

基于亚波长光栅的高集成度垂直光耦合器

赵然, 孙崇磊, 徐晓, 赵佳*

山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237

摘要 设计了一种基于亚波长光栅的具有高集成度、高耦合效率的垂直光耦合器, 在 $1.5\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 波长范围内实现了大于 97% 的耦合效率, 且器件长度仅为 $15\ \mu\text{m}$, 是传统基于绝热拉锥波导的垂直耦合器尺寸的十分之一, 提高了系统的集成度。在亚波长光栅占空比、拉锥波导尖端尺寸以及波导错位方面, 所设计的耦合器均具有较大的工艺误差容限, 在异质集成领域展现出了良好的应用前景。

关键词 光栅; 亚波长结构; 耦合器; 亚波长光栅; 异质集成

中图分类号 TN 256

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1405002

Ultra-Compact Vertical Optical Coupler Based on Subwavelength Grating

Zhao Ran, Sun Chonglei, Xu Xiao, Zhao Jia*

School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China

Abstract A vertical optical coupler with high integration and coupling efficiency is designed based on a subwavelength grating. The proposed vertical coupler shows the coupling efficiency above 97% within the wavelength range of $1.5\sim 1.6\ \mu\text{m}$. Moreover, the length of the device is only $15\ \mu\text{m}$, which is one tenth of the size of the traditional vertical coupler based on an adiabatic tapered waveguide and improves the integration of the system. In terms of duty ratio of subwavelength grating, tip size of tapered waveguide and dislocation of waveguide, the designed couplers have large tolerances to process errors, which shows a good application prospect in the field of heterogeneous integration.

Key words gratings; subwavelength structure; coupler; subwavelength grating; heterogeneous integration

OCIS codes 050.6624; 050.6875; 050.2770

1 引 言

绝缘体上的硅 (Silicon-on-insulator, SOI) 具有较大折射率差, 其制备工艺与 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 工艺兼容, 一直广受学术界及工业界的青睐, 被广泛应用于高密度光电集成线路^[1]。光调制器作为光通信链路的关键器件, 能将有效信息加载到光信号上进行传输。硅基光调制器主要基于载流子色散效应^[2-3], 但是载流子的吸收增加了光损耗。此外, 采用高阶调制格式时, 载流子色散效应的非线性导致信号失真严重。相比而言, 基于泡克耳斯 (Pockels) 效应的铌酸锂 (LiNO_3 , LN) 调制器具有电光系数大、损耗低、线性度高的优点, 被广泛应用于商用调制器中^[4-5]。Si-LN 混合集成光调制器结合了硅基光子良好的扩展性、高集成度以及铌酸锂的优良调制性能, 在高速光电集成线路中展

现出了良好的应用前景^[6-11]。目前, Si-LN 的异质混合集成主要利用苯并环丁烯 (Benzocyclobutene, BCB) 将 LN 波导粘贴于硅波导之上。其中, 实现光场与 LN 波导的充分交叠成为提高调制效率的关键。研究人员采用绝热拉锥的方式, 将硅波导中的光完全耦合到其上方的 LN 波导中, 有效地提高了调制效率^[12]。但是, 为了降低耦合损耗, 拉锥波导必须满足绝热条件, 拉锥长度高达 $150\ \mu\text{m}$ ^[12], 器件尺寸较大。亚波长光栅 (Subwavelength-grating, SWG) 通过对波导结构的亚波长尺度进行控制, 实现了对波导色散特性的调控。结合了 SWG 的硅基波导器件在带宽、偏振控制、器件尺寸以及制备容限等方面展现出了优良性能^[13-17]。

本文提出了一种基于 SWG 结构的高集成度垂直耦合器, 实现了硅波导与 LN 波导之间能量的高效耦合。根据等效介质理论设计垂直耦合器, 对光

收稿日期: 2020-02-10; 修回日期: 2020-03-31; 录用日期: 2020-04-13

* E-mail: zhaojia@sdu.edu.cn

栅周期数进行了优化。此外,对所设计的耦合器的带宽进行了分析,与传统基于绝热拉锥波导的垂直耦合器的性能进行了对比。最后,分析了耦合器对SWG占空比、绝热拉锥波导尖端尺寸以及LN波导位置的误差容忍。

2 垂直耦合器的设计及性能分析

2.1 垂直耦合器的设计及优化

图1(a)为设计的Si-LN波导垂直光耦合器的三维示意图,横电(TE)偏振光从硅波导处入射,能量经垂直光耦合器后耦合进入LN波导中。3 μm 厚 SiO_2 上方是由绝热拉锥波导及SWG构成的硅波

导,LN波导通过苯并环丁烯粘贴于硅波导的上方。图1(b)为横截面示意图,所采用的LN波导是横截面为梯形的脊波导^[18]。图1(c)所示为耦合器的俯视图,SWG宽度与入射波导宽度相等。图1(d)为绝热拉锥波导及SWG的三维示意图,SWG由高折射率材料(Si)和低折射率材料(BCB)交替构成,周期为 T ,占空比定义为硅材料长度 a 与周期长度 T 的比值。绝热拉锥波导长12 μm ,宽度逐渐由400 nm减小到80 nm。光沿图1(d)所示 x 方向传播,TE模沿 y 方向偏振。所设计的波导材料参数如表1所示。根据表中所示LN波导尺寸及材料折射率,计算得到LN波导的有效折射率为1.927。

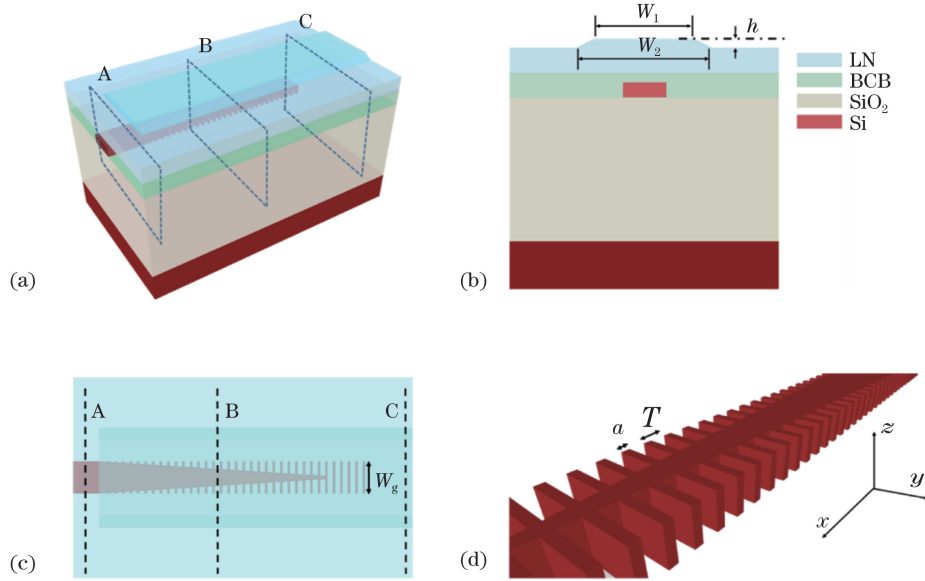


图1 垂直光耦合器示意图。(a) 三维结构;(b) 横截面;(c) 俯视图;(d) SWG及拉锥波导三维示意图

Fig. 1 Schematics of designed vertical optical coupler. (a) 3D diagram; (b) cross-sectional view; (c) top view; (d) 3D diagram of SWG and tapered waveguide

表1 垂直光耦合器波导的材料参数和结构参数

Table 1 Material parameters and structural parameters of designed vertical optical coupler waveguide

Parameter	Value
Wavelength λ /nm	1550
Thickness of SiO_2 / μm	3
Thickness of Si /nm	220
Width of Si waveguide /nm	400
Height of BCB /nm	300
Refractive index of BCB	1.54
Height of LN waveguide /nm	600
W_1 / μm	1
W_2 / μm	1.4
Height of LN ridge waveguide h /nm	180
Refractive index of LN	2.14
Width of SWG W_g /nm	400
Width of taper tip W_t /nm	80

根据等效介质理论^[19-21]可知,当光栅周期远小于入射波长时,光栅可以等效为一个均匀介质波导。根据亚波长光栅的周期及占空比,可以得到折射率(n_{swg})介于包层材料BCB与芯层材料Si的折射率之间的等效均匀介质波导。首先,利用LUMERICAL软件计算了TE偏振光入射时具有不同 n_{swg} 的波导的有效折射率 n_{eff} ,如图2所示,其中虚线代表计算得到的LN波导的有效折射率。当等效均匀介质波导与LN中传输导模的有效折射率相等即达到折射率匹配条件时,亚波长光栅与LN波导形成垂直定向耦合器,此时,通过精确控制亚波长光栅的长度,硅波导中能量可以完全耦合到LN波导中。基于定向耦合原理的垂直光耦合器尺寸较小,能够满足高密度集成的需求。但是,定向耦合器是基于精确的相位匹配,其工作带宽受限,且对波导

尺寸的精度要求很高,波导结构稍有偏差,能量耦合效率就会急剧下降。因此,在亚波长光栅结构的基础上引入波导拉锥区域,在不增加耦合器尺寸的同时,可以提高耦合器的工作带宽,增加制备容限。同时,波导拉锥区域的引入减小了硅波导与亚波长光栅之间由于模式不匹配和界面反射引起的损耗。

在图 1(d)所示的亚波长结构中,入射光沿 x 方向传播,对于 TE 偏振模,其等效折射率^[18]可以估算为

$$n_{\text{swg}}^2 \approx \frac{a}{T}n_1^2 + \left(1 - \frac{a}{T}\right)n_2^2 + o\left(\frac{T^2}{\lambda^2}\right), \quad (1)$$

式中: n_1 为高折射率材料的折射率; a 为高折射率材料的长度; n_2 为低折射率材料的折射率; $o(\cdot)$ 为高阶无穷小量。

通过图 2 可以得到,当等效均匀波导的折射率 n_{swg} 为 3.12 时,其传播模式的有效折射率与 LN 波导模式的有效折射率相等,此时由 (1) 式可计算得到亚波长光栅的占空比为 0.76,即最终选取的占空比不能大于 0.76,这里忽略了经验公式中的高阶无穷小量。

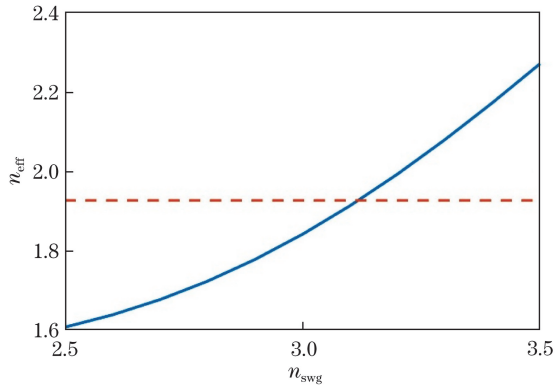


图 2 SWG 等效折射率下的有效折射率
Fig. 2 Effective refractive index versus equivalent refractive index of SWG

考虑到工艺条件,选取波导结构的最小线宽为 100 nm,因此将亚波长光栅中硅块的长度 a 设计为 100 nm,并选取光栅周期 T 为 300 nm。入射光沿着传输方向由硅波导经组合区域(即亚波长光栅+拉锥波导)到达亚波长光栅时,导模的有效折射率从 2.24 逐渐变化到 1.55,此折射率变化范围涵盖了 LN 波导中导模的有效折射率,因此基于模式演化原理,硅波导中的能量可以耦合进入 LN 波导中。另一方面,布拉格光栅周期 $T_B = \lambda/2n_B$ (n_B 为布拉格光栅的等效折射率),可以计算得到硅波导中 1550 nm 波长处的布拉格光栅周期约为 328 nm,本文所设计的光栅周期小于布拉格光栅周期,满足亚波长条件。

接下来,对亚波长光栅的周期数目进行优化分析。图 3 所示为光栅周期数对耦合率的影响规律。由计算结果可以看出,当周期数目大于 40 时,随着周期数的增加,耦合效率趋于稳定。本文所选取的光栅周期数目为 50 个,此时所设计的垂直耦合器的长度为 15 μm ,是传统绝热拉锥波导尺寸的十分之一。

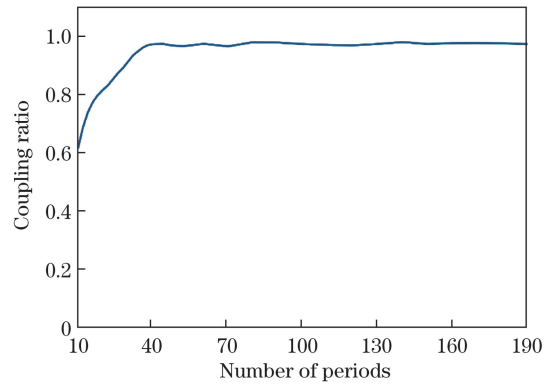


图 3 亚波长光栅周期数与耦合率的关系
Fig. 3 Coupling ratio versus number of periods of subwavelength grating

2.2 带宽分析

所设计的 15 μm 长的垂直耦合器以及 150 μm 长的普通绝热拉锥耦合器在 1.3~1.7 μm 波长范围内的耦合效率如图 4 所示。由仿真结果可以看出,两种耦合器在 1.55 μm 附近 100 nm 范围内均达到了大于 97% 的耦合效率,但是所设计的耦合器的尺寸仅为普通绝热拉锥耦合器尺寸的十分之一。除此之外,所设计的耦合器在 1420~1645 nm 区间 225 nm 带宽范围内,可以保持 95% 以上的耦合效率;在 1350~1670 nm 区间 320 nm 带宽范围内,可以保持 90% 以上的耦合效率。

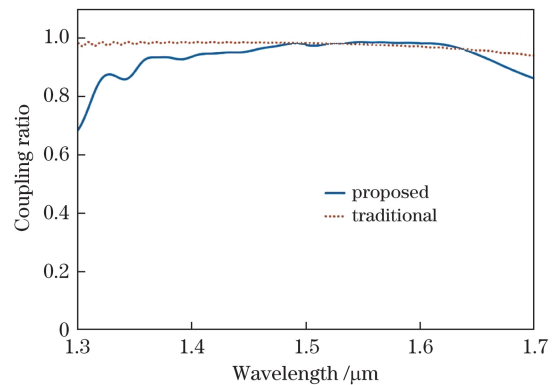


图 4 垂直耦合器的耦合效率随波长的变化关系
Fig. 4 Coupling ratio versus wavelength for vertical coupler

图 5 所示为所设计耦合器在 1550 nm 波长处的光场分布,其中 x 方向是光的传输方向。图 5(a) 和 5(b) 分别为传输光场的俯视图和侧视图,可以看

出硅波导中的入射光在亚波长光栅区域内耦合进入 LN 波导中。图 5(c)~(e)分别展示了图 5(a)~(b)所示的 A, B, C 处横截面的光场分布。在 A 位置

处,光场能量主要集中在硅波导中;在 B 位置处,硅波导中的能量耦合进入 LN 波导中;在 C 位置处,光场能量基本完全耦合进入 LN 波导中。

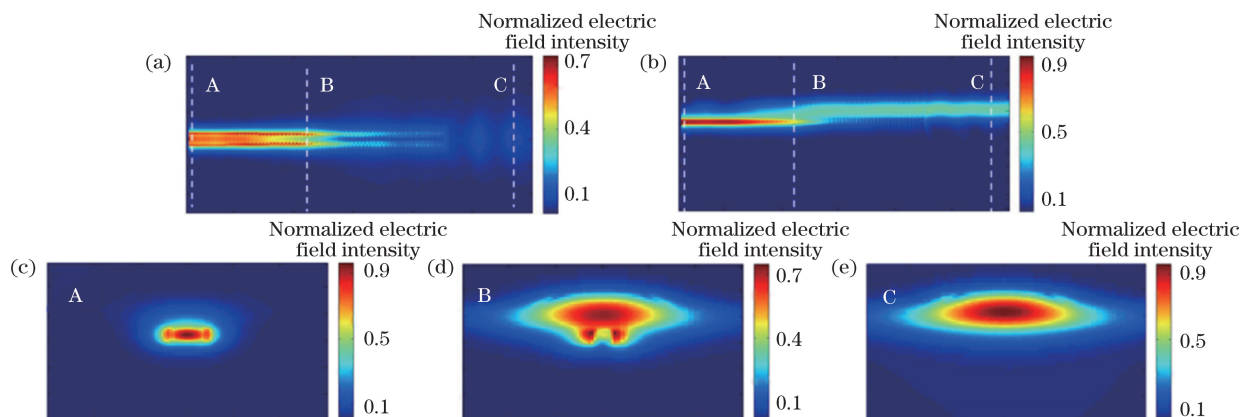


图 5 光场归一化的电场强度分布。(a) 俯视图;(b) 侧视图;(c) A 处的横截面光场分布;(d) B 处的横截面光场分布;(e) C 处的横截面光场分布

Fig. 5 Normalized electric field intensity of light field. (a) Top view; (b) side view; (c) cross-sectional light field distribution at A; (d) cross-sectional light field distribution at B; (e) cross-sectional light field distribution at C

3 制备容限分析

所设计的器件尺寸在生产制造过程中往往会存在一定的误差,器件对尺寸误差的容限越大,对加工工艺的要求就会越低,成本也会相应降低。制备工序如图 6 所示,在 SOI 的顶层硅上旋涂一层光刻胶,采用电子束曝光技术将曝光图形直接写到光刻胶上,采用感应耦合等离子体刻蚀技术,将图形转移到 SOI 片上。去除剩余光刻胶,采用 BCB 粘接工艺,将 LN 粘接到 SOI 晶圆上。

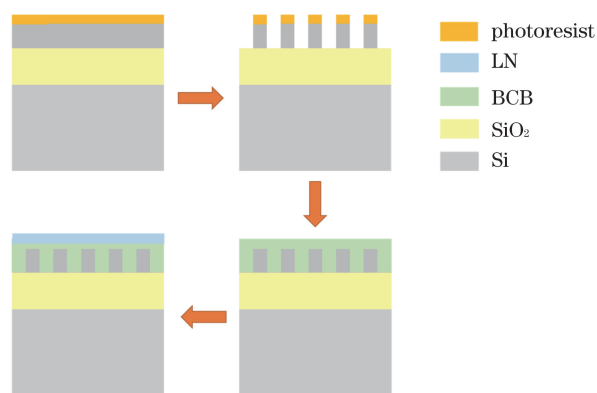


图 6 制备工序

Fig. 6 Fabrication process

对影响垂直耦合器性能的三个关键参数即 SWG 占空比、拉锥波导尖端尺寸以及耦合器与 LN 波导的相对位置进行了容错仿真分析,结果如图 7 所示。图 7(a)所示为 SWG 占空比对耦合效率的影响,可以看出,当占空比小于 0.6 时,即每个周期内

高折射率硅材料长度小于 180 nm 时,耦合效率均可达到 95% 以上。图 7(b)所示为耦合效率随着拉锥波导尖端尺寸变化的关系曲线,可以得出,拉锥波

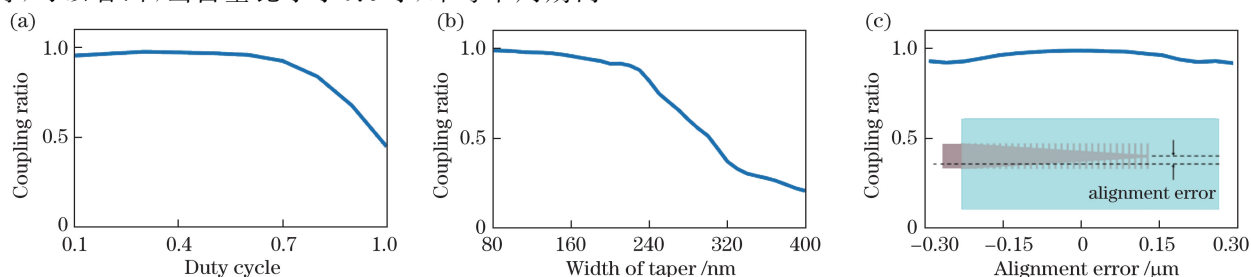


图 7 工艺误差容限分析。(a) 占空比变化对耦合率的影响;(b) 拉锥波导尖端尺寸对耦合率的影响;(c) 波导错位对耦合率的影响,其中插图示意了耦合器与 LN 波导的相对位置

Fig. 7 Tolerance analysis of process errors. (a) Coupling ratio versus duty cycle; (b) coupling ratio versus tip width of tapered waveguide; (c) coupling ratio versus misalignment, and position of coupler relative to LN waveguide indicated in inset

导尖端尺寸保持在 160 nm 以内范围时,耦合效率均可达到 95%。随着硅波导和 LN 波导之间错位距离的改变,垂直耦合器耦合效率的变化曲线如图 7(c)所示,由仿真结果可以得出,当所设计的耦合器的耦合效率为 95%时,错位容限为 ± 150 nm。通过以上分析可以看出,本文提出的垂直耦合器具有较好的工艺误差容限。

4 结 论

提出了一种基于亚波长光栅和拉锥波导的垂直光耦合器。通过优化设计,所提出的垂直光耦合器在 1.5~1.6 μm 波长范围内实现了大于 97%的耦合效率,并且器件长度只有 15 μm ,是传统的基于绝热拉锥波导的垂直耦合器尺寸的十分之一。此外,分析了垂直耦合器对亚波长光栅占空比、拉锥波导尖端尺寸以及波导错位的工艺容限,结果表明,当波导线宽容限为 80 nm,拉锥波导尖端尺寸容限为 80 nm,波导错位容限为 150 nm 时,所设计的耦合器的耦合效率均大于 95%。所提出的具有高集成度、高耦合效率的垂直光耦合器在高密度异质集成领域展现出了良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Xu Q F, Schmidt B, Pradhan S, et al. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator [J]. *Nature*, 2005, 435(7040): 325-327.
- [3] Li M F, Wang L, Li X, et al. Silicon intensity Mach-Zehnder modulator for single lane 100 Gb/s applications[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(2): 109-116.
- [4] Chmielak B, Waldow M, Matheisen C, et al. Pockels effect based fully integrated, strained silicon electro-optic modulator[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17212-17219.
- [5] Wooten E L, Kissa K M, Yi-Yan A, et al. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(1): 69-82.
- [6] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. *Nature*, 2018, 562(7725): 101-104.
- [7] Mercante A J, Shi S Y, Yao P, et al. Thin film lithium niobate electro-optic modulator with terahertz operating bandwidth[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14810-14816.
- [8] Rao A, Fathpour S. Compact lithium niobate electrooptic modulators[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(4): 1-14.
- [9] Liang F C, Li M, Wu D M. Optimized design of low driving and high modulation X-cut LiNbO₃ electro-optical modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0713001.
梁凤超, 李敏, 吴东岷. 低驱动、高调制 X-Cut 铌酸锂光电调制器的优化设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0713001.
- [10] Li Q Q, Zhang A L, Tian H M, et al. Design of tunable long-period waveguide grating coupler based on LiNbO₃ [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(3): 0323002.
李青青, 张爱玲, 田红苗, 等. 基于 LiNbO₃ 的长周期波导光栅可调谐耦合器的设计[J]. *光子学报*, 2017, 46(3): 0323002.
- [11] Weigel P O, Zhao J, Fang K, et al. Bonded thin film lithium niobate modulator on a silicon photonics platform exceeding 100 GHz 3-dB electrical modulation bandwidth[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 23728-23739.
- [12] He M B, Xu M Y, Ren Y X, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit·s⁻¹ and beyond[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(5): 359-364.
- [13] Halir R, Bock P J, Cheben P, et al. Waveguide sub-wavelength structures: a review of principles and applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(1): 25-49.
- [14] Cheben P, Bock P J, Schmid J H, et al. Refractive index engineering with subwavelength gratings for efficient microphotonic couplers and planar waveguide multiplexers [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(15): 2526-2528.
- [15] Bock P J, Cheben P, Schmid J H, et al. Subwavelength grating crossings for silicon wire waveguides[J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 16146-16155.
- [16] Benedikovic D, Cheben P, Schmid J H, et al. Subwavelength index engineered surface grating coupler with sub-decibel efficiency for 220-nm silicon-on-insulator waveguides[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22628-22635.
- [17] Zhang M, Ren J W, Chen W, et al. Design and analysis of photorefractive long-period waveguide grating coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0313002.

- 张明, 任建文, 陈文, 等. 光折变长周期波导光栅耦合器的设计和分析[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0313002.
- [18] Xu Y, Xiao J. Ultracompact and high efficient silicon-based polarization splitter-rotator using a partially-etched subwavelength grating coupler [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 27949.
- [19] Jacobsen K W, Norskov J K, Puska M J. Interatomic interactions in the effective-medium theory[J]. Physical Review B, 1987, 35(14): 7423-7442.
- [20] 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.
- [21] Lalanne P, Chavel P. Metalenses at visible wavelengths: past, present, perspectives [J]. Laser & Photonics Reviews, 2017, 11(3): 1600295.