

文章编号: 1001-3806(2007)05-0544-04

高功率掺镜双包层光纤激光器热效应理论研究

陈子伦, 侯 静, 姜宗福*

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院 定向能技术研究所, 长沙 410073)

摘要: 针对高功率双包层光纤激光器热效应严重制约着光纤激光器的输出功率和光束质量这一现象, 利用热传导方程和边界条件推导出了双包层光纤激光器温度分布的解析解, 进而分析了热效应引起的应力分布, 温度和应力引起的折射率变化以及热效应引起的光程差。结果表明, 在纤芯轴线处切向、法向、轴向应力分别达到负的最小值, 而在光纤表面处径向应力为 0, 法向、轴向达到正的最大值; 应力引起的折射率变化与温度引起的折射率变化相比较小; 温度变化是热效应引起光程差主要原因, 热膨胀和热应力引起的光程差较小。

关键词: 激光技术; 掺镜双包层高功率光纤激光器; 热效应; 光程差

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Theoretical study on thermal effect in Yb-doped double-clad high power fiber laser

CHEN Zi-lun, HOU Jing, JIANG Zong-fu

(Institute of Directed Energy Technology, Photoelectric Science and Engineering School, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Thermal effect of high power fiber laser severely limits the output power and beam quality. Temperature distribution in a double-clad high power fiber laser was analyzed based on thermal conductive equation and boundary condition, and thermal stress distribution was presented by temperature distribution. The change of index refraction induced by temperature and stress was analyzed separately. Optic path difference in double-clad high power fiber laser induced by thermal effect was presented. Results indicate that all stresses are compressive in the fiber core region; however in the cladding region, the stress is partly compressive and tensile; at the fiber outer boundary, the radial stress is zero while the tangential and longitudinal stress are equal and tensile; the change of index refraction induced by temperature is larger than by stress. Optic path difference was caused mostly by the change of temperature, very small by thermal expansion and thermal stress.

Key words laser technique; Yb-doped double-clad high power fiber laser; thermal effects; optic path difference

引 言

高功率掺镜双包层光纤激光器采用了掺镜离子的双包层光纤作增益介质, 光光转换效率有了明显的提高, 突破了其输出功率低的瓶颈, 因此在工业及通信领域有着广泛的应用前景。随着二极管抽运技术的不断成熟, 千瓦级的光纤激光器^[1,2]已经研制成功。与传统的固体激光器相比, 双包层光纤激光器具有较大的表面积-体积比, 工作在低功率时能有效散失抽运光所沉积的热量, 但是随着输出功率的不断提高, 吸收的热将引起一系列的效应影响激光器的光束质量, 因此热效应是高功率光纤激光器必须考虑的因素之一。

目前, 关于双包层光纤激光器热效应的研究常用

的方法是利用计算机进行数值模拟计算^[3~6], 其中 BROWN^[4]等人对高功率光纤激光器的热效应进行了详细的分析, 但是把光纤吸收的热能均匀分布在纤芯中, 这与实际相差较大; WANG^[5], XIONG^[6]等也对光纤激光器的热效应进行了分析, 但是他们只分析了温度场, 没有对温度场引起的折射率变化和热应力引起的折射率进行分析。

在这种情况下, 作者针对双包层光纤激光器的特殊结构, 利用热传导方程并借助速率方程导出温度分布的解析解。由温度分布的解析解得到热效应引起的应力分布, 进而得到由于应力和温度引起的折射率变化; 最后, 利用前面的结果给出了热效应引起的光程差, 并对此进行了讨论。

1 腔内光纤的温度分布

高功率双包层光纤激光器的结构见图 1, $P_p^\pm(z)$, $P_s^\pm(z)$ 分别表示抽运光、信号光在光纤中的分

作者简介: 陈子伦 (1978-), 男, 博士研究生, 主要从事高功率光纤激光器和高功率放大器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jiangzongfu@yahoo.com.cn

收稿日期: 2006-07-18 收到修改稿日期: 2006-09-01

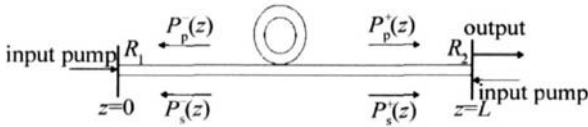


Fig 1 Schematic illustration of the fiber laser geometry

布情况, $R_1(\lambda), R_2(\lambda)$ 是在光纤两端光栅对信号光的反射率。

高功率光纤激光器工作产生的热效应可用经典的热传导方程来描述。因为纵向的热传导只对激光介质中受抽运端面附近很小的区域有影响, 因此, 在稳态下可将热传导方程简化成如下形式^[4, 5]:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right] = -\frac{Q(r, z)}{K}, & (0 \leq r \leq r_1) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right] = 0 & (r_1 \leq r \leq r_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中, r 是光纤内任一点与中心轴 z 的距离, r_1, r_2 分别

$$Q(r, z) = \frac{2\alpha_a \eta_h [P_p^+(z) + P_p^-(z)] + 2\alpha_s [P_s^+(z) + P_s^-(z)]}{\pi w_p^2} \exp(-2r^2/w_p^2) \quad (3)$$

式中, α_a 表示抽运光的总损耗包括吸收损耗和散射损耗, α_s 表示信号光的散射损耗, η_h 为热转换系数, w_p 为抽运高斯半径, 假使抽运光全部耦合入纤芯中, w_p 近似等于纤芯半径 r_1 。将 (3) 式代入 (1) 式, 并参考边界条件 (2) 式, 可得到光纤的温度分布如下:

$$\begin{cases} T = T_0 + \frac{q(z)}{4\pi K} \times \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m 2^m}{m!} \left[\frac{(r/r_1)^{2m} - 1}{m} + 2 \ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right) - \frac{2K}{hr_2} \right], & (0 \leq r \leq r_1) \\ T = T_0 + \frac{q(z)}{2\pi K} \times \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m 2^m}{m!} \left[\ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right) - \frac{K}{hr_2} \right], & (r_1 \leq r \leq r_2) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $q(z) = \alpha_a \eta_h [P_p^+(z) + P_p^-(z)] + \alpha_s [P_s^+(z) + P_s^-(z)]$, 其中 $P_p^\pm(z)$ 和 $P_s^\pm(z)$ 的计算方法见文献 [7]。而计算所用的参数^[7, 8]如下: $\lambda_s = 1064\text{nm}$, $\lambda_p =$

是纤芯半径和包层半径; K 是热导率, T 和 T' 分别是纤芯和包层区域的温度。在纤芯内由于镱离子吸收能量而受到热源函数 $Q(r, z)$ 的作用, 在包层区域没有热源, 因此边界条件满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \\ T \Big|_{r=r_1} = T' \Big|_{r=r_1} \\ \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \frac{\partial T'}{\partial r} \Big|_{r=r_1} \\ \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \frac{h}{K} [T_0 - T' (r=r_2)] \end{cases} \quad (2)$$

式中, h 是对流传热系数, T_0 表示室温。抽运源是半导体激光器, 因此, 双层光纤激光器的热源函数是高斯型的, 故 $Q(r, z)$ 可表示为^[3, 5]:

975nm, 光纤对抽运光的吸收截面 $\sigma_{ap} = 2.5 \times 10^{-20} \text{cm}^2$, 对抽运光的发射截面 $\sigma_{ep} = 2.5 \times 10^{-20} \text{cm}^2$, 光纤对信号光的吸收截面 $\sigma_{as} = 2 \times 10^{-21} \text{cm}^2$, 光纤对信号光的发射截面 $\sigma_{es} = 1.4 \times 10^{-23} \text{cm}^2$, $A = 7 \times 10^{-6} \text{cm}^2$, $V = 4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, 光纤对抽运光的损耗系数 $\alpha_p = 3 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$, 光纤对信号光的损耗系数 $\alpha_s = 5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$, 抽运光耦合入光纤的比例 $\Gamma_p = 0.0014$, 信号光耦合入纤芯的比例 $\Gamma_s = 0.85$, $\tau = 1\text{ms}$, $R_1 = 0.98$, $R_2 = 0.04$, $L = 30\text{m}$, $r_1 = 15\mu\text{m}$, $r_2 = 400\mu\text{m}$ ^[2], 热转换系数 $\eta_h = 0.101$, h 取典型值 $10\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。前后端抽运功率分别为 500W 时的信号光和抽运光在光纤中的传输规律见图 2a 轴向温度分布见图 2b 前抽运端径向的温度图见图 2c。从图 2 可知, 光纤轴向温差较大, 约有 200K, 而在径向范围内则较小, 温差只有几个开尔文。

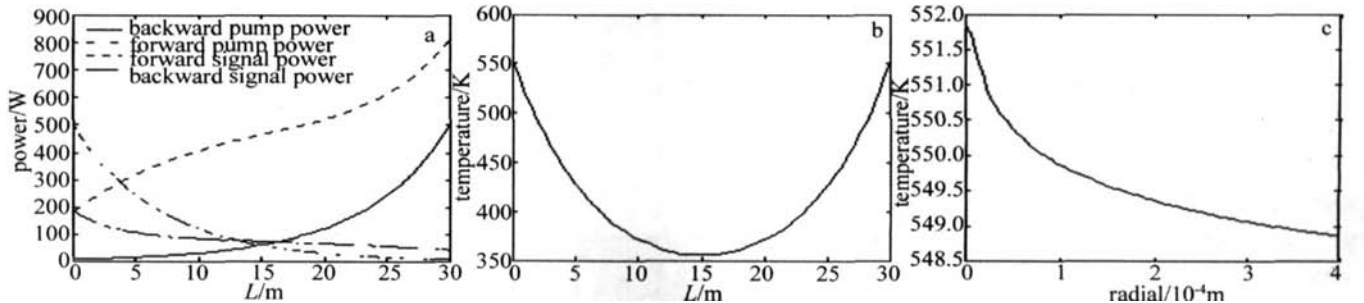


Fig 2 a— pump and signal powers as a function of the position along the fiber b— temperature along the fiber as a function of axial coordinate c— temperature in pumped surface as a function of radial coordinate

2 光纤中的应力分布

因为光纤的长度 L 远大于光纤外包层直径 $2r_2$, 即

$L/2r_2 \gg 1$ 。因此, 可以引用平面应变的近似理论: 即假定轴向应变为 0, 则径向、切向和沿轴方向的应力表达式如下^[9]:

$$\begin{cases} \delta_r(r) = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left[\frac{1}{b^2} \int_0^b f(r) r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r f(r) r dr \right] \\ \delta_\theta(r) = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left[\frac{1}{b^2} \int_0^b f(r) r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r f(r) r dr - T(r) \right] \\ \delta_z(r) = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left[\frac{2}{b^2} \int_0^b f(r) dr - T(r) \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中, E, α, ν 分别是杨氏模量、热膨胀系数、泊松比。把温度表达式 (4) 式代入 (5) 式, 得到应力分布如下:

$$\begin{cases} \delta_r(r) = \frac{q}{4\pi M} \sum_{s,m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m 2^m}{m!} \left\{ -\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) + \frac{m}{2(m+1)} \left(\frac{r_1^2}{r_2^2} \right) - \frac{1}{2} - \frac{1}{2m} \left[\frac{1}{m+1} \left(\frac{r}{r_1} \right)^{2m} - 1 \right] \right\} \\ \delta_\theta(r) = \frac{q}{4\pi M} \sum_{s,m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m 2^m}{m!} \left\{ \frac{m}{2(m+1)} \left(\frac{r_1^2}{r_2^2} - \frac{r_1^2}{r^2} \right) - \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) \right\} \\ \delta_z(r) = \frac{q}{4\pi M} \sum_{s,m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m 2^m}{m!} \left\{ \frac{m}{2(m+1)} \left(\frac{r_1^2}{r_2^2} \right) - \frac{1}{2} - \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) - \frac{1}{2m} \left(\frac{2m+1}{m+1} \frac{r^{2m}}{r_1^{2m}} - 1 \right) \right\} \\ \delta_r(r) = \frac{q}{4\pi M} \sum_{s,m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m 2^m}{m!} \left\{ \frac{m}{2(m+1)} \left(\frac{r_1^2}{r^2} - \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) - 1 - \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) \right\} \\ \delta_\theta(r) = \frac{q}{4\pi M} \sum_{s,m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m 2^m}{m!} \left\{ \frac{m}{(m+1)} \frac{r_1^2}{r_2^2} - 1 - 2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) - \frac{1}{m} \left[\left(\frac{r}{r_1} \right)^{2m} - 1 \right] \right\} \\ \delta_z(r) = \frac{q}{4\pi M} \sum_{s,m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m 2^m}{m!} \left\{ \frac{m}{(m+1)} \frac{r_1^2}{r_2^2} - 1 - 2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \right\} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $M_s = (1-\nu)K/\alpha E$, 通过上面的方程式可以看到满足边界条件: $\sigma_r(r=r_2) = 0, \sigma_r(r=0) = \sigma_\theta(r=0), \sigma_\theta(r=r_2) = \sigma_z(r=r_2)$ 和连续性条件 $\sigma_r(r=r_1) = \sigma_\theta(r=r_1), \sigma_\theta(r=r_1) = \sigma_\phi(r=r_1), \sigma_z(r=r_1) = \sigma_\phi(r=r_1)$ 。参数 $M_s = 3.05 \times 10^{-2} \text{W} \cdot \text{cm} / \text{kg}^{1/4}$ 时, 抽运端面应力分布见图 3。从图中可以看出, 在纤芯轴

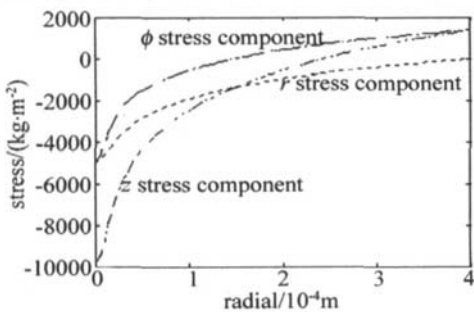


Fig 3 Stress in pumped-surface as a function of radial coordinate

线处切向、法向、轴向应力分别达到负的最小值, 负值表示压应力, 径向应力在表面处为 0 而法向、轴向达到正的最大值, 正的表示拉应力。因为物体承受压应力的能力比承受拉应力的能力强很多, 因此, 在考虑光纤热应力的破坏时应该考虑光纤表面的轴向、切向的拉应力。

3 热效应引起的折射率变化

由于热效应引起的光纤温升将引起光纤折射率的变化, 另外热效应引起的应力分布也将改变光纤的折射率, 总的折射率变化表达式如下:

$\Delta n_{r\phi}(r) = n_{r\phi}' - n_0 = \Delta n_T'(r) + \Delta n_{sc\phi}'(r)$ (7)
 式中, n_0 是线性折射率常数; $\Delta n_T'(r)$ 是温度变化引起的折射率变化, $\Delta n_{sc\phi}'(r)$ 是应力在径向、切向引起的折射率变化。而: $\Delta n_T'(r) = \beta[T(r) - T_0]$ (8)
 $\beta = dn/dT$ 是温度折射率常数; 由温度分布解析解可得:

$$\begin{cases} \Delta n_T(r) = \frac{q(z)^\beta}{4\pi K} \times \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m 2^m}{m!} \times \left[\frac{(r/r_1)^{2m} - 1}{m} + 2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) - \frac{2K}{hr_2} \right], (0 \leq r \leq r_1) \\ \Delta n_T(r) = \frac{q(z)^\beta}{2\pi K} \times \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m 2^m}{m!} \times \left[\ln\left(\frac{r}{r_2}\right) - \frac{K}{hr_2} \right], (r_1 \leq r \leq r_2) \end{cases} \quad (9)$$

参数 $\beta = 10 \times 10^{-6}$, $n_0 = 1.45$ 时, 径向温度变化引起的折射率变化见图 4

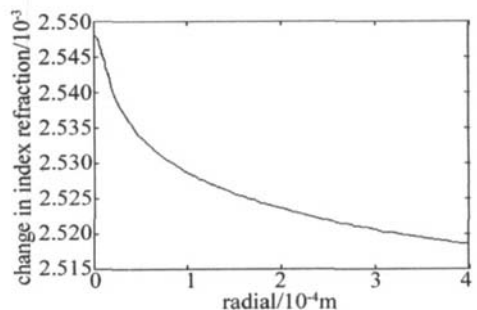


Fig 4 Change in index of refraction in pumped-surface by temperature as a function of radial coordinate

应力分布产生的折射率变化由下式表示^[4]:

$$\begin{cases} \Delta n_{\kappa} (r) = -\frac{n_0^3}{2} \{B_{\perp} [\sigma_{\phi} (r) + \sigma_z (r)] + B_{\parallel} \sigma_r (r)\} \\ \Delta n_{\phi} (r) = -\frac{n_0^3}{2} \{B_{\parallel} \sigma_{\phi} (r) + B_{\perp} [\sigma_r (r) + \sigma_z (r)]\} \\ \Delta n_{\kappa} (r) = -\frac{n_0^3}{2} \{B_{\perp} [\sigma_{\phi} (r) + \sigma_z (r)] + B_{\parallel} \sigma_r (r)\} \\ \Delta n_{\phi} (r) = -\frac{n_0^3}{2} \{B_{\parallel} \sigma_{\phi} (r) + B_{\perp} [\sigma_r (r) + \sigma_z (r)]\} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $E = 73\text{GPa} = 7.45 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, 光纤的光弹性系数 $B = 23.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{kg}$ 垂直分量的弹性系数 $B_{\perp} = 27.7 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{kg}$ 水平分量的弹性系数 $B_{\parallel} = 4.5 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{kg}$ $\nu = 0.16^{[5]}$ 时, 应力引起的折射率变化见图 5。由图 4 图 5 的计算结果可以看出, 温度引起的

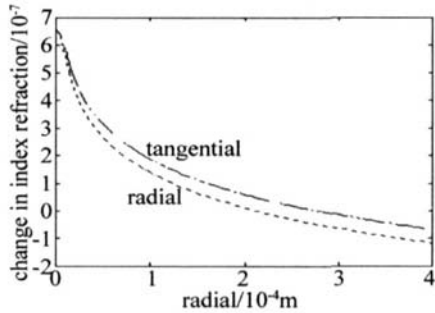


Fig 5 Change in index of refraction in pumped-surface by stress as a function of radial coordinate

折射率变化比应力引起的折射率变化要大好多, 因此在近似计算时, 应力引起的折射率变化可以忽略, 可只考虑温度引起的折射率变化。

4 热效应引起的光程差

因为只对信号光感兴趣, 信号光只在纤芯中传播, 所以在计算信号光的光程差时只考虑在纤芯中的情况。在计算光程差时, 分别以纤芯边界处为基准, 纤芯其它部分的光程差都与此进行比较所得。

(1) 由于热效应引起的光纤长度上的变化可由下式^[3]表示:

$$\zeta = (1 + \nu) \alpha \Delta T (r, z) \quad (11)$$

α 是光纤的热膨胀系数, 由此引起的光程差变化为:

$$\Delta \Lambda_e = \int_0^L (n_0 - 1) (1 + \nu) \alpha \Delta T (r, z) dz \quad (12)$$

把前面的计算结果代入上式可以得到光纤的热膨胀引起的光程差, 见图 6

(2) 温度引起的折射率变化造成的光程差为:

$$\Delta \Lambda_t = \int_0^L \Delta n_T (r, z) dz \quad (0 \leq r \leq r_1) \quad (13)$$

把前面的计算结果代入上式得到光纤的温度梯度引起的光程差, 见图 7。

通过计算的结果可以看到, 热膨胀效应引起的光程差与温度变化造成的光程差相比较小, 故在近似计

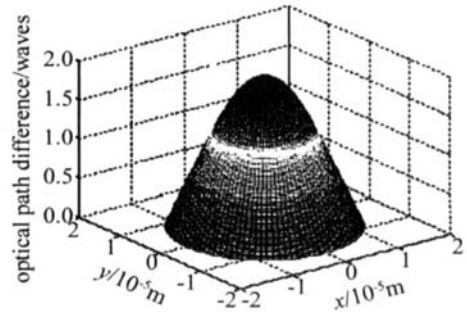


Fig 6 Optical path difference by thermal expand

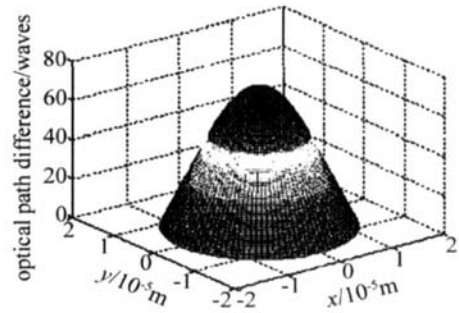


Fig 7 Optical path difference by change of temperature

算热效应引起的光程差时可只考虑温度变化造成的光纤折射率变化引起的光程差, 而热应力引起的折射率变化造成的光程差和热膨胀效应引起的光程差可忽略。

5 结 论

对高功率双包层光纤激光器的热效应进行了详细的理论分析。通过温度场分布和应力场分布的解析解得到: 温度在轴向变化很大, 而在径向的温度变化较小; 在纤芯轴线处切向、法向、轴向分别达到负的最小值, 负值表示压应力, 径向应力在表面处为 0, 而法向、轴向达到正的最大值, 正的表示拉应力; 应力引起的折射率变化比温度引起的折射率变化小。最后, 通过分析热效应引起的光程差得到: 温度变化引起的折射率变化是引起信号光光程差的主要因素, 而热应力引起的折射率变化和热膨胀引起的光程差相对很小, 可以忽略。

参 考 文 献

- [1] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N *et al*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1kW of continuous wave output power [J]. Electron Lett 2004 40(8): 470~ 471.
- [2] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N *et al*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous wave output power [J]. Optics Express 2004 12(25): 6088~ 6092
- [3] CHEN JX, SU IZH, CHEN F Sh *et al*. Thermal effect of Yb³⁺-doped double clad fiber laser [J]. Laser Technology 2006 30(3): 268~ 270 (in Chinese).
- [4] BROWN D C, HOFFMAN H J. Thermal stress and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers [J]. IEEE J Q E 2001, 37(2): 207~ 217
- [5] WANG Y, XU C Q, PO H. Thermal effects in kilowatt fiber laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2004 16(1): 63~ 65.

4.2 校正误差之后再次测量

通过软件算法可校正该误差,调整测量结果,重新取点测量。测量结果见图 5 横坐标表示测量的功率值,

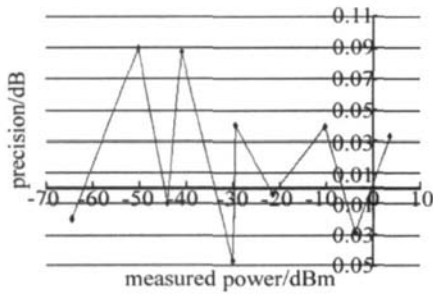


Fig 5 Measurement of power

纵坐标表示测量误差,由测量结果可知,测量误差小于 0.1dB,光功率的高精度测量范围为 -65dBm~5dBm。

4.3 回损误差校正

由图 3 可知,测量回损需要使用探测器 2,其误差与探测器 3 的误差相似。所以,可以先采用上面测量功率校正误差的方法进行误差校正。然后再用回损标准器件进行校正。

光连接器件回波损耗的测量用 FC/APC-FC/UPC 校准跳线作为标准,跳线回损值为 -14.8dB。在不同输入功率情况下,测量校准跳线的回损值来检验系统测量回损的范围和精度。将校准跳线的 FC/APC 端连接测试端口,从显示器读出回损大小,同时记录 P_{in} 。校准跳线的回损值为 -14.8dB,初步测量结果作为校正误差的参考值,经过软件修正减去系统误差之后进行再次测量,得到结果如图 6 所示,横坐标表示输入功

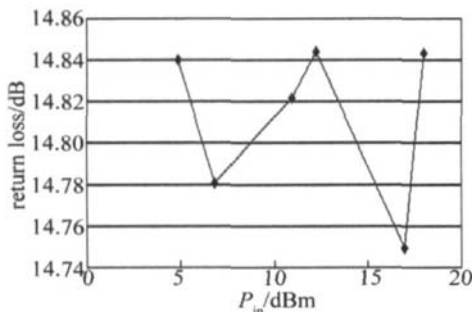


Fig 6 Result of return loss

率值,纵坐标表示测得的标准跳线回损的绝对值,由图 6 可知,误差小于 0.05dB。

5 结束语

参考光插入损耗和回波损耗的传统测量方法设计出光功率、插损、回损测量仪,能够方便准确的测量光连接器件的插损回损。经过试验验证,该方案测量光功率、插入损耗和回波损耗的精度高,测量范围大,能够满足实际测量要求。

参考文献

- [1] COLLINS JV, CLIFT D J. Return loss measurements of lensed fibre to semiconductor laser [J]. *Electron Lett* 1992, 28(14): 1313~1314
- [2] VINCENT C Y S, JIANG JW, CARGILL JA *et al*. Automation of an optical time domain reflectometer to measure loss and return loss [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1990, 8(7): 1078~1083.
- [3] KIHARA M, NAGASAWA S, TANIFUJIT. Return loss characteristics of optical fiber connectors [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(9): 1986~1991
- [4] NOUTSOS P C. Optical return loss measurements and simulation of an arbitrary array of concatenated reflective elements on field-installed optical links [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(4): 1697~1702
- [5] HUANG H P, ZHU N H, HASEN Q Q G *et al*. Small-signal power measuring technique for measuring the frequency response of electro-absorption modulators [J]. *IEEE Photonics Technology Letters* 2006, 18(23): 2451~2453.
- [6] JENTZSCH A, HENRICH W G. Theory and measurements of flip-chip interconnects for frequencies up to 100 GHz [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 2001, 49(5): 871~878.
- [7] XU F, GAO G H, CHEN Z L *et al*. Development of an automatic laser power measurement apparatus [J]. *Laser Technology*, 2000, 24(2): 107~109 (in Chinese).
- [8] TSAI Z M, SUN K J, VENDELIN G D *et al*. A new feedback method for power amplifier with unilateralization and improved output return loss [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 2006, 54(4): 1590~1597
- [9] BROWN R A, ENSAF P, MARSHALL T *et al*. Printed microwave couplers with thermal isolation [J]. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest* 1997, 2(2): 983~986
- [10] SEFLER G A, PEPELJUGOSKI P K. Interferometric noise penalty in 10-Gbit/s ethernet LAN links [J]. *IEEE Photonics Technology Letters* 2002, 14(1): 113~115

(上接第 547 页)

- [6] XIONG Y, PAN W, LUO B *et al*. Thermal effects in Yb³⁺-doped double high power fiber lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2005, 17(4): 495~499 (in Chinese).
- [7] IDO K, AMOSH. Optimization of strongly pumped fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(5): 891~897.
- [8] MEIL, WANG Y, WANG Zh J *et al*. Numerical analysis of the transi-

ent-state behavior of Yb³⁺-doped double clad fiber laser [J]. *Laser Technology* 2006, 30(3): 226~231 (in Chinese).

- [9] CHEN Z L, JIANG Z F, YANG H F. Study on thermal of end-pumped Cr:Nd:GSGG rods [J]. *Laser and Infrared*, 2004, 34(6): 430~432 (in Chinese).