

文章编号: 1001-3806(2017)03-0361-06

硅基片上刻蚀衍射光栅及其平坦化设计

陈鑫^{1,2}, 武爱民¹, 仇超¹, 黄海阳^{1,2}, 赵瑛璇¹, 盛振¹, 李伟¹, 甘甫烷^{1*}

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 刻蚀衍射光栅(EDG)作为实现波分复用功能的关键器件,对于片上光互连的实现至关重要。为了实现1310nm波段通道间隔为20nm的硅基EDG,采用了基尔霍夫标量衍射理论仿真方法进行理论设计和仿真验证,通过在闪耀光栅反射面引入布喇格反射光栅来提高反射效率、降低器件插入损耗,并在入射波导处引入多模干涉耦合器以实现通道频谱平坦化设计。结果表明,闪耀光栅反射面的反射效率由35%提高到了85%,1dB带宽达到12nm。这对于提高系统稳定性、增大传输距离和容量、降低系统成本具有显著作用,能够满足光互连系统的实际应用需求。

关键词: 集成光学; 刻蚀衍射光栅; 硅基光互连; 波分复用技术

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.03.012

Etching diffraction grating of silicon substrate and design of flatten

CHEN Xin^{1,2}, WU Aimin¹, QIU Chao¹, HUANG Haiyang^{1,2}, ZHAO Yingxuan¹,
SHENG Zhen¹, LI Wei¹, GAN Fuwan¹

(1. State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: Etching diffraction grating (EDG), one of the most critical components, can achieve wavelength division multiplex (WDM) function and realize on-chip optical interconnection. In order to realize 4-channel EDG with the wavelength spacing of 20nm at 1310nm wavelength, Kirchhoff scalar diffraction theory was used for theory design and simulation verification. To further improve the reflection efficiency and decrease the insertion loss, Bragg reflection gratings were designed to replace the normal etched facets. Multimode interference (MMI) coupler was also introduced at input waveguide for flat-top frequency response. The simulation results demonstrate the reflection efficiency of grating reflective surface is up to 85% and 1dB bandwidth is up to 12nm. The designed EDG has a significant effect on improving system stability, increasing transmission distance and capacity, and reducing system cost. The design can meet the practical application requirements of optical interconnection system.

Key words: integrated optics; etching diffraction grating; silicon-based optical interconnection; wavelength division multiplex

引言

随着多核计算时代的来临,人们对信息处理、传输速度的要求不断提高,电互连技术由于串扰、延迟和功耗等缺陷成为系统发展的瓶颈。采用光互连取代电互连可以有效解决这一难题^[1]。在光互连的具体实施

方案中,硅基光互连以其无可比拟的成本和技术优势成为首选,既能发挥光互连抗干扰、功耗低、速度快、带宽大等优点,又能充分发挥微电子低成本、工艺成熟、高成品率、高集成密度等优势,必将推动新一代光通信系统和高性能计算机的发展,有着广阔的市场应用前景。

光互连的一大优势是可以采用信息复用技术提高带宽密度,增加通信容量。其中波分复用(wavelength-division multiplexing, WDM)是应用最广泛的复用技术,而复用/解复用器是最核心的功能器件,是提高系统整体性能的关键。目前硅基光互连中,实现波分复用/解复用功能的波长滤波器件主要有刻蚀衍射光栅(etching diffraction grating, EDG)^[2-4]、阵列波导光栅(arrayed waveguide gratings, AWG)^[5-7]、微环谐振器

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61275112; 61475180;11204340);上海市自然科学基金重点资助项目(14JC1407600);上海市自然科学基金资助项目(16ZR1442600)

作者简介:陈鑫(1990-),男,硕士研究生,现主要从事硅基光互连方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: fuwan@mail.sim.ac.cn

收稿日期:2016-04-11;收到修改稿日期:2016-05-04

(micro-ring resonator, MRR)^[8-9] 和 马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI)^[10-11] 4 种。其中 EDG 和 AWG 是最典型的平面集成光学器件, 它们均具有集成度高的优点, 适合于实现窄通道间隔和大通道数的波分复用器^[12]。相比于 AWG 器件, EDG 具有面积小、齿面间距小且数量多、单边输入输出等优点, 而且具有成像质量高、集成密度大、通道频谱精度高和易于封装等优势。

本文中在绝缘体上硅 (silicon-on-insulator, SOI) 上设计一款四通道、20nm 通道间隔的 EDG, 通过在闪耀光栅反射面引入布喇格反射光栅来降低器件插入损耗, 在入射波导处引入多模干涉耦合器 (multi-mode interference, MMI) 实现通道频谱平坦化设计, 并通过数值仿真方法对器件最终的传输光谱进行仿真计算。整个器件的制作过程与商用成熟集成电路工艺平台兼容, 可以精确地大规模制作。近年来, 基于 1310nm 波段的稀疏波分复用系统由于其在城域网的优势成为研究热点, 目前该波段硅基光收发模块^[13-14] 和器件^[15] 的研究均有报道, 然而用于该波段的硅基 EDG 却鲜有报道。因此, 本文中设计工作于 1310nm 波段的 EDG 实现波分复用功能, 以满足未来城域光网络的发展需求。

1 刻蚀衍射光栅设计

EDG 设计中通常采用凹面闪耀光栅, 利用相邻两个齿面光程差的差异实现色散与聚焦功能。EDG 设计通常基于罗兰圆结构, 其工作原理如图 1 所示。输入输出波导 (waveguide, WG) 分别位于罗兰圆上, 延长线相交于切点 P , 凹面闪耀光栅位于大圆上并且与小圆相切于点 P 。对于凹面闪耀光栅, 衍射方程为:

$$\sin\theta_i + \sin\theta_d = \frac{m\lambda}{n_{\text{eff}}d} \quad (1)$$

式中, θ_i 和 θ_d 分别是入射角和出射角, λ , m , d 和 n_{eff} 分

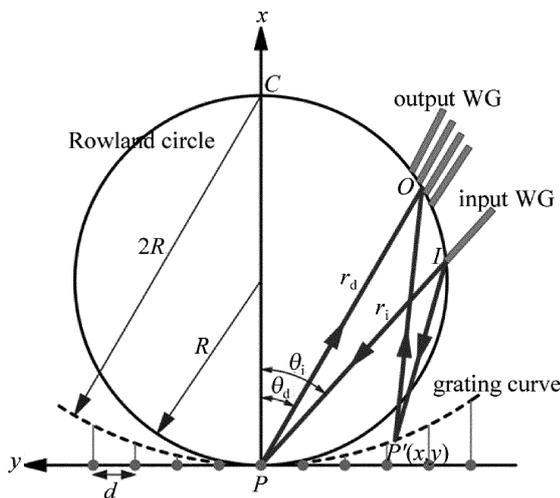


Fig. 1 Schematic of EDG based on Rowland circle

别是入射波长、衍射级数、光栅周期和自由传输区有效折射率。

定义线性色散度 (linear dispersion, LD) d_{LD} 为单位波长偏移对应的输出波导位置偏移量, 即 $\Delta s/\Delta\lambda$, 通过 (1) 式两边取微分计算角色散关系, 可得 d_{LD} 的表达式为^[2]:

$$d_{\text{LD}} = 2R \left(\frac{d\theta_d}{d\lambda} \right) = \frac{2R}{\cos\theta_d} \frac{m}{d} \frac{n_g}{n_{\text{eff}}^2} = \frac{2R}{\lambda} \frac{(\sin\theta_i + \sin\theta_d)}{\cos\theta_d} \frac{n_g}{n_{\text{eff}}} \quad (2)$$

自由光谱范围 (free spectral rang, FSR) $\Delta\lambda_{\text{FSR}}$ 可以表示为^[2]:

$$\Delta\lambda_{\text{FSR}} = \frac{\lambda}{m} \left[1 - \frac{m+1}{m} \left(1 - \frac{n_g}{n_{\text{eff}}} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

式中, n_g 是自由传输区的群折射率, $n_g = n_{\text{eff}} - \lambda \cdot dn_{\text{eff}}/d\lambda$ 。

根据以上几式结合设计要求, 可以初步确定 EDG 的基本参量。由 (1) 式确定的光栅周期 d 是指各光栅齿面中点在 P 点切线上的投影间距。这种投影等间距的设计方法忽略了光传输路径上的高阶像差, 这些高阶像差在远离切点的光栅齿面上会逐渐增加以至于不能忽略, 否则将会影响成像质量。因此, 作者采用一点法对各光栅齿面中点位置进行设计^[16]。

要满足指定波长零像差输出条件, 则要求光信号从罗兰圆上的输入波导处出发, 经过任意光栅齿面中点, 再汇聚到罗兰圆上的特定输出波导位置处所间隔的光程差为该波长的整数倍。在图 1 中, 令自由传输区有效折射率为 n_{eff} , 选定波长为 λ_0 时的零像差输出位置为 O 点, 并令 P 点为光栅第 0 个槽面的中点, 各个光栅齿面中心点 $P'(x, y)$ 满足如下关系:

$$\begin{aligned} & \sqrt{(r_i \cos\theta_i - x)^2 + (r_i \sin\theta_i - y)^2} + \\ & \sqrt{(r_d \cos\theta_d - x)^2 + (r_d \sin\theta_d - y)^2} - \\ & r_d - r_i = \frac{Km\lambda_0}{n_{\text{eff}}} \quad (4) \end{aligned}$$

式中, K 为所计算光栅齿面中心点 P' 与散射中心点 P 所间隔的光栅周期数, 其取值范围为 $[-M, N]$, r_i 为入射波导中点 I 到 P 点之间的距离, r_d 为零像差输出位置 O 到 P 点之间的距离。 M 和 N 的大小由输入波导中的出射光衍射传输到光栅处的能量分布决定, 它们的选择应该使得衍射光栅伸展到能覆盖绝大部分入射能量, 一般应该达到 99% 以上。

在 (4) 式中需要解得 P' 点纵横坐标参量, 即衍射光栅各中心点位置坐标。由于 P' 点位于与罗兰圆相切且半径为 $2R$ 的大圆上, 因此有 (5) 式成立, 与 (4) 式联立可求得各光栅齿面中点 P' 的坐标:

$$\sqrt{(x - 2R)^2 + y^2} = 2R \quad (5)$$

确定各个光栅齿面中点后,根据输入输出波导位置可以确定每个光栅面的方向。光栅面的反射结构最简单方式就是采用端面反射,如图 2a 所示,但这种结构反射效率较差,仅有 35% 左右;在此采用全反射光栅结构^[17],如图 2b 所示。因此针对 1310nm 波段进行参量优化,最终反射光栅参量取光栅周期 $\Lambda = 0.52\mu\text{m}$,刻蚀宽度 $w = 0.2\mu\text{m}$,仿真的反射光谱如图 3 所示。显示其在 1270nm ~ 1350nm 工作波长范围内反射效率大于 0.85,到此整个 EDG 的参量设计全部完成。

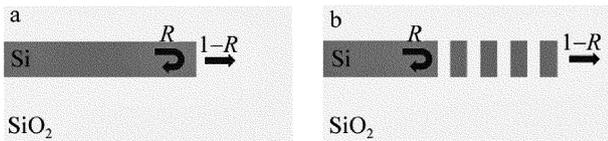


Fig. 2 Schematic of SOI grating
a—facet reflector b—Bragg reflector

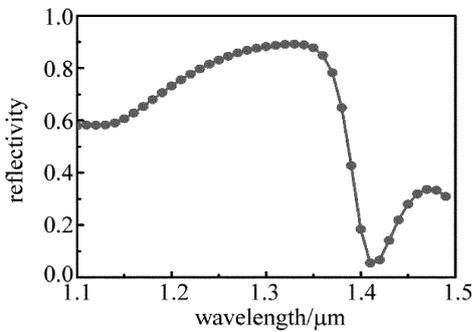


Fig. 3 Relationship between reflectivity and wavelength of Bragg reflector

作者在 SOI 上设计一款四通道 20nm 间隔的 EDG,顶层硅厚度 $H = 220\text{nm}$,具体设计参量如表 1 所示。其中入射波导和出射波导采用 130nm 浅刻蚀脊形波导,同时采用梯形波导将单模波导展宽至 $2\mu\text{m}$,以减小矩形波导与平板波导之间的模式失配,增加耦合效率。

Table 1 Design parameters of 4-channel EDG

λ_0	$\Delta\lambda$	N	θ_i	θ_d	m	d_{LD}	H
1301nm	20nm	4	42°	36°	10	250	220nm

2 刻蚀衍射光栅仿真

设计好 EDG 基本结构参量之后,需要对光在器件中的传输过程进行仿真计算,以检验所设计器件是否能够满足实际应用要求,同时也可以根据仿真结果对器件的结构和参量进行优化改进。对于 EDG 工作原理,按照光束的场传输过程,可以将仿真过程分为以下 4 步。

(1) 利用 2 维基尔霍夫标量衍射理论^[2]计算入射光传输到各光栅齿面上的光场分布,如下所示:

$$E_{inc}(P') = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n_{eff}}{\lambda}} \int_{input} E_{input}(y) \times \frac{e^{-jkr_i}}{\sqrt{r_i}} (1 + \cos\alpha) dy \quad (6)$$

式中, $E_{inc}(P')$ 是各光栅齿面中点处的光场能量, $k = 2\pi n_{eff}/\lambda$ 是平板传输区内的波数, E_{input} 是入射波导电场分布。

在低折射率对比的材料系统中,一般采用高斯光束场分布近似代替波导电场分布,此时(6)式可以利用解析方式求解。但在高折射率差对比的材料系统中(例如 SOI),这种高斯近似还不能满足设计的精度要求,主要是由于这类波导电场分布在边界处不连续性比较严重,高斯曲线不能准确表示出这种边界不连续性,而且波导外部的倏逝波衰减与高斯曲线的指数衰减差异较大,因此入射光场需要采用实际的场分布表示。并且 EDG 是一个偏振敏感器件,作者设计其仅工作在 TE 模式下,在此利用商业电磁仿真软件采用本征模展开法(eigenmode expansion, EME)计算入射波导在 TE 模式时的光传输特性,并得到入射端光场分布,进而提取出入射光场的 1 维电场分布,如图 4 所示。

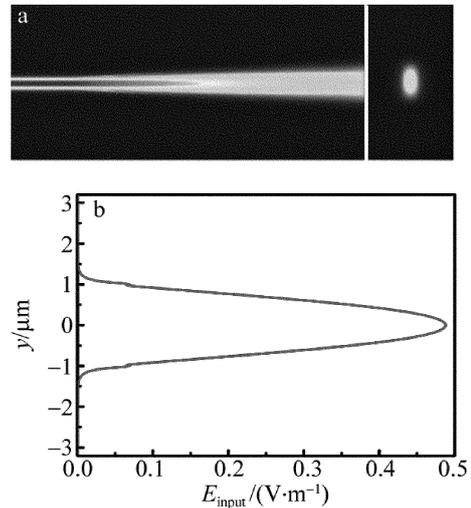


Fig. 4 Electric field intensity distribution of input ridge waveguide and 1-D diagram

仿真计算得到各光栅中点处的场分布如图 5a 所示。可以看到入射波导的衍射远场分布情况,由于是正入射,切点 P 处光强最大,两边逐渐减小,包络外侧有旁瓣。

(2) 仿真光场在闪耀光栅处发生衍射的过程,在此采用平面波近似法^[18]仿真,计算得到衍射后光栅面上电场分布为:

$$E_g'(x', z') = R'E_g(x', z') \quad (7)$$

式中, R' 为光栅反射率, E_g 为入射前光栅面上电场分布, E_g' 为衍射后光栅面上电场分布, x' 和 z' 对应的是各个衍射光栅面的坐标。

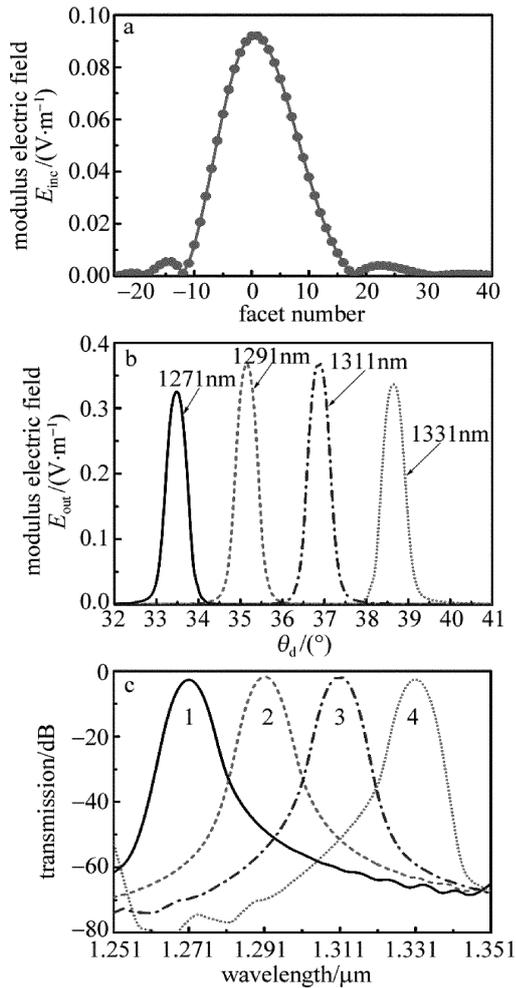


Fig. 5 a—incident electric field at the center point of each grating facet for $\lambda = 1.301 \mu m$ b—output electric field distribution on Rowland circle c—transmission spectrum of 4-channel EDG

(3) 仿真光场从衍射光栅到输出面在平板波导中传输的过程,在此仍然采用基尔霍夫标量衍射理论计算。位于罗兰圆上输出点 P'' 处的光场分布 E_{out} 等于所有光栅反射回的光场叠加总和。

$$E_{out}(P'') = \frac{\eta}{2} \sqrt{\frac{n_{eff}}{\lambda}} \sum \int_{-D/2}^{+D/2} E_{inc}(y') \times \frac{e^{-jk_r r_d}}{\sqrt{r_d}} (\cos\beta_i + \cos\beta_d) dy' \quad (8)$$

式中, β_i 和 β_d 是各点光场的入射角和反射角, D 是闪耀光栅宽度, η 是每个光栅面的反射系数,考虑到工艺偏差与传输损耗,仿真中取 $\eta = 0.8$ 。得到罗兰圆上光场分布如图 5b 所示。可以看到,4 个波长对应的光场按照角度均匀聚焦在罗兰圆上的输出波导位置。

(4) 仿真光场耦合进入输出波导的过程,进而得到器件传输光谱曲线,采用叠加积分来仿真计算:

$$I(\lambda) = \frac{\left| \int E_{out}(\lambda, y'') E_{output}^*(\lambda, y'') dy'' \right|^2}{\int |E_{output}(\lambda, y'')|^2 dy'' \cdot \int |E_{input}(\lambda, y)|^2 dy} \quad (9)$$

式中, I 表示归一化输出光场强度, E_{out} 表示衍射光在罗兰圆上相干叠加后的电场分布, E_{output} 表示出射波导电场分布, y'' 对应的是输出波导面的坐标,上标 * 表示共轭。

传输光谱仿真结果如图 5c 所示。该 EDG 的插入损耗约为 2dB,通道串扰小于 -45dB。其中插入损耗主要来源有闪耀光栅、布喇格反射光栅和输出耦合等。首先,由于光束进入自由传输区后会发生衍射发散,为了减小器件面积,闪耀光栅尺寸有限,导致两侧会有部分光能量损耗,如图 5a 所示,但其非常小可以忽略。其次,由于位置所限,布喇格反射光栅设计为 4 个光栅周期,反射效率约为 85%,这将引入部分能量损耗。最后,出射面上由于其它干涉级次的存在使得输出波导处聚焦光场有部分能量损耗。这些综合因素导致了整个器件的插入损耗。

3 刻蚀衍射光栅频谱平坦化设计

波分复用器在大容量、超高速波分复用系统中处于核心地位,器件的通道带宽是影响其大规模应用的重要指标之一。按照频谱响应形状可以将其分为高斯型和平坦型。对于高斯型,由于 1dB 带宽较小,外界因素(环境温度、中心波长和偏振态等漂移)将影响器件在实际系统中的应用。相比之下,频谱平坦型器件具有平坦的输出频谱特性,这可以提高系统的稳定性,增加传输距离和容量,降低系统工作成本。

对于实现 EDG 频谱平坦化的方法,主要可以通过以下 3 种结构优化设计实现:衍射光栅、输入波导和输出波导。对于衍射光栅和输入波导的优化,主要是改变了出射面的成像场分布,而输出波导的优化则是改变了输出波导的耦合特性,这些方法都可以通过设计器件的版图来实现。

以上 3 种方法中,改变输入波导的方法最容易实现,只需在特别小的区域内进行设计调整,而且具有较大的工艺容差。另外,级联不同输入结构时,设计参量可以具有更大的灵活性。考虑到工艺容差和性能方面的要求,作者选择改变输入波导结构对前面的 EDG 实现通道频谱平坦化设计,在入射波导端引入级联的梯形绝热波导和 MMI 结构。

本次优化设计中,取 MMI 长度为器件将一束光均分为两束光自映像所对应的长度,即 $L_{MMI} = 3L_{\pi}/8$,通过分别优化 MMI 输入波导宽度 W_1 、多模区宽度 W_{MMI} 和 EDG 输出波导宽度 W 。来实现频谱平坦化设计,如图 6a 所示。利用 EME 方法仿真 MMI 光传输特性,得到 MMI 输出场分布,如图 6b 所示。对于给定的多模区宽度,MMI 拍长随之确定,进而确定 L_{MMI} 参量,不同

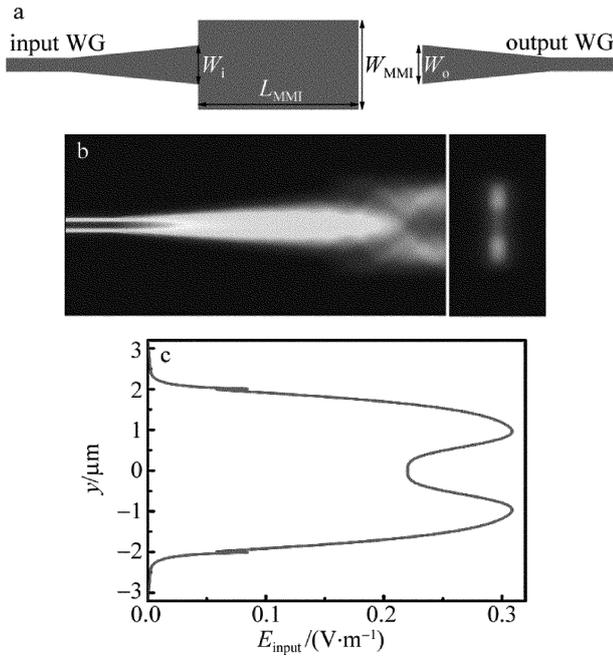


Fig. 6 a—EDG input/output waveguide based on MMI b—electric field intensity of input waveguide based on the cascaded taper and MMI c—1-D electric field intensity of end face

的 W_i 会影响频谱平坦化效果,这主要受 MMI 的自映像效应影响。此时,EDG 的最终结构随之确定,器件整体结构示意图如图 7 所示。包含 4 路不同波长的光信号由基于 MMI 结构的输入波导进入平板传输区,衍射传输到闪耀光栅面被布喇格光栅反射后聚焦于各个输出波导处,不同波长光信号由相应的输出波导输出,实现波分复用功能。

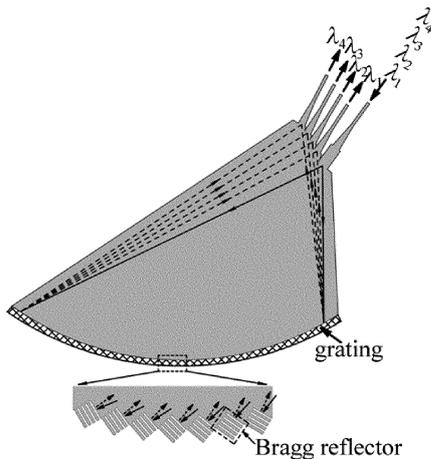


Fig. 7 EDG structure based on MMI and Bragg reflector

针对不同宽度的 MMI,通过优化输入输出波导参量得到其平坦化频谱输出,结果如图 8a 所示。可以看到,不同 W_{MMI} 对应不同的平坦化效果,性能差异主要表现在插入损耗和 1dB 带宽上,其中器件插入损耗与 1dB 带宽性能成负相关,因此器件参量的确定要在两者之间做折中考虑。通过最终参量优化,选择 $W_{MMI} = 4\mu\text{m}$, $W_i = 3\mu\text{m}$, $W_o = 2\mu\text{m}$ 作为器件频谱平坦化设计

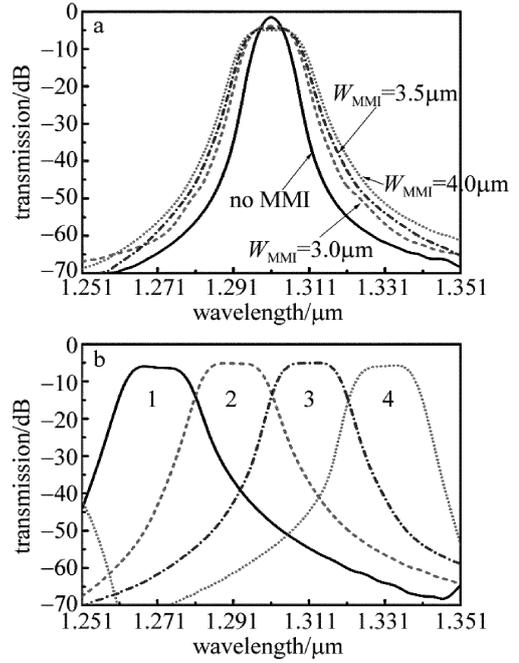


Fig. 8 a—flat-top spectral response with different W_{MMI} ($W_o = 2\mu\text{m}$) b—transmission spectrum of 4-channel flat-top EDG ($W_{MMI} = 4\mu\text{m}$, $W_i = 3\mu\text{m}$)

参量。仿真结果显示,中心通道 1dB 带宽大于 12nm,插入损耗约为 5dB,通道串扰约为 40dB。由于 MMI 具有色散特性,对于非中心通道,首先选择相应的通道波长仿真 MMI 输出场,再通过输出场计算相应通道传输光谱,结果如图 8b 所示。可以看到,器件整体频谱平坦化效果较好,但非中心通道光谱存在轻微倾斜,可以通过调整各通道输出波导参量进行改进。

EDG 的一大优势是自由传输区不受刻蚀工艺的影响,且输入输出波导具有较大的制作容差,因此工艺偏差仅会影响闪耀光栅的质量,本次仿真中的参量选取已充分考虑到布喇格光栅的工艺偏差。这为器件设计参量的可靠性提供了保障,可以保证器件的实际应用价值。

4 结 论

设计了一款用于稀疏波分复用系统中的刻蚀衍射光栅来实现波分复用/解复用功能。通过在闪耀光栅反射面引入布喇格反射光栅将光栅反射效率提高到 85%,减小器件插入损耗至 2dB;在入射波导处引入多模干涉器件实现了各通道平坦化频谱输出,1dB 带宽达到 12nm。这些为硅基片上刻蚀衍射光栅设计和优化提供了理论基础和设计指导。

参 考 文 献

[1] ZHANG B, SONG Sh H, WANG H J, *et al.* A novel micro-ring-based 4 × 4 non-blocking silicon optical router [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(6):731-735 (in Chinese).
 [2] BROUCKAERT J, BOGAERTS W, DUMON P, *et al.* Planar con-

- cave grating demultiplexer fabricated on a nanophotonic silicon-on-insulator platform [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(5): 1053-1060.
- [3] CHOWDHURY D. Design of low-loss and polarization-insensitive reflection grating-based planar demultiplexers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(2): 233-239.
- [4] FENG D, QIAN W, LIANG H, *et al.* Fabrication intensive echelle grating in silicon-on-insulator platform [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(5): 284-287.
- [5] ZOU J, JIANG X X, XIA X, *et al.* Ultra-compact birefringence-compensated arrayed waveguide grating triplexer based on silicon-on-insulator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(12): 1935-1940.
- [6] WANG J, SHENG Z, LI L, *et al.* Low-loss and low-crosstalk 8×8 silicon nanowire AWG routers fabricated with CMOS technology [J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9395-9403.
- [7] YE T, FU Y, QIAO L, *et al.* Low-crosstalk Si arrayed waveguide grating with parabolic tapers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 31899-31906.
- [8] ZHENG X Z, SHUBIN I, LI G L, *et al.* A tunable 1×4 silicon CMOS photonic wavelength multiplexer/demultiplexer for dense optical interconnects [J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 5151-5160.
- [9] FANG Q, PHANG Y T, TAN C W, *et al.* Multi-channel silicon photonic receiver based on ring-resonators [J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13510-13515.
- [10] HORST F, GREEN W M J, ASSEFA S, *et al.* Cascaded Mach-Zehnder wavelength filters in silicon photonics for low loss and flat pass-band WDM (de-) multiplexing [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 11652-11658.
- [11] JEONG S, TANAKA S, AKIYAMA T, *et al.* Flat-topped and low loss silicon-nanowire-type optical MUX/DeMUX employing multi-stage microring resonator assisted delayed Mach-Zehnder interferometers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 26000-26011.
- [12] AN J M, ZHANG J S, WANG Y, *et al.* Study on wavelength division multiplexer for silicon photonics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 110006 (in Chinese).
- [13] DENOYER G, COLE C, SANTIPO A, *et al.* Hybrid silicon photonic circuits and transceiver for 50Gb/s NRZ transmission over single-mode fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(6): 1247-1254.
- [14] TORRES-FERRERA P, PACHECO-RAMÍREZ L, GUTIÉRREZ-CASTREJÓN R, *et al.* Next-generation 400Gb/s ethernet PMD over SMF at 1310nm via DD-OFDM with electro-absorption modulator-based transmitters [C]//2015 7th IEEE Latin-American Conference on Communications. New York, USA: IEEE, 2015:1-6.
- [15] STRESHINSKY M, DING R, LIU Y, *et al.* Low power 50Gb/s silicon traveling wave Mach-Zehnder modulator near 1300nm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30350-30357.
- [16] SHENG Z Y, HE S L, HE J J. 1-Stigma and 2-stigma method for the design of etched diffraction grating [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, 12(7): 671-674 (in Chinese).
- [17] BROUCKAERT J, BOGAERTS W, SELVARAJA S, *et al.* Planar concave grating demultiplexer with high reflective Bragg reflector facets [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(4): 309-311.
- [18] SHENG Zh Y, HE S L, HE J J. Simulation for etching diffraction grating by use of scalar diffraction theory [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, 28(6): 29-32 (in Chinese).