

文章编号: 0258-7025(2009)10-2734-06

多级级联声光可调谐滤波器旁瓣的抑制

杨薇 刘迎 肖立峰* 杨兆祥

(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)

摘要 单级声光可调谐滤波器(AOTF)存在旁瓣过高的问题(-9 dB左右),这给其应用带来了一定的局限性。研究了用多级滤波结构实现旁瓣抑制,通过对单级和多级 AOTF 滤波特性的理论计算值、实验测量结果的分析比较,说明了多级滤波的优越性。利用耦合模理论分析了单级共线型和单级准共线型 AOTF 的滤波原理,推导出了多级级联滤波的转换特性表达式。计算结果表明,较之单级滤波,多级级联不仅具有较强的旁瓣抑制能力,还具有良好的带宽压窄作用。实验测量了三级滤波,其旁瓣被抑制到-27 dB左右,并且滤波带宽也得到了压窄。该实验结果说明,多级滤波结构在更为有效地抑制旁瓣的同时也能够很好地压窄带宽。

关键词 声光滤波器;可调谐滤波器;集成光学;声光耦合;波分复用

中图分类号 TN713; TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093610.2734

Suppression of Sidelobe Levels for Acousto-Optic Tunable Filters Using Cascaded Single-Stage Acousto-Optic Tunable Filters

Yang Wei Liu Ying Xiao Lifeng* Yang Zhaoxiang

(College of Science, Key Laboratory of Opt-Electronics Information Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract One limitation of the single-stage acousto-optic tunable filter (AOTF) as a bandpass filter is the presence of large sidelobes higher than -9 dB. Multi-stage AOTF for suppressing sidelobes further is studied in this paper. The filter characteristics of single and multi-stage AOTF have been analyzed and compared theoretically and experimentally, and the advantages of multi-stage filters have been demonstrated. First the theory of single-stage collinear and quasi-collinear AOTF were discussed, and then the transfer function of multi-stage filter was obtained. The calculations have shown that multi-stage devices can provide significant improvement not only in sidelobe suppression but also in bandwidth narrowing as compared to single-stage ones. The triple-stage AOTF was measured, and a sidelobe suppression of about -27 dB and a narrower bandwidth were obtained. The experimental results demonstrate multi-stage AOTF is of lower sidelobe and narrower bandwidth.

Key words acoustooptical filters; tunable filters; integrated optics; acoustooptical coupling, wavelength division multiplexing

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。而波长选择滤波器或波长路由器作为 WDM 系统中的关键器件,也得到了飞速发展。波长选择滤波器的类型有声光可调谐滤波器

(Acousto-optic tunable filter, AOTF)、法布里-珀罗型滤波器、电光滤波器和光栅阵列等。其中, AOTF 具有调谐速度快、调谐范围宽、滤波带宽窄、插入损耗低以及具有多态波分复用开关的功能等优点,是其他类型滤波器所无可比拟的,有着极为广

收稿日期: 2008-10-09; 收到修改稿日期: 2008-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(60478036)资助课题。

作者简介: 杨薇(1983—),女,博士研究生,主要从事集成光电子学方面的研究。

E-mail: youngwing0307@yahoo.com.cn

导师简介: 刘迎(1956—),男,博士生导师,教授,主要从事生物医学光子学及集成光电子学等方面的研究。

E-mail: liuying56@163.com

* 通信联系人: E-mail: xiaolifeng79@126.com

泛的应用前景^[1~4]。

AOTF 是一种以声光相互作用原理为基础的新型器件,模式转换器是其重要组成部分,当满足相位匹配条件时,两个互相正交的偏振模(TE 模和 TM 模)之间实现互相转换。但是,由于模转换效率与光波波长之间是 sinc^2 的函数关系,转换特性曲线的旁瓣会导致信道之间的串扰。因此,抑制旁瓣(即切趾)是 AOTF 的一项关键技术。

目前,抑制旁瓣所采用的主要方法有声波加权耦合切趾^[5,6]。双折射率切趾^[7]和多级滤波。AOTF 的转换效率和声光耦合系数有关,声波加权耦合切趾通过改变声光耦合系数对旁瓣进行抑制。通过声指向耦合器^[8]。声表面波聚焦^[9,10]以及改变声波导宽度^[11]等都可以实现权重耦合。双折射率切趾通过改变沿光波导方向的双折射率,即改善双折射的非均匀性对旁瓣进行抑制,例如, L. B. Aronson 等^[7]提出的双折射率切趾案可以使旁瓣降低至 -30 dB 左右。以上方法可以有效地压缩旁瓣,然而代价是增加了带宽和声波驱动功率,影响了器件的整体滤波性能。多级滤波是通过多个单级器件的级联实现的,其特点是级次越高,对旁瓣的压缩能力越强,滤出的带宽越窄。Herrmann 等^[12]对双级 AOTF 的滤波特性进行过相关研究,将两个单级共线型的 AOTF 制作在同一基底上,且每一级均采用了声指向耦合器的结构。该方法能够有效地将旁瓣降低到 -30 dB 左右,但其制作工艺复杂,精度要求高,增加了器件的实现难度;而且,其半峰全宽(FWHM)为 1.6 nm,压窄程度不够。本文对多级滤波进行了理论分析及实验研究。理论分析表明,较之单级滤波,多级级联结构不仅能够十分有效地降低旁瓣,同时也能更为显著地压窄带宽。实验中,将三个相互独立的单级 AOTF 分别接出尾纤并使之直接串联形成三级滤波结构,测得的旁瓣高 -27 dB 左右,并且滤波带宽也得到了压窄。实验结果证明,多级滤波不仅具有较高的旁瓣抑制能力,也有很好的带宽压窄效果,而且这种方法制作工艺(即单级 AOTF 的制作技术)简单成熟,在器件的使用上具有更高的灵活性及兼容性。

2 理论模型及特性分析

2.1 单级滤波

偏振依赖的单级共线型 AOTF 是声光可调谐滤波器中较为简单的一种,其结构包括光波导(Optical waveguide)、声波导(Acoustical waveguide)、叉指换能

器(Inter digital transducer, IDT)、TM 模通偏器(TM-pass polarimeter)(见图 1)。

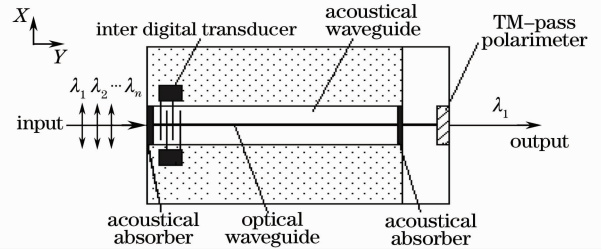


图 1 偏振依赖共线型 AOTF 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of polarization-dependent AOTF using collinear acoustooptical coupling

在 IDT 上施加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 TE 偏振态入射,且满足相位匹配条件的光波,完全转化为 TM 模,通过检偏器后得到所需要波长的光信号,从而达到滤波的目的^[13]。根据耦合模理论^[14],能量从 TE 模耦合到 TM 模的比率,即转换效率为

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

式中

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

其中 κ 为耦合系数, y 是声光耦合长度, $\Delta\beta$ 为相位失配因子, 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, $K_{ac} = 2\pi/\Lambda$ 为声波的传播常数, Λ 是发生模式转换的声波波长。当满足相位匹配条件($|\beta_{TE} - \beta_{TM}| = K_{ac}$)时,模式转换效率最高

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

通过调整 $|\kappa|$ 和 y 的大小,使 $|\kappa|y = \pi/2$ 时转换效率达到极大值。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 有关

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

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

实验中选用的共线型 AOTF 的声光耦合长度 $y = 16$ mm, $M = 9.58 \times 10^{-15}$ kg/m³, $\Lambda = 20.4$ μm。对于瑞利波,取 $H = \Lambda, W = 100 \Lambda$, 当输入声波功率为 $p_a = 7$ mW 时,声波强度 $I_a = 1.13$ W/m²。在

上述结构参数下,由(1)式得到其理论滤波特性曲线(图2中插图所示),旁瓣高度在 -9.5 dB左右,3 dB带宽为 1.67 nm。图2中实验测量滤波特性曲线的旁瓣高度为 -8 dB左右,与理论值比较吻合。

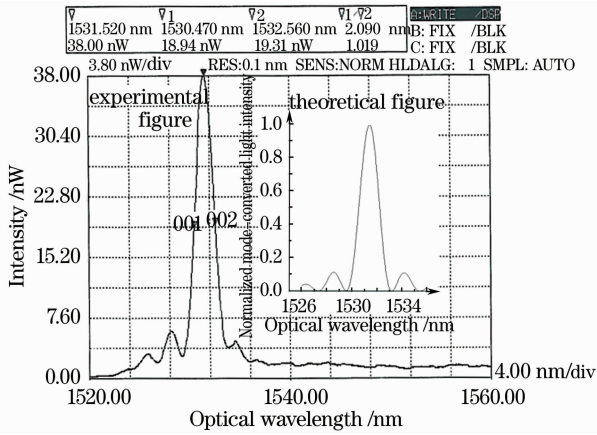


图2 共线型 AOTF 的滤波特性曲线

Fig.2 Filter characteristics of the single-stage collinear AOTF

偏振无关的单级准共线型 AOTF 的基本结构

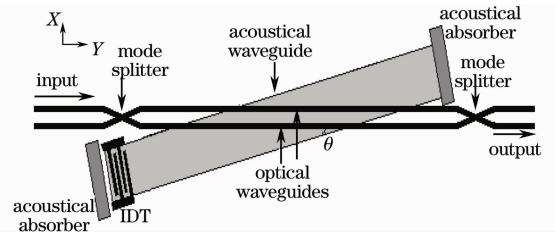


图3 偏振无关的准共线型 AOTF 的基本结构

Fig.3 Architecture of polarization-independent AOTF using quasi-collinear acousto-optical coupling

如图3所示。它由两个模分离器和两条沿 Y 轴平行的钛(Ti)扩散光波导组成,上下两光波导间距为 d 。声波导不再使用周边扩Ti的制作方法,而是采用 $\text{SiO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 薄膜制成,且与光波导之间存在一个微小的夹角 θ 。根据耦合模理论,耦合系数 κ 为^[15]

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

式中 $U(y)$ 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。 g_c 是由峰值转换效率为100%决定的比例常数。结合(1)式,可得到准共线型 AOTF 的模转换效率为

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

式中

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

准共线型 AOTF 的声波导没有使用周边扩Ti的制作方法,而是采用 $\text{SiO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 表面膜形成。因此,当在光波导上覆盖了氧化物薄膜后,TE, TM 模的有效折射率差发生变化,则(2)式中的 Δn 应为

$$\Delta n = \begin{cases} \Delta n_o, & |x| > \frac{w}{2} \\ \Delta n_o - \varepsilon, & |x| \leq \frac{w}{2} \end{cases} \quad (8)$$

根据制作光波导时所选用Ti扩散的条件参数及 $\text{SiO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 薄膜的厚度和折射率,可以算出 $\Delta n_o = 0.073, \varepsilon = 7 \times 10^{-5}$ 。对于准共线型 AOTF, 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。

实验中所选用的准共线型 AOTF 的声光耦合长度为 25 mm,声波导宽度 $w = 110 \mu\text{m}$,夹角 $\theta = 0.42^\circ$,光波导间距 $d = 30 \mu\text{m}$ 。依据上述的条件参数并结合(6)式,便可得到其理论滤波特性曲线(图4中插图所示),旁瓣高度在 -13 dB左右,3 dB

带宽为 1.2 nm。图4中实验测量滤波特性曲线的旁瓣高度达到 -12 dB的水平,贴近理论值。

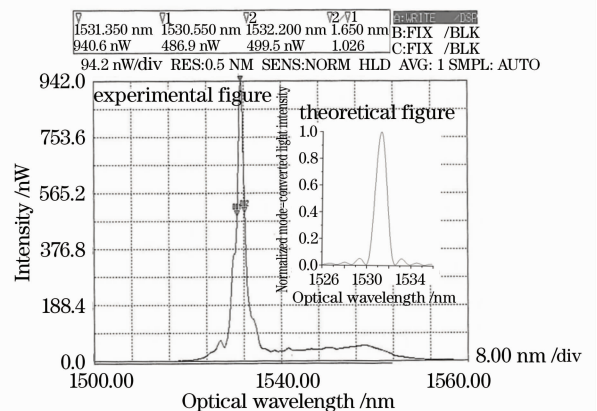


图4 准共线型 AOTF 的滤波特性曲线

Fig.4 Filter characteristics of the single-stage quasi-collinear AOTF

2.2 多级滤波

对于多级滤波,转换效率则应是多个单级转换效率共同作用的结果^[16]。将一个共线型和一个准

共线型的 AOTF 进行级联构成的两级滤波器,其理论旁瓣高度在 -24 dB 左右,3 dB 带宽为 1.0 nm。实验测得旁瓣高 -19 dB,并且 3 dB 带宽也得到一定程度的压窄,如图 5 所示。

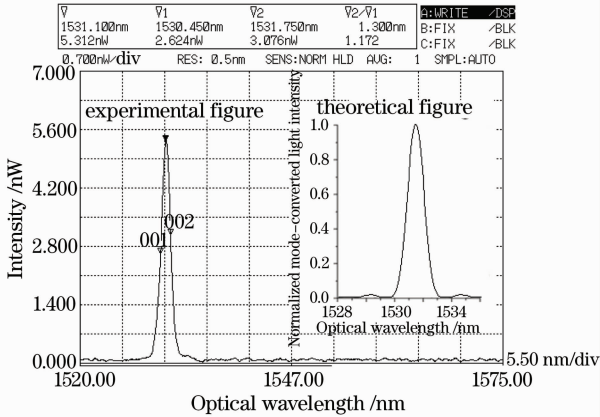


图 5 两级串联的滤波特性曲线

Fig. 5 Filter characteristics of the double-stage AOTF

而由两个共线型与一个准共线型器件进行级联得到的三级滤波结构,其模转换效率则为三者模转换特性函数的乘积

$$T = T_{c_1} T_{c_2} T_{qc}, \quad (9a)$$

其中 T_{c_1}, T_{c_2}, T_{qc} 分别为两个共线型及一个准共线型的单级 AOTF 模转换效率。由于实验中所使用的两个共线型器件的参数规格基本一致,则有

$$T_{c_1} = T_{c_2} = T_c, \quad (9b)$$

因此

$$T = T_c^2 T_{qc} = \left[\frac{|\kappa|}{s} \sin(ys) \right]^4 \left[\frac{|\kappa(y')}{s'} \sin(ys') \right]^2. \quad (10)$$

根据前面相应的参数选择再结合(10)式,得到的三级理论滤波特性曲线如图6中插图所示,旁瓣高度

在 -32 dB 左右,3 dB 带宽在 0.7 nm 以下,比文献 [12]中给出的两级滤波效果要好。

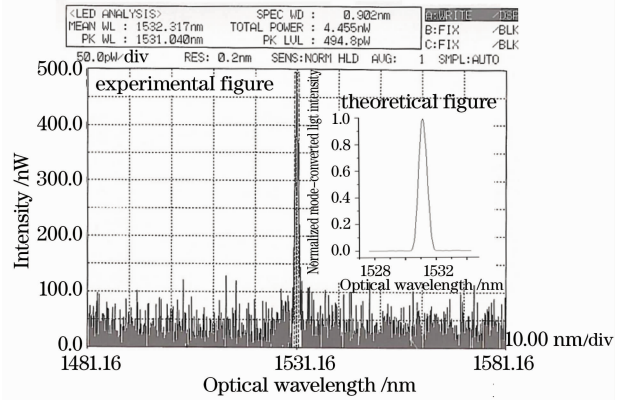


图 6 三级串联的滤波特性曲线

Fig. 6 Filter characteristics of the triple-stage AOTF

3 实验测试及结果

实验测试装置如图 7 所示。采用 AT-BBS-1550A 型宽带光源(波长范围 1523~1563 nm),经起偏器产生平面偏振光,再耦合到偏振控制器 PC_1 ,成为 TM 线偏振光后输入共线型 AOTF₁;经一级滤波后所得到的光再输入到二级滤波装置(PC_2 和 AOTF₂),最后耦合到偏振无关的准共线型 AOTF₃ 完成三级滤波。其中,三支滤波器的主要规格参数见表 1。由于波导性能与钛扩散的工艺条件(如钛条宽度、厚度等)有着密切的关系,因此钛扩散的工艺条件对器件结构参数优化的影响是非常重要的。然而,钛扩散的理论模型及其参数与实际情况必定存在一定的差异,因此在制作器件时,只能选择有限的结构参数,再通过工艺条件的调整来实现器件整体性能的优化。

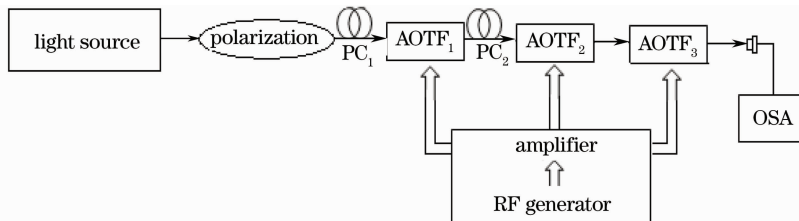


图 7 实验装置图

Fig. 7 Experimental setup for measuring the triple-stage AOTF responses

表 1 滤波器的参数

Table 1 Parameters of the filters

Filter	Type of coupling	Acoustical waveguide width / μm	Acoustical waveguide thickness /nm	Optical waveguide width / μm	Optical waveguide thickness /nm	Interaction length /nm
AOTF _{1,2}	Collinear	140	130	7	60	16
AOTF ₃	Quasi-collinear	110	220	6	100	25

射频信号由 QF-1480(0~300 MHz)和双路输出的 Tektronix AFG-3252(0~240 MHz)高频信号发生器提供,经高频放大器放大后,分别加载在三支器件的 IDT 上。利用 AQ-6317C(工作波长范围 600~1750 nm;波长精度 0.02 nm)光谱仪进行观察与测量。光谱仪输出的三级滤波特性曲线如图 6 所示,旁瓣在 -27 dB 左右,而且 3 dB 带宽的压窄效果也非常好。当三支器件所施加的射频频率分别为 175.1 MHz,175.0 MHz 和 173.3 MHz 时,三级滤波器滤出的峰值波长在 1531 nm 附近,且稳定性很好。实验中三支 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

表 2 理论值及相应实验结果

Table 2 Theoretical estimates and experimental results

Parameters	Single-stage	Single-stage	Double-stage	Triple-stage
	collinear AOTF	quasi-collinear AOTF	AOTF	AOTF
Theoretical value of sidelobe level /dB	-9.5	-13.2	-23.0	-32.0
Theoretical value of FWHM /nm	1.67	1.20	1.00	0.70
Measured value of sidelobe level /dB	-8.0	-12.0	-19.0	-27.0
Measured value of FWHM /nm	2.18	1.75	1.30	0.90

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,环境温度的变化以及自身声表面波吸收等作用可使器件温度升高;直接串联器件所带来的损耗比较大,使得光谱噪声影响相对明显;此外,器件的实际制作参数同理论设计参数存在差异。上述因素均可导致器件整体的模转换效率降低,从而减弱了旁瓣抑制效果。然而实验结果表明,通过多级级联有效地降低了旁瓣,同时滤波带宽也得到了很好的压窄,足以证明多级结构的滤波效果是非常好的。

4 结 论

理论分析表明,AOTF 的多级级联结构能够有效地抑制旁瓣,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。利用已研制出的两支偏振相关的共线型和一支偏振无关的准共线型 AOTF 进行了三级级联的滤波实验,得到的旁瓣高度 -27 dB,且滤波带宽也得到了很好的压窄。

参 考 文 献

1 Xu Ou, Lu Shaohua, Dong Xiaowei *et al.*. Properties analysis for reflection-type filter composed of microring resonator array and Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1443~1448
 许 鸥,鲁韶华,董小伟等.基于微环谐振器阵列与马赫-曾德尔

因为器件自身温度的变化,引起中心波长漂移,另一方面是由于各个器件波导性能存在一定的差异。

为便于比较,将单级和多级情况的理论及相应实验结果总结,如表 2 所示。理论计算和实验测量值均说明,首先在单级滤波中,较之传统共线型 AOTF,准共线型器件由于采用准共线式耦合结构,其光波导与声波导间存在一夹角,这样可使它不仅具有较低的旁瓣,还具有较窄的滤波带宽;相对两级滤波结构,三级滤波的旁瓣抑制及带宽压窄能力都有了不同程度的提高;另外由表 2 数据可明显看出,无论是旁瓣抑制还是带宽压窄,多级滤波的效果要明显优于单级。

干涉仪的反射型滤波器性能分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1443~1448
 2 Cao Xue, Yu Youlong, Liu Shengchun *et al.*. Interrogation techniques for fiber Bragg grating sensor system based on active closed cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1405~1408
 曹 雪,余有龙,刘盛春等.具有有源闭合腔的光纤光栅传感系统地址查询技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1405~1408
 3 Dong Jianji, Zhang Xinliang, Ding Yuan *et al.*. High speed wavelength conversion and format conversion based on semiconductor optical amplifier and optical filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 940~944
 董建绩,张新亮,丁 园等.利用半导体光放大器和滤波器组合实现高速波长转换和码型转换[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 940~944
 4 Hu Bin, Hu Hongzhang, Lin Hangyou. Study on characteristics of tunable fiber laser employing AOTF[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1): 5~8
 胡 斌,胡鸿璋,林航友.利用 AOTF 的可调谐光纤激光器的特性研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 5~8
 5 Zhang Shengjia, Hu Hongzhang, Liu Wei *et al.*. Weighted apodization in integrated optical acousto-optic tunable filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5): 411~414
 张胜甲,胡鸿璋,刘 威等.集成光学声学可调谐滤波器中的权重切趾[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5): 411~414
 6 Cui Jianmin, Feng Lihui, Liu Wei *et al.*. Weighted coupling to reduce sidelobe of the integrated acousto-optic tunable filters[J]. *Optical Fibers and Passive Components*, 2004, **5279**: 186~191
 7 L. B. Aronson, G. Rankin, W. R. Trutna *et al.*. Reduced sidelobe integrated acousto-optic filter with birefringence apodization[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(20): 1721~1723
 8 H. Herrmann, U. Rust, K. Schafer. Tapered acoustical directional couplers for integrated acousto-optical mode converters with weighted coupling [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(3): 364~374
 9 A. Kar-Roy, C. S. Tsai. Low sidelobe weighted-coupled integrated acousto-optic tunable filter using focused surface

- acoustic waves[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(10): 1132~1135
- 10 A. Kar-Roy, C. S. Tsai. Intergrated acousto-optic tunable filters using weighted coupling[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(7): 1574~1586
- 11 Y. Yamamoto, C. S. Tsai, K. Esteghamat *et al.*. Suppression of sidelobe levels for guided-wave acousto-optic tunable filters using weighted coupling [J]. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1993, **40**(6): 814~818
- 12 H. Herrmann, Member, K. Schafer *et al.*. Low-loss tunable integrated acoustooptical wavelength filter in LiNbO₃ with strong sidelobe suppression[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(1): 120~122
- 13 Guo Wei. Study on the acousto-optical tunable Er³⁺-doped fiber laser[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006
- 郭 巍. 声光可调谐掺铒光纤激光器的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006
- 14 Hu Hongzhang. Applied Optics Principle[M]. Beijing: China Machine Press, 1993
- 胡鸿璋. 应用光学原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993
- 15 Hu Hongzhang, Lin Hangyou, Yang Jisheng *et al.*. An integrated quasi-collinear coupled acoustooptical mode converter [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **208**(1-3): 79~83
- 16 D. A. Smith, J. J. Johnson, B. L. Heffner. Two stage integrated-optic acoustically tunable optical filter with enhanced sidelobe suppression [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(6): 398~399