

文章编号: 0253-2239(2004)02-195-4

集成光学声光可调谐光谱仪的特性分析

胡鸿璋 张梅 肖立峰

(天津大学理学院应用物理系, 天津 300072)

摘要: 提出了一种以集成光学声光可调谐滤波器作为分光元件的新型光谱仪,并详细介绍了这种光谱仪的具体特性。通过对这种光谱仪的特征方程、点扩展函数以及色散本领的详细分析,指出该光谱仪的分辨本领与器件的声光作用长度成正比,也与它的级联级数的平方根成正比。因此增加器件的声光作用长度比增加它的级联级数能更有效地提高光谱分辨率。另外还指出,准共线声光耦合是抑制侧瓣、提高分辨本领的有效途径。测试表明,当声光相互作用长度 $L=25$ mm,声波导和光波导的夹角 $\theta=0.42^\circ$ 时,在中心频率 174 MHz 附近可获得带宽 1.44 nm,一级侧瓣 -13.2 dB,模式转换效率大于 99% 的结果。

关键词: 集成光学; 声光可调谐滤波器; 光谱仪; 声光耦合

中图分类号: O433 文献标识码: A

The Characteristics Analysis of an Integrated Optical Acousto-optic Tunable Filter Based on Spectrometer

Hu Hongzhang Zhang Mei Xiao Lifeng

(Department of Applied Physics, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 11 November 2002; revised 23 December 2002)

Abstract: An integrated optical acousto-optic tunable filter (AOTF)-based new type spectrometer is brought forward, and its characteristics are introduced in detail. Through analysis of the transmission functions, point spread function and dispersion power of the spectrometer detailedly, it is pointed out that the spectral resolution is proportional to acousto-optic interaction length L , and the square root of the number of stages. So the resolution can be enhanced more effectively by increasing acousto-optic interaction length L than increasing the number of stages. In addition, it is proposed that quasi-collinear acousto-optic coupling is a effective way to suppress sidelopes and improve the resolution of AOTF spectrometer. The testing the quasi-collinear device shows that as the acousto-optical coupling length is 25 mm and the angle between acoustical and optical waveguid is 0.42° , it is obtained that the measured FWHM is 1.44 nm when the acoustic frequency is about 174 MHz, the measured sidelobes level is -13.2 dB and the mode-conversion efficiency of 99%.

Key words: integrated optics; acousto-optic tunable filter (AOTF); spectrometer; acousto-optic coupling

1 引言

近年来,以声光可调谐滤波器(AOTF)作为分光元件的新型光谱仪^[1,2]开始引起人们的关注。这种光谱仪没有任何机械传动装置,因此光谱重复性

好,可靠性高。它的核心分光元件声光可调谐滤波器在研制初期大多采用体器件的结构,近年来出现的集成光学声光可调谐滤波器^[3]可以将许多器件集成在一个基片上,结构更加紧凑、小巧。它利用限制在声波导中的声表面波(SAW),提高了声光相互作用效率,大大减小了驱动功率,从典型值 >1 W 降到 mW 量级(最低 8 mW);另外,集成光学声光可调谐滤波器还为多通道(如 100 路)光学集成提供了可

E-mail: zhangmlibra@sohu.com

收稿日期:2002-11-11;收到修改稿日期:2002-12-23

能,同时减小了光路的复杂性。它特别适用于对器件尺寸和驱动功率要求更加苛刻的环境中,例如遥感测量、野外测量和外科手术中输血时的血样分析。另外,由于光谱仪输入端接有尾纤,因此还可以直接接入光纤通信系统进行波分复用的信道分析。

本文从理论上详细介绍了以集成光学声光可调谐滤波器作为分光元件的光谱仪的特性,包括它的特征方程、点扩展函数、色散本领、光谱分辨本领和侧瓣抑制等多个方面。这种光谱仪的分辨本领与声光作用长度成正比,也与级数的平方根成正比,因此增加声光作用长度比增加级数能更有效地提高光谱分辨率。本文还指出,准共线声光耦合是抑制侧瓣、提高分辨本领的有效途径。有关这种光谱仪的研制正在进行中。

2 基于集成光学声光可调谐滤波器的光谱仪的特征方程及点扩展函数

共线型集成光学声光可调谐滤波器光谱仪的结构如图 1 所示。当一束 TM 模的光波入射到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。根据声光耦合理论^[4],单级声光可调谐滤波器光谱仪的透过率 ρ 具有 $\text{sinc}^2 x$ 函数的形

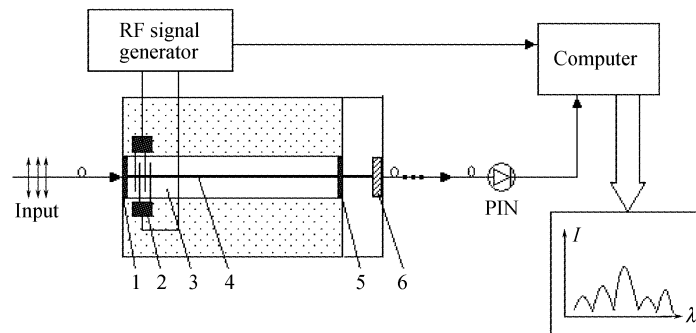


Fig. 1 The basic structure of integrated collinear AOTF spectrometer. 1,5: Acoustical absorbers; 2: Interdigital transducer; 3: Acoustical waveguide; 4: Optical waveguide; 6: TE pass polarizer

(1)式给出了当单色光(λ 一定)入射时,透过率随声频 f_a 的变化。因此,它就代表了声光可调谐滤波器的点扩展函数。我们引入关系式:

$$\kappa L = \frac{\alpha}{2} \pi. \quad (4)$$

从实际应用的角度考虑,将 α 限制在 $1 \geq \alpha > 0$ 的范围内,代入(1)式得到

$$\rho = \frac{\sin^2[(\alpha\pi/2) \sqrt{1 + (\Delta\beta/2\kappa)^2}]}{1 + (\Delta\beta/2\kappa)^2}, \quad (5)$$

当 $\Delta\beta = 0$ 时, ρ 有极大值 $\sin^2(\alpha\pi/2)$ 。当 $\alpha = 1$ 时, ρ (即转换效率) 达到极大值 100%。如果偏离相位匹

式,即

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

式中 κ 是声光耦合常量, L 是声光作用长度,相位失配因子 $\Delta\beta$ 由下式给出:

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

式中 $\Delta n = |n_{\text{TM}} - n_{\text{TE}}|$, 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 分别是声波的频率和相速, λ 是光波波长。

当满足相位匹配条件($\Delta\beta = 0$)时, ρ 有极大值。因此当声频为 f_a 时,透过光谱仪的波长的峰值 λ 由下式给出:

$$\Delta n/\lambda = f_a/v_a = 0, \quad (3a)$$

或者

$$\nu = \frac{f_a \cdot c}{v_a \cdot \Delta n}, \quad (3b)$$

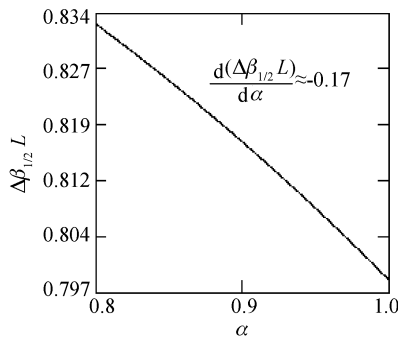
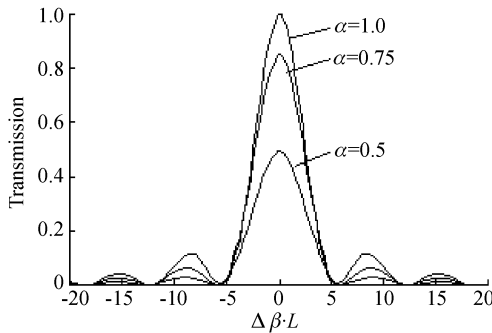
式中 c 是真空中光速, ν 是光波的频率。由式(3b)可见,只要改变声波的频率,就可以将不同频率的光波滤出,起到分光的作用。将声波频率和滤出光强的数据输入到计算机中,就可以得到输入的光谱。(3a)式或(3b)式就是声光可调谐滤波器的特征方程,它与光栅光谱仪中的光栅方程相当。

配条件(即 $\Delta\beta \neq 0$), ρ 会下降。设 $\Delta\beta = \Delta\beta_{1/2}$ 时, ρ 下降到极大值的一半,即 $\frac{1}{2} \sin^2\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)$, 可得

$$\frac{\sin^2[(\alpha\pi/2) \sqrt{1 + (\Delta\beta/2\kappa)^2}]}{1 + (\Delta\beta/2\kappa)^2} = \frac{1}{2} \sin^2\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right), \quad (6)$$

采用迭代算法得到 $\Delta\beta_{1/2}L - \alpha$ 的变化曲线如图 2 所示。可以看出随着 α 从 1 降到 0.8, $\Delta\beta_{1/2}L$ 近似成线性增长。图中曲线的斜率 $d(\Delta\beta_{1/2}L)/d\alpha \approx -0.17$ 。

图 3 给出的是当 α 取不同的值时,点扩展函数随 $\Delta\beta L$ 的变化, $\alpha = 1$ (或 $\kappa L = 2\pi/2$) 时,点扩展函数曲线最锐,此时

Fig. 2 The relationship between $\Delta\beta_{1/2}L$ and α Fig. 3 Point spread function varied with $\Delta\beta L$ for the different α

$$\Delta\beta_{1/2}L = \pm 0.80\pi. \quad (7)$$

可见,集成光学声光可调谐滤波器光谱仪的点扩展函数的半峰全宽(FWHM)随 α 的增加而变窄。引入声光材料的品质因数 M_a 后,耦合常量 κ 和光波波长 λ 的关系可以表示为

$$k = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{I_a}{2}} \sqrt{M_a}, \quad (8)$$

式中 I_a 是声波的强度(通过单位面积的声能流),由(8)式可知,如果 I_a 保持不变, κ 将随波长 λ 向长波方向移动而下降,从而引起 α 减小,半峰全宽变宽。但只要波长相对变化 $\Delta\lambda/\lambda$ 不超过20%,半峰全宽的变化不会很显著。

3 色散本领

色散本领定义为单位光学波长间隔所对应的声频的间隔。从(3a)式不难得到

$$\frac{df_a}{d\lambda} = -\frac{v_a \cdot \Delta n}{\lambda^2}. \quad (9)$$

Δn 近似的等于声光媒质的双折射率,为获得高的色散本领,应选择 v_a 和双折射率高的媒质。 LiNbO_3 晶体是一种高品质的声光媒质,在 $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ 时, $\Delta n = 0.073$,相应声频 $f_a = 174 \text{ MHz}$, $v_a = 3575.34 \text{ m/s}$, $df_a/d\lambda = 0.116 \text{ MHz/nm}$ 。

4 分辨本领

当 $kL = \pi/2$ 时,由(7)式可得到半峰全宽:

$$\Delta\lambda_{1/2} = 0.80\lambda^2 / |\Delta n|L. \quad (10)$$

如果同时入射的两条谱线强度相等,而且间隔等于 $\Delta\lambda_{1/2}$ 的1.1倍,这时一条谱线的极大值近似落在另一条谱线的第一个极小值上。如果将这样的两条谱线看作刚好能分辨,则分辨本领可以表示为

$$R = 1.1 \frac{\lambda}{\Delta\lambda_{1/2}} = \frac{|\Delta n|L}{0.88\lambda}. \quad (11a)$$

将(3a)式代入上式得到

$$R = 1.14(L/\Lambda), \quad (11b)$$

$$\text{或者} \quad R = 1.14\tau \cdot f_a, \quad (11c)$$

式中 Λ 是声波波长, $\tau = L/v_a$ 是声表面波传播声光相互作用距离 L 所需要的时间。这表示,光谱仪的分辨本领与 L 内所包含的声波周期数成正比,这与光栅的第一级光谱的分辨本领 $R = N$ (N 是光栅周期数)类似。如果近似地认为 Δn 等于双折射率,而且不随波长改变,那么,声光作用区越长、双折射率越大,分辨本领越高;而且在短波一侧的分辨本领要高于长波一侧。

5 侧瓣抑制

从图3可以看出共线型集成光学声光可调谐滤波器的点扩展函数的侧瓣较高,约为-9 dB,这严重地限制了光谱仪分辨本领的提高。为了抑制侧瓣,可以采用不同的方法。例如:1)双折射切趾,即通过改变沿光波导的双折射率的分布来实现^[5];2)权重耦合切趾^[6,7],即通过改变沿光波导的耦合强度的分布来实现,但它们的工艺都很复杂。最近,我们成功地研制成准共线声光可调谐滤波器^[8],它是声光可调谐滤波器光谱仪的核心元件。与共线形式的声光可调谐滤波器相比,它的优点是可以有效地抑制侧瓣。图4给出了准共线型声光可调谐滤波器的结构示意图,它由两个模分离器和两条沿Y轴平行的光波导组成。声波导采用 $\text{SiO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 薄膜制成,并且与光波导存在一个微小的夹角 θ 。

对于X切Y传声表面波,沿晶体X方向的振幅分布占主导地位,因此声波导结构的横向波方程可以近似的表示成

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} - (2\pi f_a)^2 \left[\frac{1}{v_{\text{eff},m}^2} - \frac{1}{v^2(x)} \right] \right\} u_m(x) = 0, \quad (12)$$

式中 $u_m(x)$ 是沿晶体X方向第 m 阶模的横向振幅分布, $v_{\text{eff},m}$ 是它的有效传播速度, $v(x)$ 是沿声波导结

构的速度分布,由下式给出:

$$v(x) = \begin{cases} v_1, & |x| \geq w/2 \\ v_1(1-e), & |x| < w/2 \end{cases} \quad (13)$$

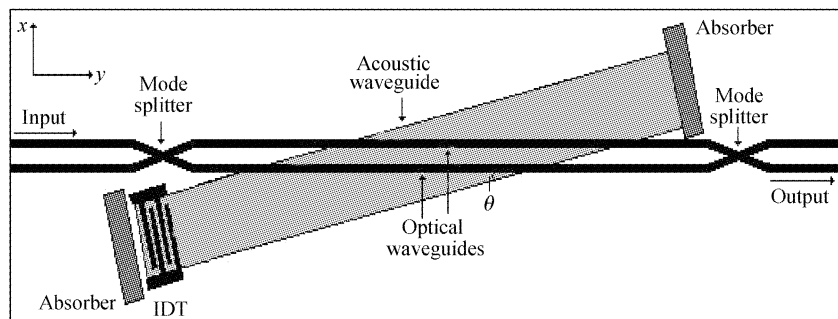


Fig. 4 The structure of the integrated quasi-collinear AOTF chip

由于声波导和光波导之间存在夹角 θ , 因此对于光波导上的点, 如果它沿 Y 轴的坐标为 y , 那么从它到声波导中心的横向距离就是

$$x = y \tan \theta \pm d/2, \quad (14)$$

式中, d 代表两条光波导中心的间距, +、- 分别对应上下两条光波导。这样, 声表面波沿光波导方向的强度就可以表示为

$$U(y) = u_0 y \tan \theta \pm d/. \quad (15)$$

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。在声光相互作用长度 $L = 25 \text{ mm}$, $\theta = 0.42^\circ$ 时, 我们在中心频率 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^[8]。可见, 利用准共线声光耦合是抑制侧瓣、提高光谱分辨本领的一个有效途径。在准共线耦合的情形下, 由于声波导与光波导之间的夹角 θ 非常小, 只有 0.42° , 所以前面关于色散本领和分辨本领的分析仍然近似适用。

6 基于集成光学声光可调谐滤波器的多级光谱仪的特性

当 m 个同样的声光可调谐滤波器级联时, 如果调整到 $\alpha=1$, 则透过率函数可以表示为

$$\rho_m = \eta^{m-1} \rho^m, \quad (16)$$

式中, η 是两级声光可调谐滤波器间的耦合效率, ρ 是单级声光可调谐滤波器的透过率函数。而特征方程仍然由(3)式给出。因此, 色散本领并没有因为级联而升高。为了讨论方便, 令 $\eta = 100\%$, 将(1)式代入(16)式, 当 $m = 2$ 时, 可以得到相应的半峰全宽: $\Delta\lambda_{1/2}^{(2)} = 0.58\Delta\lambda_{1/2}^{(1)}$; 当 $m = 3$ 时, $\Delta\lambda_{1/2}^{(3)} = 0.47\Delta\lambda_{1/2}^{(1)}$,

式中, v_1 是声表面波在 LiNbO_3 基底中的速度, e 是在 LiNbO_3 基底上覆盖了 $\text{SiO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 薄膜之后声表面波速度下降的相对值, w 是声波导的宽度。

这里, $\Delta\lambda_{1/2}$ 表示单级光谱仪的半峰全宽。与单级声光可调谐滤波器光谱仪相比, 两级和三级光谱仪的分辨本领分别提高了 39% 和 70%。因此, 多级声光可调谐滤波器光谱仪的分辨本领近似地与级数的平方根 \sqrt{m} 成正比。前面我们曾提到, 分辨本领还与声光作用长度 L 成正比, 因此, 增加声光相互作用长度比增加级数能更有效地提高分辨本领。

参 考 文 献

- 1 Huhne M, Eschenauer U, Siesler H W. Performance and selected applications of an acousto-optic tunable filter near infrared spectrometer. *Appl. Spectrosc.*, 1995, **49**(2): 177~180
- 2 Mortensen A N, Dyer S A, Hammaker R H *et al.*. A hadamard-multiplexed spectrometer based on an acousto-optic tunable filter. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement.*, 1996, **45**(2):394~398
- 3 Xue Ting, Qi Fang, Hu Hongzhang. Development of integrated optical acoustooptic tunable wavelength filter. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(8):1095~1099 (in Chinese)
- 4 Hu Hongzhang, Ling Shide. *Principle of Applied Optics*. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, 1993
- 5 Chen Jian, Hu Hongzhang, Geng Fan. Electrooptical birefringence apodization of integrated optical acoustooptic tunable filters. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(8):1011~1014 (in Chinese)
- 6 Herrmann H, Reimann V. Integrated optical, TE- and TM-pass, acoustically tunable, double-stage wavelength filters in LiNbO_3 . *Electron. Lett.*, 1992, **28**(7):642~644
- 7 Zhang Shengjia, Geng Fan. Weighted apodization in integrated optical acousto-optic tunable filter. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **29**(5):411~414 (in Chinese)
- 8 Hu H Z, Lin H Y, Yang J S *et al.*. An integrated quasi-collinear coupled acoustooptic mode converter. *Opt. Commun.*, 2002, **208**(1~3):79~83