

文章编号 1004-924X(2008)08-1371-06

新型全光纤可调光衰减器

李志全, 田秀仙, 王会波

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 研究了一种新型全光纤可调光衰减器, 设计了耦合特性检测装置。基于耦合波理论, 分析了衰减量与改变参量之间的关系, 讨论了波长微损耗特性。实验结果表明, 调节两光纤锥横间间距 u 可以实现衰减量的大幅度调节, 衰减量接近 30 dB; 调节纵向耦合长度 L 可以实现衰减量的微调, 衰减量可达 37 dB; 此可调光衰减器可以获得 < 0.2 dB 的波长微损耗。利用此结构的衰减器能够较理想地削弱或控制光信号, 在对气体进行浓度测量和组分识别时, 利用波长微损耗特性能够确保气体浓度测量的可靠性和单值性。

关键词: 可调光衰减器; 锥形光纤; 耦合; 波长微损耗; 衰减量

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Novel fiber-typed variable optical attenuator

LI Zhi-quan, TIAN Xiu-xian, WANG Hui-bo

(College of Electric Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A novel variable optical attenuator was developed and a detecting device was designed for testing its coupling characteristics. Based on coupling theory, the relations between the attenuation and the changing parameters were analyzed and the wavelength minim-loss was discussed. The experimental results indicate that the attenuation can change sharply and approach to 30 dB through adjusting the lateral displacement u of two tapered fibers, the attenuation can change slightly and reach 37 dB by adjusting the longitudinal coupling length L of two tapered fibers. And this variable optical attenuator can obtain the wavelength minim-loss less than 0.2 dB. By this new design structure, the light signal can be weakened or controlled ideally. The reliability and singleness can be guaranteed using its wavelength minim-loss characteristic when the gas concentration measurement and identity are carried out.

Key words: variable optical attenuator; tapered fiber; coupling; wavelength minim-loss; attenuation

1 引言

近年来, 随着光通信容量的迅速增长, 特别是随着波分复用全光网络的不断发展, 可调光衰减

器作为光纤通信系统中一种重要的光纤无源器件, 其市场需求持续扩大。可调光衰减器的主要功能是削弱或控制光信号, 故多用于密集波分复用系统中信道的功率平衡和器件的保护, 实现增益平坦、动态增益平衡及传输功率均衡。现有的

收稿日期: 2007-12-21; 修订日期: 2008-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60377002)

可调光衰减器大多是通过阻挡、偏转、衍射或吸收光的方式对光信号能量进行调节的,这使激光能量滞留在器件内而被转化成热能,对器件的性能造成严重的影响。光纤型可调光衰减器作为一种新型的可调光衰减器,避免了以上器件的不足,同时又具有结构简单、插入损耗小、成本低、可直接与光纤或作为尾纤与其它波导器件对接等突出优点,故而具有广泛的应用前景,但目前有关光纤模场控制的可调光衰减器研究却很少^[1-11]。

本文对一种新型的全光纤可调光衰减器进行了分析和研究。利用此结构的光衰减器能够实现较大的衰减系数,从而较理想地削弱或控制光信号。在对气体进行浓度测量和组分识别时,利用波长微损耗特性能够确保气体浓度测量的可靠性和单值性。

2 可调光衰减器的工作原理

可调光衰减器的结构原理如图 1 所示,它是利用锥形光纤特有的传输和耦合特性来实现衰减的,其关键部件是光纤锥(光纤锥的分布示意图见参考文献[1])。目前,制作锥形光纤主要采用 2 种方法:熔融拉锥法和化学腐蚀法。熔融拉锥法制作的锥形光纤的锥形端,包层和纤芯的直径沿光纤轴向逐渐变细,一般可以认为,在整个锥形区中,包层和纤芯直径之比保持不变。光纤锥由传导区、微米区和纳米区 3 个不同区域组成。传导区和普通单模光纤一样;微米区是一个过渡区域,主要作用是将收集的光场耦合成光纤的基模;纳米区是锥形光纤最尖端的部分,主要起集光的作用。微米区和纳米区对光纤的传输和耦合有很大影响,因此控制这 2 个区域的几何形状是制作锥形光纤的关键。

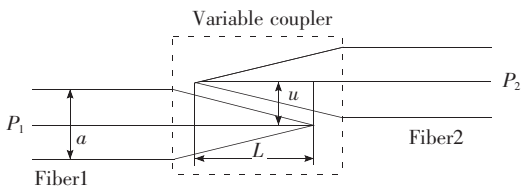


图 1 可调光衰减器的结构原理图

Fig. 1 Structure of variable optical attenuator

考虑两锥形光纤都是单模阶跃弱导光纤,在

光学尺度上相隔充分远,符合局域模耦合的条件,可以用局域模耦合理论进行分析。在弱导和弱耦合近似下,忽略自耦合效应,并假设光纤是无吸收损耗的,则在耦合区有模式耦合方程组为:

$$\begin{cases} \frac{dA_1(z)}{dz} = i\bar{\beta}_1 A_1(z) + i\bar{C}_{12} A_2(z) \\ \frac{dA_2(z)}{dz} = i\bar{\beta}_2 A_2(z) + i\bar{C}_{21} A_1(z) \end{cases}, \quad (1)$$

式中, $A_1(z)$, $A_2(z)$ 是两光纤的模场振幅; $\bar{\beta}_1$, $\bar{\beta}_2$ 是两光纤在孤立状态的纵向模传播常数, \bar{C}_{ij} ($i, j = 1, 2$) 是耦合系数,实际中近似有 $\bar{C}_{12} = \bar{C}_{21}$, 由此可以求得上述方程组的解。

实际一对单模锥形光纤间的耦合,可以借用工程技术中常用的耦合器的耦合公式来简化计算。两锥形端的耦合长度为 L , 它与两锥体的几何形状有很大关系,且小于或等于锥体的长度;两光纤锥的横向间距为 u 。假设信号光由左端的信号光纤输入,能量为 P_1 , 则根据耦合器中两锥形光纤间的耦合特性,可得到从右端的耦合光纤输出的光能量应为:

$$P_2 = P_1 \sin(kz), \quad (2)$$

上式表明:两锥形光纤间耦合功率的大小是由耦合系数 k 和耦合区域长度 z 决定的。其中 z 近似等于图 1 中的耦合长度 L , k 则取决于光纤纤芯半径 a 、两平行光纤轴间的距离 u 和光纤的相对折射指数差 Δ 。有:

$$k = (\pi/2)(\sqrt{2\Delta}/a) \exp[-(A + B\omega + C\omega^2)], \quad (3)$$

式中, $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$, $\omega = \frac{u}{a}$,

$$A = 5.279 - 3.663\omega + 0.384\omega^2,$$

$$B = -0.777 + 1.225\omega - 0.015\omega^2,$$

$$C = -0.018 - 0.006\omega - 0.009\omega^2$$

两平行光纤芯径间的距离 u 对耦合系数 k 的影响很大,当 u 增大时, k 按指数规律趋于 0; a 在锥形光纤中沿 z 向缓慢变小。对一给定锥形角度,局部模的描述对光纤的间隔非常敏感。由以上分析可知,两锥形光纤间的耦合效率与两锥形平行光纤芯径间的距离、两锥形光纤的耦合长度和锥角的大小都有很大关系^[1-2]。

3 可调光衰减器的性能分析

测量可调光衰减器两锥形光纤间耦合特性的

装置如图 2。采用单色性和稳定性较好的氦氖激光器作为光源,激光器发出的光经显微物镜聚焦,辐照在耦合器上进入信号光纤,光信号在传输过程中建立了稳态模式分布,输出功率较稳定。图中虚线框部分是一个可读数显微镜,该显微镜有 2 个可移动载物台,左右各一个。在显微镜的视野中是两锥形光纤的接头处。通过该显微镜的可移动载物台可以调整两锥形光纤的相对位置,通过该显微镜的测微目镜可读出其相对位置的具体数据^[1]。信号光纤端和耦合光纤端各接一个与 PC 机相连接的光探测器,用于探测光信号的强弱。

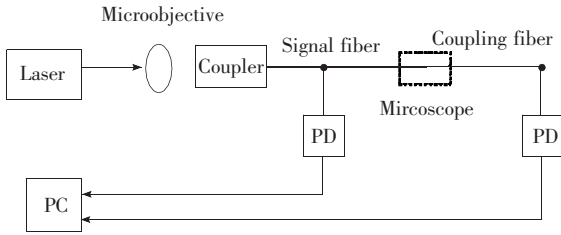
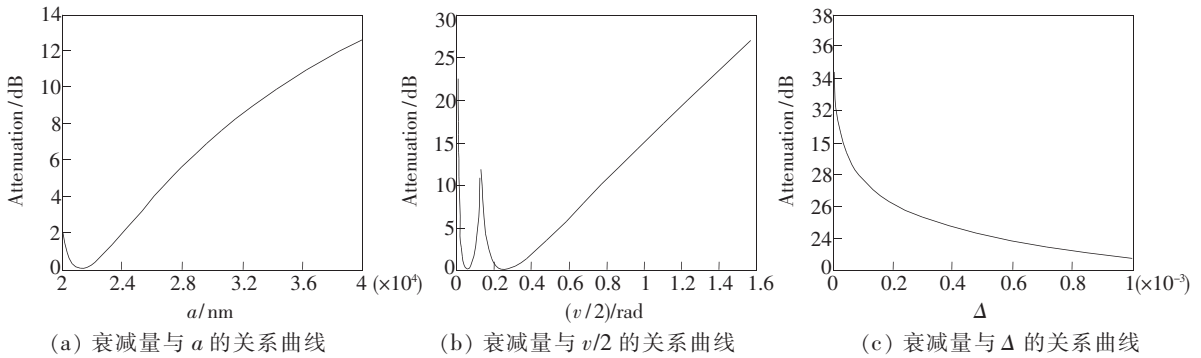


图 2 锥形光纤间的耦合特性检测

Fig. 2 Coupling characteristic detection of tapered fibers

3.1 光纤锥的特性分析

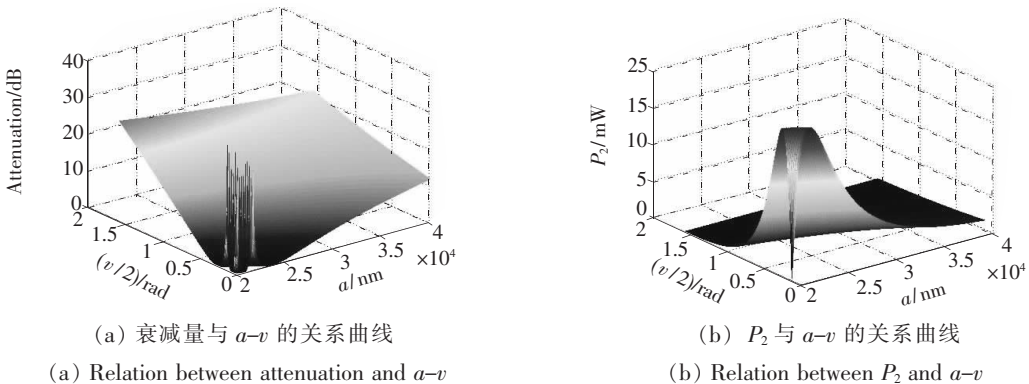
光纤锥是决定可调光衰减器性能的关键部件,因此对影响光纤锥性能的因素,如光纤纤芯半径 a , 锥角 v , 以及纤芯和包层的相对折射指数差 Δ 等的分析具有重要意义。两光纤横向间距 $u = 158 \mu\text{m}$, 耦合长度 $L = 100 \mu\text{m}$ 。固定光纤锥角 $v = 20^\circ$, 纤芯折射率 $n_1 = 1.47$, 包层折射率 $n_2 = 1.46$, 得到衰减量与 a 的关系曲线如图 3(a); 固定光纤纤芯半径 $a = 20 \mu\text{m}$, 纤芯折射率 $n_1 = 1.47$, 包层折射率 $n_2 = 1.46$, 得到衰减量与 v 的关系曲线如图 3(b); 固定光纤纤芯半径 $a = 20 \mu\text{m}$, 锥角 $v = 20^\circ$, 得到衰减量与 Δ 的关系曲线如图 3(c)。从图 3(a)可以看出, 随着 a 的增大, 可调光衰减器的衰减量开始有轻度的减小, 然后又逐渐增大。从图 3(b)可以看出, 在光纤锥角较小时, 可调光衰减器的衰减量产生波动, 在光纤锥角较大时, 随着光纤锥角的逐渐增大, 可调光衰减器的衰减量逐渐增大。从图 3(c)可以看出, 随着 Δ 的增大, 可调光衰减器的衰减量是逐渐减小的。图 4 给出了信号光纤输入激光功率 $P_1 = 20 \text{ mW}$



(a) Relation between attenuation and a (b) Relation between attenuation and $v/2$ (c) Relation between attenuation and Δ

图 3 光纤锥的特性分析

Fig. 3 Analysis of tapered fibers



(a) Relation between attenuation and $a-v$ (b) Relation between P_2 and $a-v$

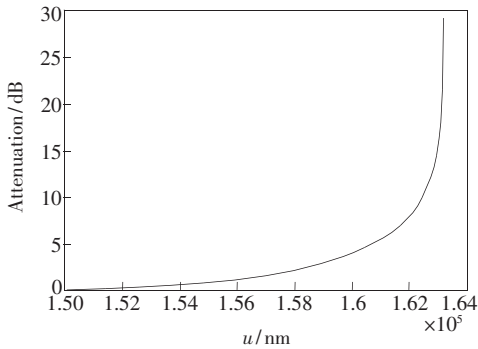
图 4 衰减量及 P_2 与 $a-v$ 的关系曲线

Fig. 4 Relations of attenuation and $a-v$, and P_2 and $a-v$

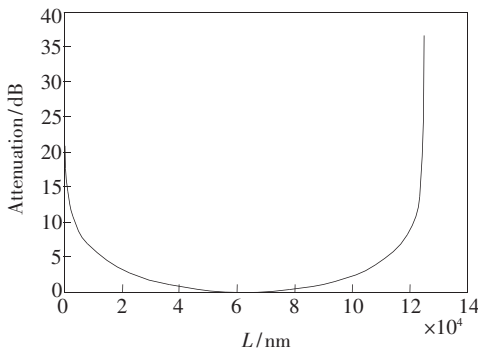
时可调光衰减器的衰减量及耦合光纤输出功率 P_2 与 $u-v$ 的关系曲线。在制作锥形光纤衰减器时所选用的锥形光纤要根据实际应用中所需的衰减程度来确定。

3.2 可调光衰减器的衰减特性分析

图 5、6 是在 3.1 中所设定的光纤锥的几何尺寸及实验条件下做出的。图 5(a) 是调节横向间距所得的衰减量与 u 的关系曲线, 可以看出, 调节横向间距 u 可以使可调光衰减器的衰减量大幅度改变, 衰减量接近 30 dB。图 5(b) 是调节纵向耦合长度 L 所得的衰减量与 L 的关系曲线。在 L 逐渐增大的过程中, 开始时可调光衰减器的衰减量逐渐减小, 两光纤锥之间的耦合作用增强; 过了最小衰减量点后, 可调光衰减器的衰减量又逐渐增大, 两光纤锥之间的耦合作用变弱, 衰减量可以达到 37 dB。图 6 给出了信号光纤输入激光功率 $P_1=20$ mW 时可调光衰减器的衰减量及耦合光纤输出功率 P_2 与 $u-L$ 的关系曲线。通过以上的分析可知利用此结构的衰减器能够较理想地



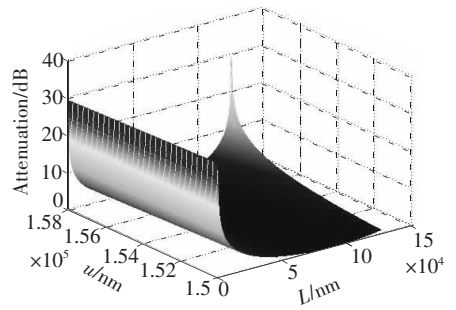
(a) 衰减量与 u 的关系曲线
(a) Relation between attenuation and u



(b) 衰减量与 L 的关系曲线
(b) Relation between attenuation and L

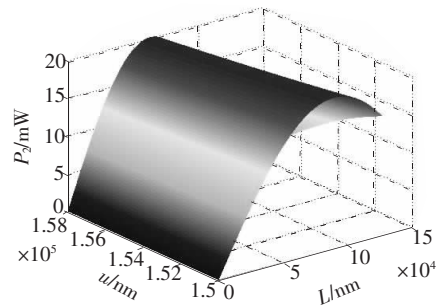
图 5 衰减量与 u 和 L 的关系曲线

Fig. 5 Relations of attenuations and u , and L



(a) 衰减量与 $u-L$ 的关系曲线

(a) Relation between attenuation and $u-L$



(b) P_2 与 $u-L$ 的关系曲线

(b) Relation between P_2 and $u-L$

图 6 衰减量及 P_2 与 $u-L$ 的关系曲线

Fig. 6 Relations of attenuation and $u-L$, and P_2 and $u-L$

削弱或控制光信号, 从而实现密集波分复用系统中的增益平坦和动态增益平衡。

3.3 可调光衰减器的波长微损耗特性分析

使用 1 530~1 560 nm 波长的宽带光源对器件进行波长相关测试时, 可以得到 <0.2 dB 的波长微损耗, 器件具有相当平稳的衰减性, 如图 7 所示。利用波长的微损耗特性, 在对气体进行浓度测

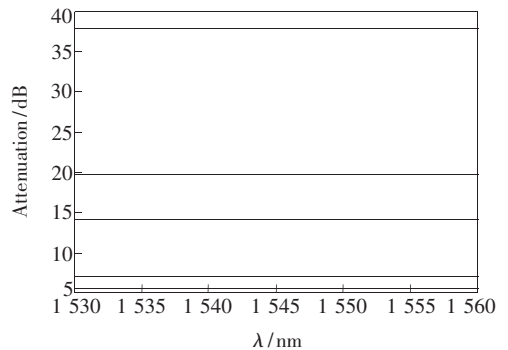


图 7 可调光衰减器的波长微损耗特性

Fig. 7 Wavelength minim-loss characteristic of variable optical attenuator

量和组分识别时,能够实现气体的吸收谱在微小范围内平移,避免被测气体吸收谱线的重叠,确保气体浓度测量的可靠性和单值性。

4 结 论

本文设计了可调光衰减器的耦合特性检测装置,基于耦合波理论分析了光纤纤芯半径 a , 锥角 ν , 以及纤芯和包层的相对折射指数差 Δ 等参量对可调光衰减器光纤锥性能的影响,为制作满足实际要求的光纤锥提供了依据。研究了两光纤锥的横向间距 u 和纵向耦合长度 L 的变化对光能量

衰减的影响,研究结果表明:调节两光纤锥的横向间距 u 可以实现可调光衰减器衰减量的大幅度调节,衰减量接近 30 dB;调节两光纤锥的纵向耦合长度 L 可以实现可调光衰减器衰减量的微调,衰减量可达 37dB。利用实验获得的衰减量能够较理想地削弱和控制光信号,从而实现密集波分复用系统中的增益平坦和动态增益平衡。最后研究了可调光衰减器的波长微损耗特性,用 1 530~1 560 nm 的宽带光源对器件进行波长相关测试时,获得了 <0.2 dB 的波长微损耗,器件具有相当平稳的衰减性,在进行气体浓度测量和组分识别时,利用此性质能够确保气体浓度测量的可靠性和单值性。

参考文献:

- [1] 薛春荣,汪洁,吴文娟. 光纤型光可变衰减器的探索[J]. 激光与红外, 2005, 35(4): 265-268.
XUE CH R, WANG J, WU W J. Exploring one kind of fiber-optic VOAs[J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(4): 265-268. (in Chinese)
- [2] 晏辉鸣,曹钟慧,吴兴坤. 光纤直接耦合微加工型可调光衰减器[J]. 光子学报, 2005, 34(5): 718-721.
YAN H M, CAO ZH H, WU X K. Micromachining based direct-coupled variable optical attenuator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(5): 718-721. (in Chinese)
- [3] 杨先辉,张秋华,于永森,等. 可调谐 F-P 腔进行锥形光栅反射带宽解调的应力测量方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 651-654.
YANG X H, ZHANG Q H, YU Y S, *et al.*. Measurement of temperature-insensitive strain based on reflected bandwidth demodulation of tapered fiber grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 651-654. (in Chinese)
- [4] 节德刚,刘延杰,孙立宁,等. 基于双光栅尺的高速高精度位移测量方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 1077-1083.
JIE D G, LIU Y J, SUN L N, *et al.*. A high speed and high precision displacement measurement method using double grating scales[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1077-1083. (in Chinese)
- [5] 黄旭光,叶晓靖,张小康,等. 光纤型热光可调光衰减器的设计及其衰减分析[J]. 光学学报, 2006, 26(12): 1787-1791.
HUANG X G, YE X J, ZHANG X K, *et al.*. Design and attenuation analysis for fiber-typed variable optical attenuator based on thermo-optic effect[J]. *Acta Opt. Sin.*, 2006, 26(12): 1787-1791. (in Chinese)
- [6] 魏会敏,罗风光,曹明翠,等. 基于低电压驱动 MEMS 的可调光衰减器的设计与性能分析[J]. 光电子·激光, 2006, 17(6): 685-687.
WEI H M, LUO F G, CAO M C, *et al.*. Design and performance analysis of a variable optical attenuator based on driven micro-electromechanical system[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(6): 685-687. (in Chinese)
- [7] CHENGKUO L. Monolithic-integrated 8CH MEMS variable optical attenuators[J]. *Sensors and Actuators*, 2005, 123(3): 596- 601.
- [8] SXMS R R A, ZOU H, STAGG J, *et al.*. MEMS variable optical attenuator with a compound latch[J]. *Micro-electronic Engineering*, 2004, 73(1): 423-428.
- [9] 潘炜,张晓霞,罗斌,等. 一种梯形干涉链可调谐光滤波器的设计与研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 627-632.
PAN W, ZHANG X X, LUO B, *et al.*. Design of tunable optical filter using ladder-interference-type structure[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 627-632. (in Chinese)
- [10] 邵国成,戴旭涵,杨昊宇,等. 一种闭环控制的错位型 MEMS 可调光衰减器[J]. 光子学报, 2006, 35(12): 1888-1891.
SHAO G CH, DAI X H, YANG H Y, *et al.*. A close-loop controlled offset type MEMS variable optical attenua-

tor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006,35(12):1888-1891. (in Chinese)

[11] 袁野, 邹勇卓, 鲍俊峰, 等. 一种新型微机电系统可调光衰减器[J]. *光学学报*, 2004,24(3):364-368.

YUAN Y, ZOU Y ZH, BAO J F, *et al.*. A novel variable optical attenuator based on micro-electromechanical system (MEMS) [J]. *Acta Opt. Sin.*, 2004,24(3):364-368. (in Chinese)

作者简介:李志全(1954—),男,博士生导师,主要从事非线性光电检测,光纤及光学传感器的研究。E-mail: lzq54@ysu.edu.cn

● 下期预告

基于混合优化算法的铝薄膜光学常数测定

金伟华^{1,2}, 金春水¹, 张立超¹, 朱宏力^{1,2}, 刘 磊^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100083)

提出了一种离线精确测定金属铝薄膜光学常数的方法,与传统的原位测量方法相比,这种方法不需要连接到真空室的复杂测量设备上。该方法以测量的椭圆光谱曲线和分光光谱曲线为目标,考虑金属铝薄膜在空气中表面氧化的影响,在混合优化算法的基础上,经过基于色散关系的多波长法拟合确定金属铝薄膜从紫外到可见区(200~800 nm)的光学常数;优化算法采用多种群并行遗传算法和单纯形法相结合的方式,提高了拟合质量和速度,得到了理想的结果,光谱曲线拟合误差 $<2\%$ 。在确定了铝光学常数的基础上,镀制了单腔紫外诱导透射滤光片,测量的透过率光谱与设计结果在 265 nm 处的峰值透过率偏差 $<1\%$ 。