

光波导级联型 F-P 可调谐滤波器研究*

袁一方 符运良 王见平 郦炬烽

(上海理工大学光电学院)

摘 要: WDM 技术在光纤通信技术得到广泛应用, 可调谐滤波器是光网络系统中的核心器件之一, 级联型 F-P 可调谐滤波器可作为 WDM 光纤通信系统的解复用器。本文提出了一种新型的光波导级联型 F-P 滤波器的设计原理和制作工艺。F-P 腔内的介质为 LiNbO_3 , 两端以抛光法, 镀上高反膜, 再沉积金属电极; 特定波长的光束在腔内发生相长干涉, 改变电极间电压, 以选择输出的光波波长, 达到调谐滤波的功能。级联型 F-P 滤波器可增加调谐范围, 并使其输出带宽变窄, 这样大大减小了信道之间的串扰; 器件的载波范围为 192.91~193.25THz, 中心频率为 193.1THz, 信道间隔为 50GHz, LiNbO_3 光波导级联 F-P 型滤波器的半波电压分别为 22V 和 20.5V。本文着重分析了级联可调谐滤波器用于 ITU-T 标准的 WDM 信道频率的选频特性, 及相应的调谐电压值和实验结果。

关键词: 可调谐滤波器 F-P 滤波器 LiNbO_3 光波导 LiNbO_3 电光调制器 WDM 解复用器

1、引 言

光纤通信技术现已成为现代通信的重要组成部分, 随着网络和数据通信的迅速发展, 对光通信中高速度大容量传输的要求越来越高。密集波分复用 (DWDM) 技术, 它能使光通信的传输效率及容量得到提高。可调谐滤波器是光波分复用技术中不可缺少的器件^[1], 是国内外光通信器件研究的热点之一。

本文设计一种基于 LiNbO_3 光波导 F-P 腔游标式级联电光可调谐滤波器, 利用多光束干涉的原理对单个滤波器的电压频率响应特性进行了模拟, 利用两个 F-P 腔级联, 实现多波长的动态滤波, 只要器件长度和两电极间电压选择得当, 所得的频率滤波特性很适宜于密集波分复用的要求。

2、基本原理

F-P 腔游标级联可调谐滤波器的结构由两个 F-P 腔相串联而组成。图 1 为其中的一个 F-P 腔可调谐滤波器, 它是以 LiNbO_3 为衬底的光波导, 光波导的两个端面抛光, 镀上高反率的介质膜。 LiNbO_3 切割向为 X 切 Y 传, 目的是利用晶体的最大电光系数 γ_{33} 。光波导的电极电压加在 Z 方向。

*本研究由上海市教委第四期重点学科(光学工程)资助

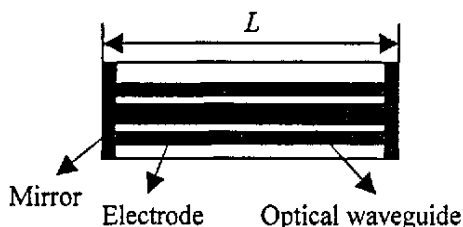


图1 F-P腔光滤波器结构图

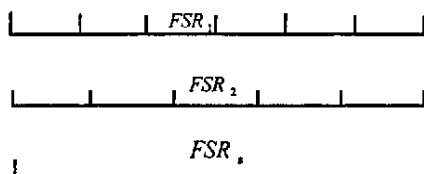


图2 游标式级联F-P腔滤波器的谐振频率

考虑光波导的传输损耗，F-P腔滤波器的功率传输系数为^[3]

$$T = \frac{(1 - R)^2 \exp(-2\alpha L)}{(1 - R e^{-\alpha L})^2 + 4 R e^{-\alpha L} \sin^2 \delta} \quad (1)$$

式中， $\delta = (2\pi/\lambda)n_{\text{eff}}L$ ， R 为介质膜的反射率， α 为光波导的损耗系数， L 为腔的长度， n_{eff} 为光波导的有效折射率， λ 为入射光波长。

滤波器的精细度为

$$F = \frac{\pi}{T_m + \alpha L} \quad (2)$$

式中， T_m 为最大的功率传输系数。腔长接近相等的两个F-P腔相串联而成的级联腔称为游标式级联腔，两腔的自由谱域的关系如图2所示，有

$$FSR_2 = (K + 1)FSR_1 = KFSR_2 \quad (3)$$

式中， K 为游标因子。级联腔的谐振发生在两腔相同的谐振频率处。可见，级联腔的自由谱范围比单个F-P腔的自由谱范围宽，分别为它们的 K 倍或 $(K + 1)$ 倍。

级联光滤波器的功率传输系数为

$$T = T_1 \cdot T_2 \quad (4)$$

游标式级联腔的传输系数在谐振峰附近为

$$\tau = \frac{1}{[1 + (2 \frac{\Delta f}{\Delta F_1})^2][1 + (2 \frac{\Delta f}{\Delta F_2})^2]} \quad (5)$$

式中， $\Delta F_1, \Delta F_2$ 分别为第一、第二个光滤波器的3dB带宽， $\Delta f = f - f_q$ 是对谐振频率的偏移。由于两腔近似，可认为 $\Delta F_1 = \Delta F_2$ ，由此可求出级联腔的带宽为

$$\Delta F_s = \sqrt{\sqrt{2} - 1} \Delta F_1 \approx 0.64 \Delta F_1 \quad (6)$$

于是级联腔的精细度为

$$F_s = \frac{FSR_s}{\Delta F_s} = \frac{KFSR_1}{0.64 \Delta F_1} = 1.6KF_1 \quad (7)$$

可见，它是单腔的精细度的1.6K倍。

3、F-P 腔调谐滤波器的分析设计

当采用游标级联腔的形式时，由以上的分析表明，总的滤波器的传输特性曲线的3dB带宽变窄，精细度增加，自由谱范围增大，在应用于ITU-T标准信道间隔情况下，意味着提高了传输信道的数量。考虑到光波导的损耗及滤波器的自由光谱范围，波导的长度不能长，但考虑到实际制作的条件，如果波导的长度过短，端面难于粘上高反射的介质膜，故取波导长度 $L_1=5.535$ mm。

现设可调谐滤波器用在光接收端选择所需接收的波长，系统中光载频频率范围为193.4485~193.6485 THz (1550.8~1549.2 nm)，信道间隔为50 GHz，总信道数为5，则其工作带宽为200 GHz。设滤波器1的波导的折射率，在加电压前为2.219650，由自由谱范围 $FSR_1 = c/2n_1L_1$ 得滤波器1的自由谱范围 $FSR_1=12.2$ GHz。采用级联腔后，只有当级联光滤波器的自由谱范围 $FSR_s > 200$ GHz时，光滤波器才能将所需的波长信号正确选出，而其它波长信号将被抑制，由式(3)得 $FSR_s = (K+1)FSR_1 \geq 200\text{GHz}$ ，求得级联游标因子 $K=16$ 。设滤波器2的光波导的折射率，在加电压前为 $n_2=2.210135$ 。由式(3)可得滤波器2的自由光谱 $FSR_2 \geq 12.5\text{GHz}$ ，在这里，我们取12.90 GHz，由此求得滤波器2的腔长 $L_2=5.260$ mm。设每个F-P腔滤波器的3dB带宽为1.5 GHz，由式(6)求得级联腔滤波器的3dB带宽 $\Delta F_s \approx 0.64\Delta F_1 = 0.96\text{GHz}$ ，由式(7)得到级联滤波器和滤波器1的精细度为 $F_s=208$ 、 $F_1=8$ 。由式(2)，则 $F_1 = \pi/(T_m + \alpha L_1)$ ， α 为光波导的损耗系数，我们取峰值透射系数 $T_m=0.11$ ，滤波器1介质膜的反射率 $R_1=0.89$ ，则 $\alpha=0.510748 \text{ cm}^{-1}$ 。同理，滤波器2的反射介质膜的反射率取 $R_2=0.91$ 。

由式(1)得滤波器1和滤波器2的谐振频率分别为

$$f_1 = m_1 c / 2 n_{eff1} L_1 \quad (8)$$

$$f_2 = m_2 c / 2 n_{eff2} L_2 \quad (9)$$

式中, m_1 , m_2 分别为腔 1 和腔 2 的干涉级数, n_{eff1} , n_{eff2} 分别为光波导 1 和 2 的有效折射率。根据晶体的电光效应, 光波导的折射率可过调谐的电压来改变, 两者的关系为

$$\Delta n = -\frac{1}{2} \frac{n_e^3 \Gamma \gamma_{33} V}{d} \quad (10)$$

式中, n_e 为加电压前的折射率, γ_{33} 为电光系数, d 为电极间距, 取 $4\mu\text{m}$, V 为电压, Γ 模场积分因子, 根据设计光波导的参数和文献[2], 其值为 0.407。由式 (10) 可看出, 调谐电压改变时, 波导的折射率发生相应的改变, 导致波导的有效折射率 $n_{eff} = n_e + \Delta n$ 改变, 从式 (8)、(9) 可知, 滤波器的谐振频率也随着改变, 从而达到调谐滤波的作用。滤波器 1 的电压频率响应曲线如图 3 所示。从图 3 可见, 电压增大, 谐振频率朝高频方向移动。

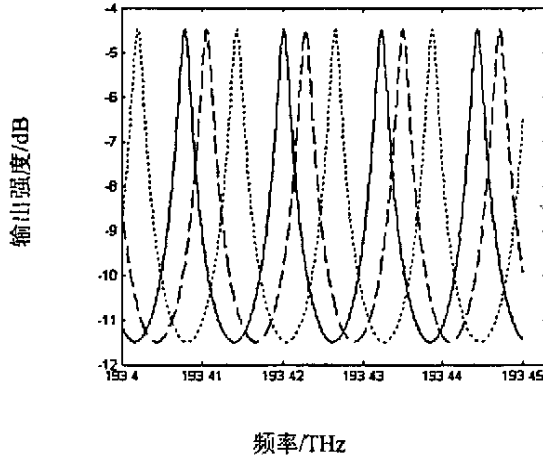


图 3 不同的调谐电压下滤波器 1 的透射光谱
-0.7V ----2.5V5V

只要分别调谐滤波器 1 和滤波器 2 的电压, 使它们的谐振频率相等, 而且等于 DWDM 复用信道中的某个频率信道, 那么, 这个频率信道便可通过级联滤波器。由于两个滤波器的自由谱设计成游标的形式, 两者的自由谱不相等, 有差别, 各自的干涉级数增加时, 两者之间的谐振频率的间隔越来越大, 而且在级联滤波器的自由谱范围内, 也不等于其它 DWDM 信道的频率, 因此, 只有一个信道通过级联滤波器。在我们设计

的滤波范围内,各信道与两个滤波器的调谐电压对应值如表 1 所示。对于我们所设计的级联滤波器的结构参数,以及应用的 DWDM 复用信号系统,通过计算得相邻信道之间的串扰达-18dB。

表 1 级联滤波器的调谐参数

Channel frequency /THz	Filter 1 /V	Filter 2 /V
193.4485	-6.8	6
193.4985	-6	5
193.5485	-5.2	3.9
193.5985	-4.2	3
193.6485	-3.1	1.8

4、LiNbO₃波导 F-P 器件的工艺

在 LiNbO₃ 晶体材料表面制作光波导一般采用扩钛技术和质子交换技术。质子交换是一种制作高折射率、低损耗 LiNbO₃ 光波导的成熟技术,它是以 LiNbO₃ 晶体材料为衬底、用质子交换技术制作得到条波导,然后端面抛光和镀高反射膜,下面简述工艺制作过程。

4.1 质子交换光波导

质子交换方法是將晶体材料完全浸入质子源中^[3],它的机理是质子源中质子 H⁺与 LiNbO₃ 中的 Li⁺发生相互置换,交换反应的式子为 $x\text{H}^+ + \text{LiNbO}_3 \rightarrow \text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3 + x\text{Li}^+$,最后在晶体表面形成一层高折射率的光波导层 Li_{1-x}H_xNbO₃。LiNbO₃ 质子交换波导具有以下一些特点:

- (1) 波导制作的温度较低,波导形成的速度快,采用苯甲酸作为质子源时,一般在 230℃,需要 30min 的交换时间,可得到单模波导。
- (2) 质子交换制作的光波导,使非常光的折射率增加,而寻常光的折射率减少,寻常光的折射率变化约为-0.04,因此质子交换波导具有单偏特性。对于 X、Y 切的 LiNbO₃ 波导,导模为 TE 模,而对于 Z 切 LiNbO₃ 波导,导模为 TM 模。
- (3) 质子交换波导的抗光损伤能力强,特别是在 LiNbO₃ 晶体材料中,掺入 MgO,可大大提高其抗损伤能力,这在波导器件的设计与制备上,减少光传输损耗非常有用。
- (4) 质子交换波导的折射率分布近似为阶跃型分布。

- (5) 质子交换波导的折射率不稳定, 经过长时间后, 其折射率分布会发生变化, 如果质子交换制作波导后, 再经过退火^[4], 其折射率分布可处于长时间的稳定状态。
- (6) 质子交换波导的电光系数发生显著的下降。

4.2 退火工艺

为了改善质子交换光波导的性能, 我们在恒温退火炉中进行退火工艺。退火光波导具有以下一系列的优点:

- (1) 改善了波导的折射率稳定性。由于退火能使波导层中的质子向衬底深度方向不断扩散, 波导表面高质子浓度区域渐渐消失, 消除了波导不稳定的根源, 使波导的折射率达到相对稳定的状态。
- (2) 降低了波导的传输损耗。退火改善了质子交换波导复杂的相成分, 减少了不同相结构之间的光散射, 退火使表面的折射率增量降低, 使波导表面的光学不平整对波导传输损耗的影响减弱。
- (3) 电光系数和非线性系数得以恢复。
- (4) 波导与光纤的耦合效率有所提高。

4.3 LiNbO₃ 平面单模波导的制作

我们在以苯甲酸为质子源, 交换温度为 230℃, 交换时间分别为 10min 和 15min 的两个不同的交换时间条件下制作两个光波导, 称为 M1 和 M2。另外, 我们还在苯甲酸中掺入苯甲酸锂作为质子源^[5], 苯甲酸锂的摩尔比例定义为

$$R = \frac{C_6H_5COOLi(\text{moles})}{C_6H_5COOLi(\text{moles}) + C_6H_5COOH(\text{moles})} \times 100\% \quad (11)$$

其中的摩尔比为 1%, 交换温度仍为 230℃, 交换时间为 45min, 制作光波导 M3。用棱镜耦合法观察和测量光波导导模的折射率, 实验结果如表 2 所示。

表 2 单模波导的质子交换制作特性($\lambda = 632.8\text{nm}$)

波导	质子源	$T_e(^{\circ}\text{C})$	$t_e(\text{min})$	折射率
M1	苯甲酸	230	10	2.24852
M2	苯甲酸	230	15	2.27912
M3	$R = 1\%$	230	45	2.21799

从表 2 中的 M1 和 M2, 我们看出, 以苯甲酸为质子源, 在 230℃ 的交换温度下, 当交换时间很短时(十几分钟), 可以得到质子交换的单模波导, 对于 M3, 由于在苯甲酸中掺入了苯甲酸锂作为质子源, 质子源中 Li^+ 的浓度相对较高, 这降低了质子交换中 H^+

与 Li^+ 相互置换的速度，使波导层中 H^+ 的浓度相对减少，因此，即使 M3 的交换时间比前两种 M1 和 M2 的交换时间长得多，也得到单模波导，且折射率也比前两者的小。

5、 LiNbO_3 波导 F-P 器件的特性测试

波导 F-P 器件的测试是在光波导-光纤自动调芯仪上进行的。测试装置光路示意图如图 4 所示。该测试系统采用自动化技术实现光波导与光纤之间的高效率、低损耗的对接，通过扫描微调波导光轴与光纤轴的相对位置来获得尽可能大的耦合效率。光波导芯片被固定在中间的三维手动调整座上，左右两侧的精密六维调整台分别用于固定输入光纤和输出光纤。利用计算机程序进行调芯操作，实时接收探测器的光功率信号，实时完成、判别、记忆和反馈操作。我们的测试分为两阶段：第一阶段测试光波导的传输损耗和光波导与单模光纤耦合连接时的端面耦合损耗；第二阶段测试 F-P 器件的强度电压调制特性。其中端面耦合损耗计算公式为

$$\eta = -10 \log \left(\frac{P_{\text{SF}}}{P_{\text{MF}}} \right) = 10 \log(P_{\text{MF}}) - 10 \log(P_{\text{SF}}) \quad (12)$$

式中， $10 \log(P_{\text{MF}})$ 以 dBm 为单位表示由光波导出射的光功率，即光波导进入多模光纤的光功率。由式(12)可计算得到光波导——单模光纤的端面耦合损耗。测试结果如表 3 所示。其中器件的强度调制测试在图 5 的仪器上进行，实验的结果如表 4 和表 5 所示。从实验的结果，可以看出，实验结果与理论是相一致的。

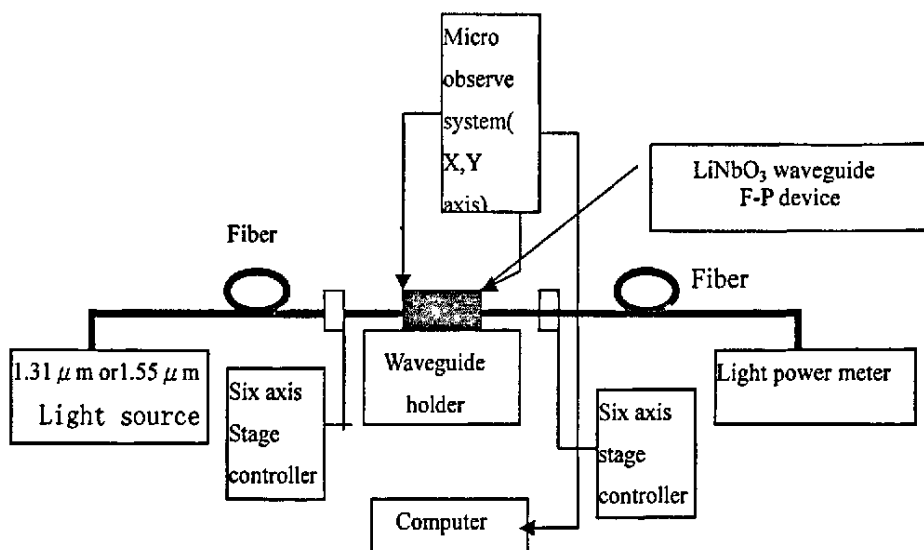


图 4 测试装置光路示意图

表 3 测试结果

波长/nm	1310		1550
端面耦合损耗 /dB	次数		
	1	3.96	3.21
	2	4.04	3.11
	3	4.01	3.15
	平均值	4.00	3.16
传输损耗 dB/cm	1	2.09	2.12
	2	2.23	2.14
	3	2.14	2.15
	平均值	2.15	2.13

表 4 波导 F-P 器件的强度调制特性(1310 nm)

调谐电压值/V		光功率/ μ W			平均值/ μ W	平均相对变化(%/V)
电 压 值	0	5.12	5.11	5.10	5.11	1.02
	5	4.90	4.89	4.90	4.89	
	10	4.65	4.60	4.62	4.63	
	15	4.35	4.35	4.35	4.35	
	20	4.06	4.06	4.08	4.06	
	25	3.72	3.71	3.71	3.71	
	30	3.43	3.43	3.42	3.43	

表 5 波导 F-P 器件的强度调制特性(1550 nm)

调谐电压值/V		光功率/ μ W			平均值/ μ W	平均相对变化(%/V)
电 压 值	0	4.43	4.43	4.43	4.43	0.688
	5	4.35	4.34	4.34	4.34	
	10	4.20	4.21	4.21	4.21	
	15	4.03	4.02	4.03	4.03	
	20	3.82	3.81	3.82	3.82	
	25	3.62	3.61	3.62	3.62	
	30	3.42	3.43	3.42	3.42	

- (1) 波导 F-P 器件对 1310 nm 波长的的重复性很好,而且光强对调制电压的响应速度快。
如调制电压从 0V 开始增加,输出光强跟着相应地减少,当电压从某个值调回 0V 时,输出光强也快速地回到与 0V 相应的输出光强。无论是 1310 nm 还是 1550 nm,都具有这种重复性。
- (2) 输出光强比 1550 nm 的输出光强大些,这可能是 1310 nm 的光源输出功率大的原因,也有可能与光功率计有关。

6、结 论

本文分析了级联光滤波器的滤波原理,模拟了单个 F-P 腔滤波器的电压滤波调谐特性,在应用于所研究的 DWDM 复用信道光滤波系统中,只要设计合理的滤波器的结构参数,利用游标式的工作原理,可从光接收端获得单信道的波长信号,通过计算,相邻信道的串扰可达-18dB 左右。

参考文献:

- 1、Lawetz C.Performance of optically preamplified receivers with Fabry-Perot optical filters. J. Lightwave Technology, 1996,14(12):2719-2735
- 2、Wang W, Tavlykaev R, Ramaswamy R V. Bandpass traveling-wave Mach-Zehnder modulator in LiNbO₃ with domain reversal . IEEE photonics Technology Letters, 1997,9(5):610-612
- 3、Jackel J L,Rice C E and Veselka J J. Proton exchange for high-index waveguides in LiNbO₃. Appl Phys Lett., 1982,41(7):607-608
- 4、Ahlfeld H, Webjorn J,Thomas P A et al. Structural and optical properties of annealed proton-exchanged waveguides in z-cut LiTaO₃.Appl.Phys.1995,77(9):1-3
- 5、Vittorio M N et al. LiNbO₃ optical waveguides formed in a new proton source. J.Lightwave Techno2002,20(1):71-77

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>