

# 1.5 $\mu\text{m}$ 波导声光可调滤光器研究

傅焰峰\* 李佐宜

(华中理工大学固体电子学系, 武汉 430074)

李 涛 刘秋华 梅锁海 刘水华 方罗珍 林 兵

(邮电部固体器件研究所, 武汉 430074)

**摘 要** 对 1.5  $\mu\text{m}$  波导型声光 TE-TM 模式转换光滤波器进行了研究。采用了可降低驱动功率的表面声波导结构。在 1.5~ 1.6  $\mu\text{m}$  波段实现了可调滤光, 通带宽度小于 2 nm, 达到 97% 以上转换率所需的射频驱动功率约 80 mW (19 dBm), 器件总插入损耗约 9 dB。

**关键词** 声光可调, 模式转换。

波分复用(WDM)光通信技术中需要用到各式各样的窄带光滤波器。可调光滤波器可以被用来在不同的通道中动态地分配波长信号, 因而大大增强了系统的功能, 在未来的全光网络中, 可调光滤波器是必不可少的器件之一。TE-TM 模式转换声光可调滤光器(AOTF)具有速度快、带宽窄、可调范围大的优点, 并且可以多波长同时滤光<sup>[1, 2]</sup>, 是一种性能极好, 应用范围很广的新型器件。

近年来, 集成光学结构的声光可调滤光器发展很快, 它具有更低的通道驱动功率和更高的稳定性、与光纤技术的兼容性较好, 而且还能够进一步集成化, 已报道研制出偏振无关型的器件<sup>[3]</sup>。本文主要报道在 x 切 y 传 LiNbO<sub>3</sub> 中研究制作波导型声光可调滤光器的部分结果。其中器件的起偏、检偏器部分采用特殊的分离结构, 具有低的插入损耗和高的稳定性。

## 1 器件原理

沿 x 切 y 传 LiNbO<sub>3</sub> 单模扩散光波导传播的导光有两个偏振模式, TE<sub>0</sub> 和 TM<sub>0</sub>, 当沿光波传导方向的折射率受到扰动时, 两种偏振模之间将产生较强的相互作用, 由于相位匹配条件是波长敏感的, 因此利用这种模式转换特性可以做成窄带光滤波器<sup>[4]</sup>, 图 1 所示为波导声光 TE-TM 转换光滤波器原理及结构图。波导中导波的偏振模转换过程可以用耦合模理论来

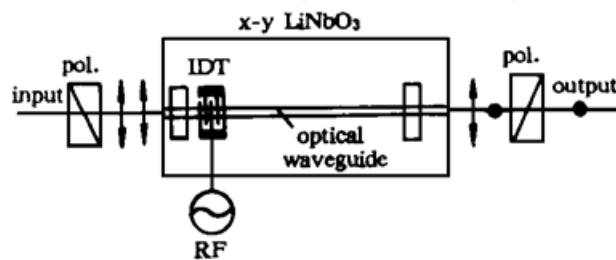


Fig. 1 Schematic of a waveguide AOTF

\* 现联系地址: 武汉邮电科学院固体器件所, 武汉 430074。

收稿日期: 1996 年 5 月 25 日; 收到修改稿日期: 1996 年 9 月 25 日

描述。假设光以 TE 偏振态入射, 用  $E_{TE}$  和  $E_{TM}$  分别表示两种偏振模的幅度, 满足下列方程<sup>[5]</sup>:

$$dE_{TE}/dy = -jk E_{TM} \exp(-j\Delta\beta y) \quad (1)$$

$$dE_{TM}/dy = -jk E_{TE} \exp(-j\Delta\beta y) \quad (2)$$

$k$  为常数时, 此方程的解为:

$$E_{TE} = \exp(-j\Delta\beta y/2) \left[ \cos\left(\frac{y}{2} \sqrt{4k^2 + \Delta\beta^2}\right) + \frac{j\Delta\beta}{\sqrt{4k^2 + \Delta\beta^2}} \sin\left(\frac{y}{2} \sqrt{4k^2 + \Delta\beta^2}\right) \right] \quad (3)$$

$$E_{TM} = \exp(-j\Delta\beta y/2) \left[ \frac{2k}{\sqrt{4k^2 + \Delta\beta^2}} \sin\left(\frac{y}{2} \sqrt{4k^2 + \Delta\beta^2}\right) \right] \quad (4)$$

式中  $\Delta\beta$  为偏离相位匹配条件的量。在波导型声光器件中, 沿波导的折射率纵向扰动由平行于光波导方向传播的声表面波来激发, 叉指电极激发的应变为  $[S] = [d][E]$ , 其中  $[d]$  为压电系数张量,  $[E]$  为叉指电极激发的电场。根据弹光效应, 引起的折射率变化为<sup>[6]</sup>:

$$\Delta\left[\frac{1}{n^2}\right] = [P][S] = [P][d][E] \quad (5)$$

$[P]$ 、 $[d]$  分别为  $\text{LiNbO}_3$  的光弹系数矩阵和压电系数矩阵, 对于  $x$  切  $y$  传  $\text{LiNbO}_3$ ,  $[E] = [E_x E_y 0]$ 。有:

$$\Delta\epsilon_{xz} = -n_e^2 n_o^2 (P_{44} S_5 + P_{41} S_6) = -n_e^2 n_o^2 (P_{44} d_{15} E_x - 2P_{41} d_{22} E_x) \quad (6)$$

很显然,  $\Delta\epsilon_{xz} \neq 0$ , 在相位匹配条件下, 能够使一种偏振态完全转换至另一种偏振态。设器件长度为  $L$ , 由(6)式可得中心波长的转换率为:

$$\eta = \sin^2 kL \quad (7)$$

当  $k = \pi/2L$  时,  $\eta \approx 100\%$ 。根据文献[5]:

$$k^2 = (\pi^2/2\lambda^2) M P_a \Gamma^2 \quad (8)$$

其中  $M$  为声光优值, 它与光弹系数  $[P]$ 、折射率  $n_{TE}$ 、 $n_{TM}$  以及声表面波速度  $V_a$  等因素有关, 由材料特性决定,  $\Gamma$  为声光模场交叠积分, 与器件结构有关,  $P_a$  为声表面波的功率密度。要实现接近 100% 的模式转换, 必须注入足够的功率。在  $\text{Ti} \cdot \text{LiNbO}_3$  波导型声光可调滤光器中, 可以采用单模表面声波导结构进一步降低驱动功率<sup>[7]</sup>, 这种表面声波导由两个  $\text{Ti}$  扩散的外覆盖区域和中间的非扩散区构成。由于  $\text{Ti}$  扩散区中表面波速度较高, 因而表面声波在这两个高速的覆盖区中间形成导波。由于表面波导限制了声波的发散及衍射效应, 使得窄孔径电极结构得以实现, 从而增加了功率密度, 使总的驱动功率降低。

## 2 器件制备

采用溅射和光刻剥离方法在  $x$  切  $y$  传  $\text{LiNbO}_3$  单晶表面制作  $\text{Ti}$  条图案, 然后经高温扩散

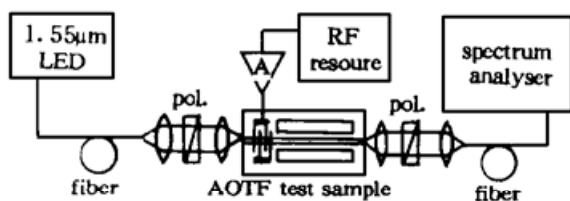


Fig. 2 Experimental setup for measurement

得到波导。首先制作声波导,  $\text{Ti}$  膜厚约 140 nm, 声波导由两条宽  $150 \mu\text{m}$ 、长约 16 mm、间隔  $110 \mu\text{m}$  的  $\text{Ti}$  膜条构成, 扩散温度  $1050^\circ\text{C}$ , 时间 22 小时。声波导制作完成之后, 用相似的方法在声波导中间制作单模光波导,  $\text{Ti}$  膜宽  $9 \mu\text{m}$ , 厚约 65 nm, 扩散温度  $1030^\circ\text{C}$ , 时间 7.5 小时。波导制作完成后, 进行端切割和精细抛

光。抛光后的样品进行电极薄膜溅射, 材料为纯 Al, 厚约 200 nm, 采用光刻腐蚀法制作叉指电极, 电极由 8 条对条宽 5.3  $\mu\text{m}$  的叉指构成, 孔径 120  $\mu\text{m}$ , 中心频率为 176 MHz, 采用 160 nH 电感串联匹配。

为了方便研究和测试, 器件两端的偏振部分采用分离结构, 偏振器由起偏器、自聚焦透镜和光尾纤构成, 界面处填充了匹配介质, 有效降低了插损。由于它们形成一个整体, 因此只需完成一次对准即可。整套测试装置原理如图 2 所示, 其中 A 为射频功率放大器, 其输出功率可达 1W 以上。

### 3 性能测试结果与讨论

将图 2 中的起偏器与检偏器轴向平行放置(均为 TE 通过)时, 可以测得的是模式转换信号的吸收光谱, 这种方式对于分析信号的转换率较为直观和有效。在 170~ 181 MHz 范围内调节射频信号频率时, 观察到对应 1.505~ 1.595  $\mu\text{m}$  的大范围可调偏振态转换, 结果见图 3。由于发光二极管光谱的限制, 没有在更大范围内进行调谐测试。

将射频信号频率固定在 175.7 MHz 时, 对应的有效转换波长为 1.55  $\mu\text{m}$ 。当驱动功率变化时, 转换率也随之变化, 见图 4, 功率从 0 至 80 mW 变化时, 转换率逐渐增大。大约在 75~ 80 mW 驱动功率时达到最大转换率, 转换率接近 97.5%。驱动功率超过 80 mW 后, 转换率下降。这一现象与(8)式描述的转换率~ 功率关系是相符的, 同时从光谱图上还可以看到, 当功率增大时, 偏向短波长一侧的边模高度增加了。这可能是由于功率增大时的局部热效应造成的。在观察整个波段内调谐的转换率~ 功率关系时还发现, 由于阻抗匹配造成不同波长对应的饱和驱动功率有一定的差异, 如果要求进行通道切换时仅仅只改变信号的频率, 则必

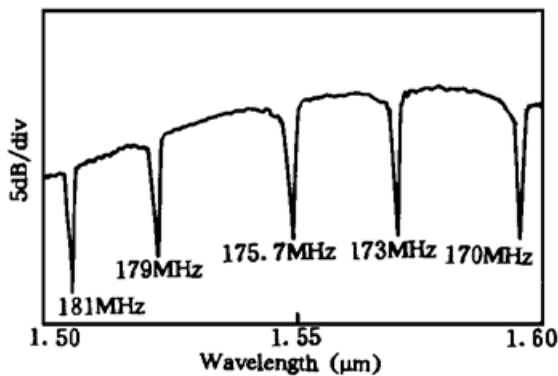


Fig. 3 The spectrum of AOTF: each peak was obtained at a single frequency acoustic excitation

须完善匹配网络, 使在整个调谐波段内都能达到很好的阻抗匹配(50 $\Omega$  或 75 $\Omega$ )。

滤波器的带宽和边模高度是两个重要的指标, 将图 2 中的起偏器与检偏器垂直放置(入射为 TE 通过, 出射为 TM 通过), 可以测得器件的透过光谱, 如图 5 所示。根据图 5 的谱线可以得到器件的 3 dB 带宽约 1.8 nm, 如果增加器件的长度, 还能得到更窄的带宽。图 5 中的最高一级边模约为 12% (即 -9.2 dB)。这与标准的 sinc(x) 函数的一级边模高度十分接近。从图中还可以看出, 短波与长波部分的边模抑制不同, 短波一侧的边模普遍要高一些, 长波一侧的边模甚至比 sinc(x) 函数的数值还

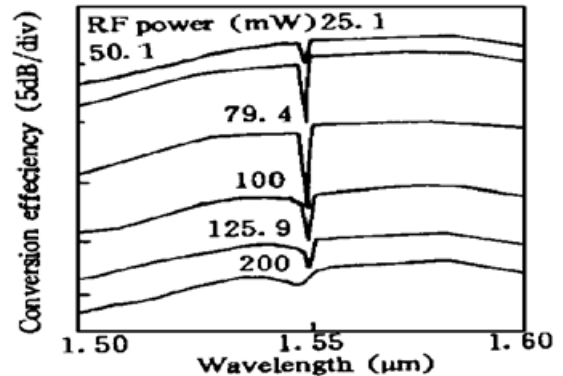


Fig. 4 TE-TM mode conversion efficiency

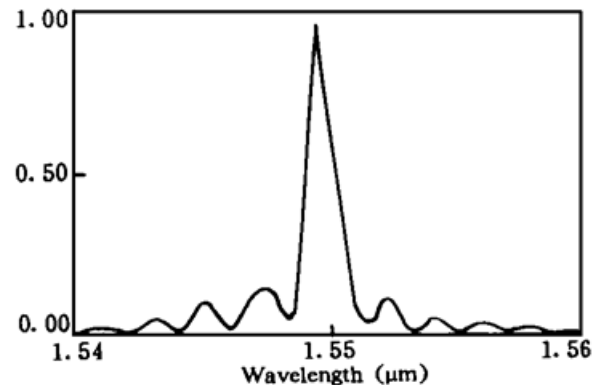


Fig. 5 Bandpass filter characteristics of AOTF, driving signal frequency: 175.7 MHz, driving power: 65 mW

低。这种现象是光线声光可调滤光器中特有的，它与表面波的端面吸收造成的不均匀热效应有关，有关问题的进一步研究将另文发表。

总之，作者研制的  $\text{Ti} \cdot \text{LiNbO}_3$  波导声光可调滤光器，在  $1.5 \mu\text{m}$  波段实现了可调滤光，带宽小于  $2 \text{ nm}$ ，通道驱动功率约  $80 \text{ mW}$ ，转换率达到  $97\%$  以上，包括分离的起偏、检偏器在内，器件的总插入损耗小于  $9 \text{ dB}$ 。与国外同类器件的性能相近。今后将在此基础上进一步研究降低边模高度、减小插入损耗以及与实用相关的温度特性、多通道操作等方向的具体问题。

### 参 考 文 献

- [1] K. W. Cheung, Acoustooptic tunable filters in narrowband WDM networks: system issues and network applications. *IEEE J. Select. Area. Commun.*, 1990, **8**(6) : 1015~ 1025
- [2] T. Coroy, P. J. Ellerbrock, R. M. Measures *et al.*, Active wavelength demodulation of Bragg fibre-optics strain sensor using acousto-optic tunable filter. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(18) : 1602~ 1603
- [3] D. A. Smith, J. E. Baran, K. W. Cheung *et al.*, Polarization-independent acoustically tunable optical filter. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(3) : 209~ 211
- [4] L. N. Binh, D. H. Steven, J. Livingstone, Electrostatically tunable acoustooptic TE-TM mode converter on a diffused optical waveguide. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(1) : 83~ 84
- [5] A. Yariv, Coupled-mode theory for guide-wave optica. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1973, **QE-9**(9) : 919~ 933
- [6] 徐介平, 声光器件的原理、设计和应用. 北京, 科学出版社, 1982 : 32

## 1.5 $\mu\text{m}$ Waveguide Acoustooptic Tunable Filter

Fu Yanfeng      Li Zuoyi

(Department of Solid State Electronics, Hua Zhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Li Tao      Liu Qiuhua      Mei Suohai

Liu Shueihua      Fang Luozhen      Lin Bing

(Wuhan Research Institute of Post & Telecommunications, Wuhan 430074)

(Received 25 May 1996; revised 25 September 1996)

**Abstract**  $1.5 \mu\text{m}$  waveguide acoustooptic tunable filter has been studied and fabricated. The SAW waveguide is used to reduce the RF driving power. Tunable optical filtering was realized over the whole  $1.5 \sim 1.6 \mu\text{m}$  range. Optical band width of the device is within  $2 \text{ nm}$ . The RF driving power need to obtain  $97\%$  conversion efficiency is nearly  $80 \text{ mW}$  ( $19 \text{ dBm}$ ) and the device total insertion loss is about  $9 \text{ dB}$ .

**Key words** acousto-optic tunable, mode conversion.