

文章编号: 0258-7025(2001)05-0463-04

单模光纤中声波传输的衰减及其对光纤 声光滤波器工作特性的影响*

厉 群 刘小明 李 佟 金 韬 周炳琨

(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 研究了声波在光纤中的衰减对光纤声光滤波器性能的影响,提出了通过测量不同长度光纤的声光模式转换效率测量声波在光纤中传输衰减的新方法,指出声波的衰减造成声光耦合效率降低并使声光滤波器的带宽展宽和消光比变差,带宽展宽的大小近似与声波衰减系数的平方成正比。

关键词 声光滤波器,声波衰减,声光耦合效率,带宽

中图分类号 TN 713 **文献标识码** A

Influence of Acoustic Wave Attenuation on the Properties of Fiber AOTF

LI Qun LIU Xiao-ming LI Tong JIN Tao ZHOU Bing-kun

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

Abstract The influence of acoustic wave attenuation on the properties of fiber AOTF is studied and a simple method to determine the acoustic wave attenuation by measuring the AO mode coupling efficiency is proposed. It is found that the acoustic wave's attenuation will reduce the efficiency of AO mode coupling and broaden the bandwidth of fiber AOTF. The increased bandwidth is in proportional to the square of the acoustic wave attenuation coefficient.

Key words AOTF, acoustic wave attenuation, AO coupling efficiency, bandwidth

1 引 言

可调谐光滤波器在光纤通信系统,特别是 WDM 系统中有广泛的应用。基于普通单模光纤的声光滤波器是最近出现的一种新型声光滤波器,它除了具有体声光滤波器的极宽可调谐范围($> 100 \text{ nm}$)和较快的调谐速度($< 10 \mu\text{s}$)等特点以外,还具有插入损耗低($< 0.1 \text{ dB}$)、偏振相关性小等优点,是极有发展前途的一类可调谐光滤波器^[1~3]。这种光纤声光滤波器利用沿光纤以绕行波方式传播的声波在光纤中产生周期性的折射率变化。当这一折射率变化的周期等于单模光纤中某一光波长处基模(LP_{01} 模)与包层模(LP_{11} 模, LP_{12} 模, LP_{13} 模...)之间的拍长时,基模就通过声光相互作用耦合到包层模,由光纤涂敷层对包层模的吸收形成滤波。调谐声波的频率便可实现对滤波器的峰值波长进行调谐。

根据耦合波方程,可以得出单模光纤中声光模式转换的效率与声光耦合系数、声波波长与光波长之间的失配以及支持声光作用的光纤长度有关。其中声光耦合系数取决于声波的强度和声波与光波场间的交叠程度。理论上,声光模式转换效率与声光耦合系数及光纤长度有关,当声光耦合系数不太高时,可以通过加长光纤来提高模式转换效率。另一方面,这种声光滤波器的带宽也与光纤长度有关。但在实际中,由于材料的吸收和散射,声波在光纤中传输时振幅是衰减的。本文从理论上研究了光纤中声波振幅的衰减对光纤声光器件声光模式转换效率以及带宽的影响,实验测量了声波在光纤中的衰减系数,从而为光纤器件的设计提供了参考依据。

2 理论分析

根据模耦合方程,可以得到声光器件模式转换效率为^[4]

$$\eta = \frac{\kappa_0^2}{\kappa_0^2 + \delta^2} \sin^2 \left[L (\kappa_0^2 + \delta^2)^{1/2} \right] \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(编号 69782003)资助项目。

其中 L 为产生声光作用的光纤长度; κ_0 为声光耦合系数; δ 为声波波长与光波拍长之间的失配, $\delta = \pi \left[\frac{1}{L_B(\lambda)} - \frac{1}{\Lambda} \right]$, 这里 Λ 为声波波长, $L_B(\lambda)$ 为参与模式转换的两个光波模式之间的拍长。能够满足波矢匹配条件 $\Lambda = L_B(\lambda)$ 的光波长成为滤波器的峰值波长。偏离相位匹配条件造成的声光滤波器的带宽为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{0.8\Lambda}{L} \frac{1}{N} \quad (2)$$

其中色散参数 $N = \frac{\partial L_B}{\partial \lambda} \frac{\lambda}{L_B}$, 主要取决于光纤的折射率分布。

由于材料的吸收和散射, 声波振幅在光纤中按指数规律衰减^[5]。可以表示为: $u = u_0 e^{-\alpha z} \sin(2\pi ft - Kz)$, 其中 u_0 为声波振幅, K 为声波波矢, $K = 2\pi/\Lambda$ 。相应地, 声光耦合系数沿光纤长度也按指数规律衰减: $\kappa = \kappa_0 e^{-\alpha z}$, 其中 α 为声波的衰减系数。在长度为 L 的光纤中声光耦合系数的平均值为

$$\bar{\kappa} = \kappa_0 \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha L} \quad (3)$$

那么, 在波矢匹配条件 $L_B(\lambda) = \Lambda$ 得到满足的条件下, 声光模式转换效率为

$$\eta = \sin^2(\bar{\kappa} L) = \sin^2 \left[\frac{\kappa_0}{\alpha} (1 - e^{-\alpha L}) \right] \quad (4)$$

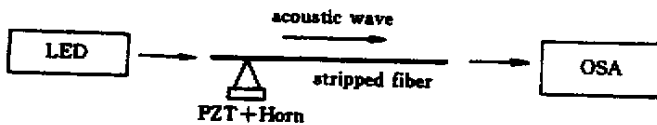


图1 测量声波衰减的实验装置

Fig.1 Experimental setup for acoustic wave attenuation measurement

利用该装置我们对 Lucent MC 单模光纤长度从 6 cm 至 31 cm 每隔 5 cm 进行了声光模式转换效率的测量。根据测量结果计算出的各光纤长度下平均声光耦合系数如图 2 所示。测量过程中声波频率分别为 2.23 MHz 和 2.57 MHz, 压电陶瓷上的电压分别为 6 V 和 8 V。

图 2 中, 实线表示声波频率为 2.23 MHz(下)和 2.57 MHz(上)时根据测量值计算出的各光纤长度下的平均声光耦合系数, 虚线为假设声波按指数规律衰减根据(4)式拟合出的相应光纤长度下的平均声光耦合系数。可以看出实验曲线与拟合曲线吻合得很好, 这说明声波在光纤中的衰减确实符合(3)式所

根据 Fourier 分析, 可以计算出衰减振幅造成的声波波矢的变化量为

$$\Delta K = 2\alpha \quad (5)$$

声波波矢的变化导致声波波长的变化, 满足相位匹配条件的光波峰值波长随声波波长的变化率为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \frac{1}{N} \quad (6)$$

这说明声波波长的变化将引起声光滤波器带宽的展宽。

3 光纤中声波衰减系数的测量

测量出不同长度光纤上的声光模式转换效率并根据(4)式算出各长度下的平均声光耦合系数的大小, 再通过曲线拟合就可以得到声波的衰减系数。测量装置如图 1 所示。声光换能器(压电陶瓷)产生的声波经过铝锥放大后在铝锥锥尖处耦合进入一段去掉涂敷层的裸光纤。宽带光源(LED)输出的光(波长范围 1420 ~ 1620 nm)进入裸光纤后与光纤中的声波发生相互作用产生模式耦合, 形成滤波特性。保持压电陶瓷上的电压和频率不变, 通过在光纤的不同位置放置声波吸收器改变实际参与作用的光纤长度, 在光谱仪上可以看到该滤波峰值高度的变化, 从而测量出平均声光耦合系数随光纤长度的变化。

示的规律。根据拟合的结果, 声波在 2.23 MHz 的衰减系数为 13 dB/m, 在 2.57 MHz 下的衰减系数为 20 dB/m。

采用上述方法还对不同批号的 MC 光纤和 DSF 等光纤的声波衰减系数进行了测量, 结果表明同一根光纤在不同频率下衰减系数不同, 每种光纤的衰减也不同。概括测量结果, 在光纤声光滤波器常用的频率下(1.5 ~ 4 MHz), 声波的衰减系数为 7 ~ 20 dB/m。

4 声波衰减对单模光纤声光滤波器性能影响的分析

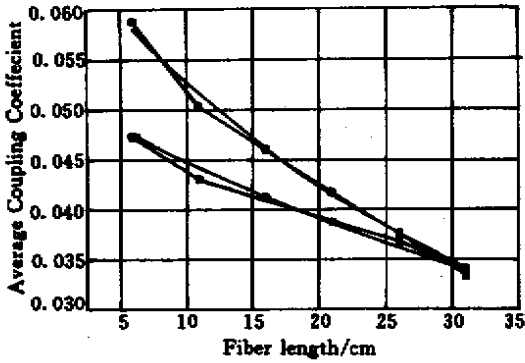


图2 不同光纤长度下声光耦合系数的测量值
Fig.2 Measured AO mode coupling coefficient at different fiber length

4.1 有效声光耦合系数下降

从(4)式可以看到,声波的衰减造成有效声光耦合系数的下降。图3所示的实测结果也说明了这一点。实际上,当光纤长度超过一定范围时,声波振幅大为衰减,声光耦合系数已经很小了。

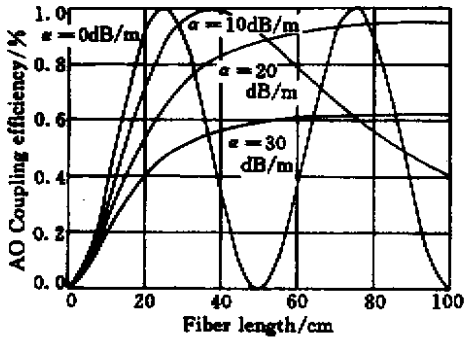


图3 声波衰减对声光耦合效率的影响
Fig.3 Influence of acoustic wave attenuation on AO mode conversion efficiency

图3给出没有声波衰减的理想情况下和声波有10 dB/m、20 dB/m和30 dB/m衰减情况下声光模式转换效率随光纤长度变化的比较(声光耦合系数取 $\kappa_0 = 6.28 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$,对应于声波振幅10 nm左右)。可见,在理想情况下,通过改变光纤长度在 $\kappa_0 L = \frac{\pi}{2}$ 处总可以得到100%的转换效率。但在实际情况下,由于声波的衰减,光纤长度增加使平均耦合系数下降。当衰减系数比较大时($> 20 \text{ dB/m}$)随着光纤长度的增加最终也达不到100%的转换效率。由于声波的衰减实际上是不可避免的,因此提高声光耦合系数 κ_0 (比如提高声波功率)才是提高

模式转换效率的唯一途径。

4.2 声光滤波器带宽展宽

前面提到,声波振幅的衰减造成的声波波矢改变将引起滤波器带宽的展宽。根据耦合波方程,我们计算了长度为30 cm的MC单模光纤(折射率差 $\Delta n = 0.33\%$,芯径 $a = 8.3 \mu\text{m}$) $\text{LP}_{01} \rightarrow \text{LP}_{11}$ 模式转换的带宽随声波衰减系数的变化(光波中心波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$)。计算结果如图4所示。可以看出,声光滤波器带宽的展宽与 α^2 近似成正比。在声波衰减系数为20 dB/m的情况下,滤波器的带宽展宽为0.1 nm。而根据(2)式计算出该滤波器在声波衰减系数为0的理想情况下带宽为1.27 nm,可见,声波衰减造成的带宽展宽约为原带宽的十分之一。

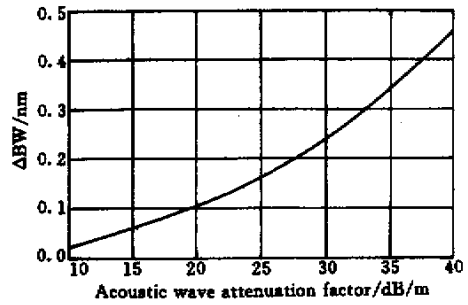


图4 光纤AOTF带宽展宽与声波衰减系数的关系
Fig.4 Relationship between acoustic wave attenuation and increment of AOTF bandwidth

值得提出的是,由(2)式可以看到,由声光相互作用的相位匹配条件决定的带宽与光纤长度有关,光纤长度越长,带宽越窄。但是,声波衰减造成的带宽展宽是由于声波波矢本身的展宽造成的,与声光相互作用过程无关。也就是说,声波衰减造成的带宽展宽是固定的,与器件的光纤长度无关。加长光纤长度仍然是压窄带宽的可行方法。

图5是与图4条件相同的声光滤波器在声波衰减系数分别为0 dB/m、10 dB/m、20 dB/m和30 dB/m下的滤波谱计算结果。结果表明,在实际的7~20 dB/m的声波衰减系数范围内,声波衰减的存在对主瓣半宽度的影响并不大,但旁瓣的幅度有所增加,而且瓣与瓣之间的损耗“零点”处损耗增大,使整个器件的消光比变差。图6给出了图2所示实验相同的单模光纤在声波频率为2.23 MHz下实测的声光滤波谱,所用光纤长度为31 cm,光纤中声波衰减系数为13 dB/m。与图5所示计算结果比较可知,图6的测量结果处于图5的(b)(衰减10 dB/m)和(c)(衰减20 dB/m)之间,与实测衰减系数为13 dB/m的结

果非常吻合。

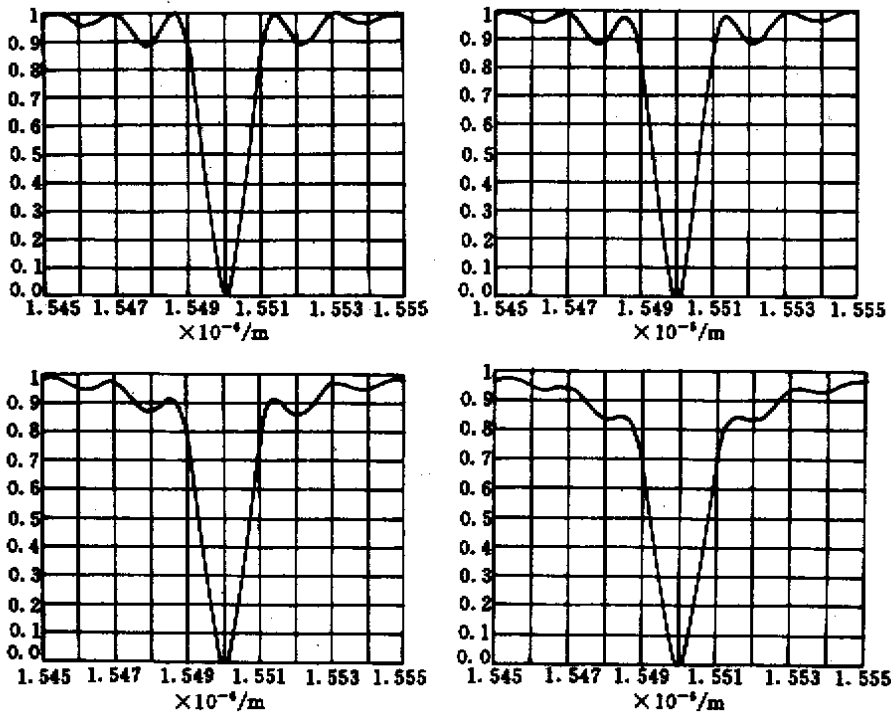


图 5 不同声波衰减系数下 AOTF 的滤波谱

Fig.5 AOTF filtering spectrum at different acoustic wave attenuation
(a) $\alpha = 0$; (b) $\alpha = 10$ dB/m; (c) $\alpha = 20$ dB/m; (d) $\alpha = 30$ dB/m

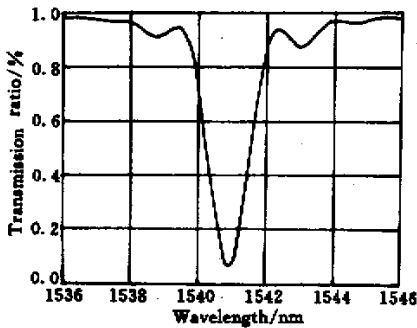


图 6 光纤 AOTF 滤波谱的测量结果
(声波频率 $f = 2.23$ MHz)

Fig.6 Measured filtering spectrum of fiber AOTF
(Acoustic frequency $f = 2.23$ MHz)

5 小 结

本文提出一种通过测量不同长度光纤的声光模式转换效率测量光纤中传输声波的衰减系数的方法,实验测得单模光纤声光器件中的声波衰减系数为 7~20 dB/m。通过理论和对实验数据的分析得出:声波的衰减造成等效声光耦合系数的减小,增加

光纤长度会使平均耦合系数下降。因此,提高声光耦合系数 κ_0 (比如提高声波功率)才是提高模式转换效率的唯一途径。同时,声波的衰减会造成滤波带宽的展宽,展宽的大小近似与声波衰减系数的平方成正比且不受光纤长度的影响。

参 考 文 献

- 1 H. E. Engan, B. Y. Kim, J. Blake *et al.*. Propagation and optical interaction of guided acoustic waves in two-mode optical fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(3):428~435
- 2 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
- 3 H. S. Kim, S. H. Yun, B. Y. Kim. Actively gain-flattened erbium-doped fiber amplifier over 35 nm by using all-fiber acousto-optic tunable filters. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **10**(6):790~792
- 4 D. Ostling, H. E. Engan. Narrow-band acousto-optic tunable filtering in a two-mode fiber. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(11):1247~1249
- 5 Ying Chongfu. *Ultrasonics*. Beijing: Science Press, 1990