

# 准共线集成声光模式转换器的性能分析与设计\*

吕 敏 崔建民 刘 维 崔 芳 孙雨南

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系,北京 100081)

**摘 要** 报道了一种 SiO<sub>2</sub> 薄膜声波导和 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 光波导之间存在一个角度的准共线的模式转换器结构,利用波导模式分析导出薄膜声波导的宽度限制;利用模式耦合理论得出了声光模式转换特性和耦合系数的加权形式. 实现了对耦合系数的加权,较好地抑制了旁瓣. 在综合考虑旁瓣和线宽的条件下,设计了这种 TE/TM 声光模式转换器,其旁瓣为 -16.8 dB, -3 dB 线宽和 -10 dB 线宽分别为 1.37 nm 和 2.31 nm.

**关键词** 光通信;声光模式转换器;加权耦合;旁瓣

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A

## 0 引言

光通信向高速、大容量方向的发展,不可避免的要采用 WDM 技术. 集成声光可调谐滤波器 (IAOTF) 被认为是极具潜力的方案之一,其应用前景十分广泛. 利用集成声光可调谐滤波器可以实现滤波器、光开关、增益均衡器等多种光器件<sup>[1,2]</sup>,特别是可应用于光分插复用器 (OADM). 集成声光模式转换器是集成声光可调谐滤波器的重要组成部分,其基本原理是光波与声表面波相互作用,当满足相位匹配条件时两正交偏振态实现峰值转换,但转换的光波能量与光波长有 sinc<sup>2</sup> 函数的关系,理论计算一阶旁瓣值达到 -9.7 dB,无法满足 DWDM 网络中的要求. 应用于 OADM 中实现多波长操作时,将会带来严重的强度串扰,所以必须对旁瓣进行抑制. 目前报道的基于声光耦合的模式转换器主要有两类:共线结构和非共线结构. 然而共线结构的声光模式转换器的高旁瓣限制了其在 DWDM 网络中的应用. 为了压缩旁瓣,通常采用两种方式:1) 器件的级联;2) 利用加权耦合技术. 对于级联器件而言,制作工艺复杂,精度要求高,实现难度较大. 本文主要研究用准共线结构实现加权的声光模式转换器.

## 1 准共线结构加权的声光模式转换器

图 1 为准共线结构的声光模式转换器. 通过声波导与光波导之间的微小倾角而造成沿光波导方向耦合系数的改变. 由于声波导和光波导之间需要交叉,所以不能采用 Ti 扩散的方法制备声波导,而是采用 SiO<sub>2</sub> 或者是其它材料制成的薄膜作为声波导<sup>[3]</sup>. 如图 1,采用 SiO<sub>2</sub> 薄膜作为声波导,声波导与

光波导之间的夹角为  $\theta$ ,两端加声吸收器. 这种模型所用的新型的薄膜 (SiO<sub>2</sub>) 声波导,在制作工艺上比 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 声波导要简单,并且可以在光波导与声波导之间安排一个角度来抑制旁瓣. 这种声波导设计时可以与光波导无关,所以抑制旁瓣的方法就显得更加灵活.

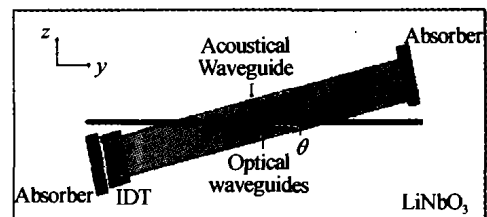


图 1 准共线的声光模式转换器

Fig. 1 Integrated quasi-collinear acousto-optic TE/TM mode converter structure

在对准共线结构的声光模式转换器的分析设计中,本文主要讨论了两个问题,就是声波导的单模条件限制和利用这种结构对旁瓣的抑制效果.

### 1.1 声波导的单模条件限制

对于 X 切 Y 传的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体,SAW 在 X 轴方向引起的强度拉伸起决定作用<sup>[4]</sup>. 与条形光波导的有效折射率模型相似,在一维条件下采用速度分布来求解,可以得到声波导结构的横波方程为

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial z^2} - (2\pi f_{ac})^2 \left( \frac{1}{\nu_{eff,m}^2} - \frac{1}{\nu^2(z)} \right) \right\} u_{x,m}(z) = 0 \quad (1)$$

$u_{x,m}(z)$  指  $m$  阶模在  $x$  轴方向的横向场分布, $\nu_{eff,m}$  为  $m$  阶模的有效速度, $\nu(z)$  是声波导横截面上的速度分布, $f_{ac}$  是 SAW 的频率. 令

$$\nu(z) = \begin{cases} \nu_1 & (|z| \leq w/2) \\ \nu_2 & (|z| > w/2) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $w$  为声波导的宽度. 采用分析三层平面光波导的方法来分析声波导. 令

$$h = 2\pi f_{ac} \left[ \frac{1}{\nu_1^2} - \frac{1}{\nu_{eff,m}^2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

\*国家“863 计划”资助项目 (2002AA312262)

Tel: 010-87462752 Email: lvmin62589149@163.com

收稿日期: 2004-05-08

$$q = 2\pi f_{ac} \left[ \frac{1}{v_{\text{eff},m}^2} - \frac{1}{v_2^2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

利用  $u_{x,m}(z)$  及其一阶导数在边界处的连续性, 可以得到横模的特征方程为

$$hw = \arctan \left[ \frac{2q}{h(1 - q^2/h^2)} \right] + m\pi \quad (5)$$

$(m = 0, 1, 2, \dots)$

式中  $m$  为模的阶数. 数值求解式(3)、(4)、(5), 并且利用文献报道的声速测量值<sup>[3]</sup>, 可得到声波模式的速度与波导宽度的关系, 如图 2.

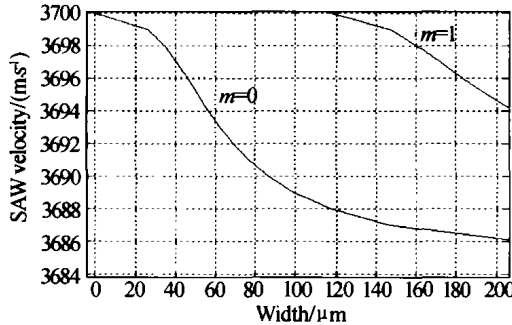


图 2 厚度为  $0.38 \mu\text{m}$  不同宽度的声波导中 SAW 模式速度 ( $f_{ac} = 170 \text{ MHz}$ )

Fig. 2 Calculated SAW velocities for guided modes in different width and  $0.38 \mu\text{m}$ -thick acoustical waveguide ( $f_{ac} = 170 \text{ MHz}$ )

由图 2 可见, 当声波导的宽度小于  $117 \mu\text{m}$  时, 只有 0 阶模  $u_0$ . 当宽度增加时, 出现了 1 阶模. 实验只模拟了在中心波长  $1.55 \mu\text{m}$  时对应的中心频率下的声波导的单模条件, 因为 SAW 的速度在整个调谐范围内随频率的改变很小, 所以单模条件基本适合于整个调谐范围.

需要说明的是 SAW 的速度与  $\text{SiO}_2$  薄膜的厚度密切相关,  $\text{SiO}_2$  薄膜越厚, 薄膜与  $\text{LiNbO}_3$  之间的 SAW 的速度差越大, 对声波束缚得越好. 但是如果薄膜太厚, 则传输损耗增大. 所以应选取适当的薄膜厚度及宽度, 保证其单模条件. 实验中的模拟是在厚度为  $0.38 \mu\text{m}$  条件下得到的. 厚度对单模条件的影响在另外的文章中详细讨论.

## 2.2 准共线结构加权对旁瓣的抑制

对于 IAOTF 的加权耦合来说, 就是使得耦合强度在声光相互作用长度上按照一定的加权函数渐变分布, 其转换特性可以近似的由耦合强度的傅里叶变换的平方取得, 从而抑制 IAOTF 的旁瓣效应. 从恒定耦合强度的耦合模方程出发, 推广到渐变耦合强度的耦合模方程, 并用矩阵相乘的方法得到加权耦合后的滤波器响应. 在此基础上得出了准共线结构加权的声光模式转换器的特性.

在 X 切 Y 传  $\text{Ti:LiNbO}_3$  单模光波导中  $\text{TE}_0$  和  $\text{TM}_0$  模传播方向相同, 它们之间属于同向耦合<sup>[5]</sup>.

这样耦合模方程简化为

$$\begin{cases} \frac{dA_{\text{TE}}(y)}{dy} = -iKA_{\text{TM}}(y) \exp(i\Delta\beta y) \\ \frac{dA_{\text{TM}}(y)}{dy} = -iK^*A_{\text{TE}}(y) \exp(-i\Delta\beta y) \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)得到恒定耦合强度耦合模方程的解析解, 写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} A_{\text{TE}}(y) \\ A_{\text{TM}}(y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p(y) & -iq(y) \\ -iq^*(y) & p^*(y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{\text{TE}}(0) \\ A_{\text{TM}}(0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中

$$p(y) = \left[ \cos(sy) + i\frac{\Delta\beta}{2s} \sin(sy) \right] e^{-i(\Delta\beta/2)y}$$

$$q(y) = \left[ \frac{K}{s} \sin(sy) \right] e^{-i(\Delta\beta/2)y}$$

$$s = \sqrt{|K|^2 + (\Delta\beta/2)^2}$$

$K$  为耦合系数, 位相失配因子  $\Delta\beta = |\beta_{\text{TM}} - \beta_{\text{TE}} - K|$ ,  $\beta_{\text{TE}}, \beta_{\text{TM}}$  为 TE、TM 模的波矢.

加权耦合的近似处理就是将  $L$  均分成  $N$  段, 每一段的长度为  $l_n$ , 如果每一段的长度足够短, 可以认为每一段的耦合系数为定值  $K_n(y)$ ,  $N$  段耦合系数  $K_n(y)$  的分布满足加权耦合函数  $W_n(x)$ . 将声光相互作用长度内的每一段简单模型串联叠加起来, 就可以逼近整个 IAOTF 加权耦合的效果. 则矩阵(7)可以写成

$$\begin{bmatrix} A_{\text{TE}_{n+1}}(y) \\ A_{\text{TM}_{n+1}}(y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_n(y) & -iq_n(y) \\ -iq_n^*(y) & p_n^*(y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{\text{TE}_n}(y) \\ A_{\text{TM}_n}(y) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中

$$p_n(y) = \left[ \cos(s(y)l_n) + i\frac{\Delta\beta}{2s} \sin(s(y)l_n) \right]$$

$$q_n(y) = \left[ \frac{K_n(y)}{s(y)} \sin(s(y)l_n) \right]$$

$$K_n(y) = W_n(y)K_0$$

$$l_n = L/N$$

$$s(y) = \sqrt{|K_n(y)|^2 + (\Delta\beta/2)^2}$$

可以得到滤波器的响应

$$\eta(\Delta\beta L) = \left| \frac{A_{\text{TM}_n}(L)}{A_{\text{TE}_1}(0)} \right|^2 \quad (9)$$

把上述加权耦合的原理运用于准共线结构的声光模式转换器中, (如图 1) 以光波导的中心为坐标原点,  $z, y$  轴的取向如图 1, 则声波导中心到光波导的横向距离为

$$z = y \tan \theta \quad (10)$$

那么声波导沿着光波导的场分布、耦合系数和相位差分别为

$$U(y) = u_0(y \tan \theta) \quad (11)$$

$$k = KU(y) \quad (12)$$

$$\Psi(y) = \int_{-L/2}^y \left( \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n - K_{ac} \right) dy' = \int_{-L/2}^y \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n dy' - K_{ac}(y + L/2) \quad (13)$$

式中  $K$  为转换系数最大值时的声光耦合系数,从式(11)、(12)可以看出耦合系数是由  $u_0$  的分布来决定的,从方程(1)可知  $u_0$  在波导内为余弦分布. 所以  $k$  为余弦函数分布.  $\lambda$  为光波长,  $\Delta n$  为 TM 和 TE 模对应的折射率差,  $K_{ac}$  是声波矢在  $y$  轴的投影. 由于声波导与光波导之间的角度  $\theta$  很小,所以可以取近似

$$K_{ac} \approx \frac{2\pi}{v_{\text{eff},0}} f_{ac} \quad (14)$$

$v_{\text{eff},0}$  是声波 0 阶模的有效速度,可以由方程(3)解出.

取耦合长度为 25 mm,  $\theta = 0.40^\circ$ 、 $0.45^\circ$ 、 $0.48^\circ$  和  $0.50^\circ$ ,可以得到 TE/TM 模式转换时透过的强度随波长变化的关系,如图 3(a). 通过对 4 个角度加权以后的模式转换特性的比较,发现随着角度的增大,旁瓣值降低,但是线宽反而增大. 为了能直观地比较加权以后对旁瓣和带宽的影响,在图 3(b)中画出了未加权( $\theta = 0^\circ$ )时与加权( $\theta = 0.45^\circ$ )时的转换特性曲线,可以看出,加权以后有效地抑制了旁瓣. 计算时已考虑到当光波导被  $\text{SiO}_2$  薄膜覆盖时,对 TE 模和 TM 模的折射率差的影响.

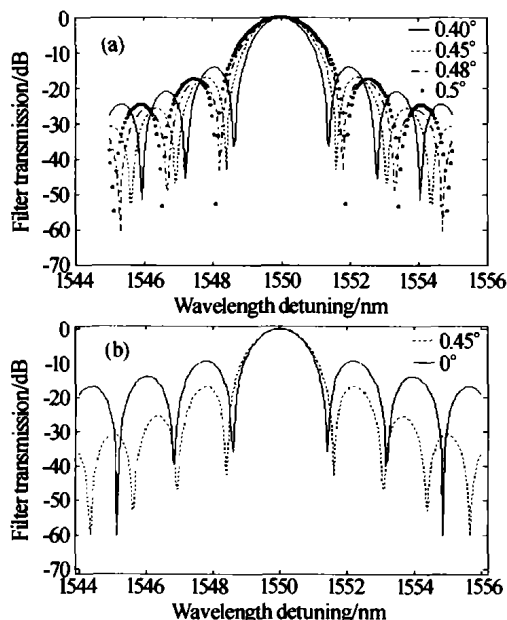


图 3 TE/TM 模式的转换特性曲线

Fig. 3 The conversion characteristics of the mode converter

研究准共线结构的声光模式转换器实质上就是通过结构的安排实现耦合系数的余弦加权来抑制旁瓣,但是在抑制旁瓣的同时还要考虑线宽. 由图 3

可见,在耦合长度一定的情况下,线宽和一阶旁瓣高度的要求是相互矛盾的,随着角度的增大,线宽压窄,但同时旁瓣增高;当旁瓣降低时,线宽增加. 所以在选取加权角度时,应兼顾这两个指标. 对线宽与旁瓣性能综合考虑,我们认为在加权角度  $\theta = 0.45^\circ$  时,线宽和旁瓣综合性能最佳,此时旁瓣大约为  $-16.8$  dB,  $-3$  dB 线宽和  $-10$  dB 线宽分别为 1.37 nm 和 2.31 nm.

## 2 结论

详细分析了准共线声光模式转换器. 首先利用分析条形光波导的方法得出了薄膜声波导的横模特征方程,从而得到声波导单模宽度限制条件,也由此决定了余弦函数加权的声光耦合系数. 其次应用加权耦合实现旁瓣抑制原理计算得到了声光模式转换特性,通过比较分析得到获得低旁瓣和窄线宽的准共线结构.

对于应用于 DWDM 光网络 OADM 中的集成声光可调谐滤波器而言,准共线结构声光模式转换器不仅降低了旁瓣水平,压缩了滤波带宽;而且工艺相对简单,易于实现多级级联反射的 IAOTF 结构<sup>[5,6]</sup>,从而可以进一步获得窄线宽的 IAOTF,达到 DWDM 光网络对 OADM 的要求.

## 参考文献

- Smith D A, Chakrvarthy R S, Bao Z, et al. Evolution of the acousto-optic wavelength routing switch. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(6): 1005 ~ 1019
- Alessandro A D, Smith D A, Baran J E. Multichannel operation of an integrated acousto-optic wavelength routing switch for WDM systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, 6(3): 390 ~ 393
- Mendis H, Mitchell A, Belski I, et al. Design, reslisation and analysis of an apodised, film-loaded acousto-optic tunable filter. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2001, 73(5-6): 489 ~ 493
- Hu H Z, Lin H Y, Yang J S, et al. An integrated quasi-collinear coupled acoustooptical mode converter. *Optics Communications*, 2002, 208(1-3): 79 ~ 83
- 崔建民, 冯立辉, 孙雨南, 等. 用于 OADM 的集成声光可调谐滤波器的性能分析. *光子学报*, 2003, 32(12): 1430 ~ 1433
- Cui J M, Feng L H, Sun Y N, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(12): 1430 ~ 1433
- Nakazawa T, Taniguchi S, Seino M, et al. Ti:LiNbO<sub>3</sub> Acousto-Optic Tunable Filter (AOTF). *Fujitsu Sci Tech*, 1999, 35(1): 107 ~ 111

## Performance Analysis and Design of Quasi-collinear Acousto-optic Mode Converter

Lü Min, Cui Jianmin, Liu Wei, Cui Fang, Sun Yunan

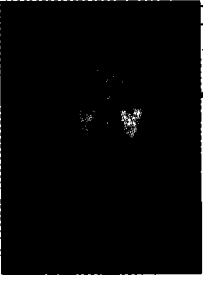
*Department of Optoelectronic Engineering, School of Information science and Technology,*

*Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*

Received date: 2004-05-08

**Abstract** The design of a SiO<sub>2</sub> film-loaded Ti: LiNbO<sub>3</sub> integrated acousto-optic tunable filter is reported. The configuration, in which an angular offset between the acoustic and optical waveguides is introduced, offers a good performance of suppressing sidelobes. With the mode analysis of the acoustic wave guide and the theory of coupling mode the limit of the width, weighted coupling coefficient and the characteristics of the conversion of acousto-optic modes are obtained. Considered the compromise between the sidelobes suppression and filtering bandwidth, the theoretical results are gained that the sidelobes level is -16.8 dB and the theoretical values of bandwidths of -3 dB and -10 dB is 1.37 nm and 2.31 nm.

**Keywords** Optical communication; Acousto-optic mode converter; Weighted coupling; Sidelobe



**Lü Min** was born in Shanxi province in 1975. She received her B. S. degree from ShanXi University in 1999. Currently, she is a Master Degree candidate in Beijing Institute of Technology. Her research interests are in the field of integrated optics and optical communication.