

文章编号: 0258-7025(2002)05-0411-04

# 集成光学声光可调谐滤波器中的权重切趾

张胜甲<sup>1</sup>, 胡鸿璋<sup>1</sup>, 刘 威<sup>1</sup>, 耿 凡<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学理学院应用物理系, 天津 300072; <sup>2</sup> 中国航天机电工业总公司 8358 所, 天津 300192)

**提要** 理论分析了权重耦合的声指向耦合器的原理及其在滤波器切趾中的应用, 并且根据理论设计了声波导的方案, 分析了应用这种声波导的滤波器的转换特性。在 X 切 Y 传的 LiNbO<sub>3</sub> 基底上实际制作了这种滤波器。实验测定表明, 侧瓣被抑制到 -14 dB, -3 dB 带宽为 2.0 nm。

**关键词** 集成光学, 波长滤波器, 声光耦合, 切趾

中图分类号 TN 713 文献标识码 A

## Weighted Apodization in Integrated Optical Acousto-optic Tunable Filter

ZHANG Sheng-jia<sup>1</sup>, HU Hong-zhang<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, GENG Fan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Applied Physics, School of Science, Tianjin University, Tianjin 300072  
<sup>2</sup>The 8358th Institute, The Third Academy, CAS, Tianjin 300192

**Abstract** In this paper, the principle of weighted directional coupler and its application in apodization of integrated acousto-optic tunable filter (IAOTF) have been analyzed and discussed. According to the theoretical analysis, the acoustic waveguide has been designed and the TE/TM mode conversion characteristics of AOTF have been analyzed. Based on the results, practical filter has been fabricated on the substrate of X-cut, Y-propagate LiNbO<sub>3</sub>. Experimental measurement shows that sidelobes are suppressed to -14 dB and -3 dB bandwidth is 2.0 nm.

**Key words** integrated optics, wavelength filter, acousto-optic coupling, apodization

### 1 引 言

集成光学声光可调谐波长滤波器 (IAOTF) 的核心器件是 TE/TM 模转换器。在声光模转换器中, 当满足相位匹配条件时, 在互相正交的两个偏振模 (TE 模和 TM 模) 之间会互相转换。通常情况下, 声光耦合的权重是不随传播距离改变的, 模转换效率与光波波长之间为  $\sin^2c$  的函数关系。理论计算表明, 侧瓣高度为 -9.7 dB, 在密集波分复用系统中, 这会导致严重的串扰。因此, 抑制侧瓣 (即切趾) 对于声光滤波器是至关重要的。

为了抑制侧瓣, 通常采用两种方式: 1) 器件的级联<sup>[1,2]</sup>; 2) 利用权重耦合技术<sup>[3,4]</sup>。利用权重耦合技术就是改变耦合系数的分布来抑制侧瓣, 转换特性可以近似地由耦合强度的傅里叶变换的平方取

得。如果耦合强度在声光相互作用长度内是渐变的, 并且在中心部分达到最大, 在两端平滑地趋近于零, 就能够实现权重耦合, 从而达到切趾的目的。本文采用如图 1 所示的非零间隙的声波导指向耦合器。先从理论上求出表面声波 (SAW) 导模的场分布。然后根据耦合模理论进一步求出声光耦合系数和有效耦合系数, 从而计算出滤波器的转换特性。

### 2 理论模型及声光模转换器的设计

首先, 我们采用 H. Herrmann 的方法<sup>[5]</sup>, 用类似于求解分层光波导的方法来求解声波导。将如图 1 所示的非零间隙的声指向耦合器中的声波导看成五层波导, 声表面波的方程为

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

收稿日期: 2001-03-12; 收到修改稿日期: 2001-05-31

基金项目: 国家自然科学基金 (批准号: 10084001) 资助项目。

作者简介: 张胜甲 (1977—), 男, 天津大学物理系研究生, 主要从事集成光子学研究。

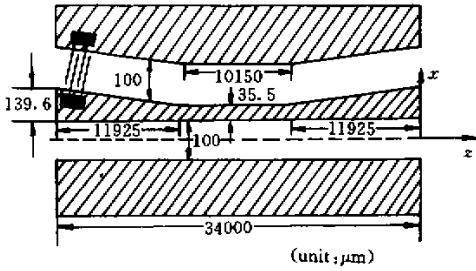


图1 声波导结构及其参数

Fig.1 Structure of SAW-guide and its parameters

$u_m(x)$  指声表面波  $m$  阶模在  $x$  轴方向的强度分布,  $v_{\text{eff},m}$  为声波导模的有效传播速度,  $f_{\text{ac}}$  是 SAW 的频率,  $v$  为波导结构的速度分布。假定  $u_m(x)$  及其一阶导数在边界连续, 就能解出该方程, 从而求得声波导模的场分布。在这种声波导中, 一般可支持两个导模, 即对称模和非对称模。根据初始条件, 可以确定它们的相对强度分布, 从而求出它们沿着光波导的复振幅分布。

模转换器可以由耦合模理论加以分析。在这种声指向耦合器中, 由于有两个声波模参与了模转换过程, 所以要对耦合模方程作一定的修正。设  $A, B$  为光波导中 TE 和 TM 模的复振幅, 耦合模方程可以写成

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\kappa_1^* B \exp[-i\psi_1(z)] - \kappa_2^* B \exp[-i\psi_2(z)] \quad (2a)$$

$$\frac{\partial B}{\partial z} = \kappa_1 A \exp[i\psi_1(z)] + \kappa_2 A \exp[i\psi_2(z)] \quad (2b)$$

其中  $\kappa_1, \kappa_2$  分别代表对称模和反对称模的耦合强度,  $\psi_1(z), \psi_2(z)$  分别代表对应的相位失配

$$\psi_j(z) = \psi_{0,j} + \int_{-L/2}^z \left[ \left( \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \right) - K_{\text{ac},j} \right] dz' \quad (j = 1, 2) \quad (3)$$

令  $\kappa = \kappa_1 + \kappa_2, \Delta\kappa = \kappa_1 - \kappa_2$ , 并引入  $\psi(z) = \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}$

和  $\Delta\psi(z) = \frac{\psi_1 - \psi_2}{2}$ , 则可以定义有效耦合系数

$$\kappa_{\text{eff}}(z) = \kappa \cos[\Delta\psi(z)] + i\Delta\kappa \sin[\Delta\psi(z)] \quad (4)$$

于是方程(2)可写成一般格式的耦合模方程

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\kappa_{\text{eff}}^*(z) B \exp[-i\psi(z)] \quad (5a)$$

$$\frac{\partial B}{\partial z} = \kappa_{\text{eff}}(z) A \exp[i\psi(z)] \quad (5b)$$

当耦合系数  $\kappa_{\text{eff}}(z)$  分布为 Gauss 函数时, 侧瓣最低, 但滤出带宽较宽; 当  $\kappa_{\text{eff}}(z)$  为最佳 Hamming

函数时, 滤出带宽比较窄, 但侧瓣抑制能力降低<sup>[4]</sup>。通过调整转换器的各个参数, 当总长  $L = 34 \text{ mm}$ , 两条声波导的间隙为  $35.5 \mu\text{m}$ , 夹角为  $0.5^\circ$  (如图 1) 时所得  $\kappa_{\text{eff}}(z)$  如图 2 中实线所示, 它恰好处于 Gauss 函数和 Hamming 函数之间, 因此既有较理想的侧瓣抑制能力, 带宽也比较窄。

利用已求得的耦合系数, 将  $L$  沿  $z$  轴分解为  $N$  段, 按照公式(5a)和(5b)进行迭代计算, 直到  $z = L/2$  为止。从而得出 TE/TM 模的转换效率

$$\eta = \left| B \left( \frac{L}{2} \right) \right|^2 \quad (7)$$

在上述结构参数下, 计算所得的  $\eta$  随光波波长  $\lambda$  的变化如图 3 所示。由图中可以看出, 最高侧瓣高度为  $-33.0 \text{ dB}$ ,  $-3 \text{ dB}$  带宽为  $1.4 \text{ nm}$ , 而国外同类滤波器的侧瓣一般都高于  $-30 \text{ dB}$ , 带宽  $1.9 \text{ nm}$  左右。因此, 我们设计的器件从各项性能指标上都优于国外报道的同类模转换器。

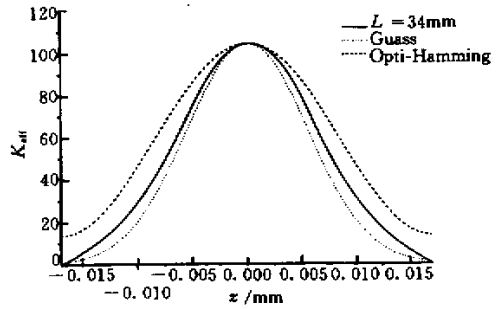


图2 权重函数比较

Fig.2 Comparison of weighting functions applicable to IAOTF's

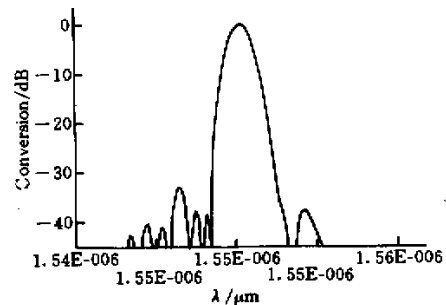


图3 计算的滤波器转换特性

Fig.3 Calculated mode conversion characteristics of IAOTF

### 3 器件制作及实验

在 X 切 Y 传  $\text{LiNbO}_3$  晶体表面上, 光刻出如图

1 阴影区所示的声波导图案,所溅射的钛膜厚度为 160 nm;然后在 1050 °C,通湿氧气气氛下扩散 31 h,制成声波导;再在直的声波导的中央溅射一条 8 μm 宽,85 nm 厚的钛条,在 1050 °C,湿氧气气氛下扩散 9 h,制成光波导;第三步是制作叉指换能器,叉指换能器指条 10 对,周期为 20.4 μm,指条是由溅射 160 nm 厚的铝膜制成的。最后将样品两端面研磨、抛光。

实验装置如图 4 所示。采用 1.523 μm 的氦氖激光器作为光源,经格兰棱镜产生平面偏振光,用 40× 物镜耦入光波导,利用 HP8656A 高频信号发生器产生高频信号,由高频放大器放大后输出到已经达到阻抗匹配的叉指换能器。模式转换后的光波用 10× 物镜耦出,并在其后放置另一格兰棱镜作为检偏器,通光方向与起偏格兰棱镜相垂直。最后用 PIN 探测器测量输出光强。

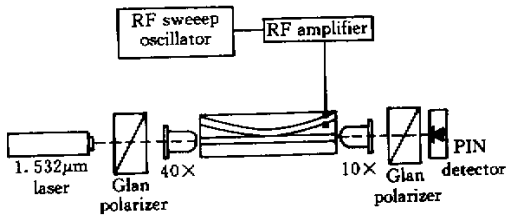


图 4 实验装置图

Fig. 4 Schematic of experimental setup

在第 2 部分设计的模转换器参数下,测得的转换特性如图 5(a)所示。在接近 100% 的转换效率时所需声波功率为 120 mW,远大于非权重耦合情况下所需的驱动功率,这是由于声波是由一条声波导耦合到另外一条声波导,所以不可避免地造成驱动功率的加大,这也是权重声指向耦合器的缺点之一。由图 5(a)还可以看出,左侧存在较高的旁瓣,这是由于光波导模双折射率  $\Delta n$  沿器件长度方向的分布不均匀,从而导致了波导滤波器旁瓣的不对称性。对于导致  $\Delta n$  变化的原因,D. A. Smith 等认为是 Ti 工艺条件造成的<sup>[6]</sup>。我们认为,更可能的原因是在较高的驱动功率下,声波吸收带吸收了富余的声波能量,从而使器件在光波传播方向上的温度呈平方律分布,导致了光波导内部的模双折射分布不均匀。

为降低由  $\Delta n$  不均匀导致的侧瓣,可采用为器件加热的方法,以补偿双折射率的梯度变化,并得到

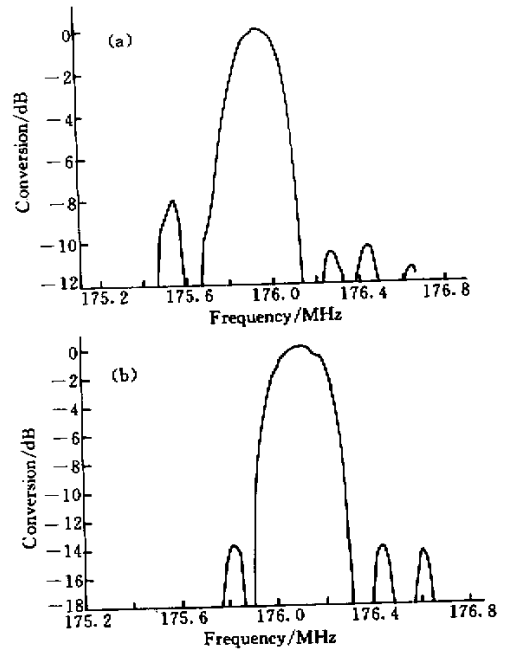


图 5 权重切趾滤波器的转换特性

(a) 未加温度控制时的测量结果;(b) 加温度控制时的结果

Fig. 5 Filter conversion characteristics for weighting apodization

(a) measured characteristics without temperature controls;

(b) measured characteristics with temperature controls

了侧瓣降低 -7 dB 的实验结果<sup>[6]</sup>。但这种方法具有很大的不稳定性和不可重复性。我们采取在器件的背面涂导热胶的方法,使器件与热的良导体充分接触,从而使温度保持均匀。重新测量所得的结果如图 5(b),旁瓣降低了一 5 dB,达到 -14 dB。这种方法简单实用,可重复性好,在其他实验中用同样的方法也获得了一致的效果。另外,我们设计了一套利用半导体制冷的高精度控温装置,不仅能保持温度均匀性,还能使滤波器工作在某一特定的温度下,从而更好地保证滤波器的频率(温度)稳定性。

即使如此,实验与理论值仍有一定差距。这是因为在波导制作过程中不可避免地与实际情况有一定偏差,如波导的宽度及厚度不均匀等,而这些因素对  $\Delta n$  影响是比较大的: $\partial \Delta n / \partial W = -3 \times 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$ ,  $\partial \Delta n / \partial x = -4.5 \times 10^{-7} \text{nm}^{-1}$ <sup>[6]</sup>。同样,器件的长度过长,使在制作波导时保持  $\Delta n$  的一致性很困难(一般器件长度不超过 20 mm 比较好<sup>[7]</sup>)。这说明我们有能力获得更高转换特性的器件。

## 4 结 论

从理论上求出表面声波(SAW)导模的场分布, 然后根据模拟耦合模理论进一步求出声光耦合系数和有效耦合系数。并分析了不同函数形式的耦合系数  $\kappa(z)$  对滤波器转换特性的影响, 得到侧瓣越低, 滤出带宽越宽的结构。综合考虑各个因素, 我们采用如图 1 中所示的非零间隙的声波导指向耦合器, 得到较理想的耦合系数分布, 使滤波器既有较低的侧瓣, 又有较窄的滤出带宽。实际制作了这种权重切趾的模转换器, 实验测定表明, 侧瓣被抑制到  $-14$  dB,  $-3$  dB 带宽为  $2.0$  nm。因此, 权重声光可调谐波长滤波器可获得很好的侧瓣抑制。

### 参 考 文 献

- 1 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
- 2 H. Herremann, P. Müller-Reich, V. Reimann *et al.*,

- Integrated optical, TE- and TM-pass, acoustically tunable, double-stage wavelength filter in  $\text{LiNbO}_3$  [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(7):642~643
- 3 Y. Yamamoto, C. S. Tsai, K. Esteghamat, H. Nishimoto. Suppression of sidelobe levels for guided-wave acousto-optic tunable filters using weighted coupling [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1993, **40**(6):814~818
- 4 A. Kar-Roy, C. S. Tsai. Ultralow sidelobe-level integrated acoustooptic tunable filters using tapered-gap surface acoustic wave directional couplers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(6):977~982
- 5 H. Herrmann, U. Rust, K. Sch fer. Tapered acoustical directional couplers for integrated acousto-optical mode converters with weighted coupling [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(3):364~374
- 6 D. A. Smith, A. d'Alessandro, J. E. Baran. Source of sidelobe asymmetry in integrated acousto-optic filters [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(8):814~816
- 7 H. Herrmann, K. Sch fer, W. Sohler. Polarization independent, integrated optical, acoustically tunable wavelength filters/switches with tapered acoustical directional coupler [J]. *IEEE Photon Technol. Lett.*, 1994, **6**(11):1335~1337

\*\*\*\*\*

## 征 订 启 事

经国家科学技术部批准, 本刊 2002 年第二季度将出版增刊一期, 内容为“第十五届全国激光学术会议”论文集, 收集会议上发表的约 200 多篇论文, 主要包括: 激光物理, 超短脉冲激光与非线性光学, 全固态激光器及各类新型激光器, 光通信有源及无源器件, 光束传输、控制及光束质量, 激光光学材料、薄膜及元器件, 工业激光及应用, 医用激光及激光与生物组织相互作用等。

本期增刊约 800 页, 定价为 160.00 元(含邮寄费)。如需订阅的单位或个人请将款从邮局汇至上海市 800-211 信箱《中国激光》编辑部苏笑珍收。

《中国激光》编辑部  
二〇〇二年五月