

文章编号: 0258-7025(2004)03-0269-04

一种基于集成光学声光可调谐滤波器的 近红外光谱仪

肖立峰¹, 胡鸿璋¹, 张梅¹, 耿凡²

(¹ 天津大学理学院应用物理系, 天津 300072; ² 航天机电总公司八三五八研究所, 天津 300192)

摘要 研制成功一种基于集成光学声光可调谐滤波器(IAOTF)的新型近红外光谱仪。从理论上分析了这种光谱仪的特征方程及分辨率,然后用三个中心波长不同的增益开关分布反馈激光器(DFB)的耦合光源进行了发射光谱的实验测量,最后通过傅里叶逆卷积的方法进行了光谱数据的恢复工作,从而进一步将该光谱仪的分辨本领提高到0.6 nm。

关键词 光电子学;集成光学声光可调谐滤波器;近红外光谱仪;傅里叶逆卷积

中图分类号 TN 214 文献标识码 A

A Near-Infrared Spectrometer Based on an Integrated Optical AOTF

XIAO Li-feng¹, HU Hong-zhang¹, ZHANG Mei¹, GENG Fan²

¹Department of Applied Physics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

²China Spaceflight Industry Corporation, Head Office 8358th Institute, Tianjin 300192, China

Abstract A near-infrared spectrometer based on an integrated optical acousto-optic tunable filter (IAOTF) is constructed. In this paper, the characteristic equation and resolution of this kind of spectrometer is first theoretically analyzed, and then the coupling light of three distributed feedback (DFB) lasers centered at different wavelengths, is used as the light source and the emitting spectrum is achieved. At last, data recovery is done with Fourier deconvolution method to improve the resolution of the spectrometer to 0.6 nm.

Key words optoelectronics; integrated optical acousto-optical tunable filter (IAOTF); near-infrared spectrometer; Fourier deconvolution

1 引言

作为传统光谱仪的更新换代产品,以声光可调谐滤波器(AOTF)作为分光元件的光谱仪^[1~3]引起人们的普遍关注。声光可调谐滤波器是利用声光衍射原理制成的分光器件,初期大多采用体器件的结构。我们在体器件的基础上,采用集成光学工艺,制成集成光学声光可调谐滤波器(IAOTF)^[4]。同体声光可调谐滤波器器件相比,集成光学声光可调谐滤波器的结构更加紧凑,体积更加小巧,衍射效率可接近100%,带宽下降到几纳米(体声光可调谐滤波器通常为数十个纳米),并大大降低了所需的射频

(RF)驱动功率(大约几十毫瓦,而体声光可调谐滤波器通常接近1 W)。在此基础上,研制成一种基于集成光学声光可调谐滤波器的近红外光谱仪。它是一种全固态装置,没有任何机械传动和调节机构,同传统的光谱仪相比,这种光谱仪具有很多优点,例如:光谱扫描速度快、重复测量容易,测量精度高等。由于采用了集成光学器件,入射光可通过尾纤进行耦合,而不必采用任何形式的狭缝,也不存在衍射效应,因此大大降低了器件的光损耗。另外,这种光谱仪还具有稳定性强、调谐范围宽、无二级光谱以及易于与计算机连接进行扫描控制等优点。

收稿日期:2003-03-24;收到修改稿日期:2003-06-13

基金项目:国家自然科学基金(编号:10084001)资助项目。

作者简介:肖立峰(1979—),男,山东莱阳人,天津大学理学院应用物理系硕士研究生,现主要从事集成光电子学研究。

E-mail: lfsh@tjpu.edu.cn

万方数据

2 理论分析

2.1 单级集成光学声光可调谐滤波器光谱仪的透过率及特征方程

单级共线型集成光学声光可调谐滤波器的结构如图 1 所示。当一束 TM 模的光波入射到集成光学声光可调谐滤波器的光波导中时,在声波作用下,会耦合出 TE 模光波。在集成光学声光可调谐滤波器的出射端有一个 TE 通偏振器,因此,透过率可以表达为^[5]

$$\rho = \frac{\sin^2 \left[\kappa L \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta\beta}{2\kappa} \right)^2} \right]}{1 + \left(\frac{\Delta\beta}{2\kappa} \right)^2} \quad (1)$$

式中 κ 为声光耦合系数, L 为声光相互作用长度, $\Delta\beta$ 由下式给出

$$\Delta\beta = 2\pi \left(\frac{\Delta n}{\lambda} - \frac{f_a}{v_a} \right) \quad (2)$$

式中 $\Delta n = |n_{TM} - n_{TE}|$, 这里 n_{TM} 和 n_{TE} 分别是 TM 模和 TE 模的有效折射率, f_a 和 v_a 为声波的频率和相速。适当调整声波强度,使得 $\kappa L = \pi/2$, 在满足位相匹配条件,即 $\Delta\beta = 0$ 时, $\rho = 1$, 达到最大值,此时,透射的峰值波长满足

$$\lambda = \Delta n \cdot v_a / f_a \quad (3)$$

如果波长偏离位相匹配条件, ρ 下降,从而达到滤波的目的。当入射光是一系列具有不同波长的单色光波,例如波分复用器(WDM)网络中各信道的波长,那么随着声频的扫频,会出现一系列分离的光波峰值。根据这些峰值所对应的声频,可按(3)式求出相应的光波波长或频率,而且这些信道的信号强度与透过集成光学声光可调谐滤波器的相应光波的强度成正比。

如果入射光是连续光谱 $L(\lambda)$, 则透过光强随声

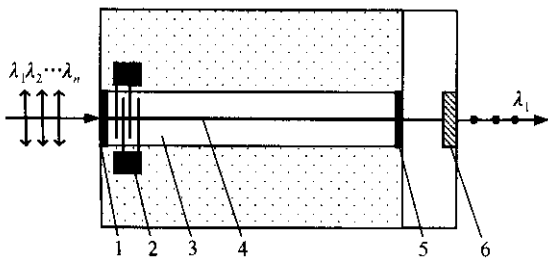


图 1 共线型集成光学声光可调谐滤波器的基本结构图

1, 5: 声吸收带; 2: 叉指换能器; 3: 声波导;
4: 光波导; 6: TE 通偏振器

Fig. 1 Basic structure diagram of collinear IAOTF

1, 5: acoustical absorbers; 2: interdigital transducer; 3: acoustical waveguide; 4: optical waveguide; 6: TE pass polarizer

频的变化 $T(f_a)$ 是 $L(f_a)$ 和由(1)式所表示的点扩散函数的卷积,这里, $L(f_a)$ 是将(3)式代入 $L(\lambda)$ 所得到的函数。亦即

$$T(f_a) = \int_{-\infty}^{+\infty} L(f_{a0}) \cdot \rho(f_a - f_{a0}) df_{a0} = L(f_a) * \rho(f_a) \quad (4)$$

因此, $L(f_a)$ 可以从测得的 $T(f_a)$ 和点扩散函数 $\rho(f_a)$ 的逆卷积得到。

2.2 分辨本领

分辨本领是衡量光谱仪器性能优劣的重要参数。从(1)式不难得出该仪器的半极大值带宽为

$$\Delta\lambda_{1/2} = \frac{0.80\lambda^2}{|\Delta n|L} \quad (5)$$

将(3)式代入(5)式,即可得到分辨本领

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda_{1/2}} = 1.25N \quad (6)$$

式中 $N = L/\Lambda$ ($\Lambda = v_a/f_a$, 为声波的波长) 是声光相互作用区 L 所包含声波的周期数,可见, L 越长,所包含的声波周期数越多,光谱仪的分辨率就越高。

3 实验测量

根据以上理论,制作了光谱仪的核心元器件集成光学声光可调谐滤波器,并利用输出波长为 $1.523 \mu\text{m}$ 的氦氖激光器对它的性能进行了测试,在有效声光作用长度 16 mm , 射频驱动功率 35 mW , 声波频率 177.8 MHz 时,获得了模式转换效率大于 99.3% , 插入损耗小于 -4 dB , 3 dB 带宽 1.6 nm , 一级侧瓣抑制达到 -9 dB 的测量结果,其点扩散函数曲线如图 2 所示。由于叉指换能器(IDT)的带宽为 16 MHz , 按照每 1 MHz 声频对应 8.7 nm 的光波波长偏移计算,该集成光学声光可调谐滤波器光谱仪可以达到的调谐范围为 140 nm 。

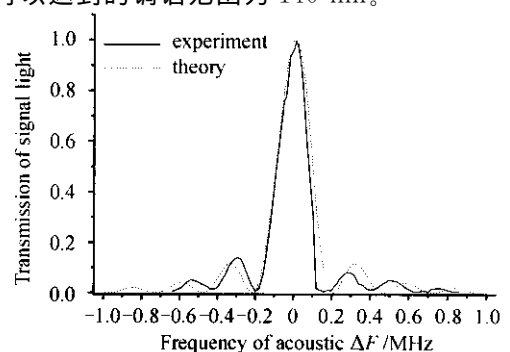


图 2 集成光学声光可调谐滤波器的点扩散函数曲线

Fig. 2 Spectral point spread function of the IAOTF

光谱测量的实验装置如图 3 所示,用 3×1 耦合器将三个中心波长分别为 1527, 1529 和 1574 nm 的

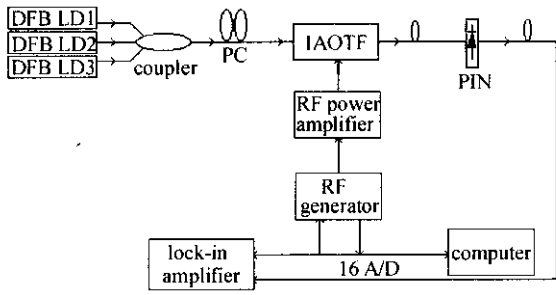


图 3 集成光学声光可调谐滤波器光谱测量的实验装置图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup for IAOTF spectrometer

增益开关分布反馈激光器 (DFB) 耦合成一束出射光,并经偏振控制器 (PC) 校准成 TM 偏振态,入射到集成光学声光可调谐滤波器光谱仪中。通过扫描信号发生器 (RF) 频率,并调节输出信号功率,进行光谱测量。输出光波用 PIN 探测器接收,再经锁相放大器,16 位模/数转换接口与计算机连接,进行采样和存储,测量结果如图 4(a) 所示。从该图可以测出测量光谱的 3 dB 带宽为 1.83 nm,比理想情况的 1.6 nm 的带宽有所展宽,因此比较接近的 1527 nm 和 1529 nm 处谱线分开得不够理想,原因有两个,第一是由于实验条件的限制,对环境温度的控制不够理想,温度的漂移使声光可调谐滤波器的带宽增大;第二是射频信号的不稳定,光纤布局的抖动也可能导致声光可调谐滤波器的带宽增大。

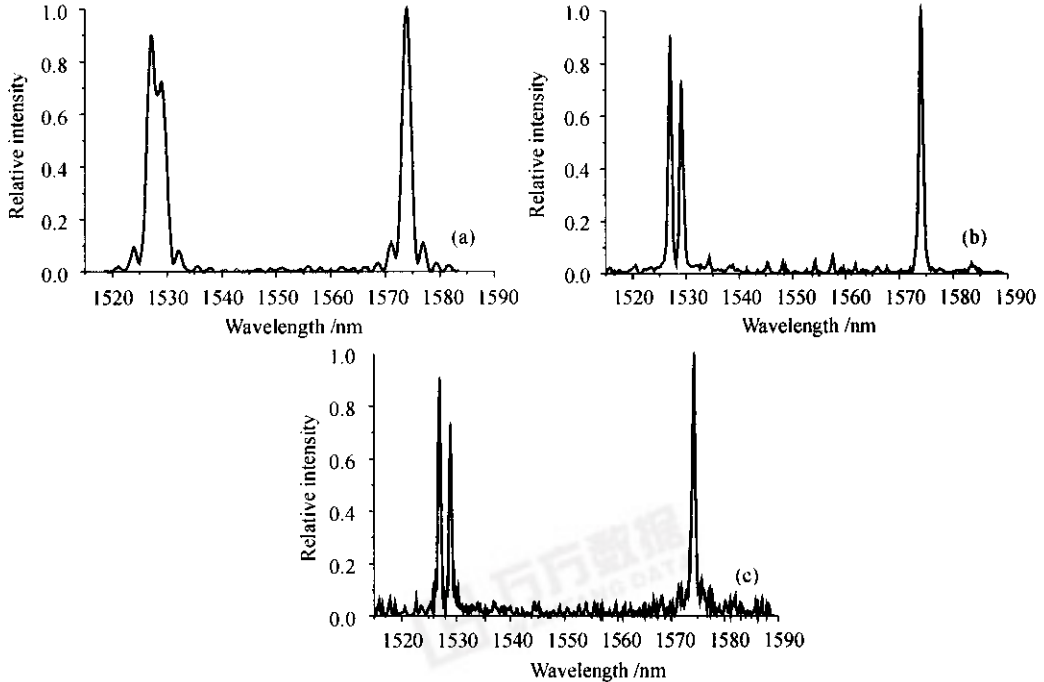


图 4 (a) 集成光学声光可调谐滤波器光谱仪所测量的增益开关分布反馈激光器发射光谱;(b) 光栅光谱仪所测量的增益开关分布反馈激光器发射光谱;(c) 经傅里叶自卷积处理后的光谱

Fig. 4 (a) DFBs emitting spectrum measured by IAOTF spectrometer; (b) DFBs emitting spectrum measured by grating spectrometer; (c) Fourier deconvolved emitting IAOTF spectrum of DFBs

另外用测量范围 800~2500 nm, 3 dB 带宽 0.8 nm 的光栅光谱仪对增益开关分布反馈激光器的出射光进行了测量,测量结果如图 4(b) 所示。从该图可以测出用光栅光谱仪所测量光谱的 3 dB 带宽为 0.83 nm,测量效果比较理想。通过图 4(a), (b) 的对比可以看出集成光学声光可调谐滤波器光谱仪在分辨本领上与光栅光谱仪有一定差距,因此为了进

一步提高集成光学声光可调谐滤波器的性能,研制了一种新型的准共线声光耦合集成光学声光可调谐滤波器^[6]作为分光元件,如图 5 所示。这种新型准共线集成光学声光可调谐滤波器采用了 TE/TM 模分离器,克服了原器件依赖于偏振的不足之处,进一步降低了入射光的耦合损耗;并且采用了 $\text{SiO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 薄膜声波导,只要适当调整声波导和光波导

的夹角 θ , 就可以既使侧瓣得到抑制, 又不会使主瓣宽度明显增加。因此即使在准共线耦合的情形下, 只要选择合适的 θ 角, 公式(5)和(6)仍然近似成立。在声光相互作用长度 $L = 25 \text{ mm}$, $\theta = 0.42^\circ$ 时, 在中心频率 174 MHz 附近获得了带宽 1.44 nm, 一级侧瓣 -13.2 dB , 模式转换效率大于 99% 的测试结果。

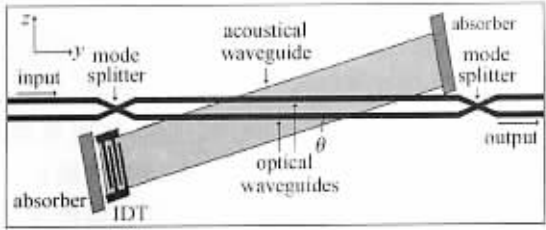


图5 准共线型集成光学声光可调谐滤波器的基本结构图

Fig. 5 Basic structure diagram of quasi-collinear IAOTF

4 讨 论

实验中采用的共线型声光可调谐滤波器虽然已经能够满足目前的要求, 但是为了进一步提高器件性能还可以采取下列方法。

如前所述, 实际测量的光谱 $m(\lambda)$ 是真实光谱 $r(\lambda)$ 与声光可调谐滤波器的点扩散函数 $\rho(\lambda)$ 的卷积, 即

$$m(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} r(\lambda)\rho(\lambda - \lambda_0) d\lambda_0 = r(\lambda) * \rho(\lambda) \quad (7)$$

由于 $\lambda \leq 0$ 不具有物理意义, 所以对(7)式规定, 当 $\lambda \leq 0$ 时, $r(\lambda) = 0$ 。令 $M(f)$, $R(f)$ 和 $P(f)$ 分别表示 $m(\lambda)$, $r(\lambda)$ 和 $\rho(\lambda)$ 的傅里叶变换, 即

$$M(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} m(\lambda) \exp(-i2\pi f\lambda) d\lambda \quad (8)$$

$$R(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} r(\lambda) \exp(-i2\pi f\lambda) d\lambda \quad (9)$$

$$P(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\lambda) \exp(-i2\pi f\lambda) d\lambda \quad (10)$$

则由卷积定理^[7]可知

$$M(f) = R(f) \times P(f) \quad (11)$$

对(11)式进行变形, 得到

$$R(f) = \frac{M(f)}{P(f)} \quad (12)$$

由此再利用傅里叶逆变换, 就可比较准确地再现输入光谱分布。图 4(c) 给出了进行数据恢复之后的光谱。可以清楚地看到, 光谱的带宽变为 0.6 nm; 原来重叠在一起的谱线现在可以明显地分辨开, 得到了比光栅光谱仪更为理想的效果。

另外, 采用级联结构^[8,9], 同时增加声光相互作用长度, 可以使谱线的 3 dB 带宽下降到 0.8 nm 以下。这样, 除了一般的谱线测量之外, 还可用它来进行波分复用器网络中各信道的频谱分析。

采用宽带设计的叉指换能器可以进一步拓宽集成光学声光可调谐滤波器光谱仪的光谱测量调谐范围, 还可以在同一个基片上制作几个调谐范围不同的集成光学声光可调谐滤波器, 制成可以测量从紫外到中红外较大光谱范围的光谱仪, 扩大它的应用范围。

5 结 论

本文所讨论的这种基于集成光学声光可调谐滤波器的近红外光谱仪比以光栅和体声光可调谐滤波器作为分光元件的光谱仪在性能方面有了很大的改善, 而且它所具有的全固态、小巧紧凑、无任何机械传动和调节机构以及光谱扫描速度快、光能量利用率高、高等突出的优点使得它非常适用于网络中各信道的频谱分析。

参 考 文 献

- 1 M. Hühne, U. Eschenauer, H. W. Siesler. Performance and selected applications of an acousto-optic tunable filter near-infrared spectrometer [J]. *Applied Spectroscopy*, 1995, **49**(2): 177~180
- 2 A. Norman Mortensen, Stephen A. Dyer, Robert M. Hammaker *et al.*. A hadamard-multiplexed spectrometer based on an acousto-optic tunable filter [J]. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 1996, **45**(2): 394~398
- 3 David P. Baldwin, Daniel S. Zamzow, Arthur P. D' Silva. High-resolution spectroscopy using an acousto-optic tunable filter and a fiber-optic Fabry-Perot interferometer [J]. *Applied Spectroscopy*, 1996, **50**(4): 498~503
- 4 Xue Ting, Qi Fang, Hu Hongzhang *et al.*. Development of integrated optical acoustooptic tunable wavelength filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(8): 1095~1099
薛挺, 祁芳, 胡鸿璋等. 集成光学声光可调谐波长滤波器的研制[J]. *光学学报*, 2000, **20**(8): 1095~1099
- 5 Hu Hongzhang, Ling Shide. Principle of Applied Optics [M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, 1993
胡鸿璋, 凌世德. *应用光学原理*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993
- 6 H. Z. Hu, H. Y. Lin, J. S. Yang *et al.*. An integrated quasi-collinear coupled acoustooptical mode converter [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **208**(1~3): 79~83
- 7 E. O. Brigham. The Fast Fourier Transform [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishing House, 1979
E. O. 布朗汉姆. *快速傅里叶变换*[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979
- 8 D. A. Smith, J. J. Johnson, B. L. Heffner *et al.*. Two-stage integrated-optic acoustically tunable optical filter with enhanced sidelobe suppression [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(6): 398~399
- 9 F. Tian, Ch. Harizi, H. Herrmann *et al.*. Polarization-independent integrated optical, acoustically tunable double-stage wavelength filter in LiNbO₃ [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(7): 1192~1197