基于光子晶体反射镜的刻蚀衍射光栅设计与制备

袁 配[1],王 玥[2],吴远大[2,3],安俊明[2,3],张家顺[2],祝连庆[1*]

(1. 北京信息科技大学 光纤传感与系统北京实验室,北京 100016;
2. 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室,北京 100083;
3. 中国科学院大学 材料与光电研究中心,北京 100049)

摘 要:刻蚀衍射光栅作为波分复用/解复用器件,有望在光通信系统中得到广泛应用。在基于顶层硅厚度为 220 nm 的绝缘体上硅材料上设计并制作了一种新型刻蚀衍射光栅,该刻蚀衍射光栅引入六角晶格空气孔型光子晶体作为其反射镜。模拟结果显示,相较于传统的阶梯光栅反射镜的刻蚀衍射光栅,光子晶体反射镜的刻蚀衍射光栅在理论上可有效降低器件的制作工艺难度以及插入损耗, 同时可以实现器件偏振的保持。随后仅利用一步电子束光刻工艺及一步电感耦合等离子体刻蚀工艺制作了该光子晶体反射镜的刻蚀衍射光栅。测试结果表明:该光子晶体反射镜的刻蚀衍射光栅片上损耗为 9.51~11.86 dB,串扰为 5.87~8.72 dB,后续可通过优化工艺条件和优化输出波导布局,进一步提高器件的性能。

关键词:刻蚀衍射光栅; 光子晶体; 硅基光子学; 波分复用/解复用
中图分类号:TN256 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0916005

Design and fabrication of an etching diffraction grating based on photonic crystal reflection mirrors

Yuan Pei[1], Wang Yue[2], Wu Yuanda[2,3], An Junming[2,3], Zhang Jiashun[2], Zhu Lianqing[1*]

(1. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China; 2. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 3. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As wavelength division multiplexing/de-multiplexing devices, etching diffraction gratings (EDGs) are promising to be widely used in the optical communication systems. A new kind of EDG was designed and fabricated on silicon on insulator (SOI) platform with top silicon layer of 220 nm, which applied hexagonal-lattice air-hole photonic crystals as its reflection mirrors. Simulated results show that compared with the traditional EDGs based on stepped-grating reflection mirrors, the EDG based on photonic-crystal reflection mirrors could reduce the fabrication difficulty, decrease the insertion loss and realize the polarization maintenance theoretically. Afterwards, the EDG based on photonic-crystal reflection mirrors was fabricated with one step of deep ultraviolet lithography (DUVL) and one

收稿日期:2019-04-11; **修订日期**:2019-05-21
基金项目:高等学校学科创新引智计划(先进光电子器件与系统学科创新引智基地 D17021)
作者简介:袁配(1989-),女,博士,主要从事 SOI 基无源光波导器件方面的研究。Email: yuanpei@semi.ac.cn
通讯作者:祝连庆(1963-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事生物医学检测技术及仪器、医疗机器人、光纤传感与系统、光电精密测量技术与装置等方面的研究。Email: zhulianqing@sina.com

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

step of inductively coupled plasma (ICP) etching. The measured results show that the insertion loss of the device is 9.51-11.86 dB, and the crosstalk of it is 5.87-8.72 dB, which can be further improved by optimizing its fabrication process and optimizing the location of the output waveguides.

Key words: etching diffraction grating; photonic crystal; silicon photonics; wavelength division multiplexing/de-multiplexing

0 引 言

随着全球互联网的快速发展,光纤到户、家庭办公的迅速崛起,人们对骨干网、局域网的通信容量和传输速率的需求也在急剧增长,波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术[1-2]可以将多个多长信号复用到一根光纤或波导中进行传输,利用光纤的巨大带宽,实现光纤系统的扩容、提高传输效率,是目前扩展光通信网络带宽的关键技术,是实现大容量、高速率光纤通信系统的必然选择。波分复用/解复用器是波分复用光纤通信系统中最关键的器件,主要分为空间光学型和平面光波导型两类,其中空间光学型波分复用/解复用器带宽大、通带平坦、对准容差大、损耗低,但是这种器件是由分立器件串联而成,随着通道数的增大,其封装难度和封装成本会急剧增加,因此这种波分复用/解复用器一般只适用于通道数目较小的情况。而平面光波导型波分复用/解复用器是利用平面加工工艺制作,通道扩展潜力大,并且可以与其他光器件如衰减器、探测器、调制器等实现集成而得到广泛研究。阵列波导光栅(Array Waveguide Grating, AWG)[3-6]和刻蚀衍射光栅(Etched Diffraction Gratings, EDG)[7-8]是最为典型的平面光波导型波分复用/解复用器件,其中,EDG 具有更小的器件尺寸,集成度高,适合于实现大通道数、窄通道间隔的波分复用/解复用功能。但是传统的基于反射式阶梯光栅的 EDG 对光栅面的制作工艺要求极高,光栅面必须深刻蚀、陡直且光滑。刻蚀衍射光栅一般要求把平板波导刻透,即刻蚀深度较大,但这样容易引起较大的侧壁倾角和侧壁粗糙度,大的粗糙度会增大器件的损耗及串扰,同时如果光栅面倾斜角度较大,在反射时就会引起基模损耗并激发高阶模,从而增大器件的插损和串扰。另外,光栅介质和空气之间的菲涅耳反射也会导致插入损耗的增加。目前,一般会在光栅面上镀上金属膜以达到全反射的目的,来增加光栅面的反射率,降低损耗,这就增加了工艺的复杂性。另外,高折射率差 EDG 具有较强的偏振相关性,器件的偏振控制也是目前亟待解决的技术难题之一。

文中基于硅光子技术[9-10],在顶层硅厚度为 220 nm 的绝缘体上硅(Silicon on Insulator, SOI)材料上制作了 8 通道、信道间隔 200 GHz 的刻蚀衍射光栅,该刻蚀衍射光栅中引入了六角晶格空气孔型光子晶体作为反射镜,理论上可以有效降低器件的制作工艺难度并降低器件的插入损耗,同时可以实现器件偏振的保持。

1 设计与制备

刻蚀衍射光栅波分复用/解复用器一般由输入波导、输出波导、自由传播平板波导区(Free Propagation Region, FPR)及刻蚀光栅组成,输入波导和输出波导位于自由传播平板波导的同一侧,自由传播区另一侧与刻蚀衍射光栅相连,且自由传播区采用罗兰圆结构,图 1(a)中,从罗兰圆(其半径为 R)上发出的任意两条光线(其长度为 r_{i1} 和 r_{i2})经光栅圆(其半径为 $2R$)反射或衍射(其长度为 r_{o1} 和 r_{o2})后,仍聚焦于罗兰圆同一点上。含有多波长的光信号通过输入波导进入自由传播平板波导,并发生衍射,衍射光到达刻蚀光栅区发生光的衍射和反射,随后不同波长的光在不同的输出位置相干涉,最终经由输出波导输出。光在器件中传输时,只有那些满足光程差时波长整数倍的光才能产生干涉加强,在输出波导中稳定输出。因此可得到相应的干涉条件为:

$$r_{i1}+r_{o1}-r_{i2}-r_{o2}=\frac{K_m\lambda_0}{n_{eff0}} \tag{1}$$

即:

$$r_{i1}+r_{o1}-\sqrt{(r_{i1}\cdot\cos\alpha-y)^2+(r_{i1}\cdot\sin\alpha-x)^2}-\sqrt{(r_{o1}\cdot\cos\beta-y)^2+(r_{o1}\cdot\sin\beta-x)^2}=\frac{Km\lambda_0}{n_{eff0}} \tag{2}$$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中：n_{eff0} 为基模的有效折射率；α 为入射角；β 为出射角，在自准直的情况下，$\alpha \approx \beta$；m 为衍射级数；λ_0 为基模的波长。K 为 A 点与 P 点之间所间隔的光栅周期数。

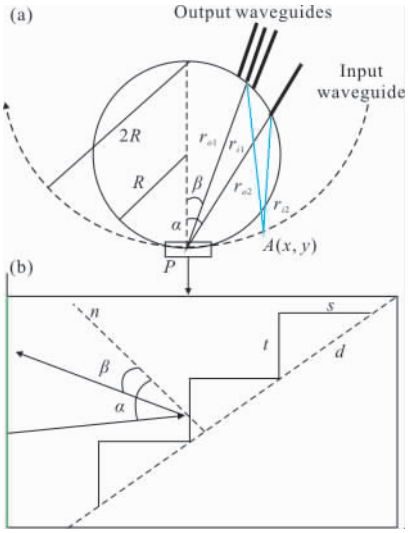


图 1 基于反射式阶梯光栅 EDG 的原理图(a)及其阶梯光栅的结构(b)

Fig.1 Schematic diagram of the EDG based on reflection stepped grating (a) and its structure of the stepped grating

根据几何关系，x 与 y 满足：

$$\sqrt{x^2+(2R-y)^2}=2R \tag{3}$$

传统的刻蚀光栅一般采用反射式阶梯光栅，如图 1(b)所示。阶梯宽度为 t，高度为 s，光栅常数为 $d=\sqrt{s^2+t^2}$，相应的光栅方程为：

$$\lambda_0=\frac{n_{eff0}\cdot\sin\alpha+n_{eff0}\cdot d\cdot\sin\beta}{m} \tag{4}$$

假设衍射级数为 $m+1$、波长为 λ_0 的衍射光束的衍射方向，与衍射级数为 m、波长为$(\lambda_0+\delta\lambda)$的衍射光束的衍射方向相同，则 EDG 波分解复用器的自由波谱范围 (Free Spectral Range, FSR) 可以表示为[11]：

$$FSR=\delta\lambda=\frac{\lambda_0}{m}\cdot\left[1-\frac{m+1}{m}\cdot\left(1-\frac{n_g}{n_{eff0}}\right)\right]^{-1} \tag{5}$$

定义线性色散度(Linear Dispersion, LD)为单位波长偏移对应的输出波导位置偏移量，则线性色散度可由以下公式计算得出[11]：

$$LD=\frac{2R}{\cos\beta}\cdot\frac{m}{d}\cdot\frac{n_g}{n_{eff0}^2}=\frac{2R}{\lambda_0}\cdot\frac{(\sin\alpha+\sin\beta)}{\cos\beta}\cdot\frac{n_g}{n_{eff0}^2} \tag{6}$$

式中：n_g 为群折射率。EDG 波分复用/解复用器的基本结构参数可由公式(1)~(6)计算得出。

在传统的采用反射式阶梯光栅的 EDG 中，光栅与空气界面存在较大的菲涅耳反射损耗，通常会在光栅面上镀金属膜以达到全反射的目的，来增加光栅面的反射率，降低损耗，但是这就增加了工艺的复杂性。因此文中在基于反射式阶梯光栅 EDG 的设计基础上，提出了一种光子晶体反射镜代替普通硅-空气界面的新型光子晶体反射型 EDG，如图 2 所示，该光子晶体型反射镜采用六角晶格空气孔型光子晶体模型，其中 SOI 顶层 Si 厚度为 220 nm，折射率为 3.478；埋层 SiO_2 厚度为 2 μm，折射率为 1.445，在顶层 Si 上制作的六角晶格空气孔型平板光子晶体，晶格常数 a=400 nm，空气孔半径 r=0.3 a=120 nm。

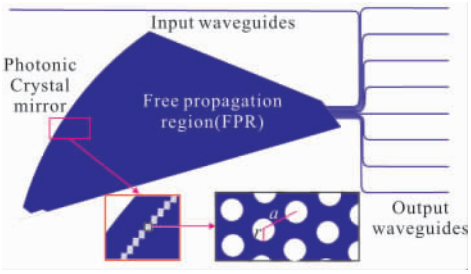


图 2 基于六角晶格空气孔型光子晶体反射镜的 EDG 结构示意图

Fig.2 Structural diagram of the EDG based on hexagonal-lattice air-hole photonic-crystal reflection mirrors

设计得到的光子晶体型 EDG 的各项结构参数如表 1 所示。

表 1 基于光子晶体反射镜的 EDG 的结构参数

Tab.1 Structural parameters of the EDG based on photonic-crystal reflection mirrors

Parameters	Symbols	Value
Central wavelength/nm	λ_0	1 550
Channel spacing/nm	$\Delta\lambda$	1.6
Input/output channel number	N_i/N_o	1/8
Grating constant/μm	d	9.45
Angle of incidence/emergence/(°)	α/β	39/35
Diffraction order	m	21
Lattice constant/mm	a	400
Radius of the air hole/mm	r	120

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

另一方面，具有高折射率差的波导具有很强的偏振相关特性，波导中各模式的有效折射率与波导宽度的变化关系如图 3 所示，可以看出在 EDG 的自由传播区，TE 模与 TM 模的有效折射率相差很大，这将引入很大的偏振相关损耗(Polarization Dependent Loss, PDL) 和偏振相关波长(Polarization Dependent Wavelength, PDW)，因此在 EDG 的设计中，必须对其偏振态进行控制。

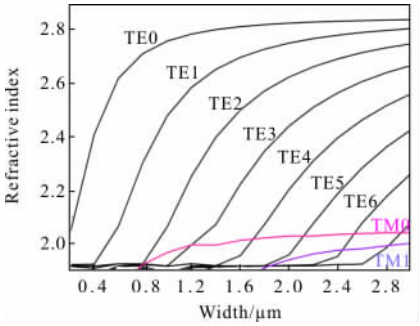


图 3 不同波导宽度下，波导中各偏振态的有效折射率

Fig.3 Effective refractive index of waveguides with different polarizations under different waveguide widths

图 4 是利用平面波展开 (Plane Wave Expansion, PWE)法模拟的六角晶格空气孔型平板光子晶体 TE 和 TM 模的能带图，从图中可以看出，在光子晶体正面入射时，存在明显的 TE 模禁带，禁带的归一化频率 $a/\lambda=(0.217-0.284)$，对应的禁带波长范围为 1.408~1.843 μm，而 TM 模没有禁带，用这一结构的光子晶体作为 EDG 反射面代替普通硅-空气界面反射，理论上可实现 TE 模 100%的全反射，而 TM 模则全部透射，这一结构不仅减小了 EDG 的损耗，而且可有效滤除 TM，实现 EDG 偏振保持。

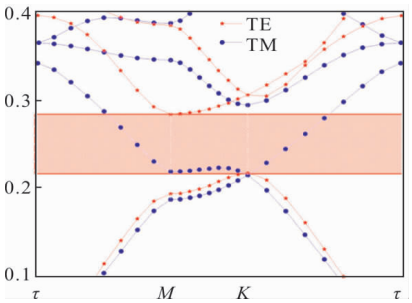


图 4 六角晶格空气孔型光子晶体 TE 和 TM 模的能带图

Fig.4 Energy band diagram of the TE and TM modes in hexagonal-lattice air-hole photonic crystals

采用时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD) 模拟了反射式阶梯光栅型 EDG 和光子晶体反射结构 EDG TE 模式响应，如图 5(a)和图 5(b)所示，从图中可以明显看到光子晶体反射结构的 EDG 有较强的输出响应。

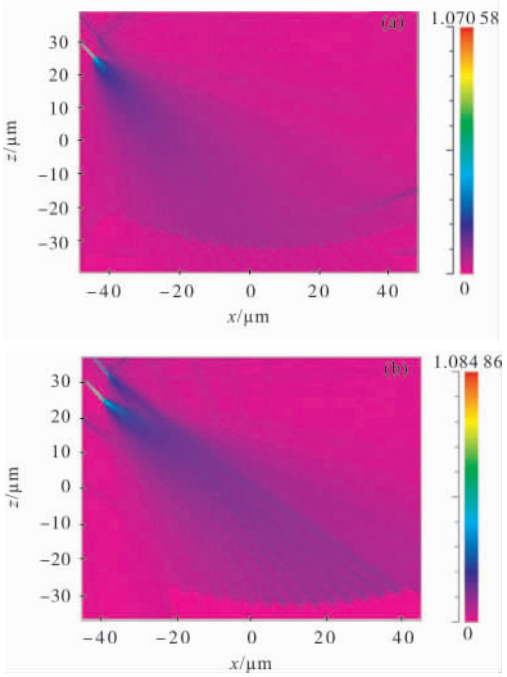
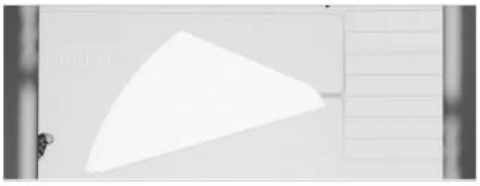


图 5 基于阶梯光栅反射镜(a)和光子晶体反射镜(b)的 EDG 的光场传输

Fig.5 Optical field propagation of EDGs based on stepped-grating reflection mirror (a) and photonic-crystal reflection mirror (b)

基于光子晶体反射镜的刻蚀衍射光栅制备仅需要一步电子束光刻和一步 ICP 刻蚀工艺即可实现，制备的 EDG 器件显微和扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)照片如图 6 所示，其中图 6(a)为制作的 EDG 整体结构显微照片，图 6(b)为输入/输出波导与 FPR 连接处显微照片，图 6(c)为光子晶体反射镜扫描电镜照片。器件整体尺寸为 1.1 mm×0.5 mm。



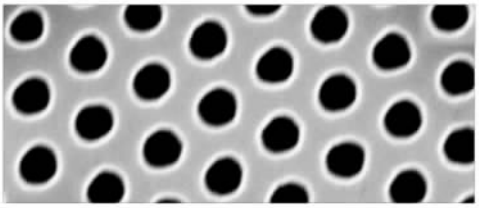
(a) 制作的EDG 整体结构显微照片

(a) Overall-structure micrograph of the fabricated EDG

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(b) 输入/输出波导与 FPR 连接处显微照片

(b) Micrograph of the junction between the input/output waveguides and the FPR



(c) 光子晶体反射镜扫描电镜照片

(c) SEM photograph of the photonic crystal reflection mirror

图 6 制备的刻蚀衍射光栅显微和扫描电镜照片

Fig.6 Micrographs and the SEM photographs of the fabricated EDG

2 测试与分析

测得的基于光子晶体反射镜的刻蚀衍射光栅光谱图如图 7 所示，从图中可以看出，该刻蚀衍射光栅的插入损耗为 9.51~11.86 dB，串扰为 5.87~8.72 dB。

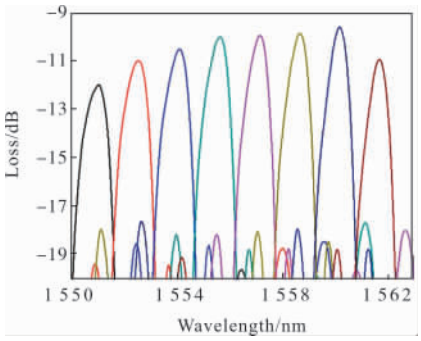


图 7 基于光子晶体反射镜的刻蚀衍射光栅测试光谱

Fig.7 Measured spectra of the EDG based on photonic-crystal reflection mirror

从测试结果可以看出，该EDG 具有很大的串扰，这一方面是由于工艺误差造成，另一方面，则是由于多模的存在造成的[12]。公式(4)仅为基模的光栅方程，对于 n 阶模，其光栅方程为：

$$\lambda_n=\frac{n_{effn}\cdot d\cdot\sin\alpha+n_{effn}\cdot d\cdot\sin\beta}{m} \tag{7}$$

从而可以得到：

$$\lambda_0-\lambda_n=\frac{(n_{eff0}-n_{effn})\cdot\lambda_0\cdot\sin\beta}{n_{eff0}\cdot(\sin\alpha+\sin\beta)} \tag{8}$$

EDG 的自由传播区存在多模，同一波长、不同阶数的光模式由于其折射率不同，将会在不同的输出波导位置聚焦并输出，从而引发附加串扰。解决这一问题，后续一方面可以通过继续改善工艺条件，减小工艺误差，另一方面可以优化输入输出波导的布局，使得 $\beta\approx0°$，根据公式(8)，可得 $\lambda_0-\lambda_n=0$，即在同一输出波导位置，基模和高阶模光信号将会具有相同的波长，从而，光传输过程中激发的高阶模将不会引入附加的损耗及串扰。

3 结 论

文中在基于顶层硅厚度为 220 nm 的 SOI 上设计并制作了一种新型的刻蚀衍射光栅，相较于传统的采用反射式阶梯光栅作为反射镜的 EDG，文中中的 EDG 通过引入六角晶格空气孔型光子晶体作为其反射镜，在理论上可以有效降低器件的制作工艺难度并降低器件的插入损耗，同时可以实现器件偏振的保持。随后文中仅利用一步深紫外光刻工艺及一步 ICP 刻蚀工艺制作了该器件，测试结果表明，该基于光子晶体反射镜的刻蚀衍射光栅片上损耗为 9.51~11.86 dB，串扰为 5.87~8.72 dB，后续可以通过优化工艺条件和优化输出波导布局，进一步提高器件的性能。

参考文献：

[1] Tan Ying, Wu Hao, Dai Daoxin. Silicon-based hybrid (de)multiplexer for wavelength-/polarization-division-multiplexing [J]. ***Journal of Lightwave Technology***, 2018, 36(11): 2051-2058.

[2] Xu Siyu, Zhang Zhaojian, He Xin, et al. Plasmonic triple-wavelength demultiplexing structure based on metal-insulator-metal waveguides side-coupled with nanoring cavities [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 48(2): 0221001.

[3] Yuan Pei, Wang Yue, Wu Yuanda, et al. Design and fabrication of wavelength tunable AWGs based on the thermo-optic effect [J]. ***Chinese Optics Letters***, 2018, 16(1): 010601.

[4] Imran A B, Doerr Chiristopher R. Interleaved silicon

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

nitride AWG spectrometers [J]. ***IEEE Photonics Technology Letters***, 2019, 31(1): 90-93.

[5] Li Kaili, Zhang Jiashun, An Junming, et al. Design and fabrication of 25-channel 200 GHz AWG based on Si nanowire waveguides [J]. ***Optoelectronics Letters***, 2017, 13(1): 241-244. (in Chinese)

[6] Liu Zhiming, Chen Kunfeng, Gao Yesheng, et al. Determination problem of mode effective refractive index in the free propagation region of AWG [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42 (8): 2146-2149. (in Chinese)

[7] Chen Xin, Wu Aimin, Qiu Chao, et al. Etching diffraction grating of silicon substrate and design of flatten [J]. ***Laser Technology***, 2017, 41 (3): 361-366. (in Chinese)

[8] Shi Zhimin, He Jianjun, He Sailing. A hybrid diffraction method for the design of etched diffraction grating demultiplexers [J]. ***Journal of Lightwave Technology***, 2005, 23(3): 1426-1434.

[9] Wang Xiaoxin, Liu Jifeng. Emerging technologies in Si photonics [J]. ***Journal of Semiconductors***, 2018, 39(6): 061001.

[10] Li Ming, Zhang Lin, Tong Limin, et al. Hybrid silicon nonlinear photonics [J]. ***Phtonics Research***, 2018, 6(5): B13-B22.

[11] Brouckaert Joost, Bogaerts Wim, Dumon Pieter, et al. Planar concave grating demultiplexer fabricated on a nanophotonic silicon-on-insulator platform [J]. ***Journal of Lightwave Technology***, 2007, 25(5): 1269-1275.

[12] Feng Dazeng, Qian Wei, Liang Hong, et al. Novel fabrication tolerant flat-top demultiplexers based on etched diffraction gratings in SOI [C]//2008 5th IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2008: 386-388.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net