

集成光学声光可调谐波长滤波器的研制*

薛 挺¹⁾ 祁 芳¹⁾ 胡鸿璋¹⁾ 丁荣林²⁾ 耿 凡³⁾

- 1), 天津大学理学院, 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072
2), 天津大学电信工程学院, 天津 300072
3), 中国航天机电工业总公司津航技术物理研究所, 天津 300192

摘 要 阐述了中心波长为 $1.523 \mu\text{m}$ 的集成光学声光可调谐波长滤波器的各项理论参数、制作工艺以及性能测试。在有效声光相互作用长度 16 mm 、射频驱动功率 35 mW 时, 获得了模式转换效率大于 99.3% 、插入损耗小于 -4 dB 、带宽 1.6 nm 、 3 dB 调谐范围为 140 nm 的实验结果。

关键词 集成光学, 声光耦合, 波长滤波器。

1 引 言

波分复用技术(WDM)是大幅度提高光纤通信系统容量的有效途径, 因此是光纤通信技术发展的必然趋势^[1]。而波长选择滤波器或波长路由器是波分复用系统中的关键器件, 因此也得到飞速发展^[2]。

波长选择滤波器的类型有声光可调谐滤波器、法布里-珀罗型滤波器和光栅阵列等。其中, 声光可调谐滤波器具有多态波分复用开关的功能, 是其它类型的滤波器所无法实现和无可比拟的, 因此是可调谐波长滤波器的最佳选择。

我们在几年前已经分别研制成 TE/TM 模转换器^[3]和 TE 通偏振器^[4]。本文将 TE/TM 模转换器和 TE 通偏振器集成于一体, 并且改善了叉指换能器的阻抗匹配, 制成实用的可调谐波长滤波器, 如图 1 所示。整个器件封装在 $13 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$ 铝合金盒子中, 两端接有尾纤, 可以直接接入光纤通讯系统使用。该器件已于 1999 年 11 月通过由国家自然科学基金委员会主持的鉴定, 它在驱动功率、通道带宽、可调波长范围、插入损耗等性能参数方面达到国外与偏振有关的同类器件的先进水平。

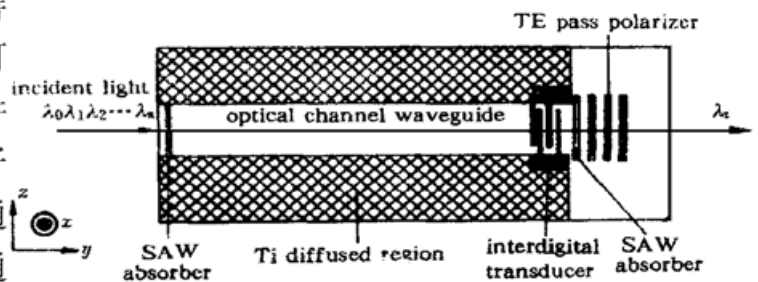


Fig. 1 Schematic diagram of the tunable wavelength filter

* 国家自然科学基金资助课题(19674039), 并得到集成光电子学国家重点实验室的部分资助。

收稿日期: 1999-01-18; 收到修改稿日期: 1999-03-18

2 滤波器理论参数与分析

2.1 模转换器的带宽

设已在 x 向切割 y 向传输 LiNbO_3 晶体上用扩散 Ti 方式制成光波导。光波入射到光波导中, 此时 TE 模和 TM 模相互独立; 如果利用表面声波给光波导加上周期性调制, 当满足相位匹配条件时, 会引起 TE 模和 TM 模强烈相互作用。

在准相位匹配情况下, TM 模与 TE 模之间的转换效率 η 与声光耦合系数 Γ 、声光相互作用长度 l 、相位失配因子 δk 等因素有关^[5]

$$\eta = (\Gamma l)^2 \frac{\sin^2 \theta}{\theta^2}, \quad (1)$$

式中

$$\theta = [(\Gamma l)^2 + (\delta k l / 2)^2]^{1/2}, \quad (2)$$

其中相位失配因子 δk 由下式给出

$$\delta k = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n - \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (3)$$

式中 λ 为自由空间光波波长, Λ 为声表面波波长, $\Delta n = |n_{\text{TE}} - n_{\text{TM}}|$ 为波导的模双折射率。当相位完全匹配时, $\delta k = 0$; 如果器件还满足 $\Gamma l = \pi/2$, 则从(1)式容易得到 $\eta = 1$, 即在这种情况下, TM(TE)模可以完全转化为 TE(TM)模。在(3)式中, 令 $\delta k = 0$, 可以解出相位匹配时 Λ 与 λ 的关系为

$$\Lambda = \lambda \Delta n. \quad (4)$$

对于 $\lambda = 1.523 \mu\text{m}$, $n_o = 2.207$, $n_e = 2.133$, $\Delta n = 0.074$, 由上式解得 $\Lambda = 20.6 \mu\text{m}$ 。

由(3)式易见, 当 Λ 固定不变时, 如果光波波长偏离中心波长 λ_0 , 则 δk 不再等于零, δk 与波长变化量 $\delta \lambda$ 的关系为

$$|\delta k| = 2\pi \Delta n \frac{\delta \lambda}{\lambda^2}. \quad (5)$$

将上式代入(1)式, 并且令 $\eta = 1/2$, $\Gamma l = \pi/2$, 可解得 $\delta k l = \sqrt{2\pi}$, 代入(5)式求得

$$\delta \lambda = \frac{\lambda^2}{\sqrt{2\pi} \Delta n l}.$$

因此, 半极大值处的波长全宽度为

$$\Delta \lambda = 2\delta \lambda = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\lambda^2}{\Delta n l}. \quad (6)$$

若声光相互作用有效长度为 16 mm, 则从上式解得: $\Delta \lambda = 1.56 \text{ nm}$ 。

另外, 由(4)式可以看出, 若忽略 Δn 对波长的变化关系与声波的色散, 可调谐滤波器波长变化范围与声波频率关系为

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta \Lambda}{\Lambda} = \frac{\Delta f_a}{f_a}, \quad (7)$$

其中 f_a 和 Δf_a 是声波频率及其变化量。

2.2 驱动功率

耦合系数 Γ 由下式给出^[6]

$$\Gamma^2 = \frac{\pi^2}{2\lambda^2} I_a M q^2, \quad (8)$$

$$\text{式中} \quad M = \frac{(n_{TE}n_{TM})^3 p^2}{\rho V_a^3}, \quad (9)$$

p 为弹光张量, ρ 为材料密度, I_a 为声波强度(W/m^2), q 为 TM 模场、TE 模场和声波场的重叠积分。当达到完全转换时, 有 $\Gamma l = \pi/2$, 由(8)式可得

$$I_a = \lambda^2/2l^2 M q^2, \quad (10)$$

对于 x 向切割 y 向传输 LiNbO_3 晶体, 其参数为:

$$p = p_{41} = 0.15, \quad \rho = 470 \text{ kg}/\text{m}^3, \quad V_a = 3670 \text{ m}/\text{s}, \quad \Delta n = 0.074,$$

因此, 从(9)式求得 $M = 9.58 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ 。

瑞利声波截面为深度 h 与宽度 w 之积。对于瑞利波, 若 $h = \Lambda = 20 \mu\text{m}$, 且 $w = 7.5 \Lambda = 150 \mu\text{m}$ 。另外, 设声光相互作用长度 $l = 16 \text{ mm}$, 则在理想情形下 ($q = 1$), 从(10)式可求得 $I_a = 0.47 \text{ W}/\text{mm}^2$, 声功率 $P_a = I_a h w = 1.4 \text{ mW}$ 。实际上由于光波导深度只有几个微米, 而瑞利声波的深度达几十微米, 因此重叠积分 q 的值非常小, 所需要的声功率是理想情形下的几十倍。

2.3 开关时间

滤波器开关时间 τ 与声表面波在晶体中传播速度 V_a 和有效声光相互作用长度 l 有关: $\tau = l/V_a$ 。 $V_a = 3670 \text{ m}/\text{s}$, 当 $l = 16 \text{ mm}$ 时, $\tau = 4.36 \mu\text{s}$ 。

3 滤波器的制作与性能测试

3.1 滤波器制作

为了避免其它信号光的干扰, 要求输入光波在晶体中为 TM 模, 并在滤波器出射端制有 TE 通偏振器。关于 TE 通偏振器的原理及制作已在文献[4]中详细叙述。因为 x 向切割 y 向传输 LiNbO_3 晶体的声光耦合系数较其它切向的大, 故本器件采用这种切向的 LiNbO_3 晶体作为基底。

如图 1 所示, 先在 x 向切割 y 向传输 LiNbO_3 晶体表面上溅射两条 $220 \mu\text{m}$ 宽、 140 nm 厚的钛条, 两钛条之间的距离为 $150 \mu\text{m}$ 。然后在 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$, 通湿氧的气氛下扩散 31 小时。由于声波在扩钛的铌酸锂中的折射率比未扩散部分低, 因此两钛条之间的通道就构成了声波导。

再在 LiNbO_3 基片上已扩散的两钛条中间溅射一条宽 $8 \mu\text{m}$ 、厚 65 nm 的钛条, 在 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ 、湿氧的气氛下扩散 7 小时, 制成光波导。

第三步, 在基片上制作 TE 通偏振器。为了进一步提高消光比, TE 通偏振器由 3 段组成, 每段沿波导方向的宽度为 0.5 mm , 均由厚 24 nm 的 MgO 膜和厚 100 nm 的铝膜构成。相邻两段之间隙为 0.3 mm 。

第四步, 制作叉指换能器。它具有十对叉指, 由在基片上溅射 140 nm 厚的铝膜制成。本文制作了周期略为不同的几组叉指, 其中效果最好的周期为 $20.4 \mu\text{m}$ 。

第五步, 将样品的两端面抛光, 并在样品两端涂上胶层作为声波吸收器。两吸收器之间的长度为 16 mm , 即为器件的有效声光相互作用长度。最后连上 $1.5 \mu\text{m}$ 的单模光纤, 安装固定制成实用器件。

3.2 滤波器性能测试

如图 2 所示, 滤波器性能测试装置为: 波长为 $1.523 \mu\text{m}$ 的氦氛激光经格兰棱镜产生平面偏振光, 用 $40\times$ 物镜耦合入滤波器的光纤, 输出光波用 PIN 探测器接收。

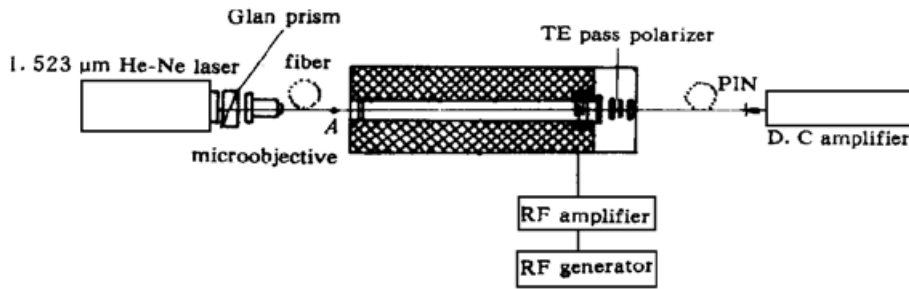


Fig. 2 Experimental setup for measurement of the filter

3.3 测试结果

用 HP8656A 型高频信号发生器产生高频正弦波, 经高频功率放大器放大后输出到已经达到阻抗匹配的叉指换能器上。

1) 扫描信号发生器频率, 并调节输出信号功率, 如图 3 所示, 在频率为 177.82 MHz 时, 获得最大模式转换效率大于 99.3%, 一级次峰透过率最大为 12.5%, 即 -9 dB, 达到器件使用要求。此时用 HP436A 型功率计测量经高频功率放大器后的射频信号功率为 35 mW, 模式转换效率曲线与理论值相符合, 且声波驱动电功率很低。另外, 用光功率计测出光纤输出末端的功率, 并将输入光纤在图 2 中 A 点断开, 测出这里输入光纤的光功率, 求出光纤 → 波导 → 光纤的插入损耗为 -4 dB。

2) 将声波频率固定在达到最大模式转换所需的频率, 改变射频驱动功率, 测得其与模式转换效率的关系如图 4 所示。

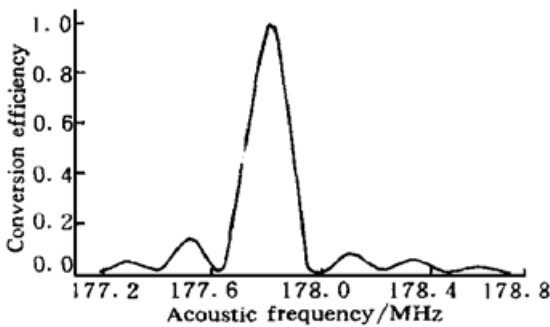


Fig. 3 Conversion efficiency of the filter as a function of the acoustic frequency for a fixed RF power $P = 35$ mW

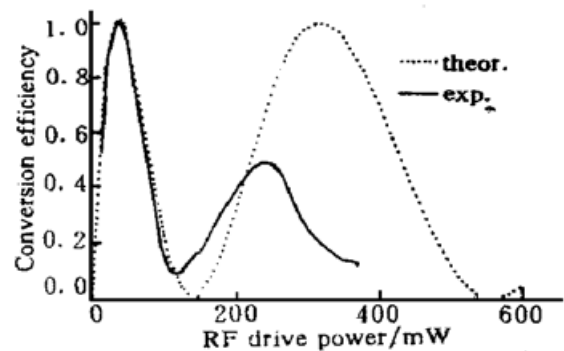


Fig. 4 Conversion efficiency of the filter as a function of RF drive power for a fixed acoustic frequency 177.82 MHz

3) 利用 HP8753C 型网络分析仪和 HP825046A 型 S 参数测试仪测量叉指的频率特性, 得出半极大值全宽度为 $\Delta f = 16.6$ MHz, 因而从(7)式可以估算出调谐范围 $\Delta \lambda = 142$ nm。还用中心波长为 1.45 μm 的半导体激光器代替氦氖激光器, 并改变信号发生器频率和功率, 测出在 $\lambda = 1.45$ μm 的转换效率 $\eta = 0.47$, 证实了滤波器的调谐范围。

从图 3 可见, 光波波长一定时, 调节信号源频率, 滤波器通带两端不仅存在旁瓣(次峰), 且次峰高度不对称, 即左边的次峰高于理论值核函数(sinc), 右边的次峰低于理论值。另外, 从图 4 可见, 在声波功率为模式最大转换时所需功率 $P_{100} = 35$ mW 的 9 倍时, 模式转换并没有再次达到最大转换, 而在约 8 倍 P_{100} 时达到最大为 50% 的转换。

结 论 本文报道了中心波长为 $1.523 \mu\text{m}$ 的声光可调谐波长滤波器的研制过程。所研制的器件在射频驱动功率为 35 mW 、声光相互作用长度为 16 mm 时, 对信号的插入损耗最大为 -4 dB 、带宽为 1.6 nm 、调谐范围为 140 nm 、模式转换效率大于 99.3% 。该器件性能稳定, 可用于光纤通信波分复用系统中的滤波器、路由器。又由于该器件带宽很窄且可连续调谐, 故也适用于光谱测量与分析, 因而具有很大的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Cheung K W. Acoustooptic tunable filters in narrowband WDM networks: System issues and network applications. *IEEE Selected Areas in Commun.*, 1990, **8**(6): 10151025
- [2] Smith D A, Chakravarthy R S, Bao Z *et al.*. Evolution of the acousto-optic wavelength routing switch. *J. Lightwave Technology*, 1996, **14**(6): 10051019
- [3] 胡鸿璋, 戴和义, 赵 慈等. 共线声光耦合的集成光学 TE/TM 模转换器. *光子学报*, 1997, **26**(4): 340-344
- [4] Hu H Z, Cheng G, Gen F *et al.*. Design of Metal-Clad Ti: LiNbO₃ polarizer. *Chinese J. Lasers*, 1996, **B5**(5): 444450
- [5] 胡鸿璋, 凌世德. 应用光学原理, 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [6] 徐介平. 声光器件的原理、设计和应用. 北京: 科学出版社, 1982.

Development of Integrated Optical Acoustooptic Tunable Wavelength Filter

Xue Ting¹⁾ Qi Fang¹⁾ Hu Hongzhang¹⁾ Ding Ronglin²⁾ Geng Fan³⁾

1), *Optoelectronic Information Science and Technology Laboratory,*

College of Natural Sciences, Tianjin University, Tianjin 300072

2), *College of Electronic Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072*

3), *China Space Flight Industry Corporation, Jinhang Institute for Technical Physics, Tianjin 300192*

(Received 18 January 1999; revised 18 March 1999)

Abstract The characteristics of the integrated optical acoustooptic tunable wavelength filter have been theoretically analyzed. A practical device with central wavelength of $1.523 \mu\text{m}$ has been fabricated on x -cut Y -propagation LiNbO₃ substrate. The effective acoustooptic interaction length in this device is 16 mm and a TE-TM mode conversion efficiency of 99.3% has been achieved with only 35 mW of RF drive power. The tuning wavelength range is 140 nm with a FWHM of 1.6 nm . The over (fiber to fiber) insertion loss is -4 dB .

Key words integrated optics, acoustooptic coupling, wavelength filter.