

# 紫外固化型聚合物高阶布拉格波导光栅滤波器

田亮, 王辉, 岳远斌, 陈长鸣\*, 张大明

(吉林大学电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林 长春 130012)

**摘要:**利用紫外固化材料 SU-8 2005 与热交联聚合物甲基丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸缩水甘油酯[P(MMA-GMA)]分别作为波导芯层和包层材料,通过直接光刻技术,成功实现了厚度为 5  $\mu\text{m}$ ,宽度为 9  $\mu\text{m}$ ,光栅高度为 4  $\mu\text{m}$  的起伏型高阶布拉格波导光栅滤波器。对光栅器件的谐振波长,光透射率等重要参数进行了模拟设计。测得制备的聚合物高阶布拉格波导光栅滤波器的谐振波长为 1 550.4 nm,消光比为 23 dB,3-dB 带宽为 2 nm。

**关键词:**紫外固化;聚合物;布拉格波导光栅;滤波器

中图分类号:TN256; TN23 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20120506.0677

## High-order Bragg waveguide grating filter based on ultraviolet curable polymer

TIAN Liang, WANG Hui, YUE Yuan-bin, CHEN Chang-ming\*, ZHANG Da-ming

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science  
and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

\* Corresponding author, E-mail: chencm@jlu.edu.cn

**Abstract:** Ultraviolet curable material SU-8 2005 and thermal crosslinked polymer Methyl Methacrylate Glycidyl Methacrylate[P(MMA-GMA)] are used as the core and the cladding layer materials, respectively, and a novel high-order Bragg waveguide grating filter with a thickness of 5  $\mu\text{m}$ , a width of 9  $\mu\text{m}$  and a grating height of 4  $\mu\text{m}$  is successfully designed and fabricated by direct photolithography technique. The characteristic parameters including resonance wavelength and transmissivity are carefully simulated. The performance parameters of fabricated device are measured to obtain the resonance wavelength of 1 550.4 nm, the extinction ratio of 23 dB and the 3-dB bandwidth of 2 nm.

**Key words:** ultraviolet-curing; polymer; Bragg waveguide grating; filter

收稿日期:2012-09-22;修订日期:2012-11-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61107019);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20110315);中国博士后科学基金资助项目(No. 2011M500597);国家教育部博士点专项基金资助项目(No. 20110061120054);吉林大学基本科研业务费专项资金资助项目(No. 201103071)

## 1 引言

布拉格光栅是光通信网络中光插分复用器(OADM)的核心器件,它决定着网络性能的优劣<sup>[1-2]</sup>,并且在分布反馈激光器、波分复用器、生化传感器、光开关、延时线等光电子器件方面有着广泛的应用。布拉格光栅的工作原理是入射的模式在光栅区与反向传输的模式进行耦合,而使前向传输模式的能量传递给后向传输模式,形成对入射波的反射<sup>[3]</sup>。

与传统布拉格光栅制作相比,用聚合物材料制作布拉格光栅具有诸多优势。在工艺方面,制备光纤布拉格光栅通常采用大功率激光器写入或紫外光写入技术,同时辅以载氢工艺来完成;而对于聚合物布拉格光栅,其制备工艺简单,主要采用半导体工艺,便于实现光电集成。在材料选择方面,光纤布拉格光栅所用光纤必须是特制的,芯层是对紫外光敏感的掺锗、硼或二者共掺的光纤材料<sup>[4]</sup>;而聚合物布拉格光栅所用材料选择多样、柔韧性好、重量轻、可高效连结、与聚合物光纤系统天然兼容。在器件结构方面,可根据实际需要任意改变光栅的结构参数。在应用性方面,相对于无机材料,聚合物材料具有介电常量低、响应速度快、热膨胀系数高、热光系数高、电光系数高、成本低、易于成膜等特点<sup>[5]</sup>。

有机聚合物是制作光电子器件的优良功能材料。通过控制材料的组分比可以调节其折射率,通过分子设计可优化材料的特性<sup>[6]</sup>。本文利用具有优良光学特性和高热稳定性的芯层材料 SU-8 2005(折射率  $n = 1.571@1550 \text{ nm}$ )和包层材料聚合物甲基丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸缩水甘油酯[P(MMA-GMA)](折射率  $n = 1.483@1550 \text{ nm}$ )设计了一种基于矩形波导结构的布拉格波导光栅,这种结构的布拉格波导光栅能够实现对光场的限制,进而能够减小光栅的损耗。

$$B(z) = \frac{B_0 \Delta\beta \sinh[r(z-L)] + jrc \cosh[r(z-L)]}{-\Delta\beta \sinh(rL) + jrc \cosh(rL)} \exp(j\Delta\beta z) . \quad (4)$$

进而得到反射系数的表达式:

$$R = \frac{|A(0)|^2}{|B(0)|^2} = \tan^2(KL) . \quad (5)$$

## 2 理论计算

采用耦合模理论分析计算光栅的结构参数,图1是光栅的顶视结构示意图。

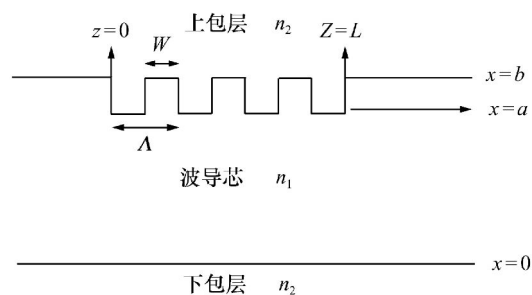


图1 布拉格波导光栅的顶视结构示意图  
Fig. 1 Top view of Bragg waveguide grating

根据耦合模方程<sup>[7-8]</sup>:

$$\frac{dA(z)}{dz} = K_{ba} B(z) \exp(2j\Delta\beta z) , \quad (1)$$

$$\frac{dB(z)}{dz} = K_{ab} A(z) \exp(-2j\Delta\beta z) , \quad (2)$$

式中:  $K_{ab} = K_{ba}^* = K = \frac{\omega \varepsilon_0}{4\pi l} \int_{-a}^0 \Delta n^2 |E_y^{(s)}|^2 dx$ ,  $K_{ab}$

为正向耦合系数,  $K_{ba}$ 为逆向耦合系数,  $\Delta\beta = \beta - \frac{l\pi}{\Lambda}$ 为相位失配谱量,  $A(z)$ 为正向行波振幅,  $B(z)$ 为逆向行波振幅,  $L$ 为光栅长度,  $b-a$ 为光栅高度,  $\omega$ 为光波的角频率,  $\varepsilon_0$ 为真空中介电常数。当满足理想相位匹配条件  $\Delta\beta = 0$ 时,传播常数  $\beta = \frac{l\pi}{\Lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} N_{\text{eff}}$  ( $l$ 为光栅阶数,  $\Lambda$ 为光栅周期,  $N_{\text{eff}}$ 为有效折射率,  $\lambda$ 为布拉格中心波长),则有  $l\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ ,即为布拉格反射条件<sup>[9-12]</sup>。对耦合模方程进行求解得到:

$$A(z) = j \frac{B_0 K_{ab} \sinh[r(z-L)]}{-\Delta\beta \sinh(rL) + jrc \cosh(rL)} \exp(-j\Delta\beta z) , \quad (3)$$

经推导:

$$K = \frac{\omega \epsilon_0 (n_2 - n_1)^2}{16\pi l r_1} A^2 [\sin(2r_1 a) + 2r_1 a] \quad (6)$$

$$(r_1^2 = k_0^2 \epsilon_1 - \beta^2, r_2^2 = \beta^2 - k_0^2 \epsilon_2, r_3^2 = \beta^2 - k_0^2 \epsilon_3, T_2 = \frac{r_2}{r_1}, A^2 = \frac{4\mu_0 \omega}{\beta(1 + T_2^2)(b + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3})})$$

从得出的结果可看出,光栅的耦合系数  $K$  与光栅高度  $a$  成正比,与光栅阶数  $l$  成反比,光栅周期与光栅阶数成正比,光栅反射率同耦合系数与光栅长度的乘积成正比。若选取光栅阶数  $l = 1$ , 它的周期约为  $0.5 \mu\text{m}$ , 在工艺上较难实现, 所以采用了高阶布拉格波导光栅。综合考虑光栅阶数对光栅周期和耦合系数的影响后, 选取光栅阶数  $l = 22$ , 这样耦合系数必然会下降, 从而加深了光栅高度, 取光栅高度  $b - a$  为  $4 \mu\text{m}$ , 以此来增加光栅的耦合系数; 另外取波导厚度  $h$  为  $5 \mu\text{m}$ , 宽度  $b$  为  $9 \mu\text{m}$ , 光栅周期数为 500 个, 布拉格中心波长  $\lambda$  为  $1550 \text{ nm}$ , 用 Matlab 软件模拟计算了此种结构的布拉格波导光栅的透射率与入射光波长之间的关系曲线, 如图 2 所示。

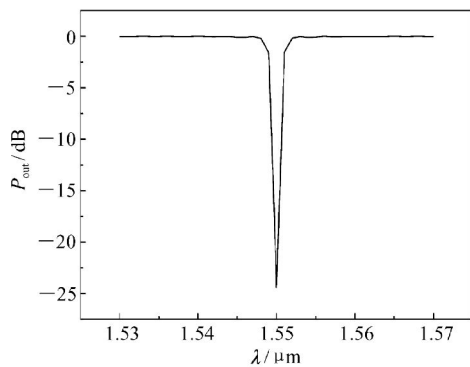


图2 布拉格波导光栅的透射率与入射光波长之间的关系曲线

Fig. 2 Relation curve of transmittivity of Bragg waveguide grating and incident light wavelength

### 3 器件的制作

器件的制作过程如图 3 所示: 在清洁好的硅片表面旋涂 P(MMA-GMA) 下包层,  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  温度下固化 2 h; 旋涂 SU-8 芯层,  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  前烘 20 min, 去除溶剂; 在  $365 \text{ nm}$  光照下进行光刻, 光引发剂三苯基硫盐在近紫外光照下吸收光子发生化学反应,

反应生成强酸  $\text{H}^+ \text{A}^-$ , 起催化交联作用,  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  温度中烘 20 min, 使被曝光的地方发生热交联反应, 在 SU-8 专用显影液 PGMEA 中显影 40 s, 然后在异丙醇中去除显影液, 最后用去离子水冲洗器件, 这样就在 SU-8 芯层上得到了布拉格波导光栅的图形; 旋涂 P(MMA-GMA) 上包层,  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  温度下固化 2 h。

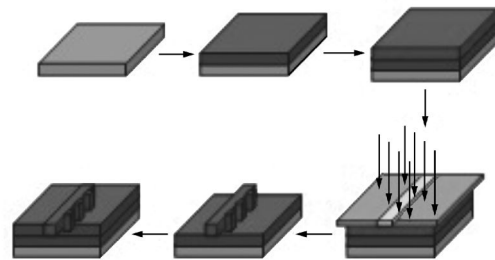


图3 器件的制作工艺

Fig. 3 Fabrication technology of device

最终, 在光学显微镜下测得下包层厚度为  $4 \mu\text{m}$ , 芯层厚度为  $5 \mu\text{m}$ , 上包层厚度为  $4 \mu\text{m}$ , 光栅周期  $\Lambda$  为  $11 \mu\text{m}$ , 光栅高度  $b - a$  为  $4 \mu\text{m}$ , 光栅谷宽  $\Lambda - W$  为  $2 \mu\text{m}$ , 光栅峰宽  $W$  为  $9 \mu\text{m}$ , 占空比为 2:9。

### 4 测试结果

对器件的两端进行解理, 波导的输入/输出端面为自然解理面, 采用图 4 所示的光波导测试系统测试了该器件的性能: 从宽谱激光器输出的激光经过单模光纤耦合进波导输入端, 波导输出端经过单模光纤耦合进光谱仪。图 5 是在输入光功率为  $1 \text{ mW}$  时得到的宽谱激光器与布拉格波导光栅的输出光谱, 从图中可看出, 器件的谐振波长为  $1550.4 \text{ nm}$ , 消光比为 23 dB, 3-dB 带宽为  $2 \text{ nm}$ 。从测试结果可以看出, 高阶聚合物布拉格波导光栅完全可以实现滤波的功能, 并且具有较大的消光比和较小的 3-dB 带宽。

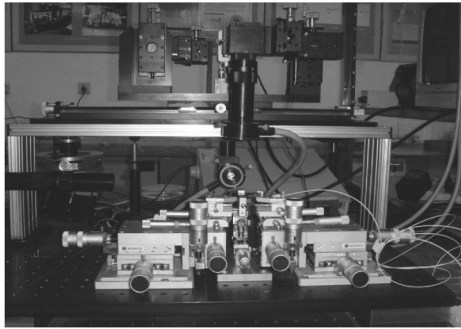


图4 布拉格波导光栅的测试系统

Fig.4 Photo of test system for Bragg waveguide grating

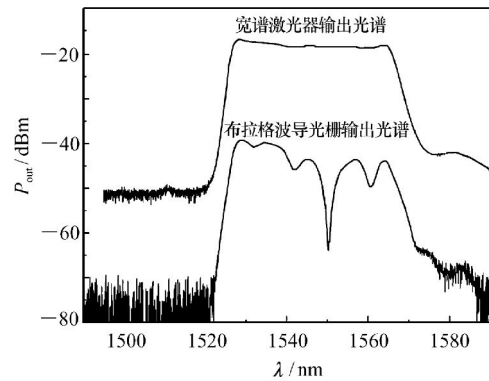


图5 宽谱激光器与布拉格波导光栅的输出光谱

Fig.5 Output spectra of wide spectrum laser and Bragg waveguide grating

## 5 结 论

通过半导体工艺成功地制作了具有良好的热稳定性和光学特性的聚合物高阶布拉格波导光

栅,并测试了其透射谱,器件的谐振波长为 1 550.4 nm,消光比为 23 dB,3-dB 带宽为 2 nm。实验证明,这种技术可用于实现低成本,高性能的光集成回路。

### 参考文献:

- [1] 刘洪兴,张巍,巩岩,等. 光栅参数测量技术研究进展[J]. 中国光学,2011,4(2):103-110.  
LIU H X,ZHANG W,GONG Y,et al.. Grating parameters measurement technology research progress[J]. *Chinese Optics*, 2011,4(2):103-110. (in Chinese)
- [2] 赵印明,刘春红,陈爽. 金属基底光纤光栅应变传感器的传感特性研究[J]. 光学与光电技术,2011,9(1):24-26.  
ZHAO Y M,LIU CH H,CHEN SH. Strain sensing property of fiber Bragg grating sensor packaged by metal materials[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*,2011,9(1):24-26. (in Chinese)
- [3] 李川,万舟,许江淳,等. 利用一块相位掩模板和两块棱镜改变光纤光栅的写入 Bragg 波长[J]. 中国光学,2009,2(5):421-425.  
LI CH,WAN ZH,XU J CH,et al.. Changing written Bragg wavelengths of fiber gratings via one phase mask and two prisms[J]. *Chinese Optics*,2009,2(5):421-425. (in Chinese)
- [4] 孙阳,徐学俊,屠晓光,等. SOI 亚微米波导光栅的设计与制作[J]. 半导体光电,2010,31(1):27-29.  
SUN Y,XU X J,TU X G,et al.. Design and fabrication of silicon-on insulator sub-micrometer waveguide grating[J]. *Semiconductor Optoelectronics*,2010,31(1):27-29. (in Chinese)
- [5] 张峰,李晓东,谭震宇,等. 键合型有机/无机杂化材料加载条形波导电光调制器[J]. 光子学报,2011,40(4):569-572.  
ZHANG F,LI X D,TAN ZH Y,et al.. Strip-loaded wave-guide electro-optic modulator based on bonded organic-inorganic hybrid material[J]. *Acta Photonica Sinica*,2011,40(4):569-572. (in Chinese)
- [6] 王辉,张峰,刘天际,等. 有机/无机复合功能材料倒脊型波导热光开关[J]. 光子学报,2011,40(9):1303-1307.  
WANG H,ZHANG F,LIU T J,et al.. Embedded waveguide thermo-optic switch based on novel organic-inorganic hybrid materia[J]. *Acta Photonica Sinica*,2011,40(9):1303-1307. (in Chinese)
- [7] 马春生,刘式墉. 光波导模式理论[M]. 长春:吉林大学出版社,2006.  
MA CH SH,LIU SH Y. *The Waveguide Mode Theory*[M]. Changchun:Jilin University Press, 2006. (in Chinese)
- [8] 刘式墉. 半导体集成光学[M]. 长春:吉林大学出版社,1986.  
LIU SH Y. *Semiconductor Integrated Optics*[M]. Changchun:Jilin University Press,1986. (in Chinese)

- [9] LIU J. *Photonic Devices*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [10] MOSS D J, TAE'ED V G, EAGLETON B J, *et al.*. Bragg gratings in silicon-on-insulator waveguides by focused ion beam milling[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85: 4860-4862.
- [11] 王建忠, 刘永智. 全光网中 FBG 的 OADM 设计研究[J]. *应用光学*, 2004, 25(4): 26-28.  
WANG J ZH, LIU Y ZH. An all-optical network OADM design based on fiber Bragg grating[J]. *Appl. Opt.*, 2004, 25(4): 26-28. (in Chinese)
- [12] 冉启江, 韩德培, 全宇军, 等. 高阶布拉格光栅在 SOI 脊型波导上的光刻制作[J]. *半导体光电*, 2009, 30(3): 381-384.  
RAN Q J, HAN D P, QUAN Y J, *et al.*. Corrugated high-order Bragg grating on silicon-on-insulator ridge waveguides fabricated by photolithography[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, 30(3): 381-384. (in Chinese)

作者简介: 田亮(1986—), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事聚合物波导光栅器件等方面的研究。

E-mail: Tianl2046@163.com

王辉(1986—), 女, 吉林白山人, 硕士研究生, 主要从事聚合物平面光波导器件等方面的研究。

E-mail: jlbsfsw@163.com

岳远斌(1988—), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事聚合物平面光波导器件等方面的研究。

E-mail: yyb0712@163.com

陈长鸣(1981—), 男, 吉林长春人, 讲师, 主要从事聚合物平面光波导器件及其集成技术等方面的研究。

E-mail: chencm@jlu.edu.cn

张大明(1970—), 男, 吉林长春人, 博士生导师, 主要从事聚合物平面光波导器件等方面的研究。

E-mail: 14319821@qq.com