

文章编号: 0258-7025(2008)06-0855-06

多模与单模光纤级联系统对激光束的传输

肖志刚^{1,2} 李斌成¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 分析了激光束在光纤中的非线性传输损耗,理论上证明了受激布里渊散射(SBS)是光纤传输能力的主要限制因素;实验上在532 nm波段对长度为5 m,纤芯半径为1.75 μm ,数值孔径(NA)为0.11的单模光纤的传输能力进行了测定,结果与理论一致。采用模场耦合理论,推导出多模光纤与单模光纤的直接耦合效率表达式,计算得到耦合效率与所选用的多模光纤和单模光纤的纤芯芯径之间的模拟关系。激光器输出波长为532 nm;多模光纤的数值孔径为0.11,纤芯半径为12.5 μm ;单模光纤的数值孔径为0.11,纤芯半径为1.75 μm ,实验结果与理论基本吻合。根据理论和实验结果,设计出多模光纤与单模光纤混合传输方案,在柔性传输较高激光功率的同时可以得到高光束质量。

关键词 光纤光学;光纤传输;光纤级联系统;多模光纤;单模光纤

中图分类号 TN 253;TN 012 **文献标识码** A

Combined Multi- and Single-Mode Fiber Relay for Laser Beam Transportation

Xiao Zhigang^{1,2} Li Bincheng¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The nonlinear scattering loss in the single-mode fiber is analyzed. It is proved theoretically and experimentally that the maximal transmitting power in an optical fiber is limited by the stimulated Brillouin scattering (SBS). Based on mode field coupling theory, a model to calculate the butt-joint coupling efficiency between a multi-mode fiber and a single-mode fiber is presented. The dependence of the coupling efficiency between the multi- and single-mode fibers on the core radius of the multi-mode fiber is investigated. A experiment is conducted with 532 nm laser, multi-mode fiber (NA=0.11, $a = 12.5 \mu\text{m}$) and single-mode fiber (NA=0.11, $a = 1.75 \mu\text{m}$) to measure the butt joint coupling efficiency of multi-mode fiber to single-mode fiber. Good agreement is obtained between the experimental results and the theoretical predictions. A combined multi- and single-mode fiber relay system is proposed to transport laser beams with high power and good beam quality.

Key words fiber optics; fiber relay; combined fibers relay system; multi-mode fiber; single-mode fiber

1 引言

随着光纤技术的发展,光纤对激光束的柔性传输为复杂情况下的光通信、光电探测、传感成像、能量传输等带来极大便利,为其应用开辟了一个新天地。在一些应用背景中(比如自适应光学系统的钠导星技术中激光到发射望远镜的传输^[1]等),希望得到较高激光功率和高质量的光束。但是,想获得高

功率的激光传输就必须选用大芯径的多模光纤,想获得高质量的光束就必须选用小芯径的单模光纤;因此利用单一的光纤传输要同时得到较高功率和质量很高的光束是很困难的^[1,2]。本文提出一种多模和单模光纤混合传输方案,利用多模光纤传输光功率,单模光纤用于保证光束质量,对多模和单模光纤的直接耦合效率进行了模拟计算,并对纤芯半径为

收稿日期:2007-12-10;收到修改稿日期:2008-03-14

基金项目:国家自然科学基金(60670587)资助项目。

作者简介:肖志刚(1975—),男,四川人,讲师,博士研究生,主要从事光纤应用方面的研究。

E-mail: xiaozhiganglsc@sina.com

导师简介:李斌成(1966—),男,湖北人,研究员,博士生导师,主要从事光热技术和光学薄膜检测技术方面的研究。

E-mail: bcli@ioe.ac.cn

12.5 μm 的多模光纤与1.75 μm 的单模光纤的直接耦合效率进行了实验测定。

2 激光束在光纤中的传输

光纤对激光功率的传输能力取决于激光在光纤中的传输损耗,主要包含几种损耗机制:1) 材料不均匀造成的光散射损耗、光纤中杂质微粒对光的吸收损耗和低阶模向高阶模的转化损耗。这些损耗由制作工艺水平决定,可用光纤的衰减系数来描述。2) 弯曲损耗:弯曲损耗的大小取决于曲率半径和光纤芯径的大小。对普通光纤,曲率半径一定时,芯径越大,损耗越大;芯径一定时,曲率半径越小,损耗越大。可以证明,当曲率半径大于5 cm时可以忽略光纤的弯曲损耗^[1]。3) 纯净介质中的光散射损耗,瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射损耗。其中瑞利散射损耗可由衰减系数来描述。拉曼散射和布里渊散射损耗属于非线性损耗,在输入光纤的功率小于一定的阈值时,这种损耗可以忽略^[3];当输入功率超过一定的阈值时,这种损耗急剧增大,成为高功率激光传输的一个主要限制因素。拉曼散射阈值功率 P_R^{cr} 和布里渊散射阈值功率 P_B^{cr} 分别满足^[4]

$$g_R P_R^{\text{cr}} L_{\text{eff}} / A_{\text{eff}} = 16, \quad (1)$$

$$g_B P_B^{\text{cr}} L_{\text{eff}} / A_{\text{eff}} = 21, \quad (2)$$

其中

$$L_{\text{eff}} = \frac{1}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)], \quad (3)$$

式中 L 为光纤的长度; α 为光纤的吸收系数; g_R 为拉曼散射增益系数; g_B 为布里渊散射增益系数; A_{eff} 为光纤有效截面积,近似等于光纤的纤芯面积。在相同条件下,布里渊散射增益系数比拉曼散射增益系数高约两个数量级^[5],因此布里渊散射阈值功率 P_B^{cr} 决定了光纤的光功率传输能力。

一旦输入光强达到布里渊散射阈值强度,输入光的很大一部分能量转化为散射光能量而损耗掉。此时输入光和受激布里渊散射(SBS)光满足^[6]

$$I_s(z) = \frac{b_0(1-b_0)}{G(z)-b_0} I_p(0) \exp(-\alpha z), \quad (4)$$

$$I_p(z) = \frac{G(z)(1-b_0)}{G(z)-b_0} I_p(0) \exp(-\alpha z), \quad (5)$$

其中

$$G(z) = \exp\{(1-b_0)(g_0/\alpha)[1-\exp(-\alpha z)]\}, \quad (6)$$

$$b_0 = I_s(0)/I_p(0); \quad g_0 = g_B I_p(0),$$

式中 $I_s(0)$ 和 $I_s(z)$ 分别为光纤输入端口和 z 处的

受激布里渊散射光强; $I_p(0)$ 和 $I_p(z)$ 为光纤输入端口和 z 处的输入光强; b_0 为受激布里渊散射效率系数; g_0 为受激布里渊散射过程中的小信号增益系数。

从(4)~(6)式分别模拟出在光纤长度给定情况下不同纤芯面积光纤的输出功率与光纤的输入功率之间关系(图1)以及纤芯面积给定时不同长度光纤的输出功率与输入功率之间关系(图2)。模拟计算中的相关参数为:输入光波长为532 nm,光纤的衰减系数为20 dB,数值孔径(NA)为0.11;图1中光纤长度为25 m,纤芯半径分别为1.75 μm ,3.25 μm 和5 μm ;图2中,纤芯半径为1.75 μm ,长度分别为2 m,5 m,10 m和20 m,实线为理论计算结果,虚线为实验结果。实验参数为:输入光波长532 nm,单模光纤的衰减系数20 dB,数值孔径0.11;光纤长度5 m,纤芯半径1.75 μm 。采用单透镜将激光束耦合进单模光纤。

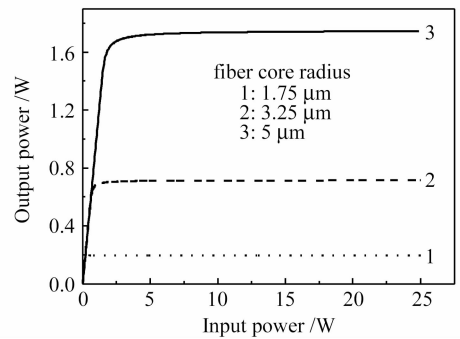


图1 光纤长度为25 m时输出功率与输入功率的关系
Fig.1 Output power versus input power for a 25 m fiber

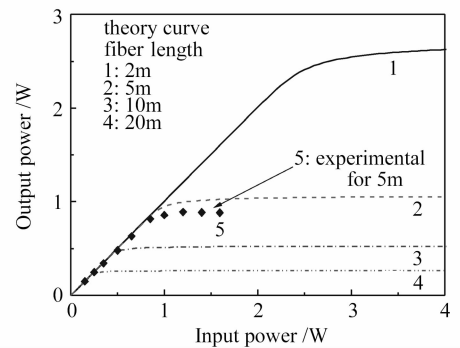


图2 光纤纤芯半径为1.75 μm 时输出功率与输入功率的关系
Fig.2 Output power versus input power for a 1.75 μm core fiber

从模拟结果来看,当光纤长度给定时或光纤纤芯面积一定时,光纤末端的输出功率随输入功率变化趋势为:当输入功率低于非线性受激布里渊散射阈值功率时,光纤末端的输出功率随输入功率近似

线性增加。当输入功率进一步增强,达到阈值功率后,输出功率有一个突变,随输入功率缓慢增长,几乎达到饱和,饱和值略高于阈值功率;光纤长度一定时,光纤的输出功率主要取决于光纤的芯径,纤芯面积越大,能传输的功率也越大;光纤纤芯面积一定时,光纤的输出功率主要取决于光纤的长度,光纤越短,能传输的功率也越大。

从图 2 可以看出,实验值略低于理论值,可能的原因有两个,一是光纤输出端面没有镀增透膜,所以会产生约 4% 的反射损耗,二是光纤输出端面与光功率计有一定的距离,导致实测功率相对光纤输出端面的功率偏低。因此在实验误差范围内实验结果与理论符合得较好,与欧洲南方天文台的实验结果^[1]基本一致。

3 多模光纤到单模光纤直接耦合效率的计算

多模光纤到单模光纤直接耦合如图 3 所示。图中, x_1, y_1 平面代表多模光纤出射光端面所在平面; x_2, y_2 平面代表单模光纤入射光端面所在平面。

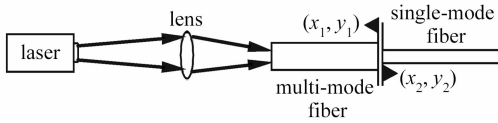


图 3 多模光纤到单模光纤直接耦合示意图

Fig. 3 Schematic diagram for butt joint coupling of multi-mode fiber to single-mode fiber

弱导阶跃光纤的场分布满足^[5]

$$E_{lm}(r, \phi) = \begin{cases} \left[J_l \left(\frac{U_{lm} r}{a} \right) / J_l(U_{lm}) \right] \cos l\phi & (0 \leq r \leq a) \\ \left[K_l \left(\frac{W_{lm} r}{a} \right) / K_l(W_{lm}) \right] \cos l\phi & (r > a) \end{cases}, \quad (7)$$

式中 J 为第一类贝塞耳函数, K 为第二类修正贝塞耳函数, a 为光纤的纤芯半径; m 为光纤导模本征值方程中第 l 阶贝塞耳函数的多个不同解的序号, lm 共同确定光纤中的导模阶数; U_{lm} 和 W_{lm} 为横向传播常数,二者满足: $V^2 = U_{lm}^2 + W_{lm}^2$, V 为光纤的归一化频率, $V = 2\pi a \text{NA} / \lambda$, λ 为光波长; r 为径向变量, ϕ 为角向变量, l 代表贝塞耳函数以及光纤中的导模阶数。

导模的阶数 l 及相应的横向传播常数 U_{lm} 和 W_{lm} 由导模的本征值方程确定^[5]

$$U_{lm} \frac{J_{l+1}(U_{lm})}{J_l(U_{lm})} = W_{lm} \frac{K_{l+1}(W_{lm})}{K_l(W_{lm})}. \quad (8)$$

光纤耦合效率采用模场耦合理论进行计算^[7]。假设多模光纤和单模光纤端面间距为零,不计对准误差引起的耦合损耗以及光纤端面的反射损耗,则多模光纤的第 lm 阶导模到单模光纤的直接耦合效率为^[8]

$$\eta_{lm} = \frac{\left| \int E_{lm} E_{s0}^* ds_2 \right|^2}{\int |E_{lm}|^2 ds_1 \int |E_{s0}|^2 ds_2}, \quad (9)$$

其中

$$E_{s0}(r, \phi) = \begin{cases} \left[J_0 \left(\frac{U_0 r}{a_0} \right) / J_0(U_0) \right] & (0 \leq r \leq a) \\ \left[K_0 \left(\frac{W_0 r}{a_0} \right) / K_0(W_0) \right] & (r > a) \end{cases}, \quad (10)$$

式中 E_{lm} 表示多模光纤中第 lm 阶导模的场分布, E_{s0} 表示单模光纤的场分布, E_{s0}^* 为 E_{s0} 的共轭场。 s_1 为多模光纤出射光端面所在平面, s_2 为待耦合单模光纤入射光端面所在平面。

多模光纤中第 lm 阶导模功率为^[9]

$$P_{lm} = P_0 \frac{V^2}{U_{lm}^2} \cdot \frac{K_{l-1}(W_{lm}) K_{l+1}(W_{lm})}{K_l^2(W_{lm})} C_l, \quad (11)$$

其中

$$C_l = \begin{cases} 2 & l = 0 \\ 1 & l > 0 \end{cases}, \quad (12)$$

第 lm 阶导模相应的权重为

$$B_{lm} = \frac{P_{lm}}{\sum_l \sum_m P_{lm}}, \quad (13)$$

故多模光纤到单模光纤的总的耦合效率为

$$\eta_{\text{tot}} = \sum_l \sum_m \eta_{lm} \times B_{lm}, \quad (14)$$

由(7)~(14)式模拟出两种典型的单模光纤(纤芯半

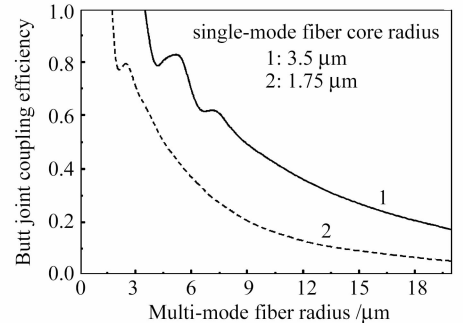


图 4 芯径分别为 3.5 μm 和 1.75 μm 的单模光纤的耦合效率与多模光纤芯径的关系

Fig. 4 Coupling efficiency versus multi-mode fiber radius for a single-mode fiber with core radii of 1.75 μm and 3.5 μm respectively

径分别为 $1.75\ \mu\text{m}$ 和 $3.5\ \mu\text{m}$)与多模光纤的直接耦合效率随多模光纤芯径的变化曲线如图4所示。

计算中的相关参数为:单模光纤的数值孔径为0.11,纤芯半径分别为 $3.5\ \mu\text{m}$ (曲线1,相应的输入波长为 $1064\ \text{nm}$)和 $1.75\ \mu\text{m}$ (曲线2,相应的输入波

长为 $532\ \text{nm}$),多模光纤的数值孔径为0.11,与单模光纤输入端面的间距为零。

表1为图4中曲线1对应的几种多模光纤芯径相应的模式分布、各阶模式耦合效率以及各阶模式所占比重。

表1 不同芯径的多模光纤中的模式分布

(参数为:输入光波长 $1064\ \text{nm}$;多模光纤 $\text{NA}=0.11$;单模光纤 $\text{NA}=0.11$, $a=3.5\ \mu\text{m}$)

Table 1 Mode distributions in multi-mode fibers with different radii

(input wavelength: $1064\ \text{nm}$; multi-mode fiber; $\text{NA}=0.11$; single-mode fiber; $\text{NA}=0.11$, $a=3.5\ \mu\text{m}$)

Fiber core radius / μm	Modes distribution U	Coupling efficiency for each mode	Percentage of each mode	Total coupling efficiency
3.5	$l=0$ 1.6119	1	1	1
4.0	$l=0$ 1.6922	0.99674	0.49372	0.75119
	$l=1$ 2.5340	3.2048×10^{-5}	0.17368	
4.5	$l=0$ 1.7574	0.98619	0.5353	0.81295
	$l=1$ 2.6889	3.5075×10^{-5}	0.14272	
5.0	$l=0$ 1.8114	0.96896	0.54252	0.8266
	$l=1$ 2.8048	3.4209×10^{-5}	0.12955	
5.5	$l=0$ 1.8569	0.94551	0.54208	0.83485
	$l=1$ 2.8967	3.2312×10^{-5}	0.12206	
6.0	$l=0$ 1.8958	0.91772	0.44907	0.6868
	$l=1$ 2.9720	3.0082×10^{-5}	0.097581	
	$l=2$ 3.8622	1.5542×10^{-5}	0.074877	
6.5	$l=0$ 1.9294	0.88632	0.39245	0.60422
	4.1382	0.06009	0.15201	
	$l=1$ 3.0353	2.7743×10^{-5}	0.083302	
	$l=2$ 3.9825	1.5548×10^{-5}	0.055003	
7.0	$l=0$ 1.9588	0.85301	0.41014	0.62113
	4.2849	0.10249	0.11519	
	$l=1$ 3.0892	2.5449×10^{-5}	0.085666	
	$l=2$ 4.0756	1.4273×10^{-5}	0.05344	

从模拟结果来看,当单模光纤一定时,耦合效率从整体上看随多模光纤芯径的增加而振荡减小,这种振荡趋势在多模光纤芯径与单模光纤芯径接近的区间内比较明显;随着多模光纤芯径的继续增大,呈现连续下降的趋势。其原因在于,一方面,当两耦合光纤的结构参数完全相同时,两光纤中的导模完全匹配,故此时耦合效率为1,随着多模光纤的芯径逐渐增大,其中的导模数目逐渐增加,各阶导模的权重相应减小,所以耦合效率随模式数目的增加而减小(比如表1中的多模光纤芯径从 $3.5\ \mu\text{m}$ 增加到 $4\ \mu\text{m}$ 时以及从 $5.5\ \mu\text{m}$ 增加到 $6\ \mu\text{m}$ 时);另一方面,光纤中的导模数目及分布在光纤其他参数一定时取决于光纤的芯径,从理论上讲,存在这么一些多模光纤芯径变化区间:在这些区间内,多模光纤中的导模数目相同,分布相同,仅横向传播常数 U 值不同,对于这种区间内的模式分布,计算结果表明,在这些区间内,

耦合效率随多模光纤芯径的增加而增大(比如表1中的多模光纤芯径从 $4\ \mu\text{m}$ 增加到 $5.5\ \mu\text{m}$ 时),而这种区间在多模光纤芯径与单模光纤较接近时,区间相对较大,随着多模光纤芯径的增加,区间减小,基本上呈现连续下降趋势。

4 实 验

实验装置如图5所示。所用激光器为美国相干公司的Verdi-5,波长为 $532\ \text{nm}$,最大输出功率为 $5\ \text{W}$,光腰半径为 $1.25\ \text{mm}$,光束质量因子 $M^2 \leq$

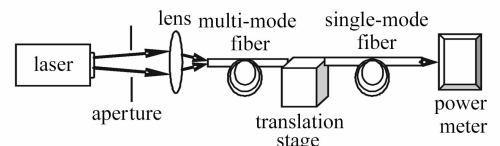


图5 实验装置示意图

Fig. 5 Experimental setup

1.05;光阑用于阻隔透镜耦合系统反射光进入激光器;耦合透镜焦距为70 mm,所用多模光纤长度为2 m,纤芯半径 $a=12.5\ \mu\text{m}$,数值孔径为0.11,输入端固定在五维光纤调整架上(手动调节灵敏度约为 $1\ \mu\text{m}$),输出端固定于三维平台上(手动调节灵敏度约为 $1\ \mu\text{m}$);单模光纤长度为1 m,纤芯半径 $a=1.75\ \mu\text{m}$,数值孔径为0.11,输入端固定于五维调节平台上(手动调节灵敏度为 $1\ \mu\text{m}$ 左右),通过细调三维平台和五维调节平台,使多模光纤和单模光纤之间的耦合效率达到最大;所用光功率计为美国相干公司的3sigma,灵敏度为0.01 mW,精度为0.1 mW。

图6为实验中用数码相机拍摄的多模光纤(a)和单模光纤(b)输出光斑和相应的数字化处理后的光强分布,从图中可以看出,多模光纤的输出光强由一些离散部分组成,而单模光纤输出光强基本上就只有一个峰,近似呈现高斯分布,光束质量明显优于多模光纤。

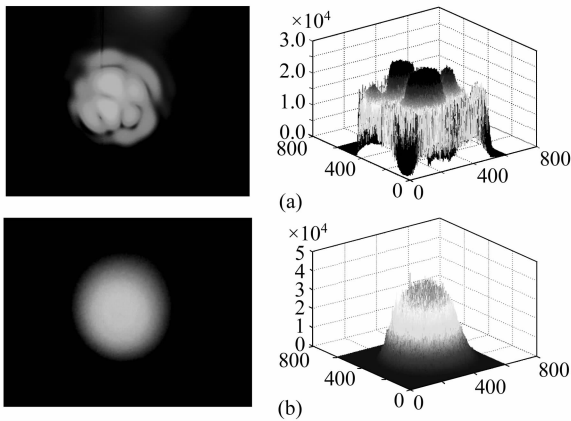


图6 多模光纤(a)和单模光纤(b)输出光斑对比

Fig.6 Photos for light field distribution of multi-mode fiber (a) and single-mode fiber (b)

5 实验结果及分析

多模光纤到单模光纤的直接耦合效率的实验结果如表2所示。实验中首先用光功率计测出多模光纤输出端的输出功率,保持此输出功率不变,然后通过细调三维平台和五维调节平台,使单模光纤的输出功率达到最大,从而得到多模光纤到单模光纤的直接耦合效率。

从实验结果来看,实验值略低于理论值。可能的原因有:

1) 对准误差在实验中不可能调节到0,这会导

致一定的失准损耗,因此会造成实验结果相对理论

值偏低。

2) 实际光纤端面不可能绝对平整,因此会有一些漫反射,会使实验结果偏低。

3) 在耦合效率的计算中,把多模光纤与单模光纤的间距假设为0以及忽略光纤端面反射损耗,将引入约8%的耦合损耗。这一损耗在两端面镀增透膜时可降低到0.1%以下。

表2 多模光纤到单模光纤的直接耦合(参数:输入光波长532 nm;多模光纤 NA=0.11, $a=12.5\ \mu\text{m}$;单模光纤 NA=0.11, $a=1.75\ \mu\text{m}$)

Efficiency	Times (n)				
	1	2	3	4	5
Experimental value	0.108	0.103	0.104	0.103	0.107
Stat value	0.105±0.002				
Theoretical value	0.120				

综上所述,实验结果在实验误差范围内与理论值相符。根据前面的理论计算和实验结果,可以设计各种需要下的混合光纤传输参数。假设在某种应用背景下需要在1064 nm波段利用光纤传输10 m距离的高质量光束进行探测。若取光纤的数值孔径为0.11,则在此波段的单模光纤的最大纤芯半径为 $3.5\ \mu\text{m}$,若采用单一的10 m长单模光纤传输,则由于非线性散射效应,其最大传输功率约为1.64 W。如果选择适当的多模和单模光纤混合系统进行传输,则可以在光纤输出端得到高质量光束的同时提高最大传输功率。参数设计为:多模光纤芯径为 $5.5\ \mu\text{m}$,单模光纤芯径 $3.5\ \mu\text{m}$,这样系统的理论耦合效率为0.83,最大传输能力在多模光纤长度为6.73 m(其传输能力约为5.98 W),单模光纤3.27 m(其传输能力约为4.96 W)时取得,最大传输功率为4.96 W。

6 结论

分析了光纤中的非线性传输损耗,并从实验上进行了验证,得到了与理论相符的结果;推导了多模光纤与单模光纤的直接耦合效率表达式,并在实验上得到了与理论较为吻合的结果。本混合传输方案利用多模光纤传输光功率,单模光纤用于保证光束质量。计算和实验表明选择适当的参数可以获得较高的耦合效率,该系统在保证光束质量的同时能传输较高的光功率,具有一定的实用价值^[9~11]。

参 考 文 献

- 1 Wolfgang Hackenberg, Domenico Bonaccini. Single-mode fiber relay for the ESO laser guide star facility [C]. *SPIE*, 2000, **4007**:258~269
- 2 Sebastien Le Floch, Pierre Cambon. Theoretical evaluation of the Brillouin threshold and the steady-state Brillouin equations in standard single-mode optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(6):1132~1137
- 3 Marc Nikles, Luc Thevenaz, Philippe A. Robert. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(10):1842~1851
- 4 R. G. Smith. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(11):2489~2494
- 5 Liu Deming. Fiber Optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. 30~31
刘德明. 光纤光学[M]. 北京:国防工业出版社, 1998. 30~31
- 6 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. New York: The Institute of Optics University of Rochester, 1991. 377~378
- 7 R. E. Wagner, W. J. Tomlinson. Coupling efficiency of optics in single-mode fiber components [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(15):2671~2688
- 8 Zhao Faying, Zhang Quang. The coupling between a butt fiber and a spherical lensed fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2):218~221
赵发英,张全. 平端光纤与锥端球透镜光纤的耦合[J]. 光子学报, 2003, **32**(2):218~221
- 9 Libo Li, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. Transverse-mode controlling of a large-mode-area multimode fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9):524~526
- 10 Yang Jian, Zhao Yong, Ni Xingjie. Development of novel fiber Bragg grating underwater acoustic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1575~1579
杨剑,赵勇,倪行洁. 新型光纤光栅水声传感器的研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(9):1575~1579
- 11 Liu Yange, Feng Xinhuan, Dong Xiaoyi. Progress in room-temperature stable multi-wavelength fiber laser technologies [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7):883~894
刘艳格,冯新焕,董孝义. 室温稳定多波长光纤激光器技术的研究新进展[J]. 中国激光, 2007, **34**(7):883~894