

# 激光与光电子学进展

## 用于垂直耦合的非对称光栅耦合器的研究进展

田苗\*, 瞿敏妮, 乌李瑛, 程秀兰

上海交通大学先进电子材料与器件校级平台, 上海 200240

**摘要** 光子集成的发展极大地促进了光栅耦合器的研究。非对称光栅打破了耦合对称条件,能够实现相对较高的耦合效率。近年来,倾斜光栅、闪耀光栅和二元闪耀光栅等均得到了极大发展,它们的结构设计、制备方法和测试方法等也都得到了改进。介绍了光栅作为光纤与光波导的耦合器的工作原理和主要特点,梳理了光栅耦合器的主要类型及各类型所面临的主要问题和解决方法,列举了一些值得关注的研究成果。旨在帮助研究者了解光栅耦合器的研究现状和潜在的发展方向,从而为未来的相关研究提供参考。

**关键词** 光栅; 衍射光栅; 光耦合; 耦合效率; 光栅制备; 光栅仿真

中图分类号 TN25

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0500004

### Progress on Asymmetrical Grating Couplers for Vertical Coupling

Tian Miao\*, Qu Minni, Wu Liying, Cheng Xiulan

Center for Advanced Electronic Materials and Devices, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China

**Abstract** Fast development of photonic integration has promoted researches on grating couplers. Asymmetrical gratings can realize high-efficiency coupling because they break the symmetrical coupling conditions. Slanted gratings, blazed gratings, binary blazed gratings, and others have obtained important development, especially their structural design, manufacturing methods, and test methods have obtained improvement. The working principles and main features for various gratings as couplers between optical fibers and waveguides are introduced. The main types and the main problems and solution methods faced by each type of gratings are systematically analyzed, and some remarkable research results are enumerated. The aim is to help researchers know about the research status and potential development directions, and thus provide some reference for the future related researches.

**Key words** gratings; diffraction grating; light coupling; coupling efficiency; grating manufacture; grating simulation

**OCIS codes** 050.1380; 230.1950; 050.2770

## 1 引 言

光子集成理论与相关制备技术经过几十年的发展已得到了长足的进步。由于信号之间无感应、无干扰,且信号速率高、密度大、无需接地等,光互连技术逐步替代了电互连技术。以结构来分,光互连可分为局间互连、架间互连(设备间互连)、框间互连、板间互连、板上互连(片间互连)、片上互连

(片内互连)。其中,片上光互连的基本单元包括光源、光波导、分束/合束器、高频调制器和探测器等有源/无源光电子器件,它们的高集成度依赖于硅基微纳光子集成技术的发展。

尽管片上的硅基微纳光电器件尺寸可缩小至纳米量级并实现一定规模的子系统,但系统对外的高效耦合始终是一个严峻的挑战。对于集成光路系统来说,耦合器是系统与外界的接口,接口问题

收稿日期: 2020-06-04; 修回日期: 2020-06-30; 录用日期: 2020-07-03

\*E-mail: miaotian@sjtu.edu.cn

会影响整个系统的功能。因此,近年来,平面光波导耦合技术受到越来越广泛的关注。通常硅波导的尺寸很小,波导中只有一个模式传播。例如,对于在低损耗光纤通信波长(如 1550 nm)下的单模运行,嵌入石英包层(折射率为 1.45)中的硅波导(折射率为 3.45)的横截面面积必须为亚微米级(如  $400\text{ nm} \times 220\text{ nm}$ )<sup>[1]</sup>。而标准单模光纤(SMF)的典型模式场直径(MFD)约为  $10\text{ }\mu\text{m}$ 。这两个波导之间的横截面面积相差 3 个数量级,这对有效的光耦合提出了很大的挑战。

光波导耦合按照耦合方式可以大致分为两类:端面耦合和平面耦合。端面耦合方法主要用于低端口数光子芯片的封装,是光纤通过波导端面直接将光耦合进波导的方法,通常有多层锥形结构,三维锥形结构和倒锥形结构等<sup>[2-3]</sup>。尽管端面耦合具有宽带宽和偏振不敏感的光耦合特性,但是它通常要求精确的对准。例如,对于 1 dB 的耦合损耗,对准公差在  $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$  左右<sup>[4]</sup>。而且端面耦合对振动和高度方向上的位移变化非常敏感,需要很好的环境条件<sup>[5]</sup>。难以制备复杂结构、高要求的制作容差和耦合封装的困难使得端面耦合不适用于大规模集成光路。

作为端面耦合的替代解决方案,人们提出了基于衍射光栅的光耦合方法,该方法可解决光子集成中的光纤与集成波导之间的模式尺寸失配问题,并在表面法线而不是芯片边缘处提供可扩展的光学接口方向<sup>[6-7]</sup>。与端面耦合相比,光栅耦合具有三个典型的优势:1)不需要后处理,例如切块或抛光,可以进行制程中的晶圆级光学表征和测试;2)耦合器结构不需要位于芯片边缘,从而提高了布局设计的灵活性和光端口的可扩展性;3)降低了对准公差,从而使测量和包装过程更加简单<sup>[8-14]</sup>。

本文首先介绍了光栅耦合的原理,重点介绍了非对称光栅相对传统对称光栅的优势;然后详细介绍了常见的几种非对称光栅的研究进展,并重点介绍了它们的制备方法、耦合效率等;最后,对文中涉及的几种光栅的特点进行了汇总比较,以期对相关科研工作提供参考。

## 2 光栅耦合原理

### 2.1 对称光栅耦合原理

衍射光栅是连续线阵呈周期排列的器件,表现为透射部分和遮光部分的周期分布。图 1 所示为光栅耦合器的结构示意图。当平面波照射此衍射光

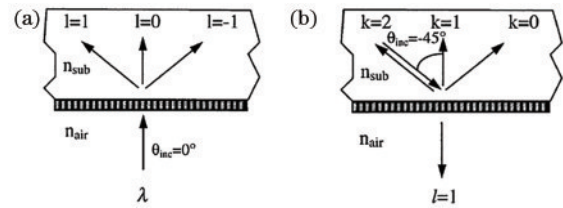


图 1 光栅耦合器的结构示意图<sup>[15]</sup>。(a)入射耦合;(b)出射耦合

Fig. 1 Structural diagram of grating coupler<sup>[15]</sup>. (a) In-coupling; (b) out-coupling

栅时,形成干涉条件,光经透射部分出射的是衍射光,衍射光的衍射方向 $\theta_l$ 由光栅方程可写为

$$\pm \sin \theta_l = \frac{l\lambda}{\Lambda}, \quad (1)$$

式中: $\Lambda$ 为光栅周期; $l$ 为衍射级次; $\lambda$ 为入射光波长。由(1)式可知,衍射角 $\theta_l$ 由波长和光栅周期决定,改变 $\Lambda$ 及 $\lambda$ 就可以改变衍射方向,而改变狭缝的宽度和形状就可以改变透射光强。一般来讲,衍射级 $l$ 越高,则对应光束的光能量越少。耦合效率是指每个阶次的功率与总入射功率之比,是衍射光栅最重要的特性之一。对于传统的对称型的光栅来说,如果不考虑其他损耗,由于正负一级衍射的光能量是相等的,左右方向分别最多可以耦合 50% 的入射光,即最大只能获得 50% 的耦合效率<sup>[16]</sup>。为了应对这种对称型光栅结构有限的耦合效率,一般将入射设计为有一定倾斜角,打破对称,提高耦合效率。一般采用的倾斜角为  $8^\circ \sim 12^\circ$ <sup>[17-18]</sup>。图 2(a)为典型的光栅耦合器的整体示意图。图 2(b)为其横截面图,给出了衍射光分量的方向。

### 2.2 非对称光栅的耦合原理

由于普通对称光栅耦合效率的局限性,必须采用倾斜入射的方法。而垂直耦合在集成光路的应用方面具有更大的吸引力,它能大大加强系统的灵活性并降低对准封装难度。相对于非完全垂直耦合,完全垂直耦合有着以下优点:不需要光纤顶端的倾斜抛光;对准难度降低,而非完全垂直耦合需要考虑光纤方向和波导方向的关系,并适当调整角度;由于光纤都是同一个方向排列,完全垂直耦合适合于更密集的集成。在完全垂直耦合下,为了打破耦合条件的对称性,就必须依赖非对称结构的光栅耦合器。

图 3 为非对称光栅的入射耦合过程,当光束入射到非对称光栅后,由于光栅的非对称性,衍射到入射平面两侧的光强是不同的。根据入射波调整

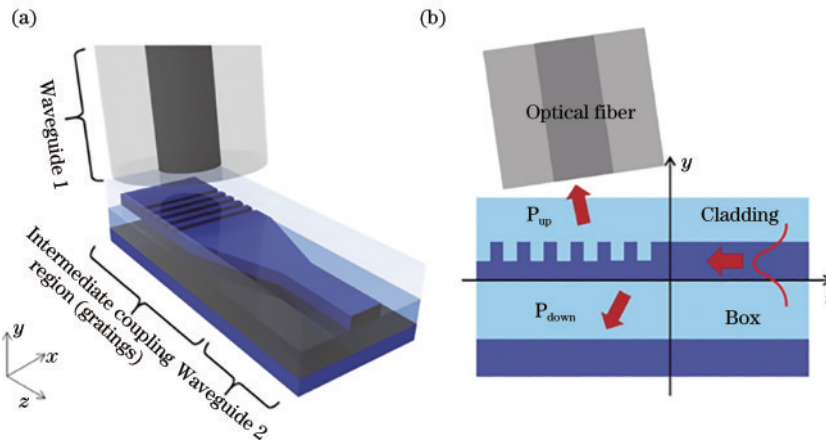


图 2 典型的光栅耦合器<sup>[18]</sup>。(a)整体示意图;(b)横截面图

Fig. 2 Typical grating couplers<sup>[18]</sup>. (a) Whole structural diagram; (b) cross sectional diagram

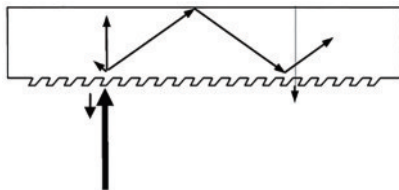


图 3 基于非对称光栅的入射耦合

Fig. 3 In-coupling based on asymmetrical grating

光栅参数、倾斜程度和折射率等,使两侧的差异最大化,从而将光衍射到入射平面的一侧,大大提高衍射效率。

在以下篇幅中,本文将梳理目前主要的非对称光栅的类型和研究现状。实现光栅非对称性的方法有多种,各有优劣,这对于研究者来说是个艰难

的选择。本文将详述和对比各种非对称光栅的结构设计和制备方法,以期为非对称光栅研究提供较全面客观的参考。

### 3 非对称光栅的研究进展

#### 3.1 倾斜光栅

目前用于光耦合的最佳非对称光栅结构是倾斜光栅<sup>[19]</sup>。这是具有倾斜侧壁的二进制光栅,通过对其进行优化,光耦合效率可以超过 90%。利用严格的傅里叶模态方法(FMM,也称为 RCWA)对倾斜光栅进行优化,如图 4 所示,可以看到,相比于对称光栅,在使用近似光栅参数的情况下,倾斜光栅的耦合效率得到大幅提高<sup>[20]</sup>。

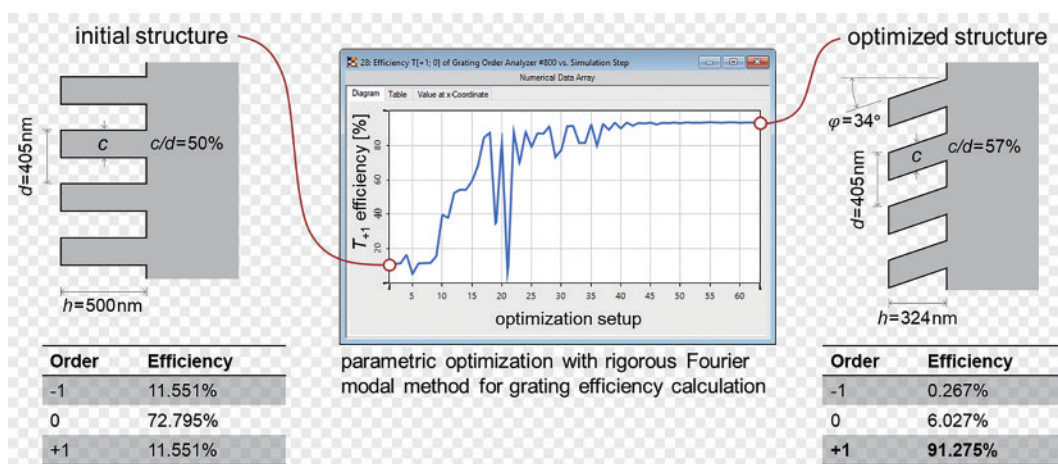


图 4 倾斜光栅和传统矩形光栅的模拟<sup>[20]</sup>

Fig. 4 Simulation of slanted grating and conventional rectangular grating<sup>[20]</sup>

目前用于制备倾斜光栅的方法主要有反应离子刻蚀(RIE)和聚焦离子束刻蚀(FIB)两种。传统 RIE 的刻蚀方向是垂直样品表面,而倾斜光栅需要

通过各种设计来实现倾斜刻蚀。

Li 等<sup>[21]</sup>于 1996 年提出,在全息曝光和显影后,使用特别设计的法拉第笼改变 RIE 中的等离子体



方向,从而实现倾斜的各向异性刻蚀,最终得到了倾斜的刻蚀槽,如图 5 所示,其中 SEM 为扫描电镜。

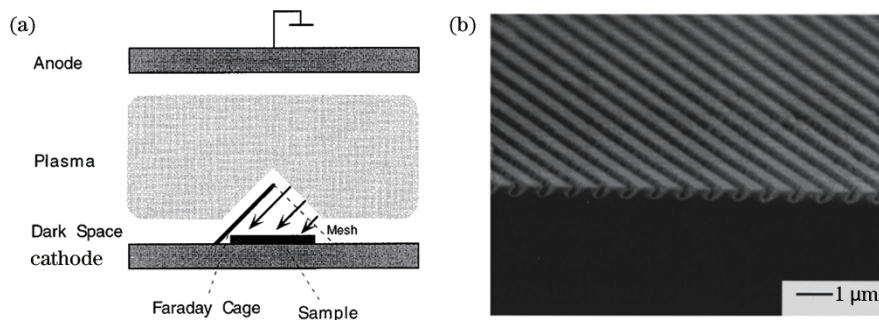


图 5 使用法拉第笼改变 RIE 中等离子体方向来实现倾斜刻蚀<sup>[21]</sup>。(a)结构示意图;(b)所得倾斜光栅的 SEM 照片  
Fig. 5 Realization of tilted etching using Faraday cage to change plasma direction in RIE<sup>[21]</sup>. (a) Structural diagram; (b) SEM image of obtained slanted grating

得益于新型设备反应离子束刻蚀(RIBE)的应用, Levola 等<sup>[22]</sup>在全息显影后使用反应离子束刻蚀,使离子化的氩束倾斜入射至基板,并通过向刻蚀室中添加反应气体氟利昂,增加 SiO<sub>2</sub>和 Cr 之间的选择性,得到了图 6 所示的倾斜光栅。得益于良好的光栅形貌和后续压印复制中所使用的材料的大折射率,所得光栅的输入耦合效率达到了 80%,透射输出耦合效率为 80%,反射输出耦合效率为 57%。

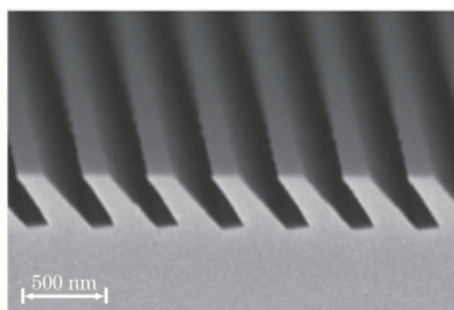


图 6 SiO<sub>2</sub>倾斜光栅的横截面<sup>[22]</sup>  
Fig. 6 Cross-section of SiO<sub>2</sub> slanted grating<sup>[22]</sup>

在标准 RIE 中,将样品倾斜一定角度,也可以得到倾斜的刻蚀槽。Miller 等<sup>[15]</sup>以倾斜 30°的方法在标准 RIE 中刻蚀出了图 7 所示的倾斜凹槽<sup>[15]</sup>。由于 RIE 设备的限制,此方法不适用于大倾斜角倾斜光栅的制备。此外,由于这种制备方法和所用材料折射率的限制,所得光栅的耦合效率最高为 49%,并没有达到理想的耦合效率。

FIB 是另外一种可以实现倾斜刻蚀的方法。Wang 等<sup>[23-26]</sup>进行了倾斜光栅耦合器的设计和制备。采用高折射率光栅,在耦合长度仅为 20 μm 时,利用时域有限差分(FDTD)法并结合遗传算

但是,由于光栅齿形和占空比的控制不佳,此结构的衍射效率测量值并未达到理想值。

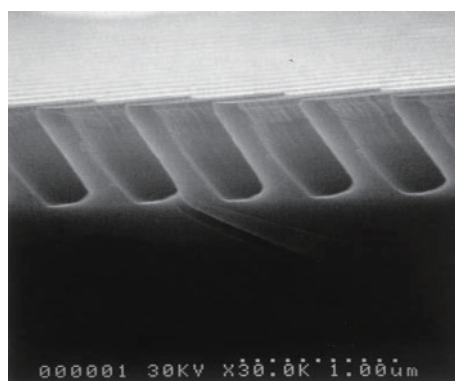


图 7 在 RIE 中倾斜刻蚀出的倾斜光栅的 SEM 照片<sup>[15]</sup>  
Fig. 7 SEM image of slanted grating etched with tilted RIE<sup>[15]</sup>

法进行优化,理论输入耦合效率可以达到 80.1%,输出耦合效率可以达到 56%,如图 8 所示,其中 SOI 表示绝缘衬底上的硅。以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>作为硬掩模,将样品相对于聚焦离子束入射方向倾斜 58°放置,并通入碘以作为化学辅助进行刻蚀。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>硬掩模和硅都在同一过程中被蚀刻,由于氧化铝和硅之间的蚀刻速率差异较大,因此形成了窄缝<sup>[26]</sup>,如图 8 (b)所示。由于制备难度较高,所得光栅与设计结构差别较大,实际测得的耦合效率与理论值相差较大,为 46%。

从以上案例可以看到,虽然倾斜光栅的理论耦合效率很高,但是简单有效的制备方法仍然是难点。传统 RIE 很难实现良好的齿形及较好的占空比控制,在倾斜刻蚀方面需要诸多改进。RIBE 可以很好地解决这个问题,是目前比较推荐的倾斜光栅制备方法。FIB 虽然可以较容易实现倾斜刻蚀,但是刻蚀速度较慢,对工艺要求很高,要求严格控制倾斜角度和刻蚀深度,并且很难与传统 CMOS(complementary metal

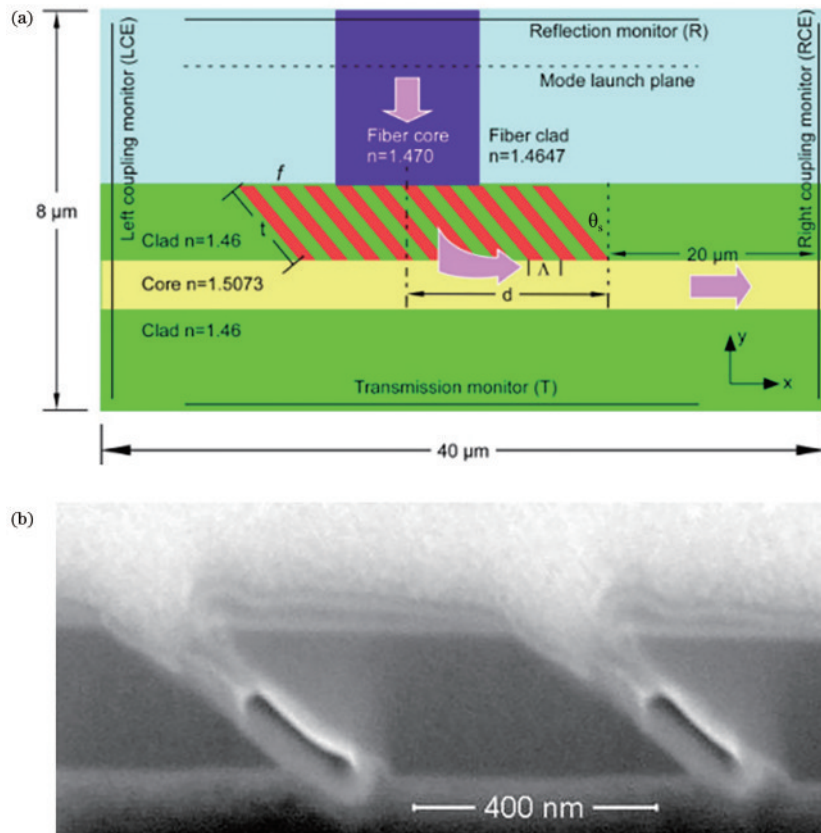


图 8 倾斜光栅耦合器的设计和制备。(a)输入倾斜光栅耦合器<sup>[23]</sup>;(b)基于FIB的SOI波导层上的倾斜光栅耦合器的SEM图<sup>[26]</sup>  
 Fig. 8 Design and fabrication of slanted grating coupler. (a) Incident slanted grating coupler<sup>[23]</sup>; (b) SEM image of slanted grating coupler in SOI waveguide layer based on FIB<sup>[26]</sup>

oxide semiconductor)工艺兼容。

### 3.2 闪耀光栅

若将光栅的刻痕刻成三角形的槽线,使每一刻痕的小反射面与光栅平面保持一定的夹角,以控制光在每一个小反射面上的反射方向,进而使光集中在所需要的某一级光谱上,这种光栅称为闪耀光栅,刻痕的小反射面与光栅平面间的夹角称为闪耀角。当入射角 $\alpha$ 、衍射角 $\beta$ 和闪耀角 $\theta_B$ 相等时,即 $\alpha = \beta = \theta_B$ ,在衍射角 $\beta$ 的方向上可得到最大的相对强度,同时满足 $2d \sin \theta_B = n\lambda_p$ ,其中 $d$ 为光栅常数, $n$ 为衍射级数, $\lambda_p$ 称为闪耀波长。图9为闪耀光栅的角度关系。

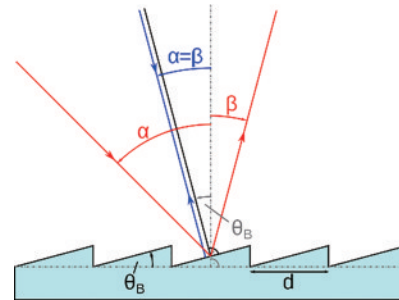


图 9 闪耀光栅的角度关系<sup>[27]</sup>  
 Fig. 9 Angle relationship of blazed grating<sup>[27]</sup>

表面上精确控制三角形凹槽的轮廓。通过监控和补偿以确保槽轮廓的严格控制。光栅要求非常高的机械加工精度,世界上只有极少的设备能够实现机械刻写光栅<sup>[30]</sup>。

闪耀光栅通过控制槽的形状,可将衍射的中央主极大转移到不同的干涉主极大上,从而使能量集中到某一衍射级。利用这一点,可以制成高效的光栅耦合器<sup>[28-29]</sup>。闪耀光栅的制备方法主要有机械刻线、全息光刻与离子铣削或各向异性蚀刻相结合的方法及灰度电子束光刻(gray scale electron beam lithography)。

全息光刻主要用于对称结构,通常与离子铣削<sup>[31]</sup>或各向异性KOH蚀刻<sup>[32]</sup>相结合以实现不对称光栅结构。Ang等<sup>[33-34]</sup>使用扰动理论调整锯齿的形状,计算得到闪耀光栅对衬底的最大输出效率约为90%。他们在包含有 $1 \mu\text{m}$ 厚度顶硅的unibond SOI(先键合再剥离得到的SOI晶片)中制造了闪耀光

如果采用机械加工过程,就必须在光栅的整个

栅,通过以一定倾斜角在 Ar 离子束铣削腔中进行刻蚀,成功地制造了良好的非对称硅锯齿状闪耀光栅,斜齿间距小于 383 nm,测试得到的输出耦合效率达到了 84%。闪耀光栅的 SEM 照片如图 10 所示。在国内,苏州大学的吴建宏课题组以熔融石英

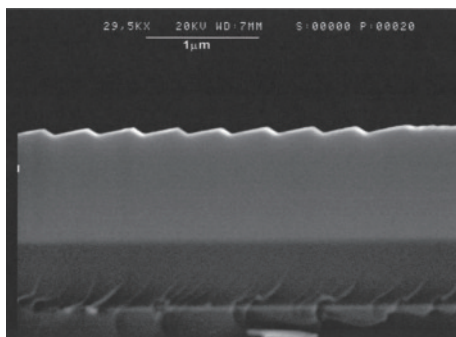


图 10 闪耀光栅的 SEM 照片<sup>[34]</sup>

或 K9 玻璃为基板,利用 413.1 nm 的氦离子激光,相干显影得到正弦形光刻胶光栅掩模;然后在倾斜角度为 82°~85°的支架上进行离子束扫描刻蚀,从而获得了小闪耀角闪耀光栅<sup>[35]</sup>。但是此方法并未获得完美的光栅形貌。

灰度电子束光刻近年来被广泛用于闪耀光栅的制备。Mattelin 等<sup>[36]</sup>使用灰度电子束光刻技术,在 PMMA (polymethyl methacrylate) 上制造了间距为 508 nm、填充系数为 0.66 的闪耀光栅,如图 11 所示,其中 OrmoCore 是一种紫外固化混合聚合物。该光栅的闪耀波长为 543 nm,闪耀角为 43°。随后用紫外线纳米压印光刻技术,在聚合物波导材料中进行复制。利用两个闪耀光栅分别进行图像的输入和输出耦合,实现了输入图像在虚拟现实中的清晰显示。入射耦合效率为 48.4%,整体通量效率为 17.4%。

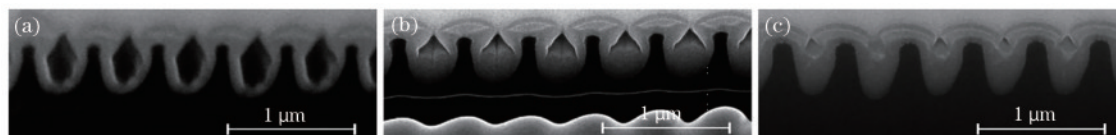


图 11 PMMA 模板光栅<sup>[36]</sup>。(a)压印前和(b)压印后的 FIB 横截面 SEM 图像;(c)OrmoCore 上的压印光栅

Fig. 11 PMMA template grating<sup>[36]</sup>. FIB cross-sectional SEM images (a) before and (b) after imprinting; (c) imprinted grating in OrmoCore

从以上案例可以看到,全息光刻与离子铣削相组合的工艺昂贵且耗时,灰度电子束光刻是更为实用的闪耀光栅制备方法。但是,光栅耦合效率对表面平滑度非常敏感,灰度电子束光刻也很难达到制作要求,这种厚度变化的结构难以制备。由于所制备的闪耀光栅的形貌欠佳,实际所得的耦合效率远远低于理论计算值。

### 3.3 二元闪耀光栅

由于传统闪耀光栅锯齿面的制造工艺难度较大,尤其是目前光电器件的尺寸越来越小,因此需要更简易的制造流程,这就极大地推动了二元闪耀光栅的研究和发展<sup>[37]</sup>。二元闪耀光栅是一种基于亚波长光栅“等效介质膜理论”的新型闪耀光栅。

等效介质膜理论是研究亚波长结构表面的近似理论。该理论认为,当入射光波长远远大于浮雕结构周期时,只产生零级的透射、反射和衍射,波阵面的形状不发生改变<sup>[38]</sup>。

二元闪耀光栅中的每个子周期均由一系列高不等宽的光栅组成,通过改变光栅的占空比,可实现等效折射率的调制,进而实现闪耀光栅。在某种意义上,二元闪耀光栅可以看作是宽度方向上离散化的闪耀光栅。闪耀光栅离散化至二元闪耀光栅的过程如图 12 所示。二元闪耀光栅由一系列高度一致的亚波长矩形齿组成,通过调制光栅凹槽的填充系数,可以实现高效的衍射光栅<sup>[39-40]</sup>。



图 12 二元闪耀光栅耦合器的设计原理<sup>[35]</sup>。(a)闪耀光栅;(b)等价形式的渐变折射率光栅;(c)二元闪耀光栅

Fig. 12 Design principle of binary blazed grating<sup>[35]</sup>. (a) Blazed grating; (b) equivalent gradient refractive index grating; (c) binary blazed grating



理论和实验研究表明,虽然闪耀光栅在理论上可以实现很高的衍射效率,但是,在纳米光学器件的设计中,常规的闪耀光栅存在固有的遮蔽效应<sup>[39-42]</sup>,原理如图 13 所示。这种遮蔽效应限制了闪耀光栅特有的优点,二元闪耀衍射元件的衍射效率要高于相同条件下的常规闪耀光栅。

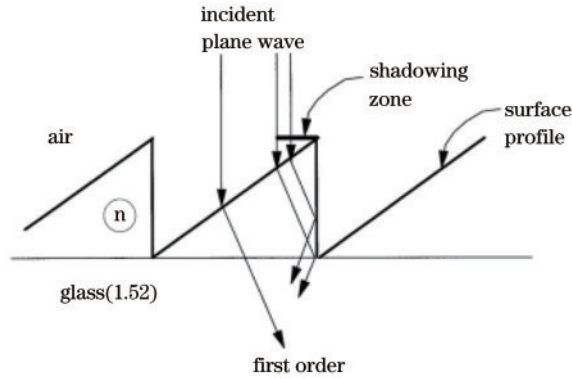


图 13 闪耀光栅的遮蔽效应<sup>[39]</sup>

Fig. 13 Shadowing effect of blazed grating<sup>[39]</sup>

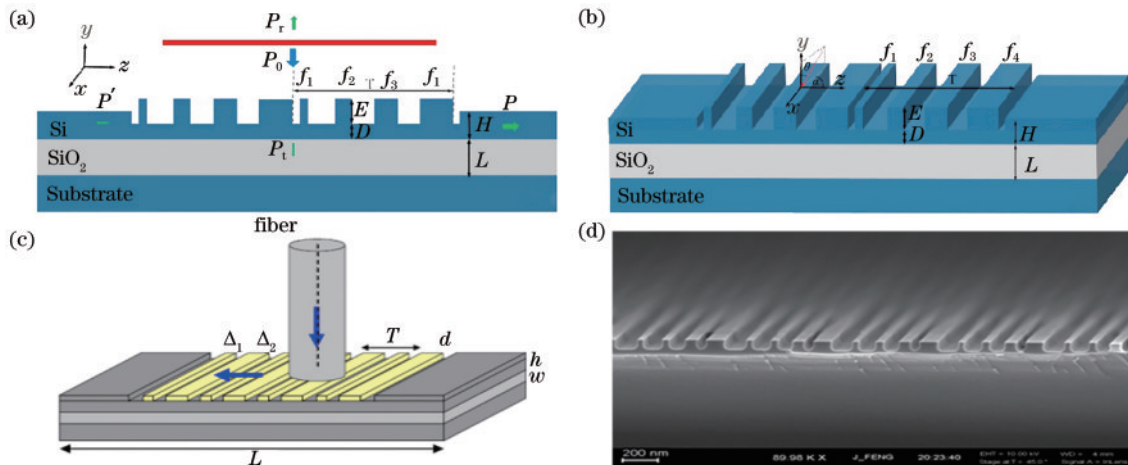


图 14 二元闪耀光栅的结构示意图。(a)2D 结构<sup>[43]</sup>; (b)3D 结构<sup>[43]</sup>; (c)二元闪耀光栅的耦合示意图<sup>[47]</sup>; (d)二元闪耀光栅耦合器的 SEM 图<sup>[48]</sup>

Fig. 14 Structural diagram of binary blazed grating. (a) 2D structure<sup>[43]</sup>; (b) 3D structure<sup>[43]</sup>; (c) coupling schematic of binary blazed gratings<sup>[47]</sup>; (d) SEM image of binary blazed grating coupler<sup>[48]</sup>

二元闪耀光栅制备的难点往往是最小宽度介质齿的实现,而由以上诸多研究结果可见,当将二元闪耀光栅离散为一个子周期内含有 2、3、4 个不同宽度的介质齿时,均可以实现效率较高的耦合。这降低了二元闪耀光栅的设计和制备难度,增加了实用性,是非常有意义的。

### 3.4 其他非对称光栅

除了目前较常见的非对称光栅,学者们也探索了其他形式的光栅结构,同样可以实现非对称的耦

合。Liu 等<sup>[50]</sup>在 SOI 波导层上,通过选择性湿法,刻蚀掉光栅层下面的氧化物层,使光栅的一侧落下,从而将常规对称光栅变为倾斜放置[图 15(a)]。这种设计不需要倾斜入射角的刻蚀就可以实现光栅倾斜,制备上有一定优势。对于横电模式的光,实验获得了 28.5% 的峰值耦合效率和 38 nm 的 1 dB 带宽。Laakkonen 等<sup>[51]</sup>提出了一种双深度双槽二元光栅耦合器,光栅结构如图 15(b)所示,该光栅的介电材料由两个不同深度的凹槽组成。虽然这种结

学者们测量了具有不同离散程度的二元闪耀光栅,均得到了较高的耦合效率,较低的制作难度得到证明。Yu 等<sup>[43-44]</sup>设计了四个不同宽度的介质齿,实现了折射率渐变的子周期,如图 14(a)、(b)所示。对于垂直电偏振入射光,耦合效率为 75%。此光栅的最窄光栅槽宽度为 50 nm,深度为 200 nm,便于微纳加工。Li 等<sup>[45]</sup>将离散为四个介质齿的二元闪耀光栅集成在基于硅的混合光电探测器中,实现了横电模式在 1550 nm 处的 68% 的耦合效率。蒋红<sup>[46]</sup>研究发现,含有三个光栅齿的二元光栅也能实现有效的渐变折射。学者将第一子周期设计为空气槽,第二子周期的介质齿宽度为 60 nm,第三子周期的介质齿宽度为 210 nm,并进行了工艺探索。Yang 等<sup>[47-49]</sup>证明了即使只有两个不同宽度的光栅齿,也可以实现较高的耦合效率,如图 14(c)所示,计算得到的耦合效率在 1.52 μm 波长下高达 69%,在 1.55 μm 波长下高达 65%。图 14(d)为他们制备的二元闪耀光栅的 SEM 照片,显示了良好的结构形貌。

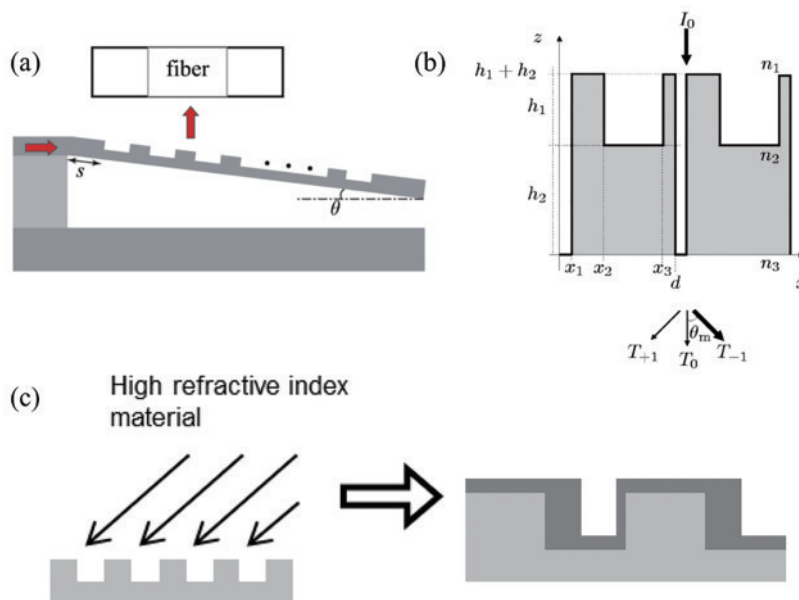


图 15 几种较为少见的非对称光栅。(a)矩形光栅倾斜放置的光栅耦合器示意图<sup>[50]</sup>;(b)双深度双槽光栅耦合器<sup>[51]</sup>;(c)高折射率材料的角蒸发示意图<sup>[52]</sup>;(d)基于图(c)得到的结构<sup>[52]</sup>  
 Fig. 15 Several less popular asymmetrical gratings. (a) Schematic of tilted rectangular grating coupler<sup>[50]</sup>; (b) double-depth double-groove grating coupler<sup>[51]</sup>; (c) angle evaporation schematic of high-refractive-index material<sup>[52]</sup>; (d) structure obtained based on Fig. (c)<sup>[52]</sup>

构在理论上能有效地实现一阶衍射,但由于其包含了一个狭窄且深的凹槽,制备难度相当大。例如,为了实现 100% 的一阶衍射,需要使用折射率为 1.80 的材料以制备出宽为 87.15 nm、深度为 664.65 nm 的沟槽。Lütolf 等<sup>[52]</sup>提出了一种相对简单的光栅加工方法,即通过阴影蒸发,制备了不对称涂覆的二元光栅。将高折射率材料(ZnS)倾斜沉积到基于紫外线固化聚合物制备的对称光栅上,引入了折射率的不对称调制,如图 15(c)和 15(d)所示。该光栅结构的折射率轮廓类似于双深度双槽

结构。对于垂直入射的非偏振光,此光栅的理论一阶衍射效率可以达到近 70%。由于制备难度高,这些富有创意的非对称性光栅探索难以推广,但是它们推动了相关研究的发展,意义非凡。

#### 4 特点比较

相对于对称光栅,非对称光栅在耦合效率方面有着明显的优势。但是,非对称光栅的应用依然没有得到普及,主要原因是其加工难度较大。

表 1 为常见非对称光栅的特点比较,其中 EBL 为

表 1 常见非对称光栅的特点比较  
 Table 1 Feature comparison of common asymmetrical gratings

Coupling structure	Schematic	Coupling efficiency	Manufacturing technique	Reference
Symmetrical grating		74%	EBL and ICP	[16]
		<u>38%</u>		
Slanted grating		90%	Tilted 30° RIE	[20]
		<u>49%</u>		
		80.1%, <u>46%</u>		
		<u>80%</u>		
Blazed grating		<u>84%</u>	Tilted ion milling	[33-34]
		48.4%		
Binary blazed grating		75%	EBL	[42, 44]
		69%		[47-49]
		68%		[45]

\*Underlined data are experimental results, while data without underline are from theoretical calculation.



电子束光刻, DUV 为深紫外光刻, ICP 为电感耦合等离子刻蚀。由表 1 的对比可以看出, 虽然倾斜光栅作为耦合器时耦合效率较高, 但是它的制备需要倾斜的反应离子刻蚀、聚焦离子束刻蚀或反应离子束刻蚀, 较难与传统 CMOS 工艺集成。除了倾斜刻蚀, 闪耀光栅还可以通过灰度曝光的方法来实现。但是光栅对表面形貌的要求非常高, 很难通过灰度曝光得到满足要求的倾斜面。二元闪耀光栅的制备方法与对称光栅类似, 只需要改变介质齿的宽度, 是相对比较容易加工的非对称光栅。

## 5 结束语

光电领域的发展对光纤与光波导的耦合效率提出了越来越高的要求。由于种种优势, 非对称光栅终将代替对称光栅而得到广泛应用。介绍了对称光栅和非对称光栅的耦合原理, 综述了目前常见的非对称光栅耦合器, 从耦合效率和加工难度等方面进行了对比和总结。讨论了光栅形貌本身对耦合效率的影响。实际上无论是哪种光栅, 都可以通过添加底部反射层、布局多层光栅等方法来改善性能。

虽然芯片制造技术已经非常成熟, 但是只适用于制备传统的对称光栅, 而很难直接应用于非对称光栅。随着各种先进制造方法的开发, 相信一些设计独特的光栅结构也将逐渐得到实现。

## 参 考 文 献

- [1] Vlasov Y, McNab S. Losses in single-mode silicon-on-insulator strip waveguides and bends [J]. *Optics Express*, 2004, 12(8): 1622-1631.
- [2] Liu X, Wang Z L. Refractive index sensor based on trapezoidal dielectric grating and metallic film structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(7): 072401.  
刘啸, 王正岭. 基于梯形介质光栅金属薄膜结构的折射率传感器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(7): 072401.
- [3] Han S, Park J, Yoo S, et al. Lateral silicon photonic grating-to-fiber coupling with angle-polished silica waveguide blocks [J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8811-8818.
- [4] van Laere F, Roelkens G, Ayre M, et al. Compact and highly efficient grating couplers between optical fiber and nanophotonic waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(1): 151-156.
- [5] Nauriyal J, Song M, Yu R, et al. Fiber-to-chip fusion splicing for low-loss photonic packaging [J]. *Optica*, 2019, 6(5): 549-552.
- [6] Lukas Chrostowski M H, *Silicon photonics design: from devices to systems* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [7] Marchetti R, Lacava C, Carroll L, et al. Coupling strategies for silicon photonics integrated chips [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(2): 201-239.
- [8] Bozzola A, Carroll L, Gerace D, et al. Optimising apodized grating couplers in a pure SOI platform to  $-0.5$  dB coupling efficiency [J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 16289-16304.
- [9] Saha T K, Zhou W D. High efficiency diffractive grating coupler based on transferred silicon nanomembrane overlay on photonic waveguide [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(8): 085115.
- [10] Tang Y, Wang Z, Wosinski L, et al. Highly efficient nonuniform grating coupler for silicon-on-insulator nanophotonic circuits [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1290-1292.
- [11] Li C, Zhang H J, Yu M B, et al. CMOS-compatible high efficiency double-etched apodized waveguide grating coupler [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 7868-7874.
- [12] Benedikovic D, Cheben P, Schmid J H, et al. High-efficiency single etch step apodized surface grating coupler using subwavelength structure [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(6): L93-L97.
- [13] Marchetti R, Lacava C, Khokhar A, et al. High-efficiency grating-couplers: demonstration of a new design strategy [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 16670.
- [14] Mao Q, Tang X G, Meng F, et al. Tunable narrow-band filter with sub-wavelength grating structure by micro-optofluidic technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 042301.  
毛强, 唐雄贵, 孟方, 等. 基于亚波长光栅结构的微流控可调窄带滤波器设计与分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 042301.
- [15] Michael Miller J, de Beaucoudrey N, Chavel P, et al. Design and fabrication of binary slanted surface-relief gratings for a planar optical interconnection [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(23): 5717-5727.
- [16] Taillaert D, Bogaerts W, Bienstman P, et al. An out-of-plane grating coupler for efficient butt-

- coupling between compact planar waveguides and single-mode fibers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(7): 949-955.
- [17] Taillaert D, Bienstman P, Baets R. Compact efficient broadband grating coupler for silicon-on-insulator waveguides [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(23): 2749-2751.
- [18] Son G, Han S, Park J, et al. High-efficiency broadband light coupling between optical fibers and photonic integrated circuits [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(12): 1845-1864.
- [19] Yang J M, Lin Y L, Huang Q Q, et al. Wavelength-tunable linearly polarized Yb-doped fiber laser based on tilted fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0314003.  
杨锦民, 林彦吕, 黄千千, 等. 基于倾斜光栅的可调谐线偏振掺镱光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0314003.
- [20] Light Trans. Parametric optimization and tolerance analysis of slanted gratings [EB/OL]. [2020-04-08]. <https://www.lightrans.com/use-cases/application-use-cases/parametric-optimization-and-tolerance-analysis-of-slanted-gratings.html>.
- [21] Li M, Sheard S. Experimental study of waveguide grating couplers with parallelogramic tooth profiles [J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(11): 3101-3106.
- [22] Levola T, Laakkonen P. Replicated slanted gratings with a high refractive index material for in and outcoupling of light [J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 2067-2074.
- [23] Wang B, Jiang J H, Nordin G. Compact slanted grating couplers [J]. *Optics Express*, 2004, 12(15): 3313-3326.
- [24] Wang B, Jiang J H, Nordin G P. Embedded slanted grating for vertical coupling between fibers and silicon-on-insulator planar waveguides [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(9): 1884-1886.
- [25] van Laere F, Kotlyar M V, Taillaert D, et al. Compact slanted grating couplers between optical fiber and InP-InGaAsP waveguides [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(6): 396-398.
- [26] Schrauwen J, Laere F V, Thourhout D V, et al. Focused-ion-beam fabrication of slanted grating couplers in silicon-on-insulator waveguides [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(11): 816-818.
- [27] Guenther B D. *Modern Optics* [M]. Oxford: Oxford University Press, 2016: 56-57.
- [28] Aoyagi T, Aoyagi Y, Namba S. High-efficiency blazed grating couplers [J]. *Applied Physics Letters*, 1976, 29(5): 303-304.
- [29] Liu Q, Wu J H, Guo P L, et al. Fabrication of convex blazed grating with high diffraction efficiency [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0313001.  
刘全, 吴建宏, 郭培亮, 等. 高衍射效率凸面闪耀光栅的研制 [J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0313001.
- [30] Zhang B Q, Wang Q H, Shen N G, et al. Experimental investigation and numerical analysis of mechanical ruling for an aluminum-coated diffraction grating [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, 139(2): 021003.
- [31] Shi J, Sheng B, Huang Y S, et al. Multifacet echelle grating for intensity broadening on spectral plane fabricated by rotating ion-beam etching [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(18): 5040-5044.
- [32] Voronov D L, Ahn M, Anderson E H, et al. High-efficiency 5000 lines/mm multilayer-coated blazed grating for extreme ultraviolet wavelengths [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(15): 2615-2617.
- [33] Ang M T W, Reed G T, Vonsovici A P, et al. Blazed-grating couplers in unibond SOI [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3896: 360-368.
- [34] Ang T W, Reed G T, Vonsovici A, et al. Highly efficient unibond silicon-on-insulator blazed grating couplers [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(25): 4214-4216.
- [35] Cheng Y. The design and fabrication of convex blazed grating with small blaze angle [D]. Suzhou: Soochow University, 2014.  
程渔. 小闪耀角凸面闪耀光栅的研究与制备 [D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
- [36] Mattelin M A, Radosavljevic A, Missinne J, et al. Design and fabrication of blazed gratings for a waveguide-type head mounted display [J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11175-11190.
- [37] Zheng Z Z, Yang Z, Xiu L C. Development and application of shortwave infrared convex blazed grating with high diffraction efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1205002.  
郑志忠, 杨忠, 修连存. 高衍射效率短波红外凸面闪耀光栅的研制与应用 [J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1205002.
- [38] Salik M D, Chavel P. Resonant excitation analysis of

- waveguide grating couplers[J]. *Optics Communications*, 2001, 193(1/2/3/4/5/6): 127-131.
- [39] Lalanne P, Astilean S, Chavel P, et al. Design and fabrication of blazed binary diffractive elements with sampling periods smaller than the structural cutoff [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(5): 1143-1156.
- [40] Haidner H, Sheridan J T, Streibl N. Dielectric binary blazed gratings[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(22): 4276-4278.
- [41] Lalanne P. Waveguiding in blazed-binary diffractive elements [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(10): 2517-2520.
- [42] Sandfuchs O, Brunner R, Pätz D, et al. Rigorous analysis of shadowing effects in blazed transmission gratings[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(24): 3638-3640.
- [43] Yu L, Liu L, Zhou Z P, et al. High efficiency binary blazed grating coupler for perfectly-vertical and near-vertical coupling in chip level optical interconnections [J]. *Optics Communications*, 2015, 355: 161-166.
- [44] Zhou W, Yang J B, Zhang H L, et al. Design of high-efficiency fully-etched binary blazed gratings nearly vertical coupler [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(12): 1048-1050.
- [45] Li H, Liu Y, Miao C, et al. High-performance binary blazed grating coupler used in silicon-based hybrid photodetector integration[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(9): 097106.
- [46] Jiang H. Research on silicon based vertical couplers with micro/nano binary blazed gratings [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- 蒋红. 硅基微纳二元闪耀光栅垂直耦合器研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [47] Yang J B, Zhou Z P, Jia H H, et al. High-performance and compact binary blazed grating coupler based on an asymmetric subgrating structure and vertical coupling [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2614-2617.
- [48] Zhou Z, Yu L. Silicon photonic devices based on binary blazed gratings [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 091708.
- [49] Feng J B, Zhou Z P. High efficiency compact grating coupler for integrated optical circuits [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6351: 63511H.
- [50] Liu L, Zhang J H, Zhang C Z, et al. Silicon waveguide grating coupler for perfectly vertical fiber based on a tilted membrane structure [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 820-823.
- [51] Laakkonen P, Siitonen S, Kuittinen M. Double-groove, two-depth grating coupler for light guides [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(12): 3156-3161.
- [52] Lütolf F, Stalder M, Martin O J F. Up-scalable method to amplify the diffraction efficiency of simple gratings[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(23): 6557-6560.
- [53] Laere F V, Claes T, Schrauwen J, et al. Compact focusing grating couplers for silicon-on-insulator integrated circuits[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(23): 1919-1921.