

文章编号: 0258-7025(2006)08-1047-04

一般相位匹配条件下声光可调谐滤波器系统的理论分析

徐可欣, 贺忠海*, 薛 彬

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 研究非共线性声光可调谐滤波器(AOTF)在一般相位匹配条件下的声光相互作用关系。对于通常设计制造的声光可调谐滤波器,它的 o 光和 e 光具有不同的波长,应用中无法同时使用此两束衍射光,为了使可用光强增大,应当使两束衍射光的波长相等。研究了使一般声光可调谐滤波器晶体两束衍射光波长相等的方法。对于未按照等值点理论制造的声光可调谐滤波器晶体,可以使入射光与晶体表面的法线成一个小的角度,根据一般相位匹配原理可以使两束光的出射波长相等。在实验中证明此方法的正确性,此角度称为等值偏置角。对于不同数值的衍射波长,有不同的等值偏置角,最后给出了等值偏置角随衍射波长的变化规律。

关键词 物理光学;等值偏置角;一般相位匹配;封闭矢量三角形;声光可调谐滤波器

中图分类号 O 436.1 **文献标识码** A

Theoretical Analysis to Acousto-Optic Tunable Filter System with Normal Phase Match Condition

XU Ke-xin, HE Zhong-hai, XUE Bin

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract The optic-acoustic reaction relationship is analyzed to noncollinear acousto-optic tunable filter (AOTF) under normal phase matching condition in this paper. To the generally designed AOTF, the diffracted o and e rays have different wavelengths. The two rays cannot be used simultaneously in practice. In order to magnify the intensity of light that can be used, the two diffracted rays should have same wavelength. The main research content of the paper is how to get two rays with same wavelength in normally produced AOTF crystal. For the AOTF crystal not produced by equivalent point theory, the incident light can be deflected a small degree with the normal of the crystal plane. By normal phase match condition it can be found that certain degree can diffracted the same wavelength rays. Experiments have validated the method. The deflected degree is called equivalent offset angle. For different diffracted wavelengths, there are corresponding different equivalent offset angles. Finally the variation rule of equivalent offset angle with diffracted wavelength is given.

Key words physical optics; equivalent offset angle; normal phase match; close vector triangle; acousto-optic tunable filter

1 引 言

声光可调谐滤波器(AOTF)^[1~3]是一种光谱分光元件,它的优点包括:扫描速度快、调谐范围宽、入射孔径角大、无次级衍射,所以声光可调谐滤波器应用十分广泛。已经提出了使两束衍射光频率相等的

等值点理论^[2],但目前大多数声光可调谐滤波器仍然是在非等值点设计制造的,衍射的两束光波长不等,应用中希望在不降低频谱分辨力的前提下尽量提高分光的光强,而同时使用两束衍射光就是一种简单而有效的方法^[4~8]。如果适当改变入射方向可使其两束衍射光的波长相等,而且该角度随波长的

收稿日期:2005-08-19;收到修改稿日期:2005-11-25

作者简介:徐可欣(1956—),男,北京人,天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室教授,主要从事无创血糖检测的研究。E-mail:kexin@tju.edu.cn

*通信联系人。E-mail:zhhe@eyou.com

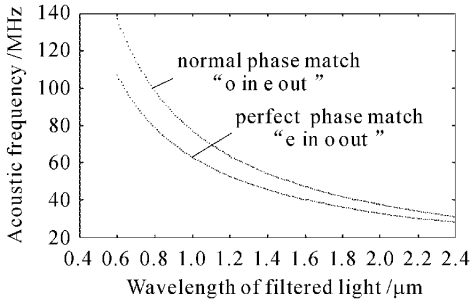


图 3 声波频率与两束输出滤光波长的关系

Fig. 3 Relation between the acoustic frequency and the output optic wavelength of the two beams

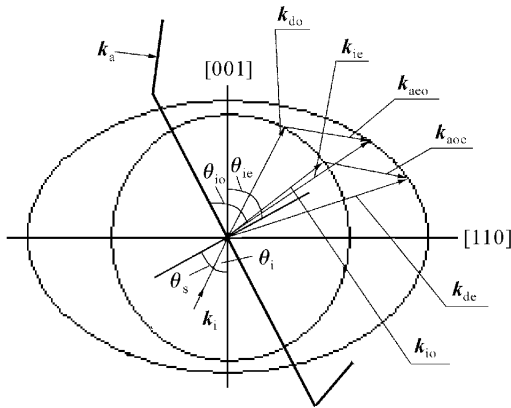


图 4 声光互作用波矢图

Fig. 4 Acoustic optic interaction wave vectors surface

具有不同的波长,如图 3 所示。

图 4 画出了入射光线偏离声光可调谐滤波器入射面法线的声光互作用波矢。以 θ_i 角入射光线经晶体表面折射后得到入射光波矢 k_{ie} 和 k_{io} ,其相应的入射角为 θ_{ie} 和 θ_{io} 。对于 o in e out 的情况,矢量三角形和计算公式与图 2 和公式(1)相同。

对于 e in o out 的情况,可得到封闭向量三角形如图 5 所示,由图可得到衍射波长的计算公式为

$$\begin{cases} \left(\frac{n_o}{\lambda}\right)^2 = \left[\frac{n_e(\theta_i)}{\lambda}\right]^2 + \left(\frac{f_a}{V_a}\right)^2 - \frac{2n_e(\theta_i)f_a}{\lambda V_a} \cos\varphi \\ \varphi = \theta_a - \theta_i \\ \frac{V_a \sin\beta}{f_a} = \frac{\lambda \sin\varphi}{n_o} \end{cases}, \quad (3)$$

由式(1),(3)可以得到输出滤光波长 λ 和衍射光方向角 β 的单值解。显然,当入射光线偏离晶体入射角表面法线时,经晶体表面折射后,e 光和 o 光均偏离平行切线相位匹配条件,可同时采用两个封闭向量三角形的一般相位匹配条件,分别求得 e in o out 和 o in e out 两束光的声频和输出滤光波长关系。

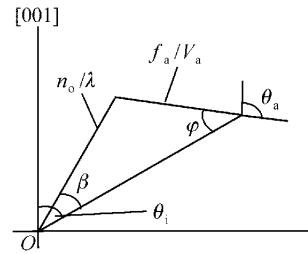


图 5 e in o out 情况下的封闭矢量三角形

Fig. 5 Close vector triangle for arrangement of e in o out

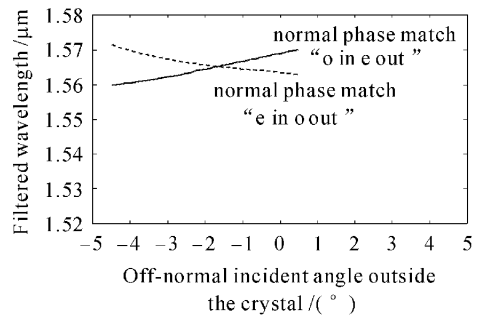


图 6 两束滤出光波长与偏置角的关系曲线

Fig. 6 Two curves of the filtered optic wavelength against the off-normal angle

这两束光将具有不同的衍射波长和衍射偏角。

图 6 画出了入射光线偏离晶体表面法线的入射角变化时,由式(1)和(3)求得的输出滤光波长曲线。从图上可以发现,两条曲线有一交点,显然在这一点两束输出的衍射光具有相同的光波长。因此在使用已设计加工好的声光可调谐滤波器时,可以采用相对于标准切割晶体入射表面法线转动入射光线的方法,找到使两束输出光束波长相等的入射光位置。对于没有按等值点 ($\theta_i \approx 56^\circ$) 设计的声光可调谐滤波器,可采用改变入射角度的方法找到波长相等的位置,该入射角相对于原入射角的改变量称为等值偏置角。在这一位置可同时使用两束光的光能量进行光谱测量,能在不降低波长分辨力的情况下,提高能量近一倍,有利于微弱信号的检测。应当指出的是这种方法获得的等值点特性,以及等值点处的偏角均随输出滤光波长而变化,而选择 $\theta_i \approx 56^\circ$ 设计的声光可调谐滤波器,其等值特性与波长基本不变。

3 实验

图 7 为实验原理框图。具体测量原理是:光源发出的光经光阑滤光后由透镜会聚成平行光照到 AOTF 上,AOTF 将入射白光的某一频率的光分离

出来,经透镜耦合进光纤,分离的单色光由光纤射入 FT-IR,由 FT-IR 分析其光谱特性。声光可调谐滤波器放置在旋转台上,旋转台转动可改变入射光线和声光可调谐滤波器主光轴的角度,从而测得不同夹角处的衍射波长。实验装置中光源采用 KLV 公司的 100 W 卤钨灯,型号为 PG64623,透镜是大恒公司的 GCL010141 型石英凸透镜,被测声光可调谐滤波器使用中国科学院上海硅酸盐研究所的 TeO_2 晶体,采用 31° 的普通入射角制造,旋转台使用 Newport 公司的 495cc 精密回转台,光纤是在上海传输线所定制的多模石英光纤束,FT-IR 是美国 Perkin Elmer 公司的傅里叶变换红外光谱仪,用以测量声光可调谐滤波器的输出光谱。表 1 给出了计算得到的不同衍射波长时所对应的等值偏置角,最

下一行是实验得到的等值偏置角的数据。受声光可调谐滤波器晶体性能的影响,分光系统分光的最短波长为 $0.8 \mu\text{m}$,因此波长为 $0.6 \mu\text{m}$ 处的等值偏置角不能实验得出。

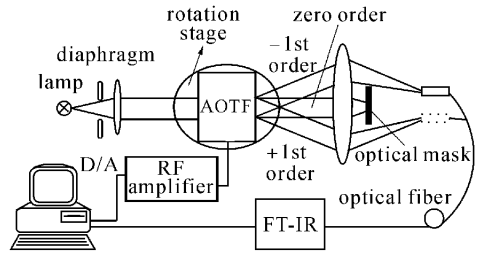


图 7 测试声光可调谐滤波器等值点特性的实验装置图

Fig. 7 Schematic diagram of the experimental setup for AOTF characterization of the equivalent point

表 1 对应不同衍射波长的等值偏置角

Table 1 Equivalent offset angel corresponding to different diffracted wavelengths

Filter wavelength / μm	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
Equivalent offset angle (calculated value) / $(^\circ)$	-4.6	-4.2	-4.0	-3.2	-2.8	-2.2	-1.3	-0.7
Equivalent offset angle (experimental value) / $(^\circ)$		-3.7	-3.9	-3.1	-2.4	-2.0	-1.6	-0.5

从表 1 的数据对比可以看出,理论值和实验值很接近,但在有的位置(波长为 $0.8 \mu\text{m}$)也有较大的差异(达到了 0.5°),因此在实际使用本文方法时,应在理论计算值的基础上,用光谱仪准确测量实际等值偏置角,以得到两束衍射波长完全相同的衍射光。

从以上实验数据可以看出,等值偏置角一般都很小,入射光与晶体表面的法线成等值偏置角度后不会对入射光能量产生很大的影响,与传统设计方法的光强相比产生的变化可以忽略不计。

4 结 论

对于通常没有按等值点设计制造的声光可调谐滤波器,一般 o 光与 e 光不能同时满足平行切线相位匹配条件,两束衍射光的输出波长不等。对于不满足平行切线相位匹配条件的光束,可采用封闭矢量三角形的一般相位匹配条件的分析方法,求出其驱动声频与输出滤光波长的关系。理论计算表明,入射光在某一入射角 θ_i 时也可使 e 光和 o 光的两路输出光具有相同的波长,即两路光也存在波长相等的等值点。该入射角称为等值偏置角,可通过旋转声光可调谐滤波器或旋转入射光的方向找到波长相等的等值偏置角点。该等值点特性对入射角的变化

敏感,等值偏置角与波长有关,可以用公式计算出其值,因此也是一种可行的提高光谱分辨力的方法。

参 考 文 献

- 1 T. Yano, A. Watanabe. Acoustooptic TeO_2 tunable filter using far-off-axis anisotropic Bragg diffraction [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(9):2250~2258
- 2 Bin Xue, Kexin Xu, Hiroshi Yamamoto. Discussion to the angular aperture narrowing behavior inside AOTF crystal [J]. *Optics Express*, 1999, **5**(1):139~146
- 3 Xu Kexin, Xue Bin, Jiang Chengzhi et al.. The equivalent point theory of acousto-optics tunable filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3):323~326
徐可欣,薛 彬,蒋诚志等. 声光可调谐滤波器的等值点理论 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(3):323~326
- 4 I. C. Chang. Noncollinear acoustic-optic filters with large angular aperture [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **25**(7):370~372
- 5 Ren Quan, Zhang Mingdong, Ding Lanying. Accurate analysis of non-collinear acousto-optic interaction in TeO_2 crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 1993, **13**(3):568~571
任 途,张明栋,丁兰英. TeO_2 晶体中非同向声光相互作用的精确分析[J]. *光学学报*, 1993, **13**(6):568~571
- 6 Xu Kexin, Yamamoto Hiroshi, Xue Bin. Acousto-optic tunable filter and method of calculating its equivalence incident angle [P]. *USP*, 5,973,822, 1999
- 7 P. A. Gass, J. R. Sambles. Accurate design of a non-collinear acousto-optic tunable filter [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6):429~431
- 8 Xu Jieping. The Principle, Design and Application of Acousto-optic Devices [M]. Beijing: Science Press, 1982. 16
徐介平. 声光器件的原理设计 and 应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1982. 16