

引用格式: YIN Xiaojie, WANG Jinghui, ZHENG Zhiyuan, et al. Characteristics of Low Coupling Coefficient, Narrow Linewidth, High Order Bragg Grating Based on SiO₂ Waveguide[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(4):0405001
尹小杰,王警辉,郑之远,等. 基于 SiO₂波导的低耦合系数、窄线宽、高阶布拉格光栅特性研究[J]. 光子学报, 2023, 52(4): 0405001

基于 SiO₂波导的低耦合系数、窄线宽、高阶布拉格光栅特性研究

尹小杰^{1,2}, 王警辉², 郑之远², 宋泽国³

(1 中国科学院半导体研究所 集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

(2 河南仕佳光子科技股份有限公司 河南省光电芯片与集成重点实验室, 鹤壁 458030)

(3 无锡芯光互连技术研究院有限公司, 无锡 214000)

摘要: 推导了布拉格光栅三维耦合系数公式, 构建了一种新型的波导型布拉格光栅三维数值模型, 并基于此设计制备出一种基于 SiO₂平面波导结构的低耦合系数、窄线宽、高阶布拉格光栅。从理论设计和试验验证两方面系统分析了布拉格光栅刻蚀深度及占空比对光栅耦合系数和线宽的影响, 并最终设计制备出了中心波长为 1 554.053 nm, 反射率为 -8.5 dB, 峰值半高宽为 89 pm 的 SiO₂波导结构布拉格光栅器件。本文设计制备的低耦合系数高阶布拉格光栅器件工艺简单, 成本低, 在滤波器、传感器及外腔窄线宽激光器领域中有广阔的应用前景。

关键词: 平面光波导; 二氧化硅; 低耦合系数; 高阶光栅; 峰值半高宽; 布拉格光栅

中图分类号: TN2

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235204.0405001

0 引言

布拉格光栅作为重要的选频元件在激光器^[1-5]、传感器^[6-9]以及滤波器^[10-11]等领域中有着广泛的应用。尤其是在窄线宽激光器中, 布拉格光栅是激光器压窄线宽的重要元件。布拉格光栅本身的线宽、反射率对窄线宽激光器的性能和可靠性有决定性的影响。从耦合腔窄线宽激光器稳定性考虑出发, 布拉格光栅本身线宽越窄, 增益芯片内腔模式与光栅纵模之间的模式竞争将得到越大的改善, 同时, 激光器波长的温度稳定性也将随之提高。因此, 光栅线宽越窄对于窄线宽激光器的性能越有益。

窄线宽激光器有内腔、外腔两种结构, 内腔结构又分为分布反馈式半导体激光器(Distributed-Feedback Laser Diode, DFB-LD), 分布布拉格反射式半导体激光器(Distributed-Bragg-Reflector Laser Diode, DBR-LD)。内腔窄线宽激光器中的布拉格光栅均采用半导体激光器的本征材料, 对于不同工作波长光栅材料主要分为 GaAs、InP 和 GaSb 等^[12-14]。在 DFB 激光器中大多采用低阶光栅, 以此改善由光栅所带来的器件损耗, 但低价光栅精度要求高, 制备工艺难度大。近年来, 为了降低器件制备的工艺难度, 也有文献报道采用高阶布拉格光栅来制备 DBR-LD 激光器, 中科院半导体所黄书山等^[14]制备了 16 阶和 24 阶 GaSb 基布拉格光栅 DBR-LD 激光器。外腔窄线宽激光器中目前最常见的技术方案为将增益芯片与无源光栅耦合, 通过外部布拉格光栅压窄线宽。无源光栅器件又有光纤布拉格光栅和平面波导光栅两种。近年来, 国内外对光纤布拉格光栅研究的较为深入, 取得了诸多成果。在工艺制备上, 低阶光纤布拉格光栅采用的工艺有激光直写^[15-16]和相位掩模法^[17-18]等方法, 这些制作工艺均存在工艺复杂, 制备成本高昂等缺点。而平面波导布拉格光栅具有与半导体工艺兼容、成本低等优点, 也开始受到研究人员的关注。有研究团队采用 Si₃N₄材料制备低阶波导布拉格光栅^[19], 其采用双侧弱折射率微扰来降低光栅的耦合系数, 实现光栅线宽的降低。但是

基金项目: 国家重点研究发展计划(No. 2019YFB2203004), 中国计算机互联技术联盟基金项目(No. CCITA Funding 20220103)

第一作者: 尹小杰, yinxiaojie@semi.ac.cn

收稿日期: 2022-11-05; 录用日期: 2022-12-13

<http://www.photon.ac.cn>

Si₃N₄材料体系工艺制备精度要求较高,且波导损耗大^[20-22],在外腔窄线宽激光器的应用中,过高的损耗会对输出功率有直接的影响,进而造成激光器线宽增加。

本文选用传输损耗较低的SiO₂^[23-24]波导材料,从光栅耦合理论出发,推导了布拉格光栅三维耦合系数公式,构建了一种新型的波导型布拉格光栅三维数值模型,并基于此设计制备出一种基于SiO₂平面波导结构的低耦合系数、窄线宽、高阶布拉格光栅器件。

1 光栅三维耦合系数模型构建

为了更好的匹配现有成熟的SiO₂波导生产工艺,布拉格波导光栅的参数设置为:波导包层折射率1.444 7,芯层折射率1.455 6,折射率差为0.75%。根据单模条件,如图1仿真结果,波导的横截面为6 μm × 6 μm。本文主要基于此单模条件进行布拉格光栅结构的设计。

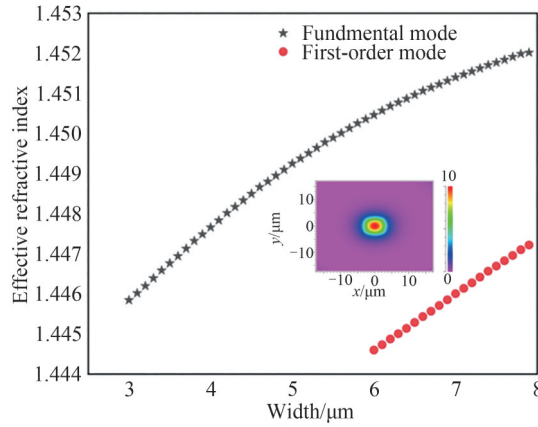


图1 波导单模条件仿真

Fig. 1 Simulation of waveguide single-mode condition

图2为布拉格光栅示意图,布拉格光栅是由高低折射率材料交替分布组成, d_1 为高折射率材料宽度, d_2 为低折射率材料宽度,占空比 $\alpha=d_1/\Lambda$ 。

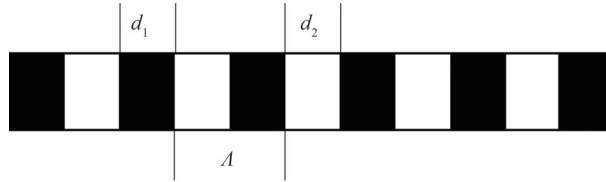


图2 布拉格光栅示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bragg grating

布拉格光栅对满足布拉格条件的波长有较高的反射率,可以对特定波长进行选择,布拉格条件如式(1)所示。

$$\Lambda = \frac{m\lambda_B}{2n_{\text{eff}}} \quad (1)$$

式中, Λ 为光栅周期, m 为反射光栅阶数, λ_B 为反射波长, n_{eff} 为波导芯区有效折射率。

从布拉格条件来看,光栅阶数 m 越大对应的光栅周期 Λ 越大,器件制备工艺难度越低,但是也会导致光栅长度更长,进而整体损耗也会随之增加;光栅阶数 m 减小使得对应的光栅周期 Λ 减小,导致制备工艺难度增加;因此,本文设计中,综合考虑现有工艺条件和器件尺寸,最终选择光栅阶数为11阶。

布拉格光栅的峰值半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)和反射率主要由光栅的耦合系数决定。FWHM^[25]、反射率与耦合系数之间的关系如式(2)、(3)所示。

$$\Delta\nu \sim \frac{c\kappa}{\pi n_{|q|}} \quad (2)$$

$$R = \tanh^2(|\kappa|L) \quad (3)$$

式中, $\Delta\nu$ 为 FWHM, c 为真空中光速, κ 为光栅耦合系数, $n_{|q|}$ 为光栅 q 阶的折射率, R 为光栅反射率, L 为光栅长度。

在外腔窄线宽激光器中, 布拉格光栅本身 FWHM 越窄, 增益芯片内腔模式与光栅纵模之间的模式竞争越有利, 其更有助于实现耦合腔窄线宽激光器波长稳定性。这是由于随着器件工作电流增加, 器件内部热量积聚会导致器件波长漂移, 光栅本身 FWHM 越窄, 其输出波长随温度的漂移范围也将越小。

影响光栅耦合系数主要参数有光栅的刻蚀深度和占空比。对此, 本文从耦合模式理论出发, 进一步推导影响光栅耦合系数的三维数值模型。

由于 TM-TM 和 TE-TE 模式间耦合极为相似, 两者的区别仅为各自的物理场不一样, 关于 TE、TM 模式间耦合系数在相关文献中均有讨论^[26-27]。本文主要针对 TE-TE 模式之间的耦合进行分析, 其耦合系数如式(4)所示。

$$\kappa_{\text{TE}_q\text{TE}_m} = \frac{\omega\varepsilon_0}{4} \int E_y^{(n)*}(x) \Delta\varepsilon_q(x) E_y^{(m)}(x) dx \quad (4)$$

式中, $\Delta\varepsilon_q$ 为 q 阶光栅引起的介电系数分布状态的变化量。

在折射率调制型光栅中, 光栅折射率变化会影响波导的介电系数, 折射率变化具体表达式如式(5)所示。

$$\Delta n(x, z) = \sum_{q \geq 0} \Delta n_q(x) \cos(qKz + \Phi_q) \quad (5)$$

式中, Δn_q 为单对 q 阶光栅折射率差。

当折射率在波导中周期性均匀分布时, $\Delta n_q(x) = \Delta n_q$, 式(5)则变为式(6)。

$$\Delta\varepsilon_q(x) = n_i \Delta n_{|q|} \exp(-j\Phi_{|q|}) \quad (6)$$

式中, n_i 为高折射材料, 在本论文中即为芯层折射率。

根据式(6), 推导出其耦合系数如式(7)所示。

$$\kappa_{\text{TE}_q\text{TE}_m} = \frac{\pi \Delta n_{|q|}}{\lambda} \frac{n_f \int_{-T}^0 E_y^{(n)} \cdot E_y^{(m)} dx}{\sqrt{N_m N_n} \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |E_y^{(n)}|^2 dx} \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |E_y^{(m)}|^2 dx}} \quad (7)$$

式中, N_m 、 N_n 为各种模的等效折射率。

对式(7)使用归一化条件

$$\left(\frac{\beta}{2\omega\mu} \right) \int |E_y|^2 dx = 1 \quad (8)$$

近似求得 TE 模式耦合系数如式(9)所示

$$\kappa = \frac{\pi}{\lambda} \Delta n_{|q|} \quad (9)$$

$$\Delta n_{|q|} = \frac{(n_0^2 - n_1^2)h(1 - \alpha)}{2n_1 H_{\text{eff}}} \quad (10)$$

式中, $\Delta n_{|q|}$ 为光栅的等效折射率变化量, 主要由光栅的刻蚀深度、占空比以及波导尺寸决定, 其中 n_0 、 n_1 分别为芯层折射率和包层折射率, h 为光栅刻蚀深度, H_{eff} 为波导芯区厚度、 α 为占空比。

最终推导出三维条件下耦合系数与光栅结构之间的关系如式(11)所示。

$$\kappa = \frac{\pi (n_0^2 - n_1^2)h(1 - \alpha)}{\lambda 2n_1 H_{\text{eff}}} \quad (11)$$

当光栅刻蚀深度从 1 μm 增加到 6 μm , 占空比从 0.5 增加到 0.8 时, 其光栅结构变化对应的耦合系数变化关系如图 3 所示。从图 3 可以看出, 在同一占空比条件下, 耦合系数随光栅刻蚀深度的增加而增加。当占空比在 0.5 条件下, 刻蚀深度从 1 μm 增加到 6 μm 时, 对应的耦合系数从 0.96 cm^{-1} 增加到 11 cm^{-1} , 耦合系数增加约 10 倍。这是由于在相同占空比下, 光栅的折射率变化量 $\Delta n_{|q|}$ 随光栅刻蚀深度的增加而增加, 因此光栅

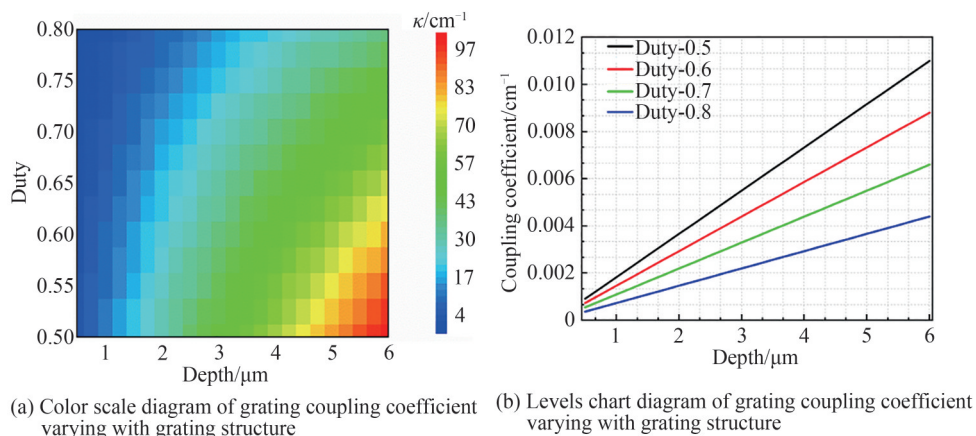


图3 光栅耦合系数与光栅结构关系

Fig. 3 Relationship between grating coupling coefficient and grating structure

的耦合系数也会随之变大。在同一刻蚀深度条件下,耦合系数随占空比的增大而减小。这是由于在相同刻蚀深度下,光栅的折射率变化量 Δn_{gr} 随光栅占空比增加而减小,最终导致光栅耦合系数的降低。

因此,可以得出结论:光栅的折射率变化量 Δn_{gr} 随着光栅刻蚀深度、占空比的变化而发生改变,而最终 Δn_{gr} 的变化将对光栅的耦合系数产生直接影响。

为进一步研究光栅耦合系数对光栅反射率和FWHM的影响,本文对不同耦合系数的光栅结构进行模拟。图4为光栅长度为6 mm时,不同耦合系数光栅结构的反射率和FWHM。从图4可以发现:

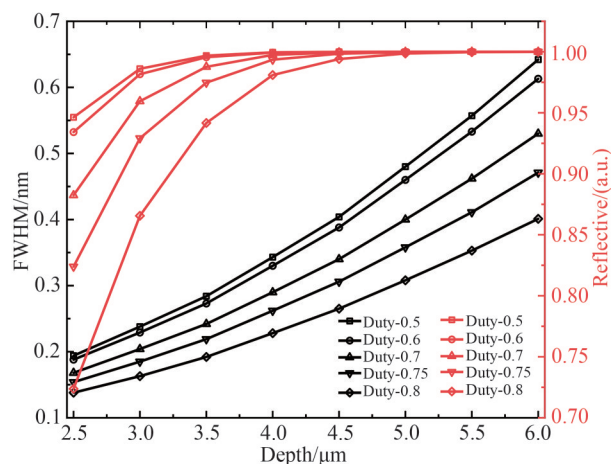


图4 不同耦合系数光栅的峰值半高宽与反射率

Fig. 4 FWHM and reflectivity of gratings with different coupling coefficients

1)在相同占空比下,光栅的FWHM随着光栅刻蚀深度增加而增加。但是,在浅刻蚀条件下不同占空比之间的FWHM相差不大,随着刻蚀深度的增加不同占空比条件下的FWHM差值逐渐增大。以光栅长度6 mm为例,在刻蚀深度 $2.5 \mu\text{m}$ 条件下,占空比为0.5和0.8所对应的FWHM分别为 0.213 nm , 0.159 nm ,相差 0.054 nm ;而当刻蚀深度增加到 $6 \mu\text{m}$ 后,占空比0.5、0.8条件下对应的FWHM分别为 0.661 nm 、 0.423 nm ,差值由原来的 0.054 nm 增加到 0.238 nm 。这是由于在浅刻蚀条件下不同占空比之间的耦合系数相差较小,从而导致FWHM变化也较小。

2)在相同的刻蚀深度下,光栅反射率随着光栅占空比的增加而减小。但是在浅刻蚀条件下,不同占空比结构的光栅反射率相差较大。在刻蚀深度为 $2.5 \mu\text{m}$,光栅长度为6 mm时,占空比为0.5和0.8所对应的反射率分别为85%、54%,占空比为0.8的光栅结构比占空比0.5的反射率降低了31%。而随着刻蚀深度的增加,两种占空比条件下的反射率差距逐渐减小,当刻蚀深度增加到 $6 \mu\text{m}$ 时,两者反射率均趋近于100%。

基于以上的理论分析和模拟,我们设计了一系列的波导光栅结构,如表1所示,通过后续的半导体工艺制备和测试来验证我们的理论模型。

表1 波导光栅结构参数

Table 1 Structure parameters of waveguide grating

Parameter	Value
Grating duty	0.5~0.8
Grating etch depth	3~6 μm
Grating length	6 mm

2 器件制备及测试分析

图5为波导光栅芯片制备工艺流程图,在1 mm厚Si基衬底上热氧化出折射率为1.444 7,厚度15 μm 厚的SiO₂下包层,然后通过生长掺杂的SiO₂芯层,芯层折射率1.455 6,厚度为6 μm ,折射率差为0.75%,然后经过光刻、刻蚀制备出光栅波导后再生长与下包相同的上包结构,完成器件的制备。

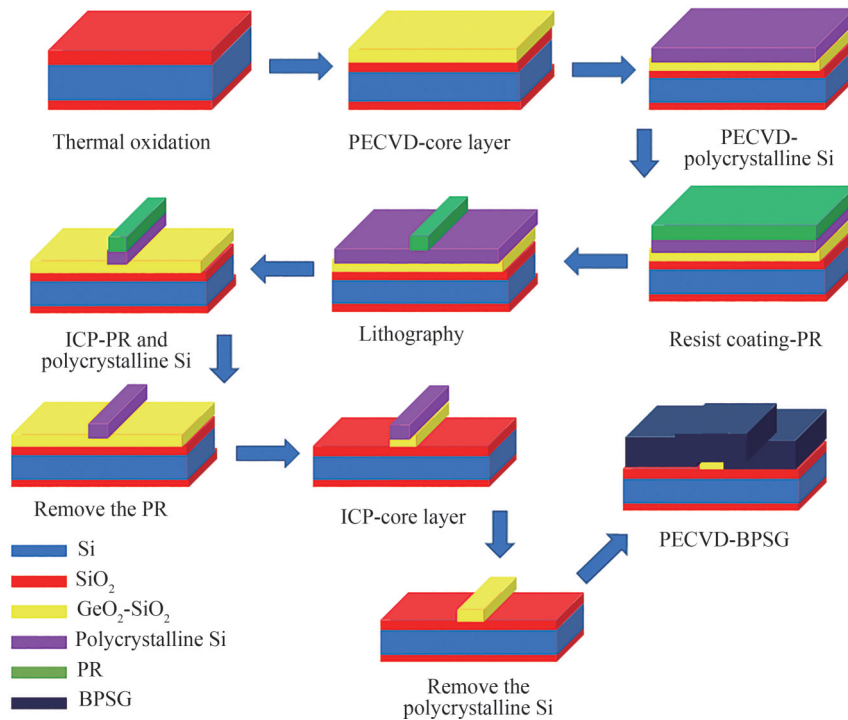


图5 波导光栅芯片制备工艺流程

Fig. 5 Process flow diagram of waveguide grating chip

图6为波导光栅截面示意图及SEM照片,最终制备的芯层厚度为5.96 μm ,波导整体结构呈梯形,顶部和底部波导宽度分别为5.83 μm 、6.05 μm 。

图7(a)为不同占空比条件下光栅表面的显微镜照片,从左至右光栅占空比依次为0.5、0.6、0.7和0.8。

图8是使用1 550 nm波段宽谱光源、环形器、光谱分析仪和单模光纤搭建的测试平台。用该测试平台对器件进行详细测试,其中光谱分析仪的最小分辨率为20 pm,单模光纤芯径尺寸9 μm 。

图9为光栅长度6 mm、刻蚀深度3 μm 、不同占空比条件下的光栅反射谱。从图9可以看出,光栅占空比从0.5增加到0.8,随着光栅占空比增大,光栅反射率逐渐降低,且光栅反射峰中心波长向长波移动。当占空比为0.5时,此时中心波长为1 552.515 nm,对应反射率为-5.01 dB;占空比增加到0.6时,中心波长向长波方向移动至1 552.908 nm,且反射率降低至-6.26 dB;而随着占空比继续增加到0.7、0.8,中心波长分别移动至1 553.236 nm、1 553.518 nm,对应的反射率-7.16 dB、-8.64 dB。这是由于随着占空比的增加,光栅的折射率变化量 $\Delta n|q|$ 变小,光栅耦合系数也随之降低,这将导致光栅反射率的降低,这与之前的理论计算结果相

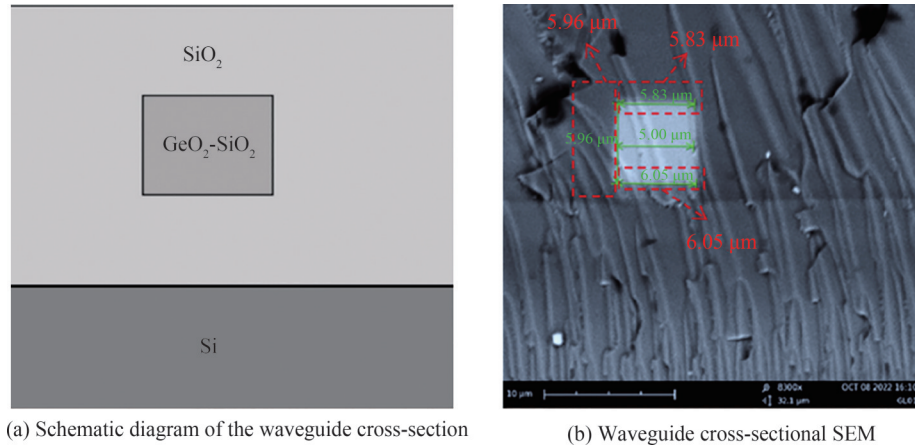


图6 波导截面示意图及SEM照片
Fig. 6 Schematic diagram and SEM of waveguide section

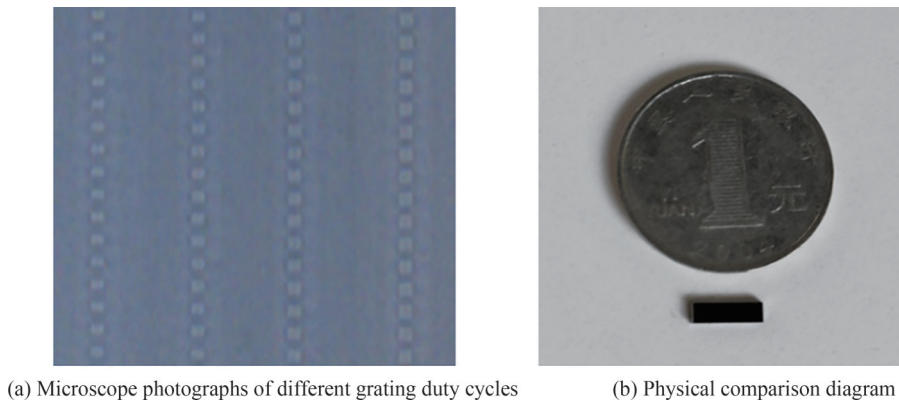


图7 不同占空比条件下布拉格光栅的显微镜照片和实物图
Fig. 7 Microscopic photos and physical images of bragg gratings at different dutys

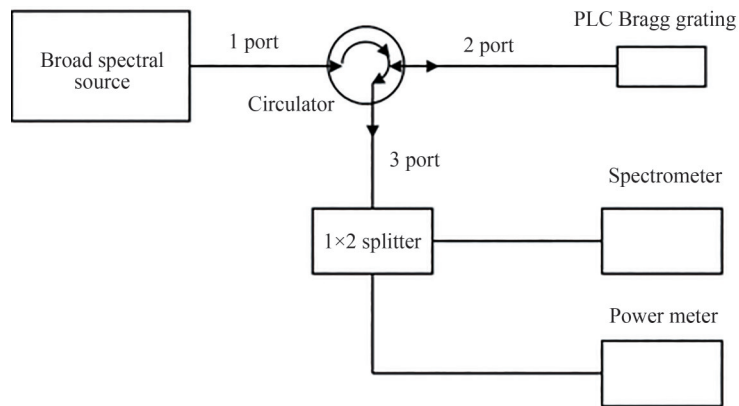


图8 测试平台示意图
Fig. 8 Schematic diagram of test platform

符。另外,占空比从0.5增加到0.8时,因为光栅高折射率材料占比有所增加,所以光栅的有效折射率随之增加。由布拉格条件可以推导出光栅有效折射率与布拉格波长之间的关系为: $\lambda_B = 2\Delta n_{eff}$ 。因此,占空比由0.5增加到0.8时,峰值中心波长向长波方向移动。

图10为光栅长度6 mm、占空比0.8条件下,不同刻蚀深度下的光栅反射谱。从图10可以看出,刻蚀深度从3 μm 增加到6 μm ,随着光栅刻蚀深度的变大,光栅反射率逐渐增加,并且峰值中心波长向短波移动。当刻蚀深度为2.5 μm 时,中心波长为1 554.053 nm,对应反射率为-8.5 dB;刻蚀深度增加到4 μm 后中心波长向短波方向移动到1 552.9 nm,反射率增加到-6.15 dB;刻蚀深度的继续增加至5 μm 和6 μm 时,中心波

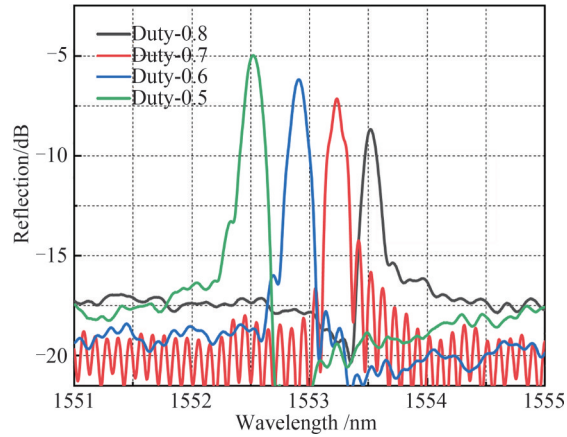


图9 不同占空比下布拉格光栅反射谱

Fig. 9 Reflection spectrum of Bragg grating at different dutys

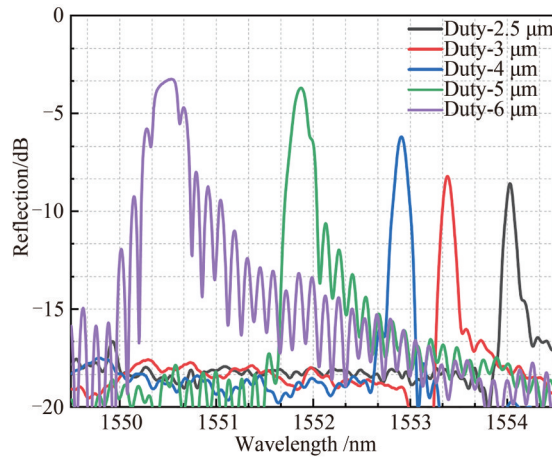


图10 不同刻蚀深度下布拉格光栅反射谱

Fig. 10 Reflection spectra of Bragg gratings at different etching depths

长分别为 1 551.896 nm、1 550.508 nm, 反射率分别增加至 -3.71 dB、-3.2 dB。当光栅刻蚀深度由浅到深, 对应光栅折射率变化量 Δn_{eff} 增加, 光栅耦合系数也随之变大, 从而导致光栅的反射率增加, 而刻蚀深度增加后, 光栅的有效折射率随之降低, 因而中心波长向短波长蓝移。

图 11 为不同光栅结构的峰值中心波长, 从图 11 中可以看出光栅占空比由低到高增加时, 由于有效折射率的增加, 中心波长出现向长波方向红移。

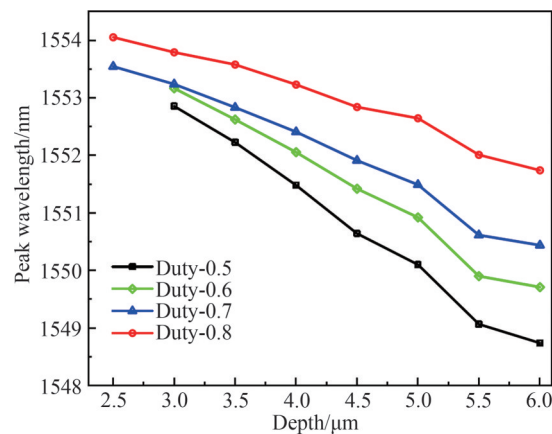


图 11 不同占空比下布拉格光栅的峰值中心波长

Fig. 11 Center wavelength of Bragg grating at different dutys

图 12 为不同光栅结构的峰值半高宽测试结果,从图 12 可以看出,FWHM 随光栅刻蚀深度的增加而增加,不同占空比条件下光栅均符合此趋势。当光栅占空比为 0.5,刻蚀深度 $2.5\ \mu\text{m}$ 时,FWHM 为 $0.139\ \text{nm}$,当刻蚀深度增加到 $6\ \mu\text{m}$ 后,FWHM 出现较大增长,增加至 $0.645\ \text{nm}$ 。而当占空比为 0.8,刻蚀深度为 $2.5\ \mu\text{m}$ 时,FWHM 为 $0.089\ \text{nm}$,相比占空比 0.5,刻蚀深度 $2.5\ \mu\text{m}$ 时 FWHM 减少了 $0.05\ \text{nm}$ 。当刻蚀深度增加到 $6\ \mu\text{m}$ 后,对应的 FWHM 大小为 $0.51\ \text{nm}$,相比 0.5 占空比, $6\ \mu\text{m}$ 刻蚀深度下 FWHM 值 $0.645\ \text{nm}$ 有 $0.135\ \text{nm}$ 的较大程度改善,该测试结果的趋势与图 4 不同耦合系数光栅的峰值半高宽与反射率关系的仿真计算结果相符合。

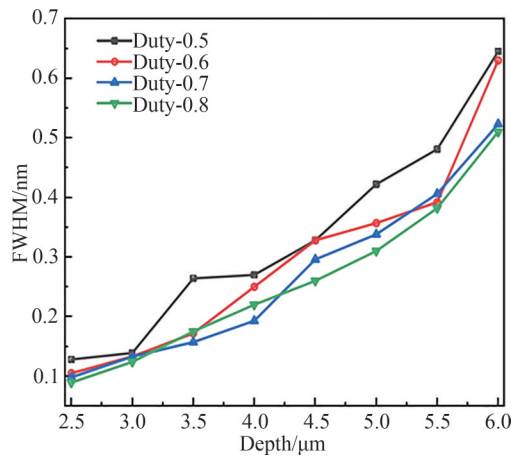


图 12 不同刻蚀深度下布拉格光栅的 FWHM

Fig. 12 FWHM of Bragg grating at different etching depths

3 结论

本文推导了波导光栅结构三维耦合系数模型,试验制备了波导光栅器件,验证了理论模型中刻蚀深度、占空比与波导光栅反射率及 FWHM 之间的关系,最终设计优化制备了折射率差为 0.75% 的 Si 基 SiO_2 布拉格光栅器件。此光栅器件阶数为 11 阶、中心波长为 $1\ 554.053\ \text{nm}$,经耦合测试得出反射谱峰值半高宽最小为 $89\ \text{pm}$,反射率为 $-8.5\ \text{dB}$ 。本文设计的低耦合系数、窄线宽高阶布拉格光栅周期大,可以直接通过低成本、大工艺容差的紫外光刻工艺进行制备,其在耦合腔窄线宽激光器、滤波器和传感器领域中具有广阔的应用潜力。

参考文献

- [1] TALBOT L, PELLETIER O S, TRÉPANIÉ F, et al. Wavelength stabilization of high-power laser diodes using Bragg gratings inscribed in their highly multimode fiber pigtailed [J]. Optics Letters, 2022, 47(3): 633-636.
- [2] MARTYANOV M, MUKHIN I, KUZMIN I, et al. Compact pulse shaper based on a tilted volume Bragg grating [J]. Optics Letters, 2022, 47(3): 557-560.
- [3] BUTT M A, KAZANSKIY N L, KHONINA S N. Advances in waveguide Bragg grating structures, platforms, and applications: an up-to-date appraisal [J]. Biosensors, 2022, 12(7): 497-508.
- [4] MENG R, WANG H, SHI T, et al. A hybrid silicon evanescent laser with sampled Bragg grating structure based on the reconstruction equivalent chirp technique for silicon photonics [J]. Laser Physics, 2021, 31(6): 802-815.
- [5] LI J Z, LI M. Metalorganic chemical vapor deposition overgrowth on the Bragg grating for gallium nitride based distributed feedback laser [C]. International Conference on Lasers, Optics, and Quantum Electronics, 2018.
- [6] BALL G A, MOREY W W, CHEO P K, et al. Fiber laser source/analyzer for Bragg grating sensor array interrogation [J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(4): 700-703.
- [7] TAN R X, YAP S H K, TAN Y C, et al. Functionalized fiber end superstructure fiber Bragg grating refractive index sensor for heavy metal ion detection [J]. Sensors, 2018, 18(6): 1821-1833.
- [8] RAJU S J, HAQUE S M, GOUD B K, et al. Fiber Bragg grating sensor for in situ substrate temperature measurement in a magnetron sputtering system [J]. Physica Scripta, 2022, 97(9): 095505.
- [9] QIU Z C, SUN R, TENG Y T, et al. Design and test of a low frequency fiber Bragg grating acceleration sensor with double tilted cantilevers [J]. Optics Communications, 2022, 15(507): 127663.

- [10] BUTT M A, KHONINA S N, KAZANSKIY N L. A compact design of a modified Bragg grating filter based on a metal-insulator-metal waveguide for filtering and temperature sensing applications[J]. *Optik*, 2022(251):168466.
- [11] XIAO R L, SHI Y C, LI J, et al. Integrated Bragg grating filter with reflection light dropped via two mode conversions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019,37(9): 1946-1953.
- [12] GULZAR A, QAZI G. Investigation and performance evaluation of DFB-(SP) EDFA configuration with optimum intrinsic EDFA parameters[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(1):1-19.
- [13] ABDELLI K, RAFIQUE D, GRIESSER H, et al. Lifetime prediction of 1550 nm DFB laser using machine learning techniques[C]. *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, 2020, 4(5):19629451.
- [14] HUANG Shushan, YANG Chengao, ZHANG Yu, et al. A simple approach to obtain 2.0 μm GaSb laser by using high-order distributed Bragg reflector[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018,37(6):653-656.
黄书山, 杨成奥, 张宇, 等. 利用高阶DBR实现简单的2.0μm GaSb激光器(英文)[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(6):653-656.
- [15] XIONG Xianwei, CHEN Shengping, ZHU Hongtian, et al. High reflectivity mid-infrared fiber Bragg grating by femtosecond laser direct inscription method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022,49(1):173-178.
熊贤伟, 陈胜平, 朱宏田, 等. 飞秒激光直写高反射率中红外光纤布拉格光栅[J]. *中国激光*, 2022,49(1):173-178.
- [16] DING Baoyan, ZHAO Qiang, WANG Xiangfei, et al. Review of fiber Bragg grating fabricated by femtosecond laser processing[J]. *Study on Optical Communications*, 2022, 48(3): 31-38.
丁宝艳, 赵强, 王相飞, 等. 飞秒激光制备光纤布拉格光栅研究进展[J]. *光通信研究*, 2022, 48(3): 31-38.
- [17] PEI Li, JIANG Zhongao, NING Tigang, et al. Research on grating production with phase masks[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2001, 23(3): 58-61.
裴丽, 江中澳, 宁提纲, 等. 相位掩膜生成光纤布拉格光栅的研究[J]. *铁道学报*, 2001, 23(3): 58-61.
- [18] WANG Guangxiang, ZHU Yuehong, Wen Jihua. Production process of FBG based on phase mask technology[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2011, 32(6):563-566.
王广祥, 朱月红, 文继华. 基于相位掩模技术的光纤布拉格光栅制作工艺研究[J]. *河北科技大学学报*, 2011, 32(6): 563-566.
- [19] SPENCER D T, DAVENPORT M, SRINIVASAN S, et al. Low kappa, narrow bandwidth Si₃N₄ Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2015, 23(23):30329.
- [20] QIN C, SHANG K, FENG S, et al. 1×256 multi-layer, low-loss, Si₃N₄ waveguide optical phased arrays with 0.050° instantaneous-field-of-view[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2017.
- [21] MANOLIS A, DABOS G, KETZAKI D, et al. Water-loaded plasmonic stripe integrated with Si₃N₄ waveguide using gold and CMOS compatible metals[C]. *European Conference on Integrated Optics*, 2018.
- [22] DABOS G, PLEROS N, KETZAKI D, et al. Butt-coupled interface between stoichiometric Si₃N₄ and thin-film plasmonic waveguides[C]. *OPOT*, 2018, 8633: 863313.
- [23] WAN L, YA W U, WANG Y. The design of low insertion loss arrayed waveguide grating [J]. *Study on Communications*, 2003, 23(3):375-379.
- [24] SUN M, SHI Y C, DAI D X, et al. Improvement of ICP etching process for reducing the surface roughness of SiO₂ optical waveguides[J]. *Optical Instruments*, 2007, 1(15): 68-73.
- [25] YARIV A, NAKAMURA M. Periodic structures for integrated optics[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1977, 13(4):233-253.
- [26] MARCUSE D. Coupling coefficients for imperfect asymmetric slab waveguides[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1973, 52(1):63-82.
- [27] SMITH R G, SCHINKE D P, SPENCER E G, et al. Thin film distributed feedback laser fabricated by ion milling[C]. *International Electron Devices Meeting, IEEE*, 1972.

Characteristics of Low Coupling Coefficient, Narrow Linewidth, High Order Bragg Grating Based on SiO₂ Waveguide

YIN Xiaojie^{1,2}, WANG Jinghui², ZHENG Zhiyuan², SONG Zeguo³

(1 State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 Henan Key Laboratory of Optoelectronic Circuit and Integration, Henan Shi Jia Photons Technology Co., Ltd, Hebi 458030, China)

(3 Wuxi Institute of Interconnect Technology, Co.,Ltd, Wuxi 214000, China)

Abstract: As an important frequency selective component, Bragg grating is widely used in the fields of lasers, sensors and filters. Especially in the field of narrow linewidth lasers, Bragg grating is an important component for narrowing the linewidth of lasers. The linewidth and reflectivity of Bragg grating itself have a decisive influence on the performance and reliability of narrow linewidth lasers. The narrower the linewidth of the Bragg grating itself is, the greater the mode competition between the cavity mode of the gain chip and the longitudinal mode of the grating will be improved, and the temperature stability of the wavelength will also be improved accordingly. In this paper, SiO₂ waveguide material with low transmission loss was selected. The refractive index of the waveguide cladding was 1.444 7, the refractive index of the core layer was 1.455 6, and the refractive index difference was 0.75%. Using the single-mode condition simulation of the waveguide transmission mode, the cross-sectional size under the single-mode condition of the waveguide was calculated to be 6 μm×6 μm. Under this single mode condition, starting from the wavelength equation of Bragg grating satisfying Bragg reflection condition, the paper mainly analyzed the coupling between TE-TE modes. Through the derivation of the refractive index change formula and the normalization equation, the three-dimensional numerical model of the coupling coefficient of Bragg grating was finally deduced, and the coupling coefficient variation relationship corresponding to the change of the grating structure was simulated when the grating etching depth increases from 1 μm to 6 μm and the duty cycle increases from 0.5 to 0.8. On this basis, the paper also further analyzed the numerical relationship between the etching depth, duty cycle of waveguide Bragg gratings, the reflectivity and FWHM of the gratings, thus establishing a high-precision theoretical model for the design of waveguide Bragg gratings, and designing a series of waveguide Bragg grating devices under this model. The grating waveguide was prepared by contact ultraviolet exposure process with large process tolerance and Inductive Coupled Plasma (ICP) etching, then the waveguide Bragg grating device wafer was prepared by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) growing the upper cladding with the same refractive index as the lower cladding. Then, the waveguide Bragg grating device designed in this paper was finally prepared by cutting, polishing, and other back-end processes. In the paper, a waveguide Bragg grating test platform was built using a 1 550 nm broadband spectrum light source, a circulator, a spectrum analyzer and a single-mode fiber. The fabricated devices were tested and analyzed in detail. The final test results show that the data relationships between the etching depth, duty cycle of the SiO₂ Bragg grating prepared in this paper and the coupling coefficient, reflectivity and FWHM of the device were completely consistent with our theoretical model. Finally, a SiO₂ waveguide Bragg grating device with 1 554.053 nm center wavelength, -8.2 dB reflectivity and 89 pm FWHM was designed and fabricated. The low coupling coefficient, narrow linewidth and high-order Bragg grating devices designed and fabricated in this paper were simple in process and low in cost, and have broad application prospects in the fields of filters, sensors and external cavity narrow linewidth lasers.

Key words: Planar lightwave circuit; SiO₂; Low coupling coefficient; High-order grating; Full width at half maximum; Bragg grating

OCIS Codes: 050.2770; 130.1750; 230.7380; 230.1360