

Lyot型液晶可调滤光片波长切换响应时间的精确测量

储松南, 王海峰, 胡奇琪, 曹宁翔, 黄立贤, 张大勇, 骆永全*

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳

Email: *409849773@qq.com

收稿日期: 2021年6月11日; 录用日期: 2021年9月1日; 发布日期: 2021年9月9日

摘要

Lyot型液晶可调滤光片(Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF)是目前广泛使用的快速调节滤光片,而在产品规格中通常只给出波长切换响应时间的大概值或范围值,在需要严格控制波长切换时间的应用场所往往制约器件的有效使用。文中提出了一种测量Lyot型LCTF波长切换响应时间的精确测量方法,其分起始波长和终止波长分别检测光强变化,通过对记录信号数据的分析得到测量结果。文中通过对一个可见光波段LCTF的实验测量验证了该方法的可行性,通过测量不确定度分析揭示了该方法具有很高的测量精度。

关键词

光学测量, LCTF, 波长切换, 响应时间

Precision Measurement of Wavelength Switch Response Time for Liquid Crystal Tunable Filter

Songnan Chu, Haifeng Wang, Qiqi Hu, Ningxiang Cao, Lixian Huang, Dayong Zhang, Yongquan Luo*

Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan

Email: *409849773@qq.com

Received: Jun. 11th, 2021; accepted: Sep. 1st, 2021; published: Sep. 9th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 储松南, 王海峰, 胡奇琪, 曹宁翔, 黄立贤, 张大勇, 骆永全. Lyot 型液晶可调滤光片波长切换响应时间的精确测量[J]. 光电子, 2021, 11(3): 103-109. DOI: 10.12677/oe.2021.113013

Abstract

Lyot-type liquid crystal tunable filters (LCTF) are widely used as fast switch filters. A general value or a range of the response time of wavelength switch given in the product manual can't support the efficient uses of instruments when the response time should be controlled rigorously. This paper presents a precise method of measuring the response time of wavelength switch for Lyot-type LCTF. Simultaneous measurement of the light intensity of the starting wavelength and ending wavelength is proposed, and the result is obtained by the analysis of the recorded data. The feasibility of this method is validated by the experiment of a visible light LCTF, and the fine precision is presented by the analysis of measurement uncertainty.

Keywords

Optical Measurement, LCTF, Wavelength Switch, Response Time

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

液晶可调节滤光片是一种利用液晶分子的电控双折射效应实现光谱快速调节的滤光器件，在光束控制及光谱成像领域有广泛的应用，相关的设备近几年也得到了快速的发展。宽光谱调节范围的 LCTF (Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF) 可选用 Lyot 型或 Solc 型结构[1]，但 Solc 型 LCTF 的光谱分辨率低，带外泄漏大[2]，所以商业 LCTF 产品多采用向列相液晶的 Lyot 型滤光片[3] [4]。Lyot 型 LCTF 有多个 Lyot 波光片单元级联而成，每级波光片均通过液晶盒调节光程差，通过外部电压的调节改变各液晶盒的状态实现透过光束波长的改变。液晶盒的响应时间与电压值、盒厚、温度、液晶材料自身的粘度及弹性系数等多种因素有关[5]，造成不同液晶状态间改变所需时间是不一样的，另外 Lyot 型 LCTF 的多个液晶盒状态可能存在不统一，因此其不同波长间切换的响应时间是多样化的。在如实时观测、机载光谱成像等 LCTF 的应用领域，预留给波长切换的时间有限，往往需要波长切换响应时间的确切值。而目前 LCTF 的产品手册只给出了一个统一的大概值或者范围值[6] [7]，缺少具体波长间切换的数据，因此在实际应用中可能出现等待时间不够波、长切换不到位，或者等待时间过长不利于发挥设备最大功效的情况。本文针对上述 LCTF 的实际应用需求提出了一种不同波长间切换响应时间的精确测量方法。

2. 测量原理与方法

液晶材料和液晶器件的响应时间一般的测量方法有光束透过率测量方法和微波谐振测量方法[8]，其中光束透过率测量方法更为通用，其以透过光束强度变化曲线上 10%变化点和 90%变化点间的时间差值作为的响应时间[9]。LCTF 作为可调节滤光器件，在波长切换时其透过光束的波长会发生改变，但总体光强的变化则不能一概而论，因此采用传统的光束透过率测量方法是不可取的。直观而论，LCTF 波长切换响应时间的测量需要连续记录透过光谱，通过光谱变化判断切换响应时间，但目前 LCTF 采用的向列相液晶的响应时间一般是 ms 级，要实现高精度的测量，连续记录透过光谱必然造成成本高、难度大、数据量多，因此不易普及推广。

对于由 m 级 Lyot 滤光片单元组成的 LCTF，其第 1 级的透过率可表示为[10]:

$$T_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \delta_1) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{2\pi \Delta n_1 d_1}{\lambda} \right) \quad (1)$$

δ_1 为 o 光和 e 光在第 1 级产生的相位差， Δn_1 为 o 光和 e 光的在第 1 级液晶层中的折射率差， d_1 为第 1 级液晶层的厚度， λ 为光的波长。

第 i 级的透过率为:

$$T_i = \frac{1}{2}(1 + \cos \delta_i) \quad (2)$$

相邻两级的相位差满足 $\delta_{n+1} = 2\delta_n$ 。

总透过率为:

$$T = \prod_{i=1}^m T_i \quad (3)$$

满足 $k\lambda = \Delta n_1 d_1$ (k 取正整数)的波长在各级的透过率均为 1 (未考虑材料对透过光束的能量吸收)，其他波长则由于各级透过率的差异被抑制。当外界驱动电压由对应起始波长 λ_a 切换到对应终止波长 λ_b 时，各 lyot 单元的液晶分子偏转状态改变，从而实现各级光程差的变化。此过程中，波长 λ_a 的总透过率由于各级该波长透过率出现差异将逐渐被抑制，而波长 λ_b 的总透过率由于各级该波长透过率逐渐趋向 1 而将增加，最终波长 λ_a 被完全抑制而波长 λ_b 透过率达到 1。因此分别检测起始波长和终止波长的光强变化理论上是一种可行的测量波长切换响应时间测量的方法。

图 1 是分波长光强检测的测量装置图，光源室采用宽光谱的卤钨灯，通过光纤将光源室的光束导入放置光学器件的暗室，从光纤输出的光束经过准直镜减小发散角，准直后的宽光谱光束经过 LCTF 后滤波为单色光束，该单色光束经过分束棱镜分成两个出射方向的光束，每束光的后续光路上均设置单色器和探测器，两个探测器连接同一台示波器的两个通道。

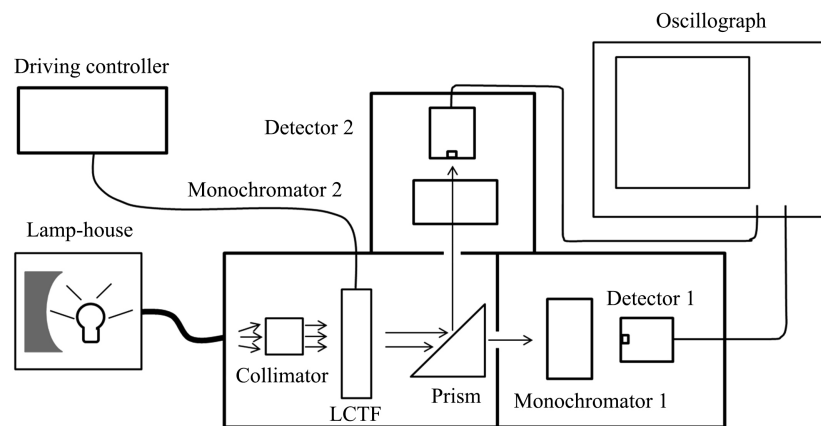


Figure 1. LCTF wavelength switch response time measurement device

图 1. LCTF 波长切换响应时间测量装置

测量 LCTF 从某起始波长到某终止波长的切换响应时间时，两个单色器工作波长分别设置为起始波长和终止波长，且带宽范围不存在交叠，首先给 LCTF 施加起始波长驱动电压并持续一段时间，接着控制驱动电压切换到终止波长对应的数值并持续加载一段时间，此过程中示波器同时记录起始波长和终止波长的光强的变化，后续通过记录数据的处理得到波长切换响应时间。

3. 实验及结果

为验证上述测量方法,对光谱分辨率为 8 nm 工作波段为 420 nm~720 nm 的自研 Lyot 型 LCTF 进行了波长切换响应时间的测量。单色器选用带宽为 10 nm 的干涉滤光片,探测器根据光强信号强弱选用 Thorlabs 的 DET10A 或者 EOT 的 ET2040 硅基探测器,示波器选用 Tektronix 的 DPO70000 系列。

图 2 给出了 650 nm 与 632 nm 之间波长切换时示波器的采集信号。LCTF 的工作过程为从未加任何电压开始交替施加两个波长的驱动电压,每次驱动电压变化后加持时间为 2 s。上方曲线为 650 nm 波长的光强变化信号,第一个信号抬升过程中出现较大起伏,后续光强的变化均平滑。起伏对应从未加任何电压状态突然加载驱动电压后 650 nm 波长的光强变化,此时光强的波动可能是由于各层液晶分子状态变化比较大,造成了该过程中出现起始波长的总透过率不为零的情况,其他波长从零开始加载驱动电压的实验也有类似信号起伏且具有重复性。

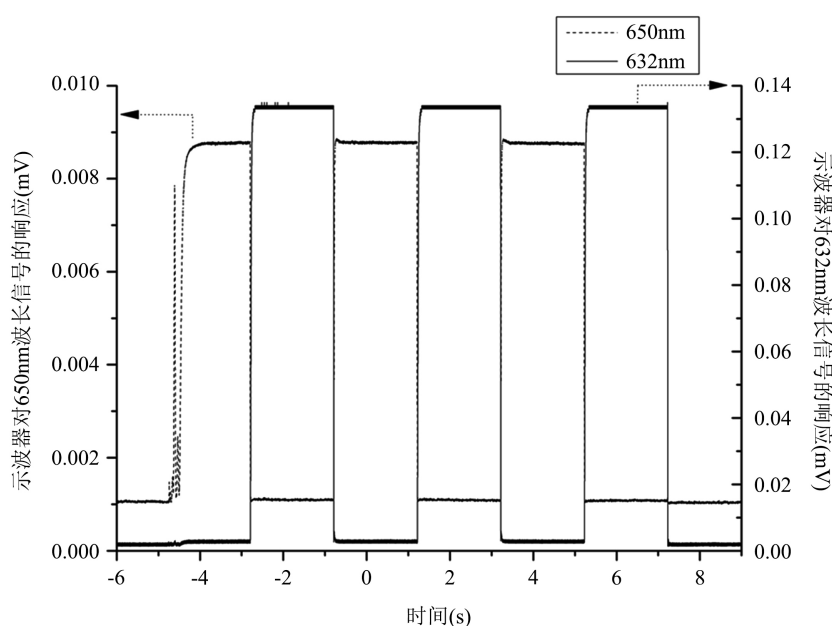


Figure 2. Figure of Wavelength switch signal collected by oscilloscope
图 2. 示波器采集的波长间切换信号

图 3 给出了一次从 650 nm 切换 632 nm 的数据处理示例,信号的基线都不为零,可能是由于杂散光, LCTF 的带外抑制能力及探测器暗电流噪声引起,但切换前后的信号都达到了稳定,所以其并不影响对结果的处理。

切换的响应时间并未考虑电压加载时间,其主要关注波长的变化响应。因此可以参照液晶显示器件响应时间的测量方法[9],将起始波长光强减少其变化量的 10%到终止波长光强增加其变化量 90%的时间记为波长切换响应时间。图 3 中,650 nm 波长信号降低 10%的时间值 t_1 与 632 nm 波长信号增加 90%的时间值 t_2 之间的差值为 38.6 ms,因此该 LCTF 从 650 nm 切换到 632 nm 的响应时间测量值为 38.6 ms,分析另外两次切换数据得到的测量结果分别为 38.9 ms 和 38.4 ms,可见测量结果具有很好的重复性。表 1 给出了不同波长间切换的响应时间结果(数值为 3 次测量平均值,单位为 ms)。可见该 LCTF 所测量的波长间切换响应时间分布在 23.0 ms 到 116.0 ms 之间,且邻近波长之间切换的响应时间短,大波长间隔的切换响应时间长,显示了不同间波长切换响应时间的多样性。

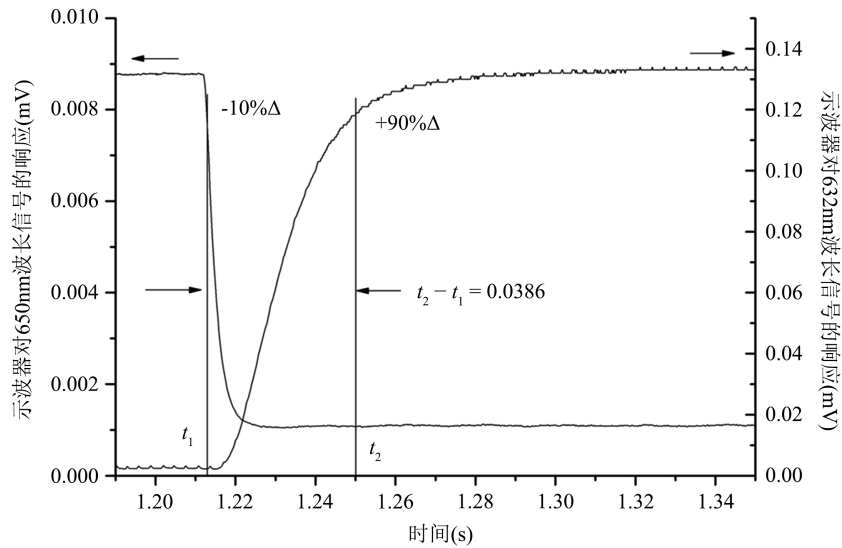


Figure 3. Example for 650 nm switch to 632 nm data processing
图 3. 650 nm 切换到 632 nm 数据处理示例

Table 1. System resulting data of standard experiment
表 1. 标准试验系统结果数据

	终止波长				
	488 nm	514 nm	532 nm	632 nm	650 nm
488 nm	-	32.8	42.8	100.0	116.0
514 nm	37.2	-	23.0	100.9	110.1
起始波长	532 nm	51.6	37.1	-	91.1
	632 nm	105.6	86.3	74.5	-
	650 nm	89.7	94.0	97.1	38.6

4. 不确定度分析

参照图 1 的测量装置，影响波长切换响应时间测量精度的因素有：探测器的上升时间、示波器的上升时间、示波器的时基精度、示波器通道间延迟时间差、示波器的采样率及脉冲幅度测量准确度。实验选用探测器的上升时间小于 30 ns，示波器的上升时间为 49 ps (信号上升 10%至上升 90%所用的时间)，示波器的通道间时滞范围为±75 ns，相对于 ms 级的测量结果均可忽略不计，因此引入测量不确定度的主要仪器因素为示波器的时基精度、采样率及脉冲幅度测量准确度。

1) 由采样率引入的测量不确定度 u_1

测量时数字示波器的采样率选择了 5 kSa/s，则时间分辨力为 0.2 ms，其示值误差为±0.1 ms。按均匀分布，由采样率引入的时间值读数的测量不确定度 $u(t)$ 为：

$$u(t) = 0.1/\sqrt{3} \approx 0.06 \text{ ms} \tag{4}$$

谱中心波长切换时间为两个时间值之差，由采样率引入的测量不确定度 u_1 为：

$$u_1 = \sqrt{u^2(t_1) + u^2(t_2)} = \sqrt{2}u(t) \approx 0.1 \text{ ms} \tag{5}$$

2) 由时基精度引入的测量不确定度 u_2

测量使用的数字示波器时基精度为 ± 5 ppm, 以 38.6 ms 测量时间为例, 在通道间时滞可忽略的前提下, 时基精度引入的误差为 ± 0.002 ms。按误差均匀分布, 由示波器时基精度引入的测量不确定度 u_2 为:

$$u_2 = 0.002/\sqrt{3} \approx 0.001 \text{ ms} \quad (6)$$

3) 由脉冲幅度的不准确测量引入的测量不确定度 u_3

测量使用的数字示波器脉冲幅度的最大允许相对误差为 $\pm 0.28\%$, 则信号变化曲线上 -10% 和 90% 的定位最大相对误差为 $\pm 0.25\%$, 转换到时间横坐标的最大误差分别约为 ± 0.04 ms、 ± 0.16 ms, 按误差均匀分布, 其测量不确定度分别为 0.02 ms、 0.09 ms, 两者差值的测量不确定度为:

$$u_3 = \sqrt{0.04^2 + 0.16^2} \approx 0.16 \text{ ms} \quad (7)$$

4) 由测量重复性引入的测量不确定度 u_4

以 650 nm 到 632 nm 的切换为例, 3 次测量值的极差为 0.5 ms, 按极差法得到测量不确定度为:

$$u_4 = \frac{R}{C\sqrt{n}} = \frac{0.5}{1.69 \times \sqrt{3}} \approx 0.2 \text{ ms} \quad (8)$$

切换时间的合成标准测量不确定度为上述 4 项的合成, 其结果为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = \sqrt{0.1^2 + 0.001^2 + 0.16^2 + 0.2^2} \approx 0.3 \text{ ms} \quad (9)$$

95%置信区间的扩展测量不确定 $U = 0.6$ ms, 以 3 次测量的平均值表示测量结果时, 650 nm 切换到 632 nm 的响应时间是 (38.6 ± 0.6) ms; $k = 2$ 。

5. 结论

本文介绍了一种 Lyot 型 LCTF 波长切换响应时间的测量方法, 其采用分起始波长和终止波长同时检测光强变化的技术手段, 通过对采集信号的简单处理得到测量结果。方法的可行性也通过多个波长间切换的实验测量得到了验证。该方法原则上可测量任意波长间的切换响应时间, 且测量结果精度高, 可为 Lyot 型 LCTF 的实际运用提供重要的数据参考; 另外其测量装置简单, 操作方便, 易于用户开展。

基金项目

国家重点研发计划课题(2018YFC0807304)。

参考文献

- [1] 曹星焯. 基于液晶可调谐的宽光谱窄带 Lyot 型滤光片[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [2] 杨国伟, 郑臻荣, 李海峰, 刘旭. Solc 型液晶可调谐滤光片的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1383-1387.
- [3] Liquid Crystal Tunable Filters Data Sheet [EB/OL]. <http://www.iseeimaging.com/hardware/CRI/cr1.htm>, 2020-7-2
- [4] Liquid Crystal Tunable Filter User Manual, Revision 2.00 [EB/OL]. https://www.meadowlark.com/store/D4020_User_Manual_2.0.pdf, 2021-6-10.
- [5] Wang, H.Y. (2005) Studies of Liquid Crystal Response Time. Thesis, University of Central Florida, Orlando.
- [6] Varispec Liquid Crystal Tunable Filters User's Manual, Revision D [EB/OL]. https://www.perkinelmer.com.cn/CMSResources/Images/46-140159MAN_LST_Q112_VarispecUserManual1107-925_2.pdf, 2020-6-10.
- [7] Selectable Bandwidth Tunable Optical Filter [EB/OL]. https://www.meadowlark.com/store/data_sheet/LC-Selectable_Bandwidth_Tunable_Optical_Filter.pdf, 2021-6-10.

-
- [8] Yozo, U., Toshihisa, K., Ryo, N. and Katsuhiko, S. (2005) Measurement Methods of Nematic Liquid Crystal Response Time. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, **434**, 337-352. <https://doi.org/10.1080/15421400590954452>
- [9] 李剑, 王海燕, 李强, 等. SJ/T11348-2006 数字电视平板显示器测量方法[S]. 北京: 中华人民共和国信息产业部, 2006.
- [10] Wu, S.T. (1989) Design of a Liquid Crystal Based Tunable Electrooptic Filter. *Applied Optics*, **28**, 48-52. <https://doi.org/10.1364/AO.28.000048>