前的像素点结构图。(c)优化了波导剖面宽度和挖孔位置后的超材料结构示意图。 . . . . .	73
5.7 经过两步优化的超材料长通滤波器的波长响应仿真结果图。(a) 3D-FDTD仿真得到的不同波长下 $ S_{11} + S_{21} $ 结果，可见由于超材料的亚波长特征尺寸，器件的布拉格衍射受到抑制，总功率大致保持守恒。(b) 仿真得到的 $S_{21}\text{dB}$ 透射谱和 $S_{11}\text{dB}$ 反射谱，可见，在1450-1500nm左右，短波长的光被全部反射，而在1550-1600nm波长的光，则可以通过超材料区域。(c)当通入波长为1450nm的TE模式时，由于超材料区域的强烈电磁响应而被反射回原波导中。(d)当通入波长为1550nm的TE模式时，由于没有激发超材料的谐振模式，光可以通过超材料区域。 . . . . .	74
5.8 超材料长通滤波器的滤波特性与器件版图的缩放关系。(a)当器件版图缩放为原尺寸的95%时的波长响应。(b)当器件版图为100%原尺寸时的波长响应。(c)当器件版图缩放为原尺寸的105%时的波长响应。可见随着器件版图的缩放，过渡带对应的波长会发生明显的偏移，偏移的程度为11.4nm/1%。 . . . . .	75
5.9 超材料长通滤波器的滤波特性与器件级联的关系。通过1、2、3个长通滤波器之间级联，实现了过渡带斜率的增强。 . . . . .	76
5.10 (a)加工后的超材料长通滤波器在电子显微镜下的结果。(b)加工后的级联超材料长通滤波器。 . . . . .	77
5.11 长通滤波器的级联测试结果图。(a)在1,2,3,5不同级联个数下，测试得到的投射谱，对应的过渡带斜率为0.493, 0.913, 1.344, 1.251dB/nm。(b) 在1,2,3,5不同级联个数下，长通波段的透射功率。可以通过提取长通波段的透射功率，通过线性拟合的方式，得到长通波段的插入损耗。(c)通过提取1550nm处的透射功率，并通过线性拟合得到，单个长通滤波器的插入损耗约为-0.5851dB@1550nm。 . . . . .	79
5.12 长通滤波器的版图缩放测试结果图。可见，随着器件版图缩放1%时，器件的透射谱偏移了10nm左右，与仿真结果较为一致。 . . . . .	80
6.1 传统的光子集成器件，器件尺寸较大( $>100\mu\text{m}$ )，具有更高的性能等优点；数值计算的光子集成器件，器件尺寸非常小( $<10\mu\text{m}$ )，则性能较为一般。 . . . . .	83
A.1 详细的器件优化代码，由于物理建模和优化算法的代码是独立且复杂的，不能完整地在博士论文里表述，具体代码可以登陆 <a href="#">我的Github</a> 进行下载查阅。 . . . . .	84

## 表格列表

3.1 已发表的高性能氮化硅光栅耦合器的设计方案、性能和加工复杂度对比。 .....	22
3.2 遗传算法优化得到的光栅耦合器几何结构变量(单位nm) .....	34
3.3 首先通过反应离子束刻RIE刻蚀氮化硅600nm，表格为等离子体刻蚀的菜单 .....	39
3.4 其次通过是RIE刻蚀二氧化硅1600nm，表格为等离子体刻蚀的菜单 ..	39
3.5 最后通过电感耦合增强等离子体ICP刻蚀硅220nm，表格为等离子体刻蚀的菜单 .....	39
4.1 图4.2中调研的三种方案的层间耦合器的数据对比 .....	51
4.2 通过遗传算法优化的图4.10中结构变量的具体参数。(单位nm) .....	58
5.1 各种片上光子滤波器实现原理的典型指标对比 .....	68

## 符号列表

### 缩写

EBL	Electron Beam Lithography	电子束曝光
SOI	Silicon On Insulator	绝缘层上硅
TE	Transverse Electric	横电场
TM	Transverse Magnetic	横磁场
SiNx	Silicon Nitride	氮化硅
PIC	Photonic Integrated Circuits	光子集成电路
IL	Insertion Loss	插入损耗
XT	Crosstalk	串扰
InP	Indium Phosphide	磷化铟
WDM	Wavelength Division Multiplexing	波分复用
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	密集波分复用
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing	粗波分复用
CMP	Chemical Mechanical Polishing	化学机械抛光

## 第1章 基于数值计算的光子集成器件的发展趋势

### 1.1 光子集成与挑战

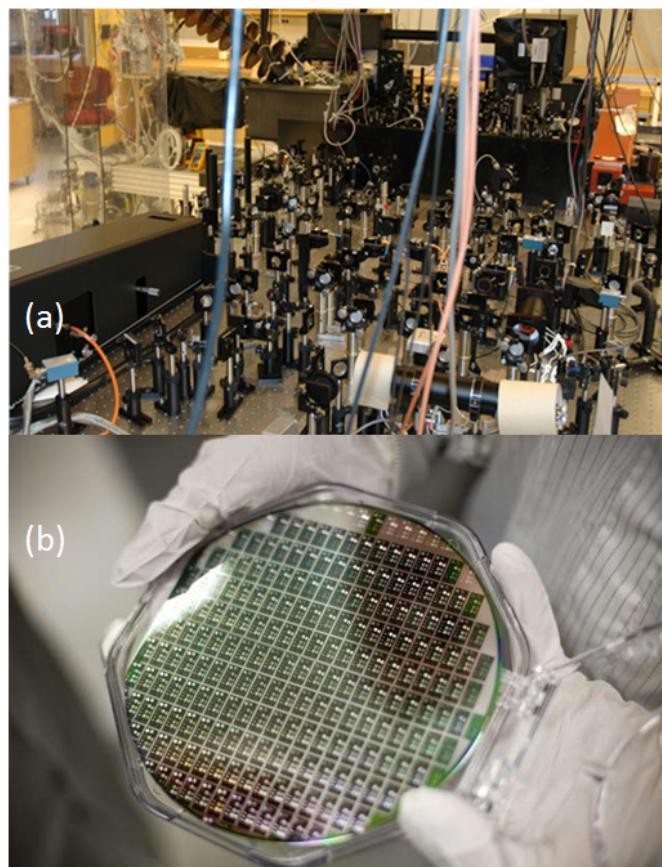


图 1.1 光子集成目的，是将原本复杂繁多的光学实验器件(a)，集成到紧凑的光子集成芯片(b)上，像电子集成电路一样，大规模普及应用，推动人类社会的发展。[图片来源(a) Hau Laboratory (b)Dominick Reuter/MIT]

光子集成电路（Photonic Integrated Circuits, PIC），借鉴于电子集成电路的发展历程和技术思路，是一种集成了多种光子集成器件功能的芯片，可以在毫米级别的芯片尺寸下，如图1.1所示，集成多种光子器件，如滤波器、调制器、光放大器、激光器、光探测器等，通常在单晶硅[31–33]、氧化硅[34, 35]、铌酸锂[36]、或三五族化合物半导体[37]的晶元表面上制备，实现复杂的光学功能。

光子集成电路的发展借鉴了电子集成电路的技术和思路，在过去的半个世纪，集成电路经历了快速发展，成为人类最伟大的发明和工业成就之一[38]，在其紧凑的芯片上集成数亿万个的纳米晶体管，实现高性能的微处理器或大容量的存储芯片等，极大推动了社会进步，改变了人类的生活方式。跟电子集成

电路的迅猛发展相比，光子集成电路的发展则较为缓慢，主要有以下的技术限制：

一、电子集成电路可以通过纳米量级的铜线实现晶体管等电子器件的连接，具有极高的便捷性和集成度。而片上的光子集成电路则是通过光波导相连，受限于光的波长，波导尺寸和器件尺寸一般为微米以上量级，且波导不能进行剧烈的弯曲。在一定程度上限制了光子集成芯片的集成度，从而光子芯片的生产成本很难下降。

二、波导与光纤的耦合器之间的光学耦合，相比电子芯片的连接器更为严苛。波导传输与器件的功能实现的存在不可避免的光能量损耗。相比可以通过晶体管放大的电信号[39, 40]。片上集成的光放大器的较为复杂，成本较高，减少光的能量损耗则是更为经济适用的突破方向。减少光器件的损耗需要提高现有的光子器件设计方法。

三、一些片上的光子器件很难实现微型化，如用于密集波分复用DWDM的阵列波导光栅AWG等

有了上述的技术限制，光子集成电路很难达到电子集成电路的复杂程度和低成本。但是，以磷化铟InP为主的三五族化合物半导体的光子集成芯片，凭借其材料的优势，极大地推动了光通信应用的发展，如集成的多路光收发芯片等，在超算和数据中心中应用，包含DFB激光器，高速光调制器、光探测器和光滤波器等。[41]

仍然需要通过器件设计的优化，设计出更多更紧凑的光子器件，实现更低的损耗和更高的性能，以提升光子集成电路的功能和降低芯片的制造成本。使得光子集成芯片，可以像电子集成芯片实现更为广泛的应用。[42]

## 1.2 计算机运算能力突飞猛进？

自计算机诞生以来，计算机的计算能力有着令人瞩目的增长。以超算为例，如图1.2为有美国田纳西州大学和美国国家能源研究科学计算机中心NERSC牵头的超算评测机构TOP500通过LINPACK测试（每半年评测一次）的世界上500强的超级计算机的浮点运算性能的发展趋势，其中在2013年到2016年连续六次世界排名第一的，由国防科技大学设计建造的天河二号超级计算机，达到了33.86 PetaFlop/s的实测双精度浮点运算速度，即每秒能实现  $3.3 \times 10^{16}$  次双精度浮点计算。而截止2019年，世界最强超算为美国橡树岭国家实验室的Summit超级计算机，其实测浮点性能比天河二号更快，达到143.5 PetaFlop/s。由于超级计算机的

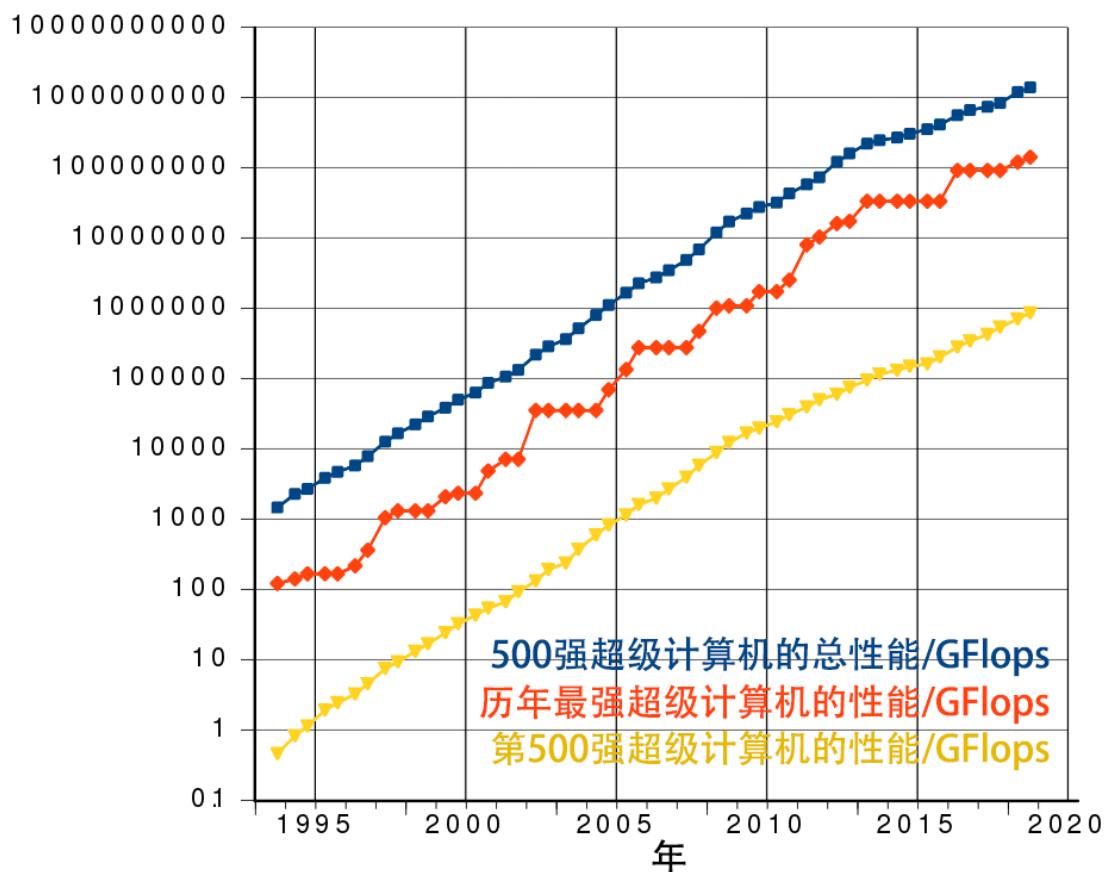


图 1.2 评测结构TOP500统计的全球前500强超级计算机的浮点性能的发展规律，其中超算的浮点性能以每12年翻1000倍的速率指数增长，为光子集成器件的纯数值设计提供了可能。  
[图片来源：TOP500]

计算能力通常是普通科研用高配置工作站的 $10^4 \sim 10^5$ 倍，发展规律也可近似等效为一般科研计算机的发展规律。[43]

从图1.2的发展趋势来看，超级计算机的计算性能呈现出每十二年增长1000倍的指数增长趋势：自1996年500强中首次出现TeraFlop级的超级计算机，到2008年首次出现PetaFlop级的超级计算机，通过趋势的预测，到了2020年将会有ExaFlop级别的超算诞生。

计算机运算能力的空前发展，给光子集成器件的设计带来了前所未有的发展机遇，可以通过更高精度、更快速的数值运算，可以实现功能更加全面、器件更加紧凑的光子器件的设计。

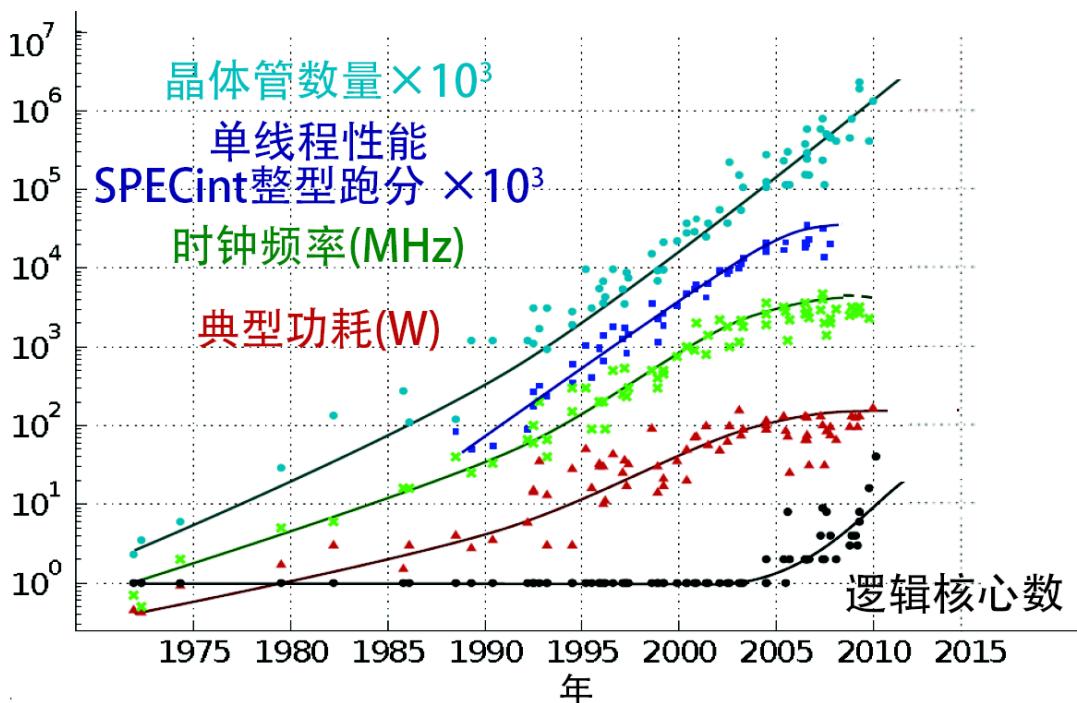


图 1.3 摩尔定律驱动下，晶体管数量呈现指数式增长，是依靠逻辑核心数量的提升。随着集成电路铜导线的物理带宽的限制，处理器的时钟频率提升趋于平缓，单线程性能趋于饱和，迫切需要研究更加高效的光学优化算法。[图片来源：Karl Rupp]

超级计算机的迅速崛起，离不开微型处理器的摩尔定律式发展，如图1.3所示为奥地利维也纳工业大学计算机专家的Karl Rupp等人整理的近40年的微型处理器发展情况。

自1980年代微型计算机进入消费者市场，强大又便宜的计算机给行业带来了巨大的变化，巨大的社会需求和市场竞争也促进了集成电路行业的迅猛发展。其中，计算机核心的微处理器的运算能力从战后的每24个月翻一番，到1980年

代的18个月翻一番，到1990年代的每12个月翻一番。[44]

图1.3为计算机微处理器的发展趋势。可以看到，虽然微处理器的晶体管数量仍旧保持强劲的指数增长趋势。然而，随着微处理器中金属铜导线的物理带宽限制，微处理器的芯片的时钟频率开始趋于饱和。依赖于更加智能的功耗控制和动态的时钟频率调节的等技术，微处理器的单核心的性能虽在不断增长，但也逐渐趋于平缓。单核心性能的不断增长，说明了单核心性能在实际应用中具有重要意义，相比多核心的复杂算法，需要进行繁杂的多核心资源调度和算法优化，单核心性能具有便捷和高效的作用。[45]

从另一个角度，单核心性能的增长缓慢，也说明了不能寄希望于简单粗暴的数学计算来进行光学计算和优化。需要发展更加可靠的并行计算算法，或者发展更加智能高效的光学计算算法。

### 1.3 光子器件的仿真趋势

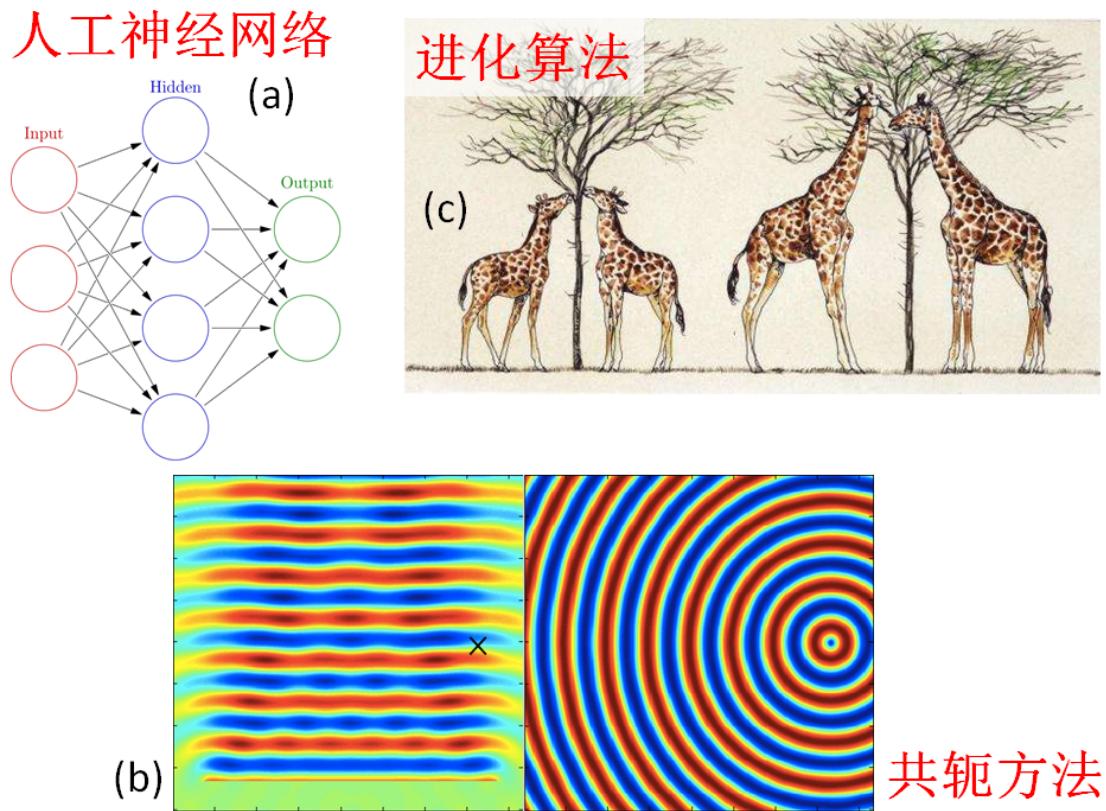


图 1.4 较为主流的光学设计方法，有依靠大样本学习拟合的人工神经网络(a)、通过计算演化梯度的共轭办法（Adjoint method）(b)、以及通过自适应、自学习寻优的进化算法(c)。  
[图片来源(b) IAC Publishing (c) Yablonovitch Group, UC Berkeley].

计算能力的迅猛发展，推动了光学计算和优化的发展。如图1.4所示，近几

年，常用的光学计算和优化的方法主要有通过大样本学习和非线性拟合的人工神经网络、用于计算演化梯度下降的共轭方法(Adjoint method)，以及自适应、自学习寻优的进化算法等。

其中，人工神经网络可以通过大量的数据案例进行学习和非线性拟合分析，获得光学器件的变量参数与器件性能指标之间隐含的深层关系，通过数据挖掘，寻找和预测新的器件设计参数。[\[1\]](#)

共轭方法通过引入光学优化目标函数的背向传播(back propagation)，通过正向传播和共轭背向传播的相干关系，实现演化梯度的计算，便于更快更好的实现目标函数的优化。[\[46–48\]](#)

而进化算法的方案，则是通过自适应、自学习的变量迭代，逐渐进步的方式，实现逐步更好的光学设计，常见的进化算法主要有借鉴生物规律的法则的遗传算法等。

通过上述的算法，可以在一维、二维、三维光器件设计中，设计并优化的光学器件，相比传统设计的光学器件具有更加明显的优势。

上述算法的设计涵盖了一维、二维、三维光学应用的计算与优化。一维的光学设计主要是光学薄膜或量子阱设计等，如图1.5a所示，美国威斯康星大学的Dianjing Liu等人，通过75万组数据的深度人工神经网络的机器学习，找到氧化硅和氮化硅交替生长的光学薄膜和对应的透射谱之间的非线性网络关系，通过深度神经网络的拟合和预测，可以设计出具有任意透射谱效果的光学薄膜。

[\[1\]](#)

二维的光学设计，主要是二维衍射元件的设计，如图1.5b所示，加州大学洛杉矶分校的Xing Lin等人，通过计算并3D打印多层的光学衍射介质板，构建了一个衍射神经网络系统，实现了手写数字和图像的自动识别。光学的多层衍射系统可以成为人工神经网络的加速平台，实现更低功耗更高性能的多层衍射神经网络系统。[\[2\]](#)

三维的设计包括片上的超材料硅光子器件设计，如图1.5c所示的美国斯坦福大学的Alexander Y. Piggott等人，通过基于目标优先的共轭方法梯度下降进行目标函数的优化，反向设计了器件尺寸 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ 的C+O波段的波长复用器件。[\[3\]](#)

其中，三维的超材料硅基光子器件的设计，有利于解决当前光子集成芯片所面临的问题，具有集成度高、器件紧凑，制备简单高效的特点，也是本论文研究的重点。[\[29, 49\]](#)

基于计算优化的超材料光子器件，在近些年成为研究的热门。设计的超材

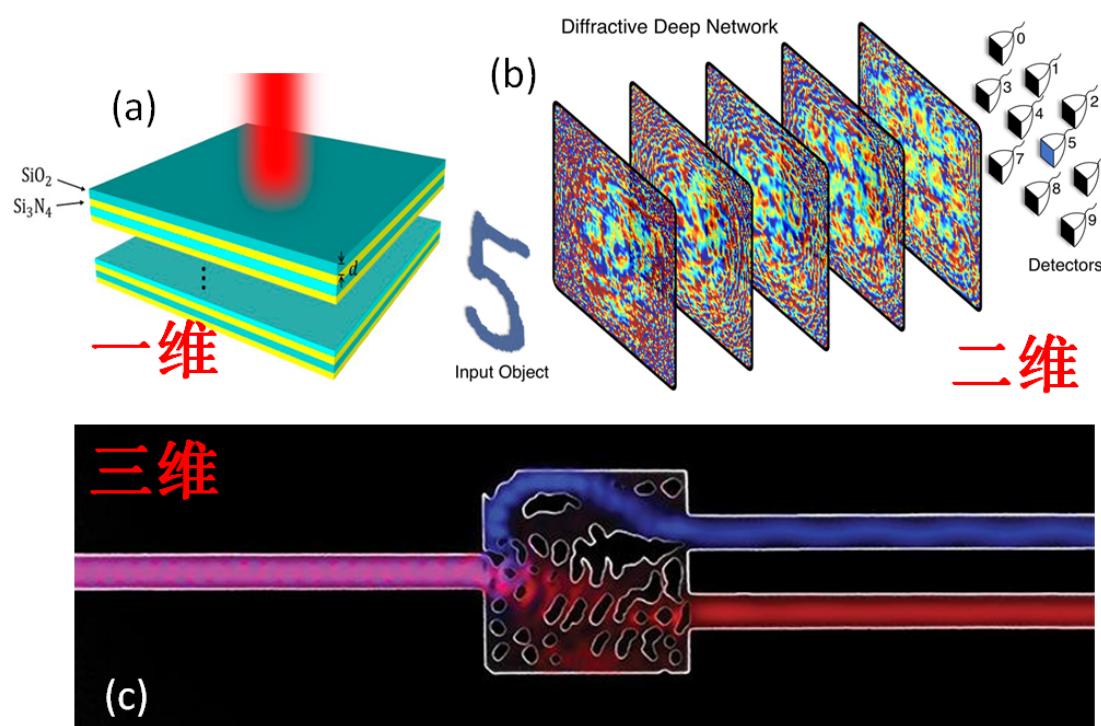


图 1.5 通过光学优化算法，可以在一维、二维、三维的光学上进行优化设计。如通过深度神经网络优化氧化硅/氮化硅的一维光学薄膜(a)；通过共轭办法优化的二维衍射元件，形成用于加速文字和图像识别的衍射深度网络(b)；通过目标优先(objective-first)的共轭方法设计的三维1310/1550nm波长复用集成光子器件。本论文中，三维光子集成器件为研究的重点。

[1–3]

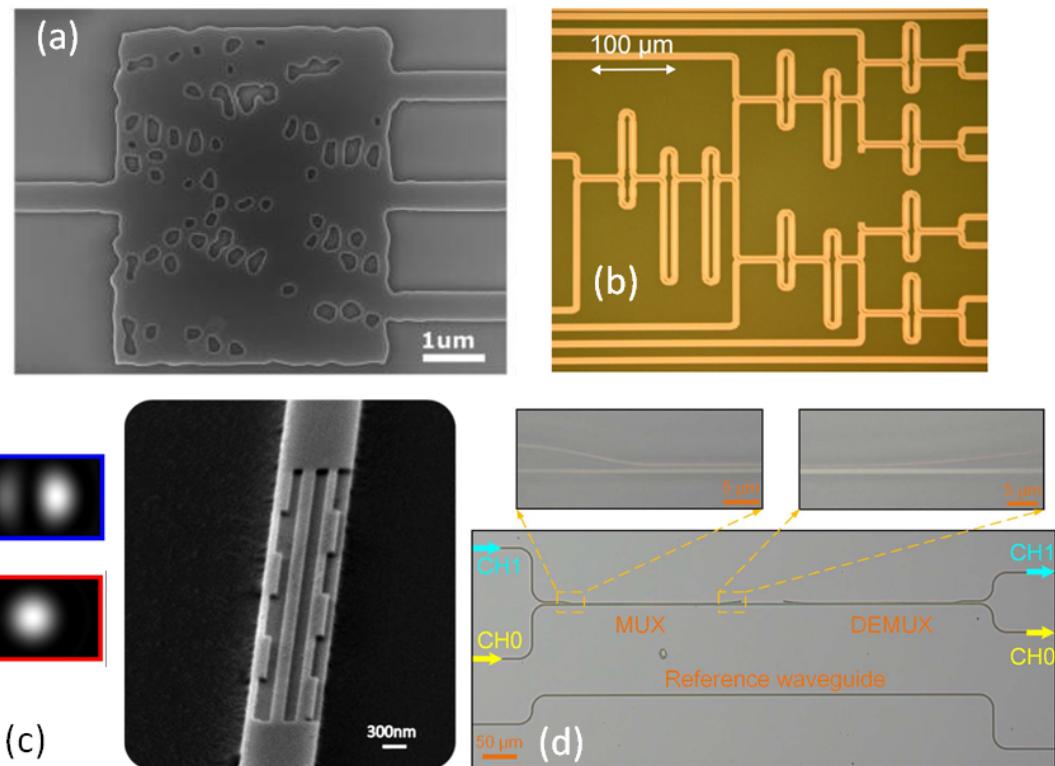


图 1.6 两个简单案例，说明了超材料光子器件的尺寸优势。**(a)** 斯坦福大学设计的三通道40nm间隔粗波分复用(CWDM)光子集成器件，器件尺寸为 $4 \times 5\mu\text{m}^2$ 。**(b)** IBM设计的传统基于级联马赫-曾德尔八通道5nm间隔的CWDM器件，器件尺寸为 $400 \times 500\mu\text{m}^2$ 。**(c)** 希伯来大学设计的波导集成TE0-TE1模式转换器，器件长度仅 $20\mu\text{m}$ 。**(d)** 中科院上海微系统与信息技术研究所设计的传统基于方向耦合器的TE0-TE1模式转换器，器件长度为 $260\mu\text{m}$ 。

[4-7]

料光子器件，相比传统的器件，具有尺寸紧凑，效果显著的特点。如图1.6，们列举了两个简单的案例，说明超材料光子器件巨大的尺寸优势。

如图1.6a的由美国斯坦福大学的Alexander Y. Piggott等人，通过目标优先的共轭方法，通过计算物质结构的演化梯度反向设计，得到的基于硅的三通道40nm间隔CWDM光子器件，器件尺寸仅为 $4 \times 5 \mu\text{m}^2$ ，约2dB的插入损耗和10dB的串扰抑制比，具有初步的应用可行性[4]。相比之下，瑞士IBM苏黎世研究院的Folkert Horst等人设计的基于级联马赫曾德尔干涉仪的CWDM的器件相比，如图1.6b，器件尺寸为 $400 \times 500 \mu\text{m}^2$ ，插入损耗约为1.6dB，18dB的串扰抑制比[5]。可以看到，原本需要数百微米尺寸的光子器件，可以通过数微米大小的尺寸来初步实现，具有很大的意义。

第二个案例，以色列希伯来大学的David Ohana 等人，通过在纳米尺度的波导上制备的超材料器件，通过 $20 \mu\text{m}$ 的单模硅波导长度，实现了TE0到TE1模式的模式转换，插入损耗约为0.55dB，TE1与TE0的模式抑制比为12.7dB [6]；相比之下，而与中国科学院上海微系统与信息技术研究所的Jing Wang等人设计的传统的基于方向耦合器的TE0-TE1模式复用/转换器，其器件的长度为 $260 \mu\text{m}$ ，插入损耗 $<0.1 \text{ dB}$ ，TE1与TE0的模式抑制比 $>20 \text{ dB}$ ，如图1.6d [7]，虽然器件性能较差，但器件尺寸同样相差一个数量级。

实际上，三维的超材料光子器件能实现更多的光学功能。通过调研、整理，将目前发表的超材料光子器件的应用场景进行归类，有折射率工程(index-engineering)、模式转换、波长复用、群速度工程、偏振复用、特殊波束发射等功能。

如图1.7a所示，德克萨斯大学奥斯丁分校的Yang Zhang等人，通过在传统的基于布洛赫波的光交叉阵列的两侧，制备了亚波长超材料的微结构，通过折射率工程实现了包层折射率的提升，并将传统的光交叉阵列的损耗降低到-0.02dB/crossing的程度，且交叉串扰 $<-40 \text{ dB}$ 。[8]

如图1.7b所示，香港中文大学的Zejie Yu等人，通过遗传算法优化的像素超材料，实现了 $1 \times 4 \mu\text{m}$ 的宽带硅波导的TE和TM偏振模式转换器，在紧凑的器件尺寸下，实现了-0.7dB的最小插入损耗和157nm的1dB带宽。[9]

如图1.7c所示，斯坦福大学的Alexander Y. Piggott等人，通过目标优先(objective-first)的共轭方法设计的O波段和C波段的波长复用光子器件，器件尺寸小于 $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ ，波长串扰 $<11 \text{ dB}$ ，带宽 $>100 \text{ nm}$ 。[3]

如图1.7d所示，渥太华大学的Przemek J. Bock通过亚波长光栅波导(Sub-Wavelength

Grating)的群速度工程，实现了超C波段的100nm光谱波段下实现了TE和TM模式的群折射率恒定为~1.5，实现了随心所欲的群速度调控。[10]

如图1.7e所示，犹他大学的Bing Shen等人通过非线性的优化算法实现了 $2.4 \times 2.4$ 微米的超材料的偏振复用器，实现了TE、TM模式的复用。[11]

如图1.7f所示，深圳大学的Zhenwei Xie等人通过反向设计的 $\pm 1$ 阶OAM光束发射器，插入损耗约-5dB，带宽超过200nm。[12]

综上所述，通过数值计算设计、优化的超材料光子器件具有较高的设计潜力，丰富的自由度和应用前景，因此，本论文主要设计紧凑的光子器件，尝试在光栅耦合器、层间耦合器和光子长通滤波器领域实现应用，丰富超材料的光子器件库，为提高光子集成度和降低光子芯片成本提供可参考的、有价值的技术方案。[49–52]

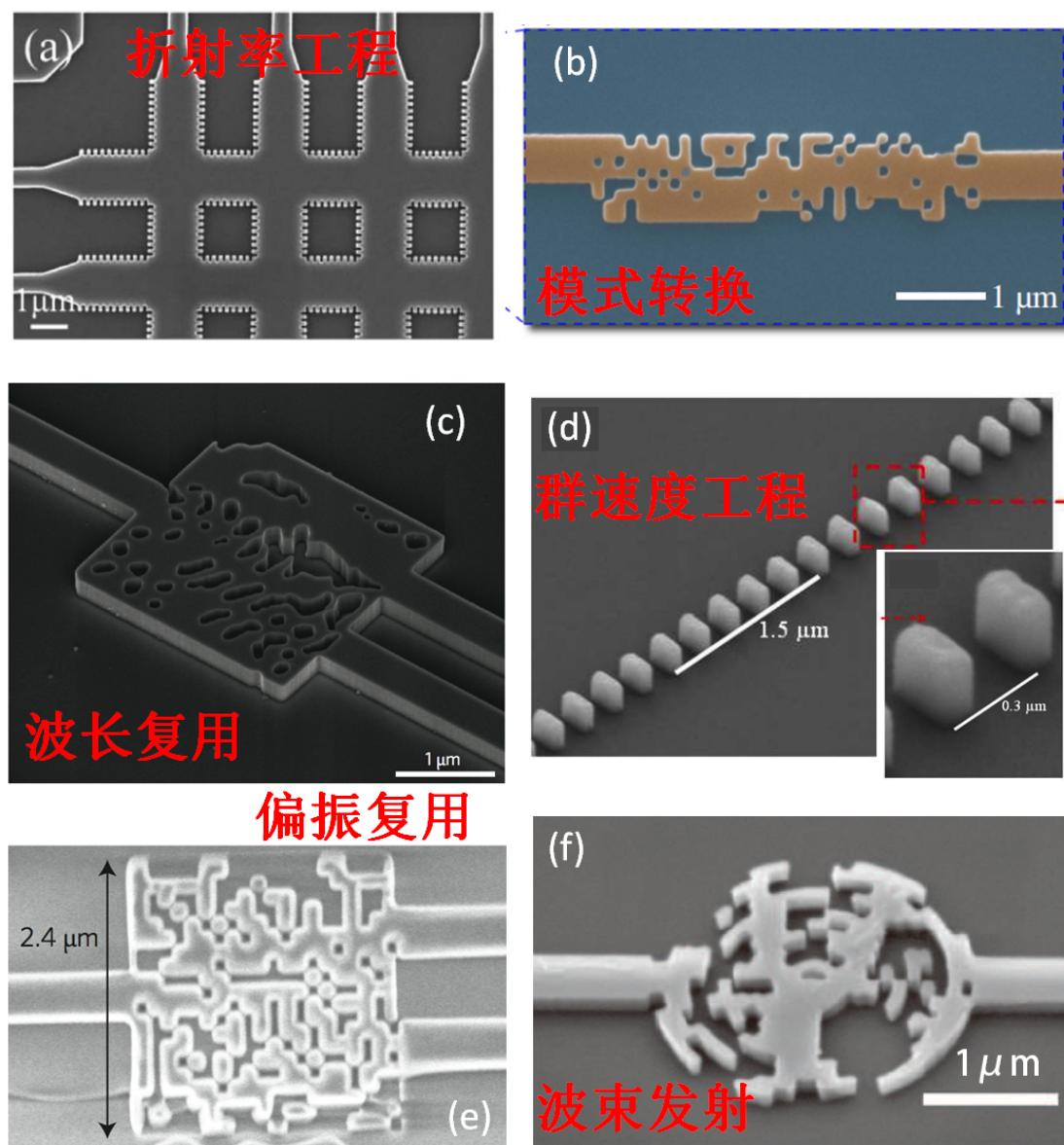


图 1.7 超材料集成光子器件的案例，可以实现丰富的功能。如(a)折射率工程、(b)波导模式转换、(c)波长复用、(d)群速度工程、(e)偏振复用、(f)特殊波束表面发射等[3, 8–12]

## 第2章 遗传算法的基础和应用

### 2.1 遗传算法的思想和简易流程

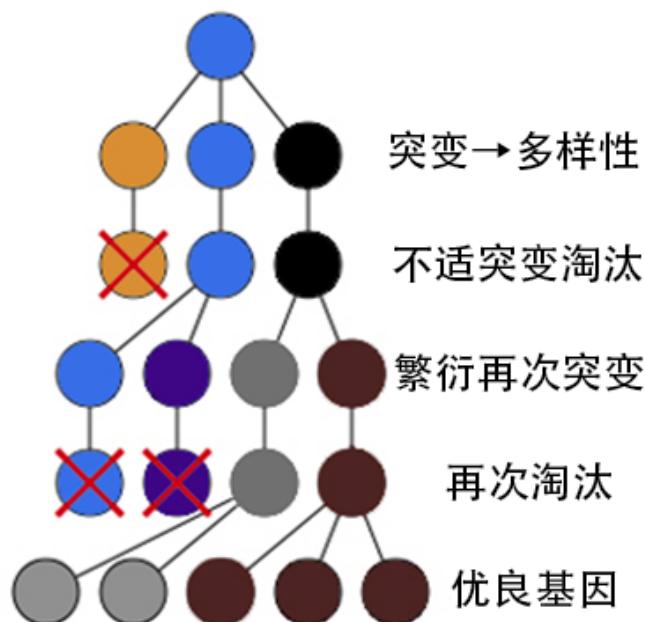


图 2.1 遗传算法的树状概念图，遗传算法通过在进化算法的基础上，引入类生物的算法操作，实现了更为直观有效的目标函数优化。生物种群的个体独立，天然具有并行计算的便利，据有现实的应用意义。

遗传算法，是一种超启发式算法，属于进化算法中的一种。1960年由密歇根大学的计算机学家John H. Holland，在进化算法的基础上，受达尔文的进化论和自然选择过程的启发，引入基于生物的算法操作，如变异，杂交融合和自然选择等算法操作，用于产生、优化具有最高适应度的个体（匹配目标函数最优的解）。[53, 54]

在遗传算法中，通过一系列的候选个体的繁衍迭代，进化，选优，最终解决问题。

每个竞争的个体都有一系列的变量或属性（可以称为染色体），染色体可以进行变异或杂交变化。个体的染色体一般通过一系列0或1的二进制序列形式进行编码（如图2.2所示），而且编码长度相同，以便进行等位变量之间杂交处理。也可以采用其他数据类型的变量，通过类似的方法进行编码。

适应度(fitness)则是表征个体匹配目标函数之间的程度，越匹配目标函数，则适应度越高。不能匹配目标函数则适应度较低。

一旦基因表达的编码和适应度函数被定义后，遗传算法开始准备优化。初始化过程中，产生一系列的初始个体，并通过交叉，繁衍和自然选择等算法操作等操作改变个体的染色体，循环迭代，驱使个体的进化。

遗传算法的过程中，每一次的迭代称为一个代(generation)。在循环迭代的初始，一般从合适的初始种群出发，在每一代中，每个个体的基因进行修改，通过一定的数学方法，评估每个个体的适应度。从每个代的群体中，筛选适应性较好的个体，淘汰部分适应性较差的个体，从筛选出的个体中，通过一系列的生物算法操作操作，如交叉，变异等（如图2.2），新的个体产生伴随着父系的许多优异的特性。

生物算法操作的结果是子代的染色体对应的个体的平均的适应度会逐渐增加，因为上一代中较优适应度的染色体得以保留并繁育后代。同时一些中等适应度的染色体也得以保留，确保了基因池中的基因多样性，才能确保下一代个体可以通过组合形成更好的个体。

一般的，当达到了一定代数后，个体普遍达到较为满意的适应度，遗传算法则中止。



图 2.2 遗传算法中，从筛选出的适应度更高的个体中，通过染色体的交叉，形成一部分新的子代染色体。通过染色体上变量的突变，形成另一部分新的子代染色体。子代染色体通过重新组合，拥有了父系染色体的许多优异特性；也通过变异生成的新的染色体，丰富了多样性。

一个基础的遗传算法的框架如图2.2所示，最开始从现实的问题的变量集开始，对待优化的变量进行编码，变成容易进行生物算法操作的染色体，数值优

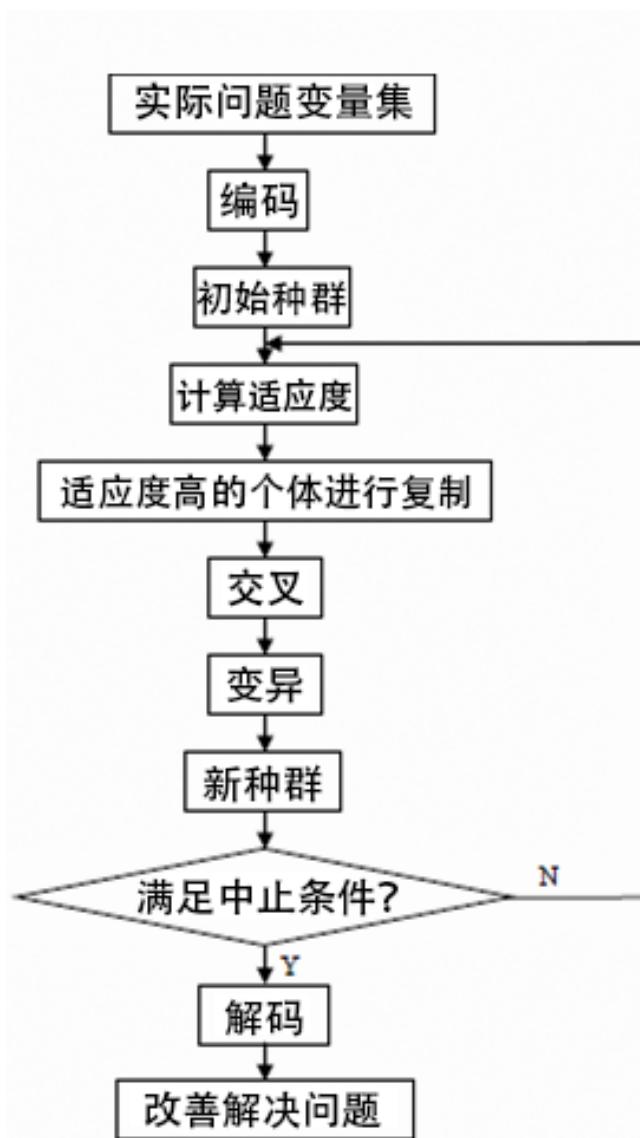


图 2.3 遗传算法的基础程序框图。程序的主体是个迭代的循环，像是生物繁衍的生生不息。通过个体筛选、交叉、变异等生物操作，实现了个体平均适应度的逐步提升，并最终改善、解决问题。

化。而后，从一个合理的初始种群开始。

对初始种群进行适应度计算，并将适应度高的个体进行筛选，再通过染色体的交叉，变异等类生物操作，实现了种群的繁衍和基因多样性的发展，完成了一个迭代循环。再通过第二次循环，计算新群体的适应度，交叉，变异等操作，当满足中止条件之后，达到最优化的个体编码。通过解码后的信息，改善并解决待优化的问题。

遗传算法的实现上，往往较为简单，可以通过2.2的程序框架，程序长度较短，自行纂写代码可以解决。也可以尝试调用开源的遗传算法工具包，实现严格、标准化的遗传算法程序实现。

## 2.2 遗传算法的标准化工具包

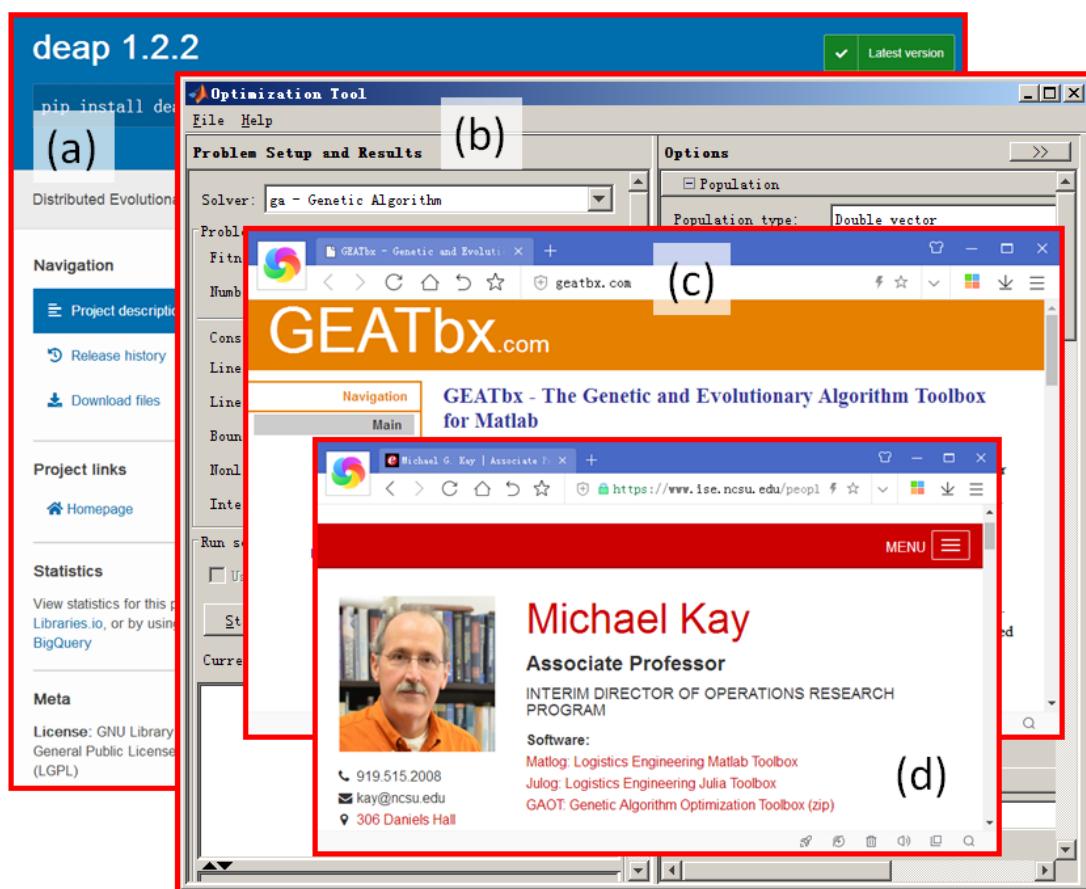


图 2.4 开源的遗传算法工具包。(a) 基于python的deap工具包。(b)MATLAB内置的optimtool工具包。(c)GEATbx工具包。(d) GAOT工具包。[13–16]

如图2.4所示，常用的开源遗传算法工具包有：

1、北卡罗来纳州立大学的Michael Kay助理教授的遗传算法工具包GAOT；

[13]

- 2、德国伊尔姆瑙理工大学的Hartmut Pohlheim开发的GEATbx遗传算法和进化算法的MATLAB工具包；[14]
- 3、加拿大拉瓦尔大学的Fran ois-Michel De Rainville等人开发的基于python开源工具包deap；[15]
- 4、采用MATLAB内置的optimtool工具箱中的遗传算法优化功能。[16]

### 2.3 遗传算法的应用案例和启发

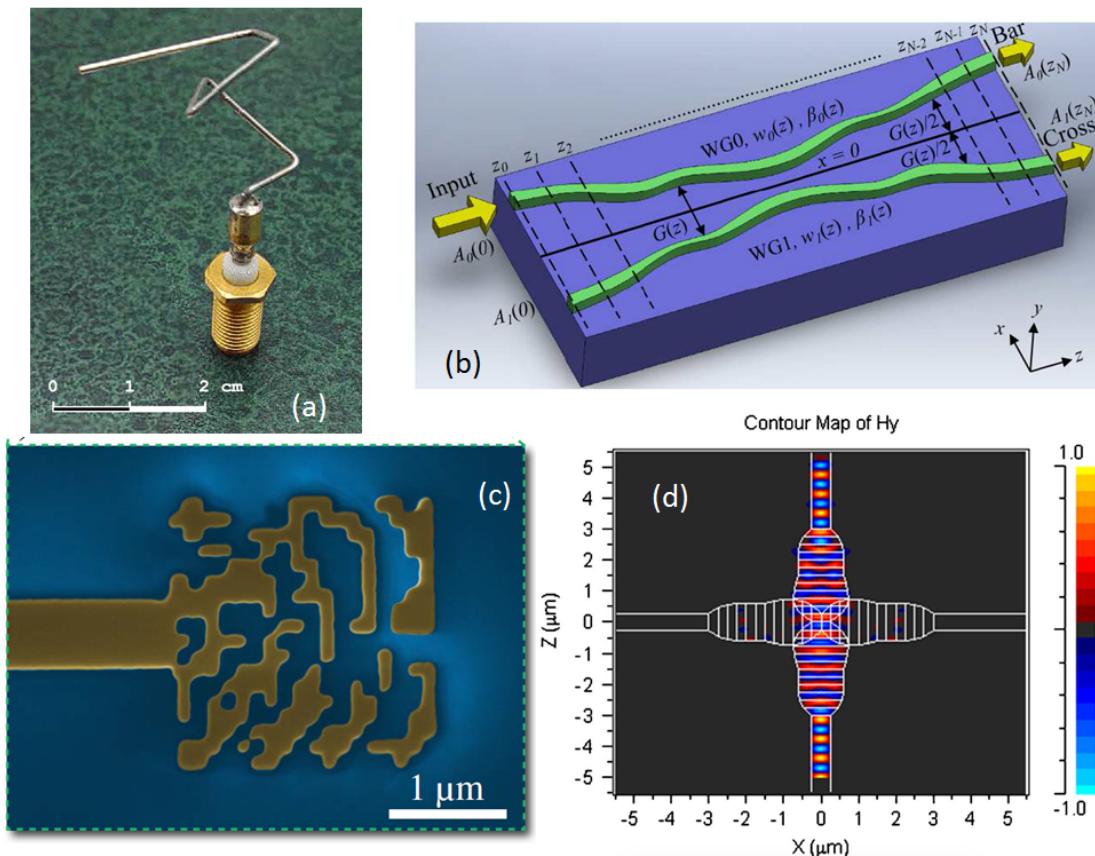


图 2.5 遗传算法优化器件的案例。

有了遗传算法，我们可以方便地引入到各种各样的光学器件的优化设计中，如图2.4所示。

图2.4a为遗传算法在电磁波优化中最为经典的案例之一，加利福尼亚大学圣克鲁兹分校的Gregory S. Hornby等人，在美国国家航空航天局Space Technology 5(NASA ST5)项目中采用的射频天线，该天线为通过遗传算法优化的折线结构，与以往规整的天线结构相比格外另类，然而这种特殊折线结构可以实现更好的微波波束辐射。[55]

图2.4b为国立台湾大学的Po-Han Fu等人，通过耦合模理论(coupled-mode theory)结合遗传算法优化的方向耦合器，可以实现任意分光比的光功率分束。[56]

图2.4c为香港中文大学的Zejie Yu等人，通过遗传算法优化的数字超材料波导反射器，在 $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ 的硅超材料结构上，实现了200nm宽光的谱的高反射效率。[57]

图2.4d为西班牙瓦伦西亚理工大学的Pablo Sanchis等人，通过遗传算法优化光交叉的波导截面宽度，在 $6 \times 6 \mu\text{m}^2$ 的器件尺寸下，实现-0.2dB低插入损耗和-35dB的低串扰的紧凑光交叉耦合器。[58]

通过上述案例，足以可见遗传算法在光学器件优化中的广泛作用和潜力。[59, 60]

## 第3章 下置硅光栅反射镜的氮化硅光栅耦合器

### 3.1 光栅耦合器的理论基础

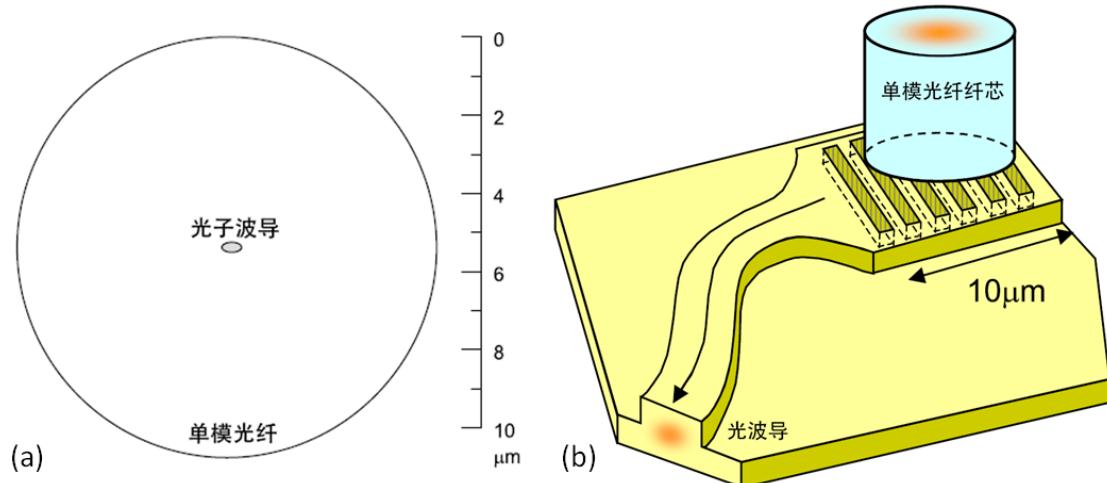


图 3.1 单模光纤的纤芯尺寸与光子波导的尺寸相差一个数量级，光从单模光纤很难直接耦合到光波导中，常用透镜光纤、倒锥模斑转换器或光栅耦合器来辅助耦合。（b）常见的光栅耦合器的结构示意图，通过光栅的衍射，改变光的传播方向，实现单模光纤与光波导之间的光耦合。[17]

在光子集成芯片中，片上的集成光学元器件通过微米量级的线波导进行光的连接。根据国际电信联盟ITU制定的标准单模光纤标准(G.652)[61]，标准单模光纤的模场直径(mode field diameter)为 $10.4\mu\text{m}$ ，相比微米量级的光波导相比，光纤纤芯尺寸和光波导尺寸相差一个数量级，如图3.1a所示。

因此，光从单模光纤到光波导之间的光耦合，不能直接相接，需要借助特殊设计的光耦合器实现光能量和信息的传输。常见的光耦合器有透镜光纤(Lensed-fiber)、缓变倒锥的模斑转换器（Spot-size convertor）[62, 63]和光栅耦合器(Grating coupler)等。

光栅耦合器的整体尺寸与单模光纤的纤芯直径接近 ( $\sim 10\mu\text{m}$ )，如图3.1b所示。光从单模光纤垂直输入到光子集成芯片的表面，受到光栅的衍射作用，改变传播方向，耦合到光波导中。

一方面，解决了光从单模光纤到光波导模场直径的巨大差异，实现了高效率的耦合；另一方面，光栅耦合器是一种非接触式的垂直光耦合，相比透镜光纤和模斑转换器，可以在无需晶元解理的情况下，实现光子芯片的片上测试，

具有更加便利的测试场景，这也是光栅耦合器垂直耦合相比端面耦合的一个优势。[17]

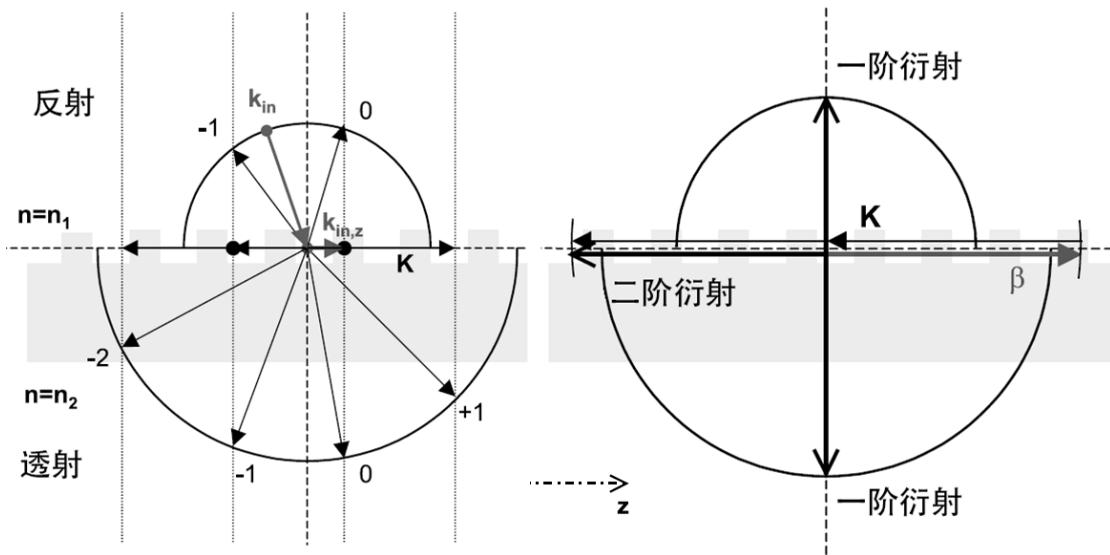


图 3.2 (a) 一般的光栅界面衍射，光栅的上下两端具有不同折射率，倾斜角度入射的光发生光栅衍射时光波矢满足的布拉格条件。(b) 一般光栅界面衍射的特殊情况，当入射的光平行于光栅表面时的衍射情况。当光栅调制的波矢等于入射的光波导模式的有效传播常数  $\beta$  时，可实现垂直光栅表面的一阶衍射。[17]

在体光学的范畴中，光栅是一种常见的大量等宽等间距的平行狭缝构成的，可以在波矢空间对光进行调制的一种衍射光学元件。

如图3.2a，为一般化的光栅界面衍射情况，在光栅界面的上下两端具有  $n_1$  和  $n_2$  两种不同折射率的材料，则对于真空中波矢为  $k_0$  的入射光，其在界面的透射和反射光的波矢z分量（ $z$ 方向为沿着光栅的方向）满足如下的布拉格方程：

$$k_{transmission,z} = k_{incidence,z} + mK \quad (3.1)$$

$$k_{reflection,z} = k_{incidence,z} + mK \quad (3.2)$$

其中  $k_z$  为入射、反射或透射光的波矢的  $z$  分量，而  $|K| = 2\pi/\Lambda$ ，是衍射光栅的波矢，  $m$  为光栅的衍射级数。

$$k_{reflection} = k_{incidence} = k_0 n_1 \quad (3.3)$$

$$k_{transmission} = k_0 n_2 \quad (3.4)$$

因此反射和透射的衍射光的波矢落在以  $k_0 n_1$  和  $k_0 n_2$  为半径的两个半圆中。

其中，0级衍射级没有受到光栅的波矢调制作用，满足传统的Sneal定律。而-2, -1, 1, 2级衍射级代表受到光栅衍射后的各个衍射级。如图3.2a所示，通过布拉格条件可以简单的计算出光经过光栅衍射后，在各个衍射级上的反射和透射的方向。

当然，也有特殊情况，如图3.2b，当入射光的波矢平行于光栅界面时，如光在集成光子芯片表面的光波导上传输，则此时入射光的波矢 $k_z$ 等于光在波导中的模式传播常数 $\beta$ ，即

$$k_{transmission,z} = \beta + mK \quad (3.5)$$

$$k_{reflection,z} = \beta + mK \quad (3.6)$$

则如图3.2b，当光栅的波矢  $|K| = \beta$  时，可以实现垂直的一阶衍射，满足垂直耦合的需求。此外，存在一个与入射波矢相反方向的二阶衍射，因此，通常的光栅耦合器，通常避免垂直 $90^\circ$ 的耦合角度，以避免二阶衍射带来的反射，通常采用略微倾斜的耦合角度（如图3.3，通常为 $5\sim20^\circ$ 不等）。此外，倾斜的耦合角度也有利于芯片测试时光纤夹具的摆放。

对于光栅耦合器，有几个常用的性能指标，用于表征器件的性能：[17, 64]

①、耦合效率或插入损耗：光波导传输模式的光功率为 $P_1$ ，而耦合到单模光纤模式时光功率为 $P_2$ 。或者反过来，单模光纤传输模式的光功率为 $P_1$ ，而耦合到光波导模式时光功率为 $P_2$ ，则其耦合效率百分率 $\eta$ ：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (3.7)$$

转为对数形式，其插入损耗IL为

$$IL = 10 \times \log_{10} \frac{P_2}{P_1} [dB] \quad (3.8)$$

②、1dB或3dB带宽：对于光栅耦合器，其设计的中心波长的一般具有最高的耦合效率或最低的插入损耗。而当波长偏移了中心波长时，插入损耗将随之增加。当插入损耗增加了1dB或3dB时，其对应的波长偏移的上限和下限形成的波长范围，即为光栅耦合器的1dB或3dB带宽。光栅耦合器的1dB带宽往往要求 $\geq 50\text{nm}$ ，以满足红外光通信C波段或L波段的全波段覆盖。

③、模式或偏振相关损耗：波导中存在较为常用的几组偏振状态不通的模式，如TE模式或TM模式。光栅耦合器的设计往往只针对单一模式或少数的模式。不同偏振或模式之间的耦合效率的偏差，即为模式或偏振相关损耗。通常

情况下，有专门设计的光栅耦合器，以提升多个模式或偏振的耦合效率，以降低模式或偏振相关损耗，来实现模式复用下的高效率耦合。也有专门设计的光栅耦合器，来提升模式或偏振相关损耗，只耦合需要的模式，抑制非需要的模式。本论文中只考虑最低阶的TE0基础模式，暂不考虑TM模式。

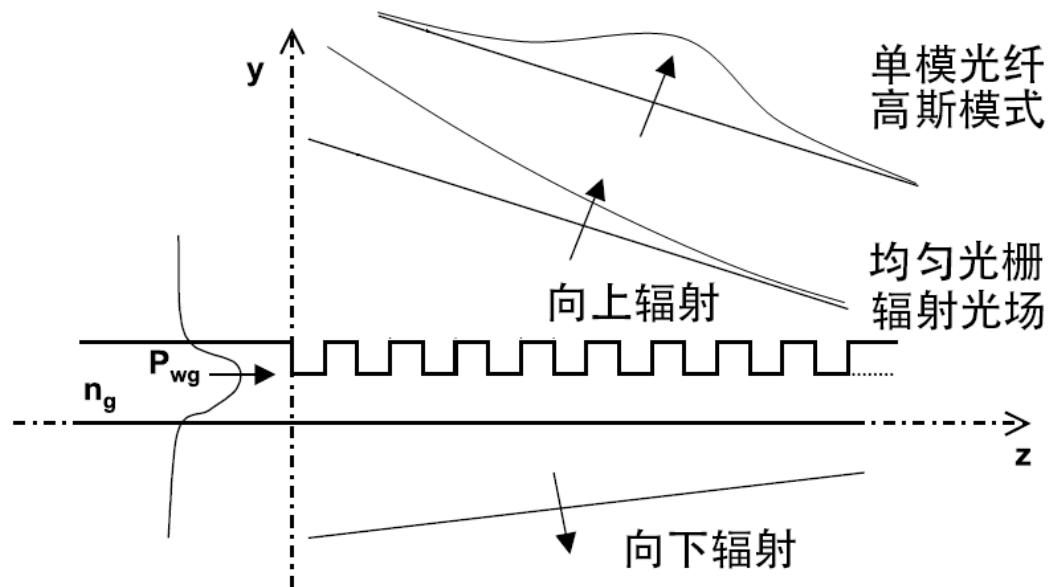


图3.3光栅耦合器的高性能的关键。光从波导中传输到光栅处，受光栅衍射作用向上辐射和向下辐射。均匀光栅的辐射光场近似为能量指数衰减的光场，其中只有匹配单模光纤高斯模式的部分可以实现耦合。

图3.3为传统设计的光栅耦合器，在光波导上刻蚀光栅，实现光的1阶衍射。由于光栅的1级衍射级在材料界面的两端都存在，因此，光栅的衍射不仅向上辐射，同时也向下辐射，两端的同时辐射意味着将损失接近一半的光功率，不利于耦合效率的提升。

因此，对于高性能光栅耦合，往往需要特殊设计的光栅耦合器的方案，来提高光的方向性，一方面要避免光栅的向下衍射的辐射损耗，换言之，需要提高光栅的向上辐射的方向选择性，进而提升光栅耦合器的耦合效率。

另一方面，对于均匀光栅而言，随着光栅向上辐射能量，光在波导中的功率逐渐减少。因此向上辐射的光场一般呈现指数衰减的趋势，如图3.3所示，均匀光栅的指数衰减辐射光场，与标准单模光纤的类高斯模式的光场，存在模式失配，只有模式匹配的部分功率可以耦合到单模光纤中，因此，效率受到限制。需要适当修整向上辐射的光场分布，采用特殊设计的非均匀的非均匀光栅，匹配单模光纤的高斯模式，提高耦合效率。

近年来，随着氮化硅材料的气相外延生长和等离子体加工工艺的逐渐成熟，基于氮化硅的光子集成芯片和器件逐渐成为研究的热门。氮化硅作为一种新兴发展的光子集成材料体系，相比传统硅的光子集成材料而言，具有低损耗、较低的折射率、高加工容差、低热光系数，低双光子吸收、可见光波段透明等优异的材料特性，具有优异的应用潜力，可用于制备低损耗、低串扰、高加工容差等的更具应用竞争力的光子集成芯片。[\[65–68\]](#)

然而，氮化硅的光子集成材料体系中，很难制备高性能的氮化硅光栅耦合器。一方面，由于氮化硅的折射率比较低 ( $n \sim 2$ )，往往需要深刻蚀的氮化硅光栅才能实现较高的光栅辐射强度；另一方面，深刻蚀的氮化硅光栅的向上辐射选择性较差，有接近一半的光功率会被损失，因此很难实现较高的耦合效率。

相比硅材料，由于硅材料先天具有高折射率的优势 ( $n \sim 3.42$ )，在刻蚀的硅光栅耦合器中，硅与氧化硅包层可以形成较高的折射率反差，使得硅光栅齿具有较高的辐射强度，通过浅刻蚀的硅光栅便可以实现较高的向上辐射效率，具有更高的耦合效率。此外，还可以通过非均匀光栅的方式，在单模光纤纤芯直径的范围 ( $\sim 10.4\mu\text{m}$ ) 实现辐射光场的模式匹配，进一步的提升耦合效率。

综上所述，较低折射率的氮化硅介质材料，要想实现类似于硅基光栅耦合器的高耦合效率，一方面需要提升向上辐射的功率，即打破竖直方向的辐射对称性；另一方面是提高光栅辐射光场到单模光纤的耦合效率，即模式匹配。

### 3.2 高性能光栅耦合器的调研

**表 3.1 已发表的高性能氮化硅光栅耦合器的设计方案、性能和加工复杂度对比。**

设计方案	1dB带宽	峰值功率	刻蚀步骤	CMP	精准套刻	文献
传统光栅	50	-5.8	1	×	×	<a href="#">[69]</a>
传统光栅	60	-5.1	1	×	×	<a href="#">[70]</a>
传统光栅	67	-4.2	1	×	×	<a href="#">[71]</a>
波导倒锥	54	-3.7	2	×	√	<a href="#">[18]</a>
下置DBR反射镜	53	-2.5	1	×	×	<a href="#">[19]</a>
下置硅光栅反射镜	80	-1.3	3	√	√	<a href="#">[20]</a>
下置硅光栅反射镜	40	-0.88*	2	√	√	<a href="#">[21]</a>
阶梯状光栅齿	20	-1.5	2	×	√	<a href="#">[22, 72]</a>
下置硅光栅反射镜	65	-2.5	1	×	×	本论文

\*号标记代表结果是仿真结果

传统的氮化硅光栅耦合器，指只在氮化硅波导上刻蚀光栅结构的光栅耦合器，器件简单，便捷，易加工，在实际的光子集成芯片系统中较为常见。如上节所述，由于氮化硅较低的折射率的限制，传统的氮化硅光栅耦合器很难同时满足“较高的向上辐射方向选择性”和“与单模光纤高斯模式的高度匹配”的高效率耦合的需求。

因此，如表3-1所示，由美国国家标准与技术研究院NIST的Jeffrey M. Shainline等人和美国贝尔实验室Bell等的Christopher R. Doerr等人报道的传统的氮化硅光栅耦合器，虽然具有较宽的1dB带宽 ( $>60\text{nm}$ )，然而其普遍的光耦合效率低于  $-4 \sim -5\text{dB}$  [69–71]。对于无源集成光子芯片而言，光从单模光纤耦合到芯片再耦合回单模光纤，即单模光纤→光子芯片→单模光纤，两次耦合则总的耦合损耗将达到  $-8 \sim -10\text{dB}$ ，即便氮化硅的光子芯片具有较低的片上传输损耗，在通信应用中，较大的耦合损耗对信噪比和通信质量存在较为严重的影响。

为提升氮化硅光栅耦合器的耦合效率，通过查阅高性能氮化硅光栅耦合器的文献，分析已发表的高性能氮化硅光栅耦合器的提升效率的方案，如图3.4所示，列举了几个有影响力的氮化硅高效率光栅耦合器。其对应的氮化硅光栅耦合器的性能指标、设计方案、峰值功率、加工复杂度等信息列举在表3-1中，加工复杂度转有光栅的刻蚀步骤次数、是否需要化学机械抛光CMP，是否需要高精度的电子束套刻曝光等信息。

在表3-1中，已知的有效提升氮化硅光栅耦合器的设计方案，大致可以归结为下置分布式布拉格光栅DBR反射镜方案、下置金属反射镜、下置的光栅反射镜方案、上置高折射率光栅覆盖层和特殊向上辐射光栅结构等方案。对应的高性能光栅耦合器设计方案的简图如图3.5所示。

通过调研已发表的器件方案的优缺点，从中寻找合适的器件设计灵感。

下置DBR的方案，需要在氮化硅光栅的下端交替沉积四分之一波长厚度的高折射率和低折射率的介质材料，其中，高折射率材料通常是非晶硅、低折射率材料通常是氧化硅。需要足够多的DBR周期数来形成有效的反射，如新加坡A\*STAR的Huijuan Zhang等人采用了两个周期的DBR形成较高底部反射率，实现了  $-2.5\text{dB}$  的插入损耗。DBR反射镜是通过布拉格条件形成反射，其布拉格反射条件对波长有较强的选择性，因此光栅耦合的1dB带宽相比传统的氮化硅光栅耦合器较窄一些。

增强向上辐射的特殊光栅，通过特殊的光栅齿结构，如图3.4b和3.5b所示的台阶状光栅等，使得辐射的光倾向于向上辐射，也可以极大的提升向上辐射的

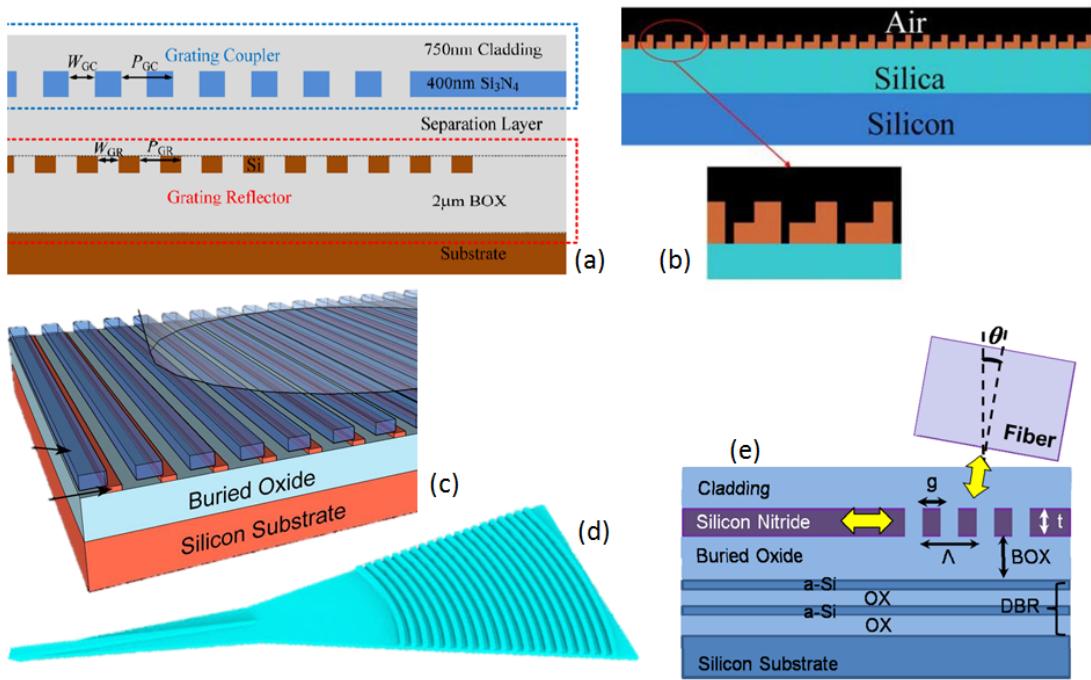


图 3.4 SiNx光栅耦合器的文献调研 (a) 华中科技大学的硅光栅反射镜+氮化硅光栅耦合器方案。 (b) 浙江大学的阶梯状光栅和远距离辐射角度映射方案。 (c) 多伦多大学的硅光栅反射镜+氮化硅光栅耦合器方案。 (d) 华中科技大学的倒锥浅刻蚀方案。 (e) 新加坡A\*STAR的下置DBR反射镜方案。 [18–22]

功率。浙江大学Yang Chen等人的通过阶梯状光栅和远距离辐射角度映射的方法，实现-1.5dB的耦合效率和60nm的3dB带宽[22, 72]。耦合效率很高，而器件带宽稍低，而且器件的测试中，需要将光纤放置在较高位置，与传统的光栅耦合器的测试和封装方式不太兼容。此外，特殊的阶梯状光栅需要极其严格的版图对准套刻过程，对器件的加工提出了更严格的要求，对良品率造成挑战。

通过下置的金属反射镜，如图3.5c中所示，器件结构相对简单，金属具有宽光谱的光反射特性，通过金属层的反射，也能实现高性能的光栅耦合器。金属层的反射与光波长无关，因此器件1dB带宽也较宽。然而需要预先在氮化硅波导的下端沉积一层金属反射层。预先沉积金属的步骤，与传统的CMOS工艺的金属化流程不一致，金属的沉积也会为后续的电子束器件曝光等工序增加不可控的因素等，邻近效应修正会发生变化。

上置的高折射率光栅的方案也可以很好的实现提升耦合效率的方式，如图3.5d，可以在无需刻蚀氮化硅波导的情况下，通过高折射率光栅代替氮化硅光栅实现耦合。采用了类似的方法设计了铌酸锂的光栅耦合器，铌酸锂的折射率与氮化硅类似，通过上置的高折射率非晶硅光栅，在无须刻蚀铌酸锂波导的

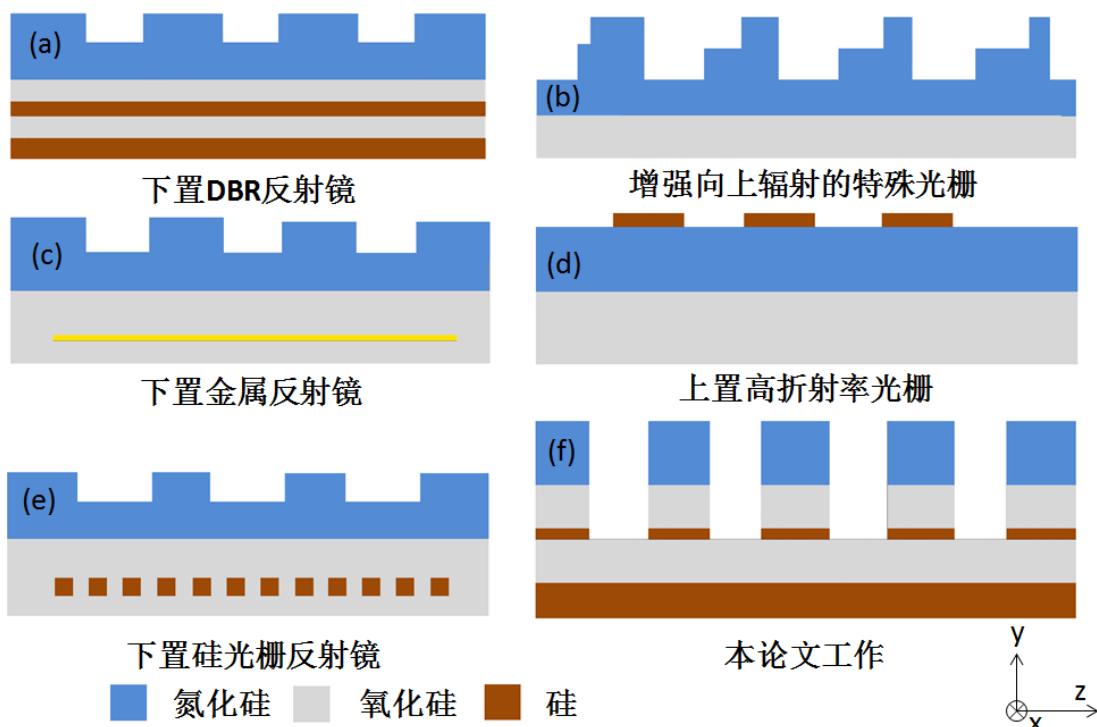


图 3.5 已发表的高性能氮化硅光栅耦合器的设计方案简图。(a)通过交替生长高折射率和低折射率材料的下置DBR反射镜方案、(b)通过多次对准刻蚀形成的增强向上辐射的特殊光栅方案、(c)通过沉积高反射率金属形成的下置金属反射镜方案、(d)通过沉积高折射率光栅覆盖层代替氮化硅光栅的方案、(e)通过下置的高反射率亚波长硅光栅的方案。

情况下，实现-3.06dB高效率和55nm的1dB带宽的光耦合效率，详情参见简健的博士论文。

除上述的光栅耦合器方案外，具有高的耦合效率和宽的1dB带宽，方法简便可靠的是由华中科大的Jinghui Zou和多伦多大学的Wesley D. Sacher等人报道的下置硅光栅反射镜的方案，如图3.4a, 3.4c和3.5e所示[20, 21]。下置硅光栅反射镜，通过在传统的氮化硅光栅耦合器的光栅下端，引入亚波长的高折射率的硅光栅，通过硅光栅形成极高的发射率，提高氮化硅光栅耦合器的耦合效率。相比下置多层DBR反射器的光栅耦合器方案，一方面，硅光栅反射镜具有更高的反射率，可以实现更高的效率；另一方面，亚波长的硅光栅反射镜相比DBR而言，波长选择性较小，可以实现更宽的1dB带宽。此外，下置的硅光栅反射镜可以采用商用的绝缘层上硅SOI晶片的高质量的单晶硅来制备，避免DBR需要通过多次的非晶硅的气相沉积，有利于制备的器件的性能稳定，可靠，高效。如表3-1所示，下置硅光栅反射镜的方案可以达到理论的 -1.3dB和-0.88dB的极低插入损耗，1dB带宽也达到相应的80nm和40nm。

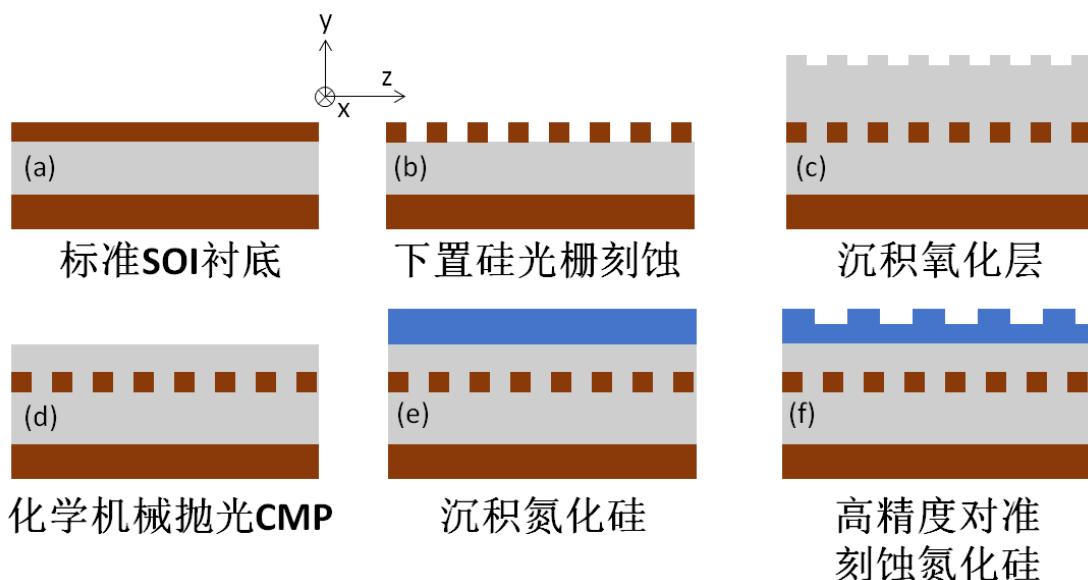


图 3.6 下置硅光栅反射镜的光栅耦合器的复杂加工流程。(a)选用商用的SOI晶片。(b)通过电子束光刻EBL和等离子体刻蚀制备硅光栅反射镜。(c)沉积二氧化硅氧化层。(d) 化学机械抛光CMP，形成平整的表面。(e)沉积氮化硅。(f) 通过高精度的对准曝光，刻蚀制备氮化硅光栅。

下置硅光栅反射镜方案具有显著突出的效果，然而，下置硅光栅的耦合器方案的器件制备过程比较复杂，如图3.6所示。制备过程中，不仅需要使用化学机械抛光CMP进行表面平整化，还需要高精准度的EBL对准曝光，过程繁杂，

对加工精度要求高，误差容忍度较差。在实际的复杂光子芯片制备中，复杂低误差容忍度的加工流程会导致成品率降低，缺乏足够的可行性。[\[73\]](#)

### 3.3 基于一次刻蚀的高性能光栅耦合器

#### 3.3.1 器件设计方案

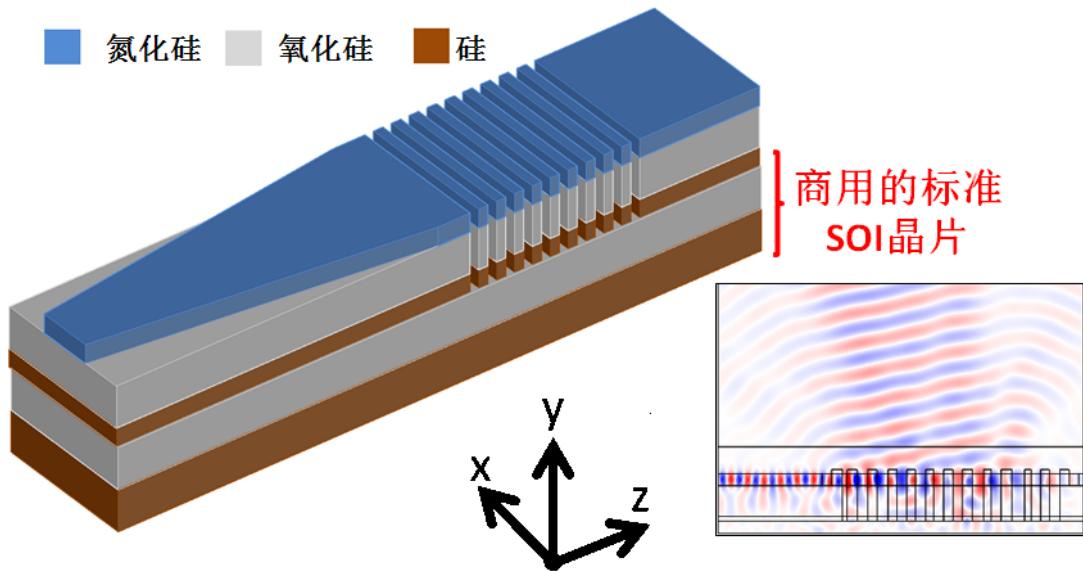


图 3.7 一步刻蚀的下置硅光栅反射镜的氮化硅光栅耦合器。电场插图展示了从波导左端输入光模式的情况下，可以实现较好的向上辐射并匹配单模光纤的模式。

如上一节所述，受下置硅光栅反射镜的光栅耦合器方案启发，为了避免CMP化学机械抛光和高精度EBL对准曝光等繁杂的器件加工流程，在兼顾下置硅光栅反射镜方案的高性能前提下，提出了一种通过单次等离子体刻蚀，实现氮化硅和硅的光栅同步制备的光栅耦合器方案，既有效提升耦合效率，又避免了器件的复杂制备流程。

如图3.7所示，提出的单次刻蚀的下置硅光栅反射的氮化硅光栅耦合器的器件结构相对简单，器件的制备基于商用的SOI晶片。在SOI晶片的上方沉积二氧化硅和氮化硅波导层后，通过一步刻蚀的方式，刻穿氮化硅、二氧化硅和硅层，同时形成上部的氮化硅光栅以及下置的硅光栅反射层，无须CMP和高精度的对准套刻。

上层的氮化硅衍射光栅用于辐射氮化硅波导中传输的光模式，而下置的硅光栅反射层，用于反射向下辐射的光功率部分，使得波导中的光整体向上辐射，避免了向下辐射带来的耦合效率损失。

图3.7的插入图为光栅耦合器仿真的电场辐射图，通过仿真证实了在一步刻

蚀的氮化硅光栅耦合器和硅光栅反射镜的双重作用下，可以使氮化硅波导中传输的TE模式光，直接向上辐射，并较好地匹配单模光纤的模式，实现高的耦合效率和宽的1dB带宽。

综上所述，提出的方案具有简单便捷，无需CMP抛光和EBL高精度对准曝光、以及宽带高效率的特点，简单便捷的器件加工步骤在复杂的光子芯片制作中具有更加广阔的应用前景。

### 3.3.2 器件仿真

在选定了一步刻蚀的光栅耦合器方案后，需要通过仿真进行具体的器件参数设计和优化，通过仿真可靠性、遗传算法引入和后期数据处理的需要，采用有限元的电磁场频域求解器对器件进行设计和优化。[\[74\]](#)

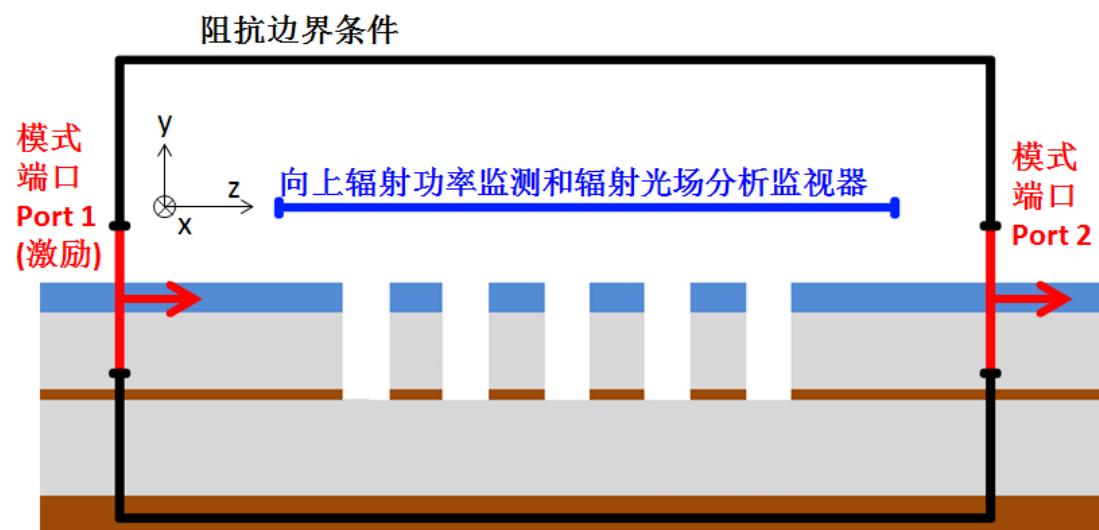


图 3.8 有限元仿真的建模示意图。左端的红色端口设置为电磁波的模式激励端口 Port1，右端的红色端口设置为模式端口 Port2，黑色的边界设置为阻抗边界条件，并离仿真区域10微米以上。在光栅的上方设置一个蓝色的Cutline，用于积分求解向上辐射的功率和提取向上辐射的电场的分布。

如图3.8所示，在有限元的模型建立和仿真编程中，需要设置好光栅耦合器的仿真物理场、器件模型几何结构、材料属性、边界条件、求解器设置和仿真结果的预处理等模型配置。

大致的模型配置如下：

选择的物理场为波动光学Wave Optics或电磁波Electromagnetic Waves，求解器选择频域求解器Frequency Domain。

器件的大致模型几何结构如图3.8所示，其中淡蓝色的部分是氮化硅材料，

设置的材料折射率为1.9894，而淡灰色的部分是氧化硅材料，设置的材料折射率为1.4431，棕红色的部分是硅材料，设置的材料折射率为3.42，纯白色部分为空气，设置的折射率为1。

仿真区域整体的黑色边界条件为阻抗边界条件，可以尽量不产生边界反射，并且距离仿真区域较远。在红色的边界处设置为端口Port，其中左端的端口Port1设置为激励端口，而波导右边输出端Port2设置为非激励端口，蓝色的切线Cutline距离光栅上表面2微米，用于积分求解向上辐射功率和提取向上辐射光场分析，用于耦合效率的计算。在Port1激励端口输入对应的电磁波TE模式，TE模式的电场偏振态平行于x轴。

频域求解器设置好光波长或电磁波的频率，便可对光栅耦合器的稳态辐射电磁场分布进行求解。

通过如上方法设置好器件模型后，就可通过遗传算法对模型进行调用、仿真和数据处理，其具体的程序框图3.9所示。

在的全局变量中，设置好对应的变量，如光栅齿的宽度，光栅槽的宽度，氧化硅层厚度等，再通过遗传算法的优化程序，优化并求解光栅耦合器的结构变量。

如图3.9中，光栅耦合器仿真中，光栅耦合器的效率，通过如下公式计算

$$\eta = P_{up} \times \varepsilon \quad (3.9)$$

其中 $P_{up}$ 为向上辐射光的光功率，可通过电磁场能流线积分进行计算。沿着蓝色切线Cutline，积分能流的y分量，可以计算得到 $P_{up}$ 。而 $\varepsilon$ 为向上辐射的光场与标准单模光纤的光场的模式匹配度。模式匹配度 $\varepsilon$ 可以通过提取切线Cutline的电场分布，并与单模光纤的准高斯模式进行模式匹配度计算，计算的公式如下：

$$\varepsilon = \frac{|\int E_{up}^* E_{SMF} dz|^2}{|\int E_{up} dz|^2 |\int E_{SMF} dz|^2} \quad (3.10)$$

其中 $E_{up}$ 为提取的向上辐射光的电场分布， $E_{SMF}$ 为的单模光纤的倾斜高斯模式，其公式为

$$E_{SMF} = A \exp\left(-\frac{(z - z_0)^2}{w_0^2}\right) \exp\left(-in\frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta z\right) \quad (3.11)$$

其中A为光纤模式的高斯模式的归一化常数， $w_0$ 为高斯模式的光腰半径，对于标准单模光纤，光腰半径为 $5.2\mu m$ ，光纤的折射率n为1.46，而光纤的倾斜角度

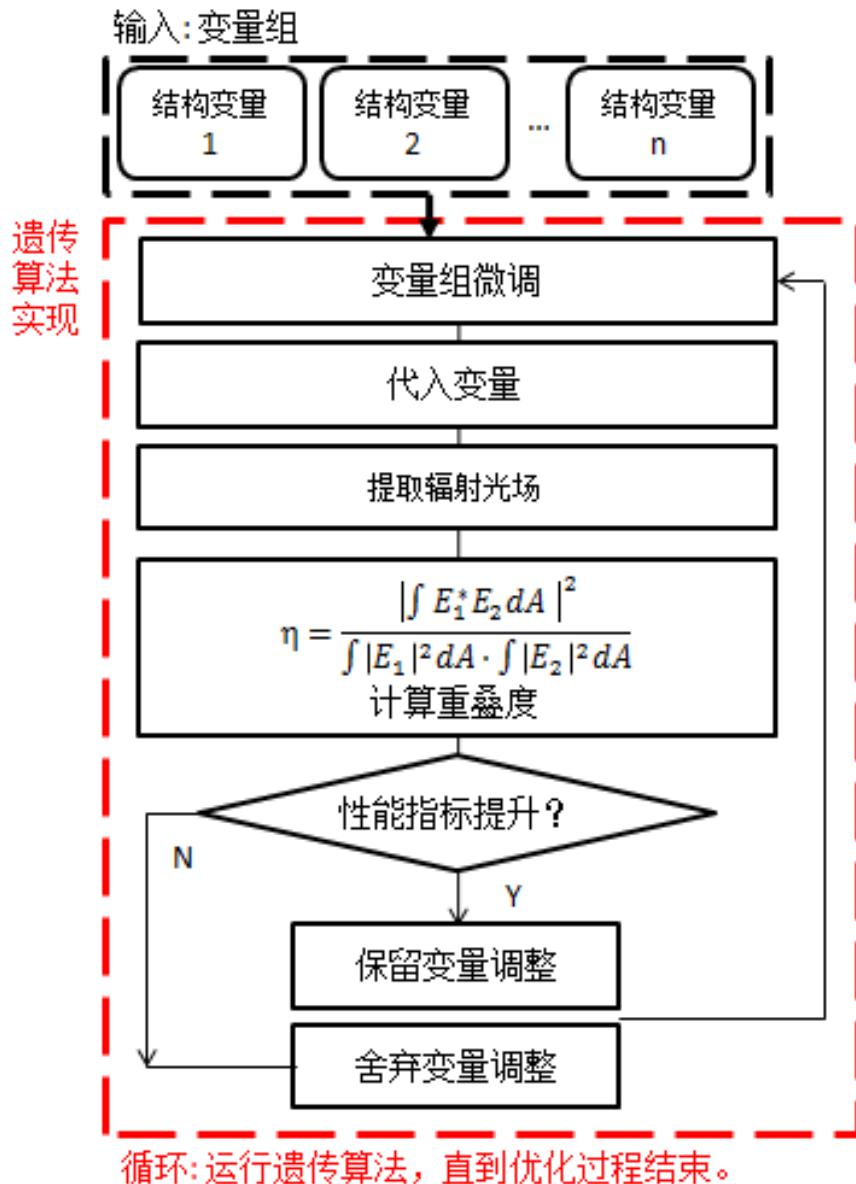


图 3.9 光栅耦合器模型进行遗传算法优化的大致程序流程。将待优化的结构变量，代入中进行仿真运算，再通过提取辐射光场和模式重叠度计算，计算光栅的耦合效率。并通过遗传算法进行循环迭代优化，实现效率的提升。

$\theta = -8^\circ$ 。通过上述仿真，设计和优化了两种常用的一步刻蚀的光栅耦合器，一种是加工容差特性较好的均匀光栅，一种是峰值效率更高的非均匀光栅。

### 3.3.3 仿真结果

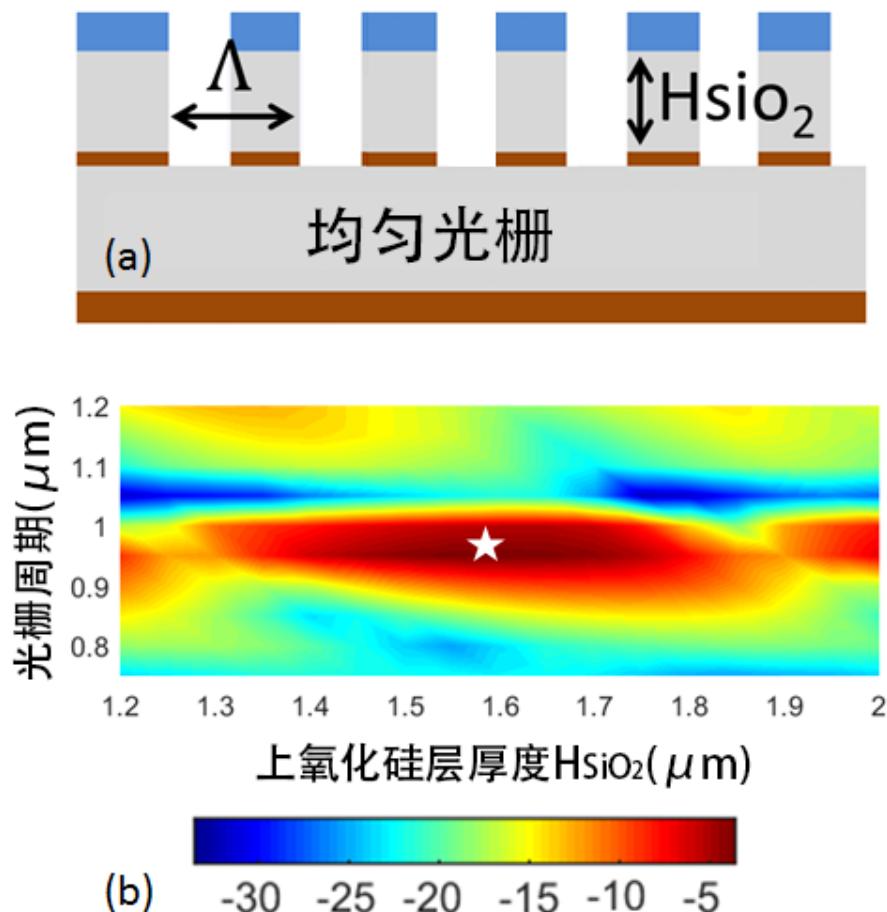


图 3.10 均匀光栅的仿真结果。(a) 均匀光栅的结构，在光栅优化过程中，考虑两个最主要的结构参数，光栅周期  $\Lambda$  和上氧化硅层的厚度  $H_{SiO_2}$ 。(b) 通过穷举仿真得到当光栅周期为  $0.95\mu m$  和上氧化硅层的厚度为  $1.6\mu m$  时，光栅耦合器的效率最高，为  $-3.52\text{dB}$ 。

通过上一小节的方法，主要设计和优化了两种的光栅耦合器，一种是加工容忍度高，带宽较宽，器件更稳定的均匀光栅的光栅耦合器，另一种是匹配单模光纤模式的具有更高峰值耦合效率的非均匀光栅的光栅耦合器。

如图3.10所示，考虑了均匀光栅的仿真，一般而言，均匀光栅的光栅耦合器相比非均匀光栅，光耦合的效率较低，然而具有更好的加工误差容忍度和更宽的光谱带宽，在实际的集成光子芯片中应用较为广泛。

本方案的均匀光栅，相关的结构变量较少，如图3.10，有氮化硅层的厚度  $H_{SiN}$ 、二氧化硅层的厚度  $H_{SiO_2}$ 、光栅周期  $\Lambda$ ，光栅占空比  $FF$ ，光纤耦合角度  $\theta$  等变

量。

在芯片测试中，为便于测试，光纤耦合角度  $\theta$  通常为5-20°的范围。本实验中，耦合角度选择-8°。为了提高光栅的最小特征尺寸，光栅占空比选定为50%，便于光栅的曝光和刻蚀。氮化硅波导的厚度定为600nm，是出于反常波导色散设计。因此需要优化的器件结构变量有二氧化硅层的厚度H<sub>SiO<sub>2</sub></sub>、光栅周期  $\Lambda$ ，如图3.10a。

因此，采用了穷举优化的方法，即完全变量组合(All combination)的方法，优化了器件的二氧化硅层厚度H<sub>SiO<sub>2</sub></sub>和光栅周期  $\Lambda$ ，通过在MATLAB中改变光栅的周期和上层氧化硅层的厚度，并计算在C波段的中心波长1550nm波长时，光栅耦合器耦合效率随H<sub>SiO<sub>2</sub></sub>和  $\Lambda$ 变化的映射图，如图3.10b。从图中可以得到，当光栅的周期为0.95μm时，且上层氮化硅的厚度为1.6μm时，可以实现最高的均匀光栅效率为-3.52dB。

在此基础之上，进一步优化均匀光栅，可得，当光栅周期  $\Lambda=965\text{nm}$ 时，FF=51.3%时，均匀光栅的光栅耦合器具有最高的耦合效率，如图3.12所示。

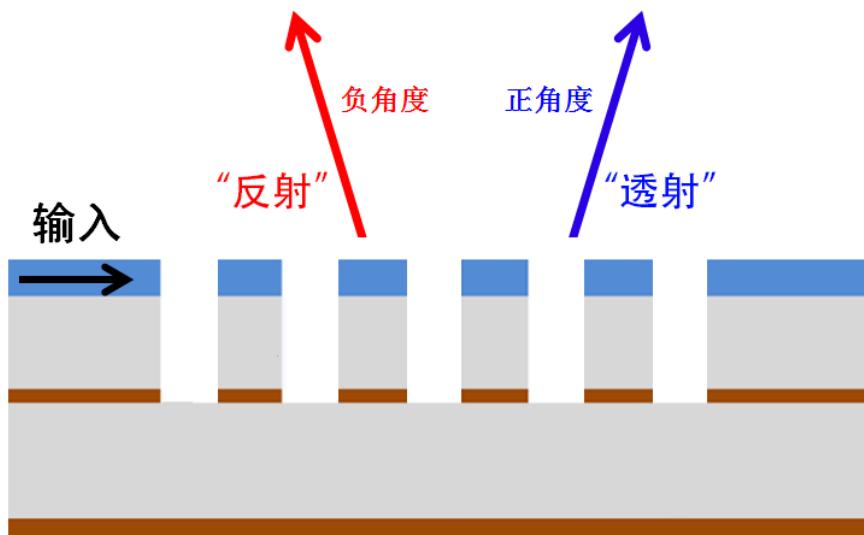


图 3.11 在光栅耦合器仿真时，之所以选择-8°的负数耦合角度，是因为在一步刻蚀的三层光栅结构中，光从波导输入近似于遭遇了垂直于芯片表面的DBR结构，因此形成“反射”比形成“透射”要更强烈。仿真结果也证明了负数角度的耦合效率更高。

均匀光栅的耦合仿真中，光纤的耦合角度定为-8°，为反向的耦合角度。在仿真过程中也尝试过正向的耦合角度，然而仿真的结果不太好，耦合效率较低。本方案中的一步刻蚀的三层光栅结构，如图3.11所示，由于采用了深刻蚀的设计，刻蚀深度接近2.4μm，可以视作垂直于芯片表面的DBR结构。在DBR结构中，形成“反射”会比形成“透射”更具有优势，即负数的耦合角度比正的耦

合角度更具优势。通过数值仿真的尝试，也能证实当耦合角度为负值时，耦合效率更高。因此，本实验中，选择了光栅耦合器的耦合角度为-8°。

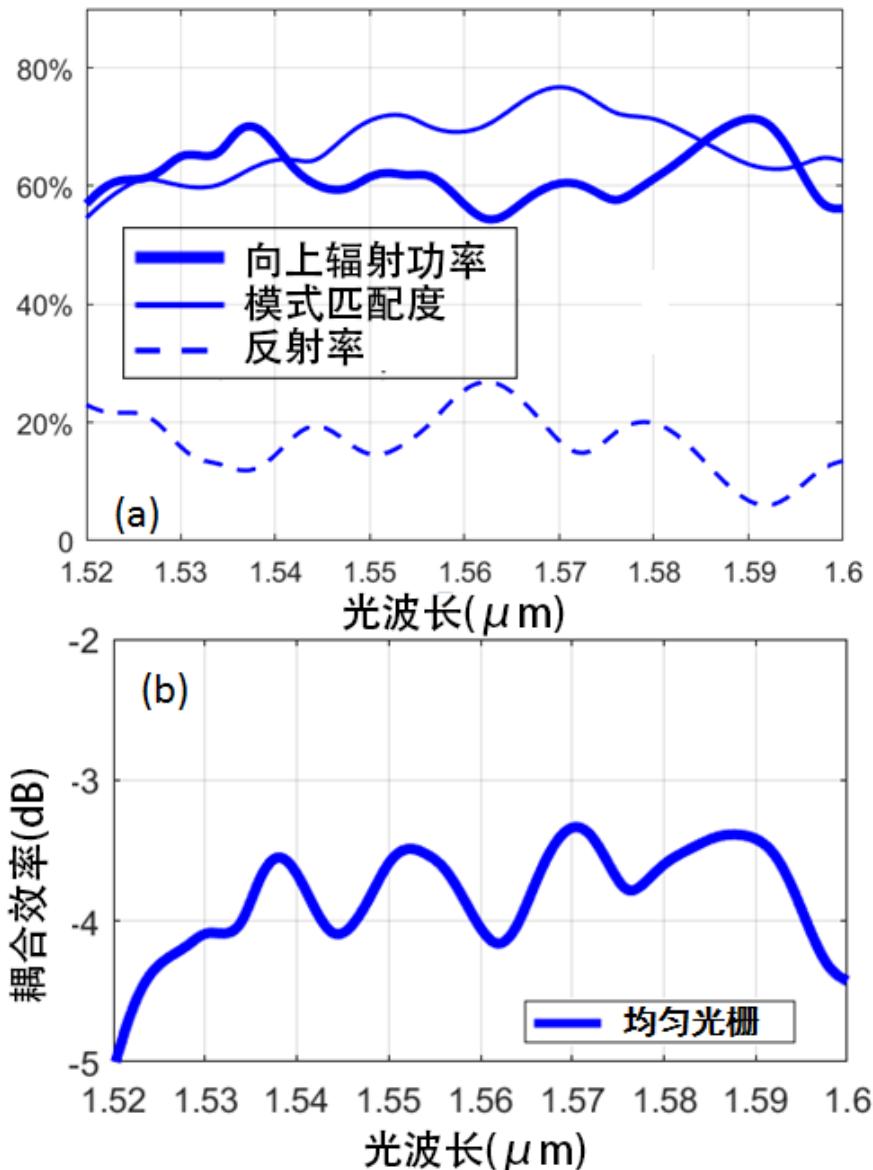


图 3.12 非均匀光栅的仿真结果。 $\Lambda=965\text{nm}$ ,  $\text{FF}=51.3\%$ ,  $H_{\text{SiO}_2}=1.6\mu\text{m}$ 。(a) 波长扫描得到的光栅向上辐射效率、光栅辐射光场与单模光纤模式的匹配度和光栅波导的反射率。(b) 波长扫描得到的光栅耦合器偶和效率，可见峰值的耦合效率为-3.4dB，波长为1570nm，且1dB带宽超70nm。

通过MATLAB脚本对光栅耦合器的波长响应进行仿真，如图3.12所示，在C波段附近1520-1600nm波长范围内，仿真了器件的光栅向上辐射效率、光栅辐射光场与单模光纤模式的匹配度和光栅波导的反射率。

通过向上辐射功率百分比和模式匹配度的乘积，可以计算得到从波导中耦合到单模光纤的效率。一般情况下，还要考虑光从空气耦合到单模光纤中的界

面反射，然而由于单模光纤的折射率较低，空气—单模光纤界面的反射约为

$$\left( \frac{n_{SMF} - n_{air}}{n_{SMF} + n_{air}} \right)^2 \approx 4\% \quad (3.12)$$

反射的比例较小可以忽略不计。可见，在C波段附近，1525-1595nm范围内耦合效率可以在-4.5dB以上，其1dB带宽为70nm，1dB带宽可以覆盖1525-1575nm的通信C波段范围，还覆盖部分L波段1575-1625nm的波长范围。在实际应用中，覆盖更宽的频谱范围，在通信、传感、声光非线性等应用中具有较大的意义。

均匀的光栅仍存在一些问题，如图3.12a，其仿真的器件反射率约为20%，反射较大，反射驻波在通信应用中需要引入非线性光隔离器来避免反射的影响。因此，需要进一步优化均匀光栅，降低光栅反射。另一方面，也有利于进一步提高光栅耦合器的耦合效率。

如图3.13所示，均匀光栅的光栅耦合器的存在较高的波导反射率、较低耦合效率的局限，可以通过进一步的非均匀的非均匀光栅来优化。

在非均匀光栅中，由于每个光栅的齿和槽的宽度都可以视作是独立的变量进行优化，如图3.13a和表3-2，一个非均匀的光栅耦合器的变量有24个。当变量较多时，不能采用传统的穷举优化的变量优化方法，需要采用高效的多变量优化的算法，采用遗传算法来进行优化光栅的结构。具体的算法过程如图3.9所示。

通过遗传算法的优化，得到了表3-4中的光栅耦合器的几何结构变量

**表 3.2 遗传算法优化得到的光栅耦合器几何结构变量(单位nm)**

g1	t1	g2	t2	g3	t3	g4	t4
405	530	450	490	470	505	460	520
g5	t5	g6	t6	g7	t7	g8	t8
545	440	555	475	495	475	515	460
g9	t9	g10	t10	g11	t11	g12	Hsio2
525	540	465	415	510	495	430	1625

在表3-4的几何结构参数下，如图3.13b所示波长扫描，其中向上辐射的功率百分比接近85%，且向上辐射的光功率与单模光纤的高斯模式的匹配度将近70%，另一方面，光栅耦合器的波导反射也得到很好的缓解，反射功率也降低到5%或-13dB以下。波长扫描仿真得到的波导到光纤的耦合效率如图3.13c所示，

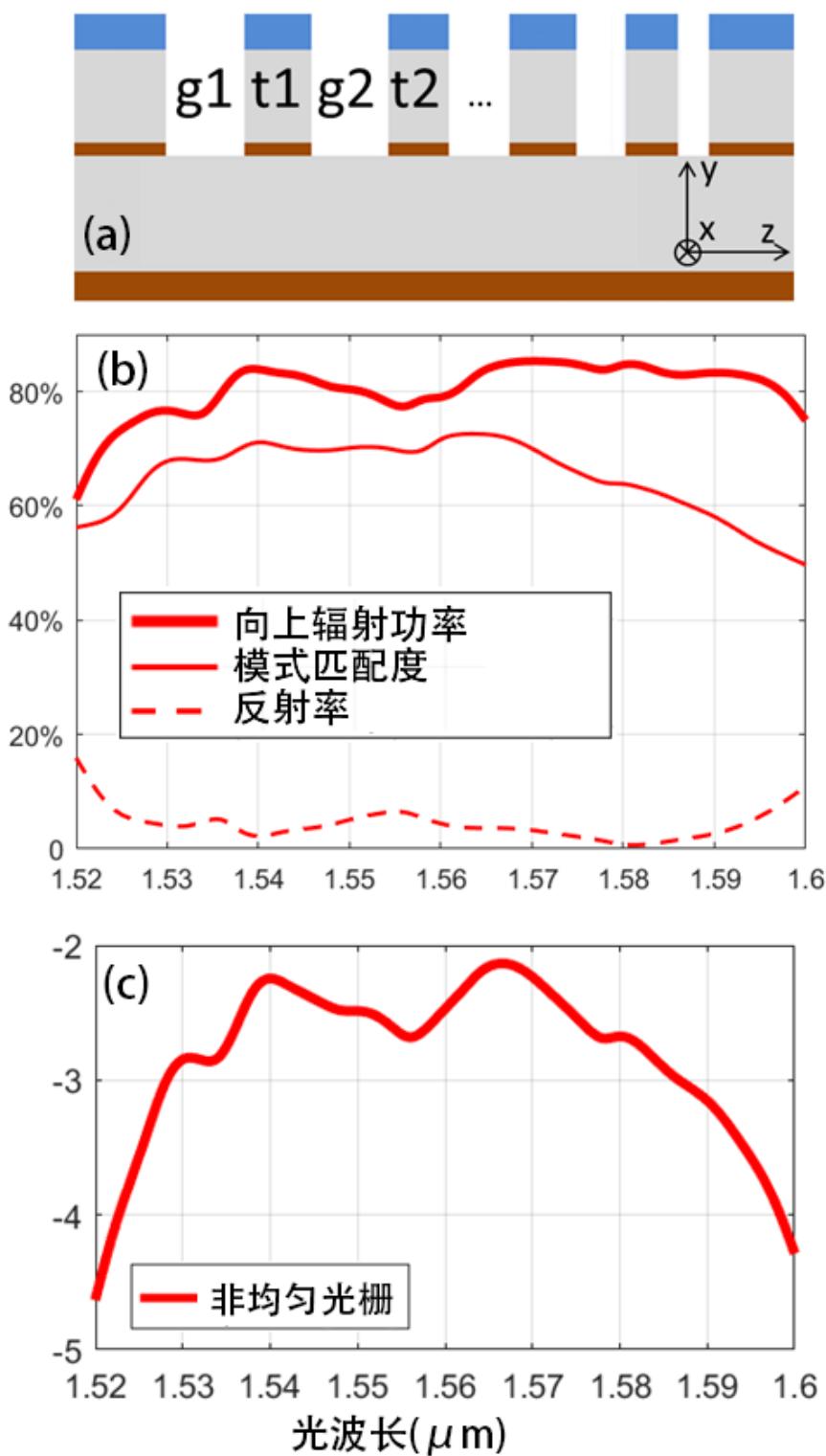


图 3.13 非均匀光栅的仿真结果，器件的结构变量见表3-2。(a) 非均匀非均匀光栅的变量定义。(b) 波长扫描得到的光栅向上辐射效率、光栅辐射光场与单模光纤模式的匹配度和光栅波导的反射率。(c) 波长扫描得到的光栅耦合器偶和效率，可见峰值的耦合效率为-2.1dB，波长为1568nm，且1dB带宽超65nm。

其中理论的峰值耦合效率为在-2.1dB@1568nm，且器件的1dB带宽约为65nm，覆盖需要的C波段光谱范围。

在设计均匀光栅和非均匀光栅的氮化硅光栅耦合器后，还需要度器件的容差特性进行分析。容差分析在器件设计和加工过程中非常重要，可以预知器件的性能随着加工误差或测试误差带来的变化，并对器件的加工可行性和可操作性做一个有效的评估。此外，在器件测试过程中，结合容差分析的趋势，可以对测试结果的展开合理的分析，并形成有意义的加工结果反馈。在本方案中，容易引起性能变化的主要加工误差有：光栅齿的刻蚀占空比变化情况、摆放光纤的位置偏差、以及中间的氧化硅层厚度的变化等。

如图3.14所示，对应的均匀光栅和非均匀光栅的误差分析。重点分析了当光纤放置位置偏差 $\pm 4\mu\text{m}$ 的情况下、当光栅齿的尺寸偏差 $\pm 50\text{nm}$ 的时候、以及当中间氧化硅层的厚度变化 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 的时候，器件仿真的峰值光栅耦合器的峰值耦合效率的变化情况。其中，中间氧化硅层的厚度，可以通过气相外延生长时的陪片监控来实现精准厚度生长。而光纤位置可以通过三维台来控制。而光栅齿的占空比需要控制在 $\pm 20\text{nm}$ （5%）左右，在合理的电子束曝光序列控制的情况下，在器件曝光和刻蚀的过程注意控制刻蚀，同时结合改变光纤的摆放位置，来补偿光栅刻蚀带来的器件性能下降。理论上该加工容差可以在实验上实现，在下一节对光栅耦合器进行制备。

### 3.3.4 器件加工与测试

器件的加工过程较为简单，如图3.15所示，只需要进行一次的光栅刻蚀过程就可以制备。器件加工流程中最大的挑战是实现 $2.5\mu\text{m}$ 的光栅齿的刻蚀。传统的聚合物光刻胶难以实现接近1:6宽高比光栅的刻蚀，因此在本方案中，采用200nm的铬金属掩膜，通过金属掩膜的的超过1:20的的刻蚀选择比来实现深光栅的制备。

采用铬金属掩膜，是因为铬金属可以溶解于硝酸和硝酸四氨的混合溶液中，形成可溶的四氨合铬 $[\text{Cr}(\text{NH}_3)_4]^{3+}$ 络合物并去除，使用方法上类似于聚合物的去胶液。[\[75\]](#)

而沉积200nm的金属铬掩膜，一般情况下需要有足够高，一般3-4倍以上厚度的聚合物光刻胶来lift-off实现，否则，光刻胶结构太薄，金属太厚容易造成金属粘连成片导致lift-off失败。因此，本试验采用了1100nm的PMMA正胶，通过EBL曝光显影，后真空蒸镀铬后lift-off的方法，形成金属铬掩膜。

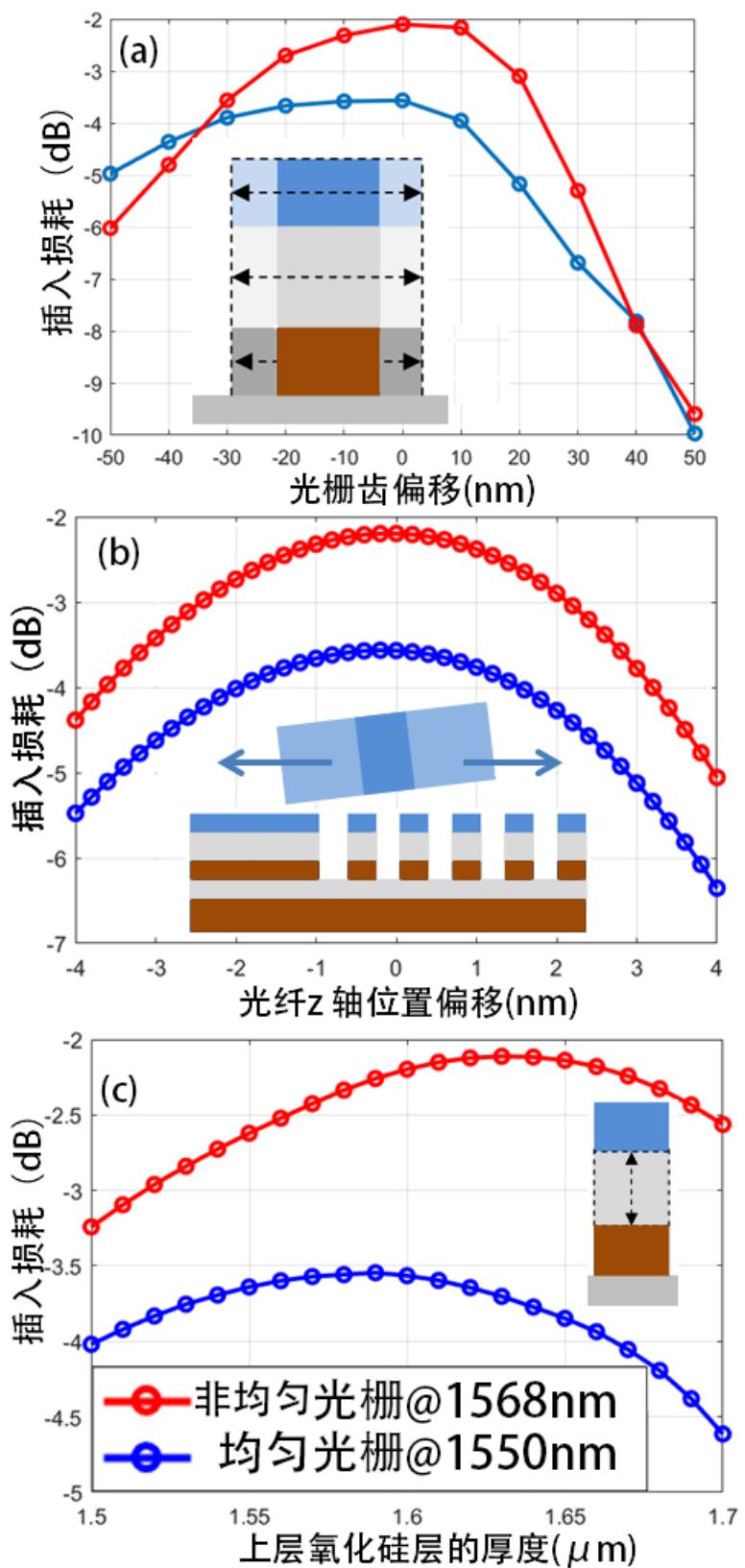


图 3.14 光栅耦合器的容差分析图。(a) 光栅齿的尺寸偏移对器件耦合效率的影响。(b)光纤摆放位置z轴偏移导致的耦合效率影响。(c)上氧化硅层厚度变化对器件耦合效率的影响。

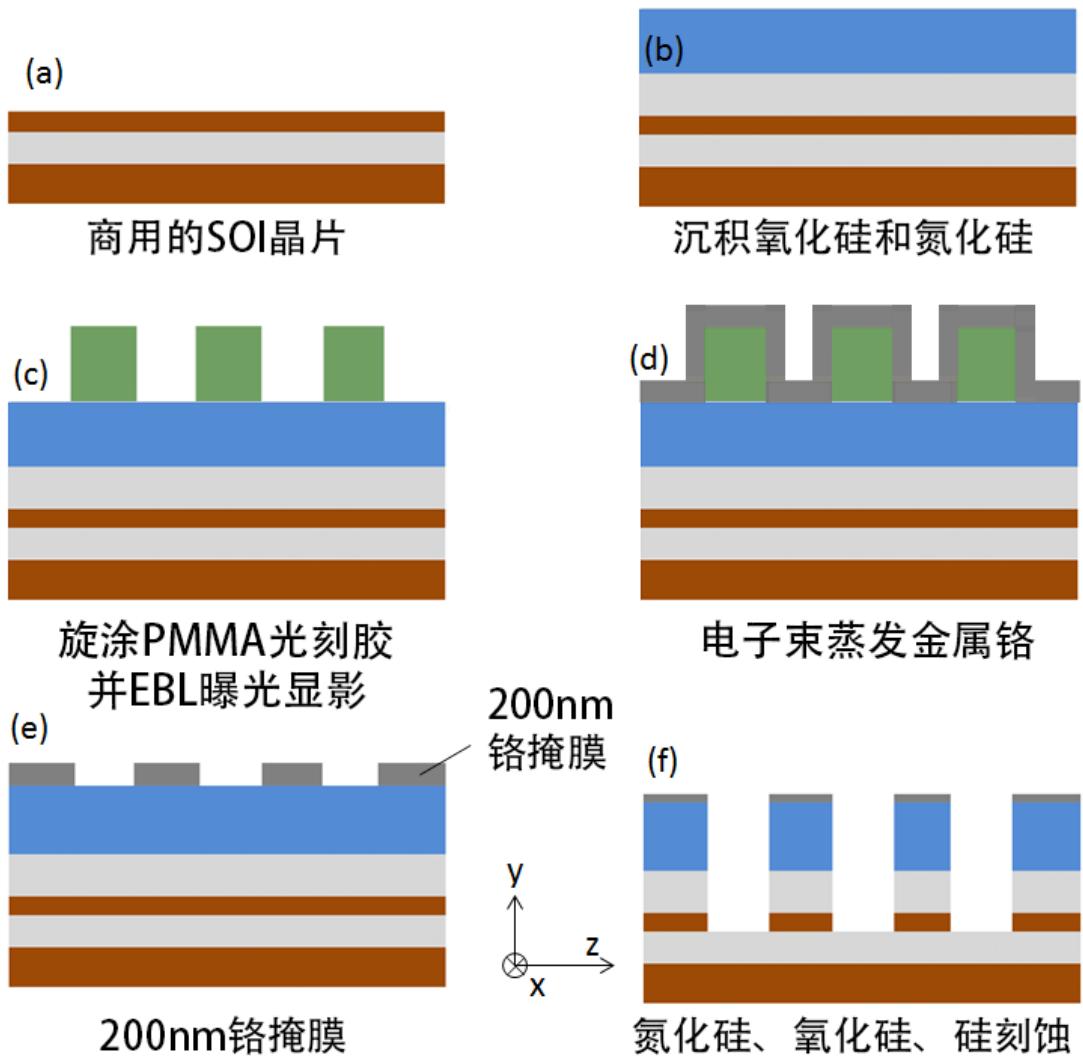


图 3.15 器件加工后的SEM和显微镜图。(a)选用220nm硅层的SOI晶片。(b)在SOI晶片上沉积1600nm氧化硅和600nm氮化硅层。(c)旋涂PMMA光刻胶并光刻显影得到PMMA掩膜。(d)通过电子束蒸镀，镀上200nm的金属铬。(e) lift-off得到200nm厚的铬金属掩膜。(f)通过等离子体刻蚀，一步刻蚀氮化硅、氧化硅、硅层，完成光栅制备。

形成铬金属掩膜之后，需要通过三次等离子体刻蚀，刻蚀的参数如下

**表 3.3 首先通过反应离子束刻RIE刻蚀氮化硅600nm，表格为等离子体刻蚀的菜单**

CHF3	O2	RF	temp	press	time
50	5	200	20	50	3'30"

**表 3.4 其次通过RIE刻蚀二氧化硅1600nm，表格为等离子体刻蚀的菜单**

CHF3	Ar	RF	temp	press	time
12	12	200	20	30	23'30"

**表 3.5 最后通过电感耦合增强等离子体ICP刻蚀硅220nm，表格为等离子体刻蚀的菜单**

HBr	ICP	temp	press	time
20	500	50	4	90"

则可以实现如图3.16c所示的电子显微镜SEM下的1:6宽高比的氮化硅+氧化硅+硅的三层光栅。

如图3.16a所示，还需要在刻蚀好的光栅的基础上再刻蚀氮化硅的波导。本实验设计的氮化硅光栅耦合器不需要精确的电子束对准套刻，使用海德堡μpg501无掩膜光刻机，其标称的套刻精度 $\geq 0.5\mu\text{m}$ ，过程相对简单，并不影响器件的性能。刻蚀氮化硅的波导后的光栅耦合器如图3.16a所示。

图3.16为加工后的器件，对器件进行测试，本方案中光栅的耦合角度为-8度，在采用双边光栅耦合器的测试方案时，负数的耦合角度会有不便，因此，选择了一端为光栅耦合器，一端为锥形光纤端面耦合的方式，如图3.17c，其优点为，可以通过较短的光波导来实现测试，短的光波导意味着波导的传输损耗在后续的数据处理中忽略不计，简化了器件测试的过程。同时，器件面积小，可以在同个芯片上制备更多的样品，有利于测试。

器件测试的配置图如图3.17a所示，采用的是一端-8°垂直耦合，另一端为锥形光纤的端面耦合。示意图如3.17c所示。采用了8164B光波测量系统，产生了1550nm的激光，经过了光纤偏振控制器的偏振控制，耦合并激发波导中的TE模式，光波导中的光传输到衍射光栅后，向上辐射，通过上方的平端面的单模光纤进行接收，返回到8164B的光功率计上，完成功率监测，测试回路损耗。

图3.18是光栅耦合器的耦合损耗的测试结果。制备了不同曝光剂量的光栅

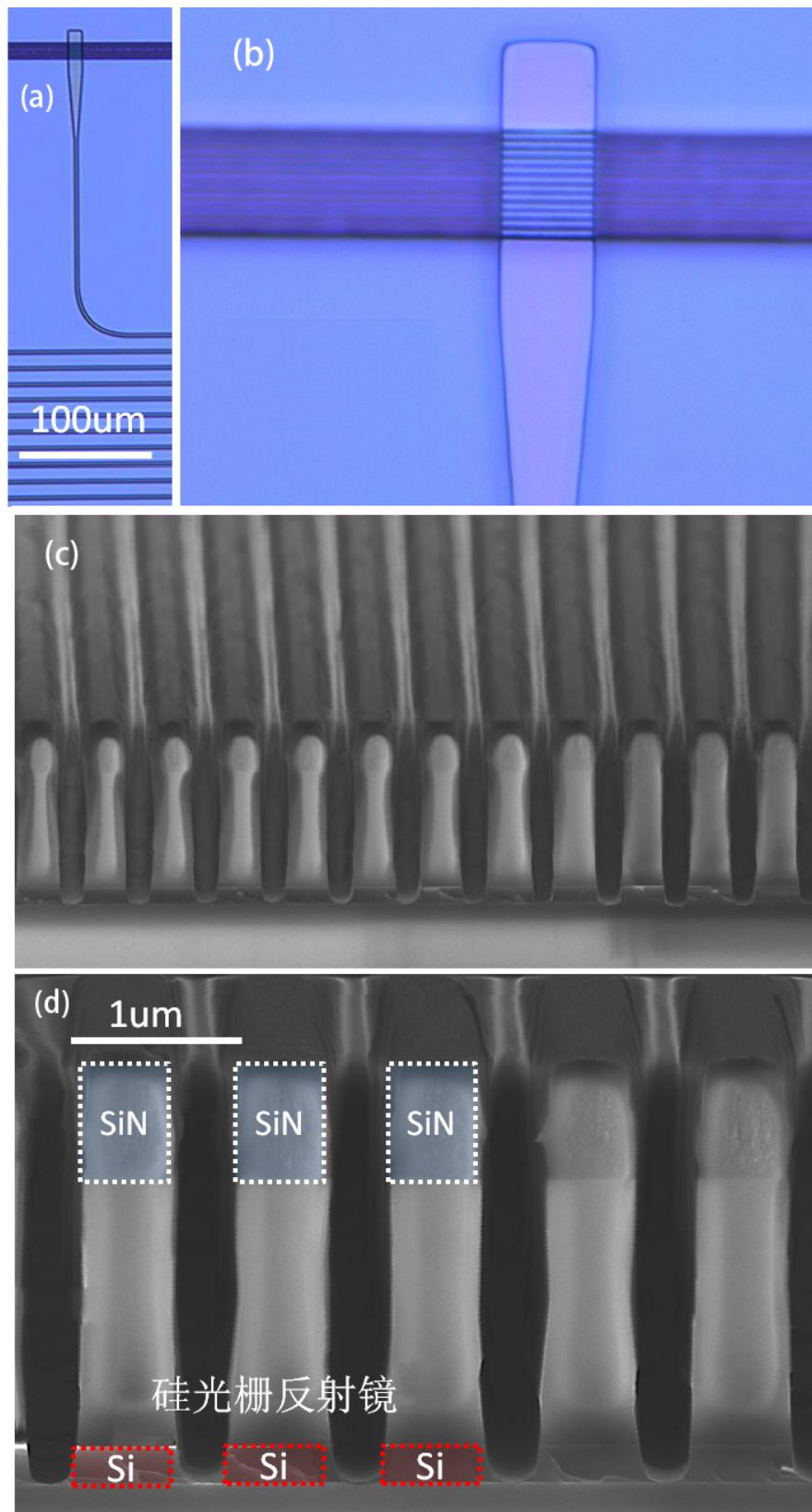


图 3.16 (a)(b) 制备后的光栅耦合器在光学显微镜下的图。 (c)(d) 制备后的光栅耦合器在电子显微镜下的图，可以清晰的看到硅光栅反射镜和氮化硅的衍射光栅结构。

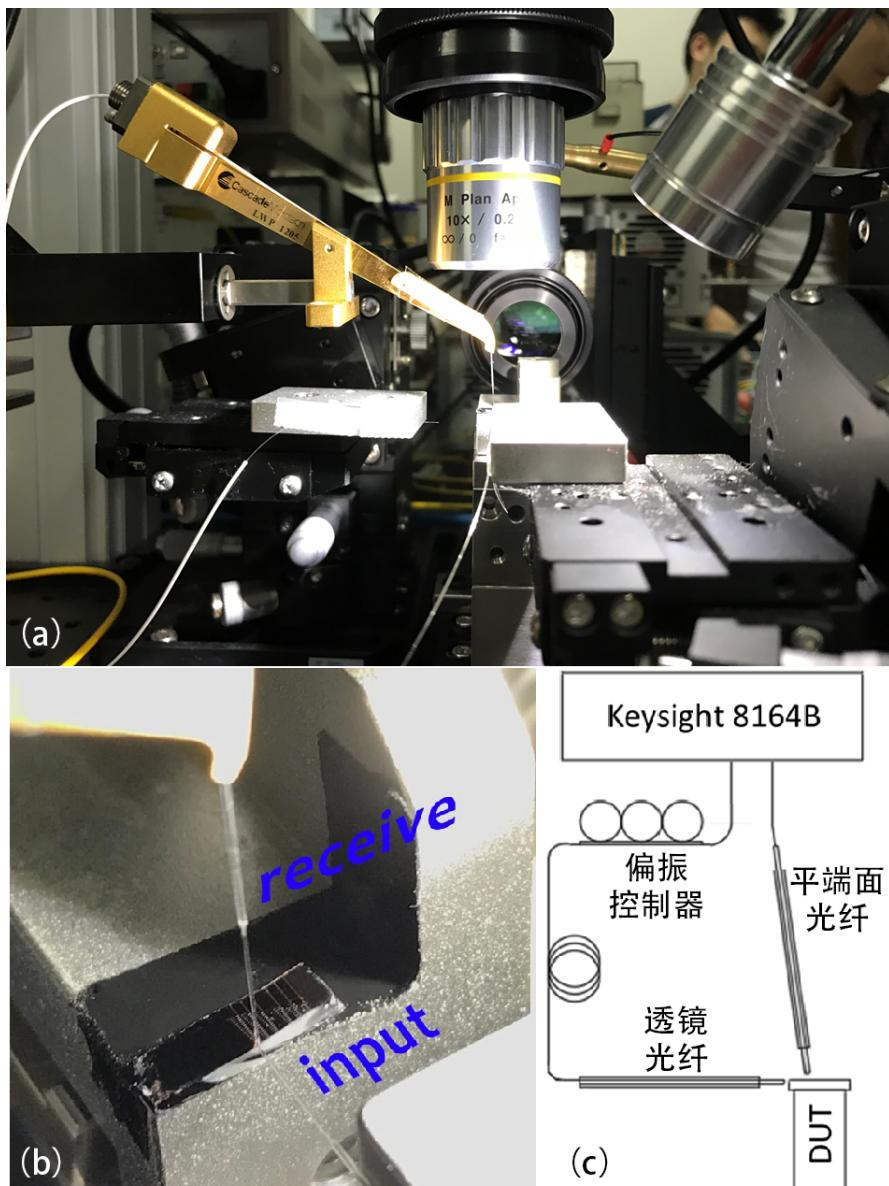


图 3.17 (a) 光栅耦合器的大致测试装置。(b) 光从断面的锥形光纤输入，到光栅处衍射后，通过垂直的平端面单模光纤接收。(c) 测试链路的大致装置示意图。通过 Keysight 8164B 激光器进行波长扫描，完成器件测试。

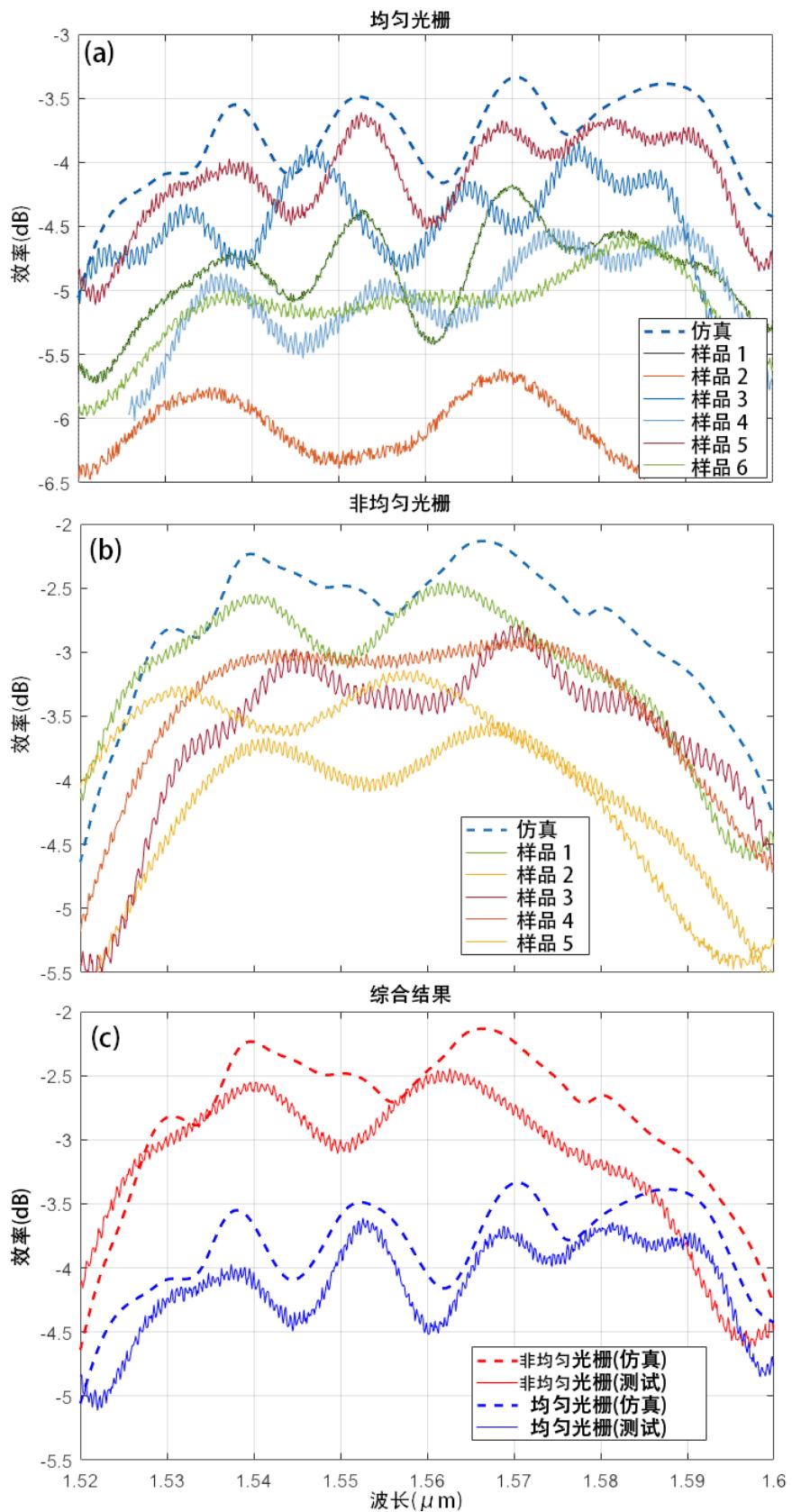


图 3.18 器件的测试结果图。(a)均匀光栅下测试样品的耦合效率和仿真的耦合效率。(b)非均匀光栅下测试样品的耦合效率和仿真的耦合效率。(c)最优的器件测试结果。

耦合器样品，器件的测试的耦合损耗的抖动大致在1dB范围内，其中选取最佳的测试结果，其测试的结果与器件仿真的结果较为贴近。

### 3.4 小结

在本章中，提出并通过遗传算法设计了一种基于底部硅光栅反射镜的氮化硅光栅耦合器。通过下置式的硅光栅，实现较高的向上的辐射效率，从而极大的提升了器件的耦合效率。同时，又采用了一种便于制备的光栅一步刻蚀的方案，一方面保留了硅光栅反射镜的高效率，另一方面，避免了化学机械抛光CMP和高精度的电子束对准曝光HPA过程。并通过器件测试得到均匀光栅的耦合效率为-3.6dB和70nm的1dB带宽，而非均匀非均匀光栅的耦合效率为-2.5dB和65nm的1dB带宽。设计的氮化硅光栅耦合器，性能突出，制备简单，在实际的器件制备和应用中具有较高的应用前景。[\[76\]](#)

## 第4章 超材料的层间耦合器

### 4.1 三维混合集成简介

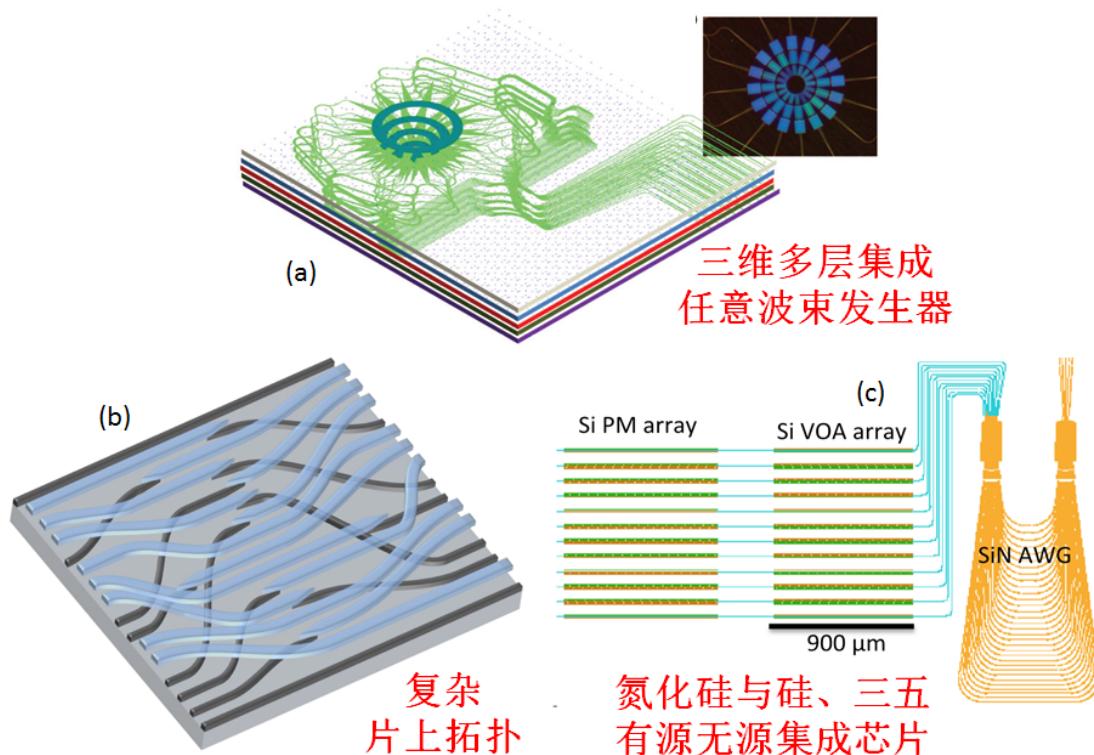


图 4.1 典型的氮化硅三维集成的应用前景。(a) 三维多层氮化硅集成的任意波束发射器。(b)复杂的片上拓扑。(c) 氮化硅与硅或三五族半导体材料有源无源混合集成。[23–25]

如第3章第一节所述，氮化硅作为一种新兴的集成光子材料体系，具有优异的光学特性，还可以进行便捷的化学气相沉积，方便地沉积到不同的材料表面上，实现三维的光子集成。[77, 78]

氮化硅的三维集成，有三类典型的应用领域，如图4.1所示，一种是通过多层氮化硅波导的三维层叠，通过多层三维集成的极高自由度，实现任意波束的片上发射，如图4.1a，加州大学戴维斯分校的S. J. Ben Yoo团队提出的通过五层的氮化硅波导的多层布局，通过环形的氮化硅光栅的相干叠加光束射，可以实现任意波束的发射。[24]

第二种是可以实现复杂的片上拓扑结构，如图4.1b为美国桑迪亚国家实验室的Adam M. Jones等人展示的 $16 \times 16$ 通道的BANYAN网络，通过传统单层的光子波导很难实现复杂的网络拓扑的连接。而通过，通过氮化硅的三维集成的辅

助，则可以方便地解决复杂光网络的连接问题。[\[23\]](#)

第三种则是通过氮化硅与成熟、功能完善的硅基光子电路或三五族光子电路的混合集成，通过氮化硅材料的低损耗、高容差特性优势，结合有源材料的有源器件功能，实现混合集成光子电路的进一步性能突破。

硅材料则作为成熟的集成光子材料体系之一，具有较高的折射率和高集成度的优势。而三五族半导体材料在激光器、光调制器和光探测器等有源集成中也有广泛的应用。由于硅和三五族材料的折射率较高，高折射率的光子器件的性能容易受到器件加工误差的影响，导致串扰增大和性能降低等负面结果。

通过硅、三五族半导体和氮化硅的混合集成，一方面，可以兼有高折射率硅和三五族集成光子芯片的成熟、高集成度和多功能优势；另一方面，结合了氮化硅的低热光系数、低非线性、低折射率、高容差特性优势，可以制备更高性能的混合集成光子芯片。如美国贝尔实验室的Po dong等人和加州大学圣塔芭芭拉分校的Molly Piels等人，通过氮化硅的阵列波导光栅AWG和硅、磷化铟的三五材料体系混合集成，制备了更低串扰的DWDM光接收模块。[\[25, 79\]](#)

综上所述，氮化硅的三维混合集成具有明确有效的应用前景。在氮化硅的混合三维集成中，需要将光从硅、三五族材料中耦合到氮化硅层，需要通过精心设计的层间耦合器来实现波导的层间耦合。

在本章中，主要考虑硅与氮化硅波导的层间耦合。

## 4.2 硅与氮化硅层间耦合器的文献调研

在高折射率的硅和氮化硅的波导层之间，需要层间耦合器来实现光从硅的波导层耦合到氮化硅波导层。通过文献调研，如图4.2所示，常见的层间耦合器类型有：缓变倒锥、布拉格光栅、二层缓变倒锥等方案。

其中，布拉格光栅的方案原理类似于两个光栅耦合器之间的耦合，如图4.2b所示，美国佐治亚理工学院大学的Majid Sodagar等人做了基于上下金属反射层的布拉格光栅方案，其方案特点为器件紧凑，尺寸约 $20\mu\text{m}$ ，氮化硅波导层与硅波导层的层间距离足够大，达到 $1600\text{nm}$ ，因而在层间串扰上可以忽略不计[\[26\]](#)。然而，布拉格光栅的方案也存在缺点，布拉格光栅之间的耦合效率较低，需要同时采用上下的金属反射层来增大效率，下金属反射层的制备需要在光栅制备流程之前预先沉积好。而预先沉积下金属反射层的步骤，与传统的CMOS工艺的金属化流程不一致，金属的沉积也会为后续的电子束器件曝光增加不可控的因素，对电子束的邻近效应修正等存在影响等。

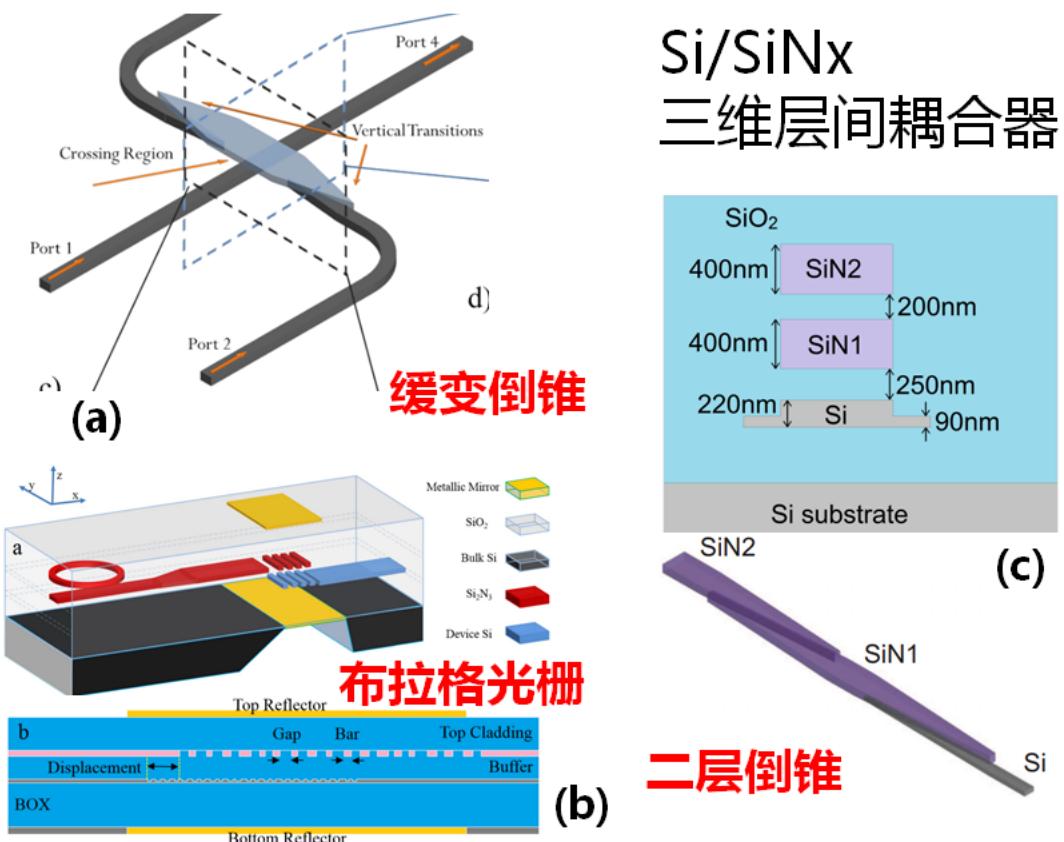


图 4.2 已报道的硅-氮化硅层间耦合器的层间耦合方案。(a) 简单有效的缓变倒锥方案。(b) 类似于光栅耦合器的布拉格光栅方案。(c) 通过双层的氮化硅的缓变倒锥层间耦合, 实现了双倍的超大层间间隔和可忽略不计的交叉损耗。[23, 26, 27]

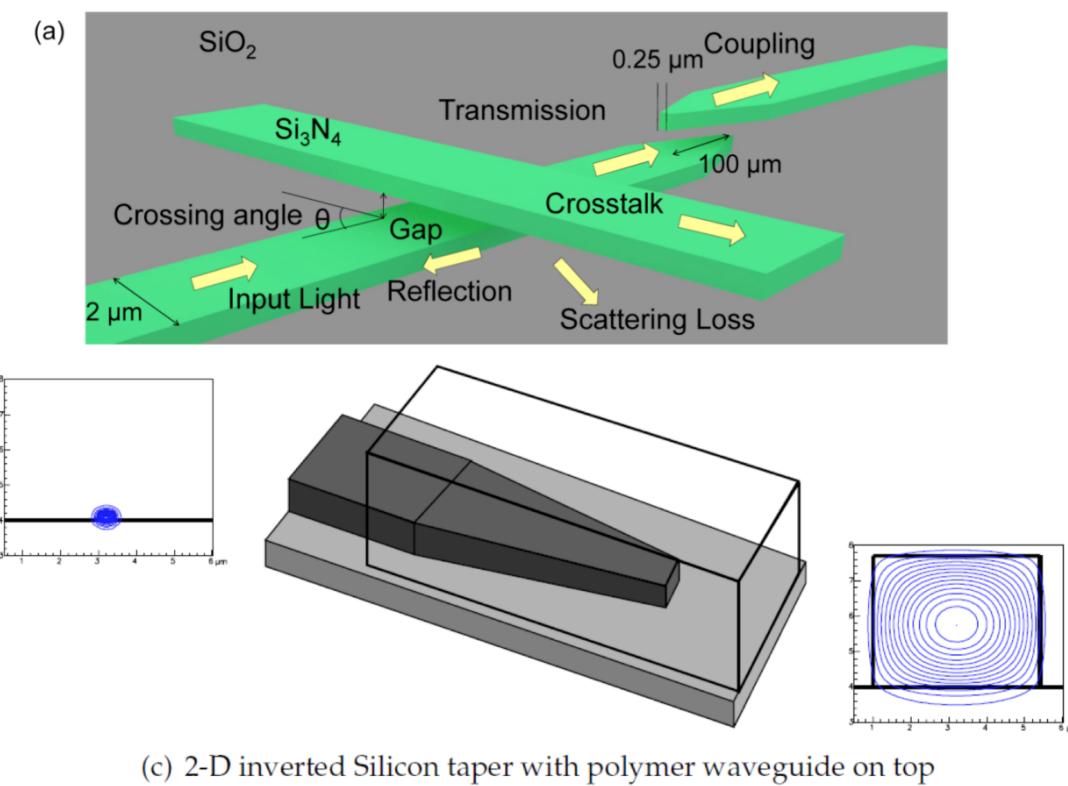


图 4.3 倒锥的工作原理示意图，通过倒锥的光限制减弱，光逐步从强限制波导中通过倏逝波的形式弥散到氧化硅的包层中。此时通过另一个相反的缓变倒锥，通过逐步增大波导的模式体积限制，就能耦合到另一层的波导中。[17, 28]

目前常用的层间耦合器，大多采用缓变倒锥的方案，如图4.3所示。通过缓变倒锥的结构，使原本局域在硅波导中的强限制光模式，随着硅波导逐渐变窄，模式体积逐渐变大，逐步弥散到二氧化硅的包层中。此时，通过另一个相反方向的氮化硅的缓变倒锥，可以将弥散的倏逝波模式的光从包层重新耦合回氮化硅的波导中，实现光从硅波导层到氮化硅波导层的耦合。[28]

如图4.4a所示，硅-氮化硅的缓变倒锥的层间耦合器的主要的指标参数有：硅-氮化硅层间耦合损耗、氮化硅输入交叉损耗、硅输入插入交叉损耗、层间串扰等。

其中硅-氮化硅的层间耦合损耗指光从硅层耦合到氮化硅层的光功率损耗。氮化硅输入交叉损耗指，光在氮化硅波导中传输时，遇到下层相互垂直的交叉硅波导时，产生的插入损耗。硅输入交叉损耗指，光在硅波导中传输时，遇到上层相互垂直的交叉氮化硅波导时，产生的插入损耗。而层间串扰指光在氮化硅波导中传输时，遇到下层相互垂直的交叉的氮化硅波导时，光从上层氮化硅波导耦合到下层硅波导的串扰程度。

美国桑迪亚国家实验室的Adam M. Jones等人，对倒锥的层间耦合器进行详细的仿真研究，如图4.4b和4.4c展示了，在三维硅-氮化硅的三维混合集成中，在不同的层间间隔以及不同的倒锥长度的情况下，三维交叉的层间耦合损耗、交叉损耗和交叉层间串扰的关系。[23]

对于基于缓变倒锥的三维层间耦合器，天然具有很好的层间串扰的特性，只要层间间隔保持200nm以上，便可确保40dB以上的优良的串扰特性。

而层间耦合损耗和交叉损耗需要设计，当倒锥的长度为 $50\mu\text{m}$ 时，其总的层间耦合损耗加上氮化硅输入交叉损耗约为1.5dB，总的损耗较大。只有当缓变倒锥的长度增长至大于 $100\mu\text{m}$ 时，硅-氮化硅层间距离增大至至少700nm以时，才能使总的损耗降低到可忽略不计的足够低的程度。

对于缓变倒锥的层间耦合器而言，需要足够长的倒锥长度 $>100\mu\text{m}$ 的同时，也需要足够大的层间间隔大于700nm才能保证足够高性能的三维层间耦合的集成的需求。

为满足足够大的层间间距，多伦多大学的Wesley D. Sacher等人做了双层倒锥层间耦合器的方案，如图4.2c所示。通过 $190\mu\text{m}$ 的器件超长器件长度和双层缓变倒锥形成850nm的较大的层间间隔，取得了-0.15dB三维交叉损耗和-56dB的层间串扰的极优秀指标。[27]

将调研的已报道的层间耦合器，不同方案的参数指标对比如表4-1所示，可

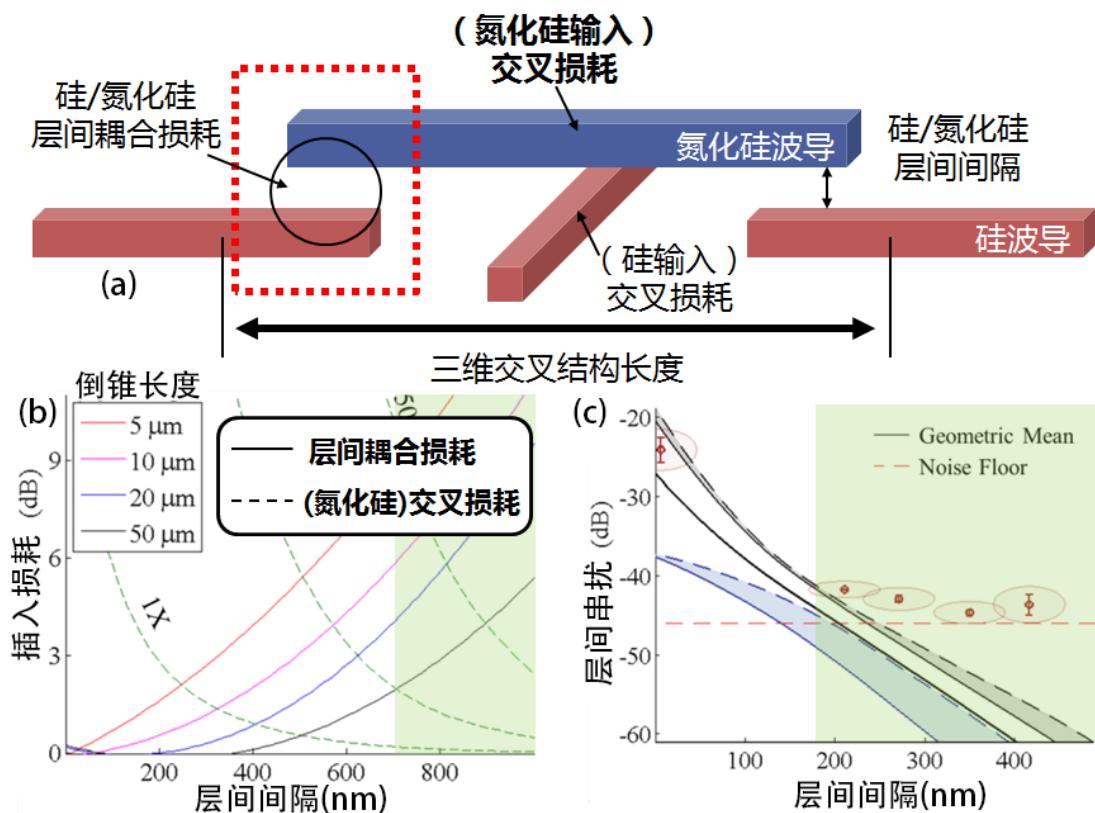


图 4.4 (a) 氮化硅-硅的三维层间耦合过程中，主要的器件指标有硅-氮化硅层间耦合损耗、氮化硅输入交叉损耗、硅输入插入损耗、层间串扰。(b) (c)美国桑迪亚国家实验室的Adam M. Jones等人总结的基于倒锥的三维层间耦合光交叉的层间耦合损耗，交叉损耗和交叉层间串扰随着倒锥长度、层间间隔的关系。[23]

见对于缓变倒锥的方案，其性能指标足够优秀，然而需要相当长的缓变倒锥来实现高性能的耦合，不利于紧凑高集成度的三维集成。需要一种高效而紧凑的硅-氮化硅的层间耦合器，在三维集成芯片中，实现高集成度、高效率的三维光子集成。

表 4.1 图4.2中调研的三种方案的层间耦合器的数据对比

三维交叉长度	Si/SiNx间隔	(氮化硅)交叉损耗	层间耦合损耗	层间串扰	特征	文献
>50μm	410nm	~1dB	~0.5dB	<-49dB	缓变倒锥	[26]
190μm	850nm	可忽略	<0.15dB	<-56dB	双层倒锥	[23]
~20μm	1600nm	可忽略	~0.5dB	可忽略	金属+布拉格光栅	[27]
~20μm	720nm	可忽略	~0.6dB	<-45dB	超材料差拍光栅	本论文

### 4.3 基于拍频的超材料层间耦合器

#### 4.3.1 方案理念

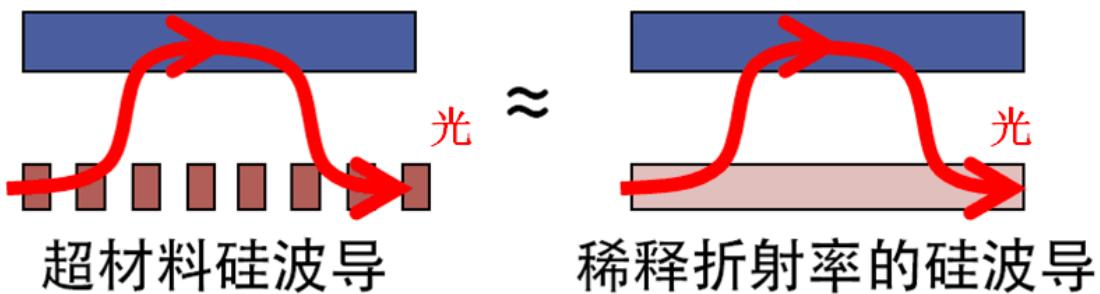


图 4.5 基于拍频的超材料层间耦合器的基本原理。通过亚波长光栅的超材料的硅波导，等效为稀释折射率的光波导，实现硅波导和氮化硅波导的折射率匹配。

如图4.5所示，与传统的缓变倒锥或布拉格光栅的层间耦合器方案不同，通过拍频的超材料层间耦合器，通过在硅波导上刻蚀亚波长的光栅。通过亚波长的光栅，减少硅波导中硅材料的占空比，借此减少硅波导的折射率，实现硅波导折射率稀释。通过匹配稀释硅波导的折射率和氮化硅波导的折射率，可以实现光的差拍光栅耦合，即光在两个相同有效折射率波导中的交替耦合的现象。

差拍光栅的层间耦合方案，相比缓变倒锥，一方面耦合效率接近，光通过差拍直接从硅波导层耦合到氮化硅层，避免了额外的衍射损耗，另一方面，差拍耦合避免了缓变倒锥层间耦合器需要>100μm足够长的缓变倒锥的缺点，可以实现更为紧凑的层间耦合。

### 4.3.2 二维仿真

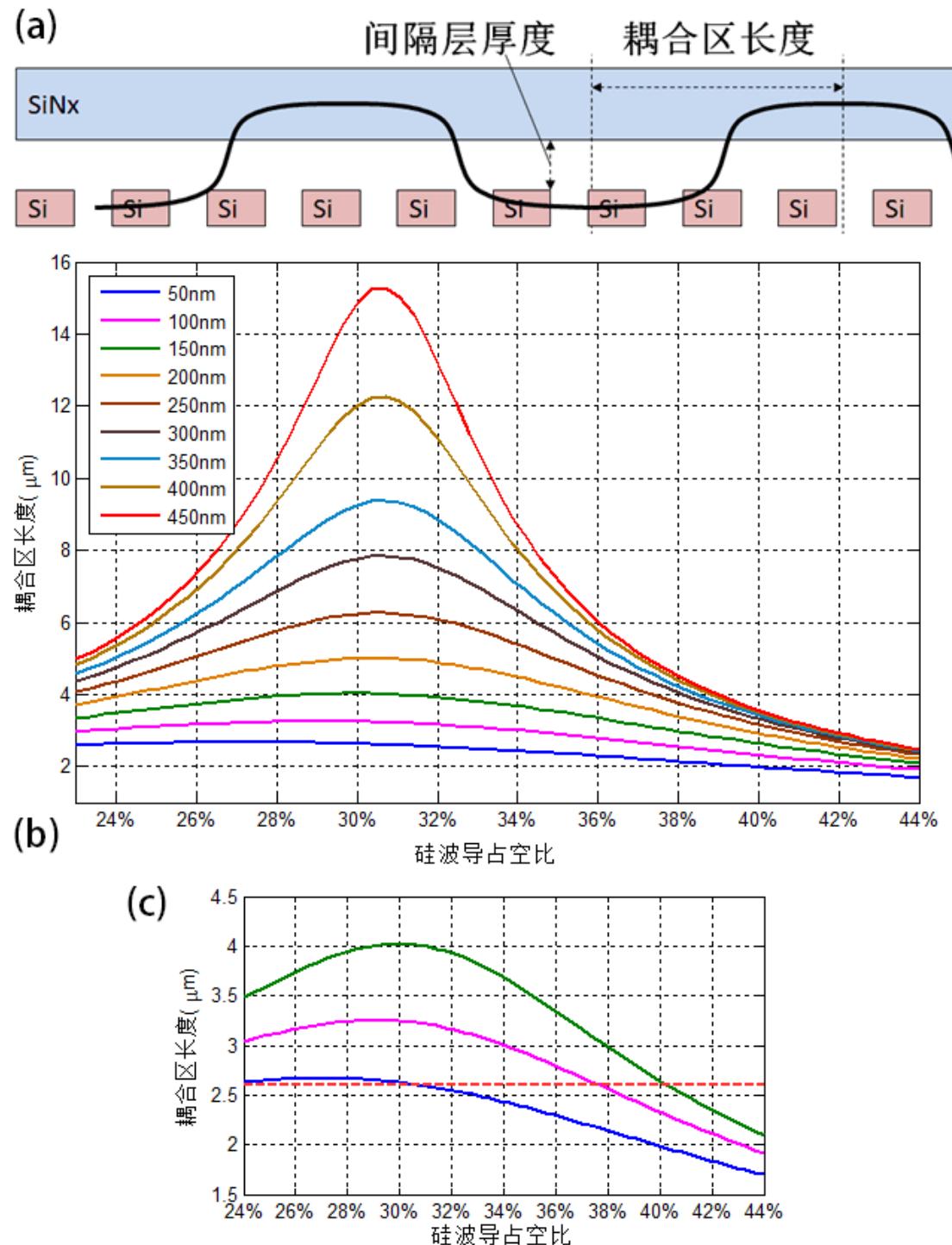


图 4.6 拍频层间耦合和层厚度之间的关系。(a) 假想的二维氮化硅平板波导与超材料平板硅波导之间的差拍耦合过程。间隔层厚度和耦合区长度已标注。(b) 不同的硅波导占空情况下，通过超模差拍理论计算的耦合区长度。可见当间隔层厚度越小时，耦合区长度随占空比变化较小。(c) 当间隔层厚度为50nm时，可以在占空比24%-34%的范围内保持耦合区长度不变，提供稳定可靠的差拍耦合。

差拍光栅的方案，先通过二维仿真进行设计，对关键参数进行分析。由于硅的折射率( $\sim 3.42$ )远大于氮化硅的折射率( $\sim 2$ )，因此，在二维平板硅波导(Slab waveguide)上刻蚀亚波长的光栅，以稀释硅波导的折射率，匹配氮化硅的平板波导的折射率，实现差拍耦合，如图4.6a所示。波导的四周的空白为二氧化硅包层，折射率为1.4431。

对于硅平板波导到氮化硅平板波导之间的层间耦合，其差拍耦合是通过波导间相互耦合的超模实现，其耦合区长度取决于硅波导的两个基础超模的有效折射率差。

其中，耦合长度可以通过波导间的相互耦合的超模之间传输常数的差值形成拍，其差拍的耦合距离由公式：(详细理论基础参考仿真中关于方向耦合器的tutorial教程)

$$L = \frac{2\lambda}{n_2 - n_1} \quad (4.1)$$

决定，其中， $\lambda$ 为光模式的真空的波长，而 $n_2$ 是同相位耦合超模式的有效折射率， $n_1$ 是反相位耦合超模式的有效折射率，一般的有 $n_2 > n_1$ 。[80–82]

通过耦合距离公式，分析了不同层间距离、不同的波导占空比的硅波导的情况下，从硅波导到氮化硅波导的耦合区长度，如图4.6b所示。硅平板波导的占空比会随着加工的局限而不可避免的发生偏差，当硅平板波导的占空比发生变化时，耦合长度也相应的发生变化。一般的，如果耦合长度容易随着占空比的偏移而发生较大的变化，则说明层间耦合器的设计对占空比变化敏感，缺乏足够的鲁棒性。

仿真了50~450nm层间间隔下的耦合情况，可见，当层间间隔越大时，耦合长度随着器件的占空比变化的影响越大，意味着当占空比出现偏差时，耦合的效果就会发生较大的偏差，不利于层间耦合的稳定性；相反，随着层间间隔变小，耦合长度随着器件占空比变化的程度变小。当层间间隔为50nm时，耦合长度可以保持在24%-34%的占空比范围内保持约 $2.6\mu\text{m}$ 不变。意味着，当层间的间隔为50nm的时候，占空比可以保持 $\pm 5\%$ 的误差容忍度。而不会因为加工误差而导致性能严重下降，能保证器件的稳定性和加工可行性。

因此，根据二维仿真的结果，将硅波导和氮化硅波导之间的间隔定为50nm，以确保器件有较好的容差特性，便于器件的加工和测试。

在图4.6中，通过二维仿真得到，当氮化硅波导和硅波导的层间距离约50nm时，才能保证足够稳定的层间耦合。而在图4.4中得知，氮化硅波导和硅波导的层间

间隔得需要足够大，才能确保足够小的交叉损耗和层间串扰，这是相互矛盾结论。为解决矛盾，采用了双层氮化硅层的方案，如图4.7所示，当光通过超材料的硅波导层，耦合到下层的氮化硅层中；上下两层氮化硅层的厚度一致，有效折射率也一致，因此，光会进一步耦合到上层的氮化硅层，上层氮化硅波导与硅波导的层间间隔较大，避免了交叉损耗。当光绕过下方的硅波导后，再通过相反的过程，逐渐向下耦合，回到超材料的硅波导中。

整个耦合过程为：硅波导→下层氮化硅波导→足够高的上层氮化硅波导→跨过下层的硅波导→下层氮化硅波导→硅波导，实现三维的层间耦合。

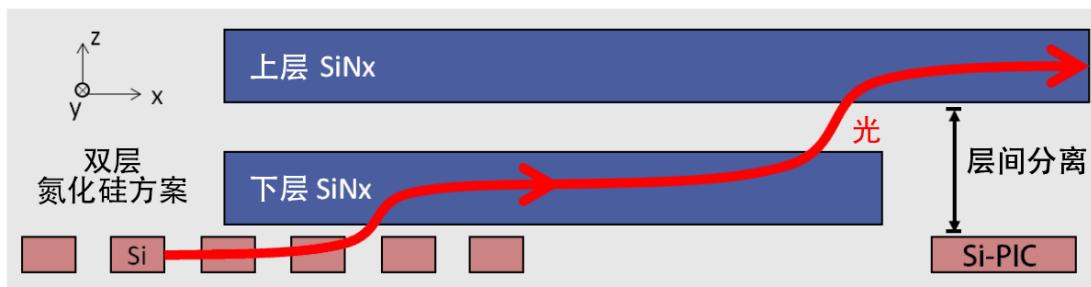


图 4.7 双层氮化硅的层间耦合方案，一方面，满足了图4.6中硅-氮化硅层间间隔应该越小越好的要求。另一方面，也满足了图4.4中氮化硅、硅的层间距离要足够大的要求。光从超材料硅波导中耦合到下层氮化硅层，再进一步耦合到上层氮化硅层，使氮化硅和硅层足够的分离，减少交叉损耗和层间串扰。

图4.6中的仿真结果是基于二维无限宽的平板硅波导和平板氮化硅波导之间的耦合情况。在实际器件制备中，波导的宽度是有限的。一方面，为了确保器件紧凑高效，波导耦合区的宽度应当尽量小。另一方面，当波导的宽度偏小时，波导传输模式的有效折射率偏小，使得硅波导和氮化硅波导的折射率匹配比较困难。因此，存在一个合理的耦合区波导宽度，使得层间耦合器足够紧凑的同时，确保层间耦合高效鲁棒。

如图4.8所示，分析了不同宽度下的硅波导和氮化硅波导的有效折射率，其中硅波导的高度为220nm，氮化硅波导的高度为520nm。虚线为二维无穷宽的平板波导的有效折射率，可见，对于三维波导而言，当波导的宽度为 $5\mu\text{m}$ 后，三维波导的有效折射率趋近于不变或变化缓慢，因此，当宽度为 $5\mu\text{m}$ 以上时，波导可以视为准二维的波导，适合作为实际的耦合区的波导宽度。[\[83\]](#)

### 4.3.3 三维仿真

从二维到三维的仿真结构变化，有很大的不同。二维平板波导的占空比调制是通过二维的亚波长光栅实现的，如图4.7所示。其中，要求亚波长光栅的光

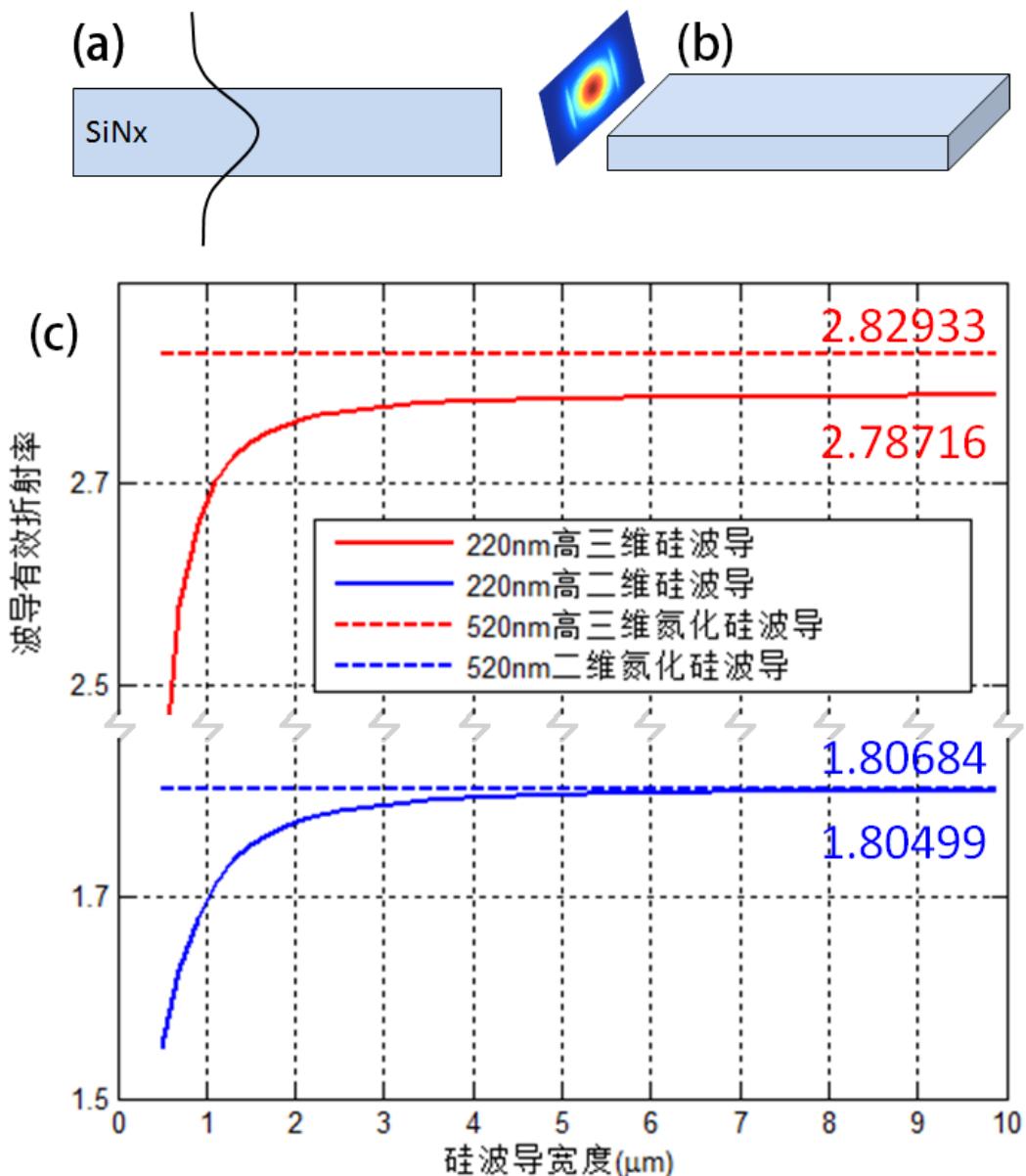


图 4.8 (a) 二维无限宽平板光波导的TE模式。(b)三维光波导的TE模式。(c)不同宽度的硅波导和氮化硅波导的有效折射率的情况，当波导宽度大于 $5\mu\text{m}$ 时，三维波导的有效折射率接近于二维光波导的有效折射率，可视作准二维的光波导。

栅周期足够小，远小于光波长，以避免满足不必要的衍射损耗。当光栅周期远小于波长时，则波导的有效折射率约等于实际波导的有效折射率乘以占空比。

然而，考虑到加工可行性，需要保证足够大的器件特征尺寸，传统的EBL曝光的特征尺寸约为~100nm [84]，因此本方案中，选择了二维的光栅和一维光栅结合的超材料方案，如图4.9，在实现硅波导与氮化硅波导之间的折射率匹配的情况下，保证有足够大的特征尺寸。

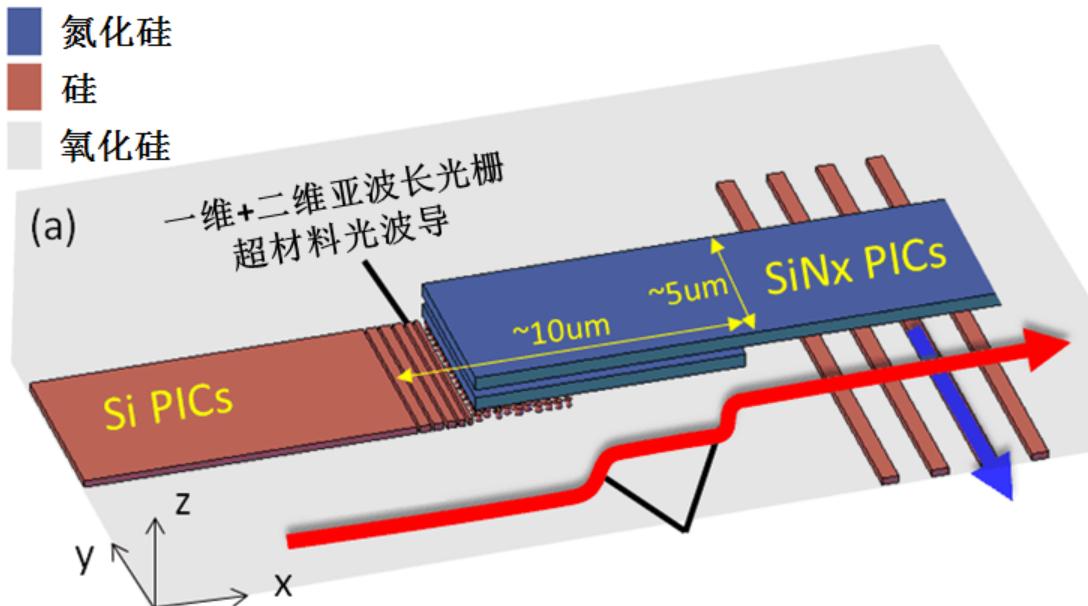


图 4.9 一维+二维亚波长光栅双层超材料的层间耦合器方案图，通过一维+二维的亚波长光栅超材料，在实现硅波导和氮化硅波导之间的折射率匹配的情况下，使超材料光波导的最小特征尺寸足够大。

由于采用了二维光栅+一维光栅的超材料的方案，如图4.9所示，通过一维光栅和二维光栅，确保超材料波导的最小特征尺寸足够大。为了便于测试，采用了图4.10a所示的三维交叉，由两个层间耦合器背对背组成。

如图4.10中，列举了所有结构相关的变量。一维+二维的光栅结构复杂，为了兼顾占空比的变化和足够大的特征尺寸，将超材料波导分成了四个部分，分别为：一维光栅、一维二维过渡，椭圆形二维光栅，圆形二维光栅，如图4.10f所示。其中一维光栅用于光波导从普通波导到超材料波导之间的渐变过渡，一维二维光栅用于一维光栅与二维光栅之间的过渡，椭圆形二维光栅用于高占空比的二维光栅，椭圆形可提升特征尺寸，避免二维光栅柱，而圆形二维光栅用于低占空比的二维光栅。[10]

在器件设计中，涉及的结构变量比较多，有36个变量，如表4-2所示。因

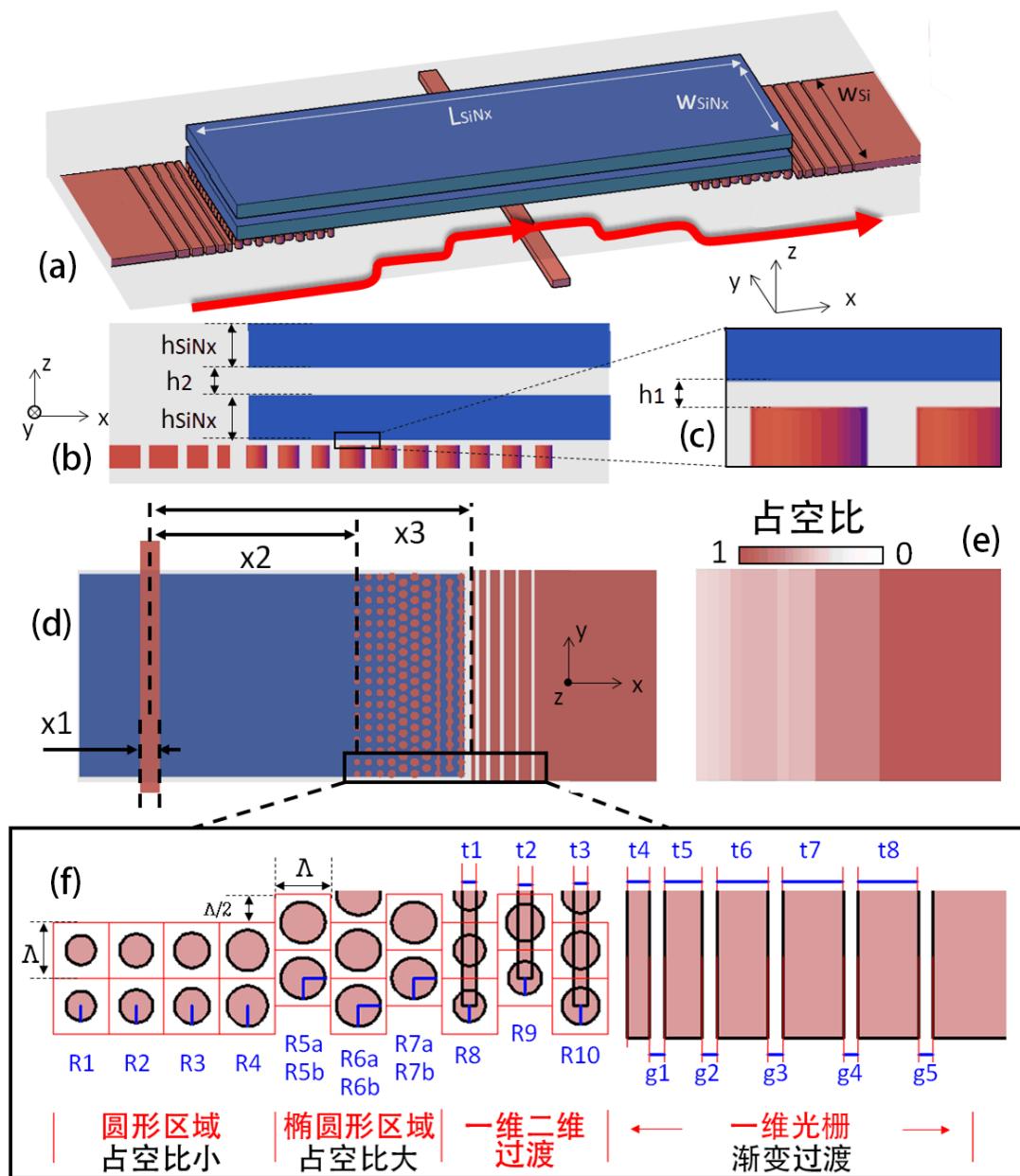


图 4.10 超材料层间耦合器的详细结构图，以及与层间耦合器相关的所有结构变量。(a) 层间耦合器的整体结构外观，有双层氮化硅的波导层，可以实现光从硅波导→下层氮化硅波导→上层氮化硅波导→下层氮化硅波导→硅波导的耦合过程。(b) 层间耦合器的主视图。(c) 硅波导与氮化硅波导之间的极薄的50nm氧化硅间隔层。(d) 层间耦合器的俯视图。(e) 层间耦合器超材料硅波导对应的占空比分布图。(f) 层间耦合器的一维+二维超材料光波导的详细结构图，超材料光波导可以划分为用于渐变过渡的一维光栅区域、一维二维的过渡区域、用于较大占空比的椭圆形二维光栅区域、以及较小占空比的圆形二维光栅区域。

此器件的设计过程中需要合理的变量优化算法，采用了遗传算法的方式进行优化。

遗传算法优化的过程是通过Lumerical内置的脚本语言实现的，如图4.11，TE基模从端口1输入硅波导然后不断优化表4-2中的变量，而仿真的目标函数为，优化从1端口输入2端口输出的光功率，最小化插入损耗。

通过遗传算法的优化，对应的结构参数如表4-2所示。其中超材料硅波导的最小特征尺寸限制为80nm以上，可以通过电子束曝光EBL进行制备。

**表 4.2 通过遗传算法优化的图4.10中结构变量的具体参数。(单位nm)**

R1	R2	R3	R4	R5a	R5b	R6a	R6b	R7a
80	90	95	110	120	110	120	110	120
R7b	R8	R9	R10	t1	t2	t3	t4	t5
110	85	100	100	80	80	80	120	200
t6	t7	t8	g1	g2	g3	g4	g5	x1
275	325	325	85	85	80	80	80	500
x2	x3	$\Lambda$	$h_{SiNx}$	h1	h2	wSi	wSiNx	LSiNx
5350	8300	300	420	50	260	5450	5250	16250

在完成了上述的遗传算法变量优化之后，通过Lumerical 3D-FDTD对器件进行了详细的仿真，主要仿真了三维层间耦合过程中的电磁场分布、插入损耗、层间串扰和波长响应等情况，如图4.11所示。.

如图4.11b所示，通过在图4.11a的1端口，输入基础TE模式，可以看到，仿真得到的电场分布符合设计的预期，TE模的光源从端口1输入后，耦合到下层的氮化硅层后又逐步攀登到上层的氮化硅层，越过下方的硅波导后，又向下耦合回超材料硅波导。通过电场图的分布，可以直观地说明双层氮化硅的设计的方案是有效的。

如图4.11c所示，可见，在仿真C波段的中心波长1550nm处，理论的最低插入损耗为-0.52dB，相当于单个层间耦合器的损耗为-0.26dB。而层间串扰如图4.11d，则低于-52dB，层间的串扰相比平面的光交叉要好12dB以上。随着光波的波长发生变化，偏离了中心波长后，插入损耗会逐步增加，而层间串扰则保持在-52dB以下。说明了当波长偏离后，层间耦合的损耗会增加，但不会增加层间串扰，相比单层的光交叉，在实际的应用中具有重要意义。

如图4.11e，对于硅输入的交叉损耗，由于硅波导的折射率~3.42非常大，完全不受上层的氮化硅波导的影响，其交叉损耗仅有<0.1dB，可以忽略不计。

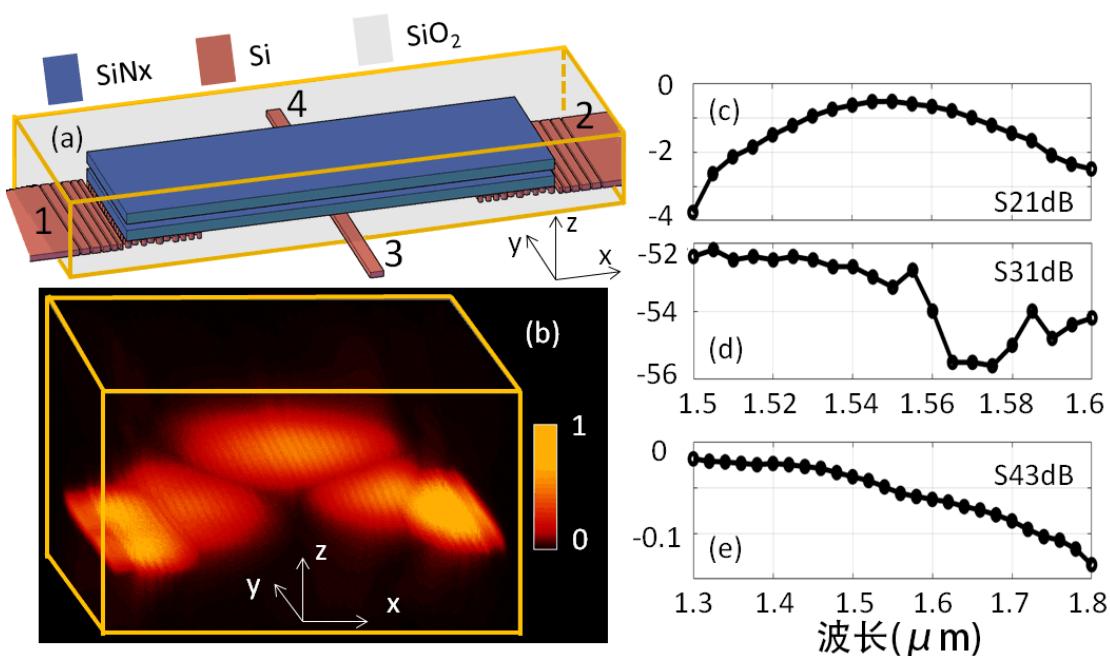


图 4.11 (a) 层间耦合器的三维交叉对应的四个端口1, 2, 3, 4。(b) 通过Lumerical 3D-FDTD在1端口输入TE模式的光后, 得到层间耦合器电场分布, 可以看到光从硅波导逐步向上耦合至上层的氮化硅波导中, 越过下端的硅波导后, 逐步向下耦合, 从端口2的硅波导中输出, 与设计的光路径一致。(c) 通过3D-FDTD仿真得到的S21dB插入损耗, 中心波长1550nm处损耗仅为0.52dB。(d)仿真得到的S31dB三维交叉层间串扰, 整体的串扰水平在-52dB以下。(e) 仿真得到的S43dB硅输入交叉损耗, 通信波段交叉损耗的整体在-0.1dB以内。

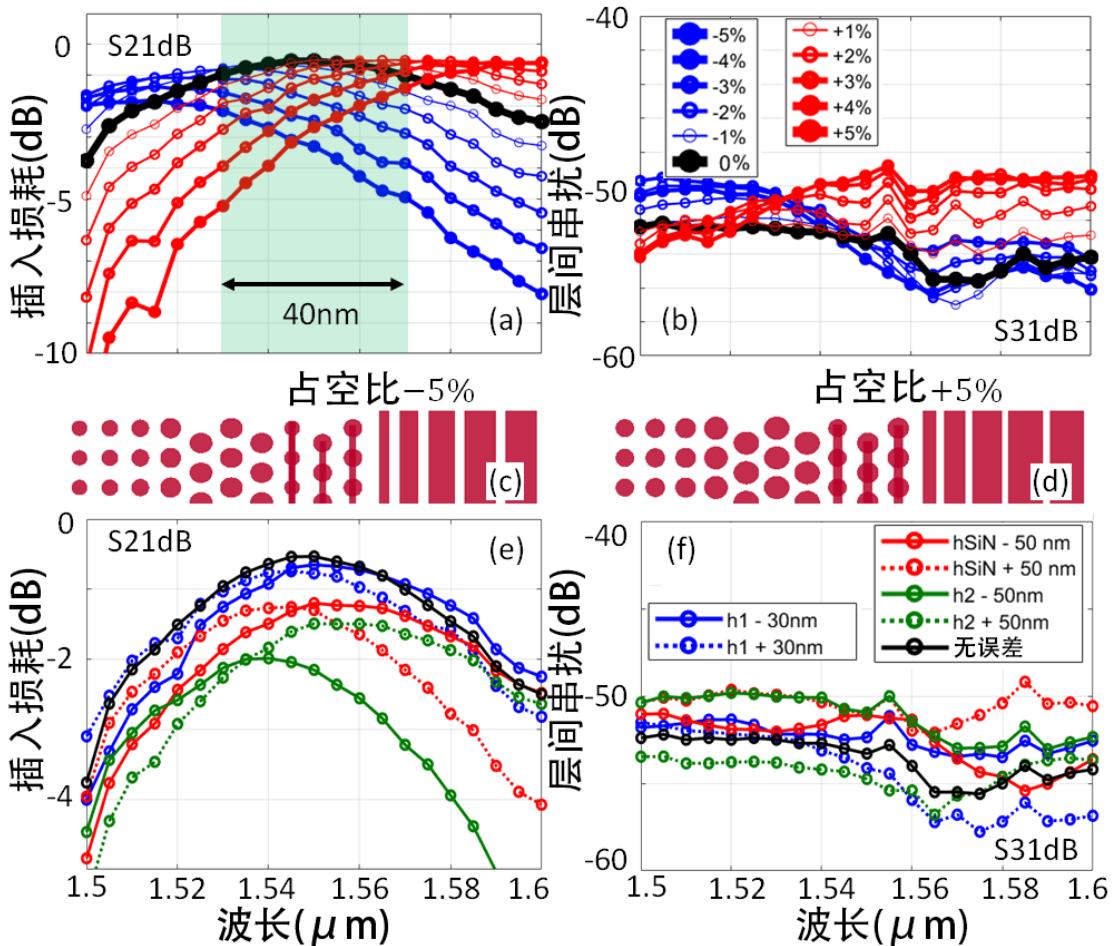


图 4.12 层间耦合三维交叉的关键结构的加工容差分析。(a)超材料硅波导的占空比偏移-5%到+5%的插入损耗 $S_{21dB}$ 变化趋势。(b)超材料硅波导的占空比偏移-5%到+5%的三维交叉层间串扰 $S_{31dB}$ 变化趋势。(c)超材料硅波导的占空比偏移-5%时的结构版图示意图。(d)超材料硅波导的占空比偏移+5%时的结构版图示意图。(e)关键的纵向参数,如硅和氮化硅波导间隔 $h_1$ , 氮化硅波导之间间隔 $h_2$ , 氮化硅波导厚度 $h_{SiN}$ 在分别偏差30nm, 50nm和50nm时的插入损耗 $S_{21dB}$ 的变化趋势。(f)关键的纵向参数在偏差时的三维交叉层间串扰 $S_{31dB}$ 变化趋势。

除了FDTD仿真外，还对器件的加工容忍度进行分析，如图4.12所示，其中，分析了部分主要的加工误差项，如超材料硅波波导的加工误差、氮化硅层间之间的厚度、氮化硅厚度的变化误差。

当超材料硅波导的刻蚀发生误差时，比如，占空比整体发生变化，如图4.12c和4.12d为占空比从-5%变化到+5%变化时候的器件版图，且其对应仿真的插入损耗和层间串扰如图4.12a和4.12b所示。可见对于占空比发生变化时，器件的层间串扰几乎没有太大影响，维持在低于-48dB的水平。然而其峰值的耦合效率会发生偏移，当刻蚀的占空比偏差从-5%到+5%的时候，其峰值的耦合波长从 $1.5\mu\text{m}$ 偏移到 $1.6\mu\text{m}$ 处。因此在器件加工的过程中，需要严格的控制电子束光刻、显影以及等离子体刻蚀过程中的占空比变化，使得峰值耦合效率的波长覆盖在所需的C波段范围。[\[85\]](#)

如图4.12e和4.12f所示，在超材料硅波导刻蚀完成之后，上层的氧化硅层厚度和氮化硅波导层的沉积厚度也会随着气相沉积过程的误差而发生偏差，分析了层间厚度 $h_1$ 、 $h_2$ 和氮化硅厚度 $h_{SiN}$ 在 $\pm 10\text{nm}$ 误差下时器件的性能变化，其中在化学气相沉积允许的厚度误差的范围内，器件的损耗变化较小，峰值插入损耗仍能保持在1dB以内，而层间损耗影业能保持在-50dB以下，在实际的气相外延过程中，通过陪片监控，这样的容差结果是可以较好的控制。

#### 4.3.4 器件加工与测试

通过电子束曝光，对器件进行加工，如图4.13所示，

(a)，首先采用了商用的SOI晶片，需要预先通过lift-off制作金属的对准标记，以便对准曝光时作为参照。

(b)，通过电子束曝光ZEP胶，显影并ICP刻蚀，制备超材料硅波导，接着，去除残余的光刻胶。

(c)，超材料光波导上沉积足够厚度 $1\mu\text{m}$ 的氮化硅，然后通过化学机械抛光(详细的CMP过程及其参数见附录)。通过filmware薄膜测量系统，控制薄膜的厚度，将 $h_1$ 层的厚度抛光至50nm。

(d)，在抛光平滑的样品表面沉积420nm，250nm，420nm的氮化硅、氧化硅和氮化硅层。

(e)，通过电子束对准曝光AZ负胶，反应离子束刻蚀RIE，分别刻蚀氮化硅、氧化硅、氮化硅层、形成三层的波导结构，并去除残余光刻胶。

(f)，再刻蚀完三层结构的芯片上，生长氧化硅的包层，保护加工好的器

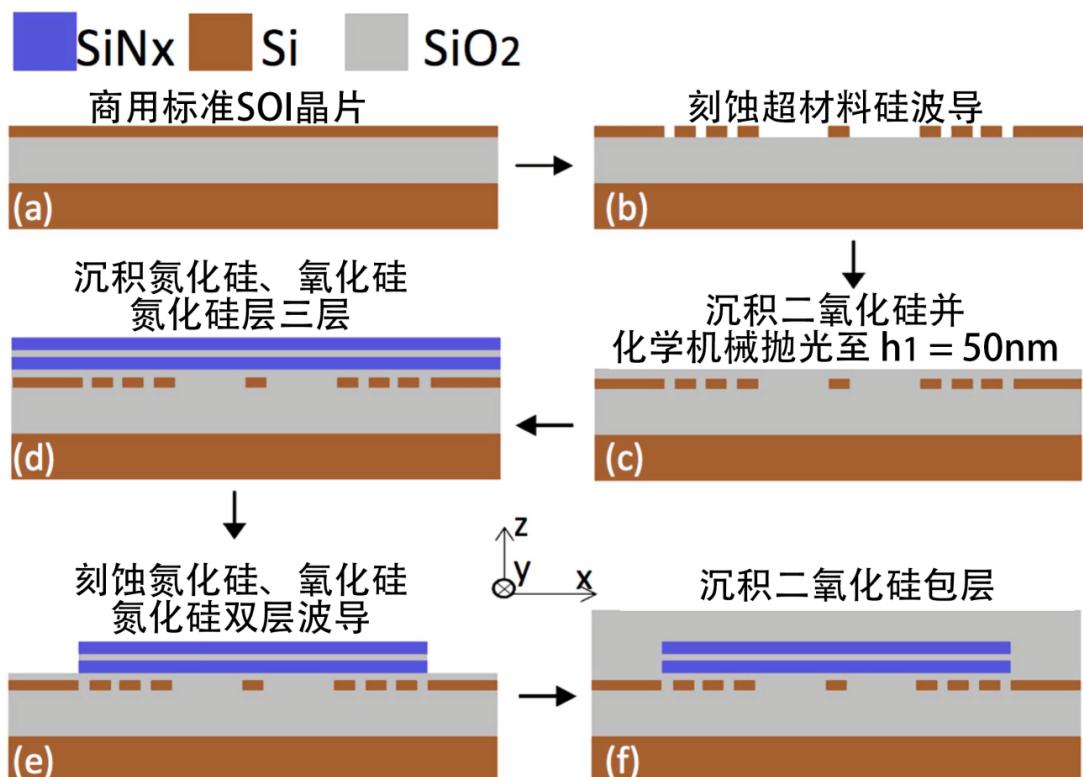


图 4.13 器件加工步骤图。 (a) 通过商用的220nm的SOI晶片。 (2)通过EBL曝光和等离子体刻蚀超材料硅波导。 (3)沉积二氧化硅间隔层，并通过CMP进行二氧化硅表面抛光至 $h_1=50\text{nm}$ 。 (d)依次沉积420nm, 250nm, 420nm的氮化硅、氧化硅和氮化硅层。 (e) 电子束对准曝光并等离子体刻蚀氮化硅、氧化硅、氮化硅双层波导。 (f) 在刻蚀完的氮化硅波导上沉积二氧化硅包层，保护波导结构。

件。

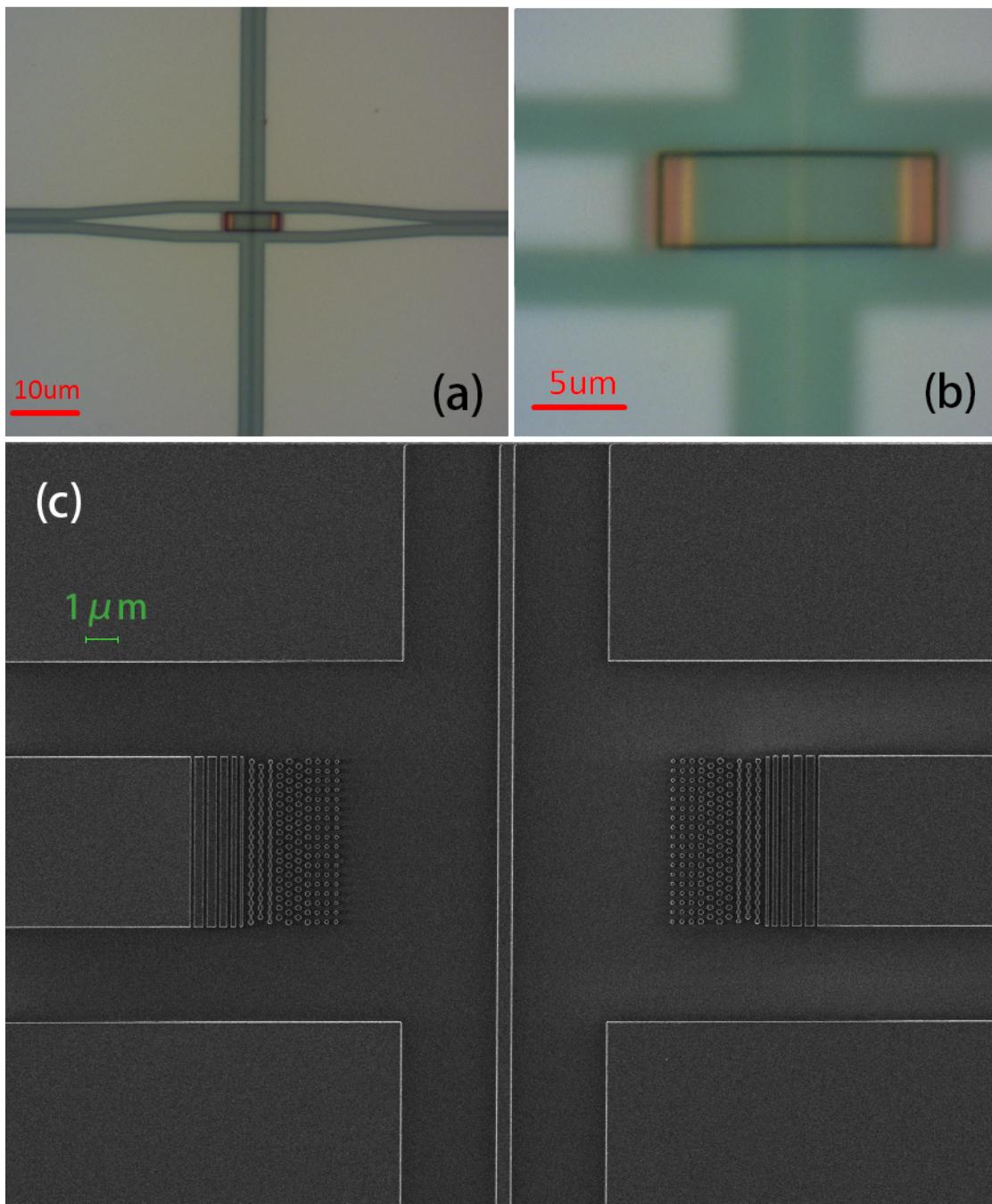


图 4.14 (a)制备后的三维交叉层间耦合器在光学显微镜下的结果图。(b) 超材料硅波导上的氮化硅波导层。(c) 制备后的超材料硅波导在电子显微镜下的结果图。

图4.14为加工后的层间耦合器在光学显微镜下的器件结构图。图4.14a和图4.14b可以看超材料硅波导上，由于折射率的调控而产生人工色彩的现象。图4.14c是电子显微镜下的超材料硅波导器件的结构，其刻蚀后硅波导的占空比与设计的版图相近。

对加工后的层间耦合件进行了测试，主要采用了间接测试的方式，通过分

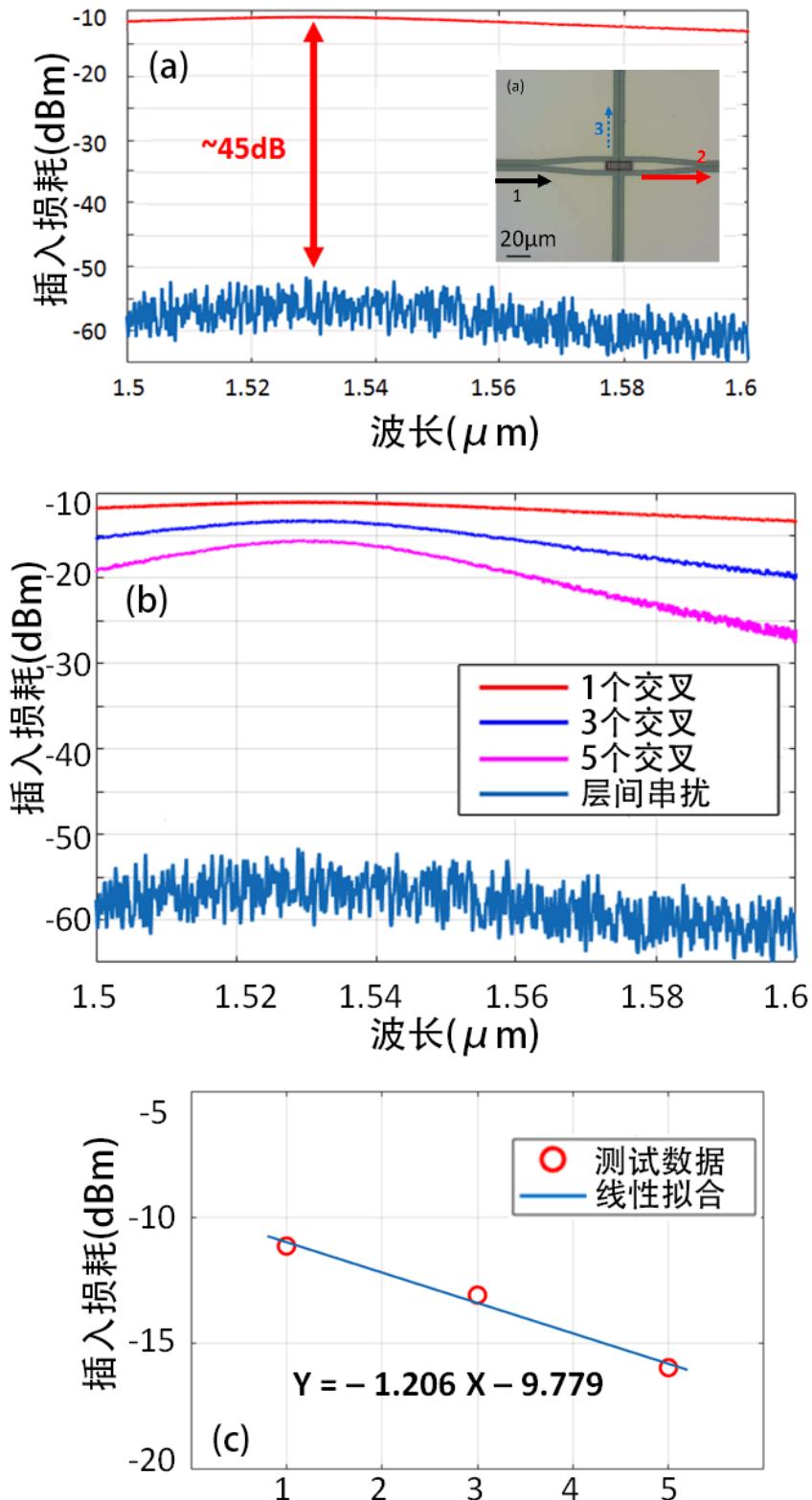


图 4.15 测试结果图。(a)通过对比S21dB和S31dB的测试数据，可得三维层间交叉的层间串扰大于-45dB。(b) 通过器件测试得到1、3、5个三维层间交叉器件的光纤到光纤投射谱。(c)通过线性拟合不同个数的三维交叉的功率，得到的单个交叉的损耗为-1.206dB。

析对比不同级联个数的器件的插入损耗和层间串扰，来评估器件的特性。

器件的测试设备与3.4章大致相同，采用的是8164B的激光器进行光链路损耗测试。采用了双端锥形光纤耦合，结合偏振控制器来激发光波导中的TE基础模式，使测试得到的光功率最大。当光功率最大时，则说明光波导中的模式以TE模式为主。

在测试过程中，通过控制单一变量方法，测试了单个三维交叉、三个三维交叉、五个三维交叉等不同交叉个数的情况下链路透射谱，以及层间串扰的透射谱，并通过线性拟合和对比，可以精确的得到单个器件的插入损耗和层间串扰。

测试得到的单个三维交叉、三个三维交叉、五个三维交叉的透射谱如图4.15所示，测试的透射谱中包含了光纤—波导的耦合损耗，光纤跳线插入损耗，偏振控制器插入损耗等。如图4.15a，通过端口1的波导输入TE模式的光，通过对比2端口和3端口出射光功率的功率差，可以得到器件的层间创扰约为45dB。

如图4.15b和4.15c，对比不同三维交叉个数的透射谱，由于最低插入损耗的峰值波长在1531nm左右，通过提取1531nm处的插入损耗并线性拟合，可以得到单个三维交叉的损耗约为-1.206dB@1531nm。

#### 4.4 小结

在本章中，我们提出、设计、加工、测试了一种紧凑的 $10 \times 5 \mu\text{m}^2$ 的超材料硅与氮化硅波导的层间耦合器，并创新性的采用了双层氮化硅的波导，在实现了稳定的硅-氮化硅层间耦合的情况下，又保证了足够大的层间间距。相比于传统的倒锥层间耦合器，具有紧凑高效率的特点。我们通过三维交叉结构来测试层间耦合器的性能，通过器件测试得到的三维交叉的插入损耗为-1.206dB@1531nm，即单个层间耦合器的损耗约为-0.6dB，且1dB带宽覆盖了所需要的1530-1570nm波段，通过这紧凑的三维层间耦合器，可以较好的满足密集的三维层间耦合应用的需求。[\[86\]](#)

## 第5章 超材料的长通滤波器

### 5.1 超材料的米氏能隙和长通滤波

俄罗斯约飞研究所的Mikhail V. Rybin等人的结果，通过对方形的晶格介质二维超材料进行电磁谐振模式和光子晶体带隙分析，如图5.1所示[30]，作者认为，当二维超材料的晶格晶格常数变得足够小或方形晶格单元的介电常数足够大的时候，二维介质超材料的电磁米氏谐振导致的米氏能隙成为最低阶的光子带隙，因而器件的布拉格衍射被抑制，米氏能隙强烈电磁响应产生的特殊电磁性质，可以用于超材料的制备和应用，如负折射、手性材料、光学隐形衣等。  
[87–94]

米氏谐振亚波长高折射率介质材料中一种强烈的本征电磁谐振模式，如图5.1a和5.1b，大致可以分为磁偶极子型的米氏谐振和电偶极子型的米氏谐振。其中TE偏振的入射光容易激发圆柱结构中的磁偶极子型米氏谐振，磁偶极子的产生使得材料的有效磁导率变为负数，使得光无法向前传播。

在二维介质超材料中，借助米氏谐振，如图5.1d所示的光子能带结构中，当输入光的偏振、频率在5.1d的米氏能隙频率范围内，则无法通过方形超材料区域，如图5.1e中的透射率截断现象，而当光的频率较低时（或波长较长时），则由于超材料抑制了布拉格衍射，光可以几乎没有衍射损耗的特性，通过超材料的区域，形成明显的高频截段现象。

因此，通过超材料的米氏能隙，可以实现低布拉格衍射损耗的短波滤波功能，即实现长通滤波功能。

受自由空间的超材料米氏谐振的长通滤波的启发，认为，可以将这种特性在集成芯片上实现。

在片上的光滤波，在通信、传感和非线性中具有广泛应用。如表5-1所示，分析了现有片上光子滤波器，通过对比现有的光子滤波原理去实现类似的长通滤波功能。通过对比，认为超材料的米氏响应，可以在极其紧凑的器件尺寸下，实现较为满意的长通滤波特性，有利于光子芯片的高度集成。

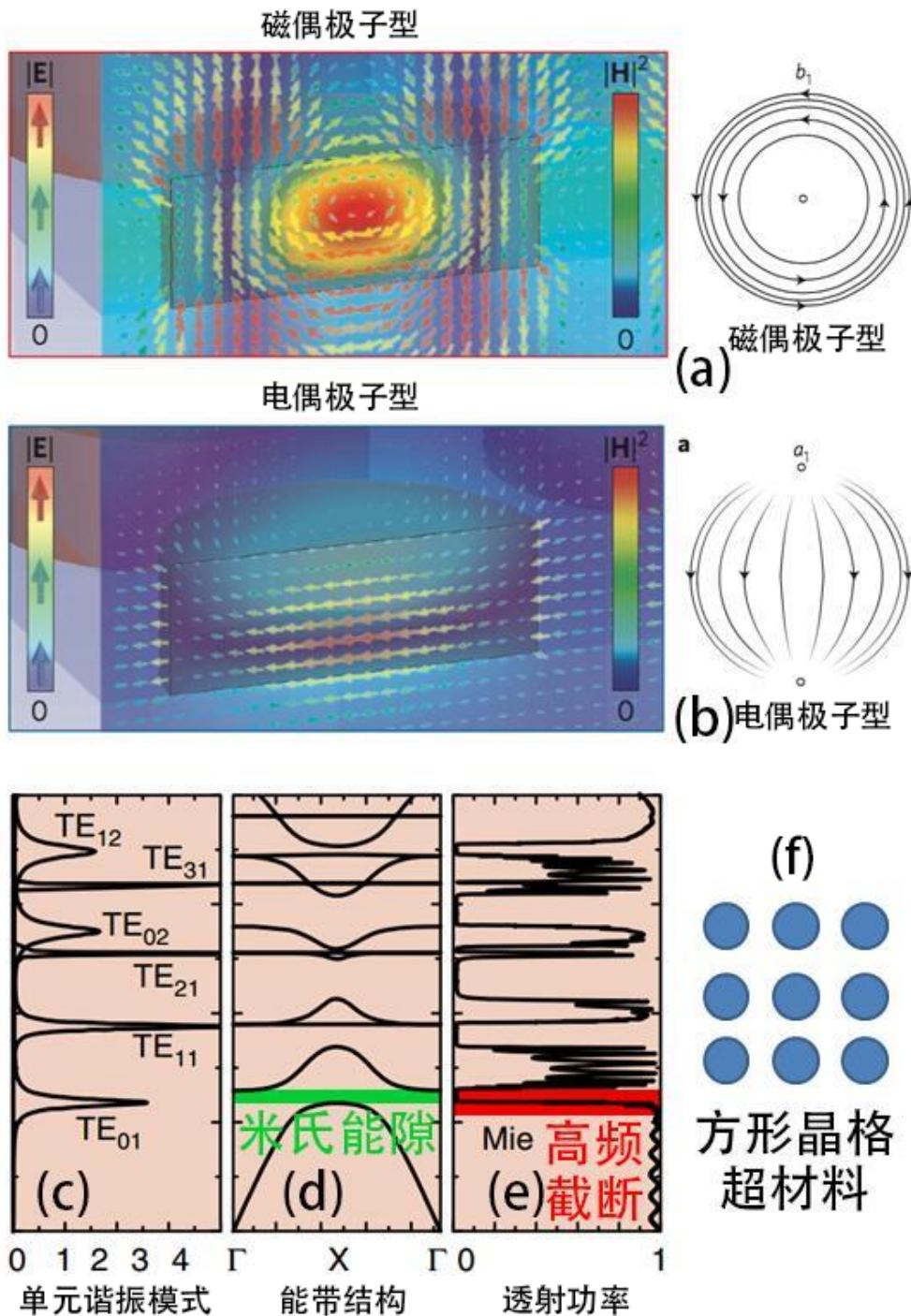


图 5.1 (a)超材料中米氏谐振分为两种主要的类型，第一种是以环形电场谐振模式的磁偶极子型谐振模式。(b)另一种是以环形电场谐振模式的电偶极子型谐振模式。(c)俄罗斯约飞研究所的Mikhail V. Rybin等人通过研究二维方形晶格超材料中的晶格单元的谐振模式时，计算得到的米氏谐振TE模式对应的归一化频率。(d)通过计算布洛赫模式得到的二维方形晶格超材料的能带结构，其中最低阶的TE米氏谐振产生了米氏能隙。(e)二维方形超晶格材料的电磁波透射谱中可以看到，由于米氏能隙的存在，产生了明显的高频截断现象。(f)二维方形晶格超材料示意图，圆形阵列为高介电常数的介质材料，间隔为空气。[29, 30]

表 5.1 各种片上光子滤波器实现原理的典型指标对比

方案	特征尺寸	通带宽度	Roll-off	插损dB	衰减dB	Ref.
环形谐振腔	$>10 \times 10 \mu\text{m}^2$	$<5\text{nm}$	$>50\text{dB/nm}$	$<1$	$>40$	[95, 96]
马和曾德尔干涉仪	$>50 \times 50 \mu\text{m}^2$	$>10\text{nm}$	$>10 \text{ dB/nm}$	$<1$	15-20	[97]
阵列波导光栅	$>500 \times 500 \mu\text{m}^2$	$<5 \text{ nm}$	$>50\text{dB/nm}$	$<3$	$>25$	[98]
布拉格光栅/光子晶体	$>10 \times 10 \mu\text{m}^2$	$>50\text{nm}$	$<1 \text{ dB/nm}$	$<0.5$	$\sim 20$	[99]
频谱选择波导	$>3 \times 100 \mu\text{m}^2$	$>1000\text{nm}$	$2.82 \text{ dB/nm}$	$<1$	15-20	[100]
超材料响应	$\sim 5 \times 5 \mu\text{m}^2$	50nm	0.493 dB/nm	$\sim 0.5$	$\sim 25$	本论文

## 5.2 超材料长通滤波器器件

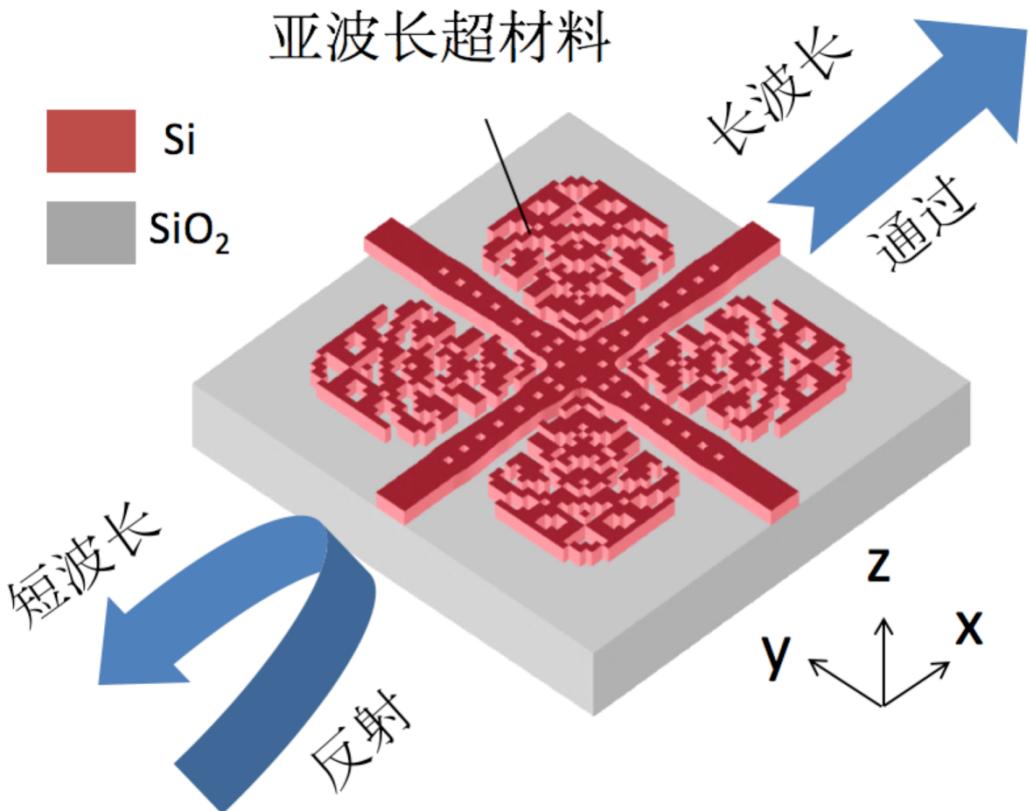


图 5.2 超材料长通滤波器的概念图，其中滤波器由一个与单模硅波导相连的亚波长的超材料组成。其中短波长的光，由于超材料结构的电磁响应而不能通过，反射回原波导中。而长波导的光由于偏离了超材料的电磁响应频率，可以通过亚波长的超材料区域。

受超材料米氏响应的长通滤波特性的启发，设计了一个片上的亚波长的超材料光子器件结构，其超材料器件结构如图5.2所示，以实现片上的超材料长通滤波功能。其中长通滤波器由一个与波导连接的亚波长超材料组成，可以通过一步的等离子体刻蚀实现制备。光从波导输入到超材料结构区域时，其中长波

长的光，可以无视超材料的亚波长结构而直接通过，而短波长的光，则由于超材料的强烈的电磁模式响应，不能通过超材料区域，被器件结构反射。由于长通滤波器的波导集成特性，尺寸紧凑，可以实现更高的集成度，在实际应用中具有较高的应用价值。

有了超材料长通滤波器的器件概念后，器件的设计的重点在于设计超材料的结构部分，已实现所需的滤波功能。

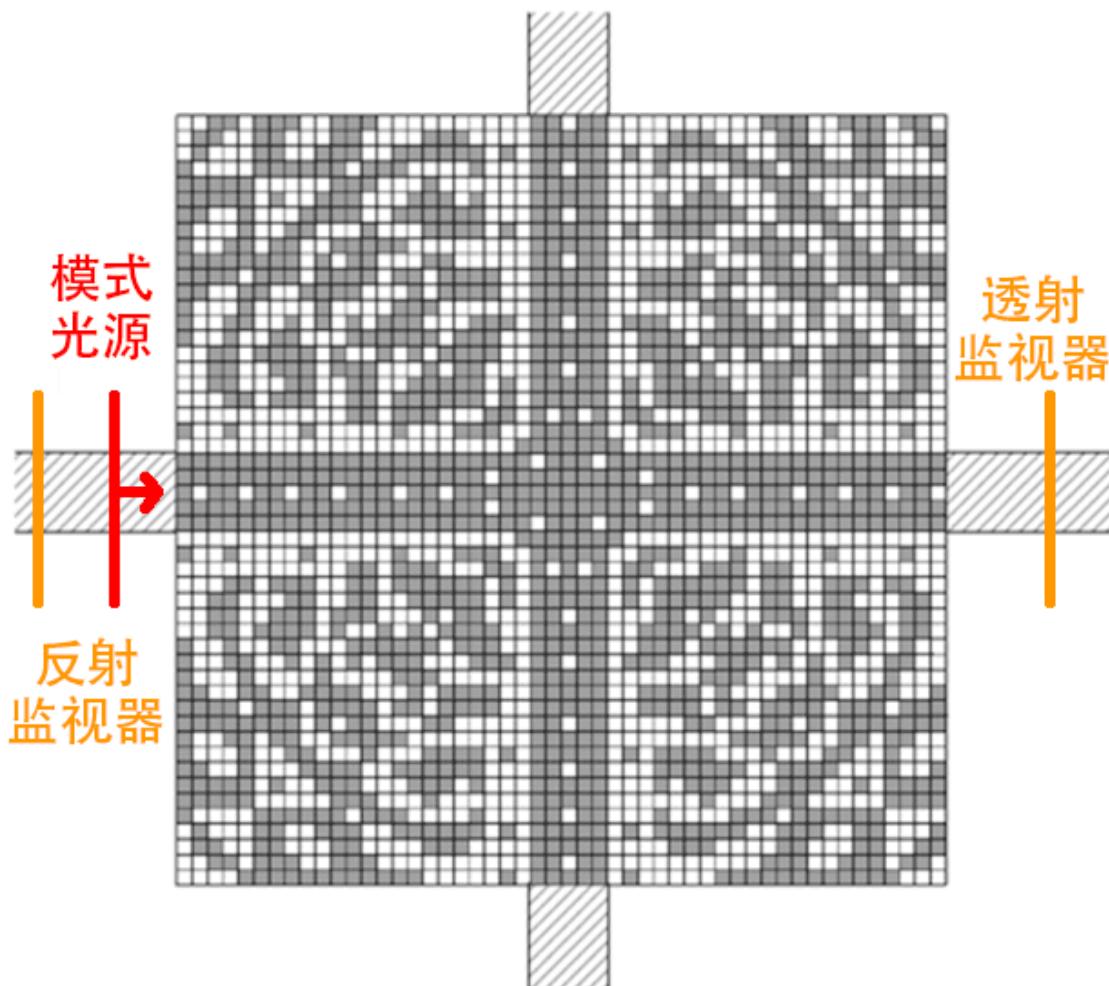


图 5.3 超材料长通滤波器的优化第一步，通过遗传算法优化的二值化的像素图案，其中每个像素的尺寸为 $100\times100\text{nm}$ ，黑色像素代表了高折射率的硅，白色像素代表低折射率的空气。

如图5.3所示，将设计超材料光子滤波器的超材料结构部分。第一步，优化了一个像素图案结构。希望最终的器件的尺寸在 $5\times5\mu\text{m}^2$ 的占地面积，因此图中仿真的超材料区域划分为 $51\times51$ 个单元格，其中每个单元格的尺寸为 $100\times100\times220\text{nm}$

(长×宽×高)，可以通过商用的标准SOI晶片实现制备。超材料的结构的下方是二氧化硅氧化层，如图5.2所示，而由于超材料光子器件通常需要较大的折射率反差来实现较好的电磁谐振响应，因此结构的上方采用空气来实现较大的折射率反差。通过像素结构的图案的黑白组合，黑色像素代表硅，白色像素代表空气，来实现长通滤波的功能。

并通过Lumerical的脚本环境，结合遗传算法的变量优化，来实现像素图案的优化。

在遗传算法优化设计过程中，为减少算法优化的时间，采取了4轴折叠对称的结构，如图5.4a，使得需要独立优化的单元的个数减少为351个，为原来的1/8，另外，保持高度的对称性，使长通滤波的响应频率可以随着器件版图的缩放而发生平移。

通过四轴折叠对称之后，如图5.4b所示，所有的二值化的独立变量的个数一共有351个。如图5.4c所示的遗传算法优化程序框图，在351个二值的独立变量的优化中，优化了1550nm的S21参数和1450nm的S11参数。假定了左端波导为端口1而右端波导为端口2，其中S21参数为从左端波导中输入的光信号时，在右端的光波导收集到的光功率。而S11参数为从左端波导中输入光信号时，从超材料左端波导反射回去的功率。

随着Lumerical遗传算法优化程序的进行，如图5.5所示，器件的仿真从一个简单的十字波导交叉开始，不断修正像素图的结构，并最终得到了一个具有长通滤波特性的像素图案。经过上述的像素图案的优化后，经过Lumerical 3D-FDTD验算得到的长通滤波器在1550nm的S21插入损耗约为-0.5dB，而1450nm的S21插入损耗约为-20dB，其短波长的截段的特性较为明显，然而其1550nm处的长通波段的S21插入损耗较大，因此，考虑第二步的优化，进一步提升器件在长通波段的S21参数指标。

如图5.6b和5.6c所示，在器件优化的第二步中，主要考虑优化中间波导的波导剖面形状和挖孔的位置，通过优化上述，进一步的降低器件在长通波段的插入损耗，使得器件的S21插入损耗更低。

如图5.6a所示，进一步优化波导的剖面形状和挖孔位置作为变量，一共有16个新引入的位置变量，16个变量通过遗传算法进行优化，实现更低的通带损耗，优化后的长通滤波器的结构如图5.6c所示。

在经过了上述的两步优化之后，通过Lumerical 3D-FDTD中对器件的性能进行详细的仿真，如图5.7c和5.7d所示，从波导端口1输入1450nm和1550nm的TE基

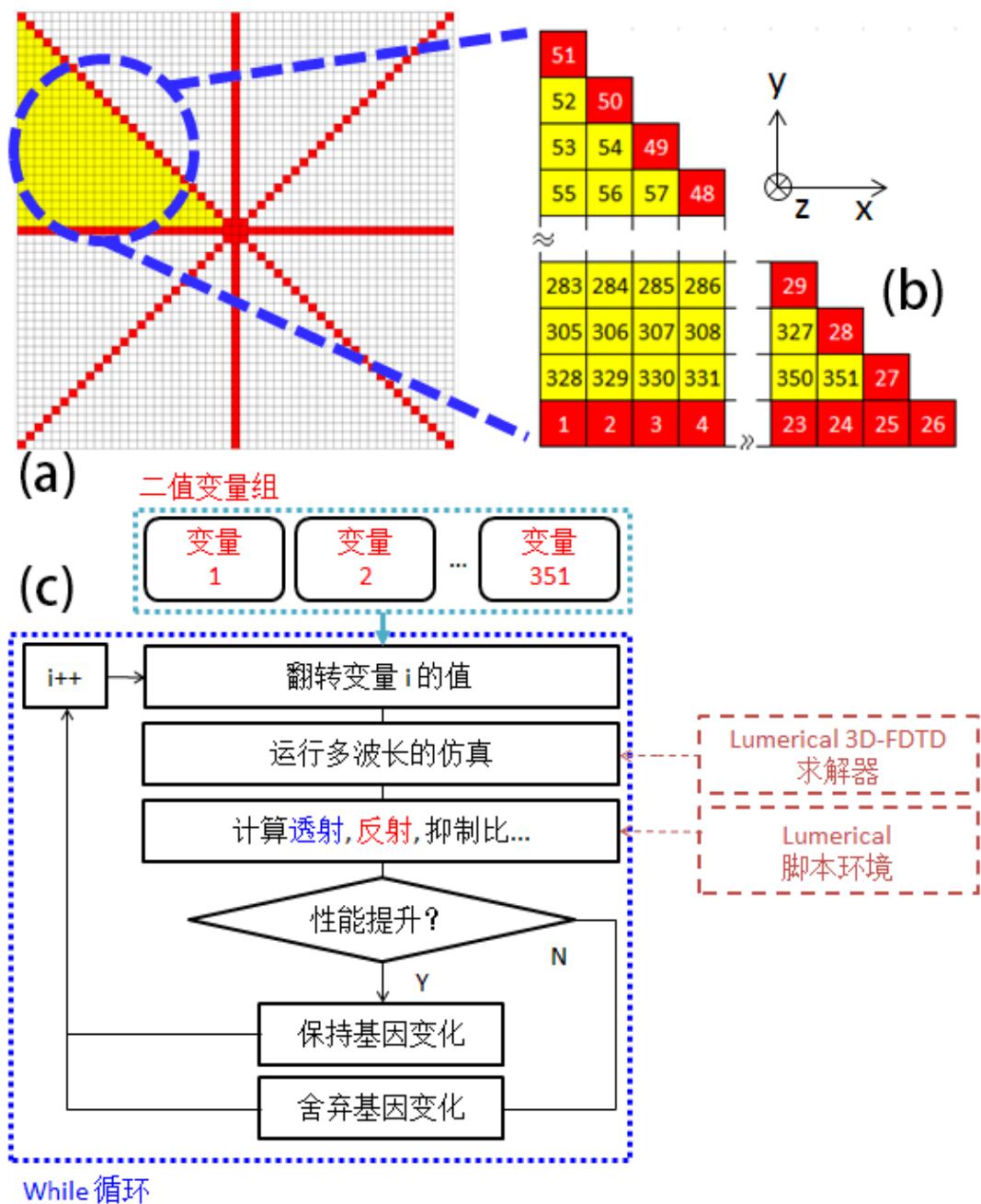


图 5.4 (a)在遗传算法优化超材料像素图案过程中，通过四轴折叠对称，可以得到需要独立优化的变量个数仅为像素图案的八分之一。(b) 351个独立的像素变量分布示意图。(c)通过对351个二值化变量进行遗传算法优化，可以得到最终的超材料像素图案如图5.5所示。

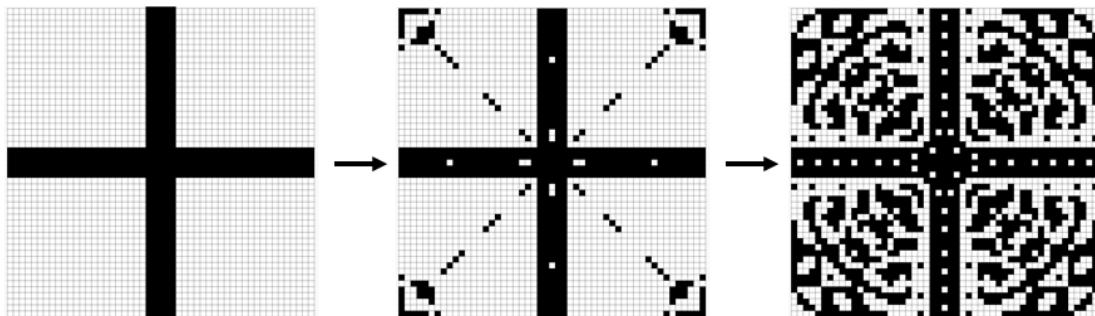


图 5.5 遗传算法的优化过程，算法的优化从一个简答你的四轴折叠对称的普通光交叉开始，逐步变化像素点的结构分布，最终形成超材料的像素结构。

础模式光，可以发现1450nm波长的光不能通过超材料区域，而1550nm的光可以通过。

通过Lumerical扫描S11和S21参数随波长变化的变化情况，如图5.7b所示，其中， $1.45\mu\text{m}\sim1.6\mu\text{m}$ 为实验室的激光器8164B所能调谐的波长范围，从仿真的波长响应结果来看，在 $1.45\mu\text{m}\sim1.5\mu\text{m}$ 的范围为器件的截止波段，由于超材料的电磁响应，TE模式的光的米氏谐振导致介质有效磁导率变为负数，使得光不能通过，且短波截断的功率衰减为 $\sim25\text{dB}$ ，在 $1.55\sim1.6\mu\text{m}$ 为长通波段，其仿真得到的1550nm处的理论插入损耗为 $-0.1\text{dB}$ 。

而且，在 $1.45\mu\text{m}\sim1.6\mu\text{m}$ 波段，总的 $|S11| + |S21|$ 功率的总和保持功率守恒，意味着由于超材料的亚波长特性，超材料区域的衍射损耗几乎被抑制，如图5.7a所示。

在上述超材料长通滤波器设计中，通过激发超材料结构中的电磁响应实现长通滤波的功能，因此，通过改变超材料结构的电磁响应频率，则改变器件的截止波段。

而最直观简单的改变响应频率的方法，可以通过器件版图的缩放来实现。如图5.8所示，通过对器件的版图施行缩放，尝试了95%、100%和105%不同的缩放比例。在Lumerical中，对缩放后的长通滤波器的S11和S21参数进行扫描，通过波长扫描，得到了图5.8中波长响应的结果，当器件的版图缩放时，器件的长通滤波功能仍然有效，截断的抑制比保持 $20\text{dB}$ 以上，而器件的短波截断和长波通过波段会发生整体平移。当器件的缩放尺寸为95%时，器件的过渡带的中心波长为1468nm，当器件的缩放尺寸为105%时，器件的过渡带的中心波长为1583nm。器件的缩放尺寸每缩放1%，则过渡带的中心波长则相应地平移11.4nm。

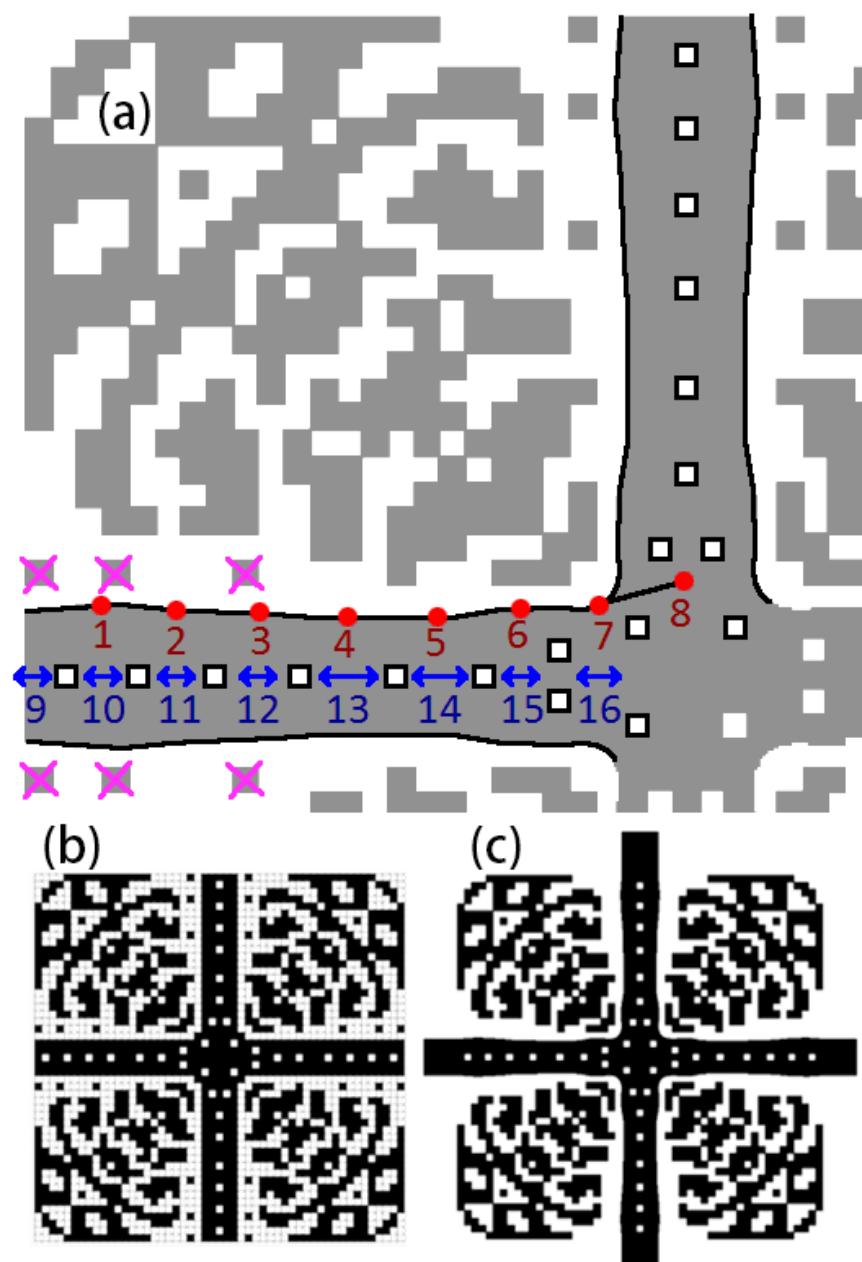


图 5.6 长通滤波器设计的遗传算法优化第二步。(a)通过优化中间波导上的波导剖面宽度和中间的方形孔的位置，通过优化8个波导剖面宽度和8个挖孔位置变量，减少在长通波段下的插入损耗，增大器件的性能。(b)第二步优化之前的像素点结构图。(c)优化了波导剖面宽度和挖孔位置后的超材料结构示意图。

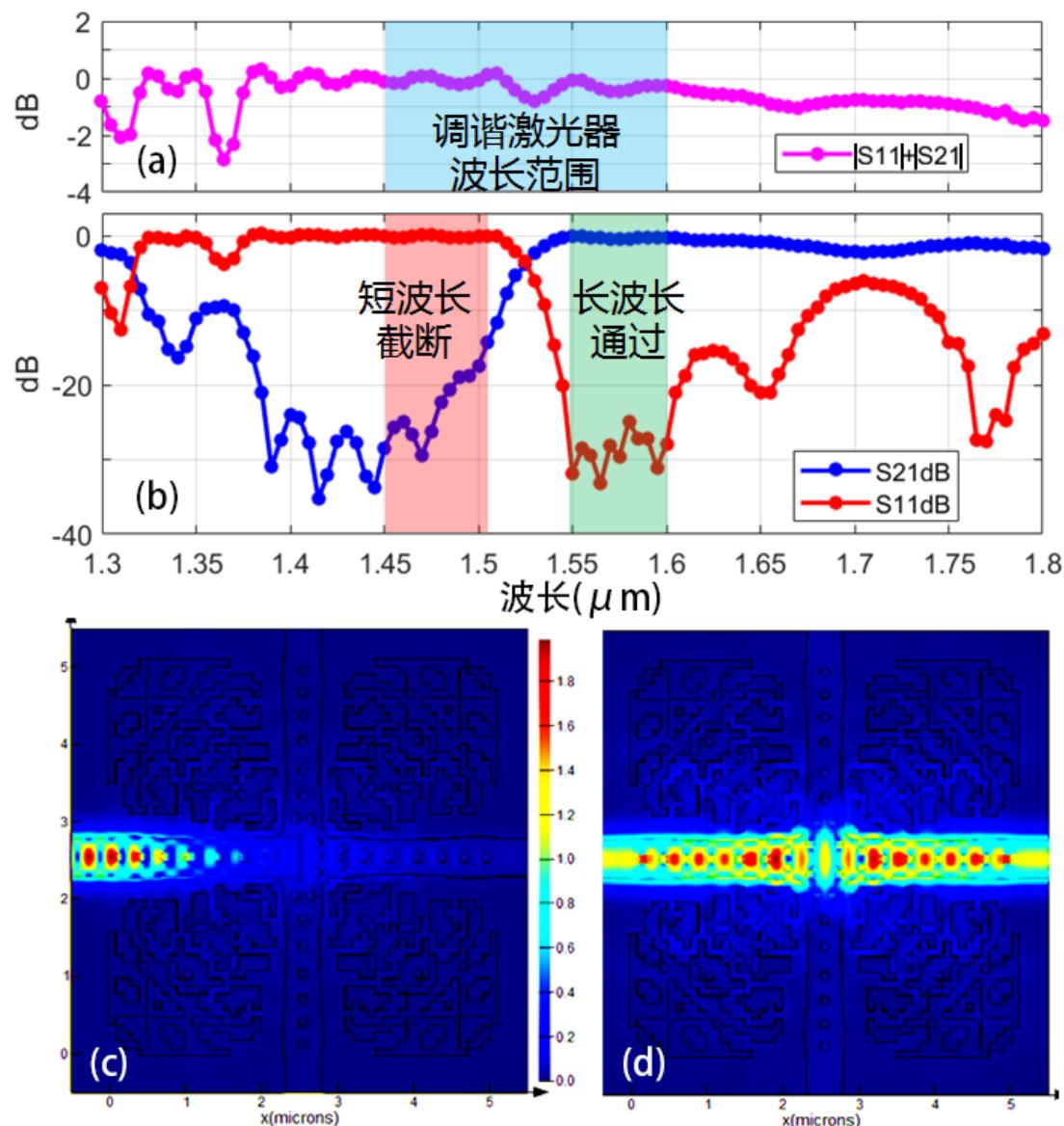


图 5.7 经过两步优化的超材料长通滤波器的波长响应仿真结果图。(a) 3D-FDTD 仿真得到的不同波长下 $|S_{11}|+|S_{21}|$ 结果, 可见由于超材料的亚波长特征尺寸, 器件的布拉格衍射受到抑制, 总功率大致保持守恒。(b) 仿真得到的 $S_{21}\text{dB}$ 透射谱和 $S_{11}\text{dB}$ 反射谱, 可见, 在1450-1500nm左右, 短波长的光被全部反射, 而在1550-1600nm波长的光, 则可以通过超材料区域。(c)当通入波长为1450nm的TE模式时, 由于超材料区域的强烈电磁响应而被反射回原波导中。(d) 当通入波长为1550nm的TE模式时, 由于没有激发超材料的谐振模式, 光可以通过超材料区域。

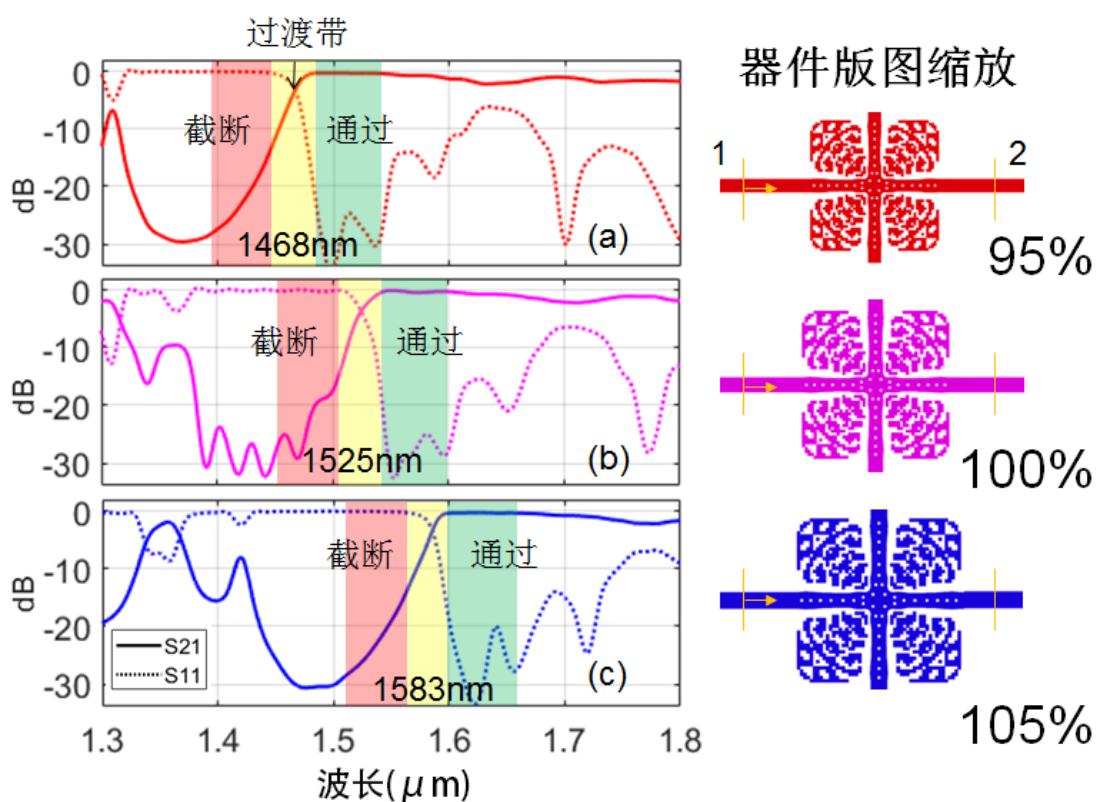


图 5.8 超材料长通滤波器的滤波特性与器件版图的缩放关系。**(a)**当器件版图缩放为原尺寸的 95% 时的波长响应。**(b)**当器件版图为 100% 原尺寸时的波长响应。**(c)**当器件版图缩放为原尺寸的 105% 时的波长响应。可见随着器件版图的缩放，过渡带对应的波长会发生明显的偏移，偏移的程度为 **11.4nm/1%**。

上述的仿真结果表明，可以通过简单的器件版图缩放来改变超材料结构的电磁响应频率，从而改变长通滤波的截止波段和长通波段的位置。

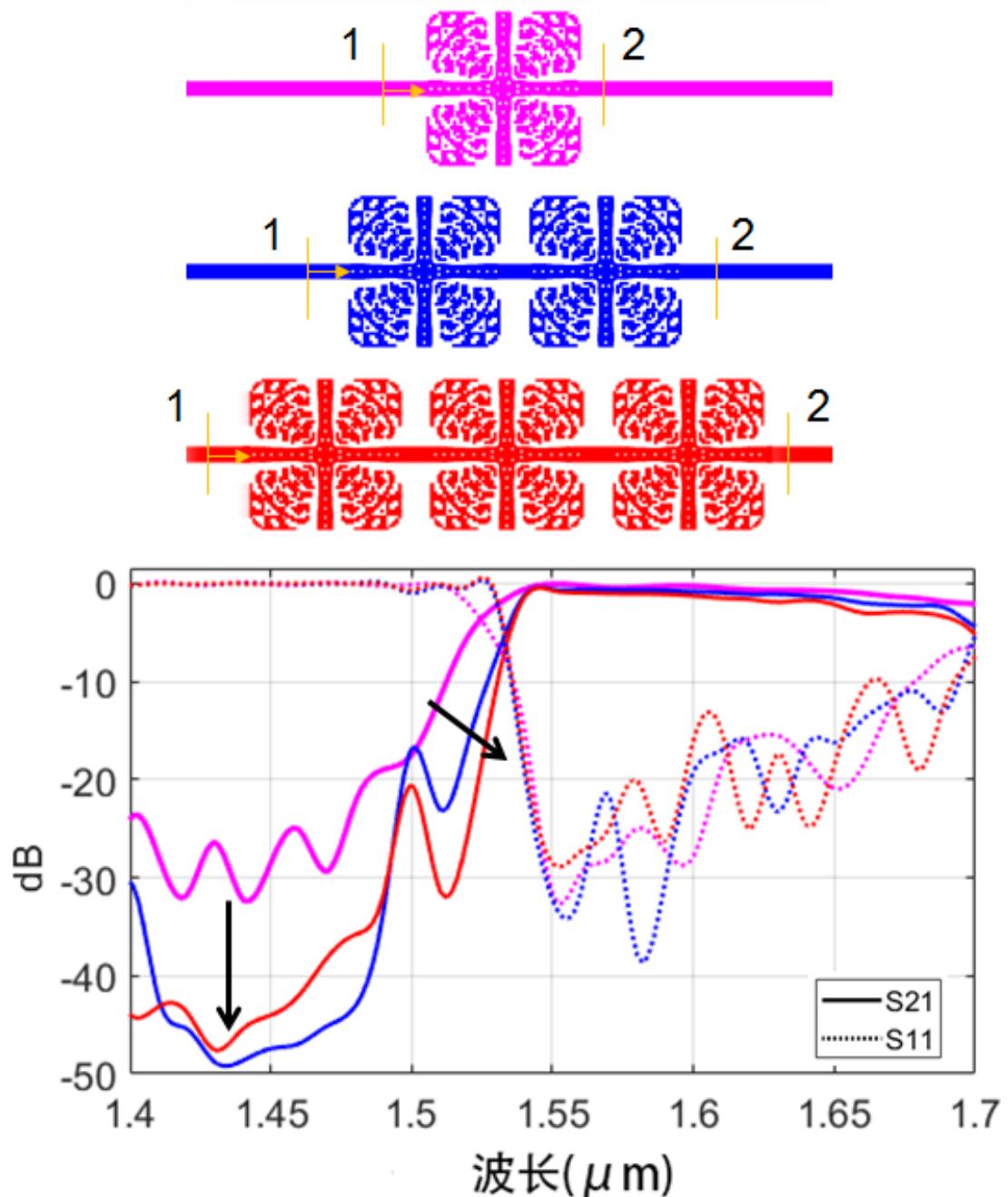


图 5.9 超材料长通滤波器的滤波特性与器件级联的关系。通过1、2、3个长通滤波器之间级联，实现了过渡带斜率的增强。

另一方面，对于长通滤波器，尝试通过器件级联的方法来改变中间的过渡带的宽度。

如图5.9所示，尝试了不同级联个数的器件，如1，2，3个级联，通过Lumerical仿真得到的不同个数的器件的S11和S21参数，可以看到，随着器件的级联个数的

增加，器件的短波波段的滤波功率衰减越来越大，达到了-40dB以上，而在长通波段，其插入损耗S21并没有明显增大，在长通波段的反射也能很好的保持在-20dB以下。最主要的，其过渡带的斜率随着器件级联个数的增加而明显的变大，更陡峭的过渡带斜率，在片上滤波应用上具有重要意义。

上述的仿真结果表明，可以通过简单的器件版图级联，来实现长通滤波的过渡带斜率的调节。

### 5.3 超材料长通滤波器的制备与测试

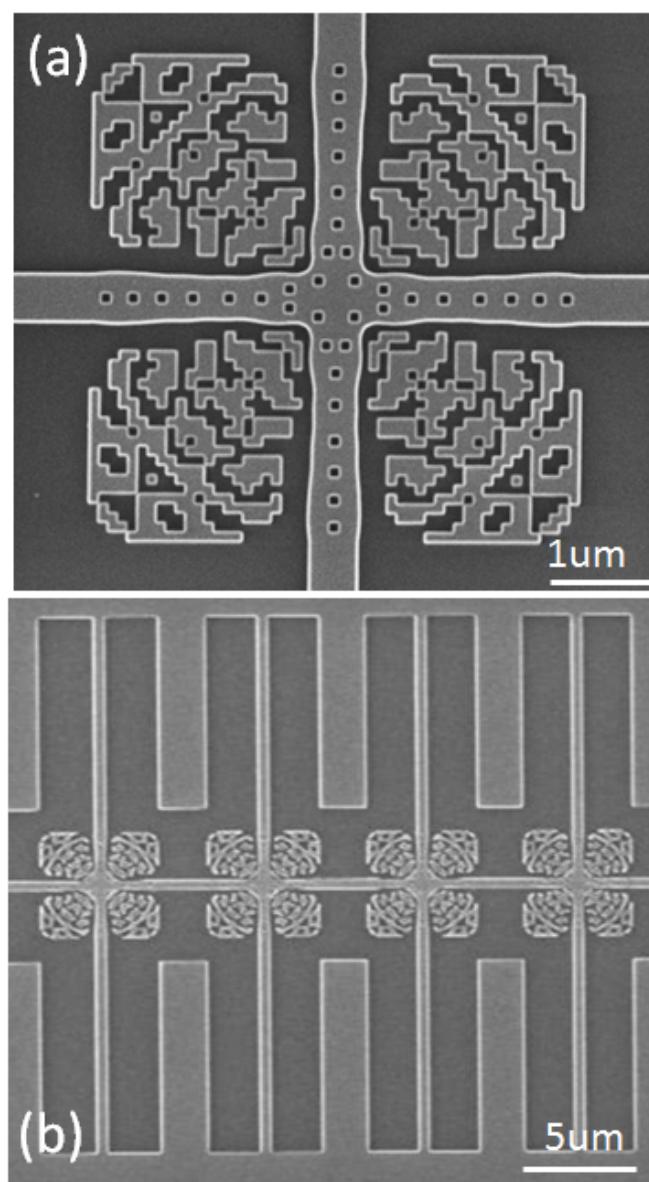


图 5.10 (a)加工后的超材料长通滤波器在电子显微镜下的结果。(b)加工后的级联超材料长通滤波器。

通过器件制备和测试来验证仿真的结果。器件的制备过程相对简单，只需在标准的SOI晶片上通过单次的电子束曝光和等离子体刻蚀便可以实现器件制备，如图5.10a为加工后的长通滤波器在电子显微镜SEM下的结果，同时也制备了不同级联个数的器件，如图5.10b，用于测试器件的级联特性和缩放特性。

加工后的器件的测试结果，同样采用了间接测试的方案。测试了1, 2, 3, 5个器件的光纤到光纤的透射谱，如图5.11a所示。通过对不同的测试结果，间接地得到单个器件的测试结果。通过不同器件个数下光纤到光纤的透射谱，从投射谱可看到较为明显的长通滤波现象，而且，随着器件级联个数的增加，其过渡带宽度逐渐变小，过渡带的斜率也逐渐增大。其对应的过渡带的斜率依次为0.493, 0.913, 1.344, 1.251 dB/nm。禁带的功率抑制比也逐渐增大，然而由于无法避免的TM模式的存在，其短波长的功率抑制无法达到仿真的水平，维持在30dB的量级。而对于长通波段的插入损耗，可以通过线性拟合的方式得到。如图5.11c所示，通过线性拟合如图5.11a中，在1550nm处的器件插入损耗，可得到单个长通滤波器在1550nm处的损耗为-0.58dB。

同样，为了测试器件在不同的缩放情况下的光通过情况，如图5.12所示，测试了99%, 100%和101%缩放的器件，其测试得到的光纤到光纤透射谱中，可以看到，当器件缩放1%时，禁带的位置偏移了10nm，与仿真的结果的11.4nm较为一致。

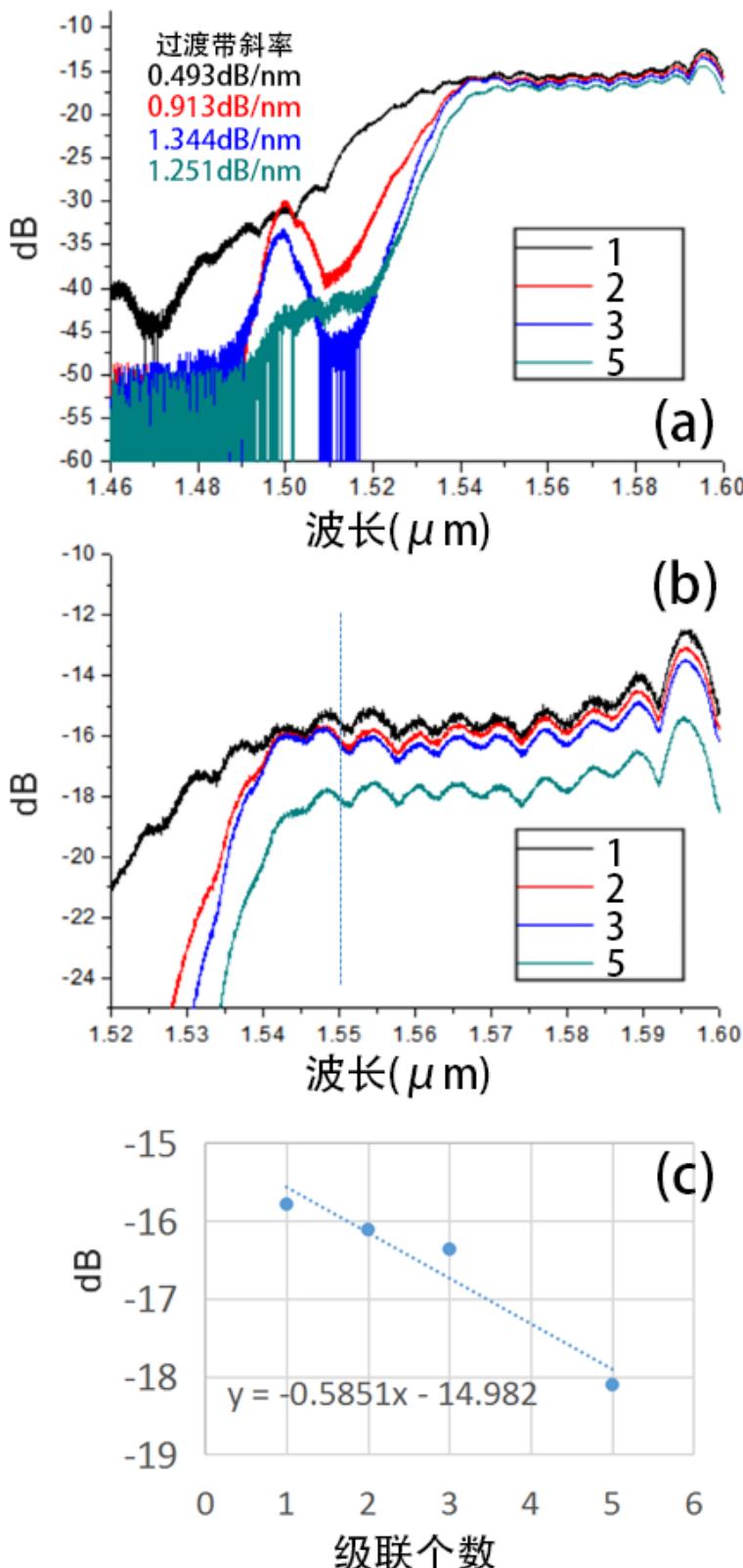


图 5.11 长通滤波器的级联测试结果图。(a)在1,2,3,5不同级联个数下, 测试得到的投射谱, 对应的过渡带斜率为0.493, 0.913, 1.344, 1.251dB/nm。(b) 在1,2,3,5不同级联个数下, 长通波段的透射功率。可以通过提取长通波段的透射功率, 通过线性拟合的方式, 得到长通波段的插入损耗。(c)通过提取1550nm处的透射功率, 并通过线性拟合得到, 单个长通滤波器的插入损耗约为-0.5851dB@1550nm。

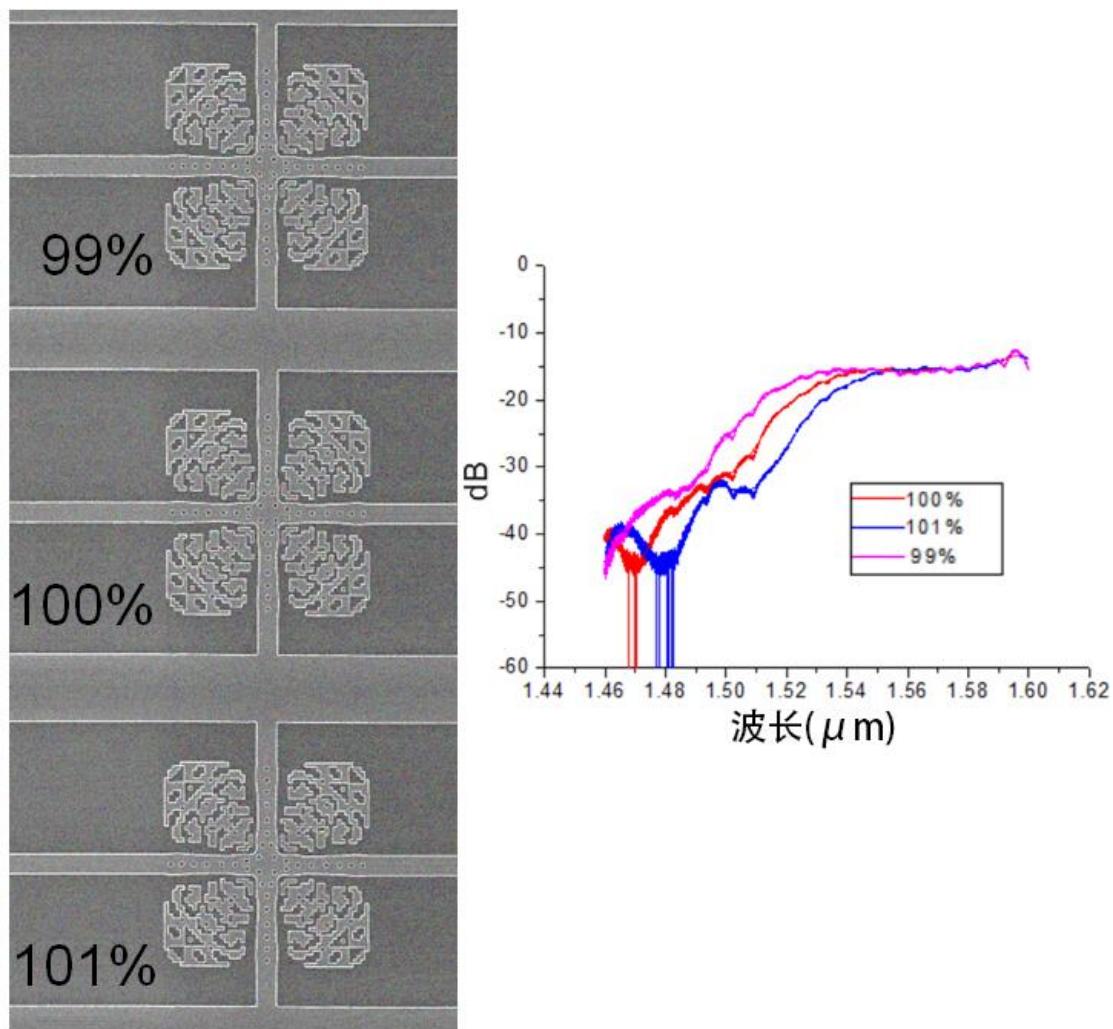


图 5.12 长通滤波器的版图缩放测试结果图。可见，随着器件版图缩放1%时，器件的透射谱偏移了10nm左右，与仿真结果较为一致。

## 5.4 小结

在本章中，设计并加工了一个紧凑的超材料长通滤波器，器件尺寸仅为 $5.1 \times 5.1 \mu\text{m}^2$ 。在长通滤波器的长通波段（1550~1600nm），器件的插入损耗仅为-0.58dB。而在短波长截止波段（约1450~1500nm），光会由于超材料结构的电磁响应而被过滤并反射，且功率衰减可以达到25dB。我们同样展示了长通滤波器的由于器件版图缩放导致的过渡带偏移现象和由器件级联带来的过渡带斜率增强现象。这些实验结果表明，超材料可以成为一种紧凑而理想的设计方法，用来实现片上的滤波功能，对于提高光子器件的集成度和降低光子集成芯片成本，具有积极的意义。

## 第6章 总结和展望

本论文切入光子集成芯片的痛点，迫切需要紧凑高性能的光子器件，用于降低较高的光子芯片成本。光子集成器件的设计往往具有较多的设计自由度、较复杂的器件需求和耗费时间的电磁波求解过程。因此需要运用高效可靠的算法来简化和加速器件设计和优化。

通过引入成熟可靠的有数十年研究的遗传算法，通过物竞天择适者生存的生物法则，实现了有效的变量优化，通过遗传算法，设计并优化了三个常用的光子集成器件。

在第三章中，提出并通过遗传算法设计了一种基于底部硅光栅反射镜的氮化硅光栅耦合器。通过下置式的硅光栅，实现较高的向上的辐射效率，从而极大的提升了器件的耦合效率。同时，又采用了一种便于制备的光栅一步刻蚀的方案，一方面保留了硅光栅反射镜的高效率，另一方面，避免了化学机械抛光CMP和高精度的电子束对准曝光HPA过程。并通过器件测试得到均匀光栅的耦合效率为-3.6dB和70nm的1dB带宽，而非均匀变迹光栅的耦合效率为-2.5dB和65nm的1dB带宽。设计的氮化硅光栅耦合器，性能突出，制备简单，在实际的器件制备和应用中具有较高的应用前景。

在第四章中，提出、设计、加工、测试了一种紧凑的 $10 \times 5 \mu\text{m}^2$ 的超材料硅与氮化硅波导的层间耦合器，并创新性的采用了双层氮化硅的波导，在实现了稳定的硅-氮化硅层间耦合的情况下，又保证了足够大的层间距。相比于传统的倒锥层间耦合器，具有紧凑高效率的特点。通过三维交叉结构来测试层间耦合器的性能，器件测试得到的三维交叉的插入损耗为-1.206dB@1531nm，即单个层间耦合器的损耗约为-0.6dB，且1dB带宽覆盖了所需要的1530-1570nm波段，通过这紧凑的三维层间耦合器，可以较好的满足密集的三维层间耦合应用的需求。

在第五章中，设计并加工了一个紧凑的超材料长通滤波器，器件尺寸仅为 $5.1 \times 5.1 \mu\text{m}^2$ 。在长通滤波器的长通波段（1550-1600nm），器件的插入损耗仅为-0.58dB。而在短波长截止波段（约1450-1500nm），光会由于超材料结构的电磁响应而被过滤并反射，且功率衰减可以达到25dB。同样，展示了长通滤波器的由于器件版图缩放导致的过渡带偏移现象和由器件级联带来的过渡带斜率增强现象。这些实验结果表明，超材料可以成为一种紧凑而理想的设计方法，用

来实现片上的滤波功能，对于提高光子器件的集成度和降低光子集成芯片成本，具有积极的意义。

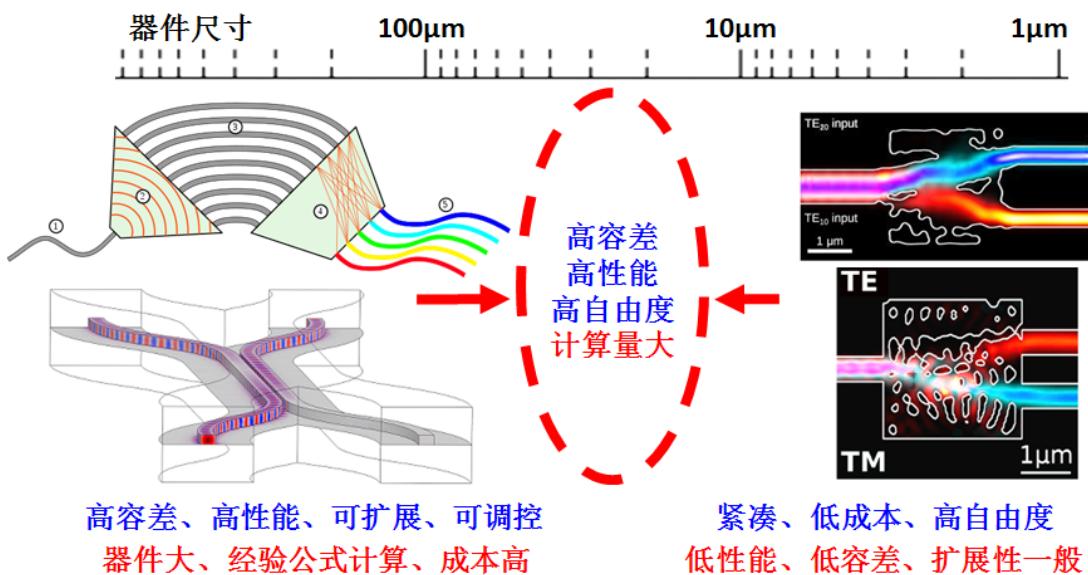


图 6.1 传统的光子集成器件，器件尺寸较大( $>100\mu m$ )，具有更高的性能等优点；数值计算的光子集成器件，器件尺寸非常小( $<10\mu m$ )，则性能较为一般。

如图6.1所示，传统应用的光子集成器件，器件尺寸较大( $>100\mu m$ )，具有较高的性能、较好的器件容差特性，可拓展、可调控等优点。而较大的器件尺寸，依赖经验公式或近似方法等低自由度的方法进行器件设计，自由度较低，较大的器件尺寸也提高了光子芯片的制造成本，不利于光子芯片的大规模应用。另一方面，通过数值优化算法计算的到光子器件，器件尺寸小( $<10\mu m$ )，具有极高的紧凑性和集成度，可通过极高的自由度，实现更多样的性能；而，器件的尺寸小（目前发表的基于计算的光子器件，尺寸往往在 $<5\mu m$ ），性能较低，容差较差，器件的拓展性一般。因此，在 $10\mu m \sim 100\mu m$ 的器件尺寸范围内，存在一个兼顾高自由度，高性能、高容差的器件设计尺寸范围。数十微米的器件尺寸下的高自由度器件设计，需要耗费宏大的计算机资源，对数值优化算法是一种巨大的挑战。遗传算法将在大规模的光子器件设计优化中，发挥更加重要的作用。

## 附录 A 论文相关代码

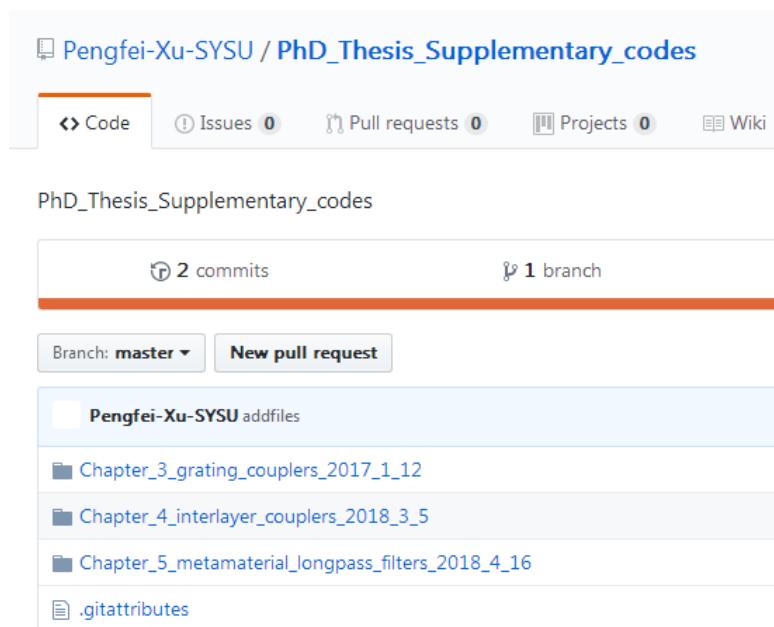


图 A.1 详细的器件优化代码，由于物理建模和优化算法的代码是独立且复杂的，不能完整地在博士论文里表述，具体代码可以登陆[我的Github](#)进行下载查阅。

[https://github.com/Pengfei-Xu-SYSU/PhD\\_Thesis\\_Supplementary\\_codes](https://github.com/Pengfei-Xu-SYSU/PhD_Thesis_Supplementary_codes)

## 参考文献

- [1] LIU D, TAN Y, YU Z. Training deep neural networks for the inverse design of nanophotonic structures[J]. *Acs Photonics*, 2017, 5(4):1365-1369.
- [2] XING L, RIVENSON Y, YARDIMCI N T, et al. All-optical machine learning using diffractive deep neural networks[J]. *Science*, 2018, 361(6406):eaat8084-.
- [3] PIGGOTT A Y, LU J, LAGOUDAKIS K G, et al. Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(6):374-377.
- [4] SU L, PIGGOTT A Y, SAPRA N V, et al. Inverse design and demonstration of a compact on-chip narrowband three-channel wavelength demultiplexer[J]. *Acs Photonics*, 2017, 5(2):acsphotonics.7b00987.
- [5] FOLKERT H, GREEN W M J, SOLOMON A, et al. Cascaded mach-zehnder wavelength filters in silicon photonics for low loss and flat pass-band wdm (de-)multiplexing[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10):11652-11658.
- [6] OHANA D, DESIATOV B, MAZURSKI N, et al. Dielectric metasurface as a platform for spatial mode conversion in nanoscale waveguides[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(12):7956-7961.
- [7] JING W, YI X, MINGHAO Q, et al. Broadband and fabrication-tolerant on-chip scalable mode-division multiplexing based on mode-evolution counter-tapered couplers[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9):1956-1959.
- [8] YANG Z, AMIR H, XIAOCHUAN X, et al. Ultralow-loss silicon waveguide crossing using bloch modes in index-engineered cascaded multimode-interference couplers[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(18):3608-3611.
- [9] CUI H, SUN X, YU Z. Genetic-algorithm-optimized wideband on-chip polarization rotator with an ultrasmall footprint[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(16):3093.
- [10] BOCK P J, PAVEL C, SCHMID J H, et al. Subwavelength grating periodic structures in silicon-on-insulator: a new type of microphotonic waveguide[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19):20251-20262.
- [11] BING S, PENG W, POLSON R, et al. An integrated-nanophotonics polarization beamsplitter with  $2.4 \times 2.4 \mu m^2$  footprint[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(6):378-382.
- [12] XIE Z, LEI T, FAN L, et al. Ultra-broadband on-chip twisted light emitter for optical communications[J]. *Light: Science and Applications*, 2018, 7(4):18001.
- [13] KAY M. Gaot[EB/OL]. 2019. <https://www.ise.ncsu.edu/people/kay/>.
- [14] POHLHEIM H. geatbx[EB/OL]. 2019. <http://geatbx.com/>.
- [15] RAINVILLE F M D. deap[EB/OL]. 2019. <https://github.com/DEAP/deap>.
- [16] TEARE S W. Optics using matlab[M]. 2017.

- [17] TAILLAERT D. Ghent university dissertation: grating coupler as interface between optical fibres and nanophotonic waveguides[M]. 2006.
- [18] CHENG Z, LI D, GE G, et al. Compact grating coupler for 700-nm silicon nitride strip waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(4):1322-1327.
- [19] HUIJUAN Z, CHAO L, XIAOGUANG T, et al. Efficient silicon nitride grating coupler with distributed bragg reflectors[J]. Optics Express, 2014, 22(18):21800-5.
- [20] SACHER W D, YING H, LIANG D, et al. Wide bandwidth and high coupling efficiency si3n4-on-soi dual-level grating coupler[J]. Optics Express, 2014, 22(9):10938-47.
- [21] JINGHUI Z, YU Y, MENGYUAN Y, et al. Ultra efficient silicon nitride grating coupler with bottom grating reflector[J]. Optics Express, 2015, 23(20):26305.
- [22] CHEN Y, HALIR R, MOLINA-FERNÁNDEZ , et al. High-efficiency apodized-imaging chip-fiber grating coupler for silicon nitride waveguides[J]. Optics Letters, 2016, 41(21): 5059-5062.
- [23] JONES A M, DEROSE C T, LENTINE A L, et al. Ultra-low crosstalk, cmos compatible waveguide crossings for densely integrated photonic interconnection networks[J]. Optics Express, 2013, 21(10):12002-12013.
- [24] YOO S J B, GUAN B, SCOTT R P. Heterogeneous 2d/3d photonic integrated microsystems [J]. 2016, 2:16030.
- [25] DONG P. Silicon photonic integrated circuits for wavelength-division multiplexing applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(6):370-378.
- [26] MAJID S, REZA P, EFTEKHAR A A, et al. High-efficiency and wideband interlayer grating couplers in multilayer si/sio2/sin platform for 3d integration of optical functionalities[J]. Optics Express, 2014, 22(14):16767-77.
- [27] SACHER. W D, MIKKELSEN. J C, DUMAIS. P, et al. Tri-layer silicon nitride-on-silicon photonic platform for ultra-low-loss crossings and interlayer transitions[J/OL]. Opt. Express, 2017, 25(25):30862-30875. <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-25-25-30862>. DOI: 10.1364/OE.25.030862.
- [28] KUANPING S, SHIBNATH P, BINBIN G, et al. Low-loss compact multilayer silicon nitride platform for 3d photonic integrated circuits[J]. Optics Express, 2015, 23(16):21334-21342.
- [29] STAUDE I, SCHILLING J. Metamaterial-inspired silicon nanophotonics[J/OL]. Nature Photonics, 2017, 11(5):274-284. <http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2017.39>.
- [30] RYBIN M V, FILONOV D S, SAMUSEV K B, et al. Phase diagram for the transition from photonic crystals to dielectric metamaterials[J]. Nature Communications, 2015, 6.
- [31] COLDREN L A, CORZINE S W, MAŠANOVIĆ M L. Diode lasers and photonic integrated circuits, second edition[J]. Optical Engineering, 2012, 36(36):616.
- [32] REED G T, KNIGHTS A P. Silicon photonics: An introduction[M]. 2005.
- [33] SOREF R. The past, present, and future of silicon photonics[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 12(6):1678-1687.

- [34] TAKATO N, JINGUJI K, YASU M, et al. Silica-based single-mode waveguides on silicon and their application to guided[J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(6):1003-1010.
- [35] ALBERTO P, CRYAN M J, RARITY J G, et al. Silica-on-silicon waveguide quantum circuits [J]. Science, 2008, 320(5876):646-649.
- [36] TONEY J E. Lithium niobate photonics[M]. 2015.
- [37] BINETTI P R A, LU M, NORBERG E J, et al. Indium phosphide photonic integrated circuits for coherent optical links[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(2):279-291.
- [38] LOCKWOOD D, PAVESIL, PAVESIL, et al. Silicon fundamentals for photonics applications [J]. Topics in Applied Physics, 2004, 94:1-50.
- [39] WISSEM SFAR Z, ANDREAS K, WOLFGANG V, et al. Bridging the gap between optical fibers and silicon photonic integrated circuits[J]. Optics Express, 2014, 22(2):1277-86.
- [40] MILLER D A B. Optical interconnects to electronic chips[J]. Applied Optics, 2010, 49(25): 59-70.
- [41] KISH F A, WELCH D, NAGARAJAN R, et al. Current status of large-scale inp photonic integrated circuits[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(6): 1470-1489.
- [42] REED G T. Silicon photonics: The state of the art[M]. 2008.
- [43] TOP500. site[EB/OL]. 2019. <https://www.top500.org/>.
- [44] FORTY. two years of microprocessor trend data[EB/OL]. 2019. <https://www.karlrupp.net/2018/02/42-years-of-microprocessor-trend-data/>.
- [45] FORTY. two years of microprocessor trend data sources[EB/OL]. 2019. <https://github.com/karlrupp/microprocessor-trend-data>.
- [46] VUČKOVIĆ J, LU J. Nanophotonic computational design[J]. Optics Express, 2013, 21(11): 13351-13367.
- [47] LU J, VUCKOVIC J. Objective-first nanophotonic design[M]. 2013.
- [48] MOLESKY S, LIN Z, PIGGOTT A Y, et al. Outlook for inverse design in nanophotonics[J]. Nature Photonics, 2018, 12(11):659-670.
- [49] YANG L, KITA S, MUÑOZ P, et al. On-chip zero-index metamaterials[J]. Nature Photonics, 2015, 9(11):738-742.
- [50] ZHELUDOV N I, KIVSHAR Y S. From metamaterials to metadevices[J]. Nature Materials, 2012, 11(11):917-24.
- [51] SHEN B, POLSON R, MENON R. Increasing the density of passive photonic-integrated circuits via nanophotonic cloaking[J]. Nature Communications, 2016, 7:13126.
- [52] HONGNAN X, YAOCHENG S. Metamaterial-based maxwell's fisheye lens for multimode waveguide crossing[J]. Laser and Photonics Reviews, 0.
- [53] GENETIC. Algorithms with python by clinton sheppard[EB/OL]. 2019. <https://github.com/handcraftsman/>.

- [54] 颜树华. 衍射微光学设计[M]. 2011.
- [55] HORNBY G S, GLOBUS A, LINDEN D S, et al. Automated antenna design with evolutionary algorithms[J]. Aiaa Journal, 2010.
- [56] FU P H, TU Y C, HUANG D W. Broadband optical waveguide couplers with arbitrary coupling ratios designed using a genetic algorithm[J]. Optics Express, 2016, 24(26):30547-30561.
- [57] ZEJIE Y U, CUI H, SUN X. Genetically optimized on-chip wideband ultracompact reflectors and fabry–perot cavities[J]. Photonics Research, 2017, 5(6):B15.
- [58] PABLO S, PABLO V, FRANCISCO C, et al. Highly efficient crossing structure for silicon-on-insulator waveguides[J]. Optics Letters, 2009, 34(18):2760-2762.
- [59] SANCHIS L, HAKANSSON A, LOPEZZENON D, et al. Integrated optical devices design by genetic algorithm[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(22):4460-4462.
- [60] JYUN-HONG L, DONG-PO C, YA-LUN T, et al. Genetic algorithms optimization of photonic crystal fibers for half diffraction angle reduction of output beam[J]. Optics Express, 2014, 22(19):22590-7.
- [61] SMF. G.652[EB/OL]. 2019. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652>.
- [62] SHOJI T, TSUCHIZAWA T, WATANABE T, et al. Low loss mode size converter from 0.3  $\mu$  m square si wire waveguides to singlemode fibres[J]. Electronics Letters, 2002, 38(25):1669-1670.
- [63] SHAREE M N, NIKOLAJ M, YURII V. Ultra-low loss photonic integrated circuit with membrane-type photonic crystal waveguides[J]. Optics Express, 2003, 11(22):2927-39.
- [64] HARPER K R. Brigham young university dissertation: Theory, design, and fabrication of diffractive grating coupler for slab waveguide[M]. 2009.
- [65] YANG C, ZHANG F, CHEN H, et al. Ultra-low temperature silicon nitride photonic integration platform[J]. Optics Express, 2016, 24(3):1865.
- [66] SUBRAMANIAN A Z, KUYKEN B, THOURHOUT D V, et al. Silicon photonics: Silicon nitride versus silicon-on-insulator[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. 2016.
- [67] RAHIM A, RYCKEBOER E, SUBRAMANIAN A, et al. Expanding the silicon photonics portfolio with silicon nitride photonic integrated circuits[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, PP(99):1-1.
- [68] MUÑOZ P, MICÓ G, BRUL A, et al. Silicon nitride photonic integration platforms for visible, near-infrared and mid-infrared applications[J]. Sensors, 2017, 17(9):2088.
- [69] SHAINLINE J M, BUCKLEY S M, NADER N, et al. Room-temperature-deposited dielectrics and superconductors for integrated photonics[J]. Optics Express, 2017, 25(9):10322.
- [70] ZHANG H, LI C, TU X, et al. High efficiency silicon nitride grating coupler[J]. Applied Physics A, 2014, 115(1):79-82.

- [71] DOERR C R, CHEN L, CHEN Y K, et al. Wide bandwidth silicon nitride grating coupler [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(19):1461-1463.
- [72] CHEN Y, DOMINGUEZ B T, KHOKHAR A Z, et al. Experimental demonstration of an apodized-imaging chip-fiber grating coupler for si3n4 waveguides[J]. Optics Letters, 2017, 42(18):3566.
- [73] HOCHBERG M, BAEHRJONES T. Towards fabless silicon photonics[J]. Nature Photonics, 2010, 4(8):492-494.
- [74] BATHE K. Finite element method[M]. 2000.
- [75] CHROMIUM. solved in acid-based nh3 solution[EB/OL]. 2019. <http://www.docbrown.info/page07/transition04Cr.htm>.
- [76] XU P, ZHANG Y, SHAO Z, et al. High-efficiency wideband sinx-on-soi grating coupler with low fabrication complexity[J]. Optics Letters, 2017, 42(17):3391-3394.
- [77] XIE W, ZHU Y, AUBERT T, et al. Low-loss silicon nitride waveguide hybridly integrated with colloidal quantum dots[J/OL]. Opt. Express, 2015, 23(9):12152-12160. <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-23-9-12152>. DOI: 10.1364/OE.23.012152.
- [78] GEYTER B D, KOMOROWSKA K, BRAINIS E, et al. From fabrication to mode mapping in silicon nitride microdisks with embedded colloidal quantum dots[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(16):557.
- [79] BAUTERS J F, BOWERS J E, HECK M J R, et al. Low-loss silicon nitride awg demultiplexer heterogeneously integrated with hybrid iii-v/silicon photodetectors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(4):817-823.
- [80] C.L.CHEN. Foundations for guide-wave optics[M]. 2005.
- [81] MARCATILI E A J. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics[J]. Bell Labs Technical Journal, 1969, 48(7):2071-2102.
- [82] TRINH P D, YEGNANARAYANAN S, JALALI B. Integrated optical directional couplers in silicon-on-insulator[J]. Electronics Letters, 1995, 31(24):2097-2098.
- [83] LUYSSAERT B, BIENSTMAN P, VANDERSTEEGEN P, et al. Efficient nonadiabatic planar waveguide tapers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(8):2462-2468.
- [84] PIGGOTT A Y, PETYKIEWICZ J, SU L, et al. Fabrication-constrained nanophotonic inverse design[J]. Sci Rep, 2017, 7(1):1786.
- [85] PIGGOTT A Y. Automated design of photonic devices[M]. STANFORD UNIVERSITY Dissertation.
- [86] XU P, ZHANG Y, ZHANG S, et al. Sinx&#x2013;si interlayer coupler using a gradient index metamaterial[J/OL]. Opt. Lett., 2019, 44(5):1230-1233. <http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-44-5-1230>. DOI: 10.1364/OL.44.001230.
- [87] ZHAO Q, ZHOU J, ZHANG F, et al. Mie resonance-based dielectric metamaterials[J]. Materials Today, 2009, 12(12):60-69.

- [88] VYNCK K, FELBACQ D, CENTENO E, et al. All-dielectric rod-type metamaterials at optical frequencies[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(13):133901.
- [89] SHI L, JIANG X, LI C. Effects induced by mie resonance in two-dimensional photonic crystals.[J]. Journal of Physics Condensed Matter An Institute of Physics Journal, 2007, 19(17):176214.
- [90] FOTEINOPOLLOU S. Photonic crystals as metamaterials[J]. Physica B Condensed Matter, 2012, 407(20):4056-4061.
- [91] MEE-KOY C, CHEE-WEI L, SHUH-YING L, et al. High-index-contrast waveguides and devices[J]. Applied Optics, 2005, 44(15):3077-86.
- [92] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(18):4184.
- [93] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. Science, 2006, 314(5801):977-980.
- [94] MUNK B. Frequency selective surfaces: theory and design [book review][J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 18(1):94-94.
- [95] Ilchenko V S, Matsko A B. Optical resonators with whispering-gallery modes-part ii: applications[J/OL]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(1):15-32. DOI: [10.1109/JSTQE.2005.862943](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2005.862943).
- [96] BOGAERTS W, DE HEYN P, VAN VAERENBERGH T, et al. Silicon microring resonators [J]. Laser & Photonics Reviews, 2015, 6(1):47-73.
- [97] CHEN D, GAO G, XIA J, et al. Silicon nitride o-band (de)multiplexers with low thermal sensitivity[J]. Optics Express, 2017, 25(11):12260.
- [98] DAOXIN D, ZHI W, BAUTERS J F, et al. Low-loss si3n4 arrayed-waveguide grating (de)multiplexer using nano-core optical waveguides[J]. Optics Express, 2011, 19(15):14130-6.
- [99] JIANG G, CHEN R, QIANG Z, et al. Slab-modulated sidewall bragg gratings in silicon-on-insulator ridge waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(1):6-8.
- [100] MAGDEN E S, LI N, RAVAL M, et al. Transmissive silicon photonic dichroic filters with spectrally selective waveguides[J]. Nature Communications, 2018, 9(1):3009-.

## 作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

本科生无需此部分。

### 作者简历

许鹏飞

许鹏飞，广东省普宁人，中山大学电子与信息工程学院博士研究生。

### 已发表(或正式接受)的学术论文:

[1] Pengfei Xu, Yanfeng Zhang\*, Zengkai Shao, Lin Liu, Lidan Zhou, Chunchuan Yang, Yujie Chen, and Siyuan Yu, High-efficiency wideband SiNx-on-SOI grating coupler with low fabrication complexity, Optics Letters, 2017, 42(17) : 3391-3394.

[2] Pengfei Xu, Yanfeng Zhang\*, Shuailong Zhang, Yujie Chen, and Siyuan Yu, SiNx–Si interlayer coupler using a gradient index metamaterial, Optics Letters, 2019, 44(5) : 1230-1233.

[3] Jian Jian, Pengfei Xu, Hui Chen\*, Mingbo He, Zeru Wu, Lidan Zhou, Lin Liu, Chunchuan Yang, and Siyuan Yu, High-efficiency hybrid amorphous silicon grating couplers for sub-micron-sized lithium niobate waveguides, Optics Express, 2018, 26(23) : 29651-29658.

### 已发表的会议论文学术论文:

[1] Pengfei Xu, Yujie Chen\*, Jie Liu, Yanfeng Zhang, Guoxuan Zhu, Qingsheng Xiao, Bingchi Liu, Hui Chen, and Siyuan Yu, Design of Travelling-wave Photodetectors Impedance-matched over 135-GHz Bandwidth, Asia Communications and Photonics Conference 2015, Hong Kong, P.R. China, 2015.11.19-11.23.

[2] Pengfei Xu, Yujie Chen\*, Zengkai Shao, Yanfeng Zhang, Tianyou Zhang, Zeru Wu, Chunchuan Yang, Lin Liu, Lidan Zhou, Hui Chen, Jie Liu, and Siyuan Yu, Hybrid integrated velocity matched travelling-wave InP/InGaAs photodetectors with silicon nitride waveguides, Asia Communications and Photonics Conference 2016, Wuhan , P.R. China, 2016.11.2-11.5.

[3] Pengfei Xu, Yanfeng Zhang\*, Zengkai Shao, Lin Liu, Lidan Zhou, Chunchuan Yang, Yujie Chen, and Siyuan Yu, Fabrication-friendly High-efficiency Silicon Nitride Grating Coupler, Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim 2017, Singapore, 2017.07.31-08.03.

[4] Pengfei Xu, Yanfeng Zhang\*, Zengkai Shao, Chunchuan Yang, Lin Liu, Yujie Chen, and Siyuan Yu,  $5 \times 5 \mu m^2$  compact waveguide crossing optimized by genetic algorithm, Asia Communications and Photonics Conference 2017, Guangzhou, P.R. China, 2017.11.10-11.13.

[5] Pengfei Xu, Yanfeng Zhang\*, Yujie Chen, and Siyuan Yu, Robust TE0 + TE1 Waveguide Crossing, Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim 2018, Hong Kong, P.R. China, 2018.07.29-08.03.

**申请或已获得的专利:**

CN201510733750.4 一种行波结构光探测器芯片及制备方法（授权）

## 致 谢

感谢的导师余思远教授，陈钰杰副教授和张彦峰副教授的悉心指导。

感谢实验室的杨纯川工程师、刘林工程师、周丽丹工程师对实验的帮助。

感谢喻颖副教授、刘洁副教授、陈晖老师的讨论。

感谢实验室的师兄师姐师弟师妹。

感谢的亲人和朋友。

许鹏飞

2019年3月