

文章编号: 0258-7025(2002)12-1071-04

# 挡光型可变光衰减器的衰减量构成的分析

向金山<sup>1</sup>, 陈波<sup>1,2</sup>, 黄河振<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学物理系信息光学研究中心, 四川 成都 610064; <sup>2</sup> 炬光科技深圳有限公司, 广东 深圳 518038)

**提要** 从机械挡光型衰减器的原理结构出发, 在理论与实验两方面证实了挡光型可变衰减器的衰减量应包括直接挡光能量衰减和模场失配衰减两部分, 并得出了这两种衰减量之间的相互关系。

**关键词** 光纤通信, 机械挡光型可变衰减器, 能量衰减, 模场失配衰减

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A

## Analysis on Attenuation of Light-blocked Attenuator

XIANG Jin-shan<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1,2</sup>, HUANG He-zhen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Information Optics Research Institute, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064

<sup>2</sup>JDSU Shenzhen Ltd., Shenzhen, Guangdong 518038

**Abstract** Based on the analysis and calculation of attenuation of the light-blocked attenuator in theory and experiment, it is found that the total attenuation should include light-blocked-only attenuation and mode-mismatched attenuation and their relationship.

**Key words** optical fiber communication, light-blocked attenuator, energy-only attenuation, modefield mismatched attenuation

## 1 引言

可变光衰减器 VOA (Variable Optical Attenuator) 是光纤通信中基本的无源器件之一, 广泛用于 DWDM 系统中各信道间光功率的均衡。实现光功率衰减主要有中性滤光片技术和机械挡光技术, 目前中性滤光片技术占主流<sup>[1]</sup>。随着 DWDM 向更多的信道数发展(100 信道以上), 以及 Raman 光放大器的成熟和应用, 光路中的光功率的要求越来越高, 中性滤光片技术越来越不适应要求。基于机械挡光技术的可变衰减器, 可实现衰减量连续、大范围、高精度的调节, 特别是挡光片可采用金属材料, 能承受较大的功率, 这类可变衰减器在未来高功率 DWDM 系统中有重要应用前景。

本文从理论与实验两方面分析、比较机械挡光型 VOA 的衰减量的构成, 并得出它们的相互关系。

## 2 衰减损耗的构成分析

挡光型衰减器的原理框图如图 1 示, 光束在两准直器的耦合区内经过挡光、耦合入后续光路, 因此总的衰减损耗由直接挡光能量衰减 ( $L_1$ ), 模场失配衰减 ( $L_2$ ) 两部分构成。以下对它们的大小及相互关系分别进行分析计算。

### 2.1 高斯光束与光纤的耦合

一般情况下, 设输入的高斯分布为  $\Phi(x, y)$ , 光纤的模场分布为  $\phi(x, y)$ , 根据模场耦合理论<sup>[2,3]</sup>, 它们的耦合效率由两场的交迭积分求得

$$\eta = \frac{\left| \int_S \Phi \cdot \phi^* dS \right|^2}{\int_S |\Phi|^2 dS \cdot \int_S |\phi|^2 dS} \quad (1)$$

然后由  $L = -10 \lg(\eta)$  (dB) (2)

可求出耦合损耗(dB 值)。

收稿日期: 2001-08-27; 收到修改稿日期: 2002-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 69978014)资助项目。

作者简介: 向金山(1970—), 男(土家族), 湖北建始人, 1999 年至今在四川大学物理系光学专业攻读硕士学位, 主要从事微光学元件方面的研究。



图 1 挡光型 VOA 原理图

*a, c*: 光纤准直器; *b*: 机械挡光板(可上下活动控制对光束的衰减)

Fig. 1 Principle diagram of light blocked VOA

*a, c*: fiber collimator; *b*: block plate (movable up and down)

## 2.2 直接挡光能量衰减

设两准直器耦合区内光束的复振幅分布为

$$\phi_1(x, y) = A_0 \exp[-(x^2 + y^2)/w^2] \times \exp[j\theta(x, y)] \quad (3)$$

其中  $w$  为耦合区的光束振幅最大值的  $1/e$  处光斑半径,  $\theta(x, y)$  为光束的位相分布函数。整个光束的总能量为

$$I = \iint |\phi_1(x, y)|^2 dx dy \quad (4)$$

如该光束在被挡之前, 与光纤耦合效率为 100%, 则光纤的模场分布在准直器的耦合区内可表示为

$$\phi(x, y) = \phi_1(x, y) \quad (5)$$

当准直器耦合区内的光束被挡光板挡住一部分时, 耦合进光纤的光场分布发生变化。如图 1 中, 挡光板在任意点处的挡光位置函数为

$$\text{door}(x) = \begin{cases} 1 & x \in (x_0, \infty) \\ 0 & x \in (-\infty, x_0) \end{cases} \quad (6)$$

则被挡后的光束可表示为

$$\phi(x, y) = \phi_1(x, y) \text{door}(x) \quad (7)$$

此时直接挡光能量衰减(dB)为

$$L_1 = -10 \lg \left| \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\phi|^2 dS}{\int_{-\infty}^{\infty} |\phi_1|^2 dS} \right| = -10 \lg \left| \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\phi_1|^2 dS}{\int_{-\infty}^{\infty} |\phi_1|^2 dS} \right| \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

## 2.3 模场失配衰减

被挡光束由于衍射<sup>[4,5]</sup>, 在被挡方向的光场分布会展宽, 光斑直径扩大。与光纤耦合时, 由于模场失配, 再次引入一部分衰减, 称该衰减为模场失配衰减。

在准直器耦合区内, 被挡后的光束如(7)式表示, 与光纤的耦合效率为

$$\eta = \frac{\left| \int_S \phi(x, y) \phi^*(x, y) dx dy \right|^2}{\int_S |\phi(x, y)|^2 dx dy \int_S |\phi_1(x, y)|^2 dx dy} \quad (9)$$

将(3), (7)式代入(9)式得

$$\eta = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\phi_1(x, y)|^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} |\phi_1(x, y)|^2 dx dy} \quad (10)$$

再由(2)式可得模场失配衰减为

$$L_2 = -10 \lg(\eta) \quad (\text{dB}) \quad (11)$$

比较(8), (11)两式发现, 如果忽略准直器的插入损耗(理想情况下), 在任意挡光点处, 能量衰减与模场失配衰减完全相等。任一挡光点处总的衰减损耗为这两个损耗之和, 也为该点能量衰减的 2 倍(dB 值); 但是, 在考虑准直器插损时(实际情况下), 能量衰减与模场失配衰减将会有一定的偏差。

## 3 实验测试与理论计算的比较

### 3.1 实验装置及过程

机械挡光型衰减器具体测试实验框图如图 2 所示, 光纤准直器选用 C-lens 准直器, 其相关参数为: 插入损耗: 0.2 dB, 工作波长: 1550 nm, 准直器工作距离: 3 cm, 准直器耦合区内光束的直径为 0.4~0.5 mm, 实际测量的光束直径为 0.44 mm。

实验测得的直接挡光能量衰减与挡光点的位置关系如图 3 中的“方框线”。由于光探测器具有阈值光功率小和光接收面大的特点, 因此可利用此曲线确定准直器耦合区内光束的束腰半径为  $w_1$ 。确定准直光束的光斑半径对各种计算情形下的衰减损耗起着关键的作用。

当对光斑半径  $w_1$  为 0.22 mm 的准直光束模拟挡光时, 其能量衰减曲线为图 3 中的“实线”。图 3 中两曲线对应点间误差很小, 因此准直器间实际光束的光斑半径即为 0.22 mm, 这与上述准直器的光

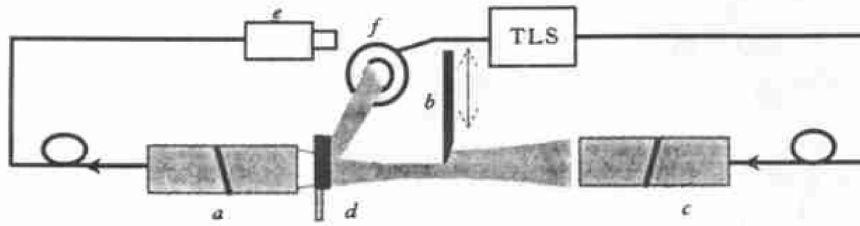


图 2 挡光型 VOA 实验测试框图

*a, c*: 光纤准直器; *b*: 挡光板(可上下活动实现对光束的衰减); *d*: 安装有反射镜的调节架(可将被挡光束反射进探测器 *f* 中); *e*: 光纤连接器; *f*: 光探测器; TLS: 可调激光源

Fig. 2 Light-blocked attenuator measurement diagram

*a, c*: fiber collimator; *b*: block plate (movable up and down); *d*: adjuster with high reflective mirror; *e*: fiber connector; *f*: photo detector; TLS: tunable laser source

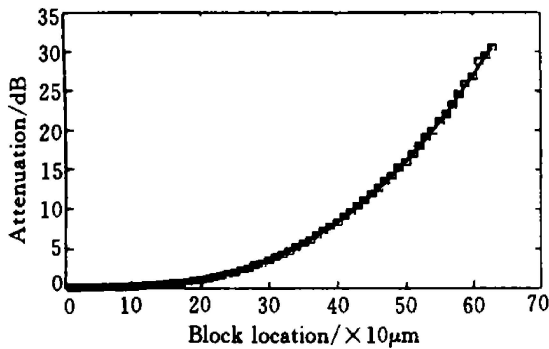


图 3 模拟能量衰减曲线(实线)与实际测试能量衰减曲线(方框)的比较

Fig. 3 Simulated energy attenuation (solid) and measured energy attenuation curve (rectangle)

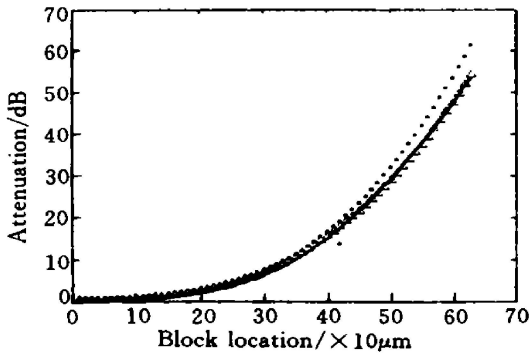


图 4 实验测量的总的衰减曲线与理论模拟的总的衰减曲线

(“点线”表示不考虑准直器插入损耗时的总的衰减曲线;“ $\Delta$ 线”表示考虑准直器插入损耗时总的衰减曲线(计算),“实线”表示实际测量的总的衰减曲线

Fig. 4 Measured total attenuation curve and calculated total attenuation curve

(dot line: total attenuation without collimator insertion loss;  $\Delta$  line: total attenuation with collimator insertion loss; solid line: real measured total attenuation curve)

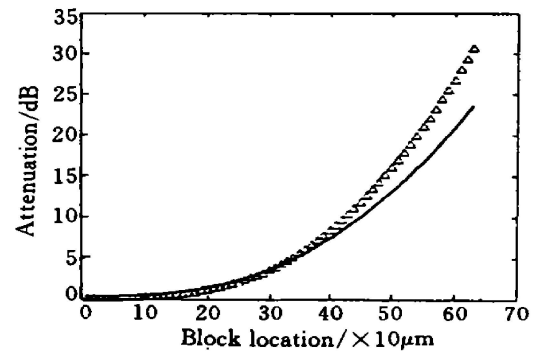


图 5 模场失配衰减曲线

(“ $\Delta$ 线”表示理想情况下的模场失配衰减曲线,“实线”表示实际情况下的模场失配衰减)

Fig. 5 Mode-field mismatched attenuation curve

( $\Delta$  line: mode-field mismatched attenuation curve ideally; solid line: mode-field mismatched attenuation curve really)

伴随着总的衰减体现出来,为了弄清模场失配衰减与能量衰减、总的衰减的关系,必须通过计算比较。计算时,分理想情况(忽略准直器插入损耗)和实际情况(考虑准直器插入损耗)两种,对半径为  $w_1$  的光束进行挡光计算,得到各自的模场失配衰减、总的衰减损耗。图 4 为测量的总的衰减、计算的总的衰减曲线,图 5 为模场失配衰减曲线。

### 3.2 理论计算与实验的比较

对上述结果的曲线进行分析、比较:

1) 理想情况下(忽略准直器插入损耗),任意挡光点处,直接挡光能量衰减(图 3 的方块线)与模场失配耦合衰减(图 5 的三角线)完全相同,总的衰减(图 4 的点线)为能量衰减或模场失配耦合衰减的 2 倍(dB 值)。

2) 实际情况下(考虑准直器插入损耗),模场失配衰减与理想情况下的模场失配衰减相比,由于准直器的插入损耗主要是耦合损耗,由(1)式知,此损耗不能简单地线性叠加在各挡光点的衰减值上,而

斑尺寸一致。

由于模场失配衰减不能直接测量出来,它总是

是一个非线性作用的过程。使得模场失配衰减的变化趋势出现大小交替(图 5 中两曲线相比),总的衰减(图 4 中的三角线)与能量衰减的比值在 1.8 至 2 之间变化。

3) 实验测定的总衰减曲线(图 4 中的实线)与考虑准直器插入损耗时计算的总衰减曲线(图 4 中的三角线)符合得很好。

## 4 结 论

通过理论与实验两方面对机械挡光型光衰减器的衰减损耗构成进行分析、比较,发现在同一挡光点处,衰减器的衰减,不仅有直接挡光能量衰减,还有模场失配耦合衰减,且直接挡光能量衰减与模场失配耦合衰减大小完全相同,即总的衰减是能量衰减或模场失配耦合衰减的 2 倍。即使在考虑光路损耗

的前提下,这一关系仍基本成立。这一量化关系对改善可变衰减器的挡光结构、减小器件的插入损耗,提高器件的性能有着重要的指导作用。

**致谢** 由衷感谢光炬公司技术总顾问陈益新教授对本文的支持与帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Lin Xuehuang. Optical Passive Elements [M]. Beijing: People's Post and Telecom Publisher, 1997 (in Chinese)
- 2 Norio Kashima. Passive Optical Components for Optical Fiber Transmission [M]. London: Artech House, 1995
- 3 Zhao Zisen. Engineering of Optical Fiber Communication [M]. Beijing: People's Post and Telecom Publisher, 1994 (in Chinese)
- 4 Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics [M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
- 5 Joseph W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. San Francisco: McGraw-hill Book Company, 1968

## 激光二极管端面抽运的高效高功率 Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器\*

我们最近研制成功了激光二极管端面抽运的高效高功率 Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器,该器件综合了抽运光耦合系统与谐振腔参数,采用基模热稳腔设计,很好地解决了抽运光与振荡光之间模匹配和激光介质的热效应等问题。

激光器抽运源采用 Coherent 公司产 FAP-System 型 30 W 的 808 nm 激光二极管(LD); Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体为福建 Castech 晶体公司生产,掺 Nd 浓度为 0.3 at.-%,尺寸为 3 mm × 3 mm × 10 mm,透光长度 10 mm;输出镜对 1064 nm 透过率为 10%。

使用 Newport 公司 2835-C 型光学多功能功率计测量激光功率,在 28.77 W 的 LD 尾纤输出功率抽运下,1064 nm TEM<sub>00</sub> 激光输出功率达到 18.16

W,功率不稳定度为 1%。根据上述实验结果,如果定义 1064 nm 激光输出功率与 LD 尾纤输出功率的比值为光-光转换效率,则激光器的光-光转换效率为 63.1%;如果定义 1064 nm 激光输出功率与经过光学耦合系统后的 LD 抽运功率的比值为光-光转换效率,则激光器的光-光转换效率为 70.3%。

<sup>1</sup> 郑州大学河南省激光应用技术重点实验室,  
河南 郑州 450052

<sup>2</sup> 天津大学精夜学院,天津 300072

<sup>3</sup> 曲阜师范大学物理工程学院,山东 曲阜 273165

郑 义<sup>1,3</sup>, 郭 洪<sup>1</sup>, 姚建铨<sup>1,2</sup>, 孙 梅<sup>3</sup>,  
张红瑞<sup>1</sup>, 高明义<sup>1</sup>, 董 杰<sup>1</sup>, 陈兴海<sup>3</sup>

收稿日期: 2002-11-12