

大口径短波红外声光可调滤光器

刘 伟, 易 平, 陈华志

(中国电子科技集团公司第26研究所, 重庆 400060)

摘 要:报道了一种工作于短波红外波段的大口径声光可调滤光器(AOTF)的设计、制作和性能检测。光矢量在折射率椭球上的切线为近似平行布局方式, 压电换能器采用两片双面串联方式实现宽光谱工作范围, 出光面利用材料的色散关系设计成斜面解决了光斑漂移, 器件实现的光谱调谐范围 $0.9\sim 2.4\ \mu\text{m}$; 通光口径 $\varnothing 10\ \text{mm}$; 光谱分辨率 $3.5\sim 12.0\ \text{nm}$; 衍射效率 $(20\%\sim 40\%)/2\ \text{W}$ 。

关键词:声光可调滤光器; 光谱成像; 衍射效率

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Shortwave Infrared Acoustic-optic Tunable Filter

LIU Wei, YI Ping, CHEN Huazhi

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: This article reports the design, production and performance test of an acoustic-optic tunable filter (AOTF) with large aperture, which operates at the shortwave infrared spectral band. The tangents of both incident and diffract light vectors at the refractive ellipsoid are approximately parallel. Two plates of piezoelectric transducer are mounted in series on each side of the AO crystal to obtain a wide spectral operating range. The spot shifting problem is solved by designing the light exit surface as an inclined surface utilizing the dispersion relation of the material, and the tuning range of the device $0.9\sim 2.4\ \mu\text{m}$; aperture $\varnothing 10\ \text{mm}$; spectral resolution $3.5\sim 12.0\ \text{nm}$; diffraction efficiency $(20\%\sim 40\%)/2\ \text{W}$.

Key words: AOTF; spectral imaging; diffraction efficiency

0 引言

在20世纪30年代就已发现了介质中的声光相互作用现象。直到60年代,随着激光的出现及光学、电子、材料学和压电学的发展,利用声光相互作用原理的器件才得到迅速发展。70年代初出现了声光可调滤光器,它的功能是通过调谐电信号的频率从宽光谱光(复色光)中滤出需要的光谱成分。声光可调滤光器在军事和民用领域有重要的应用前景,在多光谱、超光谱成像系统已广泛应用。

与一般色散元件相比,它具有下列特点:

- 1) 输出光谱切换速度快,切换时间通常只有几个微秒。
- 2) 可工作于单点、连续扫描、随机扫描和多点方式,适合于多光谱成像、超光谱成像。
- 3) 通过电信号进行调谐,方便利用计算机控

制,易于控制和系统集成。

4) 角孔径大,大角孔径特性在成像/非成像光谱仪应用中极为重要。

5) 无移动部件,波长重现性好,环境适应性强,适用于机载、星载系统。

由于声光可调滤光器(AOTF)的这些特点是传统的分光元件所不能比拟的,因而在各种各样的光谱应用中,特别是在航空、航天应用中具有很大优势。声光可调谐滤光器被称为“新一代”分光技术而迅猛发展成为超光谱成像的核心技术。

1 原理

在介质中传播的超声波引起介质折射率周期性变化。对特定频率电信号产生的超声波,整个宽光谱输入光内,只有很窄的光频带能近似地满足动量匹配条件而发生衍射。改变输入电信号的频率时,

收稿日期:2012-01-16

作者简介:刘伟(1963-),男,四川内江人,高级工程师,学士,主要研究方向为声光技术。

衍射光波长相应地改变,即输出光的波长随输入信号频率而改变,这就是声光可调谐滤光器的原理,如图1所示。由于声光滤光器通常设计为反常布喇格衍射模式,衍射光的偏振态发生转换。

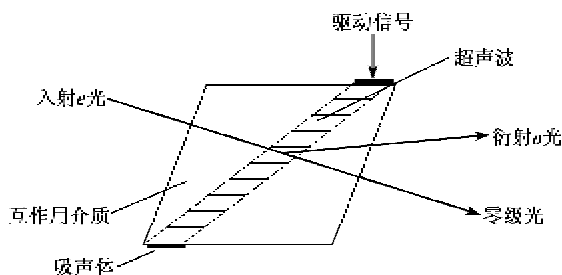


图1 声光可调谐滤光器工作示意图

2 设计

2.1 设计思路

按照 I. C. Chang 提出的非同向离轴型大角孔径声光滤光器设计的平行切线动量匹配条件^[1],入射光矢量、衍射光矢量及声矢量的折射率椭球上的布局如图2所示。图中, k_d 、 k_i 、 K 分别为入射光矢量、衍射光矢量和超声波矢量, θ_a 、 θ_i 、 θ_d 分别为声矢量、入射光矢量、衍射光矢量偏 $[001]$ 方向的角度, α 为晶体内的衍射角。声光滤光器设计为非同向互作用工作模式,当有一个小的入射角改变,仍能保持动量匹配条件成立;亦即利用双折射量随角度的变化恰好补偿因角度变化所引起的动量失配,从而既有大声光优值又保持有大角孔径。

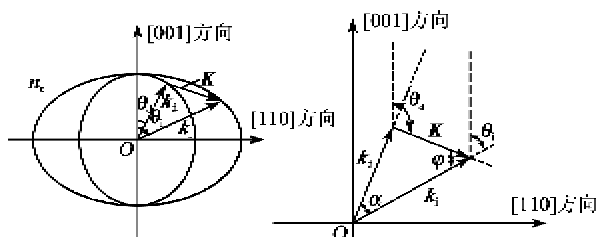


图2 非同向大角孔径声光滤光器矢量布局图
平行切线动量匹配条件的数学描述为

$$k_d = k_i - K \quad (1)$$

$$\begin{cases} k_i = 2\pi n_i / \lambda_0 \\ k_d = 2\pi n_d / \lambda_0 \\ K = 2\pi f_s / V_s \end{cases} \quad (2)$$

式中: n_i 、 n_d 为入射光和衍射光的光学折射率; λ_0 为入射光波长; f_s 为超声波频率; V_s 为超声波速度。

由折射率关系, o 光的折射率曲面是半径为 n_o 的圆,而 e 光的折射率曲面是以长短轴分别为 n_e 和 n_o 的椭圆,其关系式为

$$n_e(\theta_i) = 1 / \sqrt{\cos^2(\theta_i)/n_e + \sin^2(\theta_i)/n_o} \quad (3)$$

式中 n_e 和 n_o 可由 Sellmeier 方程计算,对 TeO_2 晶体有^[2]:

$$\begin{cases} n_o^2 - 1 = \frac{2.5838\lambda^2}{\lambda^2 - 0.01801} + \frac{1.1566\lambda^2}{\lambda^2 - 0.06959} \\ n_e^2 - 1 = \frac{2.8228\lambda^2}{\lambda^2 - 0.01801} + \frac{1.5416\lambda^2}{\lambda^2 - 0.06922} \end{cases} \quad (4)$$

这里设计的声光可调谐滤光器根据实际光谱成像系统的使用要求,光谱分辨率特别高,而孔径角相对不是很大的特点,所以增大了入射角,矢量布局在折射率椭球上为近似平行。我们选择非共线离轴型反常布喇格衍射模式,声光互作用介质采用 TeO_2 单晶。

在可见到中波红外波段,目前发现的声光性能最优的声光互作用介质是 TeO_2 单晶。 TeO_2 晶体的光学透明区是 $0.35 \sim 5 \mu\text{m}$,它属于 422 晶类,无对称中心,有旋光性,它是左旋正单轴晶体, $n_{\text{右}} > n_{\text{左}}$ 而 $n_e > n_o$ 。沿 $[110]$ 方向传播且振动方向沿 $[\bar{1}10]$ 的切变波速度特别小,称为慢切变波,它对声光器件的应用特别重要,制作反常布喇格衍射模式的宽带声光偏转器和声光滤光器常采用 TeO_2 晶体作为声光互作用介质。但 TeO_2 单晶生长较难,特别是生长大尺寸的晶体很难, TeO_2 单晶还有一个缺点是衰减相对较大,所以不适合作高频声光器件,工作频率超过 200 MHz 时,声衰减已很明显,衍射效率难以提高。

2.2 参数计算

主要计算的参数是调谐关系、光谱分辨率和衍射角。

2.2.1 调谐关系计算

动量匹配条件即动量三角形闭合,如图2所示。按余弦定律可得

$$k_d^2 = k_i^2 + K^2 - 2k_i K \cos(\theta_a - \theta_i) \quad (5)$$

入射光为 e 光,式(5)两边除以 k_i^2 并利用 $\frac{k_i}{k_d} =$

$\frac{n_i}{n_d} = \frac{n_i}{n_o}$,并引入 $a = \frac{K}{k_d} = \frac{\lambda_0 f}{n_o V}$ 可得

$$a^2 - 2 \frac{n_i}{n_o} \cos(\theta_a - \theta_i) a + \left(\frac{n_i^2}{n_o^2} - 1 \right) = 0 \quad (6)$$

解式(3),平方根号前取“—”,得到

$$a = \frac{n_i}{n_o} \cos(\theta_a - \theta_i) - [1 - \frac{n_i^2}{n_o^2} \sin^2(\theta_a - \theta_i)]^{1/2} \quad (7)$$

取 $n_i = n_e(\theta)$ 的严格结果,不忽略 $(\frac{\Delta n}{n})^2$ 以上项,正单

轴晶体可得

$$\frac{n_i}{n_o} = \left[\cos^2 \theta_i + \frac{\sin^2 \theta_i}{(1 + \Delta n/n_o)^2} \right]^{-1/2} \quad (8)$$

由式 $a = K/k_d = \lambda_0 f/n_o V$ 可得到调谐关系:

$$f = a n_o V / \lambda_0 \quad (9)$$

2.2.2 光谱分辨率计算

非同向大孔径声光可调滤光器的光谱分辨率^[3]为

$$\Delta \lambda = \frac{1.8 \pi \lambda_0^2}{b L \sin^2 \theta_i} \quad (10)$$

式中 b 为晶体的色散常数, 定义

$$b = 2 \pi \lambda_0^2 \frac{\partial}{\partial \lambda_0} \cdot \frac{\Delta n}{\lambda_0} \quad (11)$$

2.2.3 衍射角计算

在图2中, 根据正弦定律可得

$$\frac{\sin(\pi - \theta_a + \theta_d)}{\sin(\theta_a - \theta_i)} = \frac{n_i}{n_o} \quad (12)$$

由衍射角 $\alpha = \theta_i - \theta_d$ 及 $\sin(\pi - \theta_a + \theta_d) = \sin(\theta_a - \theta_d) = \sin(\theta_a - \theta_i + \alpha)$ 可得

$$\frac{\sin(\alpha + \theta_a - \theta_i)}{\sin(\theta_a - \theta_i)} = \frac{n_i}{n_o} \quad (13)$$

介质内衍射角

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{n_i}{n_o} \sin(\theta_a - \theta_i) \right] - \theta_i - \theta_a \quad (14)$$

2.3 结构设计

选择非共线离轴型反常布喇格衍射模式, 声光相互作用介质采用 TeO_2 单晶, 压电换能器采用 X 切铌酸锂 (LiNbO_3) 晶片。根据实际使用要求, 需要工作的光谱范围很大, 压电换能器的相对带宽超过了 100%, 因此设计了两片换能器串联工作方式, 每片换能器分别在一个波段工作, 保证了整个波段内的衍射效率均匀性。如果两片换能器制作在同一面上, 晶体的体积很大, 满足不了使用环境要求, 因此我们采取了双面反射串联, 如图3所示。

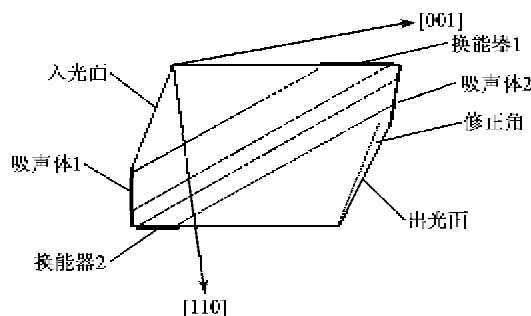


图3 声光滤光器晶体结构图

声光相互作用晶体的离轴角设计为 14° , 即超声矢量方向偏 $[110]$ 14° , 光入射角为偏 $[001]$ 方向 35° , 矢量布局在折射率椭球上为近似平行, 增大光入射角的目的是提高光谱分辨率, 但光入射角的选择要适中, 如果太大, 输出光谱将可能出现双峰现象。为了使用时器件调整方便, 晶体的入射面加工成与入射光方向垂直。为了避免光谱成像时不出现图像的漂移, 我们根据声光相互作用材料的色散, 出光面设计了一斜面 (见图3)。

声光滤光器器件内部结构包括声光晶体、压电换能器、附着层、电极层、焊接层、吸声胶和光学增透膜, 如图4所示。

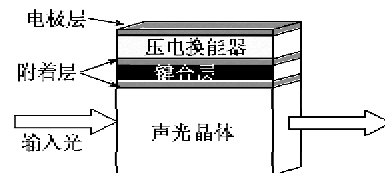


图4 声光滤光器内部结构图

3 测试结果

我们研制出了可应用于 $0.9 \sim 2.4 \mu\text{m}$ 波段光谱成像系统的声光可调滤光器, 如图5所示。

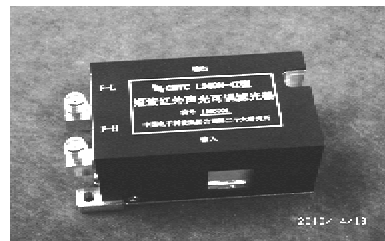


图5 短波红外声光可调滤光器

产品性能测试采用中科院上海技术物理所开发的声光可调滤光器性能测试系统。对短波红外声光可调滤光器测试的主要技术指标有: 输出光谱曲线, 光谱分辨率、调谐关系及衍射效率。测试系统如图6所示。

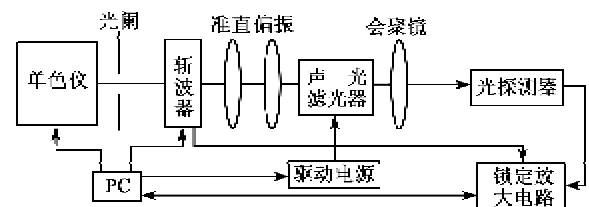


图6 声光可调滤光器性能测试框图

测试结果与理论设计值基本吻合。样品在 $0.9 \sim 2.4 \mu\text{m}$ 光谱范围对应的信号频率范围是 $41 \sim 120 \text{ MHz}$, 光谱分辨率 $3.5 \sim 11.5 \text{ nm}$, 当输入电功率为 2 W 时, 在光谱范围内峰值衍射效率 40% 、最

低衍射效率 20%, 样品在 2 400 nm 波长点输出谱线如图 7 所示。

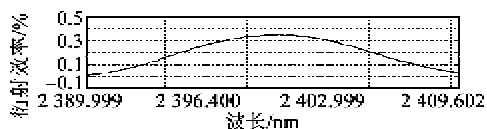


图7 样品在 2 400 nm 波长点输出谱线

4 结束语

本文介绍了工作于 0.9~2.4 μm 光谱范围的大口径短波红外声光可调滤光器的理论分析、设计思路及样品测试结果。短波红外声光可调滤光器在军事侦察告警、地球资源环境的遥感、遥测、深空探

测等领域有广泛的应用前景,特别适用于航空、航天领域。作为多光谱、超光谱成像光谱系统的最新一代分光器件,需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 徐介平. 声光器件的原理、设计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [2] KAPLAN D, TOURNOIS P. Theory and performance of the acousto optic programmable dispersive filter used for femtosecond laser pulse shaping[J]. J Phys, 2002, 12(5): 69-75.
- [3] 郑颖君. 红外声光可调滤光器的性能测试及理论分析[J]. 激光与红外, 2005, 35(6): 454-456.
- [4] (上接第 683 页)
- [17] YUAN Shenfang, ANSARI F, LIU Xiaohui, et al. Optic fiber-based dynamic pressure sensor for WIM system[J]. Sensors and Actuators A, 2005, 120(1): 53-58.
- [18] 吴奇峰. 基于光纤传感的车辆动态称重监测系统的研制[D]. 大连: 大连海事大学, 2006.
- [19] GAN Jiulin, CAI Haiwen, GENG Jianxin, et al. Optic fiber-based dynamic pressure sensor[J]. Journal of Electronic Science and Technology, 2008, 6(4): 482-485.
- [20] 吴重庆. 光波导理论[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [21] YARIV A. Coupled-mode theory for gueded-wave optics[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1973, QE-9(9): 919.
- [22] 胡兴柳, 梁大开, 陆观, 等. 基于单长周期光纤光栅光谱特性的温度和应变同时区分测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(3): 851-854.
- [23] 胡志新, 朱军, 张陵. 新型高准确度光纤光栅压力传感系统[J]. 光子学报, 2006, 35(5): 709-711.
- [24] 王昱, 李川, 胡玉瑞, 等. 双孔平行梁光纤 Bragg 光栅称重传感器[J]. 光学技术, 2008, 34(5): 678-680.
- [25] 叶顺厂, 王幸国, 胡硕臻, 等. 光纤光栅传感器在称重系统中的应用[J]. 传感器世界, 2007(1): 31-33.
- [26] 翟玉铎, 张龙, 朱灵, 等. 光纤光栅称重传感器研究[J]. 发光学报, 2007, 28(3): 412-416.
- [27] 赵琳, 张博明. 基于光纤光栅的复合材料动态称重系统研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(5): 40-43.
- [28] 高德文, 赵勇, 杨剑. 基于双折射效应的光纤光栅称重方法研究[J]. 光电工程, 2006, 33(11): 79-82.
- [29] 李永国, 戴珩, 姚开方, 等. 基于啁啾光纤光栅称重传感器的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(5): 59-61.

《压电与声光》免费索阅卡

姓名: _____ 职务: _____ 职称: _____ 单位: _____
 地址: _____ 邮编: _____ 电话: _____
 企业产品: _____

索阅期号: _____ 年 _____ 月 (每次仅限壹期)

复印有效