聚合物阵列波导光栅的大范围电-光波长调谐滤波器*

万 旭 彭保进 金洪震
(浙江师范大学信息光学研究所,浙江金华 321004)

摘 要 从阵列波导光栅的光栅方程入手,分析了聚合物阵列波导光栅采用电-光效应进行波长调谐的原理,提出了具有单推挽结构和双推挽结构的电-光波长可调谐滤波器. 并用 Optiwave 软件分别对无推挽结构和推挽结构波长调谐器进行了计算机仿真. 结果表明:当外加电压从 −100 V 增加到 +100 V时,前者的波长调谐范围约为 5 nm,而后者中,单推挽结构的波长调谐范围为约 10 nm,双推挽结构的波长调谐范围可达 20 nm.

关键词 集成光学;电-光效应;波长调谐;滤波器;AWG;推挽结构
中图分类号 TN29 **文献标识码** A

0 引言

波长调谐滤波器是一种重要的选频器件. 它可以应用于 DWDM 全光分/插复用器,实现在网络的节点上可以选择上下光路信号[1];也可以用于光纤光栅外腔激光器、光纤激光器中,实现可调谐激光输出,或实现动态波长锁定[2];在波长调制型传感器中,可调谐滤波也可以得到广泛的应用[6]. 人们对多种类型的波长可调谐滤波器展开了研究[1~5].

在阵列波导光栅(AWG)中,利用热-光效应,在 InP 阵列波导光栅实现了 10 nm 的波长调谐器[3]. 在 SiO_2/Si 阵列波导光栅,实现了约 6 nm 的波长调谐范围[7]. 由于聚合物阵列波导光栅具有较大的热-光系数,它的调节范围达到了 20 nm[4]. 由于利用电-光效应的阵列波导光栅具有更快的响应速度(响应时间小于 1 ps)[7],因而,基于电-光效应的阵列波导波长调谐也受到人们的关注,在外加电压为 −100 V 到 100 V 的变化时,聚合物阵列波导的波长调节范围约为 5 nm[7,8].

由于聚合物材料具有电光响应速度快,介电常量小、电光系数大、热-光系数大、电光转换效率高,相应器件的制作工艺简单,具有良好的抗电磁干扰等优点[1,2],使得聚合物材料在电-光波导波长调谐滤波器中也得到了应用[4,9,12].

1 理论分析

图 1 为一 4×4 阵列波导光栅的结构. 当一束单色光信号经过一根输入波导传输后,波前在星形耦合器的自由空间区内辐射,再经过一个固定长度差的阵列波的传输,到第二个星形耦合器的自由空间区聚焦输出[1].

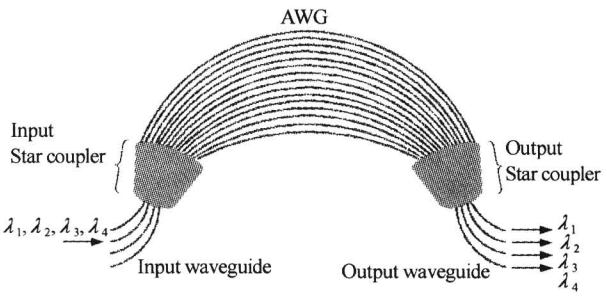


图 1 $N\times N$ 阵列波导光栅的结构
Fig. 1 Planar structure of $N\times N$ arrayed waveguide

图 1 中,假设相邻波导间的长度差为 ΔL,输入端、输出端相邻波导的间隔为 d_i、d_o,令 $d_i=d_o=d$. 星形耦合器的聚焦半径为 L_f,自由空间区和阵列波导的有效折射率分别为 n_c 和 n_s,阵列波导数目为 M,输入输出的光束角分别为 θ_i 和 θ_o,通常 $\theta_i=\theta_o=\theta$. 它们满足光栅方程

$$n_c \cdot \Delta L + k n_s d\theta = m\lambda \tag{1}$$

式(1)中,m 为 AWG 工作的衍射级,k 为波导输出口序号. 式(1)中,θ 取 0,对应的波长为阵列波导的中心波长 λ_0,满足

$$n_c \cdot \Delta L = m\lambda_0 \tag{2}$$

1.1 阵列波导波长的调谐

从式(1)可知,要实现阵列波导输出波长的调谐可以通过改变AWG的相邻阵列波导的光程差实现. 利用波导材料的电-光效应,在阵列波导的部分区域加上电极进行电-光调制,使得相邻阵列波导的光程差发生变化,如图2. 如果由于电-光效应引起相邻

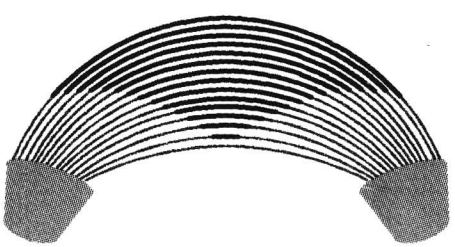


图 2 用电光效应实现的可调谐阵列波导光栅结构
Fig. 2 Sketch of an AWG with top electrodes (in back) to exploit additional phase shift by electro-optic effect

*浙江省自然基金(M603243)资助项目
Tel:0579-2298863 Email:wanxu@zjnu.cn
收稿日期:2005-10-12

阵列波导的光程差的变化量为 $\Delta n_c \cdot \Delta L_e$，其中 Δn_c 为由于电-光效应引起的波导折射率的变化量，ΔL_e 为相邻阵列波导间电极的长度差．于是，第 k 个输出口的波长变为 λ'

$$\lambda' = \frac{n_c \cdot \Delta L + \Delta n_c \cdot \Delta L_e + k \cdot n_s \cdot d \cdot \theta}{m} \tag{3}$$

由式(1)和式(3)可以得到：第 k 个输出口的波长的调谐量 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta n_c \Delta L_e}{m} \tag{4}$$

将式(2)代入式(4)，得到

$$\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{\Delta n_c \Delta L_e}{n_c \Delta L} \tag{5}$$

1.2 器件结构和电压设置

电光调制材料可以使用聚合物．阵列波导采用脊波导，波导高度为 h_g，脊高为 h_r．为了实现阵列波导中低损耗传输，在波导上下分别加上覆盖层和缓冲层，高度分别为 h_1 和 h_2．施加电场的两电极分布在覆盖层和缓冲层的上下方．图 3 为阵列波导的一个截面，光波沿 X 方向传播，图中参量是用光波传播的有限元算法软件计算给出的[7,9]．

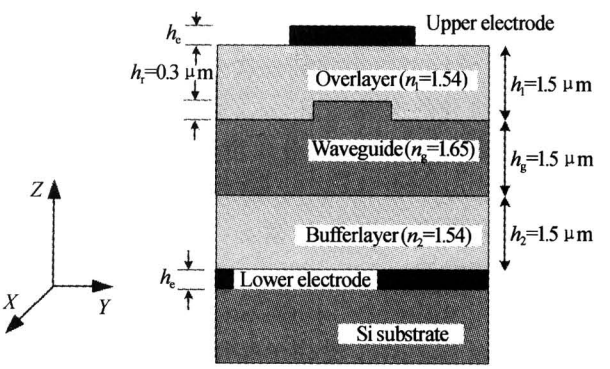


图 3 阵列波导的截面及其参量

Fig. 3 A section of AWG waveguide with the calculated parameters for the optimum design

聚合物的电光张量矩阵如下[8,10]

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{13} & 0 \\ r_{13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \tag{6}$$

通常 $r_{33} = 3r_{13}$．当外加电场沿 Z 方向时，外加电压不改变输出光的偏振态，只改变其相位．各方向的折射率可以用表示为[10]

$$\begin{cases} n_x(E) \cong n_x(0) - 2^{-1} n_x^3 r_{13} E_Z \\ n_y(E) \cong n_y(0) - 2^{-1} n_y^3 r_{13} E_Z \\ n_z(E) \cong n_z(0) - 2^{-1} n_z^3 r_{33} E_Z \end{cases} \tag{7}$$

由式(7)和式(5)可以得到外加电压 δV 与电压控制波长调谐 $\Delta\lambda$ 的关系式

$$\Delta\lambda = \left(\frac{\lambda_0}{n_c}\right)\left(\frac{1}{2} n_0^3 r_{33}\right)\left(\frac{\Delta L_e}{\Delta L}\right)\left(\frac{\delta V}{W}\right) \tag{8}$$

式(8)中 W 为两电极之间的距离．同时可得 $\Delta\lambda$ 随 δV 是线性变化的．

目前，采用聚合物掺杂发色团 CLD-75 在 150℃，8 kV 电压下放电 30 min[2] 的方法，可以得到电光系数为 40 pm/V 的聚合物，理论上电光系数可达到 50 pm/V.

如果取 $\lambda_0 = 1550$ nm，$\Delta L_e = \Delta L$，及图 3 的参量，式(8)通过计算得到

$$\Delta\lambda = 25.09 \times 10^{-3} \delta V \quad (\text{nm}) \tag{9}$$

2 阵列波导光栅电光调制的推挽结构

由式(8)分析知，要增大调谐的范围有几种方法：其一，增大电光系数 r_{33}；其二，减小波导厚度以减小两电极之间的距离 W；其三，增大相邻阵列波导间电场长度差 ΔL_e 与波导长度 ΔL 的比．受材料和工艺的限制采用前二种方法是难以实现的，因为在参量选择中几乎已达到最佳值．另外，由阵列波导的结构可以计算出 $\frac{\Delta L_e}{\Delta L}$ 的最大值．

$$\left(\frac{\Delta L_e}{\Delta L}\right)_{\max} = 1 + \frac{L_0}{\Delta L \cdot (M-1)} \tag{10}$$

式(10)中，L_0 为阵列波导长度的初始值．由式(10)可知，采用第三种方法需要增加 AWG 的面积．

式(3)可知，要增大波长调谐范围应增大由电光调制产生的相移．而借用 Mach-Zehnder 电光调制方法，采用推挽结构可达到 2 倍相移的效果[10]．推挽方法可以有二种：其一，采用电推挽，即用反极性电压加在的 Mach-Zehnder 干涉臂上．第二种方法是光推挽方法，即两臂外加相同电压，改变臂上电光调制的长度，达到相反相移的效果[10,11]．

图 4 为采用光推挽技术设计的 AWG 推挽结构波长调谐器．把外加调制电压的电极分为二组，二组分别外加相同的电压．

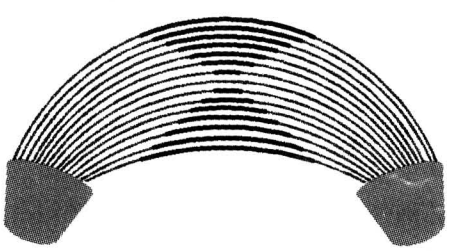


图 4 用光推挽实现的单推挽结构阵列波导光栅结构

Fig. 4 Sketch of wavelength tuner of AWG with the single push-pull using optical approach

由波导长度本身产生的光程 L_G 为

$$L_{Gi}=[L_0+(i-1)\cdot\Delta L]\cdot n_c \tag{11}$$

由电光调制产生的额外光程 L_{EO} 为

$$L_{EOi}=2\cdot(i-(M+1/2))\cdot\Delta L_e\cdot\Delta n_c \tag{12}$$

于是得到总的光程差 ΔL_T 为

$$\Delta L_T=\Delta L_G+\Delta L_{EO}=n_c\cdot\Delta L+2\cdot\Delta n_c\cdot\Delta L_e \tag{13}$$

于是可得到相应的波长调谐量为

$$\Delta\lambda=2\lambda_0\frac{\Delta n_c\cdot\Delta L_e}{n_c\cdot\Delta L} \tag{14}$$

式(14)与式(10)相比，波长的调谐能力扩大了一倍.

同理，可以设计双推挽 AWG 波长调谐器．先将 AWG 的波导分四组，再将四组分为上下两区，把两区分别设计为推挽结构的形式，最后，将上下两区产生的相移也组成推挽形式，如图 5.

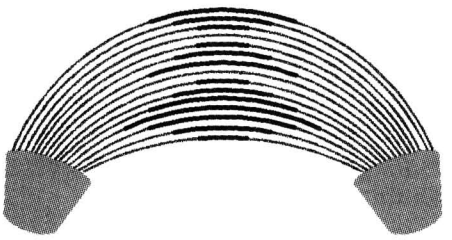


图 5　用光推挽实现的双推挽结构的阵列波导光栅结构

Fig. 5　Sketch of wavelength tuner of AWG with the double push-pull using optical approach

按以上推理过程可得双推挽结构的 AWG 波长调谐量为

$$\Delta\lambda=4\lambda_0\frac{\Delta n_c\cdot\Delta L_e}{n_c\cdot\Delta L} \tag{15}$$

3　仿真结果

线性波长调谐器随电压变化可用 BPM 软件仿真，仿真参量如表 1. 图 6 反映了输出口波峰随电压变化的情况．

表 1　电-光调谐滤波器的仿真参量

光栅衍射级(m)	120
通道数(N_{ch})	8
AWG 阵列波导数(M)	71
输入输出波导数	8
通道间隔/nm	1
相邻阵列波导长度差 ΔL/μm	114.6
波导中心波长/μm	1.55
自由光谱范围 FSR/nm	17.39

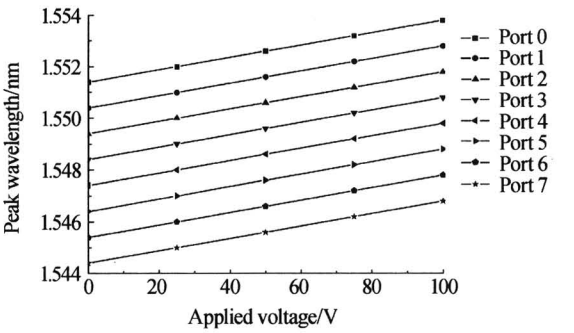
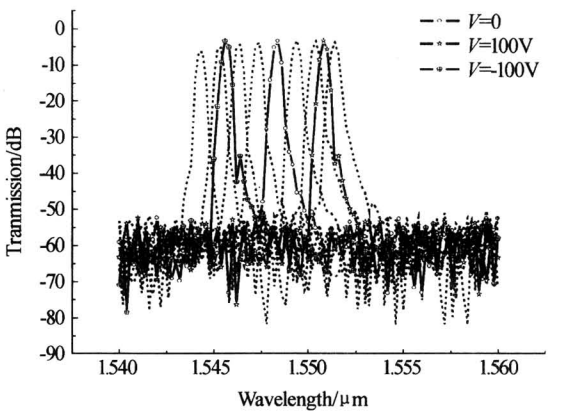


图 6　阵列波导输出口中心波长随外加电压的变化关系

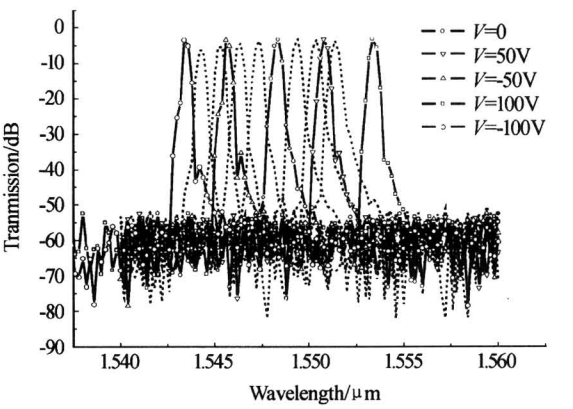
Fig. 6　Peak wavelength tuning varying with voltage on the output port of AWG tuner

图 7(a)表明了无推挽结构的 AWG 的波长调谐能力，在电压从 −100 V 到 +100 V 变化时，波长调谐范围约为 5 nm. 图7(b)反映了单推挽结构的 AWG 波长调谐情况，在外加电压相同的情况下，波长调谐范围约为 10 nm. 图 7(c)为双推挽结构的 AWG 波长调谐仿真结果，在相同条件下，它的调谐范围达到了 20 nm. 图中实线为中心波长随外加电压的变化．

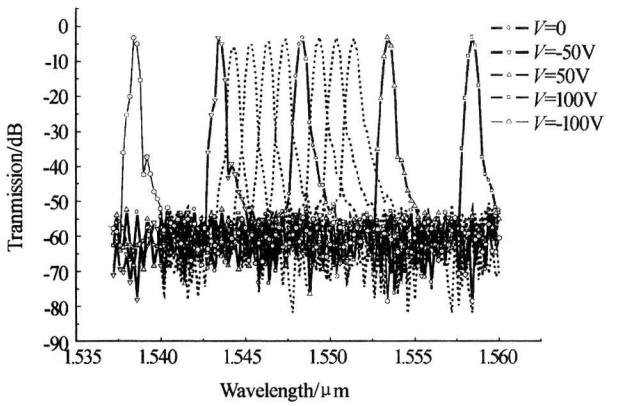
另外，为了减少通道的干扰，在实际应用中，一般要求阵列波导有较低的相邻通道的交叉干扰．由图 7 可以得到设计滤波器相邻通道的交叉干扰小于 −35 dB，能满足各领域的应用要求．



(a) None push-pull configuration



(b) Single push-pull configuration



(c) Double push-pull configuration

图7 基于AWG波长调谐滤波器的输出频谱，$\Delta L_e=\Delta L$

Fig. 7 Output spectrum of the designed wavelength tuner based on AWG, $\Delta L_e=\Delta L$

4 结论

设计了基于*AWG*的电-光波长调谐滤波器，提出了单推挽和双推挽结构的波长调谐滤波器. 用*Optiwave*软件分别对无推挽、单推挽及双推挽结构的调谐特征进行了仿真. 结果表明，外加电压从$-100\,V$到$+100\,V$变化时，波长调谐范围分别为5 *nm*、10 *nm*和20 *nm*，而且相邻通道的交叉干扰低于$-35\,dB$. 这些电光调谐滤波器可应用于波长调制型传感，波长解调检测，光通讯波长路由等领域.

参考文献

1 Takahashi H, Oda K, Toba H, *et al*. Transmission characteristics of arrayed waveguide $N\times N$ wavelength multiplexer. *J Lightwave Technol*, 1995, **13**(3): 447～455

2 Smit M K, Dam C V. PHASA based WDM devices, principles design and applications. *IEEE J Select Topic in Quantum Electron*, 1996, **2**(2): 236～250

3 Toyoda S, Ooba N, Kitoh T, *et al*. Wide tuning range and low operating power AWG based thermo optic wavelength tunable filter using polymer waveguide. *Electron Lett*, 2001, **37**(18): 1130～1132

4 Toyoda S, Ooba N, Kaneko A, *et al*. Wideband polymer thermo-optic wavelength tunable filter with fast response for WDM systems. *Electron Lett*, 2000, **36**(7): 658-660

5 鲍俊峰，吴兴坤. 一种定向耦合器型高聚物光开关设计. 光子学报，2005，**34**(3)：362～364
Bao J F, Wu X K. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 362～364

6 Sano Y, Yoshino T. Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber bragg grating sensor. *J Lightwave Technol*, 2003, **21**(1): 132～139

7 Cheyns J, Develder C, Breusegem E V, *et al*. Routing in an AWG-based optical packet switch. *Photonic Network Communications*, 2003, **5**(1): 69～80

8 Wang W, Shi Y, Olson D J, *et al*. Push-pull poled polymer Mach-Zehnder modulators with a single microstrip line electrode. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, **11**(1): 51～53

9 王科，王欣艺，林斌，等. 阵列波导光栅解复用器的标量传输理论及其简化模型. 光子学报，2003，**33**(9)：1072～1076
Wang K, Wang X Y, Lin B, *et al*. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1072～1076

10 Oh M C, Zhang H, Szep A, *et al*. Electro-optic polymer modulators for 1.55 μm wavelength using phenyltetraene bridged chromophore in polycarbonate. *Appl Phys Lett*, 2000, **76**(24): 3525～3527

11 Spiekman L H, Amersfoon M R, Vreede H D, *et al*. Design and realization of polarization independent phased array wavelength de-multiplexes using different array orders for TE and TM. *J Lightwave Technol*, 1996, **14**(6): 991～995

12 赵禹，马春生，张大明，等. 聚合物阵列波导光栅复用器关键技术的研究. 光子学报，2003，**33**(4)：417～421
Zhao Y, Ma C S, Zhang D M, *et al*. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **33**(4): 417～421

Wide Range Electro-optical Wavelength Tunable Filter Based on Polymer Arrayed Waveguide Grating

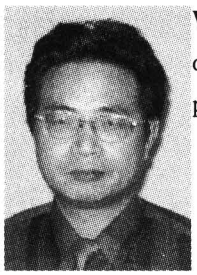
Wan Xu, Peng Baojin, Jin Hongzhen

Information Optical Institute, Zhejiang Normal University, Zhejiang Jinhua 321004

Received date: 2005-10-12

Abstract The theory that the wavelength of the polymer arrayed waveguide grating is tuned by electro-optical effect is analyzed based on the grating equation of the arrayed waveguide grating. Then two kinds of electro-optical wavelength tunable filter with single push-pull configuration and double push-pull configuration are presented. The experiments of computer simulation are respectively done by Optiwave software. The results show that the spectrum tuning range of the former is 5 nm or so by varying the applied voltage form −100 V to 100 V, the range of the AWG with single push-pull configuration is 10 nm or so, and much wider tuning ranges can be obtained, over 20 nm, with dual push-pull configuration.

Keywords Integrated optic; Electro-optic effect; Tuning wavelength; Filter; AWG; Push-pull configuration



Wan Xu was born in Zhejiang Province in November, 1966. He recevived his M. S. degree from Hangzhou University in 1991. His major research interests include photoelectric information process and sensor technique.