

## 激光与光电子学进展

## 基于栅型光波导的自由空间光耦合性能研究

吴鹏飞\*, 刘涵颖, 雷思琛

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

**摘要** 针对大气湍流信道中空间光耦合效率低、对准难度大的问题,提出一种将湍流信号光束通过光栅结构耦合进光波导的研究方案,在修正的 Von Karman 湍流谱模型下,分析大气湍流对空间光与栅型光波导耦合参数的影响,通过优化光栅结构参数,设计高效空间光耦合波导芯片。此外,引入三组 Si/SiO<sub>2</sub> 反射镜结构,减少向下耦合损耗,进一步提高光栅耦合效率。仿真结果表明,对于受大气湍流影响的空间光,当光栅周期为 660 nm,刻蚀深度为 100 nm,下包层厚度为 1.45 μm 时,该入射光栅耦合器在 1550 nm 波长处的耦合效率为 74% (无反射镜时,耦合效率为 50.5%),实现了大气湍流环境中空间光的高效耦合,对提升通信效率和自由空间光通信领域的光电集成化具有重要的意义。

**关键词** 空间光耦合; 大气湍流; 波导光栅耦合器; 耦合效率

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223238

## Optical Coupling Performance in Free Space Based on Grating-Type Optical Waveguide

Wu Pengfei\*, Liu Hanying, Lei Sichen

School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,  
Xi'an 710048, Shaanxi, China

**Abstract** Spatial optical couplings in atmospheric turbulence channels are associated with low efficiencies and difficult alignments, hence, in this study, a research scheme for coupling a turbulent signal beam into optical waveguides through a grating was proposed and the influence of atmospheric turbulence on spatial light and optical waveguide coupling parameters was analyzed. Moreover, a highly efficient spatial optical coupling waveguide chip was designed by optimizing the structural parameters of the grating. Additionally, three sets of Si/SiO<sub>2</sub> mirrors were introduced to reduce the downward coupling loss and further improve the grating coupling efficiency. Simulation results show that for the spatial light affected by atmospheric turbulence, the coupling efficiency of the incident grating coupler at 1550 nm was 74% (50.5%, without adding the mirrors) when the grating period, etching depth, and lower cladding thickness were 660 nm, 100 nm, and 1.45 μm, respectively, indicating the efficient coupling of spatial light in the atmospheric turbulent channels. The findings of this study will be of great significance in improving the communication efficiency and photoelectric integration in the field of free-space optical communication.

**Key words** spatial optical coupling; atmospheric turbulence; waveguide grating coupler; coupling efficiency

## 1 引言

大气湍流是大气中局部温度、压强等参数随机变化形成的一种复杂的不规则运动,当光束在大气信道中传输时,大气折射率随机变化,光波的振幅与相位随机起伏,引起光束波前畸变、光斑闪烁,导致接收端的光信号能量损失,严重影响空间光通信效率<sup>[1-3]</sup>。目前,在

自由空间光通信系统中,常采用自适应光学技术(AO)对湍流效应所造成的波前畸变进行校正,将空间光直接耦合进单模光纤中,从而改善光束传输质量,但该方案普遍存在模场失配与耦合效率较低的问题<sup>[4-5]</sup>。

近年来,以光子为信息载体的集成光学得到快速发展,光波导是集成光学重要的组成部分<sup>[6]</sup>,利用光波导可以将光耦合、光传输等器件连接在一起,实现大规

收稿日期: 2022-11-05; 修回日期: 2022-12-12; 录用日期: 2022-12-23; 网络首发日期: 2023-01-05

基金项目: 陕西省科技成果转化与推广计划项目(2020CGXNG-041)、陕西省教育厅服务地方专项计划项目(20JC027)、快速扶持项目(61404140520)、西安市高校院所科技人员服务企业项目(22GXFW0074)

通信作者: \*wupengf@xaut.edu.cn

模的集成。但波导器件与光纤介质之间存在模场失配,解决模场失配问题使用较多的方法有端面直接耦合、波导光栅耦合等<sup>[7-8]</sup>。端面耦合对准难度较大,对光刻技术的精度要求极高,并且只能制作在波导边缘,无法实现其他位置光耦合<sup>[9]</sup>。光栅耦合器<sup>[10-11]</sup>被刻蚀在光波导上,具有有效接收面积大、对准容差大、可进行片上测试等优点,已经成为解决光纤与波导耦合模场失配问题最主要的方案之一<sup>[12]</sup>。

本文针对大气湍流信道中空间光耦合效率低的问题,分析光束在大气湍流中的传输特性,通过设计与优化光栅波导结构,研究湍流信道下空间光到栅型光波导器件的高效耦合。其中,栅型光波导器件基于绝缘体上硅(SOI)材料<sup>[13]</sup>,该材料与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺之间具有优异的兼容性,有助于器件的规模化生产<sup>[14-15]</sup>。此外,在波导中设计 Si/SiO<sub>2</sub> 反射镜结构,使透射到衬底中的光反射回光栅,提高空间光与光栅器件的耦合效率。

## 2 基本原理

### 2.1 光束在大气湍流中传输的理论分析

在自由空间中,发射源平面处的低阶高斯波束模型可表示为

$$U_0(r, 0) = \exp\left(-\frac{r^2}{W_0^2} - i\frac{kr^2}{2F_0}\right), \quad (1)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$  是波长为  $\lambda$  的空间波数; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ;  $F_0$  和  $W_0$  分别为发射平面高斯光束的曲率半径和束腰半径<sup>[16]</sup>。

当光束从  $z = 0$  传播且方向沿  $z$  轴正向时,在自由空间中传输到  $L$  处的光场分布为

$$U_0(r, L) = \frac{1}{p(L)} \exp(ikL) \exp\left(-\frac{r^2}{W^2} - i\frac{kr^2}{2F}\right), \quad (2)$$

式中: $F$  和  $W$  分别为接收平面光束的曲率半径和束腰半径。

$$p(L) = 1 - \frac{L}{F_0} + i\frac{2L}{kW_0^2}. \quad (3)$$

光束经过大气传输后,接收面上的光强分布是随机的,根据弱起伏条件下的 Rytov 近似<sup>[17-18]</sup>,求得高斯

光束经过大气湍流传输到达  $L$  处时,其截面上的平均光场分布为

$$\langle U(r, L) \rangle = U_0(r, L) \exp[E_1(0, 0)], \quad (4)$$

式中: $E_1(0, 0)$  为基础的统计矩。其可表示为

$$E_1(0, 0) = -2\pi^2 k^2 L \int_0^\infty \kappa \Phi_n(\kappa) d\kappa. \quad (5)$$

为了模拟最真实的湍流状况,采用修正的 Von Karman 湍流谱模型<sup>[19]</sup>描述湍流引起的折射率随机变化的分布

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033 C_n^2 \frac{\exp(-\kappa^2/\kappa_m^2)}{(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{11/6}}, \quad 0 < \kappa < \infty, \quad (6)$$

式中: $C_n^2$  为大气湍流结构常数; $\kappa_0 = 2\pi/L_0$ ;  $\kappa_m = 5.92/l_0$ ;  $L_0$  和  $l_0$  分别为湍流外尺度与内尺度。

将式(2)、(5)代入式(4)中,得到平均光场表达式为

$$\langle U(r, L) \rangle = \left(1 + \frac{L}{F} - i\frac{2L}{kW^2}\right) \exp\left(ikL - \frac{r^2}{W^2} - i\frac{kr^2}{2F} - 0.39C_n^2 k^2 L k_0^{-5/3}\right). \quad (7)$$

通常采用空间光-光纤耦合结构<sup>[20]</sup>,利用光学系统对入射光场进行校正,使入射光场与光纤端面模场匹配,但是其耦合效率低是普遍存在的问题。本文提出一种将湍流信号光束通过光栅结构耦合进光波导的研究方案用于提高耦合效率,通过对栅型光波导器件进行理论分析,针对刻蚀比例等参数进行优化,设计出提高空间光耦合性能的高效耦合器件。

### 2.2 光栅耦合器结构设计

图 1 为一种在下包层加入分布式布拉格反射镜(DBR)的入射光栅耦合器<sup>[21]</sup>,采用集成光学中常规的 SOI 结构,其中 Si 材料的折射率为 3.476, SiO<sub>2</sub> 的折射率为 1.444。图 1(b)为三维结构的  $x$ - $y$  截面图,其中顶硅层  $H$  厚度为 220 nm,沿硅波导中光传输方向刻蚀出深度为  $h$ 、宽度为  $w$ 、周期长度为  $T$  的光栅结构,定义占空比  $d$  为一个周期中凸出部分宽度占一个周期长度的比值,此外,在光栅波导上表面添加上包层(TOX)结构,对光场产生束缚作用(图 1 中未画出),上包层通常采用二氧化硅材料,本结构上包层为 0.37  $\mu\text{m}$ 。优化后光栅的总长度为 8  $\mu\text{m}$ ,入射光偏离垂直方向角度为

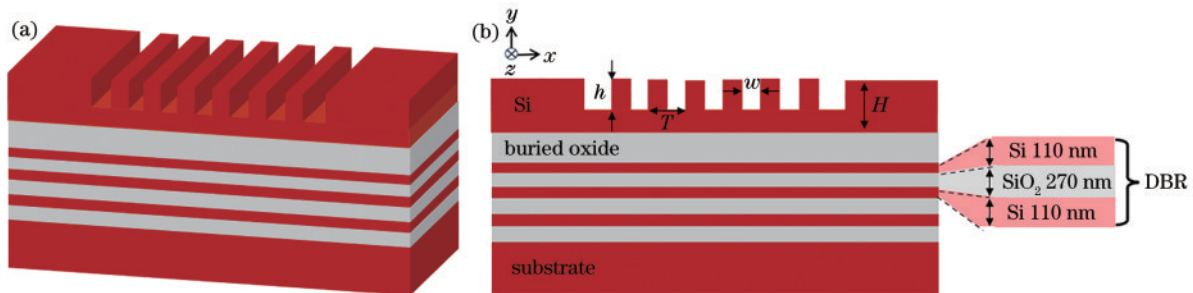


图 1 光栅耦合器示意图。(a) 三维结构图;(b)  $x$ - $y$  截面图

Fig. 1 Schematic diagram of grating coupler. (a) Diagram of three-dimensional structure; (b) diagram of  $x$ - $y$  cross section

$\theta$ , 到达光栅表面后发生衍射, 采用 TM 模式的偏振入射光, 其中心波长为 1550 nm。

波导光栅耦合器的结构设计基于布拉格衍射原理<sup>[22-23]</sup>, 即数值描述入射光波矢量和衍射光波矢量之间的关系。对于图 1 所示的入射光栅耦合器, 其  $m$  阶衍射的布拉格方程可以表示为

$$n_{\text{eff}} + m \frac{\lambda}{T} = n_1 \sin \theta, \quad (8)$$

式中:  $n_{\text{eff}}$  为光栅的有效折射率;  $n_1$  为上包层介质的折射率。

耦合效率是设计光栅耦合器的主要性能指标, 它表示为被耦合进波导的光功率与耦合前光束总功率的比值, 主要取决于如下关系式

$$E_{\text{CE}} = (1 - R)\eta D, \quad (9)$$

式中:  $R$  为光进入光栅结构时在  $x$  方向产生的部分反射分量; 光场匹配因子  $\eta$  指光源光场与光栅衍射模场二者光场的重叠积分; 由于存在衍射衬底分量, 方向性参数  $D$  定义为耦合进光栅的光功率与总的耦合进光栅耦合器的光功率的比值。耦合效率与光源、光栅波导的多个参数有关, 其中主要包括光栅周期、刻蚀深度与宽度、下包层二氧化硅厚度等。

光束在垂直耦合的过程中部分光透射到衬底中, 造成能量损耗, 为了抑制这种不利的影 响, 在二氧化硅下包层中引入反射镜, 对衍射至衬底方向的光进行反射, 进而提高耦合效率。考虑到材料的统一性, 这里选择加入三组由硅和二氧化硅以 ABAB 的方式交替排列组成的周期性结构, 看作是一组 DBR 反射镜, 常用四分之一反射镜, 即每一层的厚度都对应中心波长的四分之一, 选取的 DBR 参数如下: 硅层厚度为 110 nm, 二氧化硅层厚度为 270 nm。所设计的带有分布式布拉格反射镜的入射光栅耦合器参数如表 1 所示。

表 1 带有分布式布拉格反射镜的入射光栅耦合器结构参数  
Table 1 Structural parameters of the incident grating coupler with distributed Bragg mirrors

Parameter	Value
Wavelength $\lambda$ / nm	1550
Top Si layer thickness / nm	220
TOX thickness / $\mu\text{m}$	0.37
BOX thickness / $\mu\text{m}$	1.45
Pitch $T$ / nm	660
Duty cycle $d$	0.44
Etch depth $h$ / nm	100
Grating length / $\mu\text{m}$	8
Angle of source $\theta$ / ( $^\circ$ )	-13.5
Si thickness of the DBR / nm	110
SiO <sub>2</sub> thickness of the DBR / nm	270

利用时域有限差分方法(FDTD)对光栅耦合器进行仿真计算<sup>[24]</sup>, 为了更接近现实中的无限边界, 采用完美匹配层(PML)边界<sup>[25]</sup>, 使入射波在边界处避免反射造成的干扰进而全部被吸收。

### 3 湍流信道中空间光与波导光栅耦合性能分析

当不存在大气湍流时, 高斯光束在自由空间中传输的光强分布如图 2(a)所示, 其束腰半径  $\omega_1 = 5 \mu\text{m}$ , 波长  $\lambda_1 = 1550 \text{ nm}$ 。基于高斯光束经过大气湍流传输的平均光场模型, 考虑湍流参数对光束的影响, 仿真参数设置如下: 传输距离  $L = 8000 \text{ m}$ , 曲率半径  $F_0 = 2 \times 10^5 \text{ m}$  (接近准直光束), 湍流外尺度  $L_0 = 1 \text{ m}$ , 大气湍流结构常数  $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 。模拟出在中强湍流下传输的空间光强分布如图 2(b)所示, 可以看出, 当传输过程中存在大气湍流时, 光束仍具有高斯分布的特点。

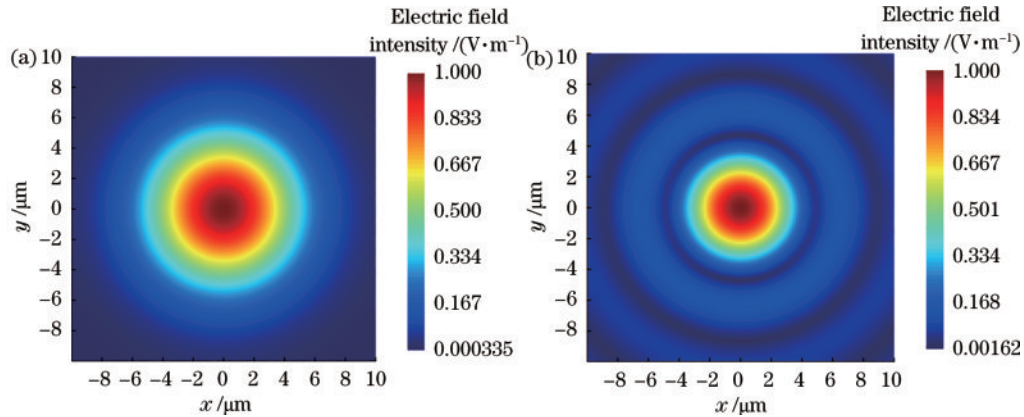


图 2 光强分布。(a)自由空间中;(b)大气湍流中

Fig. 2 Light distribution. (a) In the free space; (b) in atmospheric turbulence

#### 3.1 光栅参数对耦合效率的影响

以湍流影响的空间光作为波导的输入激励源, 讨论光栅周期  $T$  的变化对耦合性能的影响, 这里将光栅

刻蚀深度  $h$  与占空比  $d$  分别固定为 100 nm 和 0.44, 耦合角度  $\theta$  固定为  $-13.5^\circ$ 。令光栅周期从 640 nm 变化至 680 nm, 以 10 nm 为步长逐渐递增, 分析 1500~



1600 nm 波长下不同光栅周期对整体耦合效率的影响,得到的耦合效率曲线如图 3 所示,从图中可以看出,光栅周期的改变对耦合效率峰值波长影响较大,并且随着周期的增大,耦合效率曲线的中心波长向长波长移动,其中光栅周期为 660 nm 时,在 1550 nm 处的耦合效率最大。

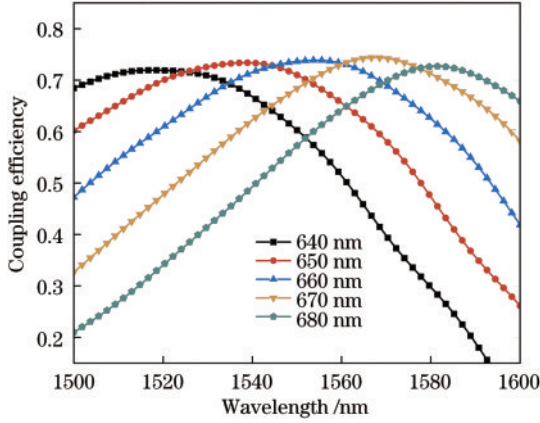


图 3 光栅周期对耦合效率的影响

Fig. 3 Effect of grating period on coupling efficiency

波导光栅的有效折射率与刻蚀深度有关:较浅的刻蚀导致波导耦合强度较弱,大部分光无法耦合进光栅;较深的刻蚀虽然能提高有效折射率,但同时会增大光栅反射率,降低耦合效率,因此需要对刻蚀深度进行优化。基于前面的计算结果,选取光栅周期为 660 nm,分别计算刻蚀深度从 80 nm 变化至 120 nm 时,1500~1600 nm 波长下的耦合效率曲线,如图 4 所示,当浅刻蚀时,刻蚀与未刻蚀部分有效折射率差较小,随着刻蚀深度增加,光栅耦合能力增大,当刻蚀深度为 100 nm 时,1550 nm 波长下的耦合效率最大,接着刻蚀深度继续增加,布拉格反射增强,耦合效率降低。

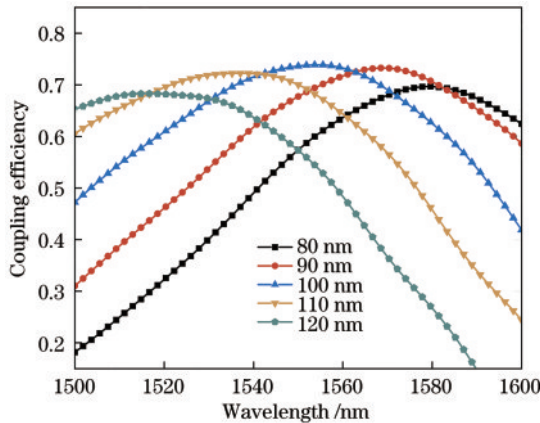


图 4 刻蚀深度对耦合效率的影响

Fig. 4 Effect of etching depth on coupling efficiency

当光以近似垂直的角度入射到光栅界面时,一部分光透射进入光栅波导,另一部分光透射进入下包层,在下包层与衬底之间的界面来回反射,之后又重新回

到光栅波导中,与原有的衍射光进行相互干涉,根据干涉原理,当两束光满足相干叠加条件时,光场增强,器件耦合效率提高。因此,在下包层中设计反射镜结构不仅可以使光波尽可能地发生反射,还可以通过控制反射镜与光栅波导层的距离,保证透射回光栅波导中的光与波导中原有的光满足相干条件,从而有效地提高光栅耦合效率。这里将光栅周期固定为 660 nm,下包层厚度从 1  $\mu\text{m}$  变化至 3  $\mu\text{m}$ ,仿真得到耦合效率曲线如图 5 所示,可以看出下包层厚度对耦合效率影响较大,大致呈现出周期性的关系,考虑到器件尺寸增大带来的能量损耗,选择 1.45  $\mu\text{m}$  为最佳厚度。

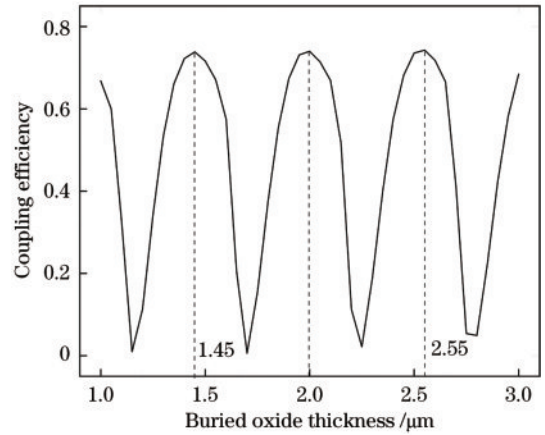


图 5 下包层厚度对耦合效率的影响

Fig. 5 Effect of buried oxide thickness on coupling efficiency

### 3.2 光场特性分析

根据优化后的结构参数可知,1550 nm 波长下无 DBR 反射镜和有 DBR 反射镜的电场分布如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,当无 DBR 反射镜时,受大气湍流影响的空间光与栅型光波导耦合后,部分光向下透射泄漏进衬底中。从图 7 的仿真结果可知,在该情况下当入射光束的中心波长为 1550 nm 时,耦合效率为

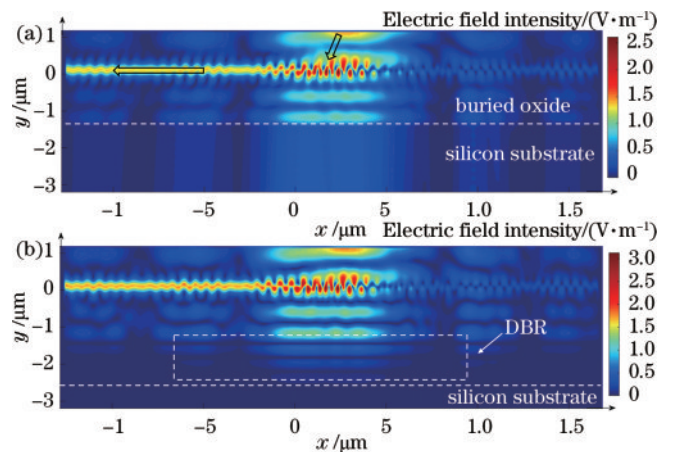


图 6 1550 nm 波长下光栅耦合器的电场分布。(a)无 DBR 反射镜;(b)有 DBR 反射镜。

Fig. 6 Electric field distribution of the grating coupler at 1550 nm. (a) Without DBR mirror; (b) with DBR mirror

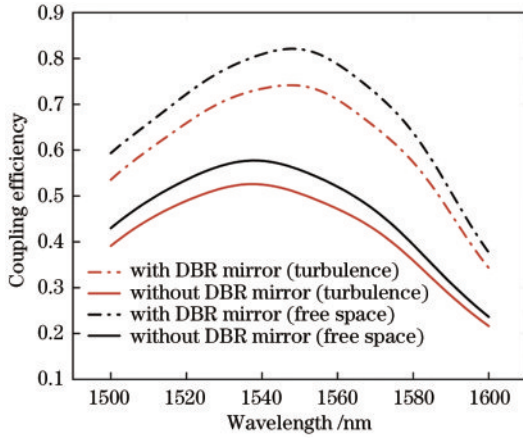


图 7 不同波长下无 DBR 反射镜与有 DBR 反射镜光栅耦合效率对比

Fig. 7 Comparison of grating coupling efficiency between without DBR mirror and with DBR mirror at different wavelengths

50.5%，相比自由空间中高斯光束与栅型光波导耦合效率降低 5.2%，这是由于光束在大气湍流中远距离传输时，受到湍流信道中温度、压强等特性影响，引起大气折射率随机变化，使得通信光信号的相位、振幅等随机变化，进而影响耦合效率。

为进一步提高耦合效率，必须减少向下耦合损耗。添加 DBR 反射镜后，如图 6(b) 所示，绝大部分受湍流

影响的空间光被耦合进栅型光波导中，并且向下透射的光被反射镜向上反射，重新耦合进光栅波导中，进一步提高耦合效率，图 7 的仿真结果表明，在该情况下入射光束的中心波长为 1550 nm 时，耦合效率为 74%。自由空间中高斯光束与栅型光波导耦合效率为 82%。

### 3.3 制备容差分析

栅型光波导器件尺寸在微米量级，在生产制备过程中存在一定工艺误差，因此实际制作出的器件与所设计的有一定差距。对于光栅耦合器，周期长度可以在实际制备中得到保证，而刻蚀宽度与刻蚀深度的尺寸不能精准控制，可能会出现误差。下面对制备过程中影响耦合性能的参数进行容错分析。

图 8(a) 为刻蚀宽度与耦合效率的关系图，可以看出刻蚀宽度对耦合性能影响较大，当刻蚀宽度在 330~390 nm 之间时，耦合效率维持在 70% 以上。图 8(b) 所示为刻蚀深度与耦合效率的关系图，相比于刻蚀宽度，刻蚀深度对光栅耦合性能的影响更大，因此，在实际制备中要尽可能减小刻蚀深度偏差。图 8(c) 为入射光源倾斜角度与耦合效率的关系图，可以发现当倾斜角度的范围在  $-15^{\circ} \sim -11.5^{\circ}$  时，耦合效率均可达到 70% 以上，在实际测试过程中，通常利用调节耦合角度来补偿刻蚀宽度与刻蚀深度带来的工艺误差。

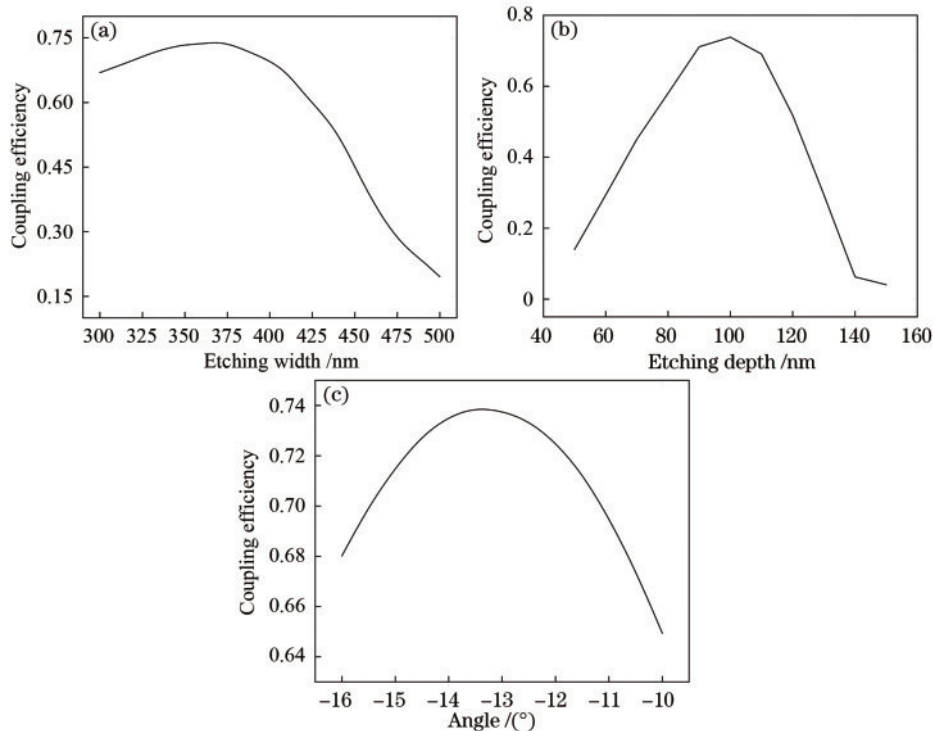


图 8 工艺容差分析。(a) 刻蚀宽度对耦合效率的影响；(b) 刻蚀深度对耦合效率的影响；(c) 倾斜角度对耦合效率的影响

Fig. 8 Process tolerance analysis. (a) Effect of etching width on coupling efficiency; (b) effect of etching depth on coupling efficiency; (c) effect of tilt angle on coupling efficiency

## 4 结 论

基于修正的 Von Karman 湍流谱模型，本文提出一

种用于大气湍流信道下的空间光与波导之间耦合的光栅结构。利用 FDTD 数值计算方法分析大气湍流对空间光与光波导耦合参数的影响，通过优化周期长度、刻

蚀深度、下包层厚度等参数和添加 DBR 反射镜的方式让尽可能多的空间光耦合进栅型光波导中,进而提高耦合效率。仿真结果表明,光栅周期的改变对耦合效率峰值波长影响较大,下包层厚度与耦合效率之间大致呈现出周期性的关系,同时,优化所得器件在没有反射镜的情况下,耦合效率为 50.5%,通过引入反射镜,该器件在波长为 1550 nm 处的耦合效率提高到 74%,有效解决了大气湍流信道中空间光耦合效率低、对准难度大的问题。最后,对影响光栅耦合性能的参数进行容错分析,当刻蚀宽度在 330~390 nm 之间,光源耦合角度在  $-15^{\circ}$ ~ $-11.5^{\circ}$  时,所设计的耦合器的耦合效率维持在 70% 以上,具备良好的工艺误差容限,对提高随机介质中自由空间光耦合性能具有重要理论指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] Wen L H, Yang P, Shuai W, et al. A high-speed model-based approach for wavefront sensorless adaptive optics systems[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 99: 124-132.
- [2] Li X P, Chen K X, Hu Z F. Low-loss bent channel waveguides in lithium niobate thin film by proton exchange and dry etching[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(5): 1322-1327.
- [3] Takenaka H, Toyoshima M, Takayama Y. Experimental verification of fiber-coupling efficiency for satellite-to-ground atmospheric laser downlinks[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15301-15308.
- [4] Weinert C M, Hiegemann S, Perlot N, et al. Taper device for the tolerant coupling of free-space optical beams into single-mode fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(18): 1843-1846.
- [5] Toyoshima M, Jono T, Nakagawa K, et al. Optimum divergence angle of a Gaussian beam wave in the presence of random jitter in free-space laser communication systems [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, 19(3): 567-571.
- [6] Marchetti R, Lacava C, Carroll L, et al. Coupling strategies for silicon photonics-integrated chips[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(2): 201-239.
- [7] 胡娟, 林欢, 汪维军, 等. 硅光子模斑转换器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 030003.  
Hu J, Lin H, Wang W J, et al. Research progress of silicon photonic mode size converters[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 030003.
- [8] Snyder B, Lepage G, Balakrishnan S, et al. Ultra-broadband, polarization-insensitive SMF-28 fiber edge couplers for silicon photonics[C]//2017 IEEE CPMT Symposium Japan, November 20-22, 2017, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2017: 55-58.
- [9] Bakir B B, de Gyves A V, Orobtcouk R, et al. Low-loss (<1 dB) and polarization-insensitive edge fiber couplers fabricated on 200-mm silicon-on-insulator wafers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(11): 739-741.
- [10] 赵然, 孙崇磊, 徐晓, 等. 基于亚波长光栅的高集成度垂直光耦合器[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1405002.
- Zhao R, Sun C L, Xu X, et al. Ultra-compact vertical optical coupler based on a subwavelength grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1405002.
- [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] 陈毅腾, 邱吉芳, 董振理, 等. 基于逆设计的新型垂直耦合器[J]. *光学学报*, 2021, 41(17): 1713001.  
Chen Y T, Qiu J F, Dong Z L, et al. Inverse design and demonstration of vertical couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(17): 1713001.
- [13] Li Q, Qiu M. Structurally-tolerant vertical directional coupling between metal-insulator-metal plasmonic waveguide and silicon dielectric waveguide[J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 15531-15543.
- [14] Bogaerts W, Baets R, Dumon P, et al. Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(1): 401-412.
- [15] Mekis A, Gloeckner S, Masini G, et al. A grating-coupler-enabled CMOS photonic platform[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(3): 597-608.
- [16] Wang T, Pu J X, Chen Z Y, et al. Beam-spreading and topological charge of vortex beams propagating in a turbulent atmosphere[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(7): 1255-1259.
- [17] Wang W J, Wu Z S, Shang Q C, et al. The propagation of Bessel Gaussian beams through non-Kolmogorov turbulence based on the Rytov theory[J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 21712-21724.
- [18] Andrews L C, Phillips R L. *Laser beam propagation through random media*[M]. Bellingham: SPIE, 2005.
- [19] Cheng W, Haus J W, Zhan Q W. The propagation of scalar and vector vortex beams through a turbulent atmosphere[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7200: 720004.
- [20] Hottinger P, Harris R J, Dietrich P I, et al. Micro-lens arrays as a tip-tilt sensors for single -mode fiber coupling [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10706: 1070629.
- [21] Zaoui W S, Kunze A, Vogel W, et al. CMOS-compatible polarisation splitting grating couplers with a backside metal mirror[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(14): 1395-1397.
- [22] Michaels A, Yablonovitch E. Inverse design of near-unity efficiency perfectly vertical grating couplers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4766-4779.
- [23] Zou J H, Yu Y, Ye M Y, et al. Short and efficient mode-size converter designed by segmented-stepwise method [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6273-6276.
- [24] Ding Y H, Peucheret C, Out H Y, et al. Fully etched apodized grating coupler on the SOI platform with-0.58 dB coupling efficiency[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(18): 5348-5350.
- [25] Wang X F, Yu H, Zhang Q, et al. Ultra-compact silicon mode (de)multiplexer based on directional couplers with subwavelength sidewall corrugations[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(9): 2198-2201.