

激光与光电子学进展

基于亚波长线光栅的垂直光栅耦合器的设计

刘萌*, 郑焯, 刘文斐, 李娟

齐鲁师范学院物理与电子工程学院, 山东 济南 250200

摘要 为了增强光子芯片与光纤耦合光路设计的灵活性,提高耦合效率,以布拉格条件为基础,设计了一种基于亚波长线光栅的高效垂直光栅耦合器。采用时域有限差分(FDTD)方法建立了光栅耦合器的二维结构模型,系统研究了亚波长线光栅的结构参数对光栅耦合器耦合效率的影响,分析了线光栅的周期、半径、光栅耦合器的上包层及下包层厚度等参数影响耦合效率的物理机制,并对结构进行了优化。结果表明,对于 1550 nm 波长的 TE 偏振入射光,当线光栅周期为 580 nm,半径为 130 nm,下包层厚度为 2500 nm,上包层厚度为 1400 nm 时,可以获得超过 91% 的垂直耦合效率。提出的亚波长线光栅垂直光栅耦合器耦合效率高、结构简单、易于制备,可以为光栅耦合器的设计提供理论指导和参考。

关键词 光栅; 亚波长结构; 垂直光栅耦合器; 耦合效率

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1705002

Design of Vertical Grating Coupler Based on Sub-Wavelength Line Gratings

Liu Meng*, Zheng Xuan, Liu Wenfei, Li Juan

College of Physics and Electronics Engineering, Qilu Normal University, Jinan, Shandong 250200, China

Abstract To enhance the flexibility in the optical path design of the photon chip and the optical fiber coupling and to improve the coupling efficiency, a kind of efficient vertical grating coupler based on the subwavelength line grating is designed on the premise of the Bragg condition. Finite difference time domain (FDTD) method is adopted to establish the two-dimensional structure model of the grating coupler. The effect of the structure parameters on the coupling efficiency of the subwavelength line grating coupler is systematically investigated, the physical mechanism of the line grating period, the radius and the cladding thickness influencing the coupling efficiency is analyzed, and the structure is optimized. The results show that for TE polarized incident light at 1550 nm, the coupling efficiency of over 91% can be achieved when the line grating has a period of 580 nm, a radius of 130 nm, a lower cladding thickness of 2500 nm, and an upper cladding thickness of 1400 nm. The vertical grating couplers with subwavelength line grating proposed in this paper have high coupling efficiency and simple structure, and are easily prepared, which can provide theoretical guidance and reference for the design of the grating couplers.

Key words gratings; subwavelength structures; vertical grating coupler; coupling efficiency

OCIS codes 050.2770; 050.6624; 060.1810

收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-01-22; 录用日期: 2021-01-27

基金项目: 山东省高等学校科技计划项目(J17KA054)

通信作者: *liumeng35@qlnu.edu.cn

1 引言

近年来,快速发展的光通信、光互连和光探测等新兴信息技术对大规模硅光子集成提出了更高的要求^[1-2]。绝缘体上硅(SOI)由于具有较大的折射率差,对光的束缚能力强,与当前的CMOS工艺兼容等优势被认为是实现片上光互联的理想材料。当前,很多种高性能的光子器件已经在SOI上得以实现^[3-4]。然而,光子器件与光纤的高效耦合问题却是一个长期具有挑战性的课题^[5-7]。

光栅耦合器作为一种由不同材料组成的周期性结构,基于波导光栅衍射效应可以实现光能量在波导和自由空间中的相互耦合^[8]。亚波长光栅^[9]是一种通过调整光栅的几何尺寸来设计波导芯层等效折射率的波导结构,进而调整截面上的光场模式分布,提高光波导与光纤之间的模式匹配程度,达到提高耦合效率的目的^[10]。当前,亚波长光栅耦合器主要采用矩形光栅来实现;然而,这类光栅为了降低二阶反射通常需要使光纤与光栅表面法线保持一定的夹角($8^{\circ}\sim 12^{\circ}$),这给器件的封装造成了一定的困难,阻碍了器件的大规模集成,限制了器件的实际应用^[11-12]。因此,当前对垂直耦合光栅的研究就显得更为迫切。垂直光栅耦合器可以制作在位于光电集成芯片平面上的I/O端口,从而增强了光路设计的灵活性,提高了芯片的集成度^[13]。但是仍然存在着耦合效率低,对入射光的波长及偏振敏感性高等问题^[7]。近年来,非对称光栅由于可以打破耦合对称条件进而实现相对较高的耦合效率,受到了越来越多的关注^[14]。华中科技大学的Feng等^[15]设计了一种基于二元闪耀光栅的双层偏振分束耦合器,该耦合器对1550 nm的TE波和TM波的耦合效率分别为58%和50%,得到了比较好的偏振分束耦合效果,但是这种双层二元闪耀结构的耦合器,制备起来非常复杂,并且耦合效率仍然比较低。刘全等^[16]采用全息光刻-离子束刻蚀法制作了一种高衍射效率的凸面闪耀光栅,在整个可见-近红外波段,所制作光栅的一级衍射效率大于40%,在闪耀波长处一级衍射效率大于75%,但加工工艺难度大,昂贵而且耗时。英国Ghent大学的van Laere等^[13]提出了一种倾斜光栅耦合器得到了最大为59%的垂直耦合效率,但制备非常困难。国防科技大学的Zhou等^[17]提出了一种阶梯型光栅耦合器以代替倾斜光栅来实现高效率垂直耦合,对波

长为1565 nm的TE波和TM波的耦合效率分别为49.9%和49.5%,然而耦合器在制作过程中需要进行多次套刻,因此制备过程非常复杂。

为了实现光子芯片与光纤之间的高效垂直耦合,本文提出了一种结构简单、易于制备的基于亚波长线光栅的光栅耦合器,通过分析耦合效率随光栅耦合器的结构参数变化的规律,研究了影响耦合效率的因素和物理机制,并对光栅耦合器的结构参数进行了优化,实现了对1550 nm入射光的高效耦合。

2 仿真模型和计算方法

仿真中采用的亚波长线光栅耦合器的结构如图1所示,综合考虑仿真计算的精度和计算机硬件条件的限制,建立了亚波长线光栅耦合器的二维结构模型来完成仿真,模型水平方向的宽度为 $10\ \mu\text{m}$,SOI基片顶层硅厚度为220 nm。入射光采用1550 nm的TE偏振波,从波导左端激发,对应此波长的Si材料的折射率设为3.476, SiO_2 包层的折射率设为1.444,空气的折射率设为1^[18]。为避免光波在仿真边界上的反射影响仿真结果的准确性,在仿真区域的四周及顶部设置了完美匹配层(PML)以有效吸收入射的光能量^[19]。同时,对于光栅耦合器,通常需要在下包层(BOX)与衬底的交界面插入金或铝作为反射镜,以提高反射界面的反射率,进而增大光栅耦合器的方向性系数^[20]。由于金和铝的复折射率虚部为零,近似可以看作完美的反射镜,为此,在接下来的仿真中,采用理想电导体(PEC)来代表 SiO_2 下包层与Si衬底交界面的反射镜。考虑到仿真时间和仿真精度,计算过程中,选

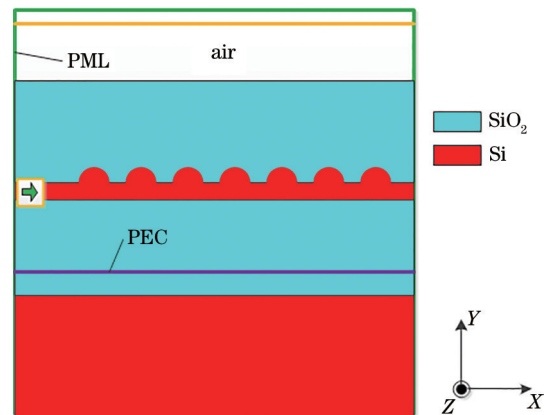


图1 亚波长线光栅耦合器仿真结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of subwavelength line grating coupler simulation structure

择网格大小统一为 10 nm。

此外,在光源处以及上包层表面上方 400 nm 处设置了监测平面以收集耦合出光子器件的光功率,并定义光栅耦合效率 η 为耦合出光子器件的光功率 (P_{out}) 与耦合前输入光功率 (P_{in}) 之比^[21]

$$\eta = P_{out} / P_{in} \quad (1)$$

3 垂直光栅耦合器的设计及性能优化

光栅耦合器耦合效率的提高与亚波长线光栅耦合器的很多参数有关,如:线光栅的周期、半径、下包层以及上包层的厚度等。为了分析这些结构参数对光栅耦合器的耦合效率的影响机制,采用逐次改变某一参数,固定其他参数的方法来分别进行分析。

3.1 线光栅周期对耦合效率的影响

首先,假定采用的 SOI 平板波导的芯层厚度为 220 nm,暂定线光栅的半径为 100 nm,下包层厚度为 2.5 μm ,上包层厚度为 2 μm ,分析了线光栅周期在 400 nm 至 1450 nm 之间以 50 nm 为间隔均匀变化时,光栅耦合效率的变化情况,结果如图 2 所示。

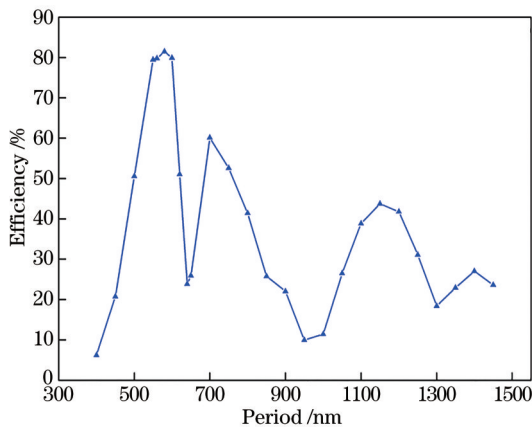


图 2 线光栅周期对耦合效率的影响

Fig. 2 Effect of line grating period on coupling efficiency

由图 2 可以看出,随着线光栅周期的逐渐增大,耦合效率呈现为逐渐减小的震荡趋势,当光栅周期为 580 nm 时,耦合效率最大为 81.5%,也就是说这一周期的线光栅可使得光栅耦合器内的光场尽可能地接近高斯型。为了更加深入地理解亚波长线光栅结构提高光栅耦合器耦合效率的物理机制并对结构进行优化,首先计算了不同厚度的 Si 波导所能支持的波导模式,得到了 Si 波导层中低阶导模关于波导厚度的色散关系曲线,如图 3 所示。

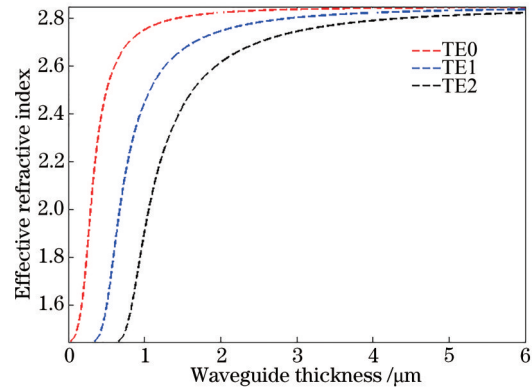


图 3 Si 波导层中低阶导模关于波导厚度的色散关系曲线
Fig. 3 Dispersion of lower order guide mode in Si waveguide layer with respect to waveguide thickness

由图 3 可知,对于固定波长 1550 nm,波导越厚,在传输方向上所能支持的模式就越多。通过计算,对于芯层厚度为 220 nm 的 SOI 平板波导,其 TE 基模的有效折射率为 2.827。当该有效折射率与 SiO₂ 包层的有效折射率相等,即满足折射率匹配条件时,亚波长线光栅与 SiO₂ 包层形成垂直定向耦合器,此时可以获得更高的耦合效率^[22]。同时,根据布拉格条件得出光栅周期 T 的近似计算公式^[23]

$$T = \frac{\lambda}{N_{eff} \mp n_1 \sin \theta} \quad (2)$$

式中: N_{eff} 为有效折射率, λ 为光波波长, n_1 为包层折射率, θ 表示衍射角,分母取 + 号对应透射衍射 -1 级,取 - 号对应透射衍射 +1 级。根据 (2) 式可以计算出光栅周期约为 544 nm 时,光栅耦合器可以获得最大的耦合效率,这与仿真结果基本吻合。

3.2 线光栅半径对耦合效率的影响

然后,基于前面的计算结果,固定线光栅的周期为 580 nm,使线光栅的半径在 50 nm 至 220 nm 之间以 10 nm 为间隔均匀变化,计算出了相应的耦合效率,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,光栅耦合器的耦合效率随着光栅半径的增加呈现出先增大后减小的变化趋势,并且当光栅半径为 130 nm 时,耦合效率可达 90%。根据等效介质理论,不同半径的亚波长线光栅与 SiO₂ 包层可以等效为均匀的介质层,等效折射率 $n = \sqrt{f \times n_{Si}^2 + (1-f) \times n_{SiO_2}^2}$,其中 n_{Si} 为 Si 的折射率, n_{SiO_2} 为 SiO₂ 的折射率, $f = r/T$ 为占空比, r 为光栅半径。并且当满足等效折射率 $n = \sqrt{n_{Si} \times n_{SiO_2}}$ 时,满足折射率匹配条件,此时会得到更高的衍射效率。由此可知,线光栅半径为 170 nm 时,可以获得更高的耦合效率,这与仿真结果基本吻

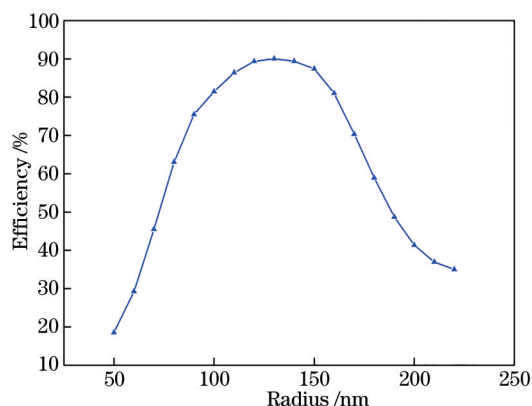


图4 线光栅半径对耦合效率的影响

Fig. 4 Effect of line grating radius on coupling efficiency

合。同时,由于线光栅的弧形结构本身就构成了一种渐变折射率结构,从而进一步提高了耦合效率。

同时,还可以看出,当线光栅半径为 220 nm 时,光栅刻穿 Si 波导层,此时称为全刻蚀光栅,尽管全刻蚀光栅制备起来比较容易,但是其耦合效率并不是很高。

3.3 下包层厚度对耦合效率的影响

下包层的厚度对于耦合效率的影响非常大^[24]。因此,接下来,固定光栅周期为 580 nm,半径为 130 nm,下包层厚度在 1 μm 至 3 μm 之间以 100 nm 为间隔均匀变化,得到了相应光栅耦合器的耦合效率,如图 5 所示。

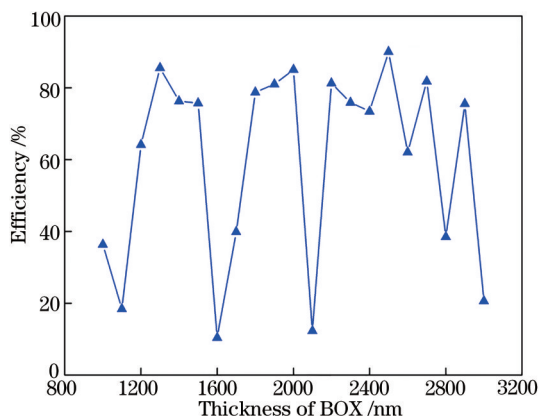


图5 下包层厚度对耦合效率的影响

Fig. 5 Effect of lower cladding thickness on coupling efficiency

由图 5 可以看出,随着下包层厚度的不断增加,光栅耦合器的耦合效率呈现出周期性的变化。并且耦合效率周期性变化的两个最大值之间的水平间隔为 700 nm,大约是半个波长,这是由直接向上的衍射光与被反射镜反射而向上传输的光之间的干涉所引起,而下包层的厚度决定了发生周期性的

相长(或相消)干涉,从而引起方向性系数的周期性变化。经过计算可以得出,当下包层的厚度为 2500 nm 时,耦合效率处于周期性变化的峰值点。

3.4 上包层厚度对耦合效率的影响

上包层的引入也会对耦合效果产生影响,上包层的引入主要是为了减小顶层硅与空气之间的折射率差,使得衍射向上的光能够更多地进入到光纤中。于是,固定光栅及下包层参数为前面仿真结果的最佳值,研究了上包层的厚度变化对光栅耦合器耦合效率的影响,如图 6 所示。由图 6 可以看出,随着上包层厚度的变化,耦合效率也呈现出周期性的变化,并且当上包层的厚度为 1400 nm 时,最大耦合效率为 91.3%。

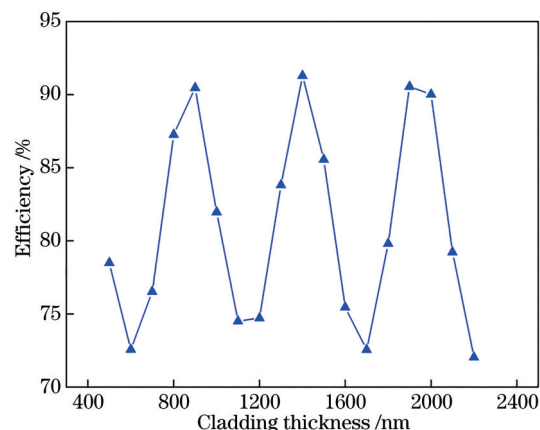


图6 耦合效率随上包层厚度的变化情况

Fig. 6 Coupling efficiency versus thickness of upper cladding

根据微腔结构理论^[25],光栅耦合器的上表面和底层反射镜之间的部分可以看成是一个光学微腔;与下包层类似,上包层的厚度同样会对耦合效率产生很大的影响,并且这种影响也应该是周期性的,这就是图 6 中垂直耦合效率随上包层厚度的变化产生周期性振荡的原因。同时,还可以看出,振荡的周期是 50 nm,近似等于 $\lambda / (2n_{\text{SiO}_2})$,这与微腔结构理论非常一致。

3.5 与传统矩形光栅耦合器的比较

最后,比较了提出的线光栅耦合器与传统的矩形光栅耦合器的耦合效率。首先分别对矩形光栅耦合器的刻槽深度 h 、脊宽 a 、光栅周期 d 和上下包层厚度进行了优化。有研究表明,当光栅的结构参数 $\rho = a/d = 1/2$ 时,光栅偶级次衍射效率为 0,此时可以得到更大的衍射效率^[26],为此,仿真中设定 $a = d/2$,得到传统矩形光栅耦合器的垂直耦合效率随光栅结构参数的变化情况,如图 7 所示。由图 7 可以看出,传统矩形光栅耦合器的垂直耦合效率与

线光栅耦合器有着类似的变化趋势,并且当光栅周期为 700 nm(脊宽为 350 nm),刻蚀深度为 90 nm,下包层和上包层厚度分别为 2400 nm 和 1400 nm 时,光栅耦合器的最大垂直耦合效率为 46%。同时,可以看出,提出的线光栅耦合器的耦合效率要

远高于传统的矩形光栅。这是由于圆形结构的光栅与矩形结构光栅相比,其光能量更易于垂直出射,同时圆弧表面使得其等效折射率是渐变的,从而使得光更容易透射出来。

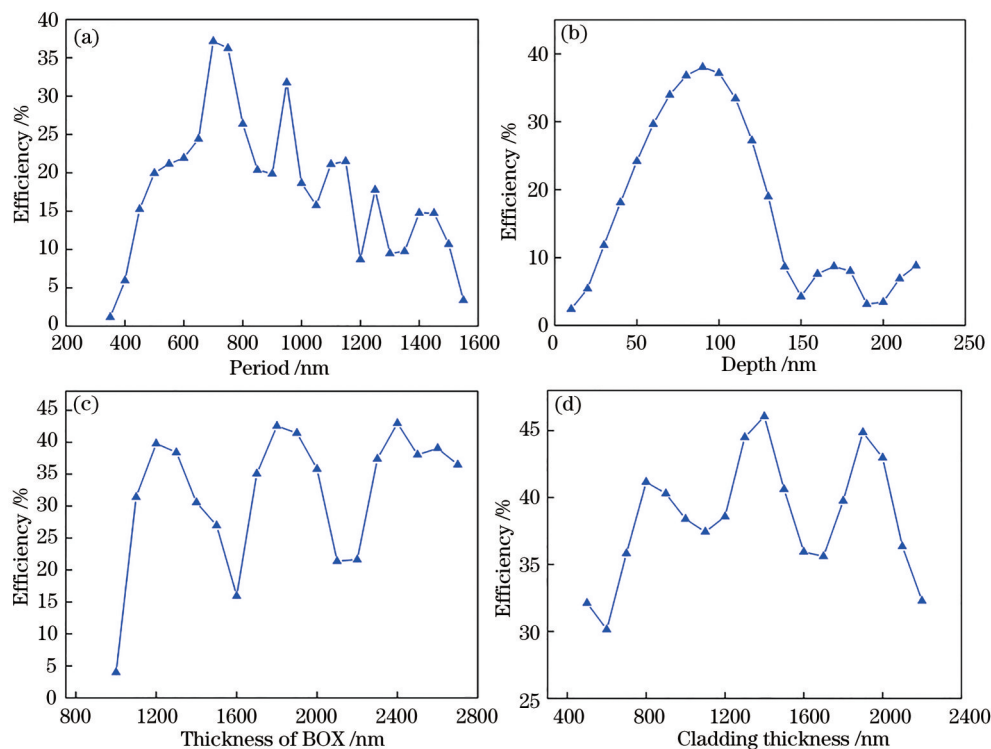


图 7 矩形光栅的垂直耦合效率随光栅结构参数的变化情况。(a)光栅周期;(b)刻蚀深度;(c)下包层厚度;(d)上包层厚度
Fig. 7 Vertical coupling efficiency versus parameters of traditional rectangular grating. (a) Grating period; (b) etching depth; (c) thickness of BOX; (d) cladding thickness

图 8 给出了不加光栅与加矩形光栅和线光栅后光栅耦合器内的光场分布。图 8 中 X 和 Z 分别代表了耦合器在 X、Z 两个方向上的坐标, E_y 为电场 E 在 Y 方向上的分量。由光场分布图,可以非常清楚地看到光信号的传输路径。当不加光栅耦合器时,由于 SiO₂ 与 Si 之间具有非常大的折射率差,光会沿着 Si 波导层向前传输,能够耦合出来的能量非常少,

而加入线光栅耦合器后,大部分的能量会受到线光栅的耦合作用而在垂直方向传输并最终耦合进光纤进行传输,从而可以得到更高的耦合效率。而由图 8(b)可以看出,光受到传统矩形光栅的作用后仍沿波导传输了较远的距离,同时向上耦合的能量会与光栅表面的法线方向存在一定的夹角,因而在垂直方向上的耦合能量较低,这也是为什么对于矩形

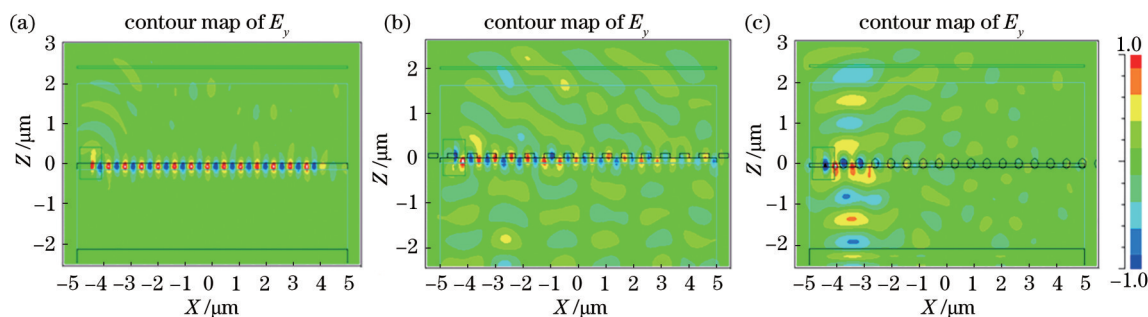


图 8 耦合器内部光场分布图。(a)不加光栅;(b)加传统矩形光栅;(c)加线光栅
Fig. 8 Light distribution in coupler. (a) Without grating; (b) with traditional rectangular grating; (c) with wire grating

光栅耦合器来说通常需要将光纤与光波导保持一定的夹角以获得更多的耦合能量,但这给器件集成带来了很多的不便。

4 结 论

硅基光栅耦合器的设计目标在于优化结构参数、提高耦合效率。基于 SOI 平台设计了线光栅垂直耦合器以提高光栅耦合器的耦合效率。利用 FDTD 数值计算方法建立了光栅耦合器的仿真模型,详细计算和优化了线光栅耦合器的周期、半径以及上下包层的厚度。结果表明,优化以后的结构可以实现高于 91% 的垂直耦合效率。此外,还研究了传统的矩形光栅耦合器的耦合效率,并与线光栅耦合器进行了比较。结果表明,提出的线光栅结构要优于传统矩形光栅的耦合效率。综上,提出的高效线光栅垂直耦合器结构简单、易于制备,在大规模光子集成领域具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Sattari H, Takabayashi A Y, Zhang Y, et al. Compact broadband suspended silicon photonic directional coupler[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(11): 2997-3000.
- [2] Yang C J Y, Xu J, Gao Y, et al. Research on subwavelength grating coupler applied in optical antenna based on silicon-on-insulator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(1): 010501.
杨成俊祎, 徐军, 高旻, 等. 硅基亚波长光栅耦合器在光学天线的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(1): 010501.
- [3] Dai D X. Silicon nanophotonic integrated devices for on-chip multiplexing and switching[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(4): 572-587.
- [4] Zhou Z P, Chen R X, Li X B, et al. Development trends in silicon photonics for data centers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 44: 13-23.
- [5] Bogaerts W. Scaling up silicon photonic circuits: where are the challenges? [C]//Proceedings of the 3rd International Workshop on Optical/Photonic Interconnects for Computing Systems (OPTICS Workshop), March 31, 2017, Lausanne, Switzerland. East Flanders: Ghent University, 2017: W06.6.1.
- [6] Hoppe N, Zaoui W S, Rathgeber L, et al. Ultra-efficient silicon-on-insulator grating couplers with backside metal mirrors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(2): 1-6.
- [7] Cheng L R, Mao S M, Li Z, et al. Grating couplers on silicon photonics: design principles, emerging trends and practical issues[J]. *Micromachines*, 2020, 11(7): 666.
- [8] Mu X, Wu S L, Cheng L R, et al. Edge couplers in silicon photonic integrated circuits: a review[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1538.
- [9] Bock P J, Cheben P, 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.
- [10] Roelkens G, Vermeulen D, Li Y L, et al. Silicon grating structures for optical fiber interfacing and III-V/silicon opto-electronic components[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8633: 86330S.
- [11] Marchetti R, Lacava C, Khokhar A, et al. High-efficiency grating-couplers: demonstration of a new design strategy[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 16670.
- [12] Hong J X, Spring A M, Qiu F, et al. A high efficiency silicon nitride waveguide grating coupler with a multilayer bottom reflector[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 12988.
- [13] 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.
- [14] Tian M, Qu M N, Wu L Y, et al. Progress in asymmetrical gratings for vertical coupling [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 58(5): 050004.
田苗, 瞿敏妮, 乌李瑛, 等. 用于垂直耦合的非对称光栅耦合器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 58(5): 050004.
- [15] Feng J B, Zhou Z P. Polarization beam splitter using a binary blazed grating coupler[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(12): 1662-1664.
- [16] 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.
- [17] Zhou K, Yang J B, Yang J K, et al. Non-polarization and high-coupling-efficiency coupler using multilevel grating structure[J]. *Optoelectronics Letters*, 2013, 9(2): 93-96.
- [18] Halir R, Cheben P, Janz S, et al. Waveguide grating coupler with subwavelength microstructures[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(9): 1408-1410.
- [19] Dewanjee A, Caspers J N, Aitchison J S, et al.

- Demonstration of a compact bilayer inverse taper coupler for Si-photonics with enhanced polarization insensitivity[J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 28194-28203.
- [20] Zhang Z Y, Huang B J, Zhang Z, et al. Highly efficient vertical fiber interfacing grating coupler with bilayer anti-reflection cladding and backside metal mirror[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 90: 136-143.
- [21] Ang T W, Reed G T, Vonsovici A, et al. Effects of grating heights on highly efficient unibond SOI waveguide grating couplers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(1): 59-61.
- [22] Zhao R, Sun C L, Xu X, et al. Ultra-compact vertical optical coupler based on subwavelength grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1405002.
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.
- [23] Guo Y N. Research on novel SOI grating coupler in optical communication systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017: 20-28.
郭亚楠. 光通信系统中基于 SOI 的新型光栅耦合器的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017: 20-28.
- [24] Emmons R M, Hall D G. Buried-oxide silicon-on-insulator structures. II: waveguide grating couplers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(1): 164-175.
- [25] Benisty H, de Neve H, Weisbuch C, et al. Impact of planar microcavity effects on light extraction-part I: basic concepts and analytical trends[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(9): 1612-1631.
- [26] Zheng Z Z, Yang Z, Xiu L C, et al. 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, 等. 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.