

文章编号: 0253-2239(2006)12-1835-6

电压调谐多级液晶滤光片的理论研究

张 剑^{1,2} 李国华¹ 彭捍东¹ 郝殿中¹

(¹ 曲阜师范大学激光研究所, 曲阜 272165)
(² 山东建筑大学理学院, 济南 250101)

摘要: 依据电压调谐多级液晶滤光片的设计原理, 给出了设计实例。主要讨论了三片液晶盒组成的多级滤光片, 在滤光片系统中液晶盒可以采用相同厚度, 也可以使厚度成一定比例。厚度成比例的多级滤光片, 其透射波长可通过调节外加电压而连续改变, 调谐范围 400~800 nm, 覆盖整个可见光区; 采用相同厚度液晶盒组成的多级滤光片可以从多条谱线中滤出所需要的波长。原理上两种形式都可以获得性能良好的滤光片。

关键词: 光学器件; 调谐滤光片; 多级; 液晶

中图分类号: O754⁺.2 文献标识码: A

Theoretical Study of Multiple Tunable Liquid Crystals Filters

Zhang Jian^{1,2} Li Guohua¹ Peng Handong¹ Hao Dianzhong¹

(¹ Institute of Laser, Qufu Normal University, Qufu 273165)
(² School of Science, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101)

Abstract: The theory on voltage-tunable multiple liquid crystal filters is discussed, and designing examples are given. The multiple filters composed of three single liquid crystal filters are mainly discussed. The three filters in the system may have the same thickness or proportional thickness. Both forms are effective. The filters having proportional thicknesses can change the transmitted wavelength by tuning the voltage, and the scope of the transmitted peak is 400~800 nm, covering the whole visible spectrum. The filters with the same thickness can be used to select certain desired wavelengths from multiline spectrum.

Key words: optical device; tunable filter; multiple; liquid crystal

1 引 言

滤光片用于在连续光谱中透过一定宽度的光谱带或在线状光谱中提取某些辐射。基于不同的机理, 滤光片的种类很多, 早期机械控制式滤光片、压电陶瓷光纤法布里-珀罗型可调谐滤光片等控制电压高^[1]、响应慢; 后来出现的声光可调谐滤光片虽然应用灵活, 但是能量消耗比较高^[2]。20 世纪 80 年代中期发展起来的液晶可调谐电光滤光片具有驱动电压低、结构简单、成本较低等优点, 广泛应用于在通信领域^[3~5]。

多级可调谐液晶彩色滤光能量消耗低, 调谐范围宽, 可以覆盖可见、近红外波段, 驱动电压低, 结构

简单, 成本较低, 能从二维图像信息提取特定波长, 可用于成像光谱仪^[6]。本文根据利奥(Lyot)型滤光片原理进行了多级可调谐液晶滤光片设计, 并从理论上给出了设计实例。

2 基本原理

利奥型液晶调谐滤光片由起偏镜、检偏镜和液晶盒组成^[7], 结构如图 1 所示, P_1 和 P_2 是偏振镜, L_1 是光轴平行于表面的液晶盒, 两偏振镜 P_1 和 P_2 的偏振面互相平行, L_1 的光轴方向与两偏光镜 P_1 和 P_2 偏振面成 45° , 其透射比^[8]

$$T = \cos^2(\delta/2), \quad (1)$$

作者简介: 张 剑(1978~), 男, 山东济南人, 曲阜师范大学硕士研究生, 主要从事偏光器件的设计工作。

E-mail: gull_sea@eyou.com

导师简介: 李国华(1937~), 男, 山东乳山人, 曲阜师范大学教授, 主要从事偏器件的研究。

收稿日期: 2006-01-13; 收到修改稿日期: 2006-03-22

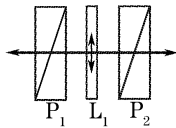


图 1 利奥液晶滤光片的结构图

Fig. 1 Structure of Lyot liquid crystal filter

其中 δ 为液晶盒的延迟量:

$$\delta = 2\pi\Delta n(\nu)d/\lambda, \quad (2)$$

$\Delta n(\nu)$ 为液晶盒的双折射率,是电压的函数。不加电压时,

$$\delta = 2\pi(n_e - n_o)d/\lambda, \quad (3)$$

n_o 和 n_e 分别为寻常光和非寻常光的主折射率, d 为液晶盒的厚度。

多级液晶调谐滤光片以利奥型滤光片为基础进行设计,所谓多级是把多个单级液晶滤光片合并而成。多级液晶滤光片的结构如图 2, 图中 P_1, P_2, \dots, P_{N+1} 是偏光镜,其主透射面是平行的, L_1, L_2, \dots, L_N 是光轴平行于表面的液晶盒,液晶盒的光轴方向与偏光镜的主透射面成,透射比为各单级液晶滤光片透射比之积^[9]:

$$T = \cos^2(\delta_1/2)\cos^2(\delta_2/2)\dots\cos^2(\delta_N/2), \quad (4)$$

其中 δ_n 为第 n 个液晶盒的相位延迟量

$$\delta_n = 2\pi\Delta n_n(\nu)d_n/\lambda, \quad (5)$$

由(4)式、(5)可知多级液晶滤光片的透射比由各个液晶盒的延迟量共同决定,因此 $\Delta n(\nu)d_n$ 的值就成为设计多级液晶滤光片时最重要的因素,每一级液晶盒的双折射率可以不同,双折射率随电压的变化也可以不同,其厚度可以成一定的比例。

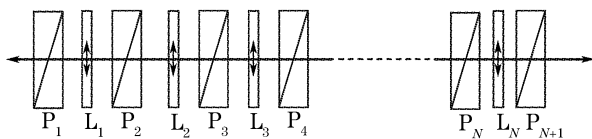


图 2 多级液晶滤光片的结构

Fig. 2 Structure of multiple tunable liquid crystals filters

3 液晶盒厚度成比例的多级液晶滤光片设计

3.1 设计原理

由以上分析可见,设计可调谐液晶滤光片时,要考虑的因素较多,因此设计比较灵活,要获得良好的滤光效果,可以从四方面考虑:1) 保证透射主峰在需要的波长 λ' 处;2) 透射主峰的半峰全宽越窄越好;3) 透射边峰越低越好;4) 透射主峰 λ' 的调谐范围在调谐范围之内。要满足上述条件 1),则滤光片中每一级在波长 λ' 处都应是极大值。由(2)式和(3)

式可知,对单级滤光片,当液晶盒的延迟量 $\delta = 2k\pi$ 或 $\Delta n(\nu)d = k\lambda$ (其中 $k = 1, 2, 3, \dots$) 时,滤光片的透射光强取极大值;当 $\delta = (2k + 1)\pi/2$ 或 $\Delta n(\nu)d = (2k + 1)\lambda/2$ 时,滤光片的透射光强取极小值。对多级液晶滤光片,各级液晶盒必须满足

$$\begin{cases} \Delta n_1(\nu)d_1 = k_1\lambda', \\ \Delta n_2(\nu)d_2 = k_2\lambda', \\ \dots\dots \\ \Delta n_N(\nu)d_N = k_N\lambda', \end{cases} \quad (6)$$

其中 k_1, k_2, \dots, k_N 为整数,且各级液晶盒的厚度满足 $d_1 < d_2 < \dots < d_N$, $\Delta n_n(\nu)$ 为各级液晶盒的双折射率。由(6)式可得

$$\frac{\Delta n_1(\nu)d_1}{k_1} = \frac{\Delta n_2(\nu)d_2}{k_2} = \dots = \frac{\Delta n_N(\nu)d_N}{k_N}, \quad (7)$$

首考虑在各级液晶滤光片中选用同一种液晶的情况,在未加电压时它们的双折射率是相同的,加电以后它们的变化规律也是相同的(液晶在一定的电压范围内,双折射率随电压的变化是线性的),但是在每一级液晶盒上所加的电压可以相同也可以不同。每一级液晶盒加相同电压时,有

$$\Delta n_1(\nu) = \Delta n_2(\nu) = \dots = \Delta n_N(\nu) = f(\nu), \quad (8)$$

其中 $f(\nu)$ 为液晶双折射率随电压变化的函数,(7)式变为

$$d_1/k_1 = d_2/k_2 = \dots = d_N/k_N, \quad (9)$$

假设最薄的液晶盒厚度为 d_1 ,于是可得各级晶片的厚度为

$$d_n = M_n d_1, \quad (n = 2, 3, 4, \dots, N) \quad (10)$$

其中

$$M_n = k_n/k_1, \quad (n = 2, 3, 4, \dots, N) \quad (11)$$

由(11)式可知:只要 k_1, k_2, \dots, k_N 为整数,无论厚度比 M_n 是否为整数比^[9],滤光片的透射谱都能满足条件 1) 的要求。

对于条件 2),由于滤光片是可调谐的,所以情况就比较复杂,对各个因素要分别考察,可以得出,液晶双折射率随电压变化的函数 $f(\nu)$,在电压不太高于临界电压时^[10],

$$f(\nu) = a - b\nu, \quad (12)$$

另外,我们主要设计可见光区域(400~800 nm)的调谐滤光片,单级滤光片的可调谐范围远小于该段内的波长,因此虽然波长 λ' 可调,但对每一级滤光片来说满足(6)式的波数 k_n 是固定值,不随电压变化,也就是单级滤光片的调谐范围在一个干涉级次上(如图 3);每一级滤光片中液晶盒的厚度 d_n 是我们设计的量。

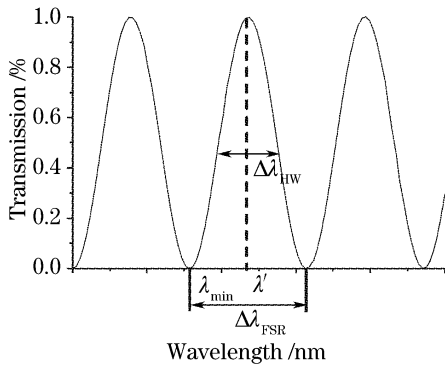


图3 透射曲线的半峰全宽和自由光谱范围

Fig. 3 Full width at half maximum of passband and of free spectral range in transmission curve

研究不加电时多级滤光片通带半峰全宽,系统的通带半峰全宽主要由具有最大延迟量 δ_N (即具有最大厚度 d_N) 的那个液晶盒所决定,因为

$$\Delta n_N(\nu)d_N = k_N\lambda', \quad (13)$$

$$\Delta n_N(\nu)d_N = \frac{(2k_N + 1)\lambda_{N\min}}{2}, \quad (14)$$

其中 $\lambda_{N\min}$ 为透射极小值处的波长,系统的半高通带值可用下式近似表示:

$$\Delta\lambda_{HW} = \lambda' - \lambda_{N\min}, \quad (15)$$

由(8)式、(10)式、(12)式、(13)式、(14)式可得

$$\Delta\lambda_{HW} = (a - b\nu)d_N \left(\frac{1}{K_N} - \frac{1}{K_N + 1/2} \right), \quad (16)$$

因为(14)式中除电压 ν 以外,都是常数,所以通带半峰全宽随电压 ν 的增加而减小,只要使未加电时的通带半峰全宽满足设计要求,则整个调谐范围内的通带半峰全宽就都满足要求。 $(n_e - n_o)$ 为不加电时液晶的双折射率,则(13)式、(14)变为

$$(n_e - n_o)d_N = k_N\lambda', \quad (17)$$

$$(n_e - n_o)d_N = (2k_N + 1)\lambda_{N\min}/2, \quad (18)$$

由(15)式、(17)式、(18)式得

$$k_N = (\lambda' - \Delta\lambda_{HW}) / (2\Delta\lambda_{HW}), \quad (19)$$

再由(17)式可得

$$d_N = (k_N\lambda') / (n_e - n_o). \quad (20)$$

要满足的条件4),由(8)式、(12)式、(13)式,可得

$$\lambda' = \frac{(a - b\nu)d_N}{k_N}, \quad (21)$$

所以波长也随调谐电压的增加而减小,因此在最大波长处进行设计就可以了,也就是对未加电时的多级液晶滤光片进行设计,使这时的透射峰处在调谐范围的最大波长处,调谐的范围由(21)式决定。调谐电压的范围通常取液晶双折射率随电压线性变化的区间,这样电压的调谐就有范围 $\nu_{\min} \sim \nu_{\max}$,波长的

调谐范围就为

$$\lambda'_{\min} = \frac{(a - b\nu_{\max})d_N}{k_N} \sim \lambda'_{\max} = \frac{(a - b\nu_{\min})d_N}{k_N}, \quad (22)$$

多级液晶滤光片的自由光谱范围由最薄液晶盒的相位延迟量 δ_1 决定。因为

$$\Delta n_1(\nu)d_1 = k_1\lambda', \quad (23)$$

$$\Delta n_1(\nu)d_1 = \frac{(2k_1 + 1)\lambda_{1\min}}{2}, \quad (24)$$

自由光谱范围可表示为

$$\Delta\lambda_{FSR} = 2(\lambda' - \lambda_{1\min}), \quad (25)$$

由(8)式、(12)式、(23)式、(24)式、(25)式可得

$$\Delta\lambda_{FSR} = 2(a - b\nu)d_1 \left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{K_1 + 1/2} \right), \quad (26)$$

由(26)式知,自由光谱范围随着电压的增加而减小,设计中自由光谱范围应不小于要求值,这样才不会在滤光片所要求的自由光谱范围内出现两个或更多的透射波长,由于调谐过程中波长随着电压的增加而不断减小,因此设计中要考虑的是滤光片处于最小波长(即所加的电压最高)时滤光片的自由光谱范围。由(22)式可知最小波长

$$\lambda'_{\min} = \frac{(a - b\nu_{\max})d_N}{k_N} \quad \text{or} \quad \lambda'_{\min} = \frac{(a - b\nu_{\max})d_1}{k_1}, \quad (27)$$

由(23)式~(25)式可得

$$k_1 = \frac{\lambda' - \Delta\lambda_{FSR}/2}{\Delta\lambda_{FSR}}, \quad (28)$$

$$d_1 = \frac{k_1\lambda'}{a - b\nu_{\max}}. \quad (29)$$

若给出了一个调谐滤光片的可调谐范围、自由光谱范围、通带半峰全宽和透射边峰的最大透射比,则滤光片的设计步骤如下:1)选择合适性质的液晶以满足调谐范围;2)根据期望值自由光谱范围 $\Delta\lambda_{FSR}$ 和通带半峰全宽 $\Delta\lambda_{HW}$ 以及液晶的相关参量计算出 k_N 、 d_N 、 k_1 、 d_1 ,估算出最厚和最薄液晶盒的厚度比 M_N ;3)对液晶盒的厚度比有可能的排列组合方式进行分析,直到找到最佳厚度比。

3.2 设计实例

要设计的滤光片的期望值分别为:调谐范围 400~800 nm,通带半峰全宽 $\Delta\lambda_{HW} \leq 90$ nm,自由光谱范围 $\Delta\lambda_{FSR} \geq 160$ nm。选择双折射率的调谐范围为:0.1334~0.2667;由(19)式、(20)式、(28)式、(29)式得: $k_1 = 2$, $d_1 = 6 \mu\text{m}$; $k_3 = 4$, $d_3 = 12 \mu\text{m}$,令 $M_2 = 1, 1.5, 2$ 即 $d_2 = 6 \mu\text{m}, 9 \mu\text{m}, 12 \mu\text{m}$ 分别验证,由于可调谐,要取折射率不同的情况进行验证,我们

发现如果取 $d_2 = 6 \mu\text{m}$ 则整个调谐范围 $400 \sim 800 \text{ nm}$ 内除主透射峰以外不会出现其他的透射峰; 如果取 $d_2 = 6 \mu\text{m}$, 则双折射率为 0.25 时, 出现了两个透射峰, 如图 4; 如果取 $d_2 = 12 \mu\text{m}$, 则当双折射率为 0.14 时, 也有其他的波长透射率超过了 80%, 如图 5; $d_2 = 9 \mu\text{m}$ 的情况, 当双折射率为 0.18 时, 透射光谱如图 6。

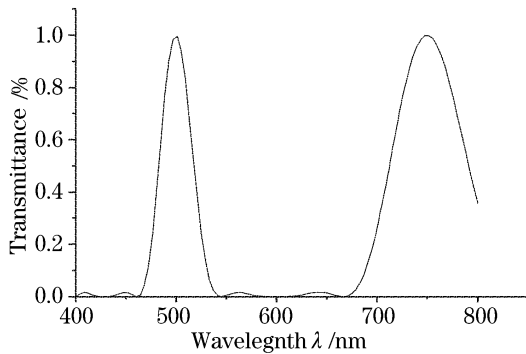


图 4 $d_2 = 6 \mu\text{m}$ 滤光片的透射比

Fig. 4 Transmittance of filters with $d_2 = 6 \mu\text{m}$

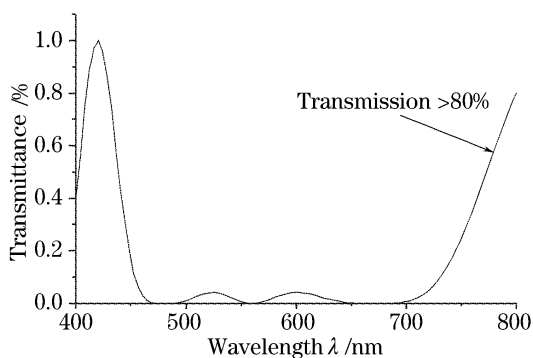


图 5 $d_2 = 12 \mu\text{m}$ 滤光片的透射比

Fig. 5 Transmittance of filters with $d_2 = 12 \mu\text{m}$

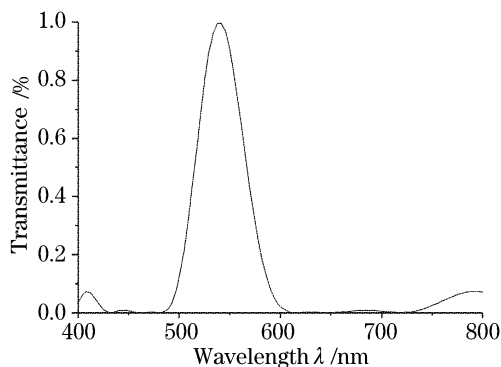


图 6 $d_2 = 9 \mu\text{m}$ 滤光片的透射比

Fig. 6 Transmittance of filters with $d_2 = 9 \mu\text{m}$

图 7 为 $d_2 = 9 \mu\text{m}$ 处于透射峰值的波长和液晶盒双折射率的关系曲线, 由(6)式可知, 处于透射峰值的波长和液晶盒的双折射率成线性关系; 由(12)式可知, 液晶盒的双折射率和所加电压成线性关系, 所以滤光片系统的透射波长就和所加电压也成线性关系。

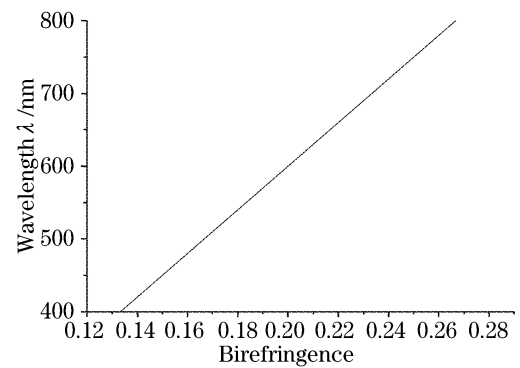


图 7 透射波长和双折射率的关系

Fig. 7 Relationship of transmitted wavelength and birefringence

4 液晶盒为相同厚度的三级液晶滤光片设计

4.1 设计原理

每个液晶盒的厚度相同, 但所加电压不同。令 $d_1 = d_2 = \dots = d_N$, 由(7)式可以得到 $\Delta n_1(\nu)/k_1 = \Delta n_2(\nu)/k_2 = \dots = \Delta n_N(\nu)/k_N$, (30) 由于液晶盒的调谐有一定阈值, 所以必须在每个液晶盒上加电压使液晶盒上的电压大于阈值电压, 然后再加上调谐电压, 这样加在液晶盒上的电压就由两部分构成, 一部分为固定电压, 它是阈值电压, 加在每个液晶盒上是相同的; 另一部分是调谐电压 ν_n ; 则由(12)式, 可以得到

$$\frac{a - b\nu_1}{k_1} = \frac{a - b\nu_2}{k_1} = \dots = \frac{a - b\nu_N}{k_N}. \quad (31)$$

由上式可知即使加在每个液晶盒上的调谐电压成比例, 也不保证所获得的双折射率成比例, 但是每个液晶盒都是相同的, 因此可以通过测试获得单级液晶滤光片的透射谱。由于多级滤光片中每个液晶盒相同, 因此只能在相同的干涉级数上获得不同波长的透射比, 由于滤光片系统的透射峰并不处于每个液晶盒的透射峰处, 所以获得的透射比相对较低。虽然采用相同厚度的液晶盒不能实现宽波段单一波长的调谐目的, 但是如果使每个液晶盒的折射率成等差数列, 并且公差很小, 调谐过程当中每个液晶盒折射率的变化相同, 可以在短波段范围内实现调谐, 并且使半峰全宽得到有效的压缩。如图 8, 从图 8 可以看到如果双折射率的公差增大, 就可以获得更窄的半高宽度, 谱线得到压缩, 但是透射比下降; 如果缩小双折射率公差, 则可获得较高的透射比, 但是半峰全宽增大, 谱线的分辨力下降; 在实际的设计中可以选择合适的双折射率公差。以厚度

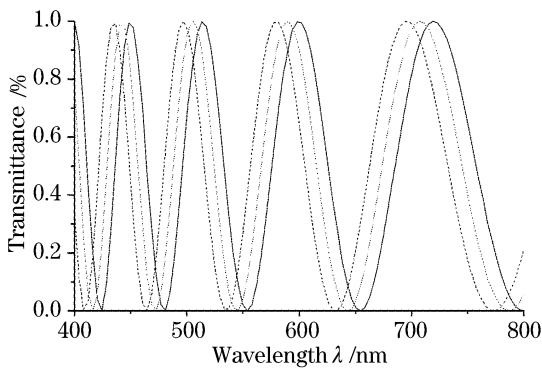


图 8 双折射率不同时的透射比

Fig. 8 Transmittance with different birefringences

$d_2 = 12 \mu\text{m}$ 的液晶盒为例,图 9 虚线为单级的液晶滤光片的透射谱,实线是三级滤光片的透射谱,三个液晶盒的双折射率分别为 0.30,0.29 和 0.295。

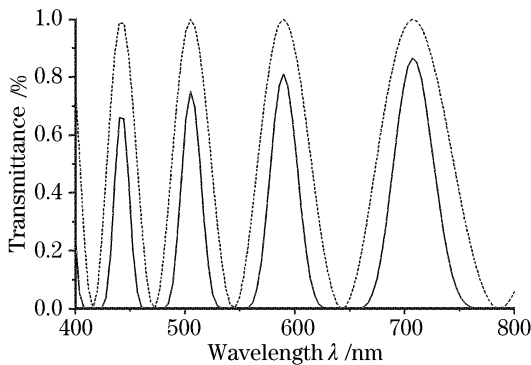


图 9 虚线为单级滤光片的透射比,实线为三级滤光片的透射比

Fig. 9 Transmittance of single filter (real line) and the multiple filters (dot line)

图 10 实线是三个液晶盒的双折射率为 0.30, 0.29 和 0.295 的透射比;虚线是三个液晶盒的双折射率为 0.295,0.29 和 0.285 的透射比。要从谱线中滤取某些波长的谱线,而去掉另外波长的谱线,就可以首先使双折射率的大小位于中间的液晶盒的某个透射峰处于要滤取的波长 λ_{in} 处,满足

$$\Delta n(\nu)d = k_m \lambda_{in}, \quad (32)$$

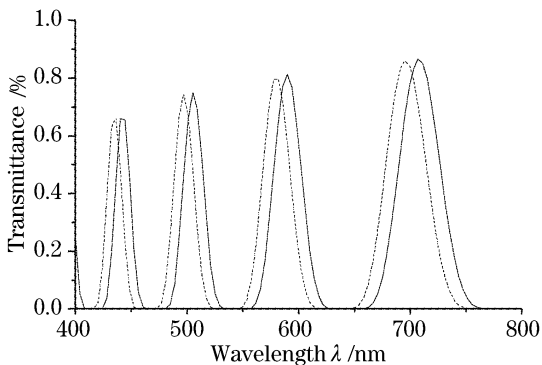


图 10 滤光片的调谐

Fig. 10 Tuning of the filters

然后使另外一个液晶盒的双折射率恰好能够在要滤去的波长 λ_{out} 处透射比为 0,满足

$$\Delta n(\nu)d = \frac{2k_m + 1}{2} \lambda_{out}, \quad (33)$$

然后再选择第三个液晶盒的双折射率构成等差数列。可以看出设计结果可能不同,然后再根据透射率和其他的具体情况进行选择。

4.2 设计实例

用上述方法设计的液晶调谐滤光片对氩激光器谱线进行提取^[10],首先滤取 514.5 nm 的绿光,滤掉 488 nm 的蓝光。我们取 12 μm 的液晶盒在双折射率为 0.3 附近进行设计,700 nm 处为透射峰时干涉级数为 7,因此在 500 nm 处的干涉级数为 5,要提取 514.5 nm 的绿光,可以使干涉级数为 5 的透射峰在 514.5 nm 处,根据 (32) 式可得双折射率为 0.30125。也可以使干涉级数为 6 的透射比为 0 透射处位于 488 nm 处,根据 (33) 式得到双折射率为 0.305;要使双折射率成等差数列,第三个液晶盒的双折射率为 0.2975;设计结果如图 11。同理可以得到滤取 488 nm,而滤去 514.5 nm 时三个液晶盒的双折射率分别为:0.2033,0.2787 和 0.1279,设计结果如图 12。在此处双折射率的精度取到了 10^{-4} 。

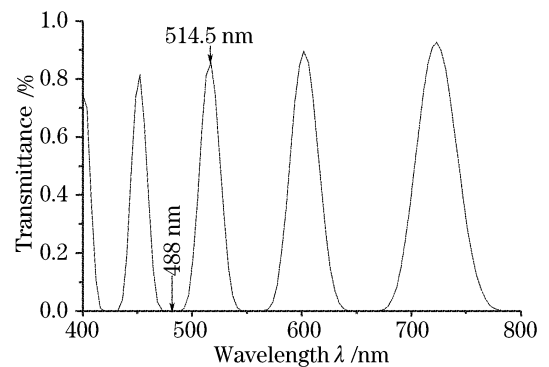


图 11 滤取波长为 514.5 nm

Fig. 11 Transmitted wavelength is 514.5 nm

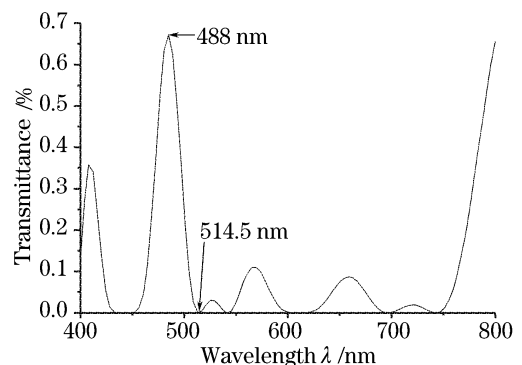


图 12 滤取波长为 488 nm

Fig. 12 Transmitted wavelength is 488 nm

5 结 论

在液晶滤光片的设计中从两个方面进行考虑,一是如何设计液晶盒厚度,二是如何通过改变电压来控制双折射率;这两点最终所改变的都是光程,因此最后的落脚点就是光程和波长的关系,如果要让某个波长通过,那么就要使光程等于该波长的整数倍;如果要截止某个波长,使光程等于半波长的奇数倍。多级的滤光片通过多个液晶盒的配合达到更好的效果,使得透射半峰全宽减小,在较大的波段内除主透射峰以外,没有其他的透射峰。液晶滤光片中最灵活的因素是液晶盒的双折射率,它随着电压的变化而变化,并且在高于阈值的某个范围内与电压成线性关系,这使得厚度成比例的多级液晶滤光片实现了线性可变,这非常适合成像光谱仪的设计。

在设计中忽略的因素是比较多的,比如所使用的液晶的性质(有的液晶在红外其双折射的性质消失,不同的液晶双折射率随着电压变化的范围也不同,液晶的最大双折射率差距也很大),双折射率的色散,加电时液晶盒光轴的偏转,温度的影响等,因此在实际的应用中要进行液晶的选择和实际的测试,进行校正。

参 考 文 献

- 1 Katsuhiko Hirabayashi, Hiroyuki Tsuda, Takashi Kurokawa. Narrow band tunable wavelength-selective filters of FP interferometers with a liquid crystal intracavity [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **3**(3): 213~215
- 2 K. W. Cheung, M. M. Choy, H. Kobrinski. Electronic wavelength tuning using acousto-optic tunable filter with broad continuous tuning range and narrow channel spacing[J]. *IEEE*

- Photon. Technol. Lett.*, 1989, **1**(1): 38~40
- 3 Yun Maojin, Li Guohua, Wu Fuquan *et al.*. Characteristics of Lyot tunable liquid crystal filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 628~631 (in Chinese)
云茂金,李国华,吴福全等. 利奥型可调谐液晶滤波器的特性分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 628~631
- 4 Yun Maojin, Li Guohua, Wang Ning. Study of tunable liquid crystal filter by voltage[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1119~1122 (in Chinese)
云茂金,李国华,王宁. 电压调谐液晶滤光片的研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1119~1122
- 5 J. S. Patel, M. W. Maceda. Tunable polarization diversity liquid crystal wavelength filter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(8): 213~215
- 6 Xu Xiaoxuan, Lin Haibo, Yu Gang *et al.*. Research of image spectrometer using linear variable interference filter [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, **22**(5): 713~717 (in Chinese)
徐晓轩,林海波,俞钢等. 小型线性可变滤光片分光的可见成像光谱仪及其特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2002, **22**(5): 713~717
- 7 Li Guohua, Pang Yantao, Dai Zuoxiao *et al.*. Study of tunable liquid crystal filters[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(2): 141~143 (in Chinese)
李国华,庞岩涛,代作晓等. 液晶调谐滤光片研究[J]. *光电子 • 激光*, 2001, **12**(2): 141~143
- 8 Kong Yong, Li Guohua, Yun Maojin *et al.*. A reaserch on multiple tunable liquid crystals filters[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(5): 474~476 (in Chinese)
孔勇,李国华,云茂金等. 多级液晶调谐滤光片的研究[J]. *光电子 • 激光*, 2001, **12**(2): 141~143
- 9 Liang Zhixia, Li Guohua, Shao Weidong *et al.*. Study of the optimal thickness ratio of the birefringent filter[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **A27**(7): 601~605 (in Chinese)
梁志霞,李国华,邵卫东等. 双折射滤光片最佳厚度比的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(7): 601~605
- 10 Yun Maojin, Li Guohua, Kong Yong. Tunable liquid crystal filter used for line selection Ar⁺ of laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(2): 135~137 (in Chinese)
云茂金,李国华,孔勇. 液晶调谐滤光片对 Ar⁺ 激光器谱线的提取[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(2): 135~137