

双边调制布拉格波导光栅的特性研究

张爱玲 孙钦芳* 闫广拓

天津理工大学计算机与通信工程学院 天津市薄膜电子与通信器件重点实验室,
教育部通信器件与技术工程研究中心, 天津 300384

摘要 设计了一种一次性制备双边调制布拉格波导光栅的新方法。通过周期性改变波导的宽度实现波导光栅的空间调制,其优势是利用波导的制备工艺将波导及光栅一次性制备,工艺简单。基于转移矩阵理论,研究了该结构的波导光栅反射谱特性与波导宽度、波导宽度差、光栅占空比及波导宽度变化的形状的关系。结果表明,双边调制比锯齿调制 3 dB 带宽明显变大,最大反射率稍有增大。当波导宽度差不变时,随波导宽度增大,最大反射率和零值带宽都随之减小。当波导宽度不变时,随波导宽度差增大,最大反射率和零值带宽都随之增大。当波导宽度与波导宽度差均不变时,光栅占空比为 1/2 时最大反射率最高,零值带宽最大。且波导宽度差足够大时,可通过改变占空比来改变零值带宽。波导变化的形状对波导光栅的反射谱性能影响较小。

关键词 光通信; 布拉格波导光栅; 双边调制; 转移矩阵理论; 反射谱

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.060603

Characteristics of the Double-Side Modulation Waveguide Bragg Grating

Zhang Ailing Sun Qinfang Yan Guangtuo

Tianjin Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Communication Devices and Technology Engineering Research Center of the Ministry of Education, School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

Abstract A new preparation method of the double-side modulation Bragg waveguide grating by one step is proposed. In the structure, spatial modulation of the waveguide grating is achieved by periodically changing the width of the waveguide. The advantage of this structure is that waveguide and grating are achieved at the same time by using a simple waveguide fabrication technology. According to transfer matrix theory, the relationship between the reflection spectrum characteristics of this structure and the waveguide width, the difference of waveguide width, the duty cycle of gratings, the changes of the waveguide in the shape is studied. Results show that 3 dB bandwidth of grating with double-side modulation is wider than that of grating with corrugated modulation. At the same time, the maximum reflectivity is increased slightly. When the difference of waveguide width is fixed, the maximum reflectivity and bandwidth decrease while the waveguide width increases. In addition, when the waveguide width is fixed, the maximum reflectivity and bandwidth increase while the waveguide width increases. When both the waveguide width and its difference are both fixed, the maximum reflectivity and bandwidth achieve these maximums at the duty cycle of 1/2. Furthermore, the bandwidth can be controlled by changing the duty cycle when the difference of waveguide width is large enough. And the waveguide shape change has a small impact on the reflection spectrum properties of waveguide grating.

Key words optical communications; Bragg waveguide gratings; double-side modulation; transfer matrix theory; reflection spectrum properties

OCIS codes 060.4510; 350.2770; 230.7370

收稿日期: 2016-01-18; 收到修改稿日期: 2016-01-21; 网络出版日期: 2016-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61377075)

作者简介: 张爱玲(1973-),女,博士,教授,主要从事光通信器件方面的研究。

E-mail: alzhang07@163.com

* 通信联系人。E-mail: sunqinfang10@163.com

1 引言

光纤光栅由于其具有高反射率和波长选择性在光纤通信及光纤传感方面有着广泛的应用^[1-2]。光纤光栅的调谐通常是基于弹光效应(应力)和热光效应(温度),其调谐速度慢,只能实现谐振波长毫秒级的调谐^[3-4]。

波导光栅易大规模集成与生产,可实现实时调谐,因而近年来受到广泛关注^[5-6]。波导光栅在材料选择上具有多样性和多功能性,目前利用半导体^[7-9]、聚合物^[10-12]、无机晶体^[13-14]等材料制备的波导光栅已有报道。利用聚合物制备的波导光栅,可实现谐振波长纳米级的快速调谐,利用无机晶体制备的波导光栅,其调谐速率更快。其中,短周期的布拉格波导光栅由于其周期较小,制备工艺更加复杂也更具挑战性。

布拉格波导光栅结构主要有两种类型,折射率调制的布拉格波导光栅和空间调制的布拉格波导光栅。对于折射率调制的布拉格波导光栅,主要利用材料的光折变效应,引起折射率沿波导轴向周期性变化形成布拉格波导光栅。2007年, Kobayashi 等^[10]利用双光束干涉在聚硅烷波导上成功制作周期为 499 nm 的布拉格光栅,光栅反射谱具有 0.4 nm 的窄带宽。对于空间调制的布拉格波导光栅,主要利用反应离子刻蚀在波导表面形成空间调制的皱阶布拉格波导光栅。2003年, Wong 等^[12]利用电子束直接在环氧天然树脂的聚合物波导上制备周期为 500 nm 的皱阶布拉格光栅,当其波导光栅蚀刻深度为 10 nm,光栅长度为 5 mm 时,最大反射率达到 99%, 3 dB 带宽约为 0.8 nm。2010年, Ghomid 等^[14]利用聚焦离子束在钛扩散铌酸锂晶体上制备周期为 1.05 μm 的皱阶布拉格光栅,其反射率达到 95%, 线宽超过 100 nm。

上述两种类型的波导光栅虽然能够获得较好的光栅性能,但其波导和光栅是用两种工艺分别制备的,制备工艺复杂。本文设计了一种一次性制备双边调制布拉格波导光栅的方法,利用波导宽度周期性变化形成空间调制的波导光栅。该结构可利用制备波导的工艺将波导及光栅一次性制备完成。利用转移矩阵理论,对双边调制的布拉格波导光栅的性能进行分析,研究了波导宽度变化及其形状对布拉格光栅反射谱的影响。

2 理论分析

本文设计的双边调制的布拉格波导光栅的结构如图 1 所示,以铌酸锂晶片为基底,利用钛扩散技术制备。它由宽度分别为 w 及 $w+2\Delta w$ 的波导周期性排列形成空间调制的波导光栅,其中,宽度为 $w+2\Delta w$ 的波导长度为 a (栅区),宽度为 w 的波导长度为 b (非栅区),则光栅周期为 $\Lambda = a + b$, n_1 为波导层折射率, n_2 为包层折射率, N 为光栅的周期数。皱阶布拉格波导光栅是在掩埋式条形波导表面进行周期性刻蚀,使波导厚度发生周期性变化从而形成波导光栅结构,其结构示意图如图 2 所示^[14],其中, n_3 为覆盖层折射率, h 为波导层的厚度, Δh 为波导光栅的厚度差。对比两种结构,皱阶布拉格波导光栅通过在波导表面蚀刻形成,其蚀刻深度受制备工艺限制。双边调制布拉格波导光栅通过波导的宽度变化形成,不受刻蚀深度的限制,能够实现折射率变化较大的波导光栅。双边调制波导光栅的波导宽度可根据需要形成矩形、梯型、正弦型等多样化的形状,提高了波导光栅的设计灵活性。

根据有效折射率法^[15-18],将折射率渐变型的条形波导等效成沿 x 方向折射率非对称分布的平面波导 I 和沿着 z 方向的折射率对称分布的平面波导 II。通过波导的色散方程^[14],结合波导的厚度以及波导的单模传输条件求得平面波导 I 的有效折射率 n_{eff_1} ,再利用 n_{eff_1} 、波导的宽度以及波导的单模传输条件求得平面波

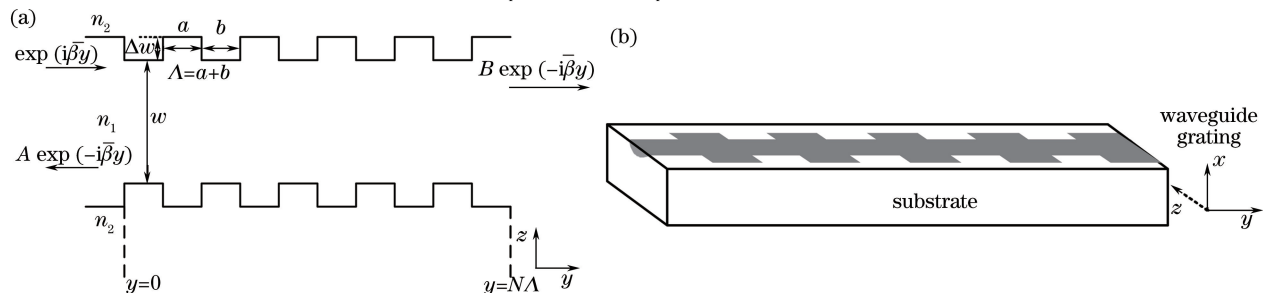


图 1 双边调制布拉格波导光栅结构。(a) 俯视图; (b) 立体图

Fig. 1 Structure of double-side modulation Bragg waveguide grating. (a) Top view; (b) stereogram

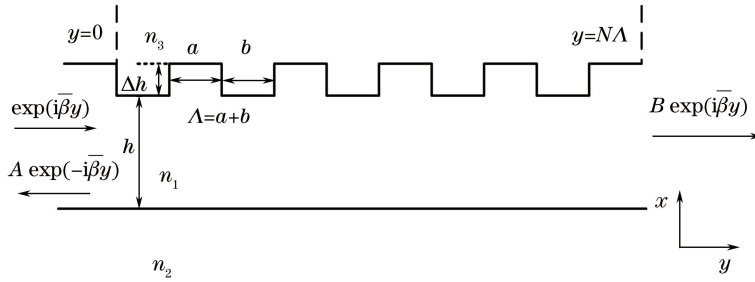


图2 皱阶调制布拉格波导光栅结构

Fig. 2 Structure of corrugated modulation Bragg waveguide grating

导 II 的有效折射率 $n_{\text{eff,II}}$, 波导光栅非栅区的有效折射率 $n_{\text{eff}_0} = n_{\text{eff,II}}$, 则波导光栅非栅区导模的传播常数 $\beta = k_0 n_{\text{eff}_0}$, 其中, k_0 为自由空间波数。波导的有效宽度 $w_{\text{eff}} = w + 2/(\beta^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2}$ 。根据微扰理论^[16], 在 $\Delta w \ll w$ 的情况下有

$$\Delta\beta = \frac{2\Delta w}{w_{\text{eff}}} \left(\frac{n_1^2 k_0^2}{\beta} - \beta \right), \quad (1)$$

式中 $\Delta\beta$ 为栅区与非栅区之间传播常数的改变量。由此得一个光栅周期内光栅的平均传播常数为

$$\bar{\beta} = \beta + \frac{\int_0^{D \cdot \Lambda} \Delta\beta dy}{\Lambda}, \quad (2)$$

式中 $D = a/\Lambda$ 为光栅的占空比, $\bar{\beta} = k_0 n_{\text{eff}}$, n_{eff} 为波导光栅的有效折射率 ($n_2 < n_{\text{eff}} < n_1$)。

根据(1)式可知波导宽度的变化将引起导模传播常数的变化, 使有效折射率随空间周期性变化, 因此图2中波导光栅可等效为有效折射率周期性变化的多层光学薄膜。设在边界 $z=0$ 时的入射波的振幅为 1, 反射波的振幅为 A , 在边界 $y=N\Lambda$ 时, 透射波的振幅为 B , 根据转移矩阵理论^[16-19], 则入射波、反射波和透射波之间的关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} B \exp(i\bar{\beta}y) \\ i\bar{\beta} B \exp(i\bar{\beta}y) \end{bmatrix} \Bigg|_{y=N\Lambda} = \mathbf{M}(N\Lambda) \begin{bmatrix} \exp(i\bar{\beta}y) + A \exp(-i\bar{\beta}y) \\ i\bar{\beta} [\exp(i\bar{\beta}y) - A \exp(-i\bar{\beta}y)] \end{bmatrix} \Bigg|_{y=0}, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{M}(N\Lambda)$ 为 N 个周期的转移矩阵。根据波导光栅的转移矩阵理论可得图1中双边调制的布拉格波导光栅的反射率为

$$R = AA^* = \frac{k_c^2 \sinh^2(Ns\Lambda)}{(\delta/\Lambda)^2 \sinh^2(Ns\Lambda) + s^2 \cosh^2(Ns\Lambda)}, \quad (4)$$

式中 s 表示衰减系数, 其表达式为

$$s^2 = k_c^2 - (\delta/\Lambda)^2, \quad (5)$$

其中 δ 为失谐量, 表示相对于相位匹配条件的微小偏差, 其表达式为

$$\delta = m\pi - \Lambda\bar{\beta}; \quad (6)$$

k_c 为波导光栅的分布反馈系数, 是一个周期内传播常数的相对变化, 表征波导布拉格光栅中前向波与后向波之间能量的交换速率, 其可以表示为^[18]

$$k_c = \frac{\Delta\beta}{\beta\Lambda} \sin[\beta\Lambda(1-D)]. \quad (7)$$

当入射波满足相位匹配条件 $\delta = m\pi - \Lambda\bar{\beta} = 0$ 时, 可得最大反射率为

$$R_{\text{max}} = \tanh^2(k_c \Lambda N), \quad (8)$$

其零值带宽为

$$\Delta\lambda = \frac{2\lambda}{\beta N \Lambda} \sqrt{(k_c \Lambda N)^2 + \pi^2}. \quad (9)$$

当双边调制波导变化形状不为矩形, Δw 的变化在一个周期 Λ 内满足 $\Delta w = f(y)$, 对(1)式进行修正得

$$\Delta\beta(y) = \frac{2}{w_{\text{eff}}} \left(\frac{n_1^2 k_0^2}{\beta} - \beta \right) \cdot f(y), \quad (10)$$

当波导宽度变化的形状如图 3、图 4 所示梯型和正弦型时, 将(10)式代入(2)式中得到梯型调制和正弦型调制布拉格波导光栅的传播常数 $\bar{\beta}$ 分别为

$$\bar{\beta}_{\text{trapezoid}} = \beta + \frac{2\Delta w}{w_{\text{eff}}} \left(\frac{n_1^2 k_0^2}{\beta} - \beta \right) \left(D - \frac{\Delta w \tan \theta}{\Lambda} \right), \quad (11)$$

$$\bar{\beta}_{\text{sine}} = \beta + \frac{4\Delta w D}{\pi w_{\text{eff}}} \left(\frac{n_1^2 k_0^2}{\beta} - \beta \right). \quad (12)$$

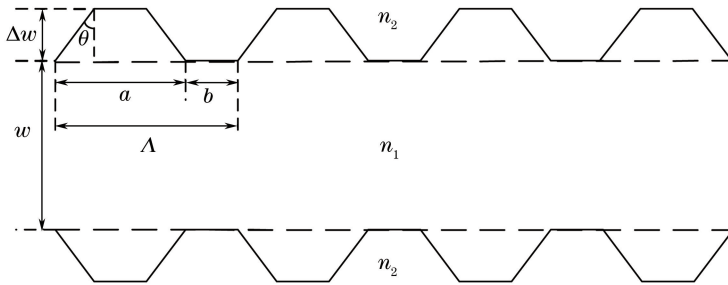


图 3 双边梯型调制布拉格波导光栅结构

Fig. 3 Structure of trapezoidal double-side modulation Bragg waveguide grating

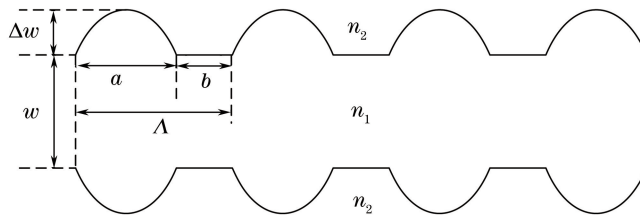


图 4 双边正弦型调制布拉格波导光栅结构

Fig. 4 Structure of sinusoidal double-side modulation Bragg waveguide grating

3 特性研究

以铌酸锂基片为基底, 利用钛扩散技术制备布拉格波导光栅, 实验室制备钛扩散波导的芯层折射率为 $n_1 = 2.1474$, 包层折射率为 $n_2 = 2.1374$, 波导区厚度约为 $4.8 \mu\text{m}$ ^[18]。根据波导传输理论, 当波导宽度为 $4 \sim 9 \mu\text{m}$ 时, 钛扩散铌酸锂满足单模传输条件。因此, 双边调制布拉格波导光栅的栅区与非栅区波导宽度应为 $4 \sim 9 \mu\text{m}$ 。

在模拟过程中, 双边调制的波导光栅的芯层和包层的折射率采用钛扩散制备波导实验测得的折射率, 为了获得中心波长 1550 nm 附近的反射峰, 波导光栅的周期取 $\Lambda = 362 \text{ nm}$, 光栅的周期数取 $N = 6500$ 。

双边调制与皱阶调制形状均为矩形时, 令双边调制的占空比 D 、波导宽度 w 和波导宽度差 $2\Delta w$ 与皱阶调制的占空比 D 、波导宽度 w 和波导厚度差 Δh 均保持一致。当 $D = 1/2$, $w = 7 \mu\text{m}$, $2\Delta w = \Delta h = 400 \text{ nm}$ 时, 两种调制的反射谱对比情况如图 5 所示。双边调制波导光栅反射谱比皱阶调制波导光栅反射谱的 3 dB 带宽明显增大, 最大反射率稍有增大, 零值带宽基本不变。

双边调制波导光栅的波导宽度差及波导宽度变化均对反射谱有影响。当波导宽度变化形状为矩形, 占空比为 $D = 1/2$, 波导宽度差为 $2\Delta w = 300 \text{ nm}$ 时, 不同宽度的波导光栅的反射率随波长失谐量的变化如图 6(a) 所示, 波导光栅的中心波长随着波导宽度 w 的增加向长波方向近似线性漂移如图 6(b) 所示。从图 6 可以看出波导宽度越大, 其最大反射率越小, 零值带宽也越小。

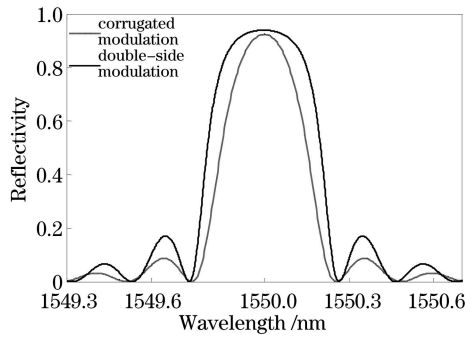
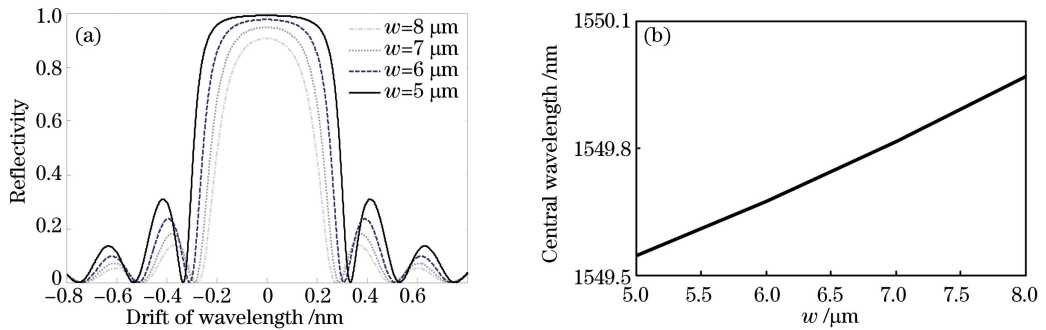
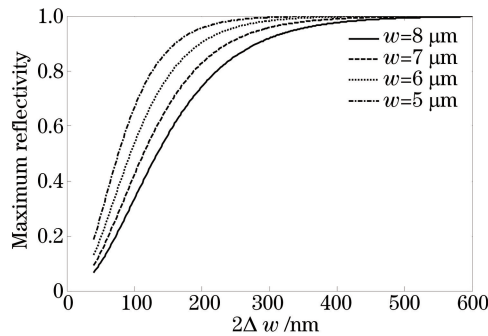


图 5 双边调制与皱阶调制反射谱对比

Fig. 5 Comparison of reflectivity of double-side modulation and corrugated modulation

图 6 $2\Delta w = 300$ nm 时不同 w 对反射性能的影响。(a) w 不同时波导光栅的反射率随波长失谐量的变化；(b) 波导光栅的中心波长随波导宽度 w 的变化Fig. 6 Effect of different w on reflectivity at $2\Delta w = 300$ nm. (a) Reflectivity ofwaveguide grating versus wavelength drift at different w ; (b) central wavelength of waveguide grating versus w

不同波导宽度时,最大反射率随波导宽度差的变化如图 7 所示。当波导宽度相同时,最大反射率随波导宽度差的增加而增大;随着波导宽度差的增大,最大反射率达到饱和。波导宽度越小,最大反射率随波导宽度差的增加速度越快,越容易达到饱和。当波导宽度差相同时,最大反射率随波导宽度的增加而减小。

图 7 w 不同时 $2\Delta w$ 对最大反射率的影响Fig. 7 Effect of $2\Delta w$ on maximum reflectivity at different w

当占空比 $D = 1/2$,波导宽度 $w = 5 \mu\text{m}$,不同 $2\Delta w$ 值的波导光栅的反射率随波长失谐量的变化如图 8(a)所示,波导光栅的中心波长随着波导宽度差 $2\Delta w$ 的增加向长波方向线性漂移,如图 8(b)所示。从图 8 可以看出,当 $2\Delta w$ 值增加时,最大反射率和零值带宽均增加。

不同波导宽度时,零值带宽随波导宽度差的变化如图 9 所示。当波导宽度相同时,零值带宽随波导宽度差的增加而增大,且增加速度逐渐变大。波导宽度越小,零值带宽随波导宽度差的增加速度越快。当波导宽度差相同时,零值带宽随波导宽度的增加而减小。

由于占空比改变同样会导致波导光栅的反射谱性能改变,当双边调制形状仍为矩形,波导宽度 $w = 7 \mu\text{m}$,

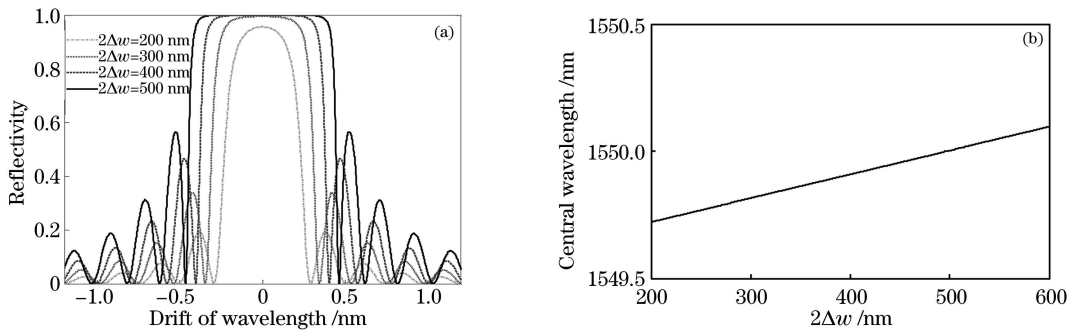


图 8 $w=5 \mu\text{m}$ 时 $2\Delta w$ 对反射性能的影响。(a) $2\Delta w$ 不同时波导光栅的反射率随波长失谐量的变化；(b) 波导光栅的中心波长随着波导宽度差 $2\Delta w$ 的变化
Fig. 8 Effect of $2\Delta w$ on reflectivity at $w=5 \mu\text{m}$. (a) Reflectivity of waveguide grating versus wavelength drift at different $2\Delta w$; (b) central wavelength of waveguide grating versus $2\Delta w$

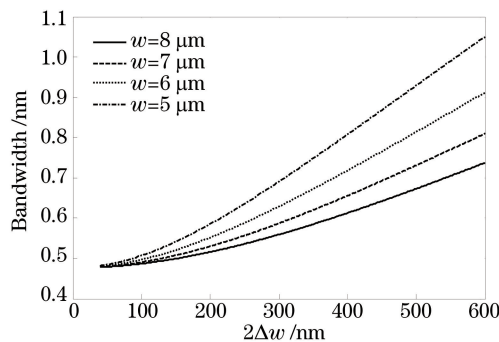


图 9 w 不同时 $2\Delta w$ 对零值带宽的影响
Fig. 9 Effect of $2\Delta w$ on bandwidth at different w

不同波导宽度差时,最大反射率随占空比的变化如图 10 所示。当波导宽度差相同时,占空比在 $0\sim 1/2$ 范围内,最大反射率随占空比的增大而增大;占空为 $1/2$ 时,最大反射率达到最大值;占空比在 $1/2\sim 1$ 范围内,最大反射率随占空比的增大而减小。波导宽度差越大,最大反射率随占空比变化的曲线顶部越平坦。

不同波导宽度差时,零值带宽随占空比的变化如图 11 所示。当波导宽度差相同时,占空比在 $0\sim 1/2$ 范围内,零值带宽随占空比的增大而增大;占空为 $1/2$ 时,零值带宽达到最大值;占空比在 $1/2\sim 1$ 范围内,零值带宽随占空比的增大而减小。波导宽度差越大,零值带宽随占空比的变化越明显。

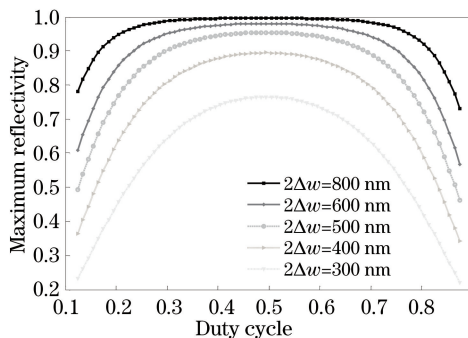


图 10 $2\Delta w$ 不同时占空比对最大反射率的影响
Fig. 10 Effect of duty cycle on maximum reflectivity at different $2\Delta w$

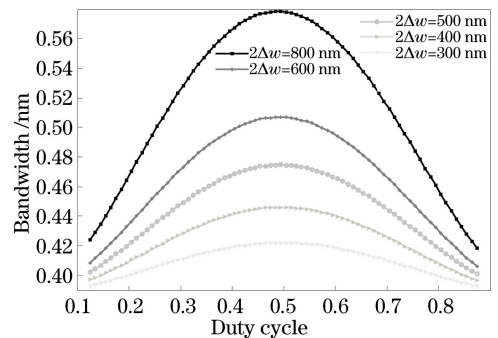


图 11 $2\Delta w$ 不同时占空比对零值带宽的影响
Fig. 11 Effect of duty cycle on bandwidth at different $2\Delta w$

结合图 10、图 11 可知,当波导宽度差越大时,最大反射率随占空比变化的曲线顶部越平坦,而零值带宽随占空比的变化却越明显,因此,在最大反射率曲线平坦处可通过占空比的改变实现对零值带宽的改变。以 $2\Delta w=500 \text{ nm}$ 和 $2\Delta w=800 \text{ nm}$ 为例,当 $2\Delta w=500 \text{ nm}$ 时,不同占空比条件下,反射率随波长失谐量的变

化曲线如图 12(a)所示;波导光栅的中心波长随着占空比的增加向长波方向线性漂移,如图 12(b)所示。波导宽度差 $2\Delta w = 500$ nm 时,最大反射率未达到饱和,改变占空比既改变最大反射率的大小又改变零值带宽的大小,且占空比近 1/2 处,最大反射率变化较平稳,零值带宽变化较大。当 $2\Delta w = 800$ nm 时,不同占空比条件下,反射率随波长失谐量的变化曲线如图 13 所示。波导宽度差 $2\Delta w = 800$ nm 时,最大反射率达到饱和,改变占空比仅改变零值带宽的大小。

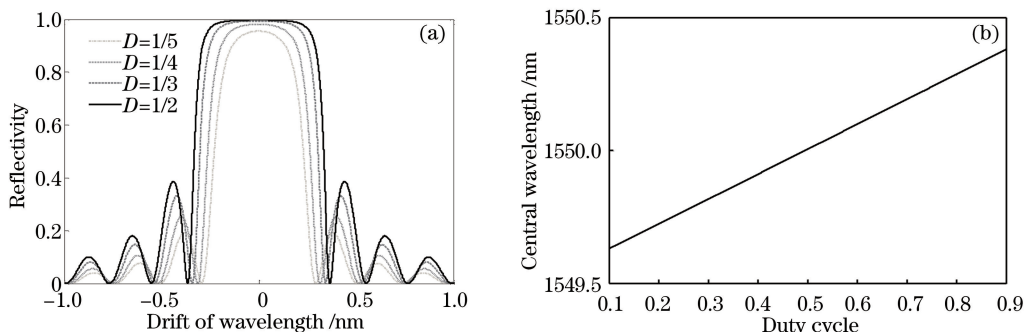


图 12 $2\Delta w = 500$ nm 时占空比对反射性能的影响。(a) 占空比不同时反射率随波长失谐量的变化曲线; (b) 波导光栅的中心波长随着占空比的变化曲线

Fig. 12 Effect of duty cycle on reflectivity at $2\Delta w = 500$ nm. (a) Reflectivity of waveguide grating versus wavelength drift at different duty cycles; (b) central wavelength of waveguide grating versus duty cycle

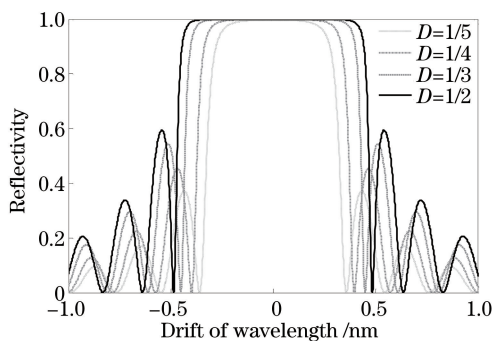


图 13 $2\Delta w = 800$ nm 时占空比对反射率的影响

Fig. 13 Effect of duty cycle on reflectivity at $2\Delta w = 800$ nm

由于双边调制的波导宽度变化形状还可以为梯型、正弦型,当波导宽度 $w = 7$ μm ,波导宽度差 $2\Delta w = 500$ nm,占空比 $D = 1/2$,梯型坡度 $\theta = 20^\circ$ 时,矩型、梯型和正弦型三种调制的反射率随波长失谐量的变化如图 14(a)所示,三种调制的反射谱如图 14(b)所示。波导变化的形状对最大反射率和零值带宽的影响较小。

只是由于传播常数 $\bar{\beta}$ 的轻微差异会导致谐振波长的轻微漂移。通过对比三种调制形状的反射谱性能,发现

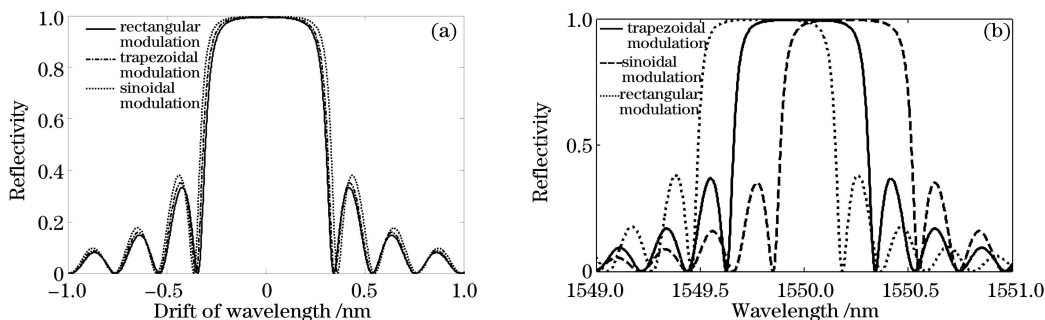


图 14 三种调制反射谱对比。(a) 反射率随波长失谐量的变化; (b) 反射谱

Fig. 14 Comparison of the reflection spectra of three modulations.

(a) reflectivity versus wavelength drift; (b) reflection spectra

4 结 论

设计了一种双边调制的布拉格波导光栅结构,通过周期性改变波导的宽度实现对布拉格波导光栅的空间调制。此结构中波导和光栅的一次性制备简化了制备工艺,缩短了制备时间;相较于皱阶调制,更容易实现较大的折射率变化,拥有较大的 3 dB 带宽。通过减小波导宽度或增加波导宽度差均可获得较大的最大反射率和较大的零值带宽,当波导宽度差足够大时还可通过控制占空比变化以控制零值带宽变化,且理论分析得出当波导宽度变化的形状不能严格遵照矩形时对布拉格波导光栅反射谱的影响较小。

参 考 文 献

- 1 He Shaoling, Hao Fenghuan, Liu Pengfei, *et al.*. High precision fiber Bragg grating pressure sensor with real-time temperature compensation[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0605003.
何少灵, 郝凤欢, 刘鹏飞, 等. 温度实时补偿的高精度光纤光栅压力传感器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0605003.
- 2 Kang Zexin, Sun Jiang, Ma Lin, *et al.*. Decoupling dual measurement sensor system of temperature and strain based on twin-core fiber cascaded with fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0506004.
康泽新, 孙 将, 马 林, 等. 基于双芯光纤级联布拉格光纤光栅的温度与应力解耦双测量传感系统[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0506004.
- 3 Runde D, Brunken S, Ruter C E, *et al.*. Integrated optical electric field sensor based on a Bragg grating in lithium niobate [J]. Appl Phys B: Lasers and Optics, 2006, 86(1): 91-95.
- 4 Qian Xiaoshi, Wu Hao, Wang Qin, *et al.*. Electro-optic tunable optical isolator in periodically poled LiNbO₃ [J]. Appl Phys, 2011, 109(5): 053111.
- 5 Hu Jinhua, Huang Yongqing, Duan Xiaofeng, *et al.*. Polarization-selective and wide-angle photodetector based on resonant waveguide grating[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0405005.
胡劲华, 黄永清, 段晓峰, 等. 基于谐振波导光栅的偏振选择广角光探测器[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0405005.
- 6 Wang Junjia, Ashrafi R, Rochette M, *et al.*. Chirped microwave pulse generation using an integrated SiP Bragg grating in a Sagnac loop[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2015, 27(17): 1876-1879.
- 7 Verbist M, Bogaerts W. Design of weak 1-D Bragg grating filters in SOI waveguides using volume holography techniques [J]. J Lightwave Technol, 2014, 32(10): 1915-1920.
- 8 Li Hongqiang, Gao Wentao, Li Enbang, *et al.*. Investigation of ultrasmall $1 \times N$ AWG for SOI-based AWG demodulation integration microsystem[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1-7.
- 9 Tu Xiaoguang, Chen Shaowu, Yu Jinzhong, *et al.*. Ultra-compact silicon-on-insulator optical filter based on sidewall Bragg grating[C]. Photonics Global@Singapore, IEEE, 2008: 1-4.
- 10 Kobayashi S, Sawada M, Suda T, *et al.*. Narrow tunable polysilane optical waveguide Bragg grating filters[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(6): 363-365.
- 11 Tian Liang, Wang Hui, Yue Yuanbin, *et al.*. High-order Bragg waveguide grating filter based on ultraviolet curable polymer[J]. Chinese Optics, 2013, 5(6): 677-681.
田 亮, 王 辉, 岳远斌, 等. 紫外固化型聚合物高阶布拉格波导光栅滤波器[J]. 中国光学, 2013, 5(6): 677-681.
- 12 Wong W H, Pun E Y B, Chan K S. Electron beam direct-write tunable polymeric waveguide grating filter[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15(12): 1731-1733.
- 13 Kroesen S, Horn W, Imbrock J, *et al.*. Femtosecond-laser inscribed, tunable, waveguide embedded Bragg gratings in lithium niobate[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2014: 1-2.
- 14 Ghoumid K, Ferriere R, Benkelfat B. Optical performance of Bragg gratings fabricated in Ti:LiNbO₃ waveguides by focused ion beam milling[J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(23): 3488-3492.
- 15 Ma Chunsheng, Liu Shiyong. Optical waveguide mode theory[M]. Jilin: Jilin University Press, 2006: 145-152.
马春生, 刘式慵. 光波导模式理论[M]. 吉林: 吉林大学出版社, 2006: 145-152.
- 16 Li Yuquan, Cui Min. Optical waveguide theory and technology[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2002: 152-165.
李玉权, 崔 敏. 光波导理论与技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002: 152-165.
- 17 Cao Zhuangqi. The transfer matrix method of optical waveguide[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000.

- 曹庄琪. 导波光学中转移矩阵方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- 18 Zhang Ailing, He Peidong, Pan Honggang, *et al.*. Design of electrically controlled double wavelength orthogonal polarization tunable filter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 072301.
张爱玲, 何培栋, 潘洪刚, 等. 电控可调谐的正交偏振双波长滤波器的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 072301.
- 19 Zhang Ailing, Li Yuxiang. Design of multi-parameter tunable Bragg waveguide grating filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(8): 0823001.
张爱玲, 李玉祥. 多参量可调谐的 Bragg 波导光栅滤波器设计[J]. *光子学报*, 2014, 43(8): 0823001.