

单纵模固体激光器与单模保偏光纤之间的最佳耦合分析*

谢兴龙 陈绍和 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 分析了用于激光脉冲整形的激光器与单模保偏光纤之间的耦合问题, 提出了获得最佳耦合效率的条件, 为了提高耦合效率, 其耦合系统的设计以及放置的位置都要受到激光器谐振腔和光纤参数的限制, 并从实验上对所提出的耦合条件进行了验证。所得结果为系统的优化提供了理论基础和实验依据。

关键词 单纵模激光器, 单模保偏光纤, 耦合效率。

1 引 言

随着惯性约束聚变实验的发展, 对大型固体激光驱动器的前级提出了激光脉冲整形的要求。以往的脉冲整形系统, 一般以闪光灯泵浦的调 Q 加锁模的钕玻璃固体激光器作为种子光, 脉冲整形器采用块状普克尔盒加光电导开关或者与其类似的技术^[1-4], 其脉冲整形能力和抗电干扰能力受到一定的限制, 而且由于闪光灯泵浦的激光器输出的振幅稳定性较差, 所以很难满足进一步发展的要求。

90 年代初期, 由于大功率半导体激光器技术和固体激光器技术的日益成熟, 激光器驱动装置的前级主振荡器可以做得极其稳定, 于是开始了全新的激光脉冲整形技术的探索, 其中最具代表性的是利用 LiNbO_3 波导调制器激光脉冲整形技术^[5], 在该技术中为避免光脉冲在空气中的传输以及传输过程中某些与反射镜有关的问题, 用于脉冲整形的波导调制器的输入和输出端均由单模保偏光纤连接, 波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的单纵模激光器输出功率为几十毫瓦的连续激光, 通过单模保偏光纤进入由一个相位调制器和一个振幅调制器串联而成的单元, 制作时将两个调制器设计在一个完整的波导上, 首先在单波导阶段设计一个相位调制器, 然后通过 3 dB 分束器形成干涉型振幅调制器, 最后再用另一个 3 dB 合成器做成输出端。该系统一个显著的特点就是, 克服了以往脉冲整形系统中所必须的高电压脉冲技术, 从而将系统的电干扰减小到最低限度, 同时也使包括主振荡器的前级装置向小型化迈进了一步。

但是, 由于受到波导和光纤损伤阈值的限制, 整个系统输出的光功率较低, 所以整个系统的损耗直接影响了整形激光脉冲的信噪比和可调性。本文讨论了用于整形的单纵模激光器

* “神光”系列预研课题。

收稿日期: 1998-03-23

与单模保偏光纤之间的耦合问题, 得出了获得最佳耦合效率的条件, 为系统进一步的设计和优化提供了理论基础。

2 激光二极管泵浦的单纵模激光器与单模保偏光纤之间的耦合

激光二极管泵浦的单纵模激光器与单模保偏光纤之间的耦合是一项精制和细心的工作, 在二者之间的耦合中, 都包含了模式匹配、耦合系统的设计和对准等问题。所以为了完整地理解器件之间的耦合损耗, 必须从相应方面着手。

2.1 光纤中的模式

对于弱传导型阶跃光纤, 通常采用 LP 模近似描述光纤中的光场行为^[6], 只考虑单模保偏光纤, 则其模式的横向电场分量为^[7]:

$$E_{01} = \begin{cases} J_0\left(\frac{u}{a}r\right) \exp(-i\beta z), & r \leq a \\ \frac{J_0(u)}{K_0(w)} k_0\left(\frac{w}{a}r\right) \exp(-i\beta z), & r > a \end{cases} \quad (1)$$

式中 u 、 w 由下列本征值求得

$$\frac{w K_1(w)}{K_0(w)} = \frac{u J_1(u)}{J_0(u)} \quad (2)$$

J 、 K 分别是贝塞尔函数和变形贝塞尔函数, a 为纤芯半径,

$$u = a \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2}, \quad w = a \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_0^2}, \quad k_0 = 2\pi/\lambda_0,$$

取归一化频率 $v = 2.4$, 本征方程的近似解为:

$$u = \frac{(1 + \sqrt{2})v}{1 + \sqrt[4]{4 + v^4}}, \quad w = v^2 - u^2 \quad (3)$$

实际上, 为了分析光纤中场分布的传输规律, 其基模可以近似等价于高斯分布或高斯-拉盖尔分布, 当归一化频率 $v = 2.4$ 时有^[8]

$$E_{01} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{B} A_0 L_0\left(\frac{2r^2}{B^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{B^2}\right) \quad (4)$$

式中 $A_0 = 1.3773a$ 、 $B = 1.083a$, L_0 为零阶拉盖尔函数。

2.2 激光二极管泵浦的单纵模激光器的输出模式

谐振腔内的激光模式, 取决于组成谐振腔的元件参数, 本文所论述的激光器是一种平凹结构, 其单纵模输出在垂直于传输方向的截面上成高斯分布。高斯光束的表达式为^[9]

$$E(x, y, z, t) = E_0 \exp[i(\omega t - kz)] \frac{w_0}{w(z)} \exp(i\Psi) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\rho}\right) \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right] \quad (5)$$

式中, $w(z) = w_0[1 + (z/z_r)^2]^{1/2}$ 为高斯光束的光斑半径, $\rho(z) = z_r(z/z_r + z_r/z)$ 为高斯光束的等相面曲率半径, $\Psi(z) = \arctan(z/z_r)$ 为高斯光束的相位因子, $z_r = kw_0^2/2 = \pi w_0^2/\lambda$ 为共焦参数或瑞利常数, 对腔长为 L 的平凹谐振腔, 其光腰半径为

$$w_0^2 = \frac{\Delta L}{\pi} \left(\frac{g_1}{1 - g_1}\right)^{1/2} \quad (6)$$

平面腔镜上的光斑半径

$$w_2 = w_0 \tag{7}$$

输出耦合镜上的光斑半径

$$w_1^2 = (\lambda L/\pi) [g_1(1 - g_1)]^{-1/2} \tag{8}$$

远场发散角

$$\theta^2 = (\lambda/\pi L) [(1 - g_1)/g_1]^{1/2} \tag{9}$$

式中 $g_1 = 1 - L/R$, R 为输出耦合镜的曲率半径。从模式分布的结构上来看, 单模保偏光纤与激光谐振腔基模光束的轴截面都具有高斯分布的形式, 从理论上来说, 当两者的模式分布完全一样时, 耦合效率可以达到 100%, 但是通过以上讨论可知, 单模保偏光纤中的基模只是一种高斯光束的近似, 所以耦合效率是达不到 100% 的, 对典型的单模保偏光纤, 理论耦合效率能达到 99% 以上^[10]。

3 耦合系统的设计和分析

在实际的耦合中, 由于耦合系统受到器件的固有损耗、二者的对准程度以及通光孔径、

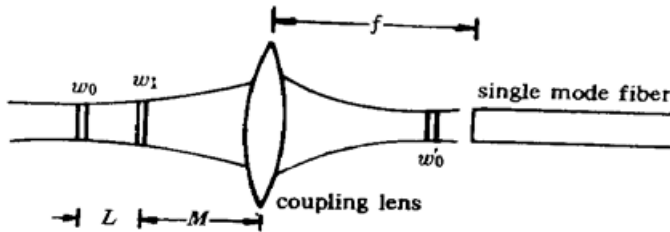


Fig. 1 Schematic of Gaussian laser beam and single mode fiber coupling system

光束的衍射等因素的影响, 所以实际得到的耦合效率, 总是低于理论上的耦合效率的。在耦合系统的设计中, 它必须满足这样一个条件: 从谐振腔中输出的高斯光束经过系统的变换, 其模式分布在单模保偏光纤的输入端与光纤内的光场模式达到自洽。

图 1 是单模激光器与单模保偏光纤的耦合示意图, 从激光器输出的高斯光束, 经过传

输距离为 M 、焦距为 f 的耦合透镜后至耦合透镜焦平面上的总传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & M \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2f/R_1 & f \\ -2/R_1 - 1/f + 2M/fR_1 & 1 - M/f \end{bmatrix} \tag{10}$$

在激光谐振腔的输出透镜上, 高斯光束的复曲率为:

$$1/q_1 = 1/\rho_1 - i\lambda/\pi W_1^2 \tag{11}$$

经过变换矩阵到达单模保偏光纤的左端面时, 利用(10)式和(11)式可以得到其复曲率半径为

$$\frac{1}{q_2} = \frac{(f - M) [(\frac{1}{\rho_1} - \frac{2}{R_1})^2 + \frac{\lambda^2}{\pi^2 w_1^4}] - (\frac{1}{\rho_1} - \frac{2}{R_1})}{f^2 [(\frac{1}{\rho_1} - \frac{2}{R_1})^2 + \frac{\lambda^2}{\pi^2 w_1^4}]} + i \frac{\frac{\lambda}{\pi w_1^2}}{f^2 [(\frac{1}{\rho_1} - \frac{2}{R_1})^2 + \frac{\lambda^2}{\pi^2 w_1^4}]} \tag{12}$$

要求高斯光束的光斑半径等于单模保偏光纤中基模的等效光腰 $1.083a$, 即

$$w_1 f [(\frac{1}{\rho_1} - \frac{2}{R_1})^2 + \frac{\lambda^2}{\pi^2 w_1^4}]^{1/2} = 1.083a \tag{13}$$

将平凹谐振腔内基模高斯光束的参数代入上式可求得耦合透镜的焦距必须满足:

$$f = 1.083a \sqrt{\pi/\lambda} \sqrt[4]{L(R_1 - L)} \tag{14}$$

上式即是为获得最大耦合效率所要求的耦合透镜的焦距表达式, 作为数值分析, 在本文的实

验中, 激光二极管泵浦的单纵模固体激光器的谐振腔参数为: 长度 $L = 50.0 \text{ mm}$ 、输出透镜的曲率半径 $R_1 = 1500 \text{ mm}$ 、输出激光的波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 单模保偏光纤的芯径半径 $a = 4 \mu\text{m}$, 代入上式得到 $f = 2.0 \text{ mm}$, 它大致相当于一个 20 倍左右的显微物镜。

耦合透镜与激光器输出镜片之间的距离 M 也是一个比较重要的参数, 图 2 所示是实验中所获得的耦合效率与距离 M 之间的变化曲线, 由此可以看出, 当距离 M 较小时, 耦合效率随着 M 的增大而增大, 当 M 增大到某一数值时, 耦合效率将不再增大, 并且在随后的一段距离内保持常数。通过分析可知, 距离 M 必须满足以下两个条件:

1) 从谐振腔输出的单模高斯光束在经过耦合透镜后, 必须以小于单模保偏光纤数值孔径的角度进入光纤, 为此要求发散角为 θ_0 、光斑尺寸为 w_0 的初始光束经过 $ABCD$ 变换矩阵之后, 其入射角必须小于光纤的数值孔径 N_f , 即

$$\begin{bmatrix} w \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2f/R_1 & f \\ -2/R_1 - 1/f + 2M/fR_1 & 1 - M/f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\theta = -\frac{2w_0}{R_1} - \frac{w_0}{f} + \frac{2Mw_0}{fR_1} + \theta_0 - \frac{M}{f}\theta_0 < N_f \quad (16)$$

从而得到

$$M > \frac{fR_1(N_f - \theta_0) + w_0(R_1 + 2f)}{2w_0 - \theta_0R_1} \quad (17)$$

基模高斯光束在光腰 w_0 处可以近似看作平面波, 将相应参数代入, 可以求得距离 M 与激光谐振腔参数及单模保偏光纤数值孔径的关系为:

$$M > \frac{fR_1N_f \sqrt{\pi/\lambda} \sqrt[4]{L(R_1 - L) + (R_1 + 2f) \sqrt{L(R_1 - L)}}}{2 \sqrt{L(R_1 - L)}} \quad (18)$$

2) 谐振腔内的高斯光束与单模保偏光纤的耦合效率也受到衍射效应的影响, 即光束经过耦合透镜之后, 爱里斑的尺寸必须小于光纤的基模光腰尺寸

$$\frac{1.22\lambda}{w_{\text{lens}}} f < 1.083a \quad (19)$$

即

$$\frac{w_1}{f} \left[\left(1 - \frac{2M}{R_1} + \frac{M}{\rho_1} \right)^2 + \frac{\lambda^2 M^2}{\pi^2 w_1^4} \right]^{1/2} > \frac{1.22\lambda}{1.083a} \quad (20)$$

$$M > L + \sqrt{L^2 - LR_1 + LR_1 \left(\frac{1.22\lambda}{1.083aw_1} \right)^2} \quad (21)$$

(18) 式和 (21) 式表达了为获得最佳的耦合效率, 耦合透镜与激光器输出镜的距离 M 所必须满足的关系, 当 M 的取值使二者同时满足时, 说明耦合系统在模式的完全匹配上不存在任何问题。在本实验中, 石英单模保偏光纤数值孔径的典型值为 0.17, 光纤芯径为 $4 \mu\text{m}$, 激光波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 。谐振腔的长度 $L = 50 \text{ mm}$ 。输出腔镜的曲率半径 $R_1 = 150 \text{ mm}$ 。这样由 (18) 式和 (21) 式分别给出: $M > 407 \text{ mm}$ 和 $M > 308 \text{ mm}$ 。即在放置激光器与单模光纤的耦合透镜时, 其耦合镜的位置必须大于 400 mm 。

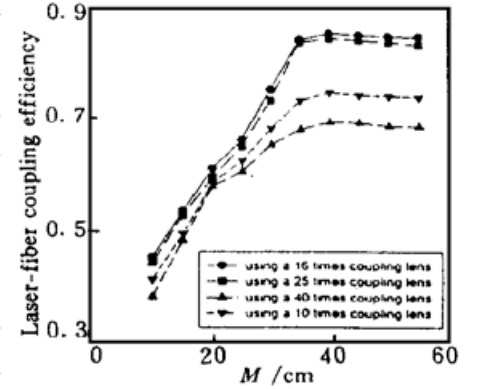


Fig. 2 Experimental results of the coupling efficiency between the single longitudinal mode laser and the single mode optical fiber. SLM laser's parameters are, cavity length 50 mm, waist $100 \mu\text{m}$, radius of output mirror 150 mm

总 结 单纵模激光器与单模保偏光纤以及波导调制器与单模保偏光纤之间耦合效率的好坏, 直接决定了激光脉冲整形器件的性能, 高效率的耦合不但能使系统输出较高强度的信号, 而且能提高系统输出整形激光脉冲的信噪比。本文从理论和实验上研究了它们之间的耦合问题, 提出了获取最佳耦合效率的条件, 并与实验中所获得的数据进行了比较, 二者符合得相当好。进行激光脉冲整形的方案中, 从实用的角度来说, 要求激光器与单模保偏光纤之间的耦合系统, 不但保证很高的耦合效率, 而且还要具有很高的稳定性, 所以本文的分析为下一步的设计提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] Kuizenga D J. Short-pulse oscillator development for the Nd³⁺-YAG laser-fusion system. *IEEE J. of Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(9) : 1694~ 1708
- [2] Lawson J K, Speck D R, Bibeau C *et al.*. Temporal shaping of third-harmonic pulses on the NOVA laser system. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(24) : 5061~ 5068
- [3] Van Wonterghem B M, Barker C E, Murray J R *et al.*. *ICF Quarterly Report (Lawrence Livermore National Laboratory)*, 1994, **5**(1) : 1~ 16
- [4] Van Wonterghem B M, Speck D R, Norman M *et al.*. A compact and versatile pulse generation and shaping sub-system for high energy laser system. *Proc. SPIE*, 1993, **1870** : 64~ 74
- [5] Burkhart S C, Penko F A. Temporal pulse shaping of fiber-optic laser beams. UCRL-LR-105821-96-2, 75~ 81
- [6] Gloge D. Weakly guiding fibers. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(10) : 2252~ 2258
- [7] Moller S E, Chynoweth A G. *Optical Fiber Telecommunications*. New York: Academic Press, Inc., 1979
- [8] 王 劫, 程瑞华, 干福熹. 单模光纤激光器耦合损耗分析. *中国激光*, 1995, **22**(3) : 181~ 184
- [9] 王绍民, 赵道木. 矩阵光学原理. 浙江: 杭州大学出版社, 1994. 41~ 43
- [10] Komukai T, Fukasaku Y, Sugawa T *et al.*. Highly efficient and tunable Nd³⁺ doped fluoride fiber laser operating in 1.3 μm band. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(9) : 755

Analysis of Optimized Coupling Between Single Longitudinal Mode Laser and Single Mode Optical Fiber

Xie Xinglong Chen Shaohe Lin Zunqi

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 23 March 1998)

Abstracts Coupling between single longitudinal mode laser and single mode optical fiber encountered in the integrated method to shape the laser pulse is analyzed. It is concluded that to maintain the highest coupling efficiency, parameters of the laser cavity and the optical fiber must take into consideration in the designing of the coupling system. Conditions to realize an optimized coupling efficiency is also verified by experiments in which provides a basement for our future research.

Key words single longitudinal mode laser, polarization reserved single mode fiber, coupling efficiency.