

文章编号: 0258-7025(2003)04-0329-05

声光可调谐滤光器分光系统光学特性的研究

李庆波, 徐可欣, 倪 勇, 蒋诚志

(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 对声光可调谐滤光器(AOTF)及其分光系统的光学特性进行了实验研究,提出了提高衍射光谱纯度的有效方法,分析了正交双偏振方法和光电结合的调制解调方法,并以近红外区域水的吸收峰测量谱图为例,对几种分光系统的改进效果与傅里叶变换红外光谱仪的测量效果进行了对比验证。结果表明,两种方法均能有效地消除零级光的影响,但正交双偏振方法以牺牲光能利用率为代价,调制方法能够在不降低光能利用率的情况下提高 AOTF 分光系统的光谱分辨力和信噪比,并可以简化光路结构。

关键词 声光可调谐滤光器;分光系统;光谱分辨力;信噪比

中图分类号 TN 713;TN 65 **文献标识码** A

Study on Characteristics of Acousto-optic Tunable Filter Optical System

LI Qing-bo, XU Ke-xin, NI Yong, JIANG Cheng-zhi

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

Abstract The characteristics of an acousto-optic tunable filter and its optical system are investigated. The effective solutions to improve the purity of the diffracted light in this optical system are put forward. The orthogonal polarizing method, and the combined modulation method of optics and electronics are discussed. The measurement results of several optical improvement methods are compared with that of FT-IR through the near-infrared spectral measurement of water. The results show that both methods can effectively reject the inference of zero order light. But the orthogonal polarizing method does at the expense of the utilization ratio of light. The combined modulation method can increase spectral resolution and signal-to-noise ratio of this optical system, while not decrease the utilization ratio of light.

Key words acousto-optic tunable filter; light-splitting optical system; spectral resolution; signal-to-noise ratio

1 引 言

声光可调谐滤光器(AOTF)是根据单轴双折射晶体的声光相互作用原理制成的分光器件。它是通过在晶体中的声光耦合对入射光产生衍射。改变激励声波的电驱动器的频率,则衍射光的波长相应地改变。这种电调谐的工作方式具有扫描速度快、调谐范围宽、入射孔径角大、无多级衍射光以及易于实现计算机控制等优点。由于 AOTF 无机械移动部件、体积小,因此有着十分广泛的应用,如在食品工业、农业、化工等领域^[1],用以实现产品成分的非破坏检

测和在线分析等。本文通过 AOTF 近红外光谱测量系统实现人体血糖含量的无创伤检测。由于需要从重叠光谱中提取微弱的信息,这一特性要求光谱测量仪器具有较高的光谱分辨力和光谱信噪比,因此需要对 AOTF 及其分光系统进行系统的研究。

AOTF 的设计理论是基于 I. C. Chang 提出的平行切线动量匹配条件^[2],70 年代开始研究其基础理论^[3],但目前对于 AOTF 及其分光系统的光学特性尚缺乏系统的实验研究。近几年, Bucher 和 Carnahan^[4]对可见光区域 AOTF 的光学特性进行了研究。本文首先对近红外区域 AOTF 的主要光

收稿日期:2002-02-06;收到修改稿日期:2002-04-08

基金项目:国家自然科学基金(60077010)和天津市自然科学基金(003800311)资助项目。

作者简介:李庆波(1975—),女,山东人,天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生,专业:测试计量技术及仪器,研究方向:生物光学与应用光谱。E-mail:qblee@eyou.com

学特性进行了实验研究,以指导 AOTF 的应用。另外,重点讨论了 AOTF 分光系统中衍射光与透射光不能完全分离,而造成的光谱分辨力和信噪比的降低,提出了解决方法,并进行了实验验证。

AOTF 是宽波段的滤光器,目前主要应用于白光光源,其中有些也可以进行调制。与激光技术中常用的声光调制器相比,两者大致结构很相似,但其设计要复杂得多,它不仅可能有调制器的指标,而且一定要有滤光器和适应白光光源的技术指标^[5]。

2 AOTF 光学特性曲线测试

基于 AOTF 的光谱测量系统通常由四部分组成:AOTF 分光光学系统、电信号处理模块、数据采集和驱动控制模块、数据处理模块。其中,由 AOTF 作为核心器件的分光光学系统用于波长选择,在整个测量系统中具有重要作用。因此,首先对 AOTF 的重要光学特性曲线进行测试,以便指导 AOTF 的应用。

2.1 衍射光中心波长与射频驱动频率的关系

在 AOTF 光谱测量系统中由计算机控制驱动 AOTF 进行光谱扫描,需要明确 AOTF 衍射光中心波长与射频驱动频率之间的关系。用 Spectrum GX 傅里叶变换红外光谱仪 (FT-IR) 对 AOTF 的衍射光能量谱图进行了测试。由于 AOTF 入射角对衍射光的中心波长有影响,因此本实验是在入射角一定的情况下进行的。驱动频率为 45~90 MHz,图 1 为 AOTF 在不同射频驱动频率下由傅里叶变换红外光谱仪测得的衍射光能量谱图。可见对于一固定的射频驱动频率,只有很窄的光频带近似满足平行切线动量匹配条件而被衍射。

衍射光的中心波长与射频驱动频率之间的数学关系^[6]为

$$\lambda_0 = \frac{V_a \Delta n}{f_a} \sqrt{\sin^4 \theta_i + \sin^2 2\theta_i} \quad (1)$$

式中, λ_0 为衍射光的中心波长, θ_i 为入射光与晶体晶轴的夹角, f_a 和 V_a 分别为超声波频率和在晶体中的传播速度, $\Delta n = |n_e - n_o|$, n_o 和 n_e 是 o 光和 e 光的轴向折射率。本研究中, $\Delta n \approx 0.142$, $V_a = 617$ m/s, $\theta_i = 30.8^\circ$,通过公式(1)可以计算出衍射光中心波数(cm^{-1})的理论值,其与射频驱动频率之间具有线性关系(如图 2 曲线 a 所示)。

由图 1 可得到 AOTF 衍射光对应的中心波数,它与射频驱动频率之间的关系曲线如图 2 曲线 b 所

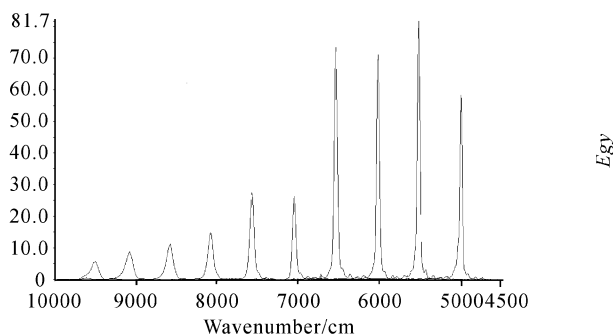


图 1 AOTF 衍射光能量谱图

Fig. 1 Spectrum of the diffracted light at different RF driving frequencies

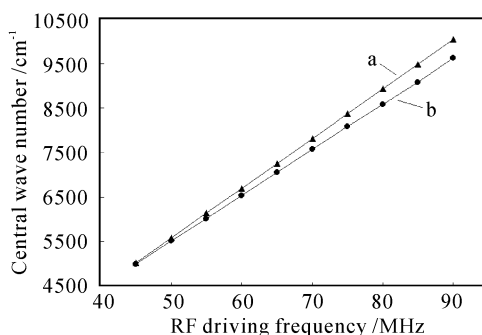


图 2 AOTF 衍射光中心波数与射频驱动频率关系曲线
a: 理论曲线; b: 实测曲线

Fig. 2 Relationship between the central wave numbers of the diffracted light and RF driving frequency
curve a: theoretical curve; curve b: experiment curve

示。射频驱动频率与衍射光中心波数之间的相关系数为 0.999。可见,AOTF 在 45~90 MHz 之间线性度很好。理论曲线与实测曲线不重合是由于制造误差及光路布局的影响。一般应用时首先标定该曲线,本系统的工作曲线为

$$\nu(\text{cm}^{-1}) = 102.66 \times f(\text{MHz}) + 377.65 \quad (2)$$

ν 为以 cm^{-1} 为单位的衍射光中心波数, f 为以 MHz 为单位的射频驱动频率。这个公式可应用在计算机程序里以控制 AOTF 的衍射光波数。

2.2 AOTF 的衍射效率

采用图 3 所示的测量光路系统进行多波长衍射效率的测量。光路中采用卤钨灯作为光源以获得较宽的光谱范围。在驱动功率固定的情况下改变 AOTF 的射频驱动频率,进行光谱扫描。由于 AOTF 在同一驱动频率下产生的正列衍射光与负列衍射光的中心波长通常不重合,接收的零级光谱会出现相应的部分叠加的双吸收峰。因此在 AOTF 前加偏振片,用垂直偏振光入射,接收到的

零级光光谱如图 4 所示。由于是垂直偏振光入射，相应的吸收峰是单峰，单峰的面积正对应偏折衍射的光能值。根据图 4 的能量谱图即可计算出 AOTF 发生衍射时零级光与衍射光之间的比例关系，从而计算得到各波长的衍射效率曲线(图 5)。可见，衍射效率一般随波长变化而有所不同，通常在 30%~50%之间，在 AOTF 的设计中心波长衍射效率较高。

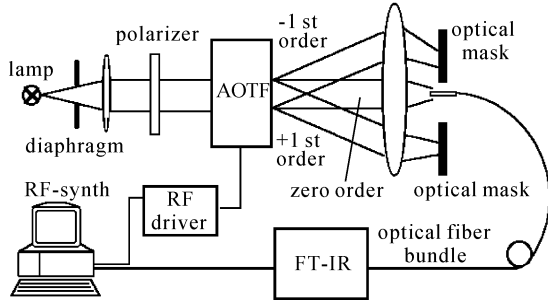


图 3 AOTF 衍射效率测量光路

Fig. 3 Schematic diagram of experiment setup for diffraction efficiency of AOTF

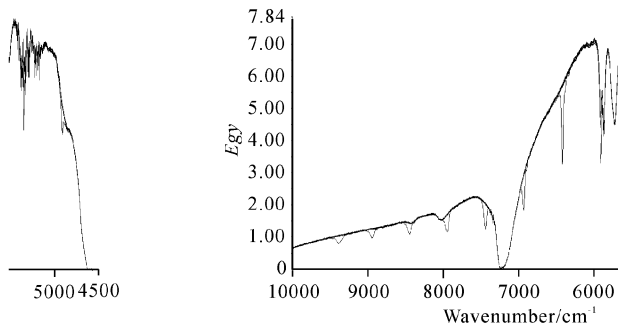


图 4 不同射频驱动频率下 AOTF 零级光能量谱图
Fig. 4 Spectrum of zero order light for constant RF power at different RF driving frequency

3 提高 AOTF 分光系统衍射光谱纯度的方法

AOTF 分光光学系统主要由光源，准直系统，AOTF，聚光透镜，光纤等构成。由于 AOTF 光谱测量系统通常需要宽广的光谱范围，因此光学系统

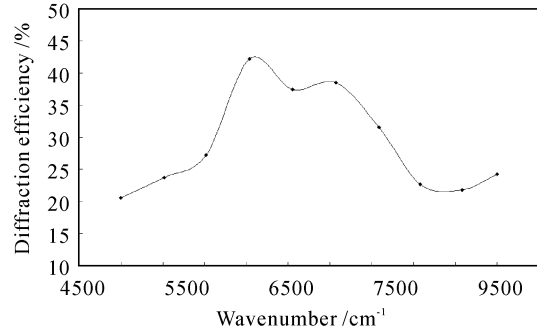


图 5 AOTF 的衍射效率曲线
Fig. 5 Curve of diffraction efficiency

中采用卤钨灯作为光源，但受本身灯丝形状的限制（不是点光源），入射到 AOTF 的光很难实现平行光。光通过 AOTF 晶体，产生衍射光的偏折角很小，不容易与透过的零级光完全分离，而混入的零级光也同样会被光电器件接收，这将降低整个系统的测量分辨力。因此 AOTF 分光系统的主要设计思路是尽可能地提高衍射光光谱纯度和效率，以提高系统的光谱分辨力和光谱信噪比。

3.1 正交双偏振法

由于 AOTF 的衍射光与入射光具有偏振方向正交的特性，可以采用正交双偏振法来消除零级光。先将入射的自然光用偏振片起偏，经 AOTF 声光作用后，衍射光的偏振状态发生 90° 偏转，并发生小角度偏转；而不满足动量匹配条件的光既不发生偏转，偏振状态也不发生改变。因此，在 AOTF 后加一个检偏器件，光轴方向与起偏元件的光轴相垂直，让相同偏振状态的衍射光可以通过。图 6 为采用正交双偏振法消除零级光的效果对比图。从图中可见，采用偏振片后有效地消除了零级光耦合进入光纤，提高了光路的分辨力和信噪比，但从表 1 可见，该方法是以牺牲衍射光的光强来实现的，降低了光能利用率，因此在弱光检测的场合，由于有用的衍射光被偏振片吸收较多，也将影响整个测量系统的信噪比。

3.2 光电结合的调制解调方法

对于 AOTF，可以通过改变驱动信号的功率来达到调制衍射光光强的效果。利用这一特性，通过

表 1 不同光路状态下耦合到光纤中的光能量(傅里叶变换红外光谱仪测量结果)

Table 1 Light energy coupling into optical fibers under different optical system conditions (measured by FT-IR)

Conditon of AOTF optical system	Zero order light energy/a. u.	Diffractioned light energy/a. u.	SNR
Not adopting orthogonal polarizing method	43	407	9.5:1
Adopting this method	1	186	186:1

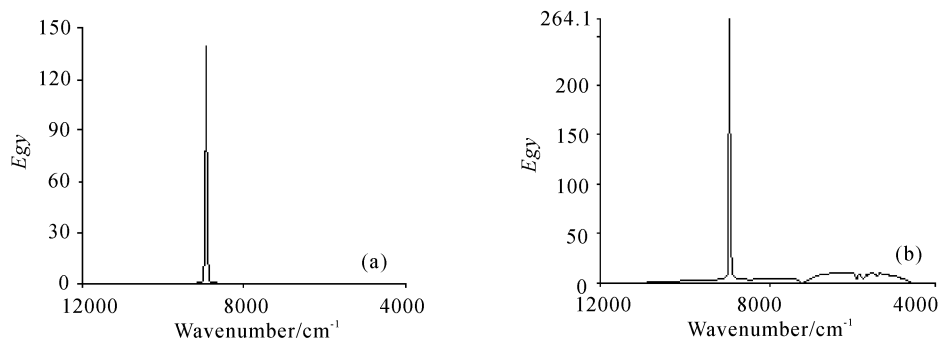


图 6 正交双偏振法消除零级光的效果对比图(耦合到光纤中的光能量谱图)

(a) 采取正交双偏振法; (b) 未采取正交双偏振法

Fig. 6 Effect of rejecting zero order light with orthogonal polarizing method

(a) adopting this method; (b) not adopting this method

将射频驱动信号进行幅度调制,使其衍射光强发生周期性改变,实现衍射光光强调制。被调制的衍射光由光电探测器转换为与调制信号同频率的交流信号,而非衍射光不被调制,转换为直流信号,然后由隔直和窄带滤波电路进行解调,从而消除零级光的影响。

由射频合成卡输出的载波信号决定了衍射光的中心波长,外部输入的调制信号决定了光强的变化周期。经调制后 AOTF 驱动器的输出波形如图 7 所示,其中,包络线对应于调制波的频率,其幅值与调制深度成比例。交流调制中的调制工作点和调制深度的选择非常重要,两者都直接影响动态范围。不合理的工作点和调制深度不够将大大缩小动态范围,理论分析和实测都证实光的衍射效率与驱动的声频功率不是线性关系。本文的具体做法是先实测出静态特性曲线,估算最佳区间,然后通过大量实验求得动态情况下的最佳工作点和调制深度。

该方法不仅可以有效消除零级光的影响,而且在去除偏振片后,经 AOTF 作用后的衍射光将直接

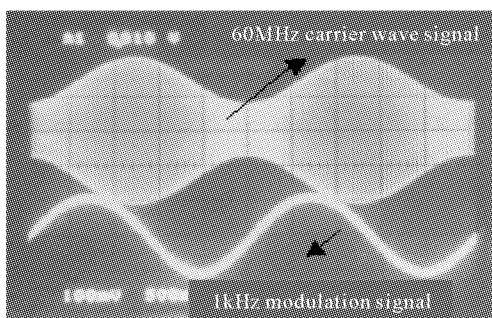


图 7 调制后 AOTF 驱动器的输出波形

Fig. 7 Output waveform of RF amplifier with modulation

被用于测量,使光能利用率增加,有效地提高了系统信噪比。另外,交流带通滤波电路与直流电路相比具有更大的可靠性,同时可以大大压缩噪音频带,降低系统噪声,使系统抗干扰能力更强。同时该方法可以缩短光路,简化系统整体结构,降低综合成本。但该方法影响光电接收的动态范围,提高了对接收器件的要求。

4 实验结果

由于人体血糖含量的测量与水密切相关,因此

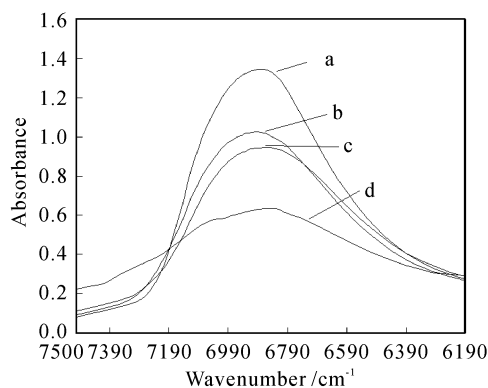


图 8 AOTF 分光系统与傅里叶变换红外光谱仪测量的水光谱比较

a: 傅里叶变换红外光谱仪测试曲线; b: AOTF 分光系统光电结合调制解调方法测试曲线; c: AOTF 分光系统正交偏振方法(未调制)测试曲线; d: AOTF 分光系统无正交偏振片(未调制)测试曲线

Fig. 8 Comparison of water spectrum measured by

AOTF optical systems and FT-IR

curve a: FT-IR; curve b: AOTF optical system with the modulation method; curve c: AOTF optical system with the orthogonal polarizing method (without modulation method); curve d: AOTF optical system without any improvement methods

测量近红外区域水的特征吸收峰的谱图具有重要意义。图 8 通过水的测量谱图对几种 AOTF 分光系统光学特性改进效果与傅里叶变换红外光谱仪的测量效果进行了对比。通过比较可知,正交双偏振法和光电结合的调制解调方法所测得的水的吸收峰与傅里叶变换红外光谱仪测得的水的吸收峰基本一致。通过图 8 曲线 b, c 与 d 比较可知,两种改进方法均能够有效地提高 AOTF 分光系统的光谱分辨力。另外,对采用调制方法的 AOTF 分光系统的稳定性进行测试,间隔时间为 5 min 的测量重复性误差一般在 0.02% 左右。经过精心稳定调整的 AOTF 实验证实,AOTF 分光系统的稳定性在该波段比傅里叶变换红外光谱仪测试的结果要好。

5 结 论

1) 对 AOTF 的主要光学特性进行了实验研究。结果表明,在近红外区域 AOTF 分光特性的实测结果与理论分析结果基本一致,测试结果对 AOTF 的应用具有参考意义。

2) 研究中实现了同一测量光路对不同波长衍射效率的测量。在白光聚光的光路布局下,衍射效率约为 40% 左右,AOTF 设计的中心波长衍射效率较高。

3) 正交双偏振方法可以有效地消除零级光的

影响,提高衍射光谱分离纯度,但该方法将降低光能的利用率。

4) 光电结合的调制解调方法在不降低光能利用率的情况下,有效地消除了零级光的影响,提高了 AOTF 分光系统的光谱分辨力和光谱信噪比,同时可以简化光路结构,降低成本。

参 考 文 献

- 1 Attila Barócsi, László Jakab, Péter Richter *et al.*. Investigation of acousto-optic tunable filter parameters for fast spectrometer application [J]. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(10):2569~2573
- 2 I. C. Chang. Noncollinear acousto-optic filter with large angular aperture [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **25**(7): 370~372
- 3 T. Yano, A. Watanabe. Acoustooptic TeO₂ tunable filter using far-off-axis anisotropic Bragg diffraction [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(9):2250~2258
- 4 Ewa G. Bucher, J. W. Carnahan. Characterization of an acousto-optic tunable filter and use in visible spectrophotometry [J]. *Appl. Spectroscopy*, 1999, **53**(5):603~611
- 5 Li Yinzhu, Li Zuo, Yang Rui *et al.*. Development of the multichannel acousto-optic modulator [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(9): 809~813 (in Chinese)
- 6 Huang Gengchen, Fang Lihua, Chen Jintai *et al.*. Collinear-beam acoustic optical tunable filter [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(12):1100~1102 (in Chinese)