

旋光性非共线型 AOTF 温漂及波长修正策略

王耀利¹, 张瑞², 陈媛媛², 刘林仙¹

1. 山西大学自动化系, 山西太原 030013
2. 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西太原 030051

摘要 现有声光可调谐滤光器(AOTF)调谐关系大多忽略旋光性影响, 忽略旋光性将影响声光滤波器的准确设计, 并会进一步影响其滤波性能, 故推导了旋光率与衍射波长之间的关系, 进而得到考虑旋光性的 AOTF 衍射频率-波长调谐关系; 针对 AOTF 衍射波长在不同温度下存在温漂, 因此影响 AOTF 的光谱分辨率, 从温度影响超声声速出发, 分析得到 AOTF 衍射波长在不同温度下与驱动频率的关系, 提出在不同温度下采用频率修正的方式跟踪衍射波长。根据考虑旋光性推导所得 AOTF 调谐关系、考虑到实时跟踪温度、频繁变换驱动频率容易对系统造成破坏, 影响使用效率, 因此采用 10 °C 为一个温度段, 在一个温度段内根据中间温度使用一个驱动频率对 AOTF 进行调控, 每一温度段有相应的驱动频率-衍射波长对应关系, 叙述了具体的实现办法, 并做了相应的实验验证。实验表明, 通过频率修正之后在相应温度下得到的衍射波长, 与普通室温未修正频率下得到的衍射波长相比, 前者与目标波长更相近, 误差减小一个数量级。为 AOTF 在不同温度下的高精度光谱测量提供了重要的依据, 具有重要的实用价值。

关键词 声光可调谐滤光器; 旋光性; 温漂; 频率修正

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)03-0823-05

引言

光谱成像技术作为目标识别中极为重要的一种方式, 传统的分光方式采用机械扫描的滤光片, 扫描速度慢和抗震性能差成为不可避免的缺点。近现代材料学、电子学及计算机科学的发展针对普通滤光片的缺点, 促进了多种新型滤光片技术的产生。声光可调谐滤光(acousto-optic tunable filter, AOTF)^[1-4]为其中最常用的一种。

在 AOTF 性能分析中, 通常不考虑旋光性的影响, 然而声光晶体二氧化碲(TeO₂)属于四方晶系的 422 晶类, 无对称中心因而有旋光性。忽略旋光性将影响声光滤波器的准确设计, 并会进一步影响其滤波性能^[5-8]。且在 AOTF 分光过程中, 由于长时间工作中自身温度的非线性漂移, 会引起晶体特性的改变, 从而影响分光波长的准确性。工程上, 因发热和环境温度改变造成的对系统性能的影响, 多采用恒温控制技术或者温度补偿技术进行修正。但由于受到声光晶体特性和工艺的限制, 很难实现对内部温度的恒温控制; 而现有的 AOTF 成像光谱仪因使用环境很少考虑到温度补偿的问

题^[12]。

本文根据相关理论, 从 AOTF 工作原理出发, 推导了考虑旋光性情况下 AOTF 的频率波长调谐关系, 分析了温度变化对 AOTF 衍射波长的影响, 建立了温度、衍射波长和驱动频率之间的数理关系, 提出并实现了一种针对 AOTF 温漂引起衍射波长变化的波长修正方案。

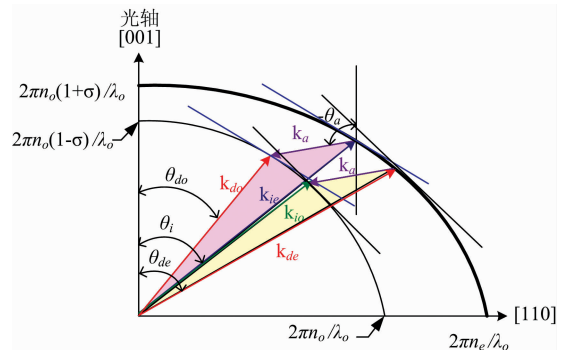


图1 声光相互作用的波矢量匹配图
Fig. 1 The wave vector matching graph of acousto-optic interaction

收稿日期: 2018-01-02, 修订日期: 2018-05-19

基金项目: 国际科技合作项目(2013DFR10150), 国家自然科学基金项目(61605176), 山西省面上青年基金项目(201801D221172, 201801D221167)资助

作者简介: 王耀利, 1987年生, 山西大学自动化系讲师 e-mail: wangyaoli2016@sxu.edu.cn

1 考虑旋光影响的 AOTF 调谐关系推导

TeO₂ 是左旋正单轴晶体^[9], 声光相互作用的波矢量匹配图如图 1 所示。其中, k_{ie} , k_{do} 表示入射 e 光和衍射 o 光波矢量, k_{io} , k_{de} 表示入射 o 光和衍射 e 光波矢量, k_a 表示超声波矢量。从图中可以看出旋光晶体的折射率曲面图形与不考虑旋光时相比, 在光轴方向上的 o 光和 e 光两个曲面不再相切。考虑旋光性影响下 AOTF+1 级衍射光波长频率调谐关系推导如图 1 所示。

如果晶体内部的入射光为右旋 e 光, 则衍射光为左旋 o 光。从图 1 可得, 入射光折射率 n_{ie} 以及衍射光折射率 n_{do} 分别表示为

$$\begin{cases} n_{ie} = [\cos^2 \theta_i / [n_o^2 (1 + \sigma)^2] + \sin^2 \theta_i / n_e^2]^{-1/2} \\ n_{do} = [\cos^2 \theta_d / [n_o^2 (1 + \sigma)^2] + \sin^2 \theta_d / n_o^2]^{-1/2} \end{cases} \quad (1)$$

表 1 20 °C 下 TeO₂ 的双振荡器参数

Table 1 Two-oscillator parameters for TeO₂ at 20 °C

	$\xi^{(1)}/$ (rad · eV ² · μm ⁻¹)	$\lambda^{(1)}/$ μm	$\delta^{(1)}/$ eV	$\xi^{(2)}/$ (rad · eV ² · μm ⁻¹)	$\lambda^{(2)}/$ μm	$\delta^{(2)}/$ eV
$ \rho $	0.883 8	0.133 1	9.31	0.087 54	0.264 5	4.69

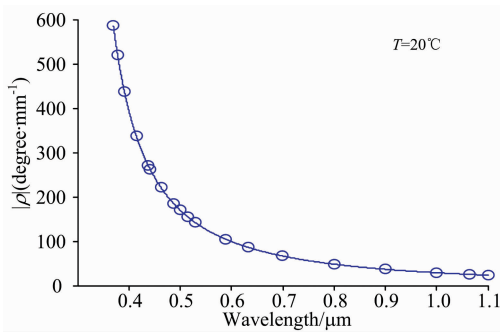


图 2 20 °C 下 TeO₂ 沿光轴旋光率 ρ 随波长 λ 分布曲线

Fig. 2 Distribution curve of rotation rate along the optical axis with the wavelength for TeO₂ at 20 °C

从图 1 可知, e 光和 o 光折射率均满足椭圆方程。分别写成如式(4)形式

$$\begin{cases} y_i^2 / [n_o^2 (1 + \sigma)^2] + x_i^2 / n_e^2 = 1 \\ y_d^2 / [n_o^2 (1 + \sigma)^2] + x_d^2 / n_o^2 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

对式(4)求导, 根据切线平行条件, 在 k_i 和 k_d 曲面上, 切点处的斜率相等, 即

$$\left. \frac{dy_i}{dx_i} \right|_{n_i \sin \theta_i, n_i \cos \theta_i} = \left. \frac{dy_d}{dx_d} \right|_{n_d \sin \theta_d, n_d \cos \theta_d} \quad (5)$$

整理可得

$$\tan \theta_d = (n_o / n_e)^2 [(1 + \sigma)^2 / (1 - \sigma)^2] \tan \theta_i \quad (6)$$

此时, $n_i = n_{ie}$, $n_d = n_{do}$; $\theta_i = \theta_{ie}$, $\theta_d = \theta_{do}$ 。

非共线可调谐滤波器的调谐关系满足

$$\begin{aligned} f_a(\theta_i, \lambda) &= \frac{V_a}{\lambda} \{ n_{ie}^2(\theta_i, \lambda) + n_{do}^2(\lambda) - \\ &2n_{ie}(\theta_i, \lambda)n_{do}(\lambda) \cos[\theta_{do}(\theta_i, \lambda) - \theta_i] \}^{1/2} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, n_o 和 n_e 分别为垂直于光轴方向上的 o 光和 e 光的折射率, 且 n_o 和 n_e 都是光波长的函数, 一般由塞耳迈耶尔方程^[10]来描述。

σ 是与晶体旋光率 ρ 有关的参数, 旋光率 ρ 是光波长的函数。 σ 与 ρ 的关系式如式(2)所示

$$\sigma = \lambda \rho / 2\pi n_o \quad (2)$$

旋光率 ρ 的物理意义为经单位长度后入射线偏振光偏振面的转角, 沿光轴方向旋光率在低吸收区域表达式由式(3)给出^[11]

$$\rho = \sum_s \xi_i^{(s)} \delta^2 / (\delta_i^{(s)2} - \delta^2)^2 \quad (3)$$

其中, ρ 单位为 degree · mm⁻¹, $\delta_i^{(s)} = hc / e\lambda_i^{(s)}$ 为旋转因子, $\delta = hc / e\lambda$, $\lambda_i^{(s)}$ 为振荡器位置, h 为普朗克常量, c 为真空中光速, e 为电子电荷量。20 °C 下旋光率 ρ 随波长变化曲线如图 2 所示。

其中, λ 为衍射波长, V_a 为超声声速, f_a 为驱动频率, θ_i 为入射角, θ_{do} 为出射角。

2 AOTF 温漂与衍射波长变化分析

AOTF 是基于声光相互作用的反常布拉格衍射效应, 其衍射波长与超声在晶体中的传播速度、射频驱动频率、入射角以及折射率有关, 关系式如式(7)所示。由于温度 T 影响声光晶体的超声波声速 V_a , 且用于 AOTF 的 TeO₂ 晶体在 $[110]$ 方向的纯剪切波声速 V_a 如式(8)^[12]

$$\begin{aligned} V_a &= \sqrt{\frac{c_{11} - c_{12}}{2\rho}} = \\ &= \sqrt{\frac{e^{-3.6 \times 10^{-4}(T-4.672 51 \times 10^4)}}{4.312 8} - \frac{e^{-4.1 \times 10^{-4}(T-4.114 11 \times 10^4)}}{4.911 8}} \end{aligned} \quad (8)$$

声速 V_a 随温度 T 的变化曲线如图 3(a) 所示, 由声速 V_a 引起的衍射波长 λ_0 随温度 T 的变化曲线如图 3(b) 所示。

由图 3 可知, AOTF 衍射光中心波长 λ_0 是随温度变化的, 这也是衍射光中心波长 λ_0 温漂的根本原因。由于声速 V_a 与中心波长 λ_0 的温漂特性, 导致 AOTF 衍射效率降低, 进而影响其分光性能。以上分析可知, 当 AOTF 超声换能器驱动频率固定时, 衍射峰值波长与温度成正比关系; 同理, 要想保持 AOTF 衍射峰值波长不随温度漂移, 超声驱动频率须随温度的升高而增大。因此本文采用超声驱动频率跟随的方式补偿衍射光波长的温漂问题, 根据 AOTF 工作环境温度和波长要求, 来确定超声驱动频率。

3 温度补偿驱动控制系统

根据第 2 节分析, 建立图 4 所示温漂波长补偿系统, 整

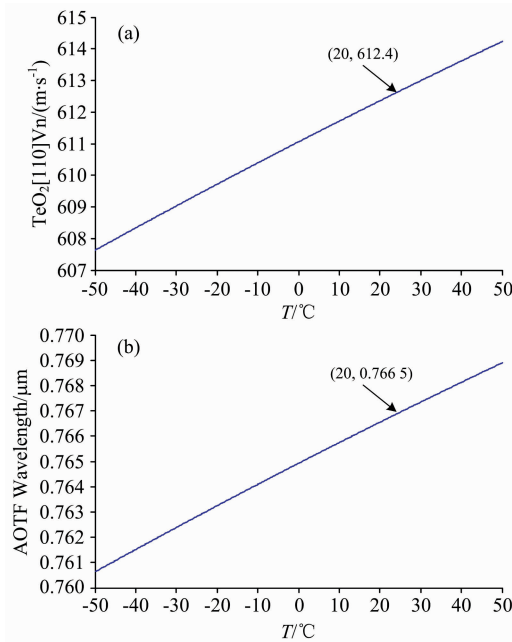


图 3 AOTF 温漂

(a): V_a 随 T 的变化; (b): λ_0 随 T 的变化 ($f=120$ MHz)

Fig. 3 AOTF temperature drift

(a): V_a changes with T ; (b): λ_0 changes with T

个系统为闭环反馈系统, 环境温度影响 AOTF 内部温度变化, 在 AOTF 内部安装温度传感器对其进行实时温度监测, 将所得温度值反馈到光谱成像控制系统中, 根据解算得到对应温度下的射频驱动频率值, 进而施加到 AOTF 上, 从而得到该温度下的衍射波长精确值。实验中的光源采用卤素灯光源; AOTF 采用中电 26 所研制的 LSGDN-3Z 型声光可调谐滤波器; 光谱仪采用 AVANTES 公司的高光谱分辨率

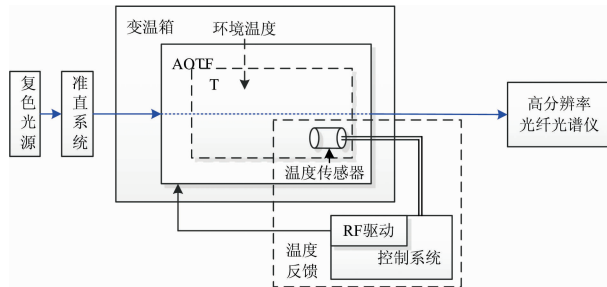


图 4 温漂波长补偿系统示意图

Fig. 4 The schematic diagram of temperature drift wavelength drive and control system

AvaSpec-ULS2048-8-USB2 型光谱仪, 光谱仪光谱范围: 200~1 070 nm; 光谱测量精度优于 0.02 nm, 变温箱调节温度精度 0.1 °C, 因实验条件限制, 我们仅对 20~50 °C 进行了实验。

从第 2 节分析可得, 在 $f=120$ MHz 时, 温度 T 在 10 °C 范围内, 衍射波长变化约为 1 nm。考虑到实时跟踪温度、频繁变换驱动频率容易对系统造成破坏, 影响使用效率, 因此采用 10 °C 为一个温度段, 在一个温度段内根据中间温度使用一个驱动频率对 AOTF 进行调控(即 15~25 °C 范围内采用 20 °C 下的修正关系式, 25~35 °C 范围内采用 30 °C 下的修正关系式, 以此类推), 每一温度段有相应的驱动频率-衍射波长对应关系。

表 2 不同温度下频率-衍射波长修正关系式

Table 2 Frequency-diffraction wavelength correction equation under different temperature

温度 ($T/^\circ\text{C}$)	波长修正关系式 ($\lambda/\text{nm}, f/\text{MHz}$)
20	$\lambda = 10^5 \left(\frac{4.4112}{f^2} + \frac{0.5038}{f} + 0.0016 \right)$
30	$\lambda = 10^5 \left(\frac{4.4073}{f^2} + \frac{0.5042}{f} + 0.0016 \right)$
40	$\lambda = 10^5 \left(\frac{4.3922}{f^2} + \frac{0.5047}{f} + 0.0016 \right)$
50	$\lambda = 10^5 \left(\frac{4.3222}{f^2} + \frac{0.5065}{f} + 0.0016 \right)$

4 AOTF 温漂解决策略与实验

根据式(7)和式(8)以及实验数据拟合建立温度 T 、衍射波长 λ 以及射频驱动频率 f 的数学模型。为了验证第 3 节中方法的可行性, 搭建图 4 所示实验装置。

采用几组规定范围内的温度, 选择 AOTF 超声驱动频率分别为室温下未修正的驱动频率 $f_{\text{未修正}}$ 和经过第 3 节所述方法修正之后的驱动频率 $f_{\text{修正}}$ 进行实验。在 20~50 °C 温度范围内, 选取温度分别在 $T_1=28$ °C, $T_2=33$ °C, $T_3=38$ °C, $T_4=42$ °C 和 $T_5=47$ °C 下进行理论修正与实验结果对比, $\lambda_{\text{修正}}$ 代表根据温度变化而改变驱动频率 f 之后的实际波长, $\lambda_{\text{未修正}}$ 代表在室温下未经过温度修正得到的理论波长, 对比结果如表 3 所示。

表 3 实验结果对比

Table 3 The comparison results

$\lambda_{\text{目标}}/\text{nm}$	$T/^\circ\text{C}$	$f_{\text{未修正}}/\text{MHz}$	$\lambda_{\text{未修正}}/\text{nm}$	$f_{\text{修正}}/\text{MHz}$	$\lambda_{\text{修正}}/\text{nm}$	$\frac{ \lambda_{\text{未修正}} - \lambda_{\text{目标}} }{\lambda_{\text{目标}}}/\%$	$\frac{ \lambda_{\text{修正}} - \lambda_{\text{目标}} }{\lambda_{\text{目标}}}/\%$
632	28	113	638.5	114.8	632.5	1.03	0.79
	33	113	638.7	114.8	632.5	1.06	0.79
	38	113	639.9	115.1	631.7	1.09	0.47

续表 3

	42	113	639.1	115.1	631.7	1.12	0.47
	47	113	639.3	115.4	631.6	1.15	0.63
	28	92	758.6	93.4	750.2	1.15	0.27
	33	92	758.8	93.4	750.2	1.17	0.27
750	38	92	759.1	93.4	750.5	1.21	0.67
	42	92	759.3	93.4	750.5	1.24	0.67
	47	92	759.6	93.6	750.3	1.28	0.40

实验中由于不可避免的系统误差, 因此得到的修正前后相对误差数值会出现不准确的情况, 但从修正前后波长相对误差的数量级来看, 误差减少了一个数量级, 达到了较好的效果, 因此该方法可为任意一种 AOTF 的衍射波长的温漂问题进行修正。

5 结 论

针对 AOTF 衍射波长在不同温度下存在温漂, 并且对于

AOTF 调谐关系的研究中大多忽略旋光性影响的问题, 推导了 AOTF 中旋光率与衍射波长的关系, 进而得到了考虑旋光性影响的 AOTF 调谐关系。在此基础上分析了不同温度下超声声速对 AOTF 衍射波长的影响, 得到衍射波长在不同温度下的温漂模型, 对此, 提出了采用频率跟踪的方式得到不同温度下的目标波长。实验表明, 经过频率修正之后的衍射波长与普通室温下所得波长相比, 前者与目标波长更相近, 误差减少一个数量级。本研究对于 AOTF 在不同温度下的高精度光谱测量具有十分重要的科学意义和实用价值。

References

- [1] Christophe C, Sylvie B, Marcel C, et al. *Optics Express*, 2015, 23: 16164.
- [2] Ferrec Y, Taboury J, Sauer H, et al. *Appl. Opt.*, 2011, 50: 5894.
- [3] Zhang Rui, Wen Tingdun, Wang Yaoli, et al. *Appl. Opt.*, 2015, 54: 8686.
- [4] Zhang R, Li K, Chen Y, et al. *Optica Acta International Journal of Optics*, 2016, 63(21): 2203.
- [5] WANG Hao, ZHANG Chun-guang, HUANG Jun-feng, et al(王 号, 张春光, 黄峻峰, 等). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2014, (4): 0423002.
- [6] WANG Hao, HUANG Jun-feng, ZHANG Chun-guang, et al(王 号, 黄峻峰, 张春光, 等). *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*, 2015, (6): 0616003.
- [7] Zhang C, Zhang Z, Yang Y, et al. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2417.
- [8] ZHANG Chun-guang, WANG Hao, QIU Yi-shen(张春光, 王 号, 邱怡申). *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*, 2011, (9): 0916001.
- [9] WANG Yao-li(王耀利). *The Research on Spectropolarimetric Imaging System and Imaging Quality Based on AOTF(基于 AOTF 的光谱偏振成像系统及其成像质量研究)*. Taiyuan: North University of China(太原: 中北大学), 2016.
- [10] Yang Yu, Sha Xuejun, Zhang Zhonghua. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(8): 081101.
- [11] Uchida N. *Phys. Rev. B*, 1971, 4(10): 3736.
- [12] ZHANG Rui(张 瑞). *The Research on High-Accuracy Hyper-Spectral Full-Polarization Imaging Based on Acousto-Optic and Liquid Crystal Variable Retarder(基于声光和液晶调制的高精度高光谱全偏振成像系统研究)*. Taiyuan: North University of China(太原: 中北大学), 2017.

Optical Rotation of Noncollinear AOTF Temperature Drift and Wavelength Correction Strategy

WANG Yao-li¹, ZHANG Rui², CHEN Yuan-yuan², LIU Lin-xian¹

1. Department of Automation, Shanxi University, Taiyuan 030013, China

2. Engineering and Technology Research Center of Shanxi Provincial for Optical-Electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China

Abstract Existing AOTF tuning relationship mostly ignores the optical rotation effect, but it will effect the accurate design of acousto-optic tunable filter, and will further influence its filtering performance, so the relationship between the specific rotation rate and diffraction wave length was deduced, then the AOTF tuning relationship considering the optical activity was acquired; aiming at temperature drift of AOTF diffraction wave under different temperature, therefore affecting the spectral resolution of AOTF, this article starting from the ultrasonic velocity influenced by temperature, the relationship between the wavelength and driving frequency under different temperatures was gained by analyzing, and the new method of frequency correction tracking diffracted wavelengths was put forward under different temperatures. According to AOTF tuning relationship considering the optical rotation, and considering the real-time tracking temperature, repeatedly conversion driving frequency will easily cause damage to the system, and will further affect the efficiency, so we adopted 10 °C as a period of temperature, within a period of using a driver frequency to adjust AOTF according to the medium temperature, and every period has the corresponding relation of driving frequency-diffraction wavelength. The paper described the specific measures for the implementation and made the corresponding experiment. The results showed that compared to no frequency correction with normal room temperature, the diffraction wavelength was close to the target wavelength operated by the frequency correction under the corresponding temperature, and the error of the correction method is 1 order of magnitude lower than that without correction. The method provides an important basis for high accuracy spectrum measurement with AOTF under different temperatures, which has important practical value.

Keywords AOTF; Optical rotation; Temperature drift; Frequency correction

(Received Jan. 2, 2018; accepted May 19, 2018)