

非对称包层调制型布拉格光栅

刘春娟, 杨超山*, 连 乐, 徐晓瑞, 胡延伟

兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 为了优化光栅性能, 提出一种基于互补金属氧化物半导体兼容性制造工艺的非对称包层调制光栅结构。该结构通过调整光栅齿的位置来改变波导中传输光的耦合率, 最终达到改善光栅的反射带宽、消光比、输出功率等性能参数的目的。利用耦合模理论分析了该改进型光栅结构对光栅耦合率、反射带宽及输出性能的影响, 同时利用有限元方法进行了数值仿真。结果表明, 该改进型光栅的反射带宽由 0.9 nm 减小到 0.3 nm, 消光比的绝对值从 29.2 dB 增加到 35.1 dB, 耗散到包层的光功率从 5.99×10^{-5} W 减小到 3.13×10^{-5} W; 该改进型光栅器件性能得到改善。

关键词 光栅; 硅基光学; 布拉格光栅; 耦合模理论; 有限元数值仿真; 窄带反射

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0505002

Cladding-Modulation Bragg Grating with Asymmetric Structure

Liu Chunjuan, Yang Chaoshan, Lian Le, Xu Xiaorui, Hu Yanwei

School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract In order to optimize the performance of gratings, one cladding-modulation grating with an asymmetric structure is proposed based on the complementary metal oxide semiconductor compatibility fabrication technique. By adjusting the position of grating teeth, the coupling efficiency of the transmission light in the waveguide is altered, which eventually achieves the improvements of reflection bandwidth, extinction ratio and output power of the grating. The effect of the improved grating structure on coupling coefficient, reflection bandwidth and output performance of gratings is analyzed by using the coupled mode theory, and the numerical simulation is conducted as well with the finite element method. The results show that the reflection bandwidth of the improved grating is reduced from 0.9 nm to 0.3 nm, the absolute value of the extinction ratio is increased from 29.2 dB to 35.1 dB, and the optical power dissipating in the claddings is decreased from 5.99×10^{-5} W to 3.13×10^{-5} W. The performance of the improved grating device is improved.

Key words gratings; silicon-based optics; Bragg grating; coupled mode theory; finite element numerical simulation; narrow-band reflection

OCIS codes 050.2770; 350.2770; 350.5500; 350.6090

1 引 言

互补金属氧化物半导体(CMOS)制造工艺使得硅基光学器件在长距离通信、短距离互连光学器件等领域中具有优异的大规模集成特性^[1-3]。光栅是硅基光学器件的重要组成部分之一,新型的微纳米级光栅器件结构紧凑、功能多样、制作方便^[4],被广泛应用于基于绝缘体上硅平台上,如滤波器、耦合器、光学开关、波分复用器、传感器等^[5-9]。根据制造工艺的不同,光栅分为板型、条形和包层调制型,其中基于浅刻蚀技术的板型光栅虽能较好地控制光栅的耦合强度,但受制造工艺的局限,平板波导的厚度不能被精确控制;条形布拉格光栅可由 CMOS 兼容全刻蚀工艺制成,但光栅侧壁发生的微扰动会引起光栅耦合强

收稿日期: 2016-11-30; **收到修改稿日期:** 2017-01-26

基金项目: 甘肃省自然科学基金(1610RJZA046)、甘肃省建设科技攻关项目(216094)、甘肃省高等学校科研项目(216132)

作者简介: 刘春娟(1973—),女,硕士,副教授,主要从事半导体器件和集成光学器件方面的研究。

E-mail: liuchj@mail.lzjtu.cn

* **通信联系人.** E-mail: 15140690350@163.com

度较大的变化,很难实现窄带反射(即反射带宽小于 1 nm);采用单步光刻技术的片上侧壁调制的布拉格光栅已经实现,这是较早提出的调制型光栅结构^[10-11]。因此,需要对光栅结构和参数进行改进,实验表明,包层调制型光栅比其他两种类型的光栅能够更好地控制窄带反射^[12],但该结构传输效率和反射带宽还需进一步优化。

本文在分析布拉格光栅工作原理的基础上,提出了一种非对称型包层调制布拉格光栅(ACMBG)结构。通过改进光栅的结构来实现对光信号的调制,该改进后的结构不仅具有更灵活的调制特性,而且具有带宽窄、消光比大、散射功率小等优点,这使得光栅能更好地应用到光信号处理以及改善光学器件性能中。

2 设 计

2.1 理论分析

光栅的理论分析方法主要包括耦合模理论(CMT)^[13]、微扰理论、劳尔德法等,其中应用最广泛的是 CMT。CMT 将电磁波在周期结构中的传播归结为电磁波在不同传播模式之间的耦合,通过求解相应的耦合模微分方程,得到电磁波在周期结构中的传播特性。波导中的横向电场可以用本征模式的线性叠加来表示:

$$E(x, y, z) = \sum_m A_m(z) E_m(x, y) \exp(-j\beta_m z), \quad (1)$$

式中 m 为波导中的传输模式数(m 取整数); A_m 为展开式系数,代表各本征模沿 z 方向各点的振幅,分析时考虑了波导中正方向和反方向两种传输模式; E_m 为相应的横向电场分布;传播常数 β_m 不仅与波长有关,还受光栅有效折射率 n_{eff} 的影响,其表达式为 $\beta_m = (2\pi/\lambda)n_{\text{eff}}$ 。

若波导中引入了微扰,原本正交的模式就会因光栅周期性的微扰而相互影响,模式间发生耦合。根据 CMT,波导中由微扰引起的耦合率变化可表示为^[13]

$$\kappa = \frac{\kappa_0}{2n_{\text{eff}}} \frac{\iint \Delta n^2(x, y) E^2(x, y) dx dy}{\iint E^2(x, y) dx dy}, \quad (2)$$

式中 $E(x, y)$ 表示芯层波导电场分布, κ_0 是自由空间的波数, Δn 是光栅结构变化引起的空间的折射率的变化量。由(2)式可知,折射率的变化量 Δn 受到光栅齿位置的影响,令 ACMBG 结构中光栅齿位置的变化为 Δx , 通过改变 Δx 使 Δn 发生改变,从而实现对光栅结构耦合率的调制。

采用的改进型光栅结构的变量参数为 Δx , Δx 的改变会引起折射率的微扰,当 Δx 增加时耦合率 κ 会减小,进而实现了弱耦合调制^[14]。耦合率的变化会引起光栅的反射带宽 $\Delta\lambda$ 的变化, $\Delta\lambda$ 的表达式为^[15-17]

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_B^2}{\pi n_g} \sqrt{\kappa^2 + (\pi/L)^2}, \quad (3)$$

式中 λ_B 是布拉格波长, n_g 是群折射率, L 为光栅的总长度。由(3)式可知,在其他参数一定的条件下,带宽 $\Delta\lambda$ 随耦合率 κ 的增大而增大,随光栅长度 L 的增大而减小,因此可增加光栅的长度或减小耦合强度使光栅具有较好的反射带宽。考虑到 L 的值受到制造工艺的限制,且现有的包层调制型光栅结构光栅齿的宽度较大,引起的折射率变化大,很难实现窄带反射。因此,采用光的弱耦合方法,即减小 κ 值来实现对传输光信号的调制,进一步减小反射带宽 $\Delta\lambda$ 。

2.2 结构设计

根据 CMT 可知,光栅的结构或参数的变化会引起波导中的模式互相耦合,进而引起光栅的耦合强度及有效折射率的变化。因此,可以改变光栅结构对光栅中传输光的调制,从而改善光栅性能^[12]。在非对称侧壁调制型布拉格光栅(条形光栅)结构中,光栅格的位置不对称,实现了特定波长范围内的多阻带,且半峰全宽、消光比等参数得到了改善,这些性能的改进使得该型光栅广泛应用于光信号处理以及改善光学器件性能中^[14]。提出的改进型结构受此启发,如图 1 所示,芯层的宽度为 W ,包层的宽度为 W_2 ,芯层与包层的距离为 D ,光栅齿的宽度为 W_g ,器件的厚度为 H ,两种结构的俯视图分别如图 1(a)、(b)所示,立体结构图分别如图 1(c)、(d)所示。

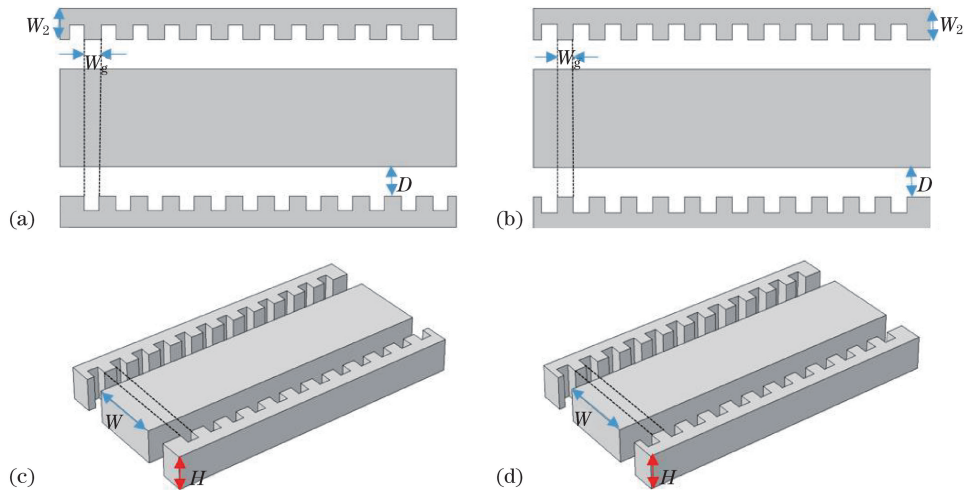


图 1 两种光栅结构。(a) 非对称结构俯视图；(b) 对称结构俯视图；(c) 非对称结构立体图；(d) 对称结构立体图
Fig. 1 Two kinds of grating structures. (a) Top view of asymmetric structure; (b) top view of symmetric structure; (c) stereogram of asymmetric structure; (d) stereogram of symmetric structure

3 仿真结果分析与讨论

采用 COMSOL 公司的基于有限元方法的 COMSOL Multi-physics 软件对非对称结构与对称结构的光栅进行仿真。将 220 nm 厚的芯层波导嵌入 2 μm 厚的氧化层中组成光栅，芯层波导的宽度 W 为 500 nm，光栅齿的宽度 W_g 为 70~80 nm，芯层和包层之间的距离 D 为 230 nm，对称型结构包层总宽度为 160 nm，非对称型结构包层总宽度为 170 nm，光栅的总长度 L 为 2 μm ，输入光信号的波长为 1560 nm，光栅齿的周期为 320 nm。

利用软件模拟光信号在光栅芯层传播时输入端口的电场分布和光信号在波导内部的横向耦合图，如图 2 所示。由图可知，在相同参数条件下，非对称结构中芯层传输光强度比对称结构的增强了，而传输光波在包层中的耗散减少了。

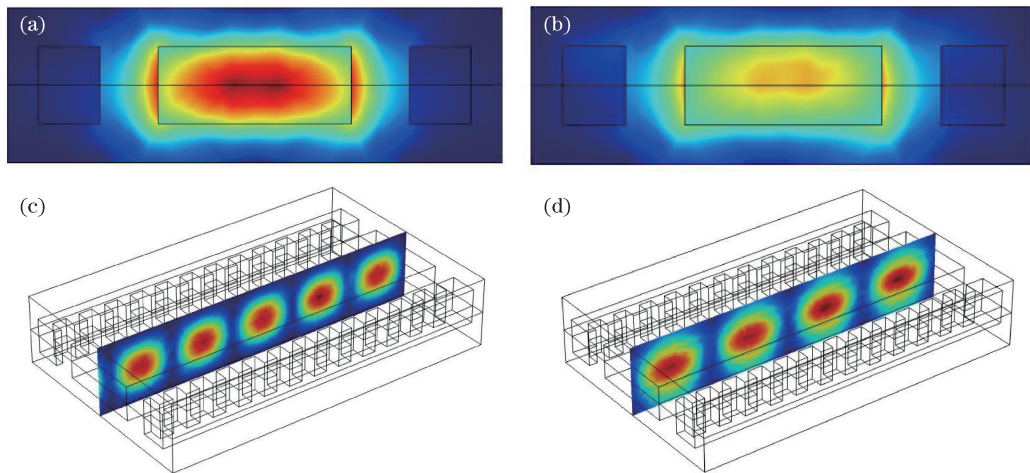


图 2 (a)非对称结构和(b)对称结构输入端口电场分布；(c)非对称结构和(d)对称结构波导内部横向模场分布
Fig. 2 Electric field distribution at input port in (a) asymmetric and (b) symmetric structure; transverse mode field distribution in waveguide with (c) asymmetric and (d) symmetric structure

仿真了 ACMBG 结构中光栅齿位置变化对波导中传输光的影响，结果如图 3 所示，其中 $d = (\Delta x - 74)$ nm，传输光的波长在 1675~1700 nm 之间变化。结果表明，当 $d = -74$ nm 时，光栅为对称结构，此时反射带宽为 2.63 nm；当 $d = 0$ nm 时，光栅为非对称结构，此时反射带宽减小到 0.83 nm。非对称结构实现了光栅的窄带反射，进一步提高了光子器件的滤波特性和灵敏度。

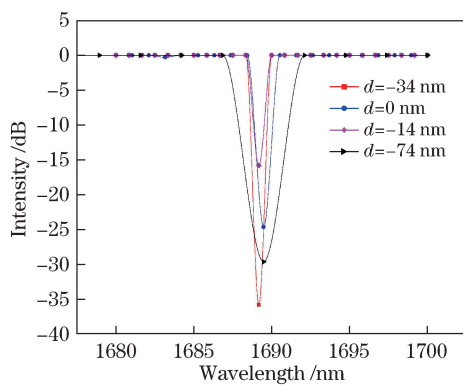


图 3 输出端口光强度和调制位置之间的关系

Fig. 3 Relationship between light intensity at output port and modulation position

仿真过程中对两种光栅结构的光耗散进行了对比,如图 4 所示。由图可知,在反射光谱最强的波长范围内,对称结构的光耗散最大值为 5.99×10^{-5} W,而非对称结构的只有 3.13×10^{-5} W,改进型结构的光耗散功率减小了 50% 以上。这是由于包层的调制将散射到包层的光集中到芯层中,提高了光的传输效率。

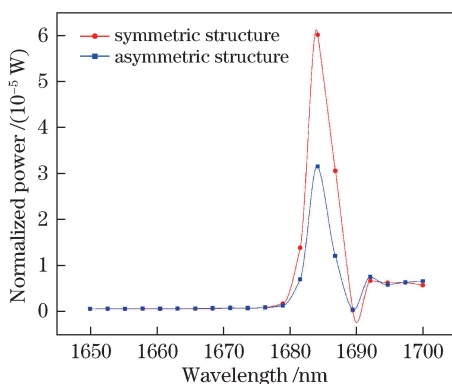


图 4 归一化光耗散功率

Fig. 4 Normalized light dissipation power

两种结构的输出端口光强度特性曲线如图 5 所示。当波长在 1688~1691 nm 范围内变化时,非对称结构的消光比为 -35.1 dB,而对称型的为 -29.2 dB,改进型结构的消光比提高了 6 dB 之多,而消光比越大,说明器件的滤波特性越好、灵敏度越高。在优化其他参数后,非对称结构的反射带宽减小到 0.3 nm,而对称型的为 0.9 nm,非对称结构的反射带宽只有对称结构的 1/3。在相同条件下,分析了两种结构芯层的有效折射率,结果表明,结构的改进对包层的散射光进行了调制,而对芯层的光传输基本不产生影响,如图 6 所示。

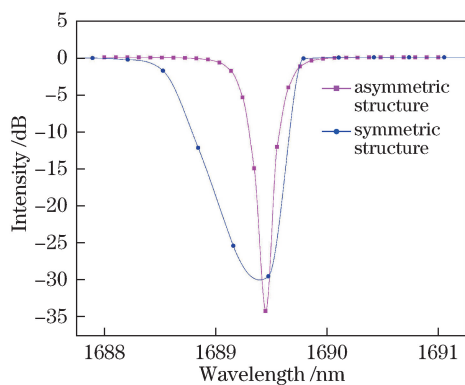


图 5 输出光强对比

Fig. 5 Comparison of output light intensities

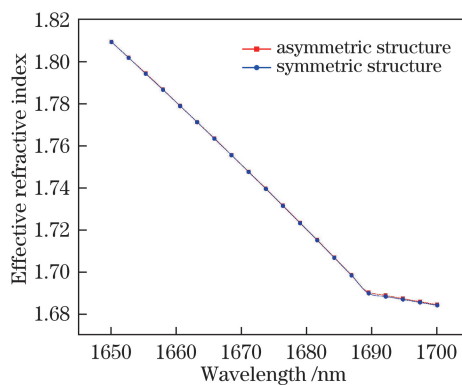


图 6 有效折射率对比

Fig. 6 Comparison of effective refractive indexes

光栅的透射谱和反射谱是光在光栅中传播效率和路径的反映,对两种结构的光栅的透射谱和反射谱进行了仿真分析,如图 7 所示,可以看出,在相同的波段内,非对称型光栅具有更窄的反射带宽,消光比更大,因此非对称结构可以进一步改善光学器件的性能。

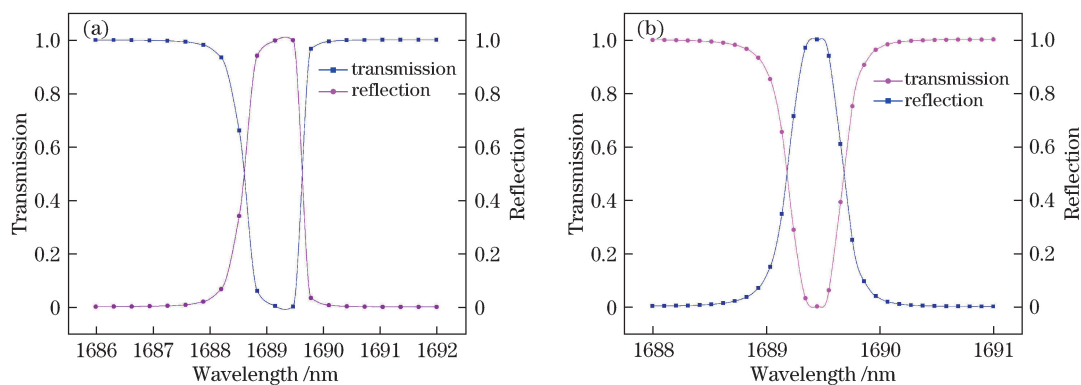


图 7 光栅的透射谱和反射谱。(a) 对称结构;(b) 非对称结构

Fig. 7 Transmission and reflection spectra of gratings. (a) Symmetric structure; (b) asymmetric structure

4 结 论

为了进一步优化光栅的性能,基于 CMOS 兼容性制造工艺,提出了一种 ACMBG 结构,定量分析了 ACMBG 结构对耦合率、有效折射率以及光传输路径的影响。根据 CMT 分析可知,通过外加调制,减小耦合率,可以实现窄带反射。因此,该改进型结构调节了光栅包层光栅齿的相对位置,调制了光栅的耦合强度,最终优化了光栅的性能参数,如反射带宽、消光比、效率等。通过仿真得出,在相同波长条件下,光栅的反射带宽由 0.9 nm 减小到 0.3 nm ,消光比的绝对值从 29.2 dB 增加到 35.1 dB ,散射到包层的光信号耗散功率从 $5.99 \times 10^{-5}\text{ W}$ 减小到 $3.13 \times 10^{-5}\text{ W}$ 。仿真结果表明,该结构不但可以实现窄带反射,而且提高了光栅的传输效率。利用以上特性可以改善光学器件的性能,如光学开关、滤波器等;也可以将以上特性应用到光学信号处理中,如多通道上下载滤波光学电路、对模式敏感的光学电路等。

参 考 文 献

- [1] Fainman Y, Nezhad M P, Tan D T, *et al.* Silicon nanophotonic devices for chip-scale optical communication applications [Invited][J]. Applied Optics, 2013, 52(4): 613-624.
- [2] Hochberg M, Harris N C, Ding R, *et al.* Silicon photonics: The next fabless semiconductor industry[J]. IEEE Solid-State Circuits Magazine, 2013, 5(1): 48-58.
- [3] Mekis A, Gloeckner S, Masini G, *et al.* A grating-coupler-enabled CMOS photonics platform[J]. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(3): 597-608.
- [4] Yariv A, Yeh P. Photonics: Optical electronics in modern communications[M]. 6th ed. Oxford: Oxford University Press, 2006.
- [5] Othonos A. Fiber Bragg gratings[J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(12): 4309-4341.
- [6] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. Optics Letters, 1993, 18(16): 1370-1372.
- [7] Wang Qiaoni, Yang Yuanhong, He Jun, *et al.* Study of fiber Bragg grating regeneration process and regeneration model[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0306001.
王巧妮, 杨远洪, 何俊, 等. 光纤布拉格光栅再生过程及模型研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0306001.
- [8] Jang Yi, Liu Li. Optical fiber Bragg sensors based on ordinary WDC and LED[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(1): 21-23.
江毅, 刘莉. 基于波分耦合器的光纤布拉格光栅传感器[J]. 光学学报, 2004, 24(1): 21-23.
- [9] Hu Jinghua, Liu Xiuhong, Zhao Jijun, *et al.* Design and analysis of optical filter based on subwavelength high-contrast grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 050502.
胡劲华, 刘秀红, 赵继军, 等. 一种亚波长高折射率差光栅滤波器的设计与分析[J]. 激光与光电子学进展, 2016,

53(5): 050502.

- [10] Ikeda K, Nezhad M, Fainman Y, *et al.* Wavelength selective coupler with vertical gratings on silicon chip[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(20): 201111.
- [11] Tan D T, Ikeda K, Saperstein R E, *et al.* Chip-scale dispersion engineering using chirped vertical gratings[J]. Optics Letters, 2008, 33(24): 3013-3015.
- [12] Hung Y J, Lin K H, Wu C J, *et al.* Narrowband reflection from weakly coupled cladding-modulated Bragg gratings[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 22(6): 1-7.
- [13] Yariv A. Coupled-mode theory for guided-wave optics[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1973, 9(9): 919-933.
- [14] Puckett M W, Vallini F, Grieco A, *et al.* Multichannel Bragg gratings in silicon waveguides with asymmetric sidewall modulation[J]. Optics Letters, 2015, 40(3): 379-382.
- [15] Kogelnik H. Theory of dielectric waveguides[M]//Integrated Optics. Heidelberg: Springer, 1975: 13-81.
- [16] Haus H A, Schmidt R V. Approximate analysis of optical waveguide grating coupling coefficients[J]. Applied Optics, 1976, 15(3): 774-781.
- [17] Visser T D, Demeulenaere B, Haes J, *et al.* Confinement and modal gain in dielectric waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(5): 885-887.