

集成光学声光可调谐滤波器侧瓣问题研究

高树理

西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055

摘要 基于模式耦合原理, 计算得到声光可调谐滤波器输出波形的第一侧瓣高达 -9.5 dB, 实验得到该结果约为 -8 dB; 阐明了侧瓣产生的机理, 并提出了一种通过改变三处光波导宽度来弯曲螺旋线的方法。结果表明, 通过改变三处光波导宽度的方法可使声光可调谐滤波器输出波形的侧瓣高度降低到 -23 dB。

关键词 集成光学; 模式耦合; 声光可调谐滤波器; 光波导宽度; 侧瓣降低

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0206003

Sidelobe Problems of Integrated Optical Acousto-Optic Tunable Filter

Gao Shuli

College of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China

Abstract Based on the principle of mode coupling, the calculated sidelobe height of output waveform of acousto-optic tunable filter (AOTF) is up to -9.5 dB. The experimental result is about -8 dB. The mechanism of sidelobe production is illustrated. A method is proposed to bend the spiral when we change the width of the three waveguides. The sidelobe can be reduced to -23 dB by this method.

Key words integrated optics; mode coupling; acousto-optic tunable filter; width of optical waveguide; sidelobe reduction

OCIS codes 130.7408; 130.3120; 230.3120; 230.7370

1 引言

集成光学声光可调谐滤波器(AOTF)具有调谐速度快、调谐范围宽、易与光纤系统集成等优点, 广泛应用于当代生产科研中^[1]。滤波带宽和侧瓣高度是评价 AOTF 性能的主要参数。传统的 AOTF 沿光波导方向的横电/横磁(TE/TM)模的双折射率分布是均匀的, 声波振幅也是均匀的, 高达 -9 dB 的侧瓣会引起密集波分复用系统中信道间的串音, 严重损害了 AOTF 的性能。因此, 如何降低侧瓣高度 AOTF 研制过程中的关键问题。

2 产生侧瓣的理论分析

AOTF 的结构图如图 1 所示。其中, AOTF 的核心是 TE/TM 转换器。

假设 $A_{TE}(y)$ 和 $A_{TM}(y)$ 分别是 TE 和 TM 模

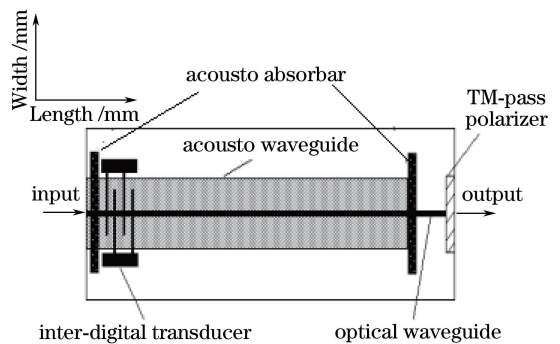


图 1 AOTF 的结构图

Fig. 1 Structure diagram of AOTF

的复振幅。当存在声波时, TE/TM 模会互相耦合, $A_{TE}(y)$ 和 $A_{TM}(y)$ 满足的耦合模方程^[2]为

$$\begin{cases} \frac{d}{dy} A_{TE}(y) = i\kappa A_{TM}(y) \exp(i\beta_{TM}y) \\ \frac{d}{dy} A_{TM}(y) = i\kappa A_{TE}(y) \exp(-i\beta_{TE}y) \end{cases}, \quad (1)$$

收稿日期: 2018-09-12; 修回日期: 2018-09-29; 录用日期: 2018-11-09

基金项目: 陕西省教育厅自然专项项目(16JK1461)

* E-mail: gaoshuli1983@163.com

式中： κ 为耦合系数，其大小主要取决于品质因数 M 和声波强度； y 为耦合长度； β_{TE} 、 β_{TM} 分别为 TE、TM 模的轴向传播常数。设初始条件为 $A_{TE}(0) = 1$ ， $A_{TM}(0) = 0$ ；设 $s = \sqrt{|\kappa|^2 + (\Delta\beta/2)^2}$ ，其中相位适配因子 $\Delta\beta = |\beta_{TE} - \beta_{TM}| - 2\pi/\Lambda$ ， Λ 为声波波长。当满足布拉格条件时， $\Delta\beta = 0$ ，转换效率 T 最大；适当调整声波强度，令此时 $T = 100\%$ ， T 可以表示为

$$T = \frac{\sin^2 \frac{\pi}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta\beta L}{\pi}\right)^2}}{1 + \left(\frac{\Delta\beta L}{\pi}\right)^2}, \quad (2)$$

式中： L 为 AOTF 有效声光相互作用长度， $L = 16 \text{ mm}$ 。 $M = 9.58 \times 10^{-15} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ，声波驱动功率为 47 mW ，声波强度为 $1.13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。利用上述结构参数进行计算，AOTF 的理论滤波特性曲线如图 2 所示。可以看出，主峰两侧的侧瓣是对称的，而且第一侧瓣的高度为 -9.5 dB ，这会导致密集波分复用系统中信道间出现串音，降低了系统的性能。

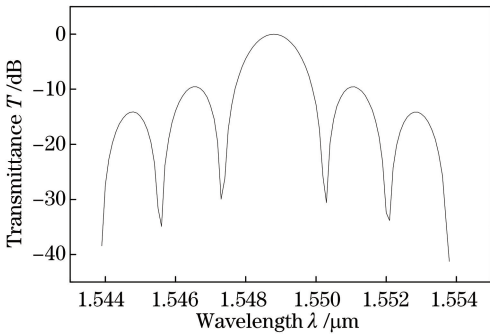


图 2 AOTF 的理论滤波特性曲线

Fig. 2 Theoretical filtering characteristic curve of AOTF

3 产生侧瓣的实验测量

实验装置如图 3 所示。采用波长范围为 $1520 \sim 1560 \text{ nm}$ 的 AT-BBS-1550A 型宽带光源，AOTF 输入光经起偏器和偏振控制器后变为 TE 线偏振光^[5]；利用美国泰克公司生产的 Tektronix AFG3252 高频信号发生器产生高频信号，由美国安捷伦科技有限公司生产的 8347A 射频放大器对信号进行放大，再将放大信号加载在器件上。采用日本横河公司生产的 AQ6317C 光谱仪进行观察与测量，其工作波长范围为 $600 \sim 1750 \text{ nm}$ 。

调节偏振控制器，使得 AOTF 输入光为 TE 线偏振光，调节高频信号频率及功率^[6]，使滤波效果达到最佳，此时高频信号频率为 173.4 MHz ，幅值为 650 mV 。AOTF 的实验滤波特性曲线如图 4 所示。

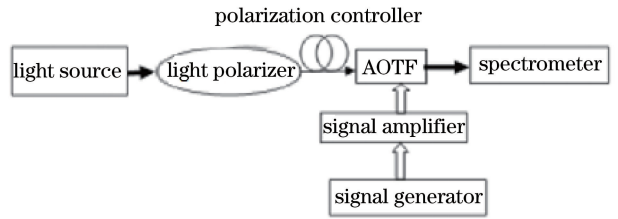


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental device diagram

可以看出，该 AOTF 的侧瓣高度约为 -8 dB ，带宽为 2.186 nm ，实验结果基本与理论计算值吻合。

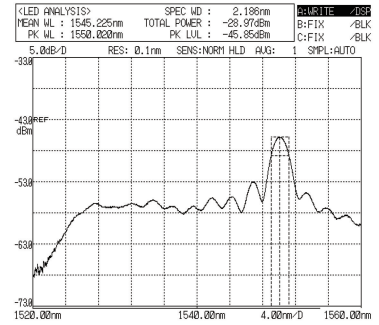


图 4 AOTF 的实验滤波特性曲线

Fig. 4 Experimental filter characteristic curve of AOTF

4 分析与讨论

采用矢量图阐述侧瓣产生的物理机理，由(1)式可得

$$A_{TM} = \int_0^L \kappa^* A_{TE}(y) \exp(-i\Delta\beta y) dy, \quad (3)$$

式中 κ^* 表示 κ 的复数共轭。由图 2 可知，中心波长左右侧瓣处的转换效率与中心波长的转换效率相比很低，因此， A_{TE} 只是随着 y 的变化而缓慢减小，可近似认为相等。将光波导在其长度方向上分成 400 个小单元，每个小单元长度 $\Delta y = 0.04 \text{ mm}$ ，每个单元对 $A_{TM}(L)$ 的贡献可以用一个矢量元^[7] ΔA_{TM} 来表示， $\Delta A_{TM} = \kappa^* A_{TE} \exp(-i\Delta\beta y) \Delta y$ 。另外，相邻两矢量元之间的夹角等于 $\Delta\beta \Delta y$ 。将所有矢量元相加，得到 $A_{TM}(L)$ 。当输入光波长等于滤波中心波长(λ_0)时，所有矢量元的幅角相同，使得相加的总结果用矢量图表示为 400 个同长度、同方向矢量首尾相连的一条直线。当输入光波长等于滤波中心波长相邻第一波谷处波长($\lambda_0 + \Delta\lambda_0$)时，这些矢量元首尾相接， $A_{TM}(L) = 0$ 。当输入光波长等于滤波中心波长相邻第一侧瓣处波长($\lambda_0 + \Delta\lambda_1$)时，矢量元首尾相接形成螺线的形状，螺线绕了一圈半， $|A_{TM}(L)|$ 又达到次极大。侧瓣产生的矢量图如

图 5 所示。

降低侧瓣的方法主要有权重法^[8]和双折射法^[9]。

在权重法中,声波沿光波导方向不再呈均匀分布。权重法的缺陷是,当波导长度不变时,滤出带宽会增大;反之,采用多级串联^[10]改变波导长度,虽然能使滤波带宽和侧瓣高度明显改善,但转换效率、驱动功率和插入损耗指标有所下降。

在双折射法中,沿波导方向的双折射率不再是常数。利用双折射降低侧瓣的结构比较简单,不会使滤出带宽增大。现有改变双折射率的方法是通过电光效应^[11],但其电场不可避免地分布于目标区域之外,导致降低侧瓣效果不是非常理想,并且产生所需电场的电压较大,因此,该方法不方便应用于实际生产中。

从图 5 可以看出,为了降低侧瓣,需要使图 5 中 E 点尽量靠近 O 点,这就意味着,在光波导上声光作用区两端各找到一点,即 A 和 B,在光波导上声光作用区中间找到一点 C,改变这三个点附近光波导的有效双折射率,会引起附加相位改变,这时可以通过弯曲螺旋线达到降低侧瓣的目的。在以 A、B 和 C 点为中心的一小段长度 ΔL 内,让有效双折射率从 Δn 改变为 $\Delta n + \Delta n'$,并且折射率变化量 $\Delta n'$ 满足

$$\int_{y-\frac{\Delta L}{2}}^{y+\frac{\Delta L}{2}} \frac{2\pi}{\lambda_0 + \Delta\lambda} \Delta n' \cdot \Delta L \approx \frac{2\pi}{\lambda_0 + \Delta\lambda} \Delta n' \cdot \Delta L \approx \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta n' \cdot \Delta L = \frac{\pi}{6} \quad (4)$$

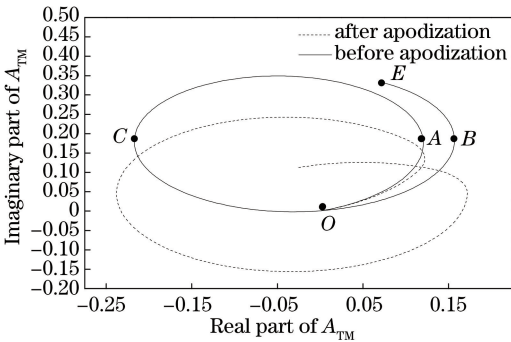


图 5 侧瓣产生的矢量图

Fig. 5 Vector diagram of sidelobe production

从(4)式可以看出,有效降低侧瓣的条件是 $\Delta n' \times \Delta L = \lambda_0/12$,因此,当 ΔL 减小时, $\Delta n'$ 增大。利用这一原理,可以通过改变 ΔL 大小来调整应当施加的 $\Delta n'$ 的大小。选择两端距离为 2.3 mm 的 A、B 两点,中间点作为 C 点。计算结果表明,当 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, $\Delta L = 1 \text{ mm}$, A、B 两点处双折射率变

化量 $\Delta n'_A = \Delta n'_B = 0.00012$, C 点处的双折射率变化量 $\Delta n'_C = -0.00012$ 时,可以有效地降低侧瓣。研究表明,通过改变钛膜扩散前钛条宽度 w ,可以改变双折射率。光束传输法^[12]的计算结果为

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial w} = -3.0 \times 10^{-4} \mu\text{m} \quad (5)$$

光波导结构示意图如图 6 所示。可以看出,对于有效声光相互作用长度 $L = 16 \text{ mm}$ 的 AOTF,在 $1045 \text{ }^\circ\text{C}$ 下扩散(9 h)光波导,扩散前光波导宽度为 $7 \mu\text{m}$,选择两端距离为 2.3 mm 的 A、B 两点,中间点作为 C 点。对称地改变以这三个点为中心的、长度为 1 mm 三个区域的光波导宽度,就可以使这三个区域光波导的 A、B 两点处 $\Delta n'_A = \Delta n'_B = 0.00012$,而 C 点处 $\Delta n'_C = -0.00012$ 。

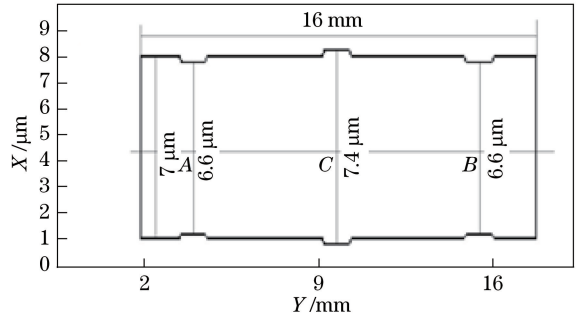


图 6 光波导结构示意图

Fig. 6 Diagram of optical waveguide structure

根据耦合模方程计算得到新结构光波导 AOTF 的理论滤波特性曲线如图 7 所示。可以看出,侧瓣高度为 -23 dB 。

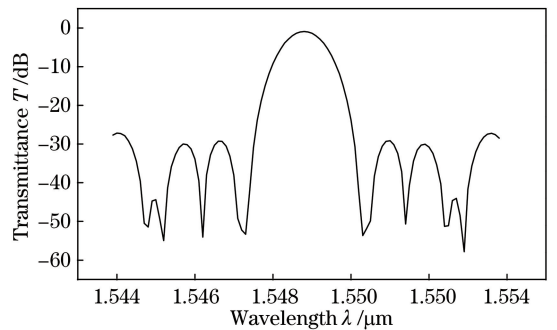


图 7 新结构光波导 AOTF 的理论滤波特性曲线

Fig. 7 Theoretical filter characteristic curve of optical waveguide AOTF with new structure

5 结 论

通过理论分析与实验验证了 AOTF 侧瓣的产生,并利用矢量图阐明了侧瓣产生的机理,进而提出了降低侧瓣的方法,得到以下结论。

1) 在距声光作用区两端 2.3 mm 的 A、B 处和中点 C 处改变光波导宽度,使得这三处的双折射率增大或减小,引起附加相位改变,从而可以有效地将侧瓣高度降低到 -23 dB,同时没有改变 AOTF 的滤出带宽。

2) AOTF 基本结构变化很小,使得其转换效率、驱动功率和插入损耗指标近似不变。

参 考 文 献

- [1] Cui J M, Feng L H, Cui F, *et al.* Integrated LiNbO₃ acousto-optic tunable filter and its application in WDM optical network [J]. *Optical Communication Technology*, 2003(11): 36-38.
崔建民, 冯立辉, 崔芳, 等. 集成 LiNbO₃ 声光可调谐滤波器及其在 WDM 光网络中的应用[J]. *光通信技术*, 2003, (11): 36-38.
- [2] Hu H Z, Lin H Y, Yang J S, *et al.* An integrated quasi-collinear coupled acoustooptical mode converter [J]. *Optics Communications*, 2002, 208(1-3): 79-83.
- [3] Dai J, Gao J, Fan Z G. Polarization-maintaining capacity of backscattered linearly and circularly polarized lights[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0505002.
戴俊, 高隽, 范之国. 线偏振光与圆偏振光后向散射偏振保持能力[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0505002.
- [4] Chu J K, Shi C, Wang Y L, *et al.* Design of polarized light real-time positioning system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0310002.
褚金奎, 时超, 王寅龙, 等. 偏振光实时定位系统的设计[J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0310002.
- [5] Xu P, Xia G Q, Wu Z M, *et al.* Circular polarization switching and polarization bistability of optically pumped 1300 nm spin vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0401002.
徐攀, 夏光琼, 吴正茂, 等. 光抽运下 1300 nm 自旋垂直腔面发射激光器输出激光的圆偏振转换及偏振双稳特性[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0401002.
- [6] Yuan J W, Zhang C G, Wang H, *et al.* Rapid microscopic spectral imaging of lung cancer tissue based on acousto-optic tunable filter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 45(4): 0407003.
原江伟, 张春光, 王号, 等. 基于声光可调谐滤波器的肺癌组织快速显微光谱成像[J]. *中国激光*, 2017, 45(4): 0407003.
- [7] Mou C B, Zou C H, Huang Q Q, *et al.* Research progress in polarization lock and polarization processing vector soliton based on carbon nanotube mode-locked fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703003.
牟成博, 邹传杭, 黄千千, 等. 基于碳纳米管锁模光纤激光器的偏振锁定和偏振进动矢量孤子的研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703003.
- [8] Cui J M, Feng L H, Liu W, *et al.* Weighted coupling to reduce sidelobe of the integrated acousto-optic tunable filters[C]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5279: 186-192.
- [9] Aronson L B, Rankin G, Trutna W R, *et al.* Reduced sidelobe integrated acousto-optic filter with birefringence apodization[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(20): 1721-1723.
- [10] Yang W, Liu Y, Xiao L F, *et al.* Suppression of sidelobe levels for acousto-optic tunable filters using cascaded single-stage acousto-optic tunable filters[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(10): 2734-2739.
杨薇, 刘迎, 肖立峰, 等. 多级级联声光可调谐滤波器旁瓣的抑制[J]. *中国激光*, 2009, 36(10): 2734-2739.
- [11] Chen J, Hu H Z, Geng F. Electrooptical birefringence apodization of integrated optical acoustooptical tunable filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(8): 1011-1014.
陈坚, 胡鸿璋, 耿凡. 采用电光效应实现双折射切趾的集成光学声光可调谐滤波器[J]. *光学学报*, 2002, 22(8): 1011-1014.
- [12] Trutna W R, Dolfi D W, Flory C A. Anomalous sidelobes and birefringence apodization in acousto-optic tunable filters[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(1): 28-30.