

高细度、低损耗光纤滤波器的研制

廖 青 彭江得 周炳琨

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 对光纤法布里-珀罗滤波器进行了详细的理论分析和实验研究, 获得了细度为 300 和 80、插入损耗 < 4dB 的光纤法布里-珀罗滤波器。

关键词 细度, 光纤法布里-珀罗滤波器。

1 引 言

可调谐光纤滤波器的研究与实用化正越来越受到人们的重视, 它是光纤通信系统中的关键器件之一。在光纤通信系统中, 可调谐光滤波器可用作 WDM/WDMA 的解复用、信号解调、ASK 调制、发射源的频率稳定及跟踪器件, 还可用作光纤放大器中的信号光滤波器, 在光纤激光器、频谱分析及光纤传感技术中也有着重要的应用^[1~3]。

与平常用的可调谐光滤波器——块状法布里-珀罗声光、电光滤波器和半导体行波放大滤波器相比^[4,5], 光纤法布里-珀罗滤波器具有许多优点: 全光纤化, 调谐方便, 自由光谱区宽, 结构灵活, 可做成不同结构来满足各种自由光谱区的需求, 消除了光纤之间的耦合损耗等^[6]。

本文对光纤法布里-珀罗光滤波器(FPPF)进行了理论分析和实验研究, 利用光纤模场的高斯近似, 对影响该滤波器性能的各因素进行了较详细的分析, 特别是对模式失配和滤波器的传输特性提出了较完整的分析方法, 并进行了实际研制, 获得了高细度(细度=300)、低损耗(细度=80, 插入损耗 < 4 dB)的光纤法布里-珀罗光滤波器。

2 光纤法布里-珀罗滤波器研制的参数选择

与普通的体状法布里-珀罗干涉仪类似, 光纤法布里-珀罗光滤波器也是基于多光束干涉原理, 其透射特性可表示为:

$$A^{(o)} = \frac{T}{1 - R \exp(i\delta)} A^{(i)} \quad (1)$$

$$I^{(o)} = \frac{T^2}{1 + R^2 - 2R \cos \delta} I^{(i)} = \frac{T^2}{(1 + R)^2 + 4R \sin^2(\delta/2)} I^{(i)} \quad (2)$$

式中 $A^{(i)}$ 、 $I^{(i)}$ 分别为入射光场的振幅及光强, $A^{(o)}$ 、 $I^{(o)}$ 为出射光场的振幅及光强, δ 为相邻两束光的相位差:

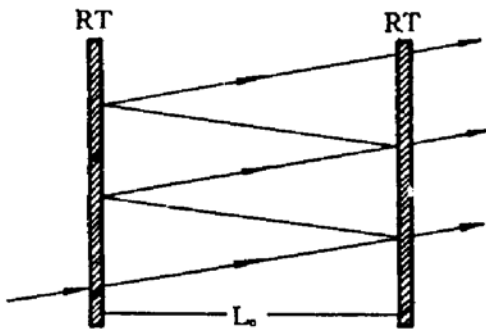


Fig. 1 The diagram of Fabry-Perot cavity

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda_0} n' L_c \cos \theta \quad (3)$$

R 、 T 分别为镜面的反射率和透过率(在理想状况下, $R + T = 1$)。当法布里-珀罗腔中存在损耗时, 设腔内的单程损耗为 $L \ll 1$, 则其峰值透过率 T_{car} 和细度 F 为:

$$T_{car} \approx \frac{T^2}{(T + L)^2} = \frac{1}{(1 + L/T)^2} \quad (4)$$

$$F = \frac{\pi \sqrt{R(1 - L)}}{1 - R(1 - L)} \approx \frac{\pi}{L + T} \quad (5)$$

损耗 L 将使腔的细度和峰值透过率下降, 损害法布里-珀罗光滤波器的性能。

光纤法布里-珀罗光滤波器的损耗来源主要在于光纤两端面的不平行、腔内的衍射损耗及开腔模式与光纤模式的不匹配等。所谓模式匹配, 是因为法布里-珀罗腔是由两光纤端面(镀高反射膜)对接而形成的, 为空气隙开腔模式, 而光纤中可传输的为导波模式, 这二者之间失配, 将使光纤法布里-珀罗光滤波器的峰值透过率下降。

2.1 腔内损耗对光纤法布里-珀罗光滤波器的影响

对光纤端面直接镀膜所带来的损耗, Marcuse 曾做了详细的分析^[7], 可直接引用其结果, 因此, 本文对腔内损耗只以 L 来代表, 由(4)式和(5)式做整体的定量分析。

图 2 为在不同附加损耗 L 下, 细度随反射镜的透过率的变化情况。由图可见, $L < 0.2\%$ 时, 提高反射率可以较大幅度地提高腔的细度。而当 $L \geq 2\%$ 时, 细度的变化已很小, 提高反射镜的反射率对提高细度已贡献不大。但增加反射镜的反射率将会使得腔的峰值透过率大大减小。所以, 当附加损耗一定时, 应适当地选择反射镜的反射率来优化腔的参数, 以免无效地提高反射率, 至使法布里-珀罗光滤波器的细度提高有限, 反而使其插入损耗增大。

图 3 为在不同的附加损耗下, 腔的峰值透过率随反射镜的透过率的变化情况。可以看到, 在反射率较大时, 峰值透过率极小, (即使腔内的总损耗只有 0.01% , 其峰值透过率也只有 25%), 而当反射率为 99% 、腔内损耗为 0.5% 时, 腔的峰值透过率也有 40% 。

当反射镜的反射率一定时, 减小腔内损耗, 可以增大其峰值透过率及提高细度。但在腔内存在一定的损耗(0.5%)时, 提高反射镜的反射率, 可以增大腔的细度(反射率从 $99\% \rightarrow 99.5\%$, 细度由 $250 \rightarrow 300$), 但腔的峰值透过率急剧减小($40\% \rightarrow 20\%$)。因此, 在法布里-珀罗光滤波器的研制中, 应综合考虑这些参数的选择, 从而优化器件的性能。

2.2 光纤法布里-珀罗光滤波器的模式失配

对开放的法布里-珀罗腔, 其稳定模式是由光束在腔内的衍射决定的, 是多模器件; 而光纤模式是由波导的导波条件决定的, 对单模光纤来说只存在基模。因此, 二者之间存在模式匹配问题, 要获得较大的峰值透过率, 二者之间应尽量地达到匹配。

模式失配的问题可以有多种途径来解决^[9], 一种较易实现而效果又比较明显的方法就是增大光纤本身的模场半径, 这是由于开腔衍射形成的模式具有较大的横向分布。增加光纤的模场半径可以通过增大光纤的芯径或减小光纤的归一化频率 V 值来实现。

图 4 在这两种方法下光纤法布里-珀罗腔的峰透过率随光纤模场半径的变化情况, 当模场半径从 $5 \mu\text{m}$ 增至 $7.5 \mu\text{m}$ 时, 取细度为 100 , 峰值透过率可从 20% 增至 40% 。靠增大光纤

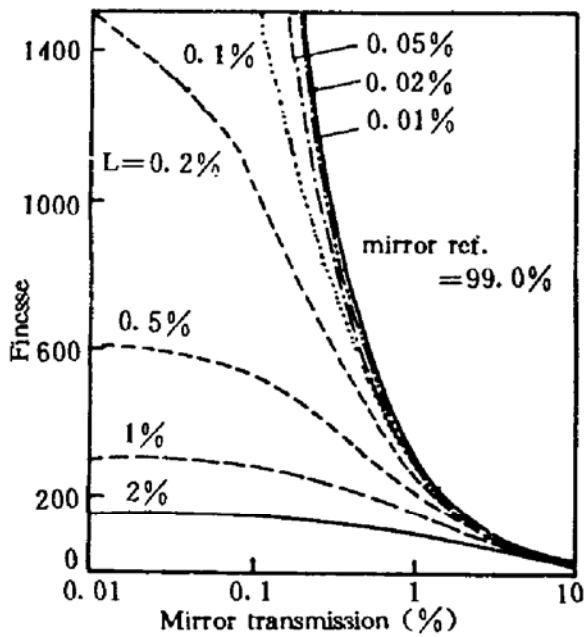


Fig. 2 Finesse of FFPF v. s. mirror transmission with different additional loss

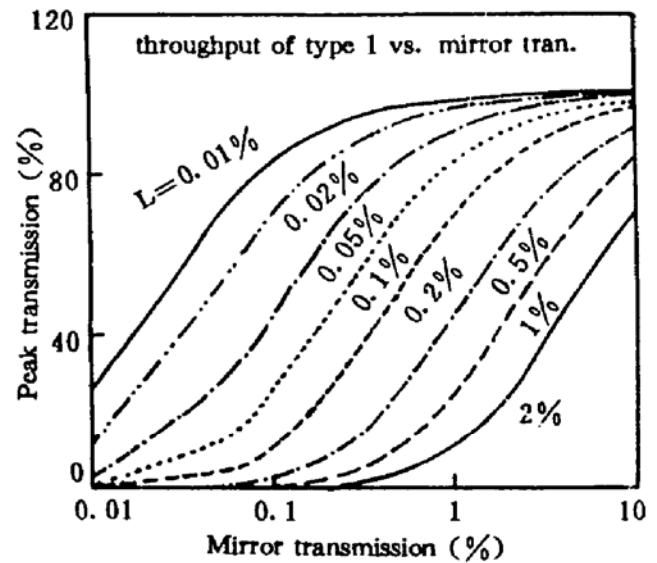


Fig. 3 The peak transmission of FFPF v. s. mirror transmission with different additional loss

芯径与减小 V 值的结果基本上一样，后者效果更为显著一些。

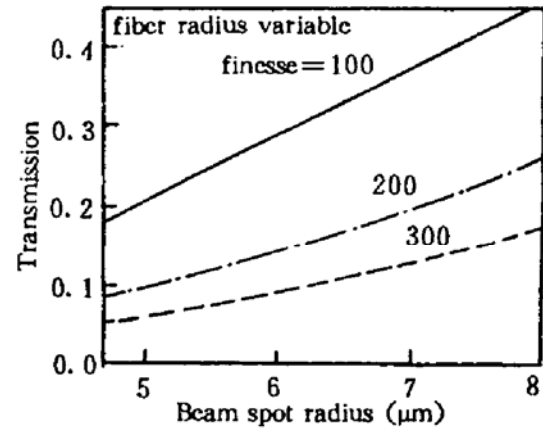
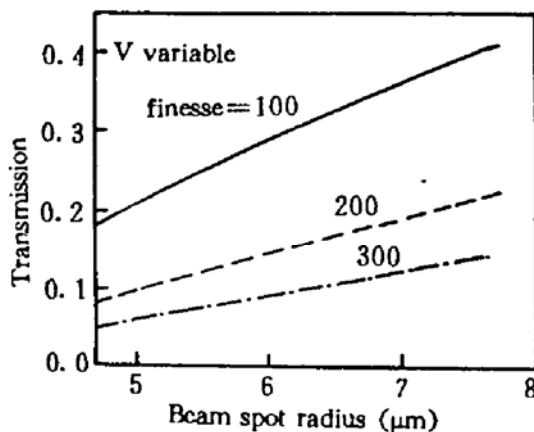


Fig. 4 The peak transmission of FFPF v. s. fiber spot size

3 光纤法布里-珀罗滤波器

根据前面的分析，在实际制作中影响法布里-珀罗滤波器性能的主要因素为：

- 1) 光纤的处理——光纤端面的平整度，光纤端面与光纤轴线的垂直度，光纤的固定等；
- 2) 光纤端面的镀膜——镀膜材料的选择，镀膜的工艺程序要求，光纤端面的清洗处理等；

- 3) 光纤滤波器的结构——光纤的固定与准直，整体结构的稳定性，压电陶瓷的选择等。

采用光纤端面直接镀膜，消除了光纤端面与镜面之间的距离不为零所造成的损耗，并分别从高细度、低损耗两方面着手，得到了细度为 300 的法布里-珀罗滤波器，及细度为 80、插入损耗 $< 4\text{dB}$ 的法布里-珀罗滤波器。同时，在结构上进行了优化设计，以保证器件的机械稳定性，得到稳定时间 $> 5\text{h}$ 的实验结果，为其实用化奠定了基础，实验装置如图 5 所示。

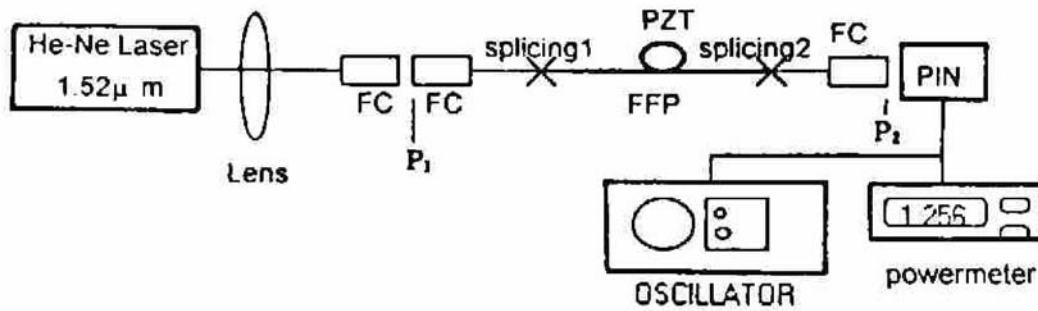


Fig. 5 The experimental setup of measurement of finesse and insertion loss

测量系统利用 $1.52 \mu\text{m}$ He-Ne 激光器作光源, PIN 光电二极管用来作光信号检测。在细度测量时, 采用锯齿波驱动法布里-珀罗滤波器的压电陶瓷, 由示波器可以看到法布里-珀罗滤波器的透过峰线型插入损耗测量时, 利用高压源对法布里-珀罗滤波器进行调谐, 达到其透过峰极大值而测得其插入损耗。

细度的测量方法为: 在压电陶瓷上加锯齿波电压时, 将可看到两个透过峰, 此两峰的间距即为腔的自由光谱区 FSR。同时, 可从示波器上测得单个透过峰的半宽度 δf , 在高细度时, 可改变示波器的时间常数来将腔的透过峰拉宽从而较精确地测得其半宽度 δf 。由此可得到细度为

$$F = \text{FSR} / \delta f$$

为能精确地测量法布里-珀罗光滤波器的插入损耗, 同时考虑到实用化的法布里-珀罗滤波器的插入损耗应包括标准的 FC 接头输入/输出时的总损耗, 故将研制的法布里-珀罗滤波器与标准的 FC 接头焊接在一起。测量 P_1 (输入) 及 P_2 (输出) 两个功率值, 可得到带标准 FC 接头的法布里-珀罗光滤波器插入损耗为:

$$\text{Loss} = 10 \log (P_2 / P_1)$$

图 6 为作者所研制的两个光纤法布里-珀罗滤波器的透过峰线型及细度测量。图 6(a) 和图 6(b) 的细度为 300, 图 6(c) 和 6(d) 的细度为 80, 插入损耗为 4.3 dB。

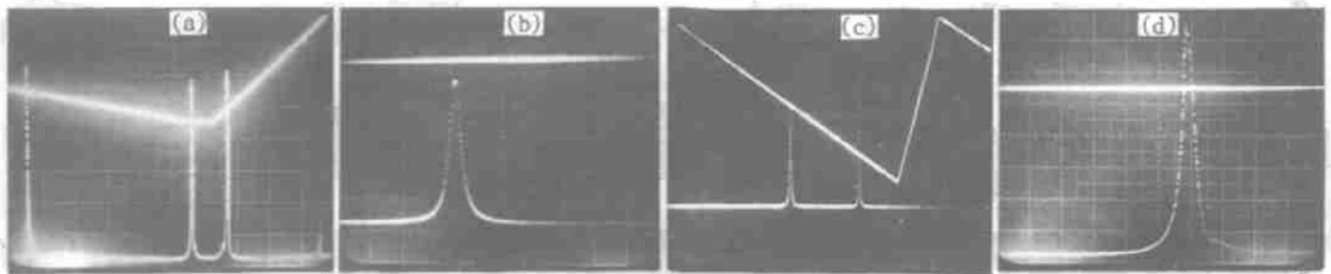


Fig. 6 The lineshape of FFPF and its finesse measurement

从上面的实验结果可以看到, 只要对光纤本身的端面等各因素做精细的处理, 完善各项工艺中过程, 根据实际情况选择各项参数, 以简单的结构完全可以达到实际应用的要求。作者已成功地将研制的法布里-珀罗滤波器用于 $2 \times 622 \text{ Mbit/s}$ WDM 光通信系统的解复用、环形腔光纤激光器的波长调谐及光纤放大器的自发辐射噪声滤波等。

感谢我教研组范澄教授对本研究给予了许多有益的指导和帮助, 及姜新、李京辉博士研究生提供的帮助和协助。

参 考 文 献

- [1] E. Y. Eng, M. Santoro, J. Stone *et al.*, An FDM optical switch experiment with a tunable two-stage fiber Fabry-Perot filter covering a 15,000 GHz range. *Proc. ECOO' 89*, Gothenbrug, Sweden, Sept. 1989: 10~14
- [2] A. E. Willner, E. D. Esurvice *et al.*, Use of LD-pumped erbium-doped fiber pre-amplifiers with optimal noise filtering in a FDMA-FSK 1 Gbit/s star network. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, 2(9): 669~672
- [3] J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff *et al.*, Single mode diode-pumped tunable erbium-doped fiber laser with linewidth less than 5.5 kHz. *Electron. Lett.*, 1991, 27(23): 2148~2149
- [4] Kwok Wai, Cheung, Acoustooptic tunable filters in narrow band WDM networks; system issues and network applications. *IEEE on Selected Areas in Commun.*, 1990, 18(6): 1015~1025
- [5] Machamad Jamil, Chanki, Rene Auffret *et al.*, Two-electrode DFB laser filter used as a wide tunable narrow-band FM receiver tuning analysis characteristics and experimental FSK-WDM system. *J. Lightwave Technol.*, 1992, 10(10): 1388~1397
- [6] J. Stone, L. W. Stulz, Pigatail high-finesse tubable fiber Fabry-Perot interferometers with large, medium and small FSR. *Electron. Lett.*, 1987, 23(15): 781~783
- [7] D. Marcuse, J. Stone, Coupling efficiency of front surface and multilayer mirrors as fiber end reflectors. *J. Lightwave Technol.*, 1986, 4(4): 377~381
- [8] D. Marcuse, Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1978, 68(1): 103~109
- [9] J. Stone, P. F. Glodis, D. Marcuse *et al.*, Large-mode-size fiber Fabry-Perot interometners. *Electron. Lett.*, 1989, 25(25): 1698~1699

High Finesse and Low Insertion Loss Fiber Fabry-Perot Filter

Liao Qing Peng Jiangde Zhou Bingkun

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

(Received 7 February 1994)

Abstract This paper reports the results of theoretical analysis and experimental research on fiber Fabry-Perot filter. The fiber Fabry-Perot filter with finesse of 300 and finesse of 80, insertion loss less than 4 dB are obtained.

Key words finesse, fiber Fabry-Peset filter.