

基于压电聚合物薄膜可调谐 Fabry-Perot 滤波器的研究^{*}

周可余 叶 辉[†] 甄红宇 尹 伊 沈伟东

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 杭州 310027)

(2009 年 2 月 24 日收到 2009 年 4 月 15 日收到修改稿)

采用 DBR/电极/间隔层/电极/DBR 的结构形式制作滤波器,器件透光部分刻蚀以消除电光效应.测试滤波器透射率光谱,并通过加电压对滤波器中心波长进行调制.据实际结果得到腔的光学厚度为 $8.04 \mu\text{m}$,腔长在电场作用下收缩.在 140 V 电压下,腔长收缩量约为 0.757%.实验证明电致伸缩效应在调制中起作用.

关键词: Fabry-Perot 滤波器, 聚合物, 可调谐, 电致伸缩

PACC: 4280C, 8120S, 7755

1. 引 言

随着通信技术的发展,光波分复用(WDM)技术越来越受到重视.在 WDM 系统中,光滤波器被用作对信道进行控制和对实际信道需要的光波长进行选择,是系统中的关键器件^[1].其中可调谐 Fabry-Perot 滤波器(FPF)与其他可调谐滤波器——声光滤波器、Mach-Zehnder 滤波器、光纤光栅可调谐滤波器相比,具有许多优点:可调谐范围广、高精度、插入损耗低、响应时间快、结构灵活等.因此,FPF 的研究受到很大关注,波导 F-P 滤波器、液晶 F-P 滤波器、光纤 F-P 滤波器等多种 FPF 都发展迅速^[2].这些滤波器主要利用机械、压电、电光和热效应等实现调制,各种都具有一定局限性:热效应、机械效应响应较慢,无机压电晶体变化量较小,电光薄膜难适用于宽光谱调制.因此新型材料的制备和研究一直是热门课题^[3].

近几年,电敏感性材料作为间隔层被应用到可调谐 FPF 的制作中.谐振波长的调制依靠 F-P 腔光学厚度的改变实现,具体可以通过以下两个途径:间隔层折射率 n 或者 F-P 腔物理厚度 d 的改变.前者可以通过有机聚合物、无机晶体或者液晶的电光(EO)效应改变^[4-11],厚度可以通过聚合物材料的电

致伸缩效应或者反压电效应改变^[12,13].与无机晶体和液晶相比,聚合物材料柔性好、阻抗低,易于加入到集成电路中或与器件表面匹配,是一种很吸引人的材料.由于单纯通过电光效应来调节 F-P 腔的光学厚度,要求聚合物有很高的电光系数.虽然目前对高电光系数的聚合物薄膜有报道^[14],但仅仅靠单纯的电光效应这种材料本身固有的性能很难实现宽光谱调制,而利用电致机械效应调节 F-P 腔时,F-P 腔的光学厚度改变不仅与聚合物性能有关,还可通过增加薄膜厚度以增大调制范围,因此很有希望制作出高性能 F-P 滤波器^[15].聚偏氟乙烯(PVDF)及其共聚物是迄今发现的压电、热释电性能最强的高分子聚合物,可以用作可调谐 F-P 滤波器的间隔层^[10,13,16].其中偏氟-三氟乙烯共聚物(P(VDF-TrFE))进行高能电子辐射后,电致伸缩量可以达到 4% 以上^[17].

本文利用铁电聚合物 P(VDF-TrFE)制作了高性能 F-P 滤波器,并在此基础上完成了这种滤波器 F-P 腔的应变、滤光特性等性能测试.

2. 结构原理和器件制备

本文制作的 F-P 滤波器结构如图 1 所示,采用反射镜/电极/间隔层/电极/反射镜的结构.我们设计

^{*} 浙江省教育厅 2008 项目(批准号:Y200803562)资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: huiye@zju.edu.cn

比较了多种结构,最终确定了此种结构.以往的结构设计一般是选用透明导电膜氧化铟锡(ITO)作为导电电极.由于ITO薄膜对近红外光的吸收较大,一般需要将两电极加在腔的最外层来降低器件的损耗^[4,5].这样一来,电压并不是直接加在聚合物薄膜两端,反射镜也分担了一部分电压,这将使得调制电压增加,有效电压使用率降低.而本文制作的滤波器将电极放置在反射镜内侧,可以防止高反膜的分压,使有效电压使用率为100%;电极是采用蒸镀方式制备的Al电极,并且通过掩模制作出光学窗口,避免金属Al对器件光学性能的影响.同时采用感应耦合等离子刻蚀(ICP)工艺刻蚀掉中间部分的聚合物薄膜,使间隔层只为空气层,从而减小聚合物薄膜的吸收造成的损耗,同时消除材料的电光效应对实验结果的影响.

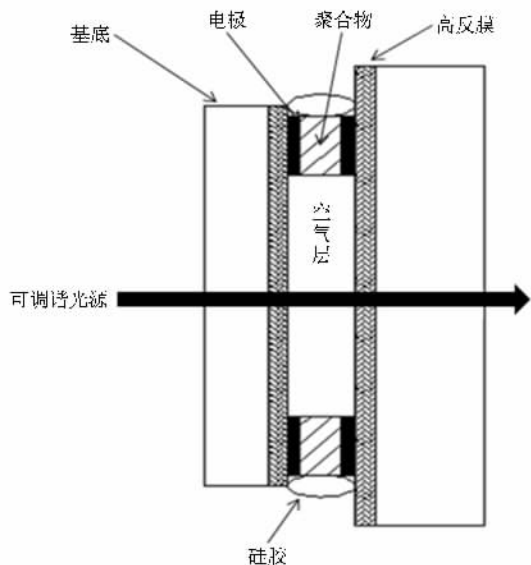


图1 器件结构

具体制作过程中,首先是要在基板上制作高反镜.由于金属膜的吸收损失较大,我们采用分布式布拉格反射镜(DBR)作为高反镜.该介质高反膜由多层高折射率(记为H)、低折射率(记为L)物质交替间隔组成,每层薄膜的光学厚度均为 $\lambda_0/4$ (λ_0 为中心波长).本文中采用折射率为2.18的 TiO_2 和折射率为1.45的 SiO_2 ,结构为 $(\text{HL})^n\text{H}$,中心波长选为1550 nm.当波长确定时,通过膜系设计可以精确控制反射膜反射率的大小.

其次是下电极制作.Al电极蒸镀过程中使用掩模板制作成设计的形状,由石英晶振控制厚度为100 nm,方阻为十几 $\Omega/\square$.

然后是间隔层制作.选用组分为70/30 mol%的P(VDF-TrFE)聚合物材料(购自法国SOLVA公司),以10 wt%溶于N-N二甲基乙酰胺(DMAc)配制成溶液.下层DBR上镀好下电极后,采用旋涂(spin-coating)的方式将共聚物P(VDF-TrFE)溶液均匀涂覆在Al膜和DBR膜层上,转速控制在1000 r/min,持续时间为30 s.甩制好的薄膜在85℃下加热20 h挥发溶剂,再在140℃下退火4 h形成稳定晶相.在聚合物膜上以相同掩模板蒸镀上电极后,直接以上层Al电极为掩模板,采用感应耦合等离子刻蚀(ICP)的方法,刻蚀掉电极以外区域的聚合物薄膜,以保证间隔层只有空气存在.刻蚀过程中以 O_2 为主要反应气体, He 为基板冷却气体.刻蚀条件为ICP功率400 W,RF功率40 W,反应室气压为1.2 Pa, O_2 和 He 流量分别为40和17 sccm.

最后是器件封装.将另一片镀有DBR的玻璃片与下层基片紧密接触,并用弹性较好的硅橡胶将两者黏合起来,形成F-P腔.这一步骤也是器件制作过程中最大的工艺难点,在封装过程中一定要尽量将两面反射镜调成平行,从后面的实验以及分析可以看到,反射镜面的平整度和平行度对实验结果有很大影响.

聚合物两端的Al电极加上电压后,聚合物会在电场作用下产生形变,从而带动上玻璃片运动,改变F-P腔的腔长.实验中采用紫外可见分光光度计(Shimadzu UV-3101PC)来测试器件在1300—1700 nm波长范围内的透过率变化.

3. 实验和数据

当入射光的入射角增加时,F-P腔干涉峰的峰值波长会出现蓝移,峰值透过率降低,并且由于非正入射时的偏振效应,使得光学分析复杂化.因此实验中采用垂直入射光进行研究.光线垂直入射时,F-P滤波器的透射率可表达为^[18]

$$T = \frac{T_0^2}{(1 - R_0)^2 + 4R_0 \sin^2 \frac{\delta}{2}} = \left(1 - \frac{A_0}{1 - R_0}\right)^2 \frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}}, \quad (1)$$

其中, R_0 、 T_0 、 A_0 分别表示两反射膜的反射率、透过率和吸收散射损耗,满足 $R_0 + T_0 + A_0 = 1$.位相差 $\delta = \frac{4\pi}{\lambda}nd + 2\phi$,其中 n 是间隔层的折射率, d 是间隔

层的厚度 ϕ 是反射膜引入的反射相变. 参数 F 记为 $\frac{4R_0}{(1-R_0)^2}$. 图 2 是 DBR 反射膜的特性曲线, 其中两条透射曲线分别为 DBR 反射膜的设计透过率和实测透过率. 由于两侧高反膜是同一罩中镀制, 它们的透过率曲线完全一致, 而且反射率不对称对 F-P 滤光片峰值透过率的影响可以忽略, 因此我们把两者的反射率 R_0 、透射率 T_0 以及反射相位差 ϕ_0 记为相同. 图中反射相变曲线为模拟值, 可以看到反射相变在中心波长 1500 nm 附近近似呈线性, 其数值在 0° 附近, 而实验中 F-P 滤波器的腔长达 μm 量级, 因而可忽略反射镜反射相变对总位相差 δ 的贡献, 反射相变 $\varphi \approx 0$.

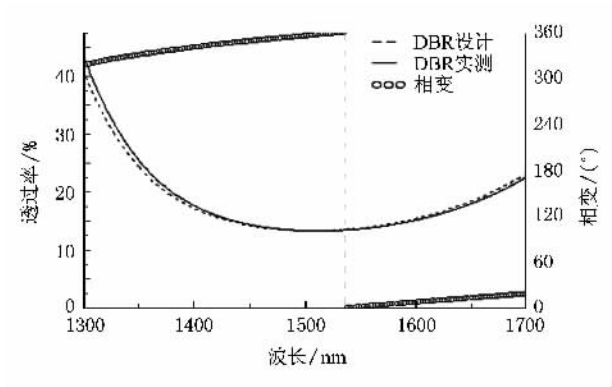


图 2 DBR 的透射率和反射相变

因为 F-P 腔的峰值透射率 $T_{\max} = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2$, 在损耗 A 一定的情况下, $A(1-R)$ 会随反射膜反射率 R 的提高而增大, 从而造成 $T_{\max}$ 减小. 而 F-P 腔的精细度 $\mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$ 随着反射率的提高而增大, 可以看出, 峰值透射率的提高和精细度的提高相矛盾. 实际应用中, 两个反射面不可能完全平行, 反射率很高时条纹锐度有上限, 反射率增加导致峰值透射率下降, 精细度却增加很少. 因此, 实验中采用反射率为 85% 的 DBR.

如图 3(a) 所示是不考虑吸收、散射等损耗的理想 F-P 腔在可见光范围内的计算模拟图, 图 3(b) 为制作的器件在没有电场作用时的透过率测试值. 同时制作了一个没有刻蚀薄膜间隔层的器件作为对比. 从图 3(a) 可以看到, 透过率为 85% 的 DBR 在理想状态下完全可以制作出很好效果的器件. 从图 3(b) 可以看出, 未刻蚀的器件透过率不如刻蚀器件高, 半宽度比刻蚀器件大. 表 1 是两个器件的性能指

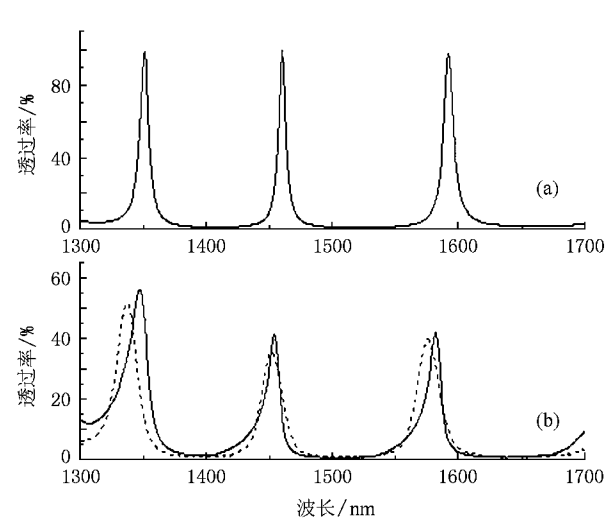


图 3 (a) 刻蚀器件透过率模拟值 (b) 器件透过率测试值 (实线和虚线分别为刻蚀器件与未刻蚀器件)

标, 可以看出, 高聚物薄膜引入的光学损耗会降低透过率和精细度, 因此在以下研究中选用刻蚀的器件.

表 1 刻蚀与未刻蚀器件的性能指标

器件类型	中心波长 透过率/%	半强度宽 度 FWHM/nm	自由光谱 范围 FSR/nm	精细度
刻蚀器件	41	13	128	9.85
未刻蚀器件	35	18	126.5	7.03

刻蚀的器件透过率测试值比理想值低, 说明器件中 DBR 层的吸收、散射等损耗是客观存在的, 同时基板本身的缺陷、制作过程中工艺不当也会产生很大影响. 而精细度的降低主要是由基板的面型缺陷等引起的. 器件总的精细度由两项参数决定: 反射精细度 (F_R) 和表面缺陷精细度 (F_S)^[9,19]. F_R 由反射镜的反射率决定, 而 F_S 由两块玻璃基板的面型、粗糙度和平行度等决定. 这三者存在以下关系:

$$\frac{1}{F^2} = \frac{1}{F_R^2} + \frac{1}{F_S^2}, \quad (2)$$

在这里反射精细度 $F_R = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} = 23$, 计算得 $F_S = 9.85$. 最大透过率

$$T_{\max} = \frac{F_S}{F_R} \arctan\left(\frac{F_R}{F_S}\right) \times T_{R\max}, \quad (3)$$

这里 $T_{\max}$ 就是 (1) 式中的 T . 计算可得 $T_{\max} = 49.9\%$, 这与实测值接近. 具体实验中基板面型的质量确实对透过率和细度的影响很大, 一方面粗糙度比较大, 会引起散射和损耗, 另一方面两块镜面的不平行会引起平均效应, 从而引起透过率的降低和半宽度的

增加.根据测试出的所使用玻璃基板面型,计算其表面弯曲度为 0.215 μm/mm,由此估计出其表面精细度大概为 10 左右,这与实验结果基本一致.

当相位差 $\delta = 2k\pi$ (k 为整数) 时,透过率出现峰值,由此可推导出谐振波长表达式为

$$\lambda_0 = \frac{2nd}{k + \Phi/\pi} = \frac{2nd}{m}. \tag{4}$$

此处 $m = k + \Phi/\pi$,并且器件的间隔层都为空气,因此 $n = 1$.相邻两个谐振峰值的波长分别记为 $\lambda_1 = \frac{2d}{m}$ 和 $\lambda_2 = \frac{2d}{m+1}$,可推出 F-P 腔的腔长为

$$d = \frac{\lambda_1 \times \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)}. \tag{5}$$

由(5)式计算出没加电压时 F-P 腔的腔长为 8.04 μm,而用台阶仪测得的膜厚度为 3 μm,除去两层 Al 电极的厚度 200 nm,仍然有近 5 μm 厚度差值.这是由多种原因造成的:黏合过程中两块基板不可避免会存在一些缝隙,而且基板的面型本身就有缺陷,中间的间隔和两边存在差异,这也同样造成了透过率峰值和细度的降低,因此今后还需改善基板的面型.

如图 4 所示为器件加上直流电压后的透射率.加电压后,中心波长发生了偏移,谐振波长表示为

$$\lambda_v = \frac{2(d + \Delta d)}{m}, \tag{6}$$

此处 λ_v 表示加电压后的谐振波长.联立(5)(6)两式,可以得到

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta d}{d}. \tag{7}$$

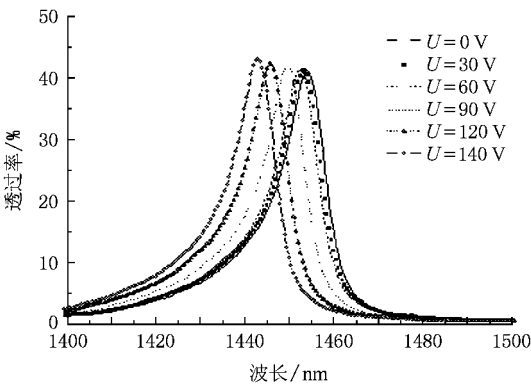


图 4 刻蚀器件在不同电压下透射率曲线

从图 4 可以看到,中心波长向短波方向移动,由(7)式可推出腔长趋于收缩.当透射峰移动时,峰值透过率增高,半强度宽度变小,这有可能是由于上基板在运动过程中平行度发生了改变.所加最高电压为

140 V,膜厚为 3 μm,电场强度约为 46.7 V/μm,当电压继续往上加时,边缘有一些放电现象,并且透射峰移动明显变小.当电压为 140 V 时,1454 nm 处的谐振波长移动了 11 nm.如图 5(a)所示,中心波长变化量与电压成二次方关系,因此可以通过改变聚合物两侧的电压来微调中心波长.

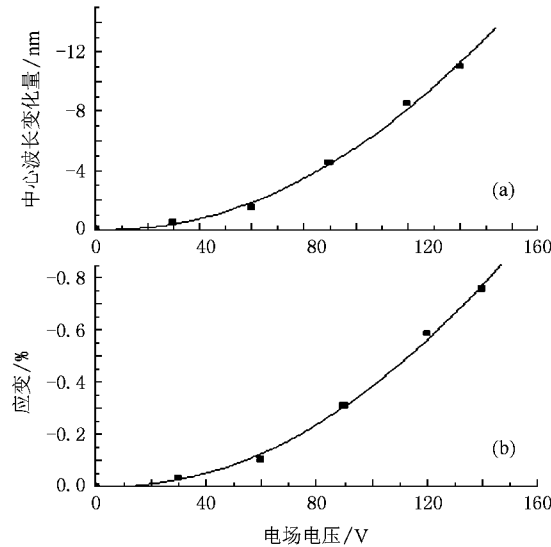


图 5 电场与中心波长移动量以及腔长应变关系(■, — 分别为实测值和拟合值)

根据(7)式,计算出腔长收缩量与电场的关系.如图 5(b)所示,腔长收缩量也与电压成二次方关系,这符合电致伸缩效应与电场的关系.实验过程中发现,腔长变化与电场方向没有关系,证明在此场强下反压电效应贡献很小,从另一方面证明电致伸缩效应起主要作用.而且由于该器件经过刻蚀,因此不用考虑电光效应对腔长收缩的影响.腔长的最大变化量为 -0.757%,算得聚合物的收缩量为 2.029%,这在未经过高能电子辐射的聚合物中是比较大的变化.以后我们的工作可以对聚合物进行进一步处理,如进行高能电子辐射等以提高其性能.

4. 结 论

以聚合物 P(VDF-TrFE)为间隔层制作了 F-P 滤波器,通过对器件中可能存在的效应的分析,确定了器件结构.该结构排除了电光效应的影响,提高了电压利用率,并且所有制作工艺都为常规制作工艺,不会增加器件成本.制作了刻蚀与不刻蚀器件进行性能对比,验证了本文所采用的器件的结构有利于透过率等性能的提高,通过对 F-P 器件进行加电压调

制,验证了聚合物的电致伸缩效应对器件起调制作用,并得到比较好的调制效果.结果表明,铁电聚合物的电致伸缩效应可以被用来制作可调谐滤波器,

器件实现宽光谱可调,调节范围较大并且还有上升空间,并且聚合物具有易于加工和易于加入到集成电路中等优点,因此有比较好的前景.

- [1] Pang S, Jiang Y, Cui Y P 1999 *Optical Instruments* **21**(4-5) 204 (in Chinese) 庞叔鸣、蒋燕、崔一平 1999 光学仪器 **21**(4-5) 204]
- [2] Song M, Xie F, Feng Q B 2005 *Photon Technology* **4** 197 (in Chinese) 宋明、谢芳、冯其波 2005 光子技术 **4** 197]
- [3] Zhou M, Chen X S, Wang S W, Zhang J B, Lu W 2006 *Acta. Phy. Sin.* **55** 3725 (in Chinese) 周梅、陈效双、王少伟、张建标、陆卫 2006 物理学报 **55** 3725]
- [4] Chen P L, Lin K C, Chuang W C, 1997 *Photon. Technol. Lett.* **9** 467
- [5] Harada K 2002 *Opt. Quantum Electron.* **34** 1183
- [6] Chen K X, Yi M B, Zhang D M, Hou A L 2000 *Acta. Phy. Sin.* **49** 1611 (in Chinese) 陈开鑫、衣茂斌、张大明、侯阿临 2000 物理学报 **49** 1611]
- [7] Gan H Y, Zhang H X, DeRose C T, Norwood R A, Peyghambarian N, Fallahi M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 041127
- [8] Gan H Y, Zhang H X, Zhang H X, DeRose C T, Norwood R A, Fallahi M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 141113
- [9] Hirabayashi K, Tsuda H, Kurokawa T 1993 *Lightwave Technol.* **1** 2033
- [10] Dae-Y J, Wang Y K, Huang M, Zhang Q M 2004 *Appl. Phys.* **96** 316
- [11] Xu J J, Zhou L G, Thakur M 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 153
- [12] Elderling C A, Knoesen A, Kowel S T 1991 *J. Appl. Phys.* **69** 3676
- [13] Dae-Y J, Ye Y H, Zhang Q M 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4857
- [14] Norwood R A, Derose C, Enami Y, Gan H, Greenlee C, Himmelhuber R, Kropachev O, Loychik C, Mathine D, Merzylak Y, Fallahi M, Peyghambarian N 2007 *J. Nonlin. Opt. Phys. Mater.* **16** 217
- [15] Nicole G, Harald D, Katrina B 2006 *Appl. Phys. B* **85** 7
- [16] Li J, Baur C, Koslowski B, Dransfeld K 1995 *Physica B* **204** 318
- [17] Zhang Q M, Vivek B, Zhao X 1998 *Science* **280** 2101
- [18] Born M, Wolf E 1978 *Principles of Optics* (Beijing: Science Press) p182—190 (in Chinese) 玻恩、沃尔夫、杨葭孙译 光学原理 (北京: 科学出版社) 第182—190页]
- [19] Wang P, Seah L K, Murukeshan V M, Chao Z X 2007 *J. Modern Opt.* **54** 2735

Study of tunable Fabry-Perot filter based on piezoelectric polymer film *

Zhou Ke-Yu Ye Hui[†] Zhen Hong-Yu Yin Yi Shen Wei-Dong

(College of Information Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(Received 24 February 2009 ; revised manuscript received 15 April 2009)

Abstract

Tunable Fabry-Perot filter (FPF) has high practical value in optic communications. Piezoelectric copolymer P(VDF-TrFE) can be used as spacer material in FPF to obtain large tunability in wide range because of its great electrostrictive effect. The filter has been fabricated with the structure of DBR/electrode/spacer/electrode/DBR. The copolymer is partly etched at where the light traverses. The transmittance spectra have been studied. The resonant wavelengths have been modulated by applied voltage. The optical length is measured to be $8.04\ \mu\text{m}$, which shrinks under the electric field. The filter exhibits a total optical path-length change of -0.757% under an electric field of 140 V. The results indicate that the electrostrictive effect plays a major role.

Keywords: Fabry-Perot filter, polymer, tunable, electrostriction

PACC: 4280C, 8120S, 7755

* Project supported by the 2008 Research Program of the Education Bureau of Zhejiang Province of China (Grant No. Y200803562).

[†] Corresponding author. E-mail: huiye@zju.edu.cn