

文章编号: 1001-3806(2016)04-0476-03

## 单轴双折射滤光片温度不敏感性的研究

高 傲,孔 勇\*,夏 刚,韩 华,王 鑫

(上海工程技术大学 电子电气工程学院,上海 201620)

**摘要:** 为了研究单轴晶体铌酸锂双折射滤光片的温度特性,采用计算机进行数值理论分析,讨论了入射光方向上铌酸锂晶体双折射率和厚度随温度变化的关系,并利用 Ultra-6600 系列紫外-可见分光光度计对铌酸锂滤光片进行了光谱测量和实验验证。结果表明,在不同波段的滤波带宽,可以找到某些特定的入射角度,使滤光片的中心波长不随温度变化而变化,双折射滤光片温度的稳定性可以保持。此结果说明,可以通过调节入射光方向来提高滤光片的温度稳定性和使用精度。

**关键词:** 光学器件;晶体光学;温度不敏感;铌酸锂双折射滤光片

**中图分类号:** O734

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.004

## Research of temperature insensitivity of uniaxial birefringence filters

GAO Ao, KONG Yong, XIA Gang, HAN Hua, WANG Xin

(College of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In order to study the temperature-dependant properties of a birefringent filter made by uniaxial crystals  $\text{LiNbO}_3$ , the relationship between birefringence and thickness of  $\text{LiNbO}_3$  with the change of temperature was characterized by numerical simulation. Transmission spectrum of the designed  $\text{LiNbO}_3$  birefringence filter was tested and investigated by using Ultra-6600 spectrophotometer. The results show that, in different bandwidths, a certain incident angle can be found to make center wavelength of the filter is insensitive to temperature. Further, the birefringence filter maintains temperature stability. The results show that, temperature stability of filter and precision of the  $\text{LiNbO}_3$  filter can be improved by adjusting the direction of incident light.

**Key words:** optical devices; crystal optics; temperature insensitivity;  $\text{LiNbO}_3$  birefringent filter

## 引 言

光学滤光片是重要的无源器件之一,能按照需要来改变入射光的光谱强度分布,在连续光谱中透过一定宽度的光谱带或在线状光谱中用来提取某些辐射的波长选择器件<sup>[1]</sup>。光学滤光片种类很多,根据不同原理可分为选择吸收滤波器、多光束干涉滤波器、色散滤波器、双折射滤波器<sup>[2]</sup>等。

双折射滤光片具有结构简单设计灵活、透射光谱带宽窄、滤波波形可精确调节、可实现 0.1nm 级的滤波线宽、可实现大视场入射<sup>[3-4]</sup>等优点,在太阳光谱研究、激光腔内波长选择器、波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)器件、生物医药成像<sup>[5-7]</sup>等领域中有广泛的应用。铌酸锂晶体具有较大的双折射

率,在 0.4 $\mu\text{m}$ ~2.9 $\mu\text{m}$  的可见光和近红外波段内部都有很高的透过率,具有良好的电光特性<sup>[8]</sup>,机械强度高,人工生长技术成熟,成为重要电光材料和双折射材料。双折射滤光片在使用时折射率易受温度的影响,从而影响双折射滤光片系统精度<sup>[9]</sup>。

本文中通过计算机进行数值分析,发现利用铌酸锂晶体制作的双折射滤光片在某些特定入射光方向上,滤光片性能不随温度的变化而变化,利用滤光片随入射角的变化来补偿滤光片随温度的变化,结果表明,可以通过调节入射光的方向来保证滤光片的温度稳定性,进而提高滤光片系统精度。

## 1 基本原理

$\text{LiNbO}_3$  属于三方晶系的负晶体,具有优越的光学特性,但这种晶体的折射率对温度的变化比较敏感,考虑温度影响, $\text{LiNbO}_3$  双折射晶体的主折射率为温度的函数,折射率色散公式为<sup>[10]</sup>:

$$n_o^2 = 4.9130 + (0.1173 + 1.65 \times 10^{-8} T^2) / [\lambda^2 - (0.212 + 2.7 \times 10^{-8} T^2)^2] - 2.78 \times 10^{-2} \lambda^2,$$

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61305014);上海市自然科学基金资助项目(13ZR1455200);上海工程技术大学研究生科研创新资助项目(E109031401037)

作者简介:高 傲(1990-),男,硕士研究生,现主要从事偏振光学和偏振器件方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail:kkyy7757@aliyun.com

收稿日期:2015-05-06;收到修改稿日期:2015-05-21

$$n_e^2 = 4.5567 + 2.605 \times 10^{-7} T^2 + (0.097 + 2.7 \times 10^{-8} T^2) / [\lambda^2 - (0.201 + 5.4 \times 10^{-8} T^2)^2] - 2.24 \times 10^{-2} \lambda^2 \quad (1)$$

式中,  $T$  为温度(单位为 K),  $\lambda$  为入射光波长(单位为  $\mu\text{m}$ ), 设入射角为  $\theta$ , 极角为  $\varphi$  ( $e$  光的波法线  $k_e$  与光轴的夹角), 入射面方位角为  $\phi$ , 其中极角  $\varphi$  可表示为:

$$\cos\varphi = \frac{n_o \sin\theta \cos\phi}{\sqrt{n_e^2 n_o^2 - (n_e^2 - n_o^2) \sin^2\theta \cos^2\phi}} \quad (2)$$

利用折射率方程有:

$$n_e(\varphi) = n_e n_o / \sqrt{n_e^2 \cos^2\varphi + n_o^2 \sin^2\varphi} \quad (3)$$

可以得出  $o$  光折射率不变为  $n_o$ ,  $e$  光折射率变为  $n_e(\varphi)$ , 当温度发生变化时, 晶体的折射率会发生变化, 同时由于热胀冷缩晶片的厚度也会发生变化, 材料的线性膨胀系数可表示为:

$$\alpha = A \times 10^{-6} + B \times 10^{-8} T + C \times 10^{-11} T^2 \quad (4)$$

式中,  $A$  表示具有温度倒数的量纲系数,  $B$  和  $C$  分别表示具有温度平方和立方倒数的单位系数。查光学手册<sup>[11]</sup>可知, 在 273K ~ 353K 范围内, 对于  $\text{LiNbO}_3$  晶体,  $A = 16.7$ ,  $C = 2.0$ , 温度为  $T$  时晶体的等效厚度为:

$$d = d_0(1 + KT) \quad (5)$$

式中,  $K = \alpha + (\Delta n_e - \Delta n_o) / [n_e(\varphi) - n_o]$ ,  $\Delta n_e$  和  $\Delta n_o$  为  $e$  光和  $o$  光的折射率温度系数,  $d_0$  为温度为 273K 时  $\text{LiNbO}_3$  晶体的厚度(单位是  $\mu\text{m}$ ), 入射角为  $\theta$ , 极角为  $\varphi$  入射时,  $\text{LiNbO}_3$  晶体相位差  $\delta(\theta, \varphi, T)$  为:

$$\delta(\theta, \varphi, T) = (2\pi/\lambda) d [n_e(\varphi) - n_o] = (2\pi/\lambda) d_0 [n_e(\varphi) - n_o] (1 + KT) \quad (6)$$

典型的双折射滤光片通常是由在振动方向相互平行(或正交)的两个偏振片间放置双折射波片构成的, 而且波片光轴平行于表面, 结构如图 1 所示。其中  $P_1$  和  $P_2$  是偏振镜,  $L_1$  是  $\text{LiNbO}_3$  晶体, 方位角  $\phi = 45^\circ$  时, 滤光片的透过率可表示为:

$$T_r = \{ \cos[\delta(\theta, \varphi, T)/2] \}^2 \quad (7)$$

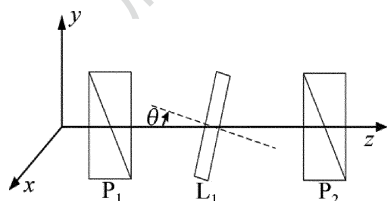


Fig. 1 Schematic diagram of the  $\text{LiNbO}_3$  filter

由上式分析可知,  $\text{LiNbO}_3$  滤光片的透射特性与入射角  $\theta$ 、极角  $\varphi$ 、温度  $T$  有关, 以厚度为 0.7mm、入射角  $\theta = 10^\circ$ 、方位角  $\phi = 45^\circ$  的  $\text{LiNbO}_3$  晶体为例, 图 2 是该入射方向  $\text{LiNbO}_3$  晶体双折射率随温度变化的关系图; 图 3 是该入射方向  $\text{LiNbO}_3$  晶体厚度随温度变化的关系图; 图 4 是  $\text{LiNbO}_3$  滤光片在温度 333K, 343K, 353K

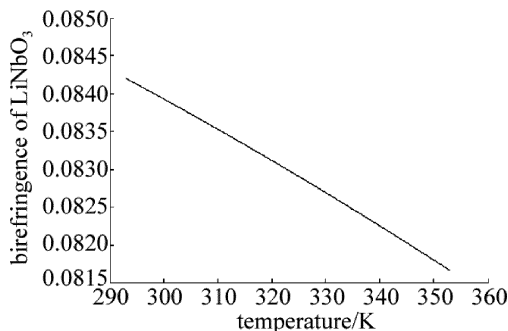


Fig. 2 Relationship between birefringence of  $\text{LiNbO}_3$  and temperature when  $\theta = 10^\circ, \phi = 45^\circ$

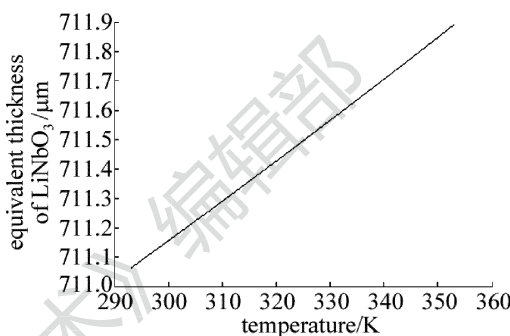


Fig. 3 Relationship between equivalent thickness of  $\text{LiNbO}_3$  and temperature when  $\theta = 10^\circ, \phi = 45^\circ$

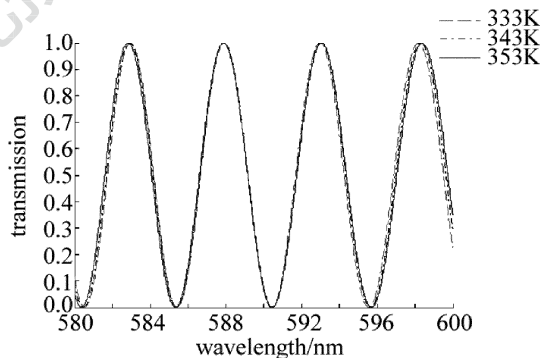


Fig. 4 Relationship between transmission of  $\text{LiNbO}_3$  filter and wavelength when  $T = 333\text{K}, 343\text{K}, 353\text{K}$

下的理论透射曲线, 波长范围为 580nm ~ 600nm。

由图 2 可知, 温度在 293K ~ 353K 变化时,  $\text{LiNbO}_3$  晶体双折射率变小, 减小 0.0025, 减幅为 2.96%。由图 3 可知, 温度在 293K ~ 353K 变化时,  $\text{LiNbO}_3$  晶体等效厚度变大, 等效厚度增大 0.8 $\mu\text{m}$ , 增幅为 0.11%。由图 4 可知, 入射角为  $10^\circ$ 、温度在 333K ~ 353K 变化时,  $\text{LiNbO}_3$  滤光片温度稳定性很好, 中心波长不随温度变化而发生漂移, 经进一步模拟可知在 560nm ~ 580nm 波长范围内, 入射角在  $5^\circ$  附近进行微调节, 可以保持滤光片的温度不稳定性, 在 600nm ~ 620nm 波长范围内, 入射角在  $19^\circ$  附近进行微调节, 可以保持滤光片的温度稳定性, 模拟结果表明, 在不同温度下入射光以一定角度入射, 在该入射角度方向使  $\text{LiNbO}_3$  滤光片中心波长产生一定的漂移量, 并对该温度下由温度

导致的 LiNbO<sub>3</sub> 滤光片中心波长的变化量进行相应的反向补偿,且不同带宽的 LiNbO<sub>3</sub> 滤光片可以找到某些特定的入射角来保证滤光片的温度不敏感性。

## 2 实验设计与结果分析

为了检验以上理论的正确性,利用 Ultra-6600 系列紫外-可见分光光度计搭建了实验系统,对 LiNbO<sub>3</sub> 双折射晶体滤光片的透射光谱进行研究与分析。透射光谱测量系统框架如图 5 所示,测试系统由以下几个部分组成:光学系统、电源、数据采集与放大系统、主控板。光学系统主要由光源室、滤光片组、单色器、分光室和接收室组成。Ultra-6600 系列提供 5 个滤光片,光谱范围为 190nm ~ 900nm,光谱分辨率为 0.1nm。温控箱采用上海申贤恒温设备厂的 DHG-9053A 电热恒温鼓风干燥箱,温控范围为 10℃ ~ 250℃,温控波动度小于 0.5℃,精度为 0.1℃。

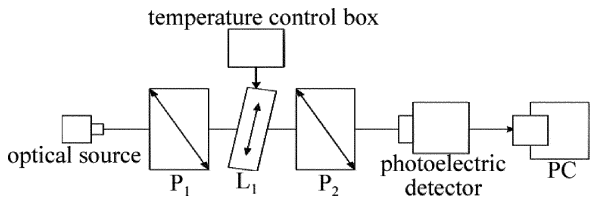


Fig. 5 System frame

测试中使用的 LiNbO<sub>3</sub> 晶片厚度为 0.7mm,实验中利用 DHG-9053A 系列温控箱控制 LiNbO<sub>3</sub> 晶体温度。测试得到的 LiNbO<sub>3</sub> 滤光片的透射曲线见图 6,图 6 中光谱测量范围为 580nm ~ 600nm,光谱分辨率为 0.1nm,3 条曲线是入射角均为 10°、温度分别为 333K, 343K,353K 时 LiNbO<sub>3</sub> 滤光片的透射曲线。分析实验结果可以看出:(1)滤光片中心波长不随温度的变而变化,滤光片表现出很好的温度稳定性,与上述理论模拟相当接近,存在的微小差别认为是由于 LiNbO<sub>3</sub> 晶片的厚度误差及转角微小误差所引起的;(2)Lyot 型滤光片透射率最高在 90% 左右,这是由于 LiNbO<sub>3</sub> 晶片的散射及偏振片吸收等原因导致的;(3)Lyot 型滤光

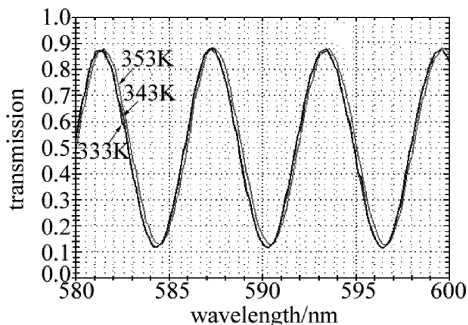


Fig. 6 Transmission of LiNbO<sub>3</sub> filter

片透射率最低在 10% 左右,是由于实验中所用偏振片的消光比不高导致的。

## 3 结 论

研究了单轴晶体铌酸锂双折射滤光片的温度特性,讨论和分析了入射光方向上铌酸锂晶体双折射率和厚度随温度变化的关系。在 560nm ~ 580nm 波段范围内,入射角度为 5° 的双折射滤光片温度的稳定性可以保持;在 580nm ~ 600nm 波段范围内,入射角度为 10° 的双折射滤光片温度的稳定性可以保持;在 600nm ~ 620nm 波段范围内,入射角度为 19° 的双折射滤光片温度的稳定性可以保持。利用这一结果,在实际单轴晶体滤光片设计制作时,对于不同滤波带宽的滤光片,寻找合适的入射光角度来保证温度不敏感性,即利用滤光片随入射角的变化来补偿滤光片随温度的变化,为单轴晶体滤光片的优化设计提供了新思路,原理简单实用,仅仅通过调节入射光方向就可以提高滤光片的温度稳定性,可供光器件的设计者参考。

### 参 考 文 献

- [1] FRANCON M. Optical filter for radiations separation [M]. Beijing: Science Press, 1984; 37-42 (in Chinese).
- [2] ZHANG Sh, WU F Q, WU W D. Characteristics of multistage quartz optical filter based on the optical rotatory dispersion effect [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(8): 5020-5026 (in Chinese).
- [3] CHEN H, XIA Y Q, LU Zh Zh, et al. Broadband tunable output of Ti:sapphire laser by using BF [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(3): 461-463 (in Chinese).
- [4] ZHANG J, LI G H. The theory of correcting the deviation of retardation wave-plate [J]. Laser Technology, 2005, 29(6): 639-640 (in Chinese).
- [5] KONG Y, WANG Y M, ZHANG L P, et al. A quartz birefringent filter insensitive to incident angle [J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44(5): 1497-1500.
- [6] GAO F, WANG W L, KONG Y. Research on new type temperature-insensitive quartz filter [J]. Optik, 2014, 125(3): 1212-1216.
- [7] WANG X, YAO J. Transmitted and tuning characteristics of birefringent filters [J]. Applied Optics, 1992, 31(22): 4505-4508.
- [8] WANG Zh B, LI K W, ZHANG R, et al. Fabrication of piezoelectric actuator for photoelastic modulator based on lithium niobate [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 63-69 (in Chinese).
- [9] KONG Q D, SONG L K, KONG L H. Study about the temperature effect of the retardation of quartz wave-plates [J]. Laser Technology, 2008, 32(4): 374-376 (in Chinese).
- [10] LIN K Y, XU J, WANG H Ch, et al. Temperature properties of uniaxial crystal electro-optic modulator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(8): 1051-1055 (in Chinese).
- [11] LI J Zh. Handbook of optics [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1986; 1304-1337 (in Chinese).