

红外波段液晶电调谐滤波器

张兆祥 潘南生[✓] 奚中和 石自光
(北京大学电子学系, 北京, 100871)

TN2814

A

摘要 将液晶作为内腔物质的电调谐滤波器, 测量了在红外波段不同条件下的透射特性, 给出了大约 100nm 的可调谐范围和约 40nm 的自由光谱区, 通过对透射谱的测定和计算得到了液晶折射率随驱动电压的变化曲线。

关键词 液晶, 电调谐滤波器, 红外波段, 透射特性。

引言

目前人们使用的多种类型光学滤波器存在工作电压高、体积大、响应速度慢、调谐范围有限等缺点, 为克服以上缺点, Mallsion^[1]于 1987 年提出了以液晶为内腔物质的法布里—珀罗结构的光学滤波器, 在液晶上加很小电压就能得到较大的调谐范围, 制成了一种新型的电调谐滤波器。随后, 美国贝尔实验室 Patel^[2~4]和日本光电子技术实验室 Kurakawa^[5~10]的研究小组分别开展了一系列的研究工作, 取得了引人注目的进展, 并已作出了接近实用化的产品^[14]。为了克服温度变化引起的频率漂移, 采用频率锁定技术来补偿温度起伏造成的频漂^[15~17]。尽管他们的研究成果在实用化方面还有不少问题, 但作为一种新型电调谐滤波器, 其应用前景是很诱人的, 为此我们进行了液晶电调谐滤波器的研究。

1 实验装置

我们制作了法布里—珀罗型液晶电调谐滤波器, 并对其透射特性及不同结构参数所产生的影响进行了研究^[18]。实验用液晶电调谐滤波器的结构如图 1 所示。在两片研磨过的 K₉ 玻璃基片上沉积 ITO 透明导电膜和多层介质反射膜, 在准直层上用丝网印刷机在玻璃边缘印刷密封胶, 向一基片上喷撒少量尺寸均匀的玻璃衬垫, 再粘合基片, 真空灌注 E, 向列型液晶, 最后用密封胶封口。

我们研究的器件是适用于红外波段的液晶电调谐滤波器, 在上海光学仪器厂的平面光栅单色仪基础上建立了测试系统, 探测器用中科院半导体所生产的 InGaAs 光电二极管, 其波长探测范围为 1.0~1.7 μ m, 光电二

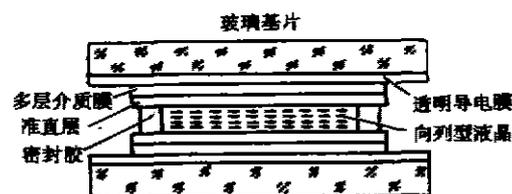


图 1 液晶电调谐滤波器结构示意图
Fig. 1 Electrically tunable liquid crystal filter

极管的输出信号经放大后输出到记录仪上进行检测. 入射光通过准直透镜射到单色仪入口光栏处的液晶电调谐滤波器部件上. 液晶部件要求交流驱动, 驱动电压的频率为 1kHz 到几十 kHz, 实验中使用 1kHz 方波信号作为信号源, 通过 CMOS 集成电路产生占空比为 1:1、上下对称、连续可调峰峰值为 0~15V 的方波电压, 作为液晶电调谐滤波器的驱动电压.

2 工作原理

液晶电调谐滤波器实质上是一法布里珀罗标准具结构, 因此法布里珀罗干涉仪的理论是适用的. 用多光束干涉理论分析液晶电调谐滤波器的透射光谱特性, 为讨论简便, 不考虑玻璃片、ITO 膜和多层介质膜的损耗. 对于液晶腔内两束相邻平行光线之间的光程差 ΔL 可表示为

$$\Delta L = 2nh\cos i, \quad (1)$$

式(1)中 h 为腔长, n 为腔内液晶的折射率, i 为光线在腔内的倾角, 因此相邻光线之间的相位差 δ 可以表示为

$$\delta = 2\pi\Delta L/\lambda = 4\pi nh\cos i/\lambda, \quad (2)$$

式(2)中 λ 为波长, 由多光束干涉理论^[19]可以推导出透射光强 I_T 为

$$I_T = \frac{I_0(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(\delta/2)}, \quad (3)$$

式(3)中 I_0 为入射束光强, R 为光强反射率. 由式(3)可知, 当 $\delta = 2K\pi$ 时, K 为整数, 称为级数, 这时 $I_T = I_0$, 即在没有任何损耗的理想情况下, I_T 达极大值. 用半峰宽概念描述透射峰的宽度时, 反射率越高, 谱线半峰宽越窄. 对于非单色平行光垂直入射时, 透射峰强达到极大时满足 $2\pi h = K\lambda_K$, 因此相邻两透射峰间距离, 即自由光谱区(FSR) $\Delta\lambda_K$ 为

$$\Delta\lambda_K = \lambda_{K+1} - \lambda_K = \frac{2\pi h}{K(K+1)}, \quad (4)$$

用 ν_K 表示频率, c 表示真空中光速, 则相邻两透射峰的频率间隔为

$$\Delta\nu_K = \nu_{K+1} - \nu_K = c/(2nh), \quad (5)$$

从式(5)可见, 随频率变化, 自由光谱区的频率数相同.

由于液晶分子本身在结构上具有各向异性, 使液晶的折射率、介电常数、磁化率、电导率、粘滞系数等物理参量沿液晶分子长轴的平行方向和垂直方向也具有各向异性. 这种各向异性由于液晶本身的弹性系数小, 其分子排列在电场、磁场、应力和温度等作用下极易发生变化. 利用在液晶腔两边加上交变可调驱动电压改变液晶分子的折射率, 可实现滤波器的波长调谐. 对固定腔长的液晶电调谐滤波器, 当驱动电压产生 ΔV 变化时, 折射系数会产生 Δn 微小变化, 从而使透射光谱波长产生 $\Delta\lambda$ 微小变化.

3 实验结果与分析

我们测量了 2mm 厚玻璃和沉积不同厚度 ITO 膜玻璃的透射率曲线, 得到 1.00~1.65 μm 波长范围的一组曲线(见图 2). 用 Dektak II 型台阶仪测量 ITO 膜厚. 由图 2 可见, 2mm

厚玻璃在 $1.00\sim 1.65\mu\text{m}$ 波长内透射率约为 94%。当玻璃沉积 ITO 膜后, 随波长增加, 透射率呈下降的趋势, 而且随膜厚增加, 这种下降趋势增大, 因此为不影响红外波段透射率, ITO 膜的厚度应小于 40nm。

液晶电调谐滤波器加上不同电压时的透射特性曲线如图 3 所示。图 3 分别为 0V 和 11V 时的透射光谱。由图 3 可见, 光强较强的透射峰随电压的增加峰位移动, 称为移动峰; 光强较弱的透射峰随电压的增加峰位基本上不移动, 称为不移动峰。从实验数据得

知, 在任意一驱动电压下, 随波长的增加, 同组光谱中的相邻两透射峰之间的距离, 即自由光谱区是增加的, 但相邻两峰之间的频率间隔在误差范围内是相等的, 这与前面分析的法布里—珀罗滤波器时得出的结论是一致的。图 4 给出不同驱动电压下透射峰波长变化曲线。由图 4 可以明显地看出移动峰和不移动峰的情况, 还可以看出在 $V_{pp} < 1.4\text{V}$ 时, 透射峰是不移动的; 当 $V_{pp} > 1.4\text{V}$ 后, 波长会发生明显的移动, 这个电压就是液晶电调谐滤波器的阈值电压。当电压从 0V 加到 15V 时, 峰值波长移动了约 100nm。产生这种现象的原因是液晶材料的折射率具有各向异性, 当液晶电调谐滤波器加的电压超过阈值电压时, 折射率开始变化, 其变化也呈各向异性。因垂直于液晶分子长轴方向的折射率不随电压变化, 所以透射峰不会移动; 而沿液晶分子长轴方向的折射率随电压的变化而变化, 故其透射峰是移动的。

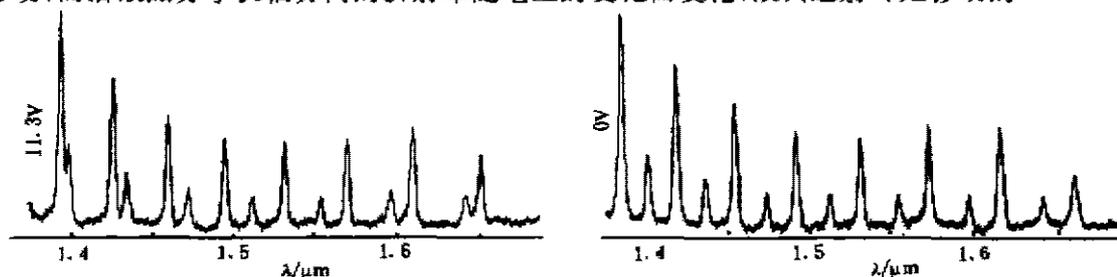


图 3 不同驱动电压时滤波器的透射光谱
Fig. 3 Transmission spectrum of filter for different driving voltage

从实验数据还可以计算出液晶分子折射率随驱动电压的变化情况。利用不加驱动电压时测得的不移动透射峰的波长和液晶分子长轴方向折射率的典型值, 即寻常光的折射率, 可以求出液晶腔的腔长, 再由不同电压下移动透射峰波长的实验数值, 计算出液晶分子对非寻常光的折射率随驱动电压的变化, 其结果如图 5 所示。由图 5 可见, 液晶电调谐滤波器的阈值电压约为 1.4V, 电压大于 1.4V, 折射率随电压增加开始减小, 当驱动电压较大时, 折射率变化趋于缓慢。

液晶法布里—珀罗型电调谐滤波器是利用液晶折射率的各向异性制作的, 当驱动电压

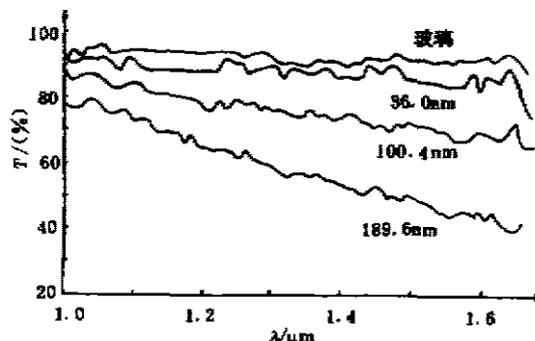


图 2 玻璃和沉积 ITO 膜玻璃的透射率曲线
Fig. 2 Transmission curves of glass and glass deposited with ITO film

变化时,液晶的折射率产生变化,实现波长连续可调,自由光谱区约为40nm,驱动电压从0V加到15V时,透射峰移动约为100nm.要获得性能较好的液晶电调谐滤波器,对玻璃基片的平整度有较高的要求,且封装时应保持两块基片平行.由于温度的变化会引起液晶折射率的变化,从而引起透射峰的漂移,因此必须采用频率跟踪技术来减小温度效应产生的影响.

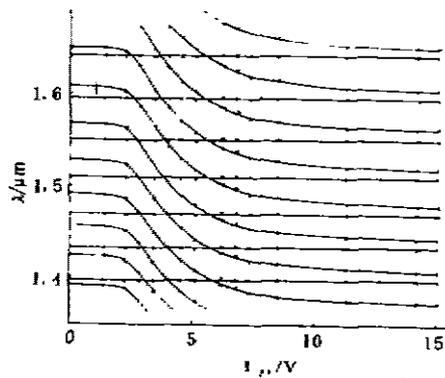


图4 不同驱动电压下透射峰波长变化曲线
Fig. 4 Position of the transmission peak as a function of driving voltage

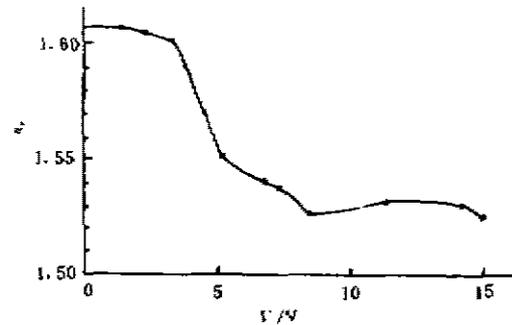


图5 液晶折射率与驱动电压的关系
Fig. 5 Refractive index of liquid crystal vs driving voltage

参考文献

- 1 Mallison S R. *Appl. Opt.*, 1987, 26(3), 430
- 2 Maeda M W, Patel J S, Smith D A, et al. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1990, 2(11), 787
- 3 Maeda M W, Patel J S, Lin C, et al. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1990, 2(11), 820
- 4 Patel J S, Saifi M A, Berreman D W, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 57(17), 1718
- 5 Patel J S, Maeda M W. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1991, 3(7), 643
- 6 Patel J S, Maeda M W. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1991, 3(8), 739
- 7 Patel J S, Lee S D. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58(22), 2491
- 8 Patel J S. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 59(11), 1314
- 9 Hirabayashi K, Tsuda H, Kurokawa T. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1991, 3(3), 213
- 10 Tsuda H, Hirabayashi K, Tohmori Y, et al. *IEEE Photo. Technol.* 1991, 3(6), 504
- 11 Hirabayashi K, Tsuda H, Kurokawa T. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1991, 3(8), 741
- 12 Hirabayashi K, Tsuda H, Kurokawa T. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1992, 4(6), 597
- 13 Hirabayashi K, Kurokawa T. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1992, 4(7), 737
- 14 Hirabayashi K, Kurokawa T. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1992, 4(7), 740
- 15 Patel J S, Wullert J R. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1991, 3(12), 1094
- 16 Patel J S, Wullert J R. *J. Appl. Phys.*, 1992, 71(5), 2464
- 17 Wullert J R, Patel J S. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1993, 5(2), 257
- 18 潘南生. 液晶电调谐滤波器的研究, 北京大学电子学系硕士论文, 1994. 6
- 19 赵凯华, 钟锡华. 光学, 北京: 北京大学出版社, 1984, 330

ELECTRICALLY TUNABLE LIQUID-CRYSTAL FILTER FOR INFRARED WAVE BAND

Zhang Zhaoxiang Pan Nansheng Xi Zhonghe Shi Ziguang

(Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Electrically tunable filters using liquid crystal as the cavity material were described. The transmission characteristic in the infrared wave band was measured under different conditions. It was shown that the tunable range is about 100nm, and the free spectral range is about 40nm. Through measurement and calculation of the transmission spectrum the refractive index of liquid crystal as a function of driving voltage was obtained

Key words liquid crystal, electrically tunable filter, infrared wavelength, transmission characteristic.