

双锥光纤滤波器的研制*

陈智浩 彭江得 顾东华 周炳琨
(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 实验研究了熔锥条件对双锥光纤滤波器的影响。提出一个高斯模型, 预测锥的几何形状。获得了窄带(3 dB 带宽 4 nm)带通双锥光纤滤波器以及带阻中心波长分别为 1535 nm(损耗-6.6 dB)和 1559 nm(损耗-19.6 dB)的带阻双锥光纤滤波器。

关键词 光纤滤波器, 双锥光纤, 拉锥。

在各种光纤元器件中, 双锥光纤是比较简单的一种。双锥光纤可用作带通滤波器、带阻滤波器、窄带滤波器、波分复用器以及传感器等^[1, 2]。采用双锥光纤滤波器的优点是: 制作简单、与光纤系统兼容、附加损耗小、对偏振不敏感、背向反射小、成本低。

锥的几何形状对滤波器的性能有很大的影响。在过去十多年中, 已提出一些模型, 如抛物型^[3]、指数型^[4], 来描述光纤锥的几何形状。作者发现, 所研制锥的几何形状并不符合抛物型和指数型, 而是比较符合高斯分布。

波分复用器结合掺铒光纤放大器是当今高速率光通信网络系统发展的主流方向。这要求掺铒光纤放大器不仅具有高增益、低噪声、高输出功率而且增益谱要平坦。采用多级结构和大功率泵源, 可实现对放大器的前三项要求。目前存在的最主要问题是增益谱不平坦。最近有报道, 双锥光纤滤波器也可用于平坦掺铒光纤放大器的增益谱^[5]。为了解决级联掺铒光纤放大器的增益均衡问题, 作者研制出其透过谱形状与基于光纤光栅^[6]的增益均衡器的透过谱十分相象的带阻双锥光纤滤波器。由此看来, 双锥光纤滤波器也可望用于级联掺铒光纤放大器系统的增益均衡。

1 双锥光纤的滤波原理及锥形模型

研制双锥光纤采用熔融拉锥方式: 把一段长为 L_0 的光纤加热到其软化点, 然后沿光纤轴向拉伸。图 1 是双锥光纤示意图, 其中 D_0 为初始光纤直径, D_w 为锥腰直径, L_t 为双锥的长度。归一化频率定义为

$$V_{\text{core}} = \pi d(z) \sqrt{n_{c0}^2 - n_{c1}^2} / \lambda, \quad V_{\text{clad}} = \pi D(z) \sqrt{n_{c1}^2 - n_{ext}^2} / \lambda \quad (1)$$

式中 $d(z)$ 和 $D(z)$ 分别为处于 z 处的芯层和包层直径, n_{c0} 为芯层折射率, n_{c1} 为包层折射率,

* 国家科委 863 高科技项目。

收稿日期: 1996 年 7 月 21 日

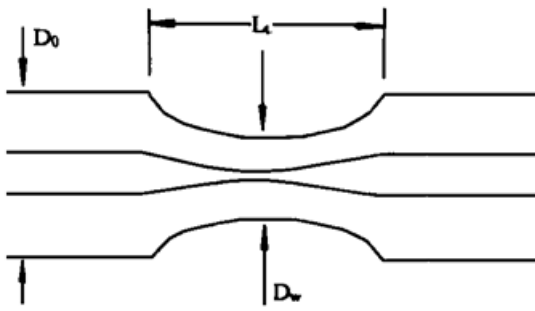


Fig. 1 A biconical fiber

n_{ext} 为外包层折射率(通常是空气), λ 为波长。由于拉锥, 单模光纤芯径 $d(z)$ 变小。当 $V_{\text{core}} < 1$ 时, 光场主要集中在包层。在该区, 内包层和外包层构成新的导引光的波导。该波导归一化频率很大 ($V_{\text{clad}} > 20$), 所以该锥区是一个多模波导。当沿锥区传播时, HE_{11} 基模与高次包层模发生耦合。通过锥区后, 包层模又转换成 HE_{11} 芯模, 其它高次模被损耗掉。由于耦合与波长有关, 于是出现了与波长有关的损耗。理论与实验研究表明, 锥腰 D_w 越小或锥的长度越长, 双锥光纤滤波器透过谱的

周期就越窄; 反之, 就越宽。滤波器的特性取决于锥的几何形状。

作者测量了不同熔锥条件下研制的光纤锥的几何分布, 发现其分布符合高斯分布

$$D(z) = D_0 \exp(-z^2/L_0^2), \quad 0 \leq z \leq L_t/2 \quad (2)$$

L_0 是一个与加热区宽度有关的量, 可通过测量锥形分布, 求出该量。

此外, 根据光纤体积不变^[3], 即

$$\pi(D_0/2)^2 L_0 = 2 \int_0^{L_t/2} \pi[D(z)/2]^2 dz \quad (3)$$

积分后, 得

$$L_0 = \sqrt{\pi/2} L_0 \operatorname{erf}(L_t/\sqrt{2}L_0) \quad (4)$$

在实际中, 通常 $L_t > 2.6L_0$, 此时, $\operatorname{erf}(L_t/\sqrt{2}L_0) \rightarrow 1$ 。这样(4)式简化为

$$L_0 = \sqrt{\pi/2} L_0 \quad (5)$$

L_0 为一个反映燃烧器有效加热区宽度的量。可通过测量锥的长度 L_t 与拉伸长度 L_e 的关系 $L_t = L_0 + L_e$ 来确定 L_0 。把(5)式代入(2)式, 可得

$$D(z) = D_0 \exp(-\pi z^2/2L_0^2), \quad 0 \leq z \leq L_t/2 \quad (6)$$

从(6)式可以看出, 尽管也可通过测量锥形分布确定 L_0 , 但是, 通过测量锥的长度和拉伸长度确定 L_0 显得更为方便。根据(6)式可以求得锥腰直径

$$D_w = D_0 \exp[-\pi(1 + L_e/L_0)^2/8] \quad (7)$$

从(7)式可以看出锥腰直径主要由 L_e/L_0 决定。 L_e/L_0 越大 D_w 越小。对于相同燃烧器, 拉伸长度越长锥腰就越小。对于相同拉伸长度, 燃烧器火嘴越小锥腰也越小。锥腰越小, 则透过谱的周期就越短。

2 实验结果与讨论

图 2 是双锥的长度 L_t 与机械拉伸长度 L_e 的关系曲线。经曲线拟合, L_t 和 L_e 近似满足线性关系。对于 1 号燃烧器, $L_0 = 7.6 \text{ mm}$ 。从图 2 可以看出, 只要已知熔锥条件(拉伸长度, 燃烧器有效加热区宽度), 即可预测双锥的长度。图 3 是典型的双锥形状分布图, 其形状可用(6)式近似。图 4 是 $[(8/\pi) \ln(D_0/D_w)]^{1/2}$ 与 $(1 + L_e/L_0)$ 的关系曲线。从图 4 可看出, 理论与实验结果符合。这表明, 作者提出的高斯分布模型是正确的。特别值得一提的是, 根据高斯模型, 只要已知熔锥条件, 即可预测锥的几何形状。

实验结果表明, 对于相同燃烧器, 拉伸长度越长锥腰越小。实验测量还表明, 对于相同拉伸长度, 燃烧器火嘴越小锥腰也越小。这些都与理论结果一致。更为精确的电镜分析表明, 在锥腰中心有一区域, 光纤外径几乎相等, 并不呈高斯分布。该区域的长短与拉伸长度有关。

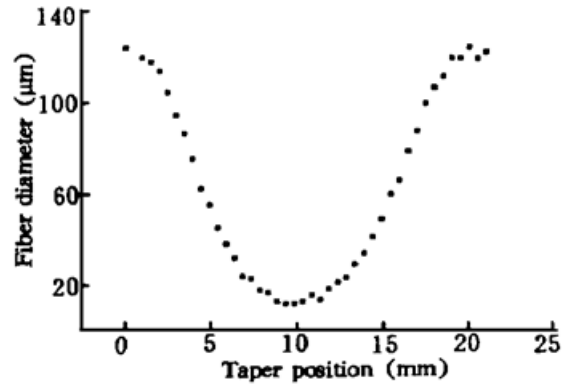
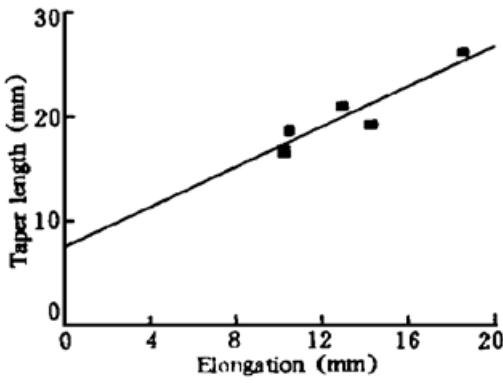


Fig. 2 Taper length as a function of elongation length

Fig. 3 Profile of taper No. 25 produced with burner No. 1

拉伸长度越长该区域也越长。分析表明, 理论模型固有的误差约为 $3 \mu\text{m}$ 。

图 5 是双锥光纤滤波器透过谱周期倒数与拉伸长度的关系曲线。从图 5 可以看出, 谱周期倒数与拉伸长度近似呈线性关系。拉伸长度越长, 谱周期就越短。实验测量表明, 在相同拉伸长度下, 燃烧器火嘴越小, 透过谱的周期就越短。图 6 是 35 号双锥光纤滤波器透过谱曲线。从图 6 可以看出, 其振荡具有周期性(周期约 7 nm), 附加损耗 - 0.6 dB。该滤波器若作为窄带带通滤波器, 带阻衰减太小。解决该问题的有效方法是, 通过适当的级联^[1], 增加带阻衰减, 使带宽变窄并把不需要的边瓣抑制掉, 如图 7 所示。图 7 是四个双锥光纤滤波器级联而成的总透过谱。从图可看出, 其 3 dB 带宽为 4 nm, 边瓣抑制大于 7 dB。

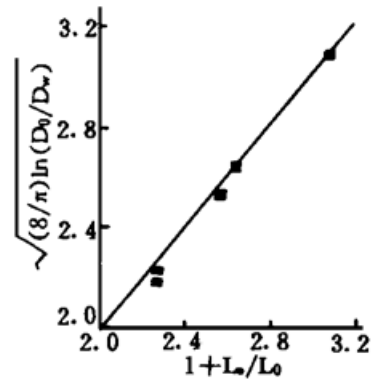


Fig. 4 $\sqrt{(8/\pi) \ln D_0/D_w}$ against $1 + L_c/L_0$
— theory, experiment

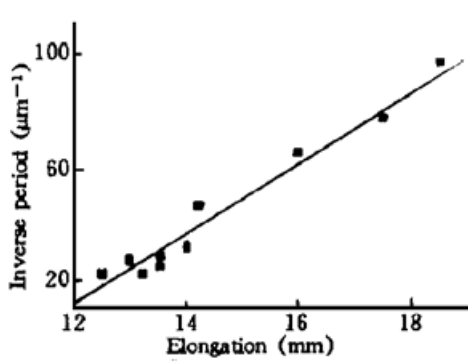


Fig. 5 Inverse period in the spectral response of biconical tapers as a function of elongation length

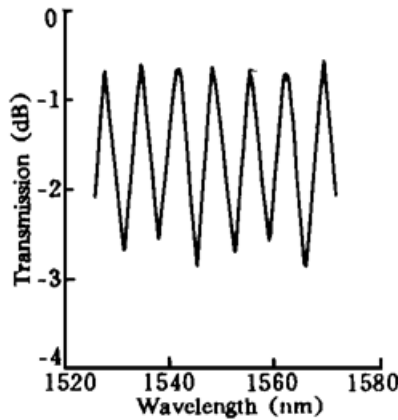


Fig. 6 Transmission of filter No. 35 as a function of wavelength

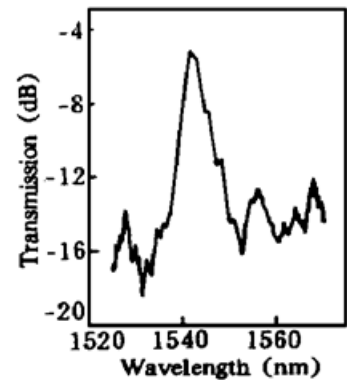


Fig. 7 Total spectral response of four concatenated biconical fiber filters

图 8 是 11 号双锥光纤滤波器的透过谱。从图 8 可以看出, 其谱形状与掺铒光纤放大器增益谱近乎反对称分布。滤波器带阻中心波长约为 1535 nm, 损耗 - 6.6 dB。这可用于消除光纤放大器增益谱尖峰, 使放大器增益谱平坦^[5]。该滤波器的附加损耗约 - 3 dB。进一步改进拉锥工艺, 有可能把附加损耗降到最小。这种滤波器通常放在二段掺铒光纤的中间, 由于第二段掺铒光纤的增益补偿作用, 3 dB 损耗的引入并不影响放大器总的增益。

图 9 是 32 号双锥光纤滤波器的透过谱。从图可以看出, 其带阻中心波长为 1559 nm 左右, 损耗 - 19.6 dB, 其透过谱形状与基于光纤光栅^[6]的增益均衡器的透过谱十分相象。由此

看来, 双锥光纤带阻滤波器也可作为增益均衡器。

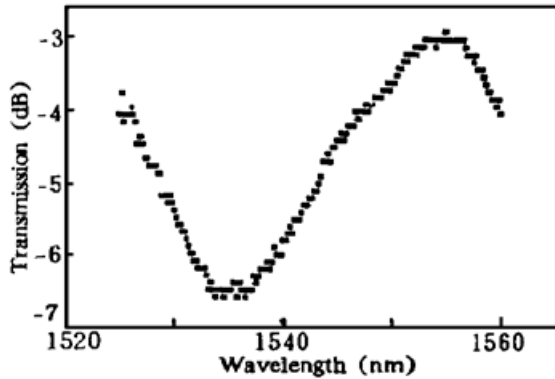


Fig. 8 Transmission of filter No. 11 as a function of wavelength

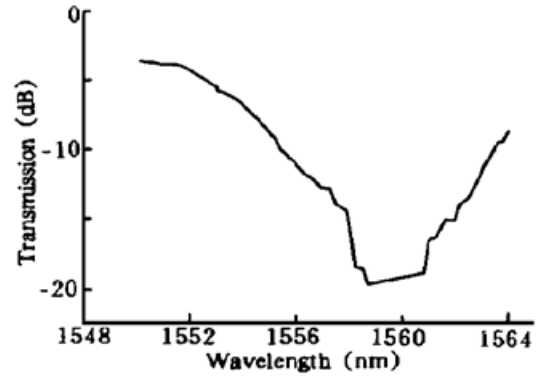


Fig. 9 Transmission of filter No. 32 as a function of wavelength

上述实验结果表明, 双锥光纤滤波器可用于解决掺铒光纤放大器增益均衡问题以及作为窄带带通滤波器。

说明: 图 6、8、9 中的附加损耗包括一个活接头、三个焊点、约 800 米长的光纤的损耗, 约 -0.5 dB。同样, 图 7 实际附加损耗应扣除 2 dB。

参 考 文 献

- [1] L. C. Bobb, P. M. Shankar, Taper optical fiber components and sensors. *Microwave J.*, 1992, **35** (5) : 218~ 228
- [2] F. Gonthier, S. Lacroix, X. Daxhelet *et al.*, Broadband all-fiber filters for wavelength division multiplexing application. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(14) : 1290~ 1292
- [3] W. K. Burns, M. Abebe, C. A. Villarruel, Parabolic model for shape of fiber taper. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(17) : 2753~ 2755
- [4] R. P. Kenny, T. A. Birks, K. P. Oakely, Control of optical fiber taper shape. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(18) : 1654~ 1656
- [5] A. V. Belov, E. M. Dianov, V. I. Karpov *et al.*, Gain spectrum flattening of erbium-doped fiber amplifier using tapered fiber filter. *Proc. Topical Meeting of Optical Amplifiers and their Applications*. Switzerland, OSA, 1995 : 32~ 35
- [6] A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins *et al.*, Long-period fiber-grating-based gain equalizers. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(5) : 336~ 338

Biconical Taper Fiber Filters

Chen Zhihao Peng Jiande Gu Donghua Zhou Bingkun
(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 10084)

(Received 21 July 1996)

Abstract The effects of fusion and tapering conditions on biconical taper fiber filters are studied experimentally. A Gaussian profile model for the prediction of fiber taper shape is presented. We have fabricated the passband fiber filter with narrow band (3 dB-width 4 nm), and band-rejection fiber filters with central band-rejection wavelengths of 1553 nm (loss - 6.6 dB) and 1559 nm (loss - 19.6 dB), respectively.

Key words fiber filter, biconical fiber, tapering.