

# 新颖的掺铒光纤放大器无源 复合组件的研究\*

刘水华 虞国华\*\* 方罗珍 江山

(武汉邮电科学研究院固体器件研究所 \*\* 华中理工大学光电子工程系 武汉 430074)

**提要** 报道了一种将光波分复用器与光隔离器集于一体的适用于掺铒光纤放大器的新颖复合组件。根据复合组件的性能指标对组件的结构参数进行了优化设计。实际制作的复合组件,得到泵浦光插入损耗 $< 0.6$  dB,信号光的插入损耗 $< 1.5$  dB,反向隔离度 $> 42$  dB,体积为 $\phi 9 \times 45$  mm<sup>3</sup>。将复合组件用于掺铒光纤放大器中(前向泵浦方式)得到约 30 dB 的小信号增益,10 dBm 的饱和输出功率。

**关键词** 掺铒光纤放大器,波分复用器,光隔离器,无源复合组件

## 1 引 言

掺铒光纤放大器(EDFA)具有增益高、噪声低、输出功率大<sup>[1,2]</sup>、工作频带宽等优良性能,在系统应用中具有与偏振无关、信道间的串扰可忽略不计、对传输码率与格式及系统升级透明等优点,已成为光通信、光缆电视(CATV)、光信息网络系统中的关键器件之一,利用 EDFA 的密集波分复用器件已成为当今高速率、长距离光通信发展的方向之一。

随着技术进步,EDFA 逐步商用化,即要求 EDFA 光模块结构紧凑、性能稳定、可靠。这就需要研制、开发适合于 EDFA 商用化的复合组件。本文根据商用化需求,研制一种将光隔离器和波分复用器(WDM)组合成单个器件的新颖组件。该组件中两器件均通过光路直接进行耦合,中间没有光纤接点,因此体积小、结构紧凑、性能也更加稳定可靠。经实际制作,得到该组件的隔离度大于 40 dB,信号光插入损耗小于 1.5 dB,泵浦光插入损耗小于 0.6 dB,偏振灵敏度小于 0.1 dB。

## 2 复合组件的结构和设计

### 2.1 复合组件的结构和原理

WDM 与光隔离器的复合组件采用如图 1 所示的复合结构,其中 WDM 采用 GRIN 型复用器<sup>[3]</sup>,光隔离器采用“Wedge”双折射型<sup>[4]</sup>结构。该组件充分利用了自聚焦透镜(GRIN)离轴耦合特性,仅利用了一对 GRIN 就将 WDM 和光隔离器通过光路耦合成一个复合组件,取消

\* 邮电部重点项目。

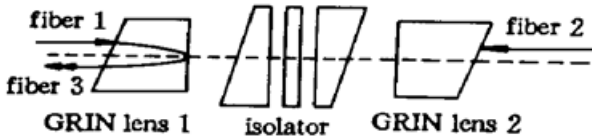


图1 波分复用器+光隔离器的掺铒光纤放大器用无源复合组件

Fig. 1 A hybrid passive component for EDFA with WDM and an isolator

了WDM和光隔离器间的光纤接点,这就减小了器件的体积、节省了材料、增加了性能的稳定性和该组件能用在EDFA三种基本泵浦方式中的任何一种。针对不同的泵浦方式,只需改变信号的输入口和输出口和隔离器的隔离方向即可。

复合组件的工作原理(用作前向泵浦)如图1所示,端口1输入的泵浦光经第一个GRIN透镜后端面反射膜的反射,耦合进端口3的EDF中,端口2输入的信号,经第二个GRIN透镜输入后,再经第一个GRIN透镜耦合进端口3的EDF。从光纤3返回的光由于隔离器的隔离,不能回到光纤2,这样就实现了端口1的泵浦光和端口2的信号光耦合进端口3的EDF,同时隔离了端口3到端口2的信号光。

2.2 组件结构参数的设计及制作

如图1所示的复合组件中,涉及结构优化设计的主要参数有光纤1与光纤3的间距 $d$ ,隔离芯中双折射晶体的倾斜角度 $\theta$ 和双折射晶体与旋转晶体间距 $L$ 。

在组件中,由于利用了GRIN透镜的离轴耦合,这就会给信号光引入附加的耦合损耗,而且它也是造成泵浦光插入损耗的主要原因。假设从单模光纤出来的光是由光纤端面上许多点光源发出的锥形光束组成,每一个点光源发出的许多光线中,每一条光线都携带一定比例的能量,那么利用光线轨迹方程就可判断全部入射光线中有多少条光线通过GRIN透镜后耦合进对应的单模光纤,从而确定由于GRIN透镜离轴耦合引起耦合损耗的大小。图1中,假定光纤1发出许多光线进入GRIN透镜,对每一条光线,先根据入射点的坐标及入射光线的方位角,利用GRIN透镜的传输矩阵计算出该光线出射点坐标和方位角,根据点坐标判断该点是否落在接收光纤3的芯径内,若没有落在接收光纤3的芯径内,则认为这条光线所携带的光能量被损耗掉;相反若落在接收光纤3的芯径内,则利用方位角计算出该光线的数值孔径,若所得数值孔径小于光纤3的数值孔径,则该光线被光纤3所接收,反之则被损耗掉。最后将光纤3所接收的光线数目 $N_{receive}$ 与光纤1所发出的光线数目 $N_{emission}$ 相比,其比值就为由于GRIN透镜离轴耦合引起的光纤1到光纤3的耦合损耗<sup>[5]</sup>:

$$\alpha = -10 \log \frac{N_{receive}}{N_{emission}} \quad (1)$$

利用上述方法进行计算,计算参数为:单模光纤的数值孔径 $NA = 0.1$ ,芯径 $D = 10 \mu m$ ,折射率 $n_0 = 1.45$ ;GRIN透镜的聚焦常数 $\sqrt{A} = 0.327 \text{ mm}^{-1}$ ,中心折射率 $n_0 = 1.59$ ,长度 $z = 9.602 \text{ mm}$ 。计算的光纤1到光纤3的耦合损耗和光纤1与光纤3间距 $d$ 的关系的结果如图2所示。从图2可以看出,随着光纤1与光纤3间距 $d$ 的增大,光纤1与光纤3的耦合损耗也随之增大,当 $d$ 的变化范围为 $0.2 \sim 1 \text{ mm}$ 时,耦合损耗为 $0.25 \sim 0.81 \text{ dB}$ 。因此,要想得到泵浦光的低损耗输入,就必须使得 $d$ 越小越好。在实际器件中,我们将两根光纤设计成紧挨在一起,即 $d = 0.25 \text{ mm}$ 。

信号光的插入损耗和隔离度也是在组件结构参数优化中必须考虑的因素。为了简化,近似认为信号光

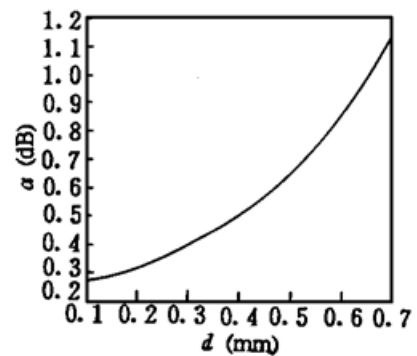


图2 自聚焦透镜型波分复用器的耦合损耗与输入光纤的离轴距离的关系曲线  
Fig. 2 GRIN-type WDM coupling loss vs offset distance between the input fiber and the optical axis

的插入损耗来自两个方面: 一是 GRIN 透镜离轴耦合引起的附加损耗, 另一是 GRIN 透镜轴心耦合时, 信号光通过 GRIN 透镜和双折射晶体、旋光晶体时产生的损耗。利用波动光学理论, 得到组件中信号光的插入损耗为

$$\eta_{\text{loss}} = \alpha + \exp \left[ - \left[ \frac{n_0 \sqrt{A} \pi h w_0}{2\lambda} \right]^2 \right] \quad (2)$$

式中  $\alpha$  如公式(1) 所示,  $n_0$  为 GRIN 轴线折射率,  $\lambda$  为信号光的波长,  $w_0$  为单模光纤输出的高斯光束腰斑半径,  $h$  为输入光纤输入的光经准直 GRIN 透镜和隔离芯的传输后到会聚 GRIN 透镜输入面时  $o$  光和  $e$  光两束平行光的间距。

同样通过理论分析, 可得到复合组件中信号光的峰值隔离度为

$$\eta_{\text{isolation}} = \frac{1}{2} \left\{ \exp \left[ - \frac{(n_0^2 k^2 \sin^2 \theta_o + 4 \cos^2 \theta_o h_o^2)}{2(1 + \cos^2 \theta_o)} \cdot \left[ \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi A} n_2 w_o} \right]^2 \right] + \exp \left[ - \frac{(n_0^2 k^2 \sin^2 \theta_e + 4 \cos^2 \theta_e h_e^2)}{2(1 + \cos^2 \theta_e)} \cdot \left[ \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi A} n_2 w_o} \right]^2 \right] \right\} + (E_p + E_q) \times \exp \left[ - \left[ \frac{n_0 \sqrt{A} \pi h w_0}{\lambda} \right]^2 \right] \quad (3)$$

式中,  $k$  为信号光传播常数,  $E_p$  为双折射晶体的消光比,  $E_q$  为旋光晶体的消光比,  $\theta_o, \epsilon, h_o$  和  $h_e$  分别为在信号光反向传输时, 输出光纤返回的  $o$  光和  $e$  光经准直透镜和隔离芯后射向会聚透镜的夹角和偏轴距离。上述的  $h, \theta_o, \theta_e, h_o$  和  $h_e$  均是组件中双折射晶体的楔角  $\theta$  和双折射晶体与旋转晶体间距  $L$  的函数。至于,  $h, h_o, h_e, \theta_o, \theta_e$  与  $\theta, L$  的关系可利用光学折射定理推导得到。

对公式(2), (3) 进行计算, 得到图 3 和图 4 的关系曲线。图 3 是复合组件的反向隔离度、正向插入损耗与双折射晶体楔角的关系曲线。此时选定双折射晶体为钽酸钷( $\text{YVO}_4$ ), 旋光晶体为 YIG, 两双折射晶体的间距为 0.6 mm。工作波长为  $1.55 \mu\text{m}$ ,  $E_p$  为 50 dB,  $E_q$  为 45 dB。GRIN 透镜的参数如图 2 所述。图 4 是当双折射晶体的楔角为  $7^\circ$  时, 组件的隔离度和插入损耗与两双折射晶体间距  $L$  的关系曲线。图 3 和图 4 的关系曲线中的损耗忽略了各器件的吸收损耗和 GRIN 离轴耦合引起的附加损耗。

从图 3 可以看到, 增加双折射晶体楔角, 组件信号光的隔离度迅速增加, 而信号光的插入损耗变化幅度不大, 因此  $\theta$  越大, 对提高信号光隔离度越有利。但考虑到  $E_p, E_q$  的限制和组件的偏振相关损耗的性能指标, 选择  $\theta$  为  $7^\circ$  较合适。

从图 4 也可以看到: 组件的信号光隔离度随间距  $L$  的增大而变化幅度不大, 而插入损耗随  $L$  的增加而增大, 因此小间距  $L$ , 对提高组件性能是有利的。结合实际器件的厚度及制作的方便, 选择  $L$  为 0.6 mm。

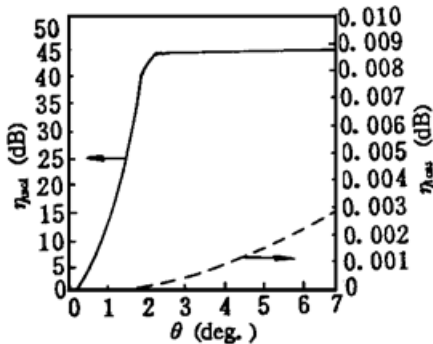


图 3 楔型光隔离器的隔离度和插入损耗与双折射晶体楔角的关系曲线

Fig. 3 Isolation and insertion losses of the wedge-type isolator vs wedged-angle of a birefringent crystal

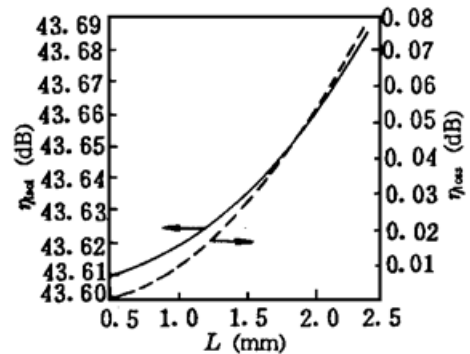


图 4 楔型光隔离器的隔离度和插入损耗与两双折射晶体间距的关系曲线

Fig. 4 Isolation and insertion losses of the wedge-type isolator vs distance of two birefringent crystal

此外,为了提高组件的回波损耗,采用 $8^\circ$ 斜面插针与斜面的GRIN透镜耦合,如图1所示,利用以上优化的结构参数,我们进行了实际制作,制作中采用 $\text{YVO}_4$ 作双折射晶体, $\text{YIG}$ 作旋光晶体,光纤1和光纤3采用截止波长为 $960\text{ nm}$ 的单模光纤,光纤2采用截止波长为 $1550\text{ nm}$ 的单模光纤,GRIN透镜的参数如图2计算参数一致。经测量,所制得的复合组件的性能指标如下:泵浦光的插入损耗 $< 0.6\text{ dB}$ ,信号光的插入损耗 $< 1.5\text{ dB}$ ,信号光的反向隔离度 $> 42\text{ dB}$ ,隔离带宽为 $40\text{ nm}$ ,回波损耗 $> 52\text{ dB}$ ,体积为 $\Phi 9 \times 45\text{ mm}^3$ ,泵浦波长为 $980 \pm 20\text{ nm}$ ,信号光波长为 $1550 \pm 20\text{ nm}$ 。

### 2.3 复合组件在EDFA中的应用

将所研制的复合组件用于EDFA的前向单级泵浦中,实验中掺铒光纤的长度为 $21\text{ m}$ ,泵浦激光器的波长为 $978\text{ nm}$ ,泵浦功率为 $80\text{ }\mu\text{W}$ ,信号光波长为 $1550\text{ nm}$ 。得到信号光的小信号增益约为 $30\text{ dB}$ ,噪声指数 $< 5\text{ dB}$ ,饱和输出功率 $> 10\text{ dBm}$ 。

### 参 考 文 献

- 1 E. Desravier, J. R. Simpon. High-gain erbium-doped travelong-wave fiber. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(11) : 888
- 2 R. J. Mears, L. Roke, J. M. Jawreney *et al.*. Low-noise Er-doped fiber amplifier operating  $1.54\text{ }\mu\text{m}$ . *Electron. Lett.*, 1987, **23**(19) : 1026~ 1030
- 3 J. M. Senior, S. D. Cusuorth. Devices for wavelength multiplexing and demultiplexing. *IEE Proceedings*, 1989, **136**(3) : 183~ 201
- 4 Masataka Shirasaki, Kunihiko Asama. Compact optical isolator for fiber using birefringent wedges. *Appl. Opt.*, 1982, **23**(23) : 4296~ 4299
- 5 Thyagarajan *et al.*. Aberration losses of the microoptic directional coupler. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(7) : 1061

## Studies on a Novel Hybrid Passive Component for EDFA

Liu Shuihua Yu Guohua\* Fang Luozhen Jiang Shan

(Solid State Devices, Wuhan Research Institute of Post & Telecommunications, Wuhan 430074)

\* Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** In this paper, a novel hybrid passive component with a wavelength-division multiplexer and a polarization insensitive optical isolator for an erbium-doped amplifier is reported. The optimum design for hybrid component parameters by considering the characters of the hybrid component is presented. The hybrid component has the following features: insertion loss of signal light is less than  $1.5\text{ dB}$ , the isolation of signal light is more than  $42\text{ dB}$ , the insertion loss of pump light is less than  $0.6\text{ dB}$ , and the  $9\text{ mm}$  diameter component is  $45\text{ mm}$  long. We apply this hybrid component to an practical EDFA using the single forward pumping structure and achieve the small signal gain of about  $30\text{ dB}$ , the noise figure less than  $5\text{ dB}$ , and the saturated output power more than  $10\text{ dBm}$ .

**Key words** erbium-doped fiber amplifier, wavelength-division multiplexer, optical isolator, hybrid passive component