

两级串联声光可调谐滤波器旁瓣抑制的研究^{*}

杨 薇 刘 迎 肖立峰[†] 高树理

(天津大学理学院物理系, 光电信息技术科学教育部重点实验室 天津 300072)

(2008 年 1 月 15 日收到, 2008 年 6 月 22 日收到修改稿)

阐述了偏振依赖的共线型和偏振无关的准共线型声光可调谐滤波器的滤波原理, 进而导出了两级滤波的转换特性表达式, 通过理论计算说明了两级声光可调谐滤波器能够有效地抑制旁瓣, 最后, 将两个单级的声光可调谐滤波器级联成两级滤波器, 进行了旁瓣抑制的实验. 实验结果表明, 旁瓣被抑制到 -19 dB, 并且 3 dB 带宽也得到一定程度的压窄.

关键词: 集成光学, 声光可调谐滤波器, 旁瓣抑制

PACC: 4282, 4230Q, 4281

1. 引 言

波分复用(WDM)技术是大幅度提高光纤通信系统容量的有效途径. 在 WDM 技术中, 需要波长选择滤波器或波长路由器进行信号的切换. 目前较为典型的滤波器主要有法布里-珀罗滤波器、马赫-曾德尔滤波器、电光滤波器、光纤光栅滤波器和声光可调谐滤波器(AOTF)等. 其中, AOTF 以其调谐速度快, 调谐范围宽, 滤波带宽窄及插入损耗低等优点, 受到越来越多的关注^[1-3].

AOTF 的滤波作用是基于光波导中的 TE 模和 TM 模之间的模式转换实现的. 由于模转换效率与光波波长之间是 $\sin^2$ 的函数关系, 转换特性曲线的旁瓣容易导致信道之间的串扰, 当旁瓣达到一定程度(高度为 -9.7 dB)时, 势必引起 WDM 系统中信道的严重串扰. 因此, 抑制旁瓣(即切趾)是声光可调谐波长滤波器的关键技术之一.

目前抑制旁瓣主要采用的方法有声波加权耦合切趾^[4,5], 双折射率切趾^[6]和多级滤波. 声波加权耦合切趾通过改变声光耦合系数的分布对旁瓣进行抑制, 其主要实现方法有声指向耦合器^[7,8], 声表面波聚焦法^[9], 以及改变声波导宽度^[4]. 双折射率切趾则是通过改变沿光波导方向的双折射率对旁瓣进行抑制, 例如, Truntna 等人^[6]提出的双折射率切趾方案

可以使旁瓣降低至 -30 dB 左右. 上述方法能够有效地降低旁瓣, 但对声波驱动功率要求较高, 同时也增加了滤波带宽.

多级滤波是将多个 AOTF 级联起来进行滤波, 以实现旁瓣的压缩. Herrmann 等人^[10]将两个单级共线型的 AOTF 制作在同一基底上, 研究了双级 AOTF 的滤波特性. 此法在有效降低旁瓣的同时, 还能够对单级滤波中常出现的频移现象进行很好的补偿, 但它对制作工艺的要求甚高, 实现难度大. 本文将一个共线型的和一个准共线型的 AOTF 进行级联, 对其滤波特性进行了理论分析和实验研究. 这种方法既继承了前人所验证了的多级滤波的各种优点, 且制作工艺简单成熟(即为单级 AOTF 的制作技术); 同时, 在器件的使用上具有更高的灵活度, 并且对存在性能差异的各个独立器件有着较强的兼容性.

2. 两级串联 AOTF 滤波特性的理论分析

实验中所使用的两个 AOTF 都是自行研制的, 一个为共线型, 另一个为准共线型. 偏振依赖的共线型 AOTF 结构如图 1 所示. 在图 1 中, 施加在叉指换能器(IDT)上的射频信号激发出平行于光波导传播的声表面波(SAW), SAW 的周期性扰动, 使以偏振态 TE 入射, 且满足位相匹配条件($\Delta\beta = 0$)的光波波长, 完全转化为 TM 模. $\Delta\beta$ 为位失配因子. 根据耦

^{*} 国家自然科学基金(批准号: No. 60478036)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xiaolifeng79@126.com

合模理论^[11], 能量从 TE 模耦合到 TM 模的比率, 即转换效率为

$$T_c = \frac{|\kappa|^2}{s^2} \sin^2(sy) = |\kappa|^2 \frac{\sin^2(y \sqrt{|\kappa|^2 + (\Delta\beta/2)^2})}{|\kappa|^2 + (\Delta\beta/2)^2}, \quad (1)$$

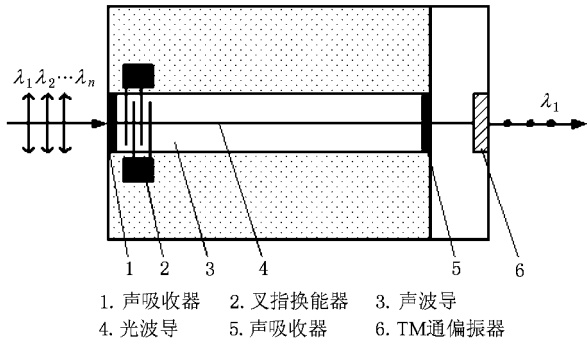


图1 偏振依赖的共线型 AOTF 结构示意图

式中

$$s = \sqrt{|\kappa|^2 + (\Delta\beta/2)^2}, \quad \Delta\beta = |\beta_{TE} - \beta_{TM}| - K_{ac} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n - K_{ac}, \quad (2)$$

当 $\Delta\beta = 0$ 时, 模式转换效率最高, 即

$$T_{max} = \sin^2(|\kappa|y). \quad (3)$$

式中 β_{TE}, β_{TM} 分别为 TE, TM 模的轴向传播常数, Δn 为 TE, TM 模的有效折射率差, 声波波数 $K_{ac} = 2\pi/\Lambda$, Λ 是发生模式转换的声波波长, y 是声光耦合长度, κ 为耦合系数. κ 与声波导材料的品质因数 M 、声波强度 I_a 、光波波长 λ 有如下关系:

$$\kappa^2 = \frac{\pi^2}{2\lambda^2} M I_a, \quad (4)$$

式中 $I_a = P_a/HW$, H, W 分别是瑞利声波截面的深度和宽度.

实验中选用的 AOTF 的声光耦合长度 $y = 16$

mm, $M = 9.58 \times 10^{-15} \text{ kg/m}^3$, $\Lambda = 20.4 \text{ }\mu\text{m}$. 对于瑞利波取 $H = \Lambda, W = 100\Lambda$, 当输入声波功率为 $p_a = 7 \text{ mW}$ 时, 声波强度 $I_a = 1.13 \text{ W/m}^2$. 在上述结构参数下, 根据(3)式得到理论滤波特性曲线的旁瓣高度在 -9.5 dB 左右, 3 dB 带宽为 1.67 nm . 图2是实际测量的滤波特性曲线, 旁瓣高度为 -8 dB 左右, 与理论值比较符合.

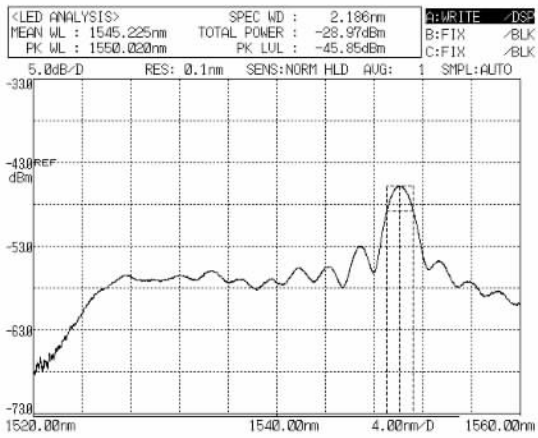


图2 共线型 AOTF 的实验滤波特性曲线

偏振无关准共线型 AOTF 的基本结构如图3所示. 它由两个模分离器(使得此滤波器不再依赖于偏振)和两条沿 Y 轴平行的光波导组成, 光波导与声波导之间存在一个微小的夹角 θ , 且上下两光波导间距为 d . 对于准共线型 AOTF, 耦合系数 κ 应为^[12]

$$\kappa(y) = g_c U(y), \quad (5)$$

式中 g_c 是由峰值转换效率为 100% 决定的比例常数, $U(y)$ 是 SAW 沿光波导的振幅分布函数, 可以通过求解声波导的标量波动方程得到. 结合(1)式, 可得到准共线型 AOTF 的模转换效率 T_{qc} 为

$$T_{qc} = \frac{|\kappa(y)|^2}{s'^2} \sin^2(s'y) = |\kappa(y)|^2 \frac{\sin^2[y \sqrt{|\kappa(y)|^2 + (\Delta\beta'/2)^2}]}{|\kappa(y)|^2 + (\Delta\beta'/2)^2} \quad (6)$$

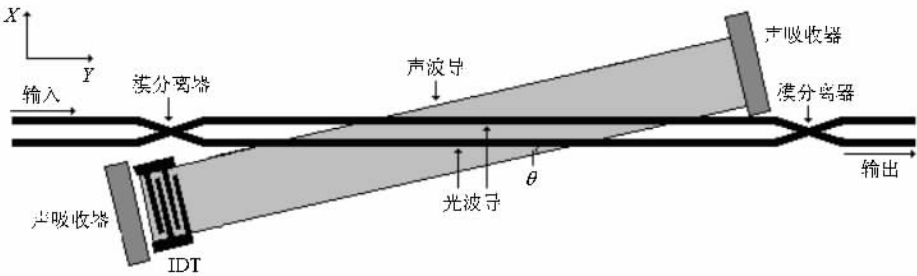


图3 偏振无关的准共线型 AOTF 结构示意图

式中

$$s' = \sqrt{|\kappa(y)|^2 + (\Delta\beta'/2)^2},$$
$$\Delta\beta' = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta n' - K'_{ac}. \tag{7}$$

实验中所选用的 AOTF 的声波导采用 SiO₂/In₂O₃ 表面膜形成(不再是使用周边扩 Ti 的制作方法)因而覆盖了氧化物薄膜后的光波导,有效折射率差发生了变化,

$$\Delta n' = \begin{cases} \Delta n_o, & |x| > w/2, \\ \Delta n_o - \epsilon, & |x| \leq w/2. \end{cases} \tag{8}$$

根据制作光波导时所选用 Ti 扩散的条件参数及 SiO₂/In₂O₃ 薄膜的厚度和折射率,可以算出 $\Delta n_o = 0.073$, $\epsilon = 7 \times 10^{-5}$. K'_{ac} 是声波矢在 Y 轴上的投影,当 θ 很小时, $K_{ac} \approx 2\pi f_{ac}/v_{eff,m}$, 其中 f_{ac} 是声表面波的频率, $v_{eff,m}$ 是声表面波的 m 阶模的有效传播速度. 声光耦合长度为 25 mm, 声波导宽度 $w = 110 \mu\text{m}$, 夹角 $\theta = 0.42^\circ$, 光波导间距 $d = 30 \mu\text{m}$. 在上述结构参数下,根据(6)式得到理论滤波特性曲线的旁瓣高度为 -13.2 dB, 3 dB 带宽为 1.2 nm. 图 4 是实际测量的滤波特性曲线,旁瓣高度达到 -12 dB 的水平,贴近理论值.

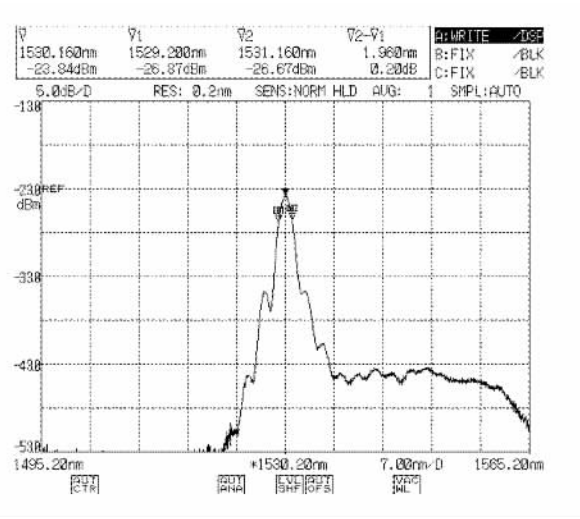


图 4 准共线型 AOTF 的实验滤波特性曲线

对于两级滤波,转换效率则应是两个单级转换效率共同作用的结果^[13]. 一个共线型的和一个准共线型器件进行级联,其模转化效率为二者模转化特性函数的乘积

$$T_{c,qc} = T_{c,Tq}$$
$$= \left[\frac{|\kappa|}{s} \sin(\gamma s) \right]^2 \left[\frac{|\kappa(y)|}{s'} \sin(\gamma s') \right]^2. \tag{9}$$

根据(9)式,得到的理论滤波特性曲线如图 5 中实线

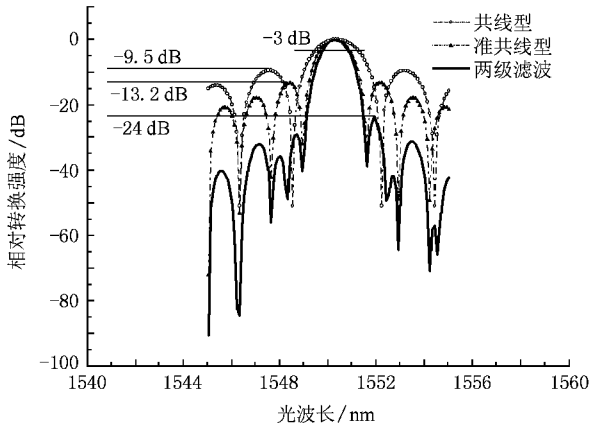


图 5 理论滤波特性曲线比较

所示,它的旁瓣高度到 -24 dB,且 3 dB 带宽也压窄至 1.0 nm. 由图中可以看出,无论是旁瓣抑制还是带宽压窄,两级滤波效果都要优于单级.

3. 实验设计及测定

我们利用一个共线型(AOTF₁)和一个准共线型器件(AOTF₂)进行了两级滤波的实验,装置如图 6 所示. 波长范围为 1523—1563 nm 的宽带光源(型号 AT-BBS-1550A)经起偏器产生偏振光. 由于 AOTF₁ 是依赖于偏振的,所以起偏器的输出光需先通过一个偏振控制器(PC)成为 TM 线偏振光后,再耦入 AOTF₁,经一级滤波后的光再输入 AOTF₂,完成两级滤波. 高频信号发生器(Tektronix, AFG3252)的双路高频信号,分别加载在 AOTF₁ 和 AOTF₂ 上. 光谱仪(YOKOGAWA, AQ6317C)的波长范围为 600—1750 nm,波长精度 0.02 nm.

利用 AOTF₁ 进行一级滤波时,调节射频信号的频率及功率,当滤波效果达最佳时,测得的声波频率为 173.4 MHz,幅值为 650 mV. 而后将 AOTF₂ 与一级滤波装置进行级联. 调节加载在 AOTF₂ 上的射频信号的频率及功率,同时微调加载在 AOTF₁ 上的射频信号,使整体滤波达到最优. 此时,测得加载在 AOTF₂ 上的声波频率为 174.3 MHz,幅值为 2.8 V. 光谱仪输出的两级滤波特性曲线如图 7 所示. 从图中可以看出,旁瓣高 -19 dB 左右,比理论值稍高,3 dB 带宽的压窄效果比较好.

实验的结果证实了两级串联滤波器的滤波特性是两个单级 AOTF 共同作用的结果,这使得旁瓣得

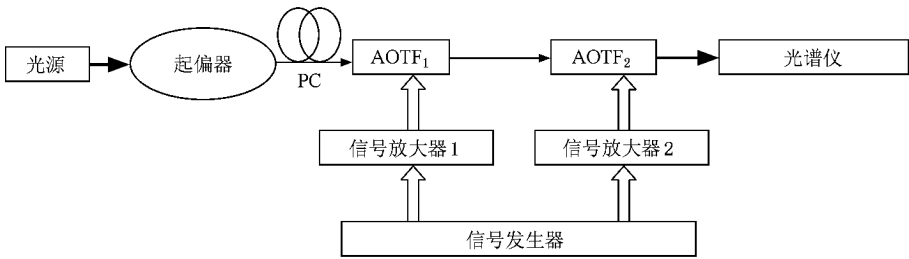


图 6 实验装置

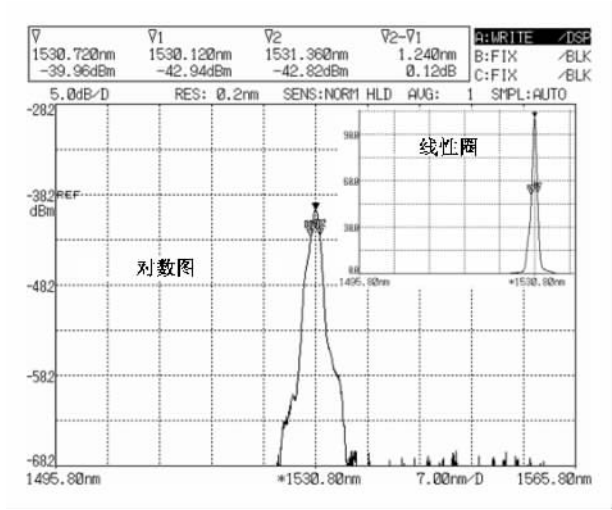


图 7 两级串联的实验滤波特性曲线

到了很好的抑制,并且也压窄了滤波带宽.此外我们还可以看到,即使其中某一支器件(如 AOTF₁)的旁瓣抑制效果并不十分理想(旁瓣高,或模分离比差),但与另一支较好性能的器件(如 AOTF₂)级联后也

会得到较好的结果.

当然,实验测定结果同理论计算值有一定差距,这主要是因为 AOTF 工作时,由于环境温度的变化以及自身声表面波吸收等作用使得器件温度升高,致使器件的模转换效率降低,从而减弱了旁瓣抑制效果.另外我们发现,实验中两支 AOTF 实现最大模转换效率时所施加的射频频率稍有不同,且很难达到完全一致,一方面是因为器件自身温度的变化,引起中心波长漂移,另一方面是由于两器件的波导性能存在一定的差异.

4. 结 论

理论分析表明,与单级 AOTF 相比,级联器件显示了突出的优越性:有效抑制旁瓣的同时也压窄了带宽,这是其他切趾方法(降低了旁瓣却加宽了带宽)所无法比拟的.实验测定的结果也证实了两级滤波不仅有效地降低了旁瓣,同时也压窄了带宽.

[1] Smith D A , Baran J E , Johnson J J , Chenung K W 1990 *J. Sel. Areas Commun.* **8** 1151

[2] Cao H Sun J Q , Zhang X L *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3077 (in Chinese) [曹 辉、孙军强、张新亮等 2004 物理学报 **53** 3077]

[3] Xiao L F , Liu Y , Tian M 2005 *Proc. SPIE* **5644** 452

[4] Yamamoto Y , Tsai C S , Esteghamat K *et al* 1993 *J. Ultrasonics , Ferroelectrics , and Frequency Control* **40** 814

[5] Cui J M , Feng L H , Liu W *et al* 2004 *Optical Fibers and Passive Components* **5279** 186

[6] Aronson L B , Rankin G , Trutna W R , Dolfi D W *et al* 1993 *Opt. Lett.* **18** 1721

[7] Herrmann H , Schafer K , Sohler W 1994 *Photon Technol. Lett.* **6** 1335

[8] Herrmann H , Rust U , Schafer K 1995 *Journal of Lightwave Technology* **13** 364

[9] Kar-Roy A , Tsai C S 1992 *Photon Technol. Lett.* **4** 1132

[10] Herrmann H , Schafer K , Schmidt C 1998 *Photonics Technology Letters* **10** 120

[11] Hu H Z 1993 *Applied Optics Principle* (Beijing : China Machine Press) (in Chinese) [胡鸿璋 1993 应用光学原理(机械工业出版社)]

[12] Hu H Z , Lin H Y , Yang J S *et al* 2002 *Optics Communications* **208** 79

[13] Smith D A , Johnson J J , Heffner B L 1989 *Electronics Letters* **25** 398

Suppression of sidelobe levels using two cascaded single-stage acousto-optic tunable filters^{*}

Yang Wei Liu Ying Xiao Li-Feng[†] Gao Shu-Li

(*College of Science , Key Laboratory of Opt-electronics Information Technical Science ,
EMC , Tianjin University , Tianjin 300072 , China*)

(Received 15 January 2008 ; revised manuscript received 22 June 2008)

Abstract

Transfer function of single-stage acousto-optic tunable filter (AOTF) has sidelobes higher than -9 dB , and this large sidelobes level limits AOTF application. In this paper , the sidelobes of two single-stage AOTF 's , which are polarization-dependent collinear and polarization-independent quasi-collinear respectively , are investigated , and the transfer function of double-stage filter is obtained. The calculations on single- and double-stage AOTF 's have shown that the double-stage device can provide significant improvement in sidelobe suppression. In experiment , two single-stage AOTF 's are cascaded , and filtering property of this double-stage device is measured. The experimental results show that the sidelobes of this cascaded AOTF is suppressed to -19 dB , and the 3 - dB bandwidth is narrowed to some extent.

Keywords : integrated optics , acoustooptical tunable filters , sidelobe suppression

PACC : 4282 , 4230Q , 4281

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60478036).

[†] E-mail : xiaolifeng79@126.com