

文章编号: 0258-7025(2001)06-0541-04

基于单模光纤的可调谐声光滤波器*

厉 群 刘小明 李 佟 彭江得 周炳琨

(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 从模式转换效率、带宽和波长调谐范围等角度分析了普通单模光纤中声光模式转换的性质,并在实验上实现了插入损耗小于 0.1 dB,带宽小于 1 nm,调谐范围大于 30 nm 的光纤声光滤波器。

关键词 声光滤波器,单模光纤,模式转换效率,带宽,波长调谐范围

中图分类号 TN 713 文献标识码 A

Acousto-optical Tunable Filters Based on Single Mode Fibers

LI Qun LIU Xiao-ming LI Tong PENG Jiang-de ZHOU Bing-kun

(Electronic Engineering Department of Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The acousto-optical mode conversion efficiency, filtering bandwidth and wavelength tuning range of the acousto-optical tunable filters (AOTF) based on single mode (SM) fiber are analyzed theoretically. A fiber AOTF with < 0.1 dB insertion loss, < 1 nm bandwidth and > 30 nm tuning range is realized experimentally.

Key words AOTF, SM fiber, mode conversion efficiency, bandwidth, wavelength tuning range

1 引 言

可调谐光滤波器在未来的光纤通信系统中,特别是 WDM 光通信系统中有广泛的应用。实现可调谐光滤波可采用 F-P 干涉仪或利用电光、声光等物理效应。其中,声光滤波器以其极宽的可调谐范围 (> 100 nm)、较快的调谐速度 (< 10 ms) 和较好的滤波特性获得了广泛的重视。但是,现有的声光可调谐滤波器基本上是基于 LiNbO₃ 波导的,它的缺点是插入损耗和偏振相关性比较大。近年来,人们开始研究利用光纤中的声光效应来实现可调谐滤波^[1]。由于这种滤波器由普通单模光纤构成,不但与光纤通信系统完全兼容,具有极低的插入损耗和较小的偏振相关性,而且可以通过加载多个频率的声波,按需要构成各种滤波谱形状以适应特殊的需要(例如 EDFA 增益均衡滤波器^[2]),因而是很有发展前途的一类全光纤可调谐光滤波器。本文将从模式转换效率、带宽和波长调谐范围等几方面分析普通单模光纤中声光模式转换的性质,并在实验上实现了插入

损耗小于 0.1 dB,带宽小于 1 nm,调谐范围大于 30 nm 的光纤声光滤波器。

2 光纤中声光相互作用的基本原理

光纤中声光相互作用的基本原理如图 1 所示。压电陶瓷(PZT)产生的声波经过铝锥放大后进入一段去掉涂敷层的光纤,并在光纤中产生周期性的折射率变化。当折射率变化的周期等于单模光纤中某一波长处的基模(LP₀₁模)与包层模(LP₁₁模,LP₁₂模,LP₁₃模...)之间的拍长时,基模就通过声光相互作用耦合成为包层模并被后面光纤的涂敷层吸收,从而在该波长处形成滤波。

声光耦合系数 κ_0 与声波造成的折射率变化大小有关,也与参与模式转换的两个光波模式之间的模场交叠积分有关^[3]

$$\kappa_0 = \frac{\pi}{\lambda} \int_A \psi_1(x, y) \Delta n(x, y) \psi_2^*(x, y) dx dy \quad (1)$$

其中 $\Delta n(x, y)$ 为声波造成的折射率变化, $\psi_1(x, y)$, $\psi_2^*(x, y)$ 分别为基模与包层模的归一化场分布。

对于一定的声波频率,在满足波矢匹配条件

$$L_B(\lambda) = \Lambda \quad (2)$$

(其中 $L_B(\lambda)$ 为基模与包层模拍长, Λ 为声波波长,

* 国家自然科学基金(编号 69782003)资助项目。

收稿日期 2000-04-08;收到修改稿日期 2000-05-29

$\Lambda \sim f^{-1/2}$ (f 为声波频率)的光波长处声光模式转换效率最大,相应的光波长为滤波器的峰值波长。声光滤波器在峰值波长附近的半峰值全宽度(FWHM)带宽为^[4]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{0.8L_B}{L} \frac{1}{N} \quad (3)$$

其中 L 为裸光纤长度, $N = (\partial L_B / \partial \lambda)(L_B / \lambda)$ 为光纤的色散参数,它主要取决于光纤的波导色散。

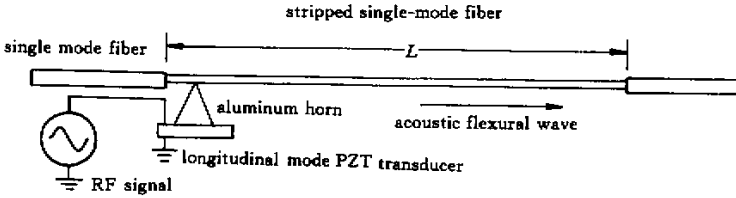


图 1 单模光纤可调谐声光滤波器结构简图

Fig.1 Schematic diagram of single-mode fiber acousto-optic tunable filter

3 光纤中声光相互作用与滤波特性的数值分析

下面以匹配包层(MC)单模光纤(阶跃折射率分布,包层折射率 $n_0 = 1.458$,芯包折射率差 $\Delta n = 0.33\%$,芯径 $a = 8.3 \mu\text{m}$)为例,对光纤中的声光相互作用及以此为基础的滤波器的工作特性进行数值分析。

3.1 声波谐振频率与声光耦合系数

根据(2)式和(1)式可以计算出利用MC单模光纤构成的声光滤波器在以 1550 nm 为中心波长时不

同模式转换所对应的声波频率和声光耦合系数(假设声波振幅 $u_0 = 10 \text{ nm}$),计算结果如表 1 所示。可见,利用光纤中不同的包层模可以在不同的声波频率下构成中心波长在同一波长的声光滤波器。但是,在不同的包层模上产生声光相互作用的难易程度是不同的,这一点可以用品质因数(单位声波功率产生的声光耦合系数)来衡量。从表 1 可以看出,利用 LP_{11} 模, LP_{12} 模, LP_{13} 模, LP_{14} 模构成的声光滤波器品质因数比较高,这是因为这 4 个包层模与光纤基模的模场交叠积分比较大。

表 1 不同包层模声光模式转换效率的比较

Table 1 Acousto-optic mode conversion efficiency for different cladding modes

Optical mode	Acoustic frequency f	Acousto-optic mode conversion efficiency κ_0	Power of acoustic wave P_a	Figure of merit κ_0/P_a
$LP_{01} \rightarrow LP_{11}$	2 MHz	1.61 m^{-1}	0.648 mW	$2.49 \text{ m}^{-1}\text{mW}^{-1}$
$LP_{01} \rightarrow LP_{12}$	2.34 MHz	4.06 m^{-1}	0.954 mW	$4.26 \text{ m}^{-1}\text{mW}^{-1}$
$LP_{01} \rightarrow LP_{13}$	2.9 MHz	6.57 m^{-1}	1.6 mW	$4.06 \text{ m}^{-1}\text{mW}^{-1}$
$LP_{01} \rightarrow LP_{14}$	3.74 MHz	8.05 m^{-1}	3.1 mW	$2.62 \text{ m}^{-1}\text{mW}^{-1}$
$LP_{01} \rightarrow LP_{15}$	5 MHz	8.38 m^{-1}	6.4 mW	$1.32 \text{ m}^{-1}\text{mW}^{-1}$
$LP_{01} \rightarrow LP_{16}$	6.87 MHz	8.1 m^{-1}	14 mW	$0.58 \text{ m}^{-1}\text{mW}^{-1}$

另一方面,在相同声波频率下,基于不同包层模的滤波峰值波长不同,声光耦合系数和品质因数随不同模式的变化规律与表 1 基本相同,但由于光波模式交叠积分随波长变化,因此它们的具体数值有所差异。例如,声波频率 $f = 2.35 \text{ MHz}$ 时,上述 MC 光纤对应于 $LP_{01} \rightarrow LP_{11}$, $LP_{01} \rightarrow LP_{12}$, $LP_{01} \rightarrow LP_{13}$ 和 $LP_{01} \rightarrow LP_{14}$ 模式转换的滤波峰值波长分别为 1500 nm , 1549 nm , 1646 nm 和 1870 nm ,声光耦合系数分别为 1.93 m^{-1} , 4.08 m^{-1} , 5.23 m^{-1} 和 4.94 m^{-1} ,品质因数分别为 $2 \text{ m}^{-1}\text{mW}^{-1}$, $4.25 \text{ m}^{-1}\text{mW}^{-1}$, 5.45 m^{-1}

mW^{-1} 和 $5.15 \text{ m}^{-1}\text{mW}^{-1}$ 。由于 $LP_{01} \rightarrow LP_{13}$ 模式转换工作在较长的波长,两个光波模式交叠积分较大,因此它的品质因数超过 $LP_{01} \rightarrow LP_{12}$ 模式转换。

3.2 波长调谐范围与波长调谐度

宽带可调谐是声光滤波器的显著优点,在光纤声光滤波器中这一特点也很突出。根据(2)式可以得到声光滤波器的中心波长随声波频率的变化关系,即波长调谐度为

$$\frac{\partial\lambda}{\partial f} = -\frac{\lambda}{2f} \frac{1}{N} \quad (4)$$

例如,对于 MC 单模光纤,当采用 $LP_{01} \rightarrow LP_{11}$ 模式转换,工作波长在 1550 nm 时,声波频率 $f = 2$ MHz,色散量 $N = 2.43$,波长调谐度为 0.159 nm/kHz。如果

采用的压电陶瓷工作带宽大于 1 MHz,则该光纤声光滤波器的波长调谐范围大于 200 nm。其他几种模式转换相应的调谐度见表 2。

表 2 不同包层模色散参数和中心波长调谐度的比较

Table 2 Dispersion parameter and wavelength tuning rate for different cladding modes

	$LP_{01} \rightarrow LP_{11}$	$LP_{01} \rightarrow LP_{12}$	$LP_{01} \rightarrow LP_{13}$	$LP_{01} \rightarrow LP_{14}$	$LP_{01} \rightarrow LP_{15}$
Dispersion parameter N	2.43	2.12	1.71	1.31	0.91
Tuning rate (nm/kHz)	0.159	0.156	0.156	0.158	0.17

3.3 光纤声光滤波器的带宽

从(3)式和(2)式可以看出,声光滤波器的带宽取决于器件的长度 L ,声波的频率 f 和光纤的色散参数 N 。器件的长度越长,声波的频率越高,光纤的波导色散越大,声光滤波器的带宽就越窄。对于 MC 单模光纤,当采用 $LP_{01} \rightarrow LP_{11}$ 模式转换,器件长度为 30 cm,中心波长在 1550 nm 时,滤波器的带宽为 1.27 nm。值得一提的是,对于不同的包层模,色散参数 N 是不同的,如表 2 所示。可见,为了构成窄带光纤声光滤波器,采用 $LP_{01} \rightarrow LP_{11}$ 模式转换比较有利。

4 光纤声光滤波器的实验结果

我们采用长度为 30 cm 的 Lucent TrueWave 单模光纤,构成如图 1 所示的全光纤声光滤波器。其中压电陶瓷中心频率为 3.5 MHz,铝锥底面直径为 8 mm,高度 8 mm。RF 信号源输出频率范围 1 Hz ~ 10 MHz,频率稳定度 10^{-6} 。

光纤声光滤波器的滤波谱用 ANDO AQ-6315A/B 型光谱仪测量。测量时采用宽带 LED(非偏振光)作为输入光源,其输出功率为 60 μ W,谱宽为 200 nm (1420 ~ 1620 nm)。声光滤波器的滤波谱由输出光谱与输入光谱相减得到。

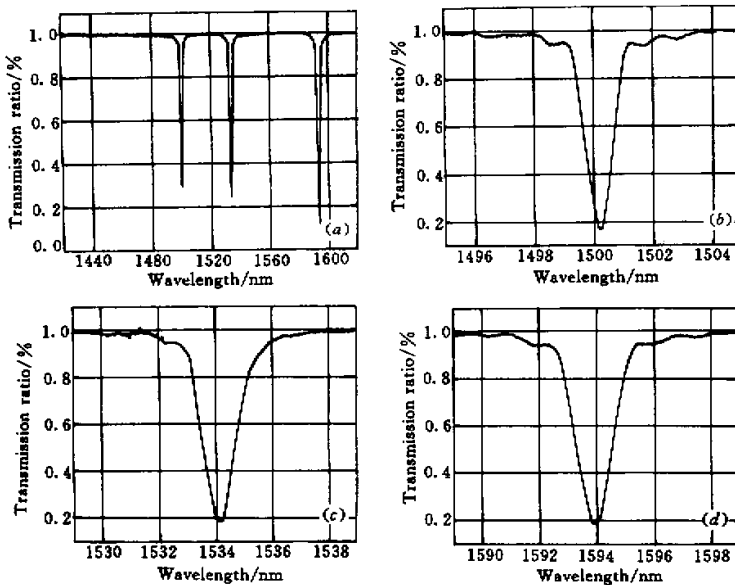


图 2 基于 TrueWave 光纤的 AOTF 滤波谱(光纤长度 $L = 30$ cm, 声波频率 $f = 2.9$ MHz)

Fig. 2 Filtering spectrum for AOTF based on TrueWave fiber (Fiber length $L = 30$ cm, acoustic frequency $f = 2.9$ MHz)

(a) $LP_{01} \rightarrow LP_{11}$, $LP_{01} \rightarrow LP_{12}$, $LP_{01} \rightarrow LP_{13}$ mode; (b) $LP_{01} \rightarrow LP_{11}$ mode, $V_{p-p} = 4.2$ V;

(c) $LP_{01} \rightarrow LP_{12}$ mode, $V_{p-p} = 3.3$ V; (d) $LP_{01} \rightarrow LP_{13}$ mode, $V_{p-p} = 2.9$ V

图 2 是该声光滤波器在声波频率 $f = 2.9$ MHz 时的滤波谱。从图 2(a) 可以看到该滤波器在 1500 nm, 1534 nm 和 1594 nm 处有 3 个滤波峰, 它们分别对应于 $LP_{01} \rightarrow LP_{11}$, $LP_{01} \rightarrow LP_{12}$ 和 $LP_{01} \rightarrow LP_{13}$ 模式转换 3 个模式的转换效率依次递增, $LP_{01} \rightarrow LP_{13}$ 模式的转换效率最高, 这和前面的理论分析结果相符。为了使这 3 个滤波峰达到相同的模式转换效率, 压电陶瓷上所加电压分别为 4.2 V, 3.3 V 和 2.9 V, 相应的滤波谱分别示于图 2(b) ~ (d)。可以看出, 这 3 个滤波峰的 FWHM 带宽分别为 1.04 nm, 1.33 nm 和 1.46 nm。改变声波频率重新测量 3 个滤波峰的峰值波长, 可以得到它们的波长调谐度分别为 0.11 nm/kHz, 0.123 nm/kHz 和 0.148 nm/kHz, 根据 (5) 式计算出相应的 N 值为 2.35, 2.15 和 1.86, 带宽与 N 值确实成反比。如果采用具有较大波导色散的单模

光纤(如色散补偿光纤)可以实现更窄带宽的光纤声光滤波器。

图 3 是该声光滤波器采用 $LP_{01} \rightarrow LP_{11}$ 模式转换在声波频率 $f = 2.17$ MHz (a) 和 $f = 3.11$ MHz (b) 时的滤波谱, 其峰值波长分别为 1594 nm 和 1478 nm, 因此该滤波器的波长调谐范围可以达到大于 100 nm。但是从图 2 看到, 对应于 $LP_{01} \rightarrow LP_{11}$ 和 $LP_{01} \rightarrow LP_{12}$ 模式转换的滤波峰间距仅为 34 nm, 因此该声光滤波器的波长调谐范围大于 30 nm。利用其他种类的光纤或采用对光纤刻蚀的方法可以增加不同模式间滤波峰的间距, 从而大大增加光纤声光滤波器的波长调谐范围。

由于该滤波器采用全光纤结构, 因此它的插入损耗主要取决于接头和焊点等损耗, 实测只有 0.1 dB。

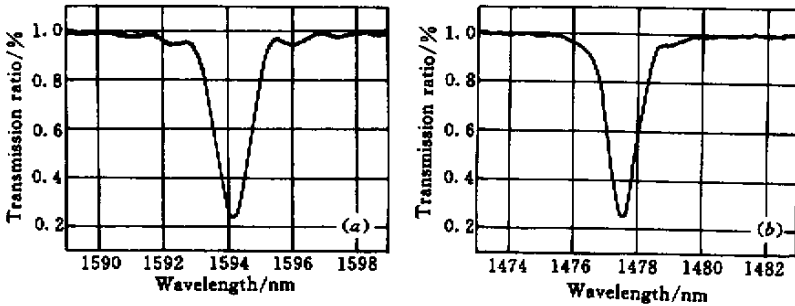


图 3 TrueWave 光纤声光滤波器在不同声波频率下的滤波谱

Fig.3 Filtering spectrum of TrueWave fiber AOTF under different acoustic frequency

(a) $f = 2.17$ MHz, $\lambda_c = 1594$ nm; (b) $f = 3.11$ MHz, $\lambda_c = 1478$ nm

5 结 论

本文对基于单模光纤的声光滤波器进行了数值分析和实验研究, 比较了不同光波模式转换时的声光耦合系数、品质因数和滤波带宽。指出 $LP_{01} \rightarrow LP_{11}$ 模式转换的带宽较窄, 但 $LP_{01} \rightarrow LP_{12}$ 和 $LP_{01} \rightarrow LP_{13}$ 模式转换的效率较高。采用商用单模光纤, 实验上实现了插入损耗小于 0.1 dB, 带宽 1 nm, 波长调谐范围大于 30 nm 的全光纤声光滤波器。

参 考 文 献

- 1 H. S. Kim, S. H. Yun, I. K. Kwang *et al.*. All-fiber acousto-optic tunable notch filter with electronically controllable spectral profile. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(19):1476 ~ 1478
- 2 H. S. Kim, S. H. Yun, H. K. Kim *et al.*. Actively gain-flattened erbium-doped fiber amplifier over 35 nm by using all-fiber acousto-optic tunable filters. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6):790 ~ 792
- 3 T. A. Birks, P. St. J. Russell, D. O. Culverhouse. The acousto-optic effect in single-mode fiber tapers and couplers. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(11):2519 ~ 2529
- 4 D. Ostling, H. E. Engan. Narrow-band acousto-optic tunable filtering in a two-mode fiber. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(11):1247 ~ 1249