

文章编号: 0258-7025(2001)09-0829-04

单模光纤声光滤波器带宽特性的研究

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)

摘要 研究了基于匹配包层(MC)、色散位移(DS)和色散补偿(DC)单模光纤的声光滤波器的带宽特性。研究结果表明利用具有比较强的波导色散的光纤可以实现窄带声光滤波器。为了描述光纤的色散特性与滤波器带宽的关系,定义了一个新的表征光纤色散特性的参数 N 并提出了通过测量光纤声光滤波器峰值波长调谐度来测量色散参数 N 的新方法。采用商用 DC 光纤在实验上实现了带宽为 0.55 nm 的半高全宽(FWHM)全光纤声光滤波器。

关键词 声光滤波器, FWHM 带宽, 光纤色散

中图分类号 TN 713⁺.1 **文献标识码** A

Study on Bandwidth Characteristics of AOTF Based on Single Mode Fibers

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

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Acoustooptic tunable filters (AOTF) based on MC (matched cladding), DS (dispersion shifted) and DC (dispersion compensation) fiber were studied. It is found that the fiber with large waveguide dispersion is a promising candidate to reduce the bandwidth of AOTF. In order to describe the relations between the fiber dispersion and the filters bandwidth, a dispersion parameter N is defined and its relation to the tuning rate of the fiber AOTF is derived. This allows one to estimate the dispersion properties of a fiber by using the more easily measurable parameter of tuning rate. Experimentally, as narrow as 0.55 nm of FWHM bandwidth was demonstrated on commercially available DC fiber.

Key words AOTF, bandwidth, fiber dispersion

1 引言

单模光纤声光滤波器^[1]以其极低的插入损耗 (<0.1 dB),较宽的调谐范围(>200 nm),较低的功效和较小的偏振相关性得到了广泛的重视,成为光纤通信系统中比较有发展前途的一类可调谐滤波器,并且已经被应用于 EDFA 的动态增益均衡中^[2]。然而目前这类滤波器的带宽还不够窄(2~3 nm),限制了它们在 WDM 光通信系统中窄带宽场合的应用。本文研究了基于 MC, DS 和 DC 三种光纤的声光滤波器的带宽特性,指出具有较大波导色散的光纤是实现窄带光纤声光滤波器的最佳选择。

2 理论分析

光纤声光滤波器的工作原理在文献[1]中已详

细描述。这种滤波器利用单模光纤中基模(LP₀₁模)在声波作用下到包层模(LP₁₁模, LP₁₂模, LP₁₃模...)的模式转换,使包层模被光纤的涂敷层吸收。这种波长相关的损耗机制就形成滤波。

由光纤模式耦合理论出发,经过推导可以得到这种滤波器在波失匹配波长(中心波长)附近的带宽为^[1]

$$\Delta\lambda = \frac{0.8}{L} \left[\frac{\partial L_B(\lambda)}{\partial \lambda} \right]^{-1} [L_B(\lambda)]^2 \quad (1)$$

其中 L 为光纤长度, $L_B(\lambda)$ 为基模与包层模的拍长,满足波失匹配条件时 $L_B(\lambda)$ 等于声波波长 Λ 。这里,我们定义一个描述光纤色散特性的无量纲的数 N

$$N = \frac{\partial L_B / \partial \lambda}{L_B / \lambda} \quad (2)$$

则(1)式改写为

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

从(3)式中可以看出,为了实现窄带声光滤波器,可以增加光纤的长度,减小声波的波长(增加声波的频率)和采用具有较大 N 值的光纤。其中光纤的长度受到器件尺寸和声波衰减的限制,不能过份增长;而高频的声波对产生有效的声光耦合是不利的^[4],因此采用具有较大 N 值的光纤是实现窄带光纤声光滤波器的一种有效途径。

根据(3)式和拍长的定义可以得到

$$N = -\lambda L_B \left(\frac{\partial \beta_{01}}{\partial \lambda} - \frac{\partial \beta_{1n}}{\partial \lambda} \right) \quad (4)$$

其中 β_{01} 和 β_{1n} 分别为基模和包层模的传播常数。由于弱导光纤的 β_{01} 和 β_{1n} 值非常接近,材料色散相同而被抵消,但基模和包层模的波导色散不相同,因此 N 值主要取决于光纤的波导色散。

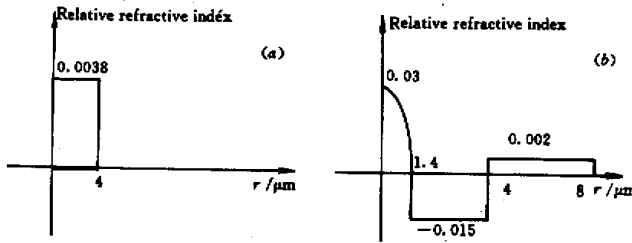


图1 两种不同单模光纤的折射率分布

(a) 阶跃折射率分布单模光纤; (b) 色散补偿单模光纤

Fig. 1 Refractive index profile for two kinds of SM fibers

(a) SM fiber with step index profile; (b) SM fiber with DCF index profile

表1 两种光纤的色散参数(N)和波长调谐度(T)(工作波长 $\lambda = 1550$ nm)

Table 1 Dispersion parameter (N) and wavelength tuning rate (T) for the two fibers (working wavelength $\lambda = 1550$ nm)

Refractive index profile	Parameters	$LP_{01} \rightarrow LP_{11}$	$LP_{01} \rightarrow LP_{12}$	$LP_{01} \rightarrow LP_{13}$	$LP_{01} \rightarrow LP_{14}$	$LP_{01} \rightarrow LP_{15}$
Step profile	f /MHz	2.92	3.32	3.95	4.9	6.33
	N	2.36	2.09	1.73	1.38	1.08
	T /nm·kHz ⁻¹	0.112	0.112	0.113	0.115	0.113
DCF profile	f /MHz	3	3.28	3.93	5	6.7
	N	15.14	14.5	13.2	11.55	9.87
	T /nm·kHz ⁻¹	0.0171	0.0163	0.0149	0.0134	0.0117

从表1可见,具有较大波导色散的光纤(b)具有较大的 N 值,因此在相同的光波波长和声波频率下,基于光纤(b)的声光滤波器将具有比较小的带宽。例如,如果我们采用 10 cm 的光纤(a)和(b)分别构成光纤声光滤波器,根据(3)式计算出它们在工作波长为 1550 nm 时的带宽将分别为 3.3 nm 和 0.5 nm,滤波器带宽与色散参数 N 成反比。从表1

但是,直接测量光纤的 N 值是困难的,如何确定 N 值便成为实际应用中的一个问题。根据波矢匹配条件 $L_B(\lambda) = \Delta$ 和声波的色散特性 $\Delta \sim f^{1/2}$ (f 为声波频率)^[5] 可以推出滤波器峰值波长的调谐度为

$$T = \frac{\partial \lambda}{\partial f} = -\frac{\lambda}{2f} \frac{1}{N} \quad (5)$$

可见只要测量出声光滤波器峰值波长的调谐度 T 就可以算出光纤的 N 值。

为了研究不同光纤折射率分布对 N 值的影响,计算了如图1所示的两种光纤在不同模式下的色散参数 N 和调谐度 T 。图1(a)中的光纤具有阶跃折射率分布,而图1(b)中的光纤具有类似于色散补偿光纤(DCF)^[6]的折射率分布。计算结果如表1所示。

中还可以看到,不同包层模对应的 N 值也是不同的,但两种光纤都是 $LP_{01} \rightarrow LP_{11}$ 模式转换对应的 N 值最大,因此采用 $LP_{01} \rightarrow LP_{11}$ 模式转换更有利于实现窄带声光滤波器。

3 实验结果

为了证实以上的分析,我们采用 40 cm 的三种

单模光纤(匹配包层光纤(MCF)),色散位移光纤(DSF)和色散补偿光纤(DCF)分别构成光纤声光滤波器并研究了它们的滤波特性。实验装置如图2所示,声波由压电陶瓷(PZT)产生并经过铝锥放大后耦合到一段去掉涂敷层的裸光纤中,从而在光纤中产生周期性折射率微扰,造成光纤基模到包层模的声光模式转换。实验中所用压电陶瓷谐振频率为3.5 MHz,声光滤波器的滤波谱由光谱仪测量。由于这三种光纤的波导色散不同($DCF > DSF > MCF$),可以预见它们的带宽和峰值波长调谐度将

是不同的。表2是三种声光滤波器在不同工作模式下峰值波长调谐度 T 的测量结果和相应的色散参数 N 值。

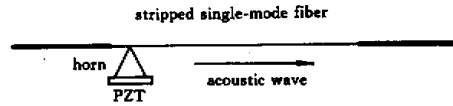


图2 单模光纤声光滤波器的基本结构

Fig.2 Basic structure of AOTF based on SM fiber

表2 三种不同单模光纤波长调谐度和色散参数的测量结果

Table 2 Measured tuning rate and corresponding dispersion parameter for three kinds of SM fibers

Fiber	Parameters	$LP_{01} \rightarrow LP_{11}$	$LP_{01} \rightarrow LP_{12}$	$LP_{01} \rightarrow LP_{13}$	$LP_{01} \rightarrow LP_{14}$
MCF	Wavelength λ /nm	1488	1547	1556	1588
	Acoustic frequency f /kHz	2577	2557	2950	3401
	Tuning rate T /nm·kHz ⁻¹	0.159	0.182	0.2	0.23
	Dispersion parameter N	1.82	1.66	1.32	1.0
DSF	Wavelength λ /nm	1572	1608	1580	
	Acoustic frequency f /kHz	2626	2605	3296	
	Tuning rate T /nm·kHz ⁻¹	0.133	0.143	0.13	
	Dispersion parameter N	2.25	2.16	1.85	
DCF	Wavelength λ /nm	1504	1530	1554	1572
	Acoustic frequency f /kHz	1598	1598	1899	2605
	Tuning rate T /nm·kHz ⁻¹	0.076	0.085	0.091	0.093
	Dispersion parameter N	6.16	5.65	4.5	3.23

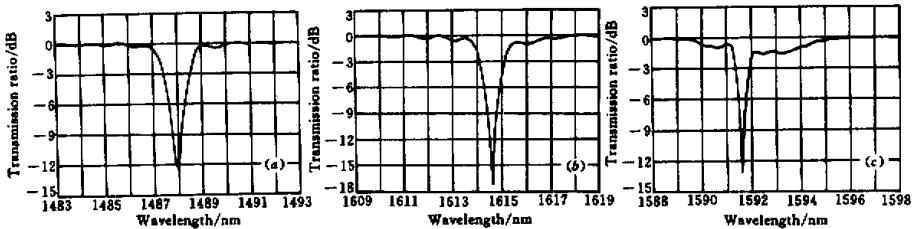


图3 基于MD(a), DS(b)和DC(c)单模光纤的声光滤波器滤波谱

Fig.3 Filtering spectrum of AOTF based on MC(a), DS(b) and DC(c) SM fibers

从表2可见,波导色散大的光纤对应的色散参数 N 值也大,而且所有光纤都是 $LP_{01} \rightarrow LP_{11}$ 模式转换对应的 N 值比其他模式大。

图3(a),(b),(c)中分别给出了MCF,DSF和DCF三种光纤对应的声光滤波谱,它们的工作频率分别为2.577 MHz($LP_{01} \rightarrow LP_{11}$),2.605 MHz($LP_{01} \rightarrow LP_{12}$)和1.606 MHz($LP_{01} \rightarrow LP_{13}$),峰值波长分别为1488 nm,1614.5 nm和1591.5 nm。三种声光滤波器的FWHM带宽分别为1.1 nm,1.0 nm和0.55 nm,可见波导色散越大的光纤,相应的声光滤波器的带宽越窄。受限于声光耦合效率,图3给出的DSF和DCF光纤的滤波谱分别工作在 $LP_{01} \rightarrow LP_{12}$

$\rightarrow LP_{12}$)和1.606 MHz($LP_{01} \rightarrow LP_{13}$),峰值波长分别为1488 nm,1614.5 nm和1591.5 nm。三种声光滤波器的FWHM带宽分别为1.1 nm,1.0 nm和0.55 nm,可见波导色散越大的光纤,相应的声光滤波器的带宽越窄。受限于声光耦合效率,图3给出的DSF和DCF光纤的滤波谱分别工作在 $LP_{01} \rightarrow LP_{12}$

和 $LP_{01} \rightarrow LP_{13}$ 模式, 工作在 $LP_{01} \rightarrow LP_{11}$ 模式的滤波谱具有更窄的带宽。值得一提的是, 图 3(c) 所给出的基于 DC 光纤的声光滤波谱不但工作在 $LP_{01} \rightarrow LP_{13}$ 模, 而且工作在较低的声波频率即较大的声波波长 Λ 上。根据前面的分析, 这两个因素均不利于实现窄带宽, 但由于所用 DC 光纤具有较大的色散 N 值, 它的带宽仍明显小于基于其他两种光纤的声光滤波器。图中 DC 光纤的滤波谱有较大的旁瓣, 这是由于所用 DC 光纤具有微小的不均匀性所致。

4 小 结

本文研究了基于 MC, DS 和 DC 三种光纤的声光滤波器的带宽特性, 理论分析和实验结果均证明利用具有较大波导色散的光纤可以实现较窄的带宽。本文还提出了利用声光滤波器峰值波长调谐度来测量光纤色散参数 N 值的新方法。采用色散补偿光纤实现了 FWHM 带宽为 0.55 nm 的窄带光纤声光滤波器。

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 D. Ostling, H. E. Engan. Narrow-band acousto-optic tunable filtering in a two-mode fiber. *Opt. Lett.*, 1995, 20(11): 1247~1249
- 4 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
- 5 H. E. Engan, B. Y. Kim, J. N. Blake *et al.*. Propagation and optical interaction of guided acoustic waves in two-mode optical fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1988, 6(3): 428~436
- 6 A. J. Antos, D. K. Smith. Design and characterization of dispersion compensating fiber based on the LP_{01} mode. *J. Lightwave Technol.*, 1994, 12(10): 1739~1745