

一种对双包层大芯径光纤光栅反射率和纤芯折射率调制估算的方法*

周仁来[†] 鞠有伦 杨超 王巍 王月珠

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 可调谐气体激光技术国家重点实验室, 哈尔滨 150081)

(2012年4月5日收到; 2012年7月7日收到修改稿)

报道了一种简单而又实用对双包层大芯径光纤光栅反射率和纤芯折射率调制的估算方法. 通过监测和记录光栅刻写过程中光纤激光器输出功率随时间的变化, 将实验数据和掺铥光纤激光器的速率方程理论相结合, 对刻写光栅反射率和纤芯折射率变化进行估算. 光纤光栅的最大反射率大约为 96.4%, 纤芯折射率调制达到 1.2×10^{-3} . 利用显微镜对光栅进行观测, 纤芯的折射率调制变化均匀, 且周期与模板周期一致. 将光纤光栅应用在全光纤化掺铥光纤激光器中, 在抽运功率为 51.6 W 时, 获得 15.5 W 的 1950.6 nm 激光输出, 斜率效率为 37.9%, 并在输出功率为 15 W 时, 利用刀口法测得光束质量 $M^2 \approx 1.4$.

关键词: 反射率, 折射率调, 光纤光栅, 掺铥光纤激光器

PACS: 42.55.Wd, 42.79.Dj, 42.70.Gi

1 引言

作为一种新型无源器件, 光纤光栅具有可靠性高、尺寸小、抗干扰能力强及集成化程度高等优点, 广泛的应用在光纤通信、光纤传感和光纤激光器等领域. 目前, 刻写光纤光栅的方法主要有两种. 一种是基于光敏性的光纤光栅刻写方法. 1978年, Hill 等使用了驻波法直接在光纤芯部写入光栅结构, 并揭示了光纤光敏性现象^[1]. 1993年, 该研究小组又提出了紫外光垂直照射相位掩模形成的衍射条纹曝光光敏光纤, 通过相位掩模法刻写光纤光栅, 这种方法使光纤光栅走向实用化和产业化^[2]. 由于掺杂稀土离子的硅光纤在光纤激光器和放大器方面有着非常广泛的应用, 为了降低掺杂离子猝灭和寿命短等不利因素影响, 稀土掺杂硅光纤中的锆元素被 Al_2O_3 所代替. 由于锆元素的缺乏降低了光纤的光敏性, 无法获得折射率调制大的光纤光栅, 故传统的紫外曝光刻写方法对于掺杂稀土离子的

硅光纤有一定的局限性. 首先, 利用这种方法刻写光纤光栅性能高度依赖于光纤纤芯掺杂材料的光敏性, 对于不含锆的硅光纤的折射率调制效果差强人意. 其次, 在高温工作下, 这种方法刻写的光纤光栅的折射率调制很容易被擦除, 这大大限制光纤光栅的使用范围. 另一种基于飞秒脉冲激光器相位掩模刻写方法^[3-9]. 和传统的相位掩模刻写方法相比, 用强度极高的飞秒激光脉冲来代替紫外光源对光纤直接进行刻写, 这种刻写方法具有绝对优势. 首先, 它可以直接在非光敏光纤上刻写, 不需要考虑光纤纤芯掺杂材料的性质. 其次, 它可以获得很大的折射率调制, 并且是永久性的损伤. 另外, 利用这种方法刻写的光纤光栅具有更好的温度稳定性, 工作环境温度可以大于 1000°C ^[10,11]. 正是拥有这些显著的优点, 该方法自出现以后就获得了国内外研究者的青睐.

通常情况下, 利用光谱法来检光纤光栅性能, 即直接将包含光栅中心波长的宽带白光光源耦合到光纤光栅中, 用高分辨率光谱仪来测量光栅的透

* 国家自然科学基金 (批准号: 60878011, 61078008) 和教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-10-0067) 资助的课题.

[†] E-mail: zrlhit@126.com

射谱和反射谱, 然后利用光栅反射率来估算纤芯的折射率变化, 这种方法广泛应用于通信波段单模光纤光栅的检测. 然而利用光谱法检测中红外波段的光纤光栅有一定的局限性, 尤其是双包层大芯径光纤光栅. 首先, 商品化的、光谱范围能达到中红外波段宽带白光光源较少, 即使光谱范围达到要求, 输出的功率也比较低, 不能提供足够的功率来满足测试要求. 其次, 即使将白光光源耦合进双包层大芯径光纤光栅, 由于包层和纤芯光之间的串扰, 其透射谱和反射谱也难以检测. 另外无论是高功率宽带白光光源, 还是高分辨率的中红外光谱仪, 成本较高, 大大限制这种方法的使用. 通过查阅文献, 还有一些方法可以用来检测光纤光栅的特性, 如边衍射法^[12]、X 射线断层摄影技术^[13], 而它们的高成本和复杂性严重限制了其应用.

本文通过监测和记录刻写光纤光栅过程中光纤激光器输出功率随时间的变化, 将实验数据和 793 nm LD 抽运掺铋光纤激光器的速率方程理论结合起来, 通过求解速率方程对光纤光栅反射率和纤芯折射率变化进行估算. 光纤光栅的最大反射率大约为 96.4%, 纤芯折射率调制达到 1.2×10^{-3} . 利用显微镜对光栅进行观测, 纤芯的折射率调制变化均匀, 且周期和模板周期符合. 将该光纤光栅作为掺铋光纤激光器的输入镜, 在抽运功率为 51.6 W 下, 获得 15.5 W 的 1950.6 nm 激光输出, 斜率效率为 37.9%, 并在输出功率为 15 W 时, 利用刀口法测得光束质量 $M^2 \approx 1.4$.

2 光纤光栅刻写实验装置和实验结果

图 1 给出了飞秒脉冲激光器相位掩模方法刻写光纤光栅实验装置. 刻写光源是由 Coherent 公司生产的掺钛蓝宝石 (Ti:Sapphire) 飞秒激光器, 工作波长为 800 nm, 重复频率为 1 kHz, 脉冲宽度为 50 fs, 单脉冲能量为 2.2 mJ. 为了控制入射到光纤上的激光功率, 在光路中插入一个小孔光阑, 通过调节光阑的大小来获得合适的刻写功率. 实验中选用一块焦距 $f = 20$ mm 的柱面透镜作为压缩透镜, 焦线的宽度为 $1.27f\lambda/D$, D 是在聚焦透镜处垂直于光纤轴向的光束直径 (~ 6.4 mm), 计算约为 $3.18 \mu\text{m}$. 焦点线处功率密度 $I_0 = 2P_m[\ln(2)]^{1/2}/k\tau\pi^{3/2}\omega_0^2$, 这里 P_m 是平均功率, k 是重复频率, τ 是脉冲持续时间, ω_0 是光束

束腰半径, 经计算功率密度约 $3.84 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$. 相位掩模板是根据飞秒激光波长和要刻写光纤光栅中心波长订制的. 实验中相位掩模板周期为 $2.7 \mu\text{m}$, 飞秒激光经过相位掩模板后得到 0, ± 1 , ± 2 , ± 3 级衍射光, 其中 $+1$ 和 -1 级衍射光的光强最大并且相等, 约为总光强的 35%, 衍射角约为 17.23° . 垂直入射的飞秒激光经过柱透镜压缩, 然后再经过相位掩模板衍射, 得到的衍射光在光纤纤芯处通过干涉刻写光纤光栅, 考虑到光源的时间相干性, 只要光纤距离相位掩模一定的距离, 0 级和 ± 1 级光将不会发生干涉, 此时形成衍射级次分离效应, 纯的 ± 1 级衍射光在光纤上产生干涉. 为了使 ± 1 级光能够在纤芯位置发生干涉, 刻写光纤被固定在一个四维调整架上, 通过电机控制或手动调整对光纤的位置进行精密的调整.

为了实时监测光栅的刻写情况, 搭建一个简单的激光光源. 选取长度约 1 m 的 15/210 μm 双包层非掺杂光纤作为刻写光纤, 在中间取一段长约 45 mm 的位置, 剥除其涂覆层. 将非掺杂光纤和相匹配的掺铋光纤熔接在一起, 利用光纤端面约为 4% 菲涅耳反射构成谐振腔, 产生激光振荡. 抽运源选用的 793 nm 的二极管激光器, 通过 200/220 μm 的光纤将抽运光输出, 经过透镜组准直聚焦耦合到掺铋光纤的包层内. 在抽运端加一片 45° 的二色片, 对 793 nm 激光的透光率大于 98%; 对 1.9 μm —2.05 μm 激光的反射率大于 99%. 在刻写光栅过程中, 用功率计 (Field-Max, Coherent) 放在抽运耦合端 (端面 A), 对激光器输出功率随时间的变化实时监测和记录. 另外通过用波长计 (WA-1500, 加拿大 EXFO) 也能观测到光栅刻写过程中激光光谱的变化, 其分辨率高达 0.7 pm.

在未刻写前, 先将约 6.1 W 的 793 nm 的抽运光耦合进掺铋光纤包层内, 此时掺铋光纤激光器产生自由振荡, 利用功率计测得 A 端和 B 端得输出功率几乎一样, 约为 0.1 W. 通过计算机控制平移台, 调整刻写光纤的位置, 使其逐渐移向光束焦线, 若干干涉条纹在光纤纤芯上刻写时, B 端反射率就会增加, A 端得输出功率会迅速增长. 图 2 给出 A 端功率输出与飞秒激光器辐射时间的变化关系. 由图可以看出, 在前 2 min 内掺铋光纤激光输出功率随飞秒脉冲辐射时间增加而迅速增长, 约从 0.2 W 增加到 1.4 W; 当脉冲辐射时间大于两分钟, 输出功率增长速度变得缓慢, 直至后来趋于稳定, 约从 1.4 W 增

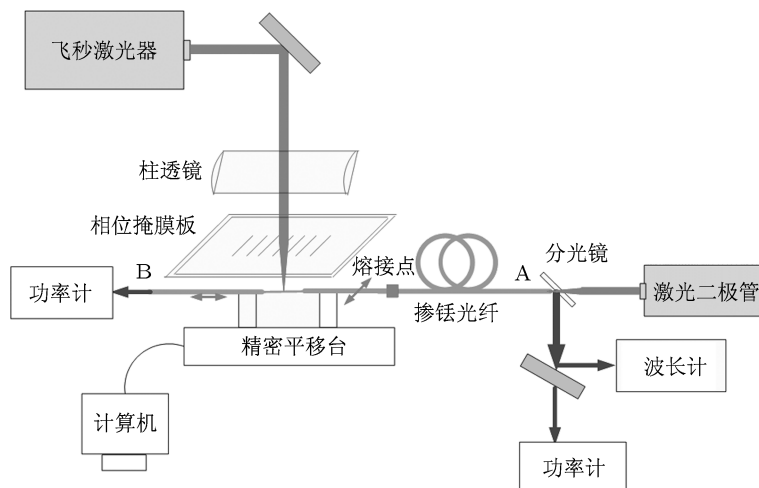


图1 800 nm 飞秒激光器相位掩膜方法刻写光纤光栅的实验装置图

加到 1.5 W. 若对刻写光纤继续进行飞秒激光辐射, 其 A 端得输出功率不会增加反而会急速下降, 这种情况我们认为已经刻好的光栅有可能被损坏. 在刻写过程中, 我们同时使用波长计对激光器输出光谱进行观察. 图 3 是给出了掺铒光纤激光器输出激光光谱特性. 从图中可以看出, 在为刻写光栅之前, 激光器输出的是自由振荡光谱, 光谱输出混乱, 没有一个稳定激光输出, 其振荡带宽约 50 nm(如图 3(a) 所示). 随着飞秒激光脉冲辐射, 光纤激光器输出光谱逐渐趋于稳定, 最后输出激光波长为 1950.6 nm, 线宽约为 50.6 pm(如图 3(b) 所示).

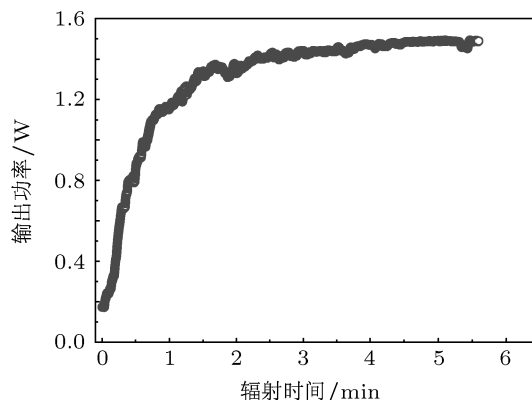


图2 A 端面输出功率与辐射时间的关系

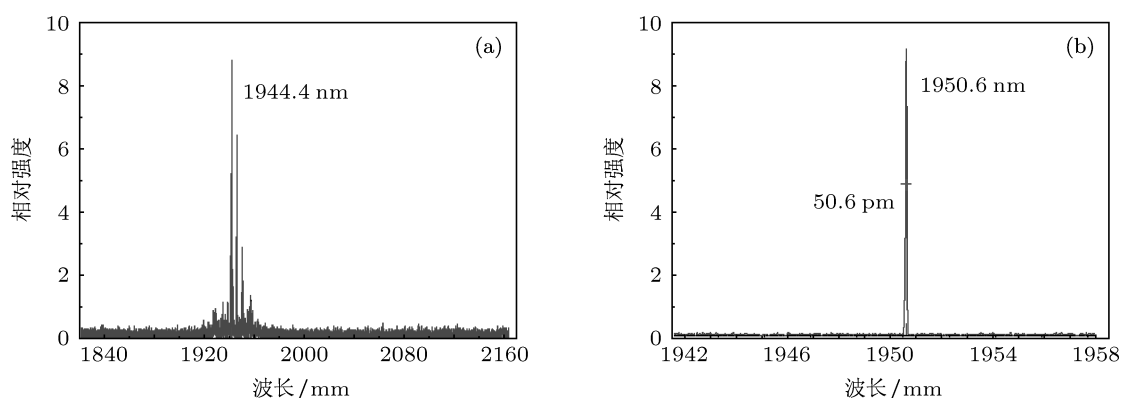


图3 (a) 刻写光栅前自由振荡光谱; (b) 刻写光栅后输出激光光谱图

通过光学显微镜, 纤芯中折射率调制可以被直接观测到. 图 4 给出所刻写的光纤光栅的显微镜

图像, 从图中可以看出光纤光栅的折射率调制周期为 1.35 μm , 与相位掩膜板的掩模周期 2.7 μm 相匹

配. 由于光纤较粗, 不能完全看清光纤全部调制分布, 将光纤旋转 180° , 反面也发现折射率调制现象, 可见折射率调制已经扩展到整个纤芯里面, 而且在纤芯与包层接触面和包层表面的调制也可观察到折射率调制的现象.

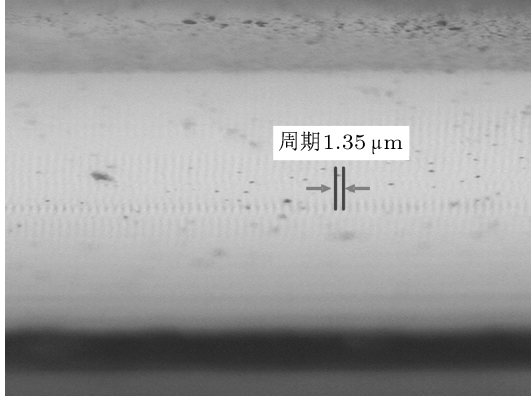


图4 显微镜下光纤光栅的微结构图

3 掺铥光纤激光器速率方程分析和应用

图5给出793 nm抽运的掺铥光纤激光器粒子跃迁能级结构图, 图中 N_i ($i = 0, 1, 2, 3$) 为各能级粒子数密度. 波长793nm的抽运光被 3H_6 的 Tm^{3+} 吸收跃迁到 3H_4 能级, 一个 3H_4 的 Tm^{3+} 通过与周围的 Tm^{3+} 横向弛豫产生两个 3F_4 的 Tm^{3+} , 同时由于掺铥光纤激光器的准三能级特性, 激光下能级在近室温出现粒子数集居, 故会出现对1950 nm的激光产生再吸收. 由于 3H_5 能级 Tm^{3+} 能级寿命较短, 约为 $7 \times 10^{-3} \mu s$, 故该能级上粒子数可近似被忽略. 在此前提下, 掺铥光纤激光器的速率方程表示为^[14-16]

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = -W_{03}N_0 - CR_{3011} - (R_{30} + R_{31} + \Gamma_3)N_3, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = W_{01}N_0 + 2CR_{3011} - (R_{10} + W_{10} + \Gamma_1)N_1 + R_{31}N_3, \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_0}{\partial t} = - (W_{03} + W_{01})N_0 - CR_{3011} - (R_{10} + W_{10} + \Gamma_3)N_1, \quad (3)$$

$$N_t \approx N_0 + N_1 + N_3, \quad (4)$$

$$\frac{\partial S_{f,b}(z)}{\partial z} = \pm S_{f,b}(z)[\sigma_e(\lambda_s)N_1 - \sigma_a(\lambda_s)N_0 - \delta_s], \quad (5)$$

$$\frac{\partial P_{f,b}(z)}{\partial z} = \mp P_{f,b}(z)(\sigma_a(\lambda_p)N_0 + \delta_p), \quad (6)$$

这里, N_t 是光纤中所掺杂的 Tm^{3+} 密度. $\sigma_e(\lambda_p)$ 和 $\sigma_a(\lambda_p)$ 分别是 Tm^{3+} 在抽运光处的发射截面和吸收截面. $\sigma_e(\lambda_s)$ 和 $\sigma_a(\lambda_s)$ 分别为 Tm^{3+} 在信号光处的发射截面和吸收截面. δ_s 和 δ_p 分别为激光和抽运光在光纤材料介质中本征吸收损耗. Γ_p 和 Γ_s 分别为抽运光和激光的重叠因子.

$$W_{03} = \frac{\lambda_p \Gamma_p}{hcA_{cor}} \sigma_a(\lambda_p) [P_f(z) + P_b(z)]$$

为基态粒子对抽运光的吸收速率.

$$W_{10} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA_{cor}} \sigma_e(\lambda_s) [S_f(z) + S_b(z)]$$

为激光受激发射的发射速率.

$$W_{01} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA_{cor}} \sigma_a(\lambda_s) [S_f(z) + S_b(z)]$$

为基态粒子对激光粒子受激吸收速率. R_{ij} 为从 $i \rightarrow j$ 能级的 Tm^{3+} 自发辐射率. Γ_i 是 i 态的非辐射跃迁概率. 当 3H_6 能级 Tm^{3+} 直接跃迁到 3F_4 时所产生的交叉弛豫过程为

$$CR_{3011} = k_{3011}N_3N_1 - k_{1130}N_1^2 \times (^3H_4 + 3H_6 \rightarrow ^3F_4 + ^3F_4).$$

$P_{f,b}(z)$, $S_{f,b}(z)$ 分别为正反向传输抽运光和激光功率, 下标 f 和 b 表示前向和后向. 抽运光和激光功率传输分布的边界条件:

$$P_f(0) = P_0 + [R_2(\lambda_p) - \eta_p]P_f(0), \quad (7)$$

$$P_b(L) = [R_3(\lambda_p) - \eta_p]P_f(L), \quad (8)$$

$$S_f(0) = [R_0(\lambda_s) - \eta_s]S_b(0), \quad (9)$$

$$S_b(0) = [R_1(\lambda_s) - \eta_s]S_f(L), \quad (10)$$

其中 P_0 是入射到光纤抽运功率, R_0 和 R_1 为激光在入射和输出端面反射率. R_2 和 R_3 为抽运光入射和输出端面反射率. η_p 和 η_s 分别为谐振腔对抽运光和激光的损耗. L 为掺铥光纤的长度, 在刻写实验中, 我们选取的长度大约为3 m. 从(1)–(10)式, 我们可以看出激光输出功率与输入端反射率之间有着直接的关系, 因此我们可以根据输出功率的变化得出输入端反射率的变化. 若能求出输入端信号光的反射率的变化, 其折射率调制可由下式给出:

$$\Delta n_m = \frac{2n_{eff} \Lambda_m a \tanh(\sqrt{R_1})}{L\pi m}, \quad (11)$$

这里 Λ_m 为光纤光栅的第 m 个调制周期. L 为光栅栅区长度. Δn_m 为第 m 阶折射率调制. R_1 为输入端光纤光栅的反射率.

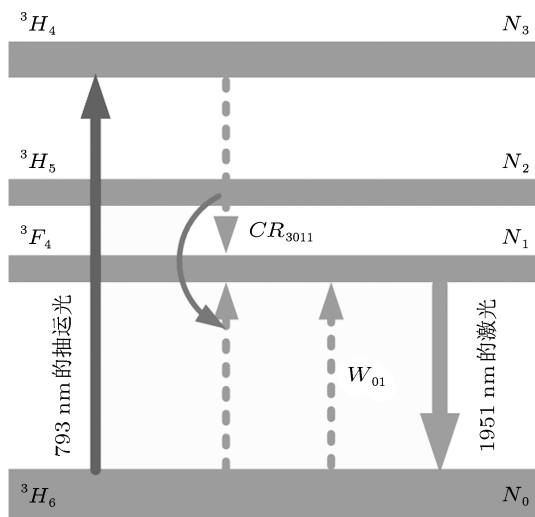


图5 掺铽光纤的能级结构和粒子跃迁简图

利用 (1)—(11) 式和下面的光纤参数:

$$\begin{aligned} \lambda_p &= 793 \text{ nm}, & \lambda_s &= 1950 \text{ nm}, \\ \tau_1 &= 334.7 \text{ } \mu\text{s}, & \tau_3 &= 10.4 \text{ } \mu\text{s}, \\ \sigma_e(\lambda_p) &= 8.9 \times 10^{-25} \text{ m}^2, \\ \sigma_a(\lambda_p) &= 8.5 \times 10^{-25} \text{ m}^2, \\ \sigma_e(\lambda_s) &= 6.2 \times 10^{-25} \text{ m}^2, \\ \sigma_a(\lambda_s) &= 1.5 \times 10^{-26} \text{ m}^2, \\ \Gamma_p &= 0.9, & \Gamma_s &= 0.75, \\ \delta_s &= 2.3 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}, \\ \delta_p &= 1.2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}, \\ \eta_p &= \eta_s = 4\%, & L &= 3 \text{ m}, \\ k_{3011} &= 3.0 \times 10^{-23} \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}, \\ k_{1130} &= 2.5 \times 10^{-24} \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}, \\ R_1 &= 4\%, & R_2 &= 4\%, & R_3 &= 4\%. \end{aligned}$$

图 6 给出了飞秒激光刻写光纤光栅过程中, 刻写光纤纤芯折射率和光栅反射率变化情况. 从图中可以看出在脉冲辐射前 1.5 min 时, 光栅反射率快速增长, 达到 72% 左右; 随着辐射时间逐渐增加, 光栅反射率增长速度变缓, 逐渐趋于稳定, 最大反射率达

到 96.4%.

和反射率变化趋势一样, 在前 3 min, 光纤纤芯的折射率调制在不断增长, 但增长的速度要小的很多, 随着辐射时间的增加, 折射率调制变得有些不规则. 这主要是在刻写过程中需要对光栅的位置进行不停的调节, 由此可能对折射率的调制产生一定的影响. 另外在实验中发现, 光栅刻写存在一个最佳时间, 若超过这个时间, 光栅的反射率就会下降, 甚至会出现超荧光现象, 这时光栅就有可能被损坏. 在我们刻写实验条件下, 其辐射的最佳时间约为 5.6 min, 最大折射率调制为 1.2×10^{-3} .

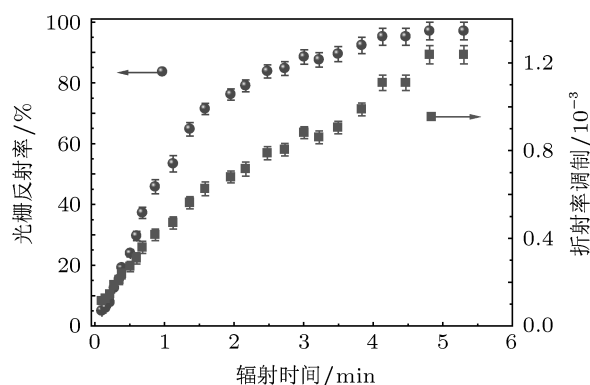


图6 光纤光栅的反射率和纤芯折射率调制与辐射时间的关系

利用光栅光纤应用在全光纤化掺铽光纤激光器中, 腔的结构为线性腔. 图 7 给出全光纤化掺铽光纤激光器的原理图. 792nm 的半导体激光器通过 200/220 μm 的光纤输出, 利用光纤熔接机 (藤仓公司, FSM-45S-LDF) 将传导光纤和光纤光栅相熔接, 然后将光栅和 15/210 μm 掺铽光纤 (烽火光纤特种光纤研究部) 熔接在一起. 为了较好的散热, 整个掺铽光纤缠绕在铝圆盘上, 并利用实验室调制的精确温控系统对铝盘进行控温, 整个掺杂光纤温度控制在 15 $^{\circ}\text{C}$ 左右. 图 8 给出激光器功率输出特性. 从图中可以看出, 在抽运激光功率为 51.6 W 时, 获得 15 W 的激光功率输出, 利用线性拟合, 斜率效率为 37.9%. 输出功率随抽运功率增加呈线性增长, 且未发现输出功率饱和现象, 输出功率受到抽运源功率的限制. 在输出功率为 15 W 时, 利用 90/10 刀口法对激光的光束质量进行测量. 测得光束质量 $M^2 = 1.4$ (见图 8 中插图).

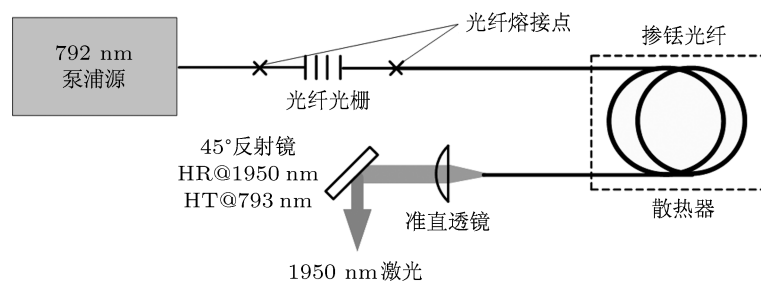


图7 全光纤化掺铒光纤激光器实验装置图

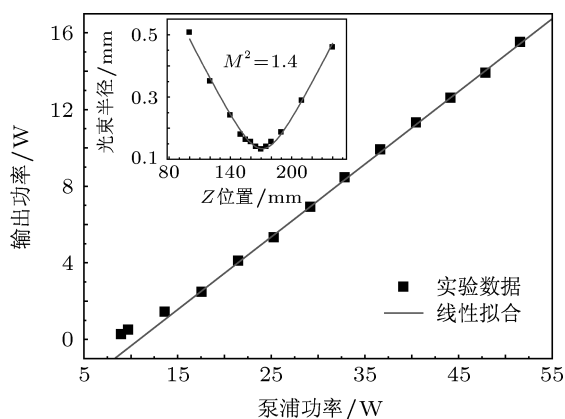


图8 掺铒光纤激光器输出功率与抽运功率之间关系

4 结论

通过监测和记录刻写大芯径双包层光纤光栅过程中光纤激光器输出功率输出变化, 将实验数据和掺铒光纤激光器的速率方程结合起来并进行求解, 得出光纤光栅反射率和纤芯折射率变化. 光纤光栅最大反射率约为 96.4%, 纤芯折射率调制约为 1.2×10^{-3} . 利用显微镜对光栅进行观测, 纤芯的折射率调制变化均匀, 且周期和模板符合. 将光纤光栅应用在全光纤化掺铒光纤激光器中, 在抽运功率为 51.6 W 下, 获得 15.5 W 的 1950.6 nm 激光输出, 斜率效率为 37.9%, 并在输出功率为 15W 时, 利用刀口法测得光束质量 $M^2 = 1.4$.

- [1] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, Kawasaki B S 1978 *Appl. Phys. Lett.* **32** 647
- [2] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, Johnson D C, Albert J 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 1035
- [3] Lai Y, Martinez A, Khrushchev I, Bennion I 2006 *Opt. Lett.* **31** 1672
- [4] Thomas J, Wikszak E, clausnitzer T, Fuchs U, Zeitner U, Nolte S, Tunnermann A 2007 *Appl. Phys. A* **86** 153
- [5] Martinez A, Dubov M, Khrushchev I, Bennion I 2004 *Electron. Lett.* **40** 1170
- [6] Mihailov S J, Smelser C W, Lu P, Walker R B, Grobnc D, Ding H, Henderson G, Unruh J 2003 *Opt. Lett.* **28** 995
- [7] Mihailov S J, Smelser C W, Grobnc D, Walker R B, Ping Lu, Huiming D, Unruh J 2004 *J. Lightwave Technol.* **22** 94
- [8] Dragomir A, Nikogosyan D. N, Zagorulko K A, Kryukov P G, Dianov E M 2003 *Opt. Lett.* **28** 2171
- [9] Bernier M, Faucher D, Vallée R, Salimnia A, Androz G, Sheng Y, Chin S L 2007 *Opt. Lett.* **32** 454
- [10] Martinez A, Khrushchev I, Bennion I 2006 *Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO 2006)*, May 22, 2006 p2188
- [11] Martinez A, Khrushchev I Y, Bennion I 2005 *Electron. Lett.* **41** 176
- [12] Diasty F E, A. Heaney, Erdogan T 2001 *Appl. Opt.* **40** 890
- [13] Limberger D F, Salathé H G, Hindle R P, Douay F, Fertein M, Przygodzki E 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 4983
- [14] Stuart J D, Terence K A 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 948
- [15] Xu J Q, Prabhu M, Lu J R, Ueda K I, Xing D 2001 *Appl. Opt.* **40** 1983
- [16] Jackson S D and, King T A 1996 *Proceedings of SPIE.* **2676** 369

A method of estimating the reflectivity and refractive-index modulation of double-cladding large core fiber Bragg grating*

Zhou Ren-Lai[†] Ju You-Lun Yang Chao Wang Wei Wang Yue-Zhu

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, No. 2, Yikuang Street, Nangang District, Harbin 150080, China)

(Received 5 April 2012; revised manuscript received 7 July 2012)

Abstract

A simple and practical method of estimating reflectivity and refractive-index modulation is reported when writing fiber Bragg grating (FBG) into silica fiber core based on 800 nm femtosecond laser pulses and a phase mask. By monitoring and recording the variation of the fiber laser output power, the reflectivity and refractive-index modulation are estimated theoretically and experimentally. The reflectivity of FBG is approximate 96.4%, and the refractive-index modulation is about 1.2×10^{-3} . When the FBG is used as a linear cavity mirror, 15.5 W of output power is obtained under an incident pump power of 51.6 W, corresponding to a slop efficiency of 37.9%. A beam factor of $M^2 = 1.4$ at an output power of 15 W is measured by using the knife-edge method.

Keywords: reflectivity, refractive-index modulation, fiber Bragg gratings, Tm³⁺ doped fiber laser

PACS: 42.55.Wd, 42.79.Dj, 42.70.Gi

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60878011, 61078008), and the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (NCET-10-0067).

[†] E-mail: zrlhit@126.com