

文章编号: 1005-5630(2024)01-0049-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202303040038

部分刻蚀光栅对衍射光束影响的仿真研究

钱峻, 谢静雅

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了研究部分刻蚀光栅对波导光栅衍射光束的影响, 提高集成光子学设计自由度, 通过有限时域差分法仿真分析了分别在光栅边缘或中间进行波导部分刻蚀后的不同结构的性质, 输入光波长为 1 400~1 700 nm, 覆盖 1 550 nm 通信波长, 仿真结果表明: 边缘刻蚀方法具有更高的辐射率、更低的反射率, 并且可以控制辐射光场的强度分布; 中间刻蚀方法波导中的反射能量更强且线宽更窄。2 种刻蚀方法下, 光栅尺寸越大则辐射率越高; 当光栅尺寸固定, 波导宽度越大则边缘刻蚀的辐射率越低。波导光栅的部分刻蚀方法可以用于集成光路的设计优化。

关键词: 绝缘体上硅; 光栅; 波导; 集成光学

中图分类号: TN 252 **文献标志码:** A

Simulation of the effects of partial etched gratings on diffracted beams

QIAN Jun, XIE Jingya

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to study the influence of partial etching gratings on the diffracted beam of waveguide gratings and improve the degree of freedom of integrated photonics design, the different structural properties of waveguide partially etched gratings at the edge or middle were analyzed by finite time domain difference method simulation. The input light wavelength is in the range of 1 400~1 700 nm, covering 1 550 nm communication wavelength. The simulation results show that the edge etching method has higher radiation efficiency, lower reflection efficiency, and can control the intensity distribution of the radiated light field. The reflected energy in the intermediate etch method waveguide is stronger and the linewidth is narrower. By using the two etching methods, the larger the grating size, the higher the radiation efficiency. When the grating size is fixed, the larger the waveguide width, the lower the radiation efficiency of edge etching. The partial etching method of waveguide gratings can be used to optimize the design of the integrated optical path.

Keywords: silicon-on-insulators; grating; waveguide; integrated optics

收稿日期: 2023-03-04

第一作者: 钱峻 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为集成光电器件。E-mail: jqiansh@qq.com

通信作者: 谢静雅 (1987—), 女, 副教授, 研究方向为集成光电器件。E-mail: xiejy@usst.edu.cn

引 言

绝缘体上硅(silicon-on-insulator, SOI)是当前公认的具有很大潜力的光电子集成材料^[1],它允许将传感器、检测器、光源和读出电子器件集成在一个芯片中^[2-3],这为大规模生产提供了可扩展的平台^[4-5],并为电子和光子器件的单片集成提供了机会,被称为电子光子集成电路(electronic-photonic integrated circuits, EPICs)^[6]。SOI 主要由硅芯层、掩埋氧化物层(buried oxide, BOX)、硅衬底层构成。不同的集成光电子器件被制备在硅芯层中,该层被称为器件层。由于硅芯层($n=3.45$)和包层(一般为氧化硅 $n=1.45$ 或者空气 $n=1$)之间的高折射率对比,SOI 对 1 550 nm 波段的通信波长具有很强的光约束能力。目前,将光限制在亚微米范围内的低损耗硅波导已在互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)兼容工艺中实现^[7]。其他硅基光电子器件,如调制器和光电探测器也被证明具有高性能^[8-9],在高速通信方面有着广阔的应用前景。

波导光栅是目前比较热门的 SOI 结构。波导光栅的基本原理是波导的周期性折射率变化,它已被广泛应用于集成光路中,如阵列波导光栅^[10]、多模干涉耦合器^[11]、光栅耦合器^[12-13]。目前研究比较普遍的是完全刻蚀光栅,即光栅宽度与波导宽度一致,影响该种波导光栅的结构因素有:周期、占空比、刻蚀深度、光栅长度、折射率分布等。本文对部分刻蚀光栅,即光栅宽度小于波导宽度的情况进行了仿真分析,主要针对光栅刻蚀在波导边缘、中间的不同位置,讨论了其对光栅辐射率、透射率、反射率以及衍射角、场分布的影响。并且在该种刻蚀方法下,仿真分析了光栅大小以及波导宽度对辐射率的影响。

1 部分刻蚀光栅的结构

布拉格相位匹配条件采用波矢的概念,很好地解释了入射光波矢与衍射光波矢之间的联系。设波导中任意 2 个模式 μ 和 ν , 其传播矢量常数

为 β_μ 和 β_ν , 则有^[14]

$$\beta_\mu - \beta_\nu = qK \quad (q = 0, \pm 1, \pm 2 \dots) \quad (1)$$

式中: K 是一个在光栅平面内与光栅线垂直的矢量,且 $K = 2\pi / \Lambda$, 表示光栅的空间频率, Λ 为光栅周期。由于光栅具有周期性质,光栅下面区域的波导模式会受到微扰,其相位受到周期性调制,使每个模式 β_ν 产生一组空间谐波 $\beta_\nu + qK$, q 为谐波阶数。当空间高次谐波的传输常数矢量能够在光栅结构内传输时,它实际上是作为模在结构内传输的,基阶谐波等同于没有光栅的波导的特定模式。为了使 2 个可以用传输矢量 β_μ 和 β_ν 表示的光波能够耦合,这 2 个光波必须满足相位匹配条件。采用布拉格相位匹配公式,可以得到光栅周期与波导结构、光栅衍射角的关系,初步对光栅结构进行了设计。

光栅周期决定了光栅阶数。一阶光栅仅有与入射光方向相反的一级衍射光;二阶光栅除了与入射光方向相反的二级衍射光,还存在与其垂直的一级衍射光;更高阶的光栅具有更多方向的衍射光。本文研究的波导光栅为二阶光栅,二阶光栅的光栅周期是一阶光栅的 2 倍,因此其制作工艺相较于一阶光栅来说更简单。最强的相互作用或模式耦合发生在布拉格波长,根据二阶布拉格光栅公式^[15]

$$\lambda = n_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad (2)$$

式中, n_{eff} 为波导光栅的有效折射率。

输入光为横电(transverse electric, TE)模平面波,波长 λ 的范围为 1 400~1 700 nm,波导光栅的有效折射率 n_{eff} 约为 2.8,因此光栅周期设置为 600 nm。当二阶光栅的占空比在 0.5 左右时,辐射率最高^[16],光栅的长宽高($a \times b \times c$)设计为 250 nm \times 250 nm \times 60 nm,分别置于波导的边缘和中间,光栅个数设置为 20。波导光栅采用硅材料,折射率 n_1 为 3.45,宽度 w 为 500 nm,厚度 h 为 340 nm。覆盖层为空气,折射率 n_2 为 1。光栅采用部分刻蚀方法,分别置于波导顶部的边缘和中间,其结构示意图如图 1 所示。

波导中的导模与光栅相互作用,产生若干级的衍射光束。衍射光分为 2 部分:一部分向上,从光波导的覆盖层向外衍射,一般利用向波导上

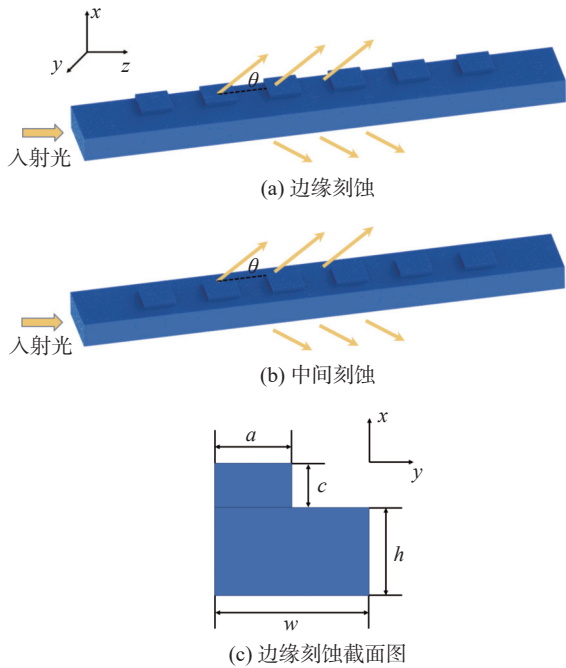


图 1 部分刻蚀光栅示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a partially etched grating

包层衍射的光与光纤进行耦合, 故这一部分衍射光又被称为耦合光; 一部分向下, 从衬底方向衍射, 这一部分光则被称为泄露光。光通过波导后, 一部分没有被光栅衍射的光会继续在波导中传播, 将这部分光被称为透射光。在没有通过光栅之前, 入射光在波导中的传播非常稳定。但从通过光栅开始, 波导中的传输光产生了明显的扰动, 这是因为此时有一部分光被波导光栅反射, 对光波导中的导模产生了影响, 这部分被光栅反射的光, 被称为反射光。

2 光束性质分析

通过有限时域差分法 (finite difference time domain, FDTD) 对该波导光栅模型进行仿真分析, 图 2 显示了 2 种结构的耦合光、泄露光的辐射率, 波导的透射率以及反射率谱线。

如图 2(a) 所示, 对于耦合光, 光栅刻蚀在

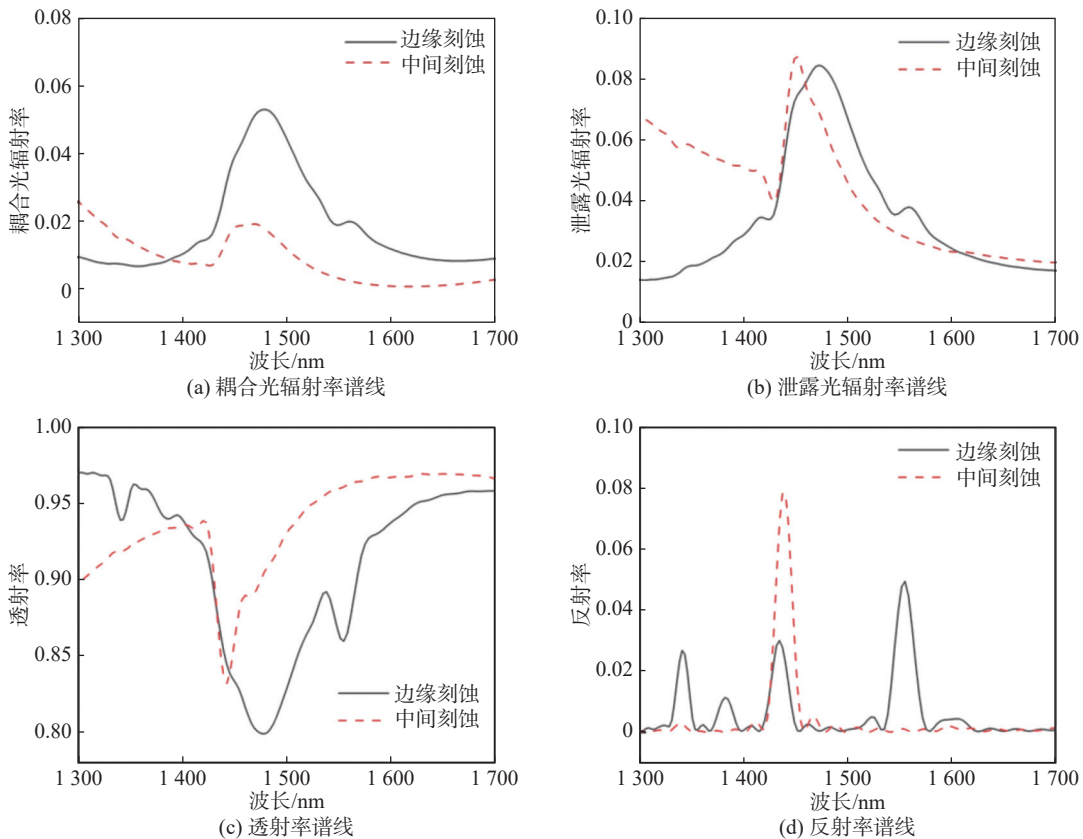


图 2 耦合光与泄露光辐射率谱线

Fig. 2 Coupled light and leaked light radiation efficiency spectral lines

波导边缘具有更高的辐射率, 辐射峰在 1 475.41 nm 处, 辐射率为 0.059 8; 而当光栅刻蚀在波导中间位置时, 辐射峰在 1 451.61 nm 处, 辐射峰值向波长较短方向偏移了 23.80 nm, 辐射率为 0.021 5, 相较于前者明显降低。

如图 2(b)所示, 对于泄露光, 光栅刻蚀在波导边缘时辐射峰位置较中间刻蚀位置的波长更长。此时, 边缘刻蚀的辐射率为 0.084 3, 中间刻蚀的辐射率为 0.087 3, 两者辐射率接近。可以明显看到, 中间刻蚀的辐射率的半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 更窄。对比图 2(a)和图 2(b), 泄露光的辐射率大于耦合光的辐射率, 且中间刻蚀时更加明显。在设计光栅结构时, 通常希望尽量减少泄露光的损耗, 可以通过在光栅底部增加反射镜, 或者改变波导上下层的折射率差等方式来减少泄露光的损耗, 以提高耦合效率。

因此, 不同的光栅刻蚀位置可以改变耦合光和泄露光的辐射率。需要注意的是, 当光栅刻蚀在波导两侧的任意一侧时, 或者当光源从波导的任意一端输入时, 衍射光的辐射率都是相同的。

波导中传播的光会在每个光栅面进行透射和反射, 如果不满足布拉格条件, 依次排列的光栅平面反射的光会逐渐变得不同, 直到最后相互抵消。同时由于系数不匹配, 与布拉格波长不相符的光在每个光栅平面的反射也很微弱, 这些光大部分在波导中发生透射。波导光栅的透射率谱线如图 2(c)所示, 透射率最低位置与辐射率峰值位置对应, 另外, 在边缘刻蚀中出现了更明显的旁峰, 而中间刻蚀的半峰全宽则更窄。通过增加光栅耦合器在波导上的刻蚀长度, 可以有效地减少光栅透射光的能量损耗, 从而提高耦合效率。原则上, 只要光栅的长度足够长, 就能将透射光的损耗减少到零。但是现实应用中, 波导光栅的长度会受到制作工艺、制作材料等的限制, 因此也可以在均匀光栅尾端增加反射光栅, 进而减少透射光的损耗。

如果满足布拉格条件, 每个光栅平面反射回来的光将逐步累加, 最后会在反向形成一个反射峰, 中心波长由光栅参数决定。反射率谱线如图 2(d)所示, 边缘刻蚀的反射率较低, 并且出现了多个反射峰。因此, 在高折射率对比度波导

中, 采用边缘刻蚀方法, 光栅的背向散射问题^[17]就可以被有效解决。中间刻蚀的反射率较高, 峰值达到了 0.078 4, 在仿真范围内仅出现了单个反射峰, 且线宽更窄, 这对于二阶光栅分布反馈式半导体激光器^[18]的设计优化具有重要参考价值。2 种结构的反射峰位置与辐射峰相比, 向波长较短方向出现了偏移, 尤其以边缘刻蚀更为明显。在确定光栅占空比的情况下, 可以在光栅前端设计一个凹槽结构, 以减少反射光的损耗。

波导中的导模与光栅相互作用会产生衍射光束, 二阶光栅的一级衍射光垂直于波导的方向衍射, 图 3 所示为波导光栅上方 1 000 nm 处的光场分布。

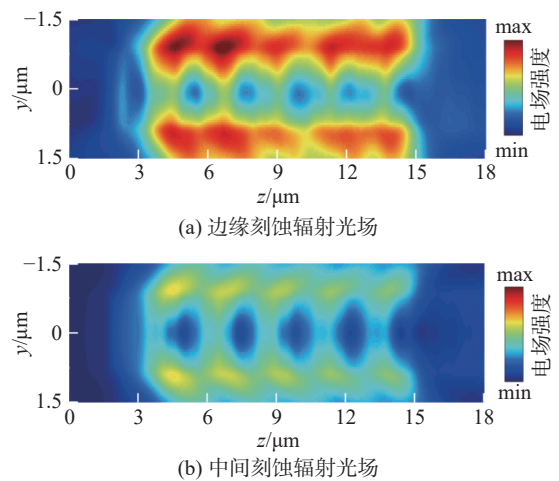


图 3 辐射光场分布

Fig. 3 Radiation light field distribution

当光源沿着 z 轴的正向入射时, 可观察到辐射光场的能量沿着光的传播方向逐渐递减。为了获得更加均匀的光场分布, 可以将光栅设计为非周期性结构^[19]。与辐射率不同, 光栅刻蚀在波导两侧的其中一侧时, 刻蚀会影响光场分布, 在有光栅刻蚀的一侧光场的能量更强。而当光栅刻蚀在波导中间位置时, 辐射光场呈现对称分布。因此, 如果希望选择性地控制一侧光场, 使其较强, 可以采用边缘刻蚀光栅的方法。

衍射角是波导光栅的重要参数, 为了更好地表征部分刻蚀对衍射角的影响, 探究了波导光栅的竖向截面衍射光场分布情况, 结果见图 4。

对比图 4(a)和(b), 边缘刻蚀相较于中间刻蚀衍射角更大, 且近场辐射更强, 导模沿着光栅

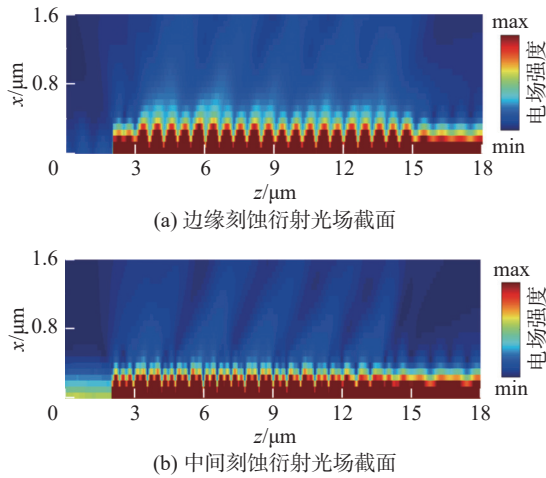


图 4 衍射光的光场截面分布
Fig. 4 Optical field cross-sectional distribution of diffracted light

的位置分布更均匀。光的衍射效果主要集中在光栅的前端, 且能量较为集中, 而在中后端, 衍射效果逐渐减弱。从图 4(b)中可以看出, 波导的最左端出现了较强的能量分布, 这是中间刻蚀的高反射率引起的现象。

接着讨论了在边缘刻蚀与中间刻蚀 2 种情况下, 波导光栅尺寸对衍射光的影响。保持波导尺寸不变, 将光栅设置为边长为 150~450 nm 的正方形, 高度仍为 60 nm。在 1 550 nm 波长附近同样出现了辐射峰值, 并且随着光栅尺寸的变大, 辐射峰值位置逐渐向波长较长的方向偏移。根据式(2), 波导光栅的有效折射率逐渐增大, 波长随之增大。不同光栅尺寸下的耦合光辐射率如图 5 所示。

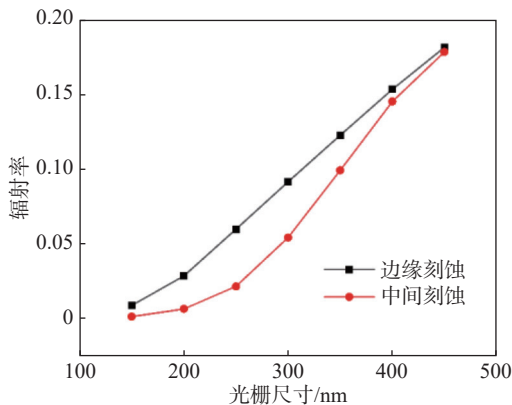


图 5 不同光栅尺寸的耦合光辐射率
Fig. 5 Coupled optical radiation efficiency of different grating sizes

边缘刻蚀与中间刻蚀两种结构的辐射率均随光栅尺寸的增大而增大。保持光栅尺寸不变, 将波导设置为 500~1 000 nm 的不同宽度, 由于波导宽度对有效折射率的影响较大, 当其宽度为 500 nm 时, 有效折射率为 2.8; 当其宽度为 1 000 nm 时; 有效折射率为 3.06, 此时辐射峰值位置偏移较大。不同波导宽度的辐射率如图 6 所示。对于边缘刻蚀, 当波导宽度越宽, 辐射率越低; 中间刻蚀的耦合光辐射率与波导宽度没有表现出明显规律。这是因为光场能量主要集中在波导中心, 当波导变宽时, 处在边缘位置的光栅光场能量减弱, 导致边缘刻蚀辐射率随波导宽度增加而降低。

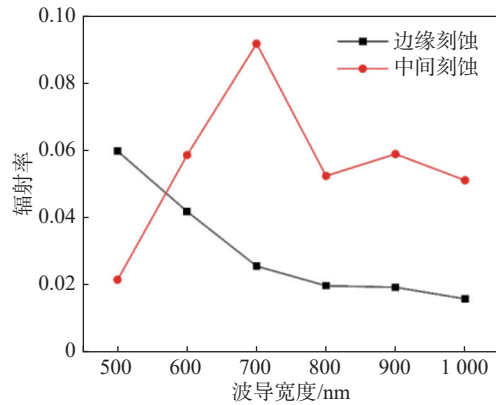


图 6 不同波导宽度的耦合光辐射率
Fig. 6 Coupled optical radiation efficiency of different waveguide widths

3 结 论

通过有限时域差分法对部分刻蚀波导光栅进行了仿真分析, 结果表明: 波导光栅在两侧的任何一侧刻蚀, 衍射效率完全相同, 光场分布呈镜像对称。边缘刻蚀具有更高的辐射率、更低的反射率, 该刻蚀可以应用在某些需要控制辐射光场强度分布的情景。对于 2 种刻蚀方法, 光栅尺寸越大辐射率越高; 当光栅尺寸固定, 波导宽度越宽, 边缘刻蚀的衍射光辐射率越低。因此, 该研究对波导光栅的设计提供了新的优化方向。

参考文献:

[1] BAEHR-JONES T, PINGUET T, LO GUO-QIANG P,

- et al. Myths and rumours of silicon photonics[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(4): 206 – 208.
- [2] ALIMONTI G, AMMENDOLA R, ANDREAZZA A, et al. Use of silicon photonics wavelength multiplexing techniques for fast parallel readout in high energy physics[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 936: 601 – 603.
- [3] ZANG K, ZHANG D K, HUO Y J, et al. Microring bio-chemical sensor with integrated low dark current Ge photodetector[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(10): 101111.
- [4] BOEUF F, CREMER S, TEMPORITI E, et al. Recent progress in silicon photonics R&D and manufacturing on 300mm wafer platform[C]//2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Los Angeles: IEEE, 2015: 1 – 3.
- [5] LAPLATINE L, LUAN E, CHEUNG K, et al. System-level integration of active silicon photonic biosensors using Fan-Out Wafer-Level-Packaging for low cost and multiplexed point-of-care diagnostic testing[J]. *Sensors and Actuators B:Chemical*, 2018, 273: 1610 – 1617.
- [6] KNOLL D, LISCHKE S, BARTH R, et al. High-performance photonic BiCMOS process for the fabrication of high-bandwidth electronic-photonic integrated circuits[C]//2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). Washington: IEEE, 2015: 15.6. 1 – 15.6. 4.
- [7] LI G L, YAO J, THACKER H, et al. Ultralow-loss, high-density SOI optical waveguide routing for macrochip interconnects[J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12035 – 12039.
- [8] BAEHR-JONES T, DING R, LIU Y, et al. Ultralow drive voltage silicon traveling-wave modulator[J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12014 – 12020.
- [9] VIVIEN L, POLZER A, MARRIS-MORINI D, et al. Zero-bias 40 Gbit/s germanium waveguide photodetector on silicon[J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1096 – 1101.
- [10] PATHAK S, VAN THOURHOUT D, BOGAERTS W. Design trade-offs for silicon-on-insulator-based AWGs for (de)multiplexer applications[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 2961 – 2964.
- [11] ZHOU H F, SONG J F, LI C, et al. A library of ultracompact multimode interference optical couplers on SOI[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(12): 1149 – 1152.
- [12] HE L, HE Y L, POMERENE A, et al. Ultrathin silicon-on-insulator grating couplers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(24): 2247 – 2249.
- [13] ZHANG H X, LIANG C P, SONG J, et al. Terahertz out-of-plane coupler based on compact spot-size converter[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(2): 021301.
- [14] 李淑凤, 李成仁, 宋昌烈. 光波导理论基础教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 118 – 119.
- [15] HILL K O, MELTZ G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1263 – 1276.
- [16] HARDY A, WELCH D F, STREIFER W. Analysis of second-order gratings[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(10): 2096 – 2105.
- [17] MORICHETTI F, CANCIAMILLA A, FERRARI C, et al. Roughness induced backscattering in optical silicon waveguides[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(3): 033902.
- [18] STREIFER W, SCIFRES D, BURNHAM R. Coupled wave analysis of DFB and DBR lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1977, 13(4): 134 – 141.
- [19] 余思远. 涡旋光场的集成光子学操控方法 [J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1026008.

(编辑: 李晓莉)