

文章编号: 0258-7025(2009)11-2827-05

高功率光纤激光器端面反射系数快速优化算法

胡旭东 宁提纲 陈青艳

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 在高功率光纤激光器优化中提出了一种输入端反射系数与输出端反射系数快速优化算法。基于斜率效率优化准则,通过掺镱光纤激光器实例分析,数值计算结果表明,采用端面反射系数快速优化选择算法,将计算时间至少缩短为传统算法的 8%,较好地避免了阶梯误差的产生,提高了计算精度;在相同的参数条件下,正向抽运时,光纤激光器的端面反射系数优化选择取值区域最大,双向抽运时,光纤激光器的端面反射系数优化选择取值区域次之,而反向抽运时,光纤激光器的端面反射系数优化选择取值区域最小。

关键词 通信技术; 光纤激光器; 端面反射系数; 最佳光纤长度; 优化算法

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20093611.2827

A Rapid Optimization Algorithm of Mirror Reflectivity in High Power Fiber Lasers

Hu Xudong Ning Tigang Chen Qingyan

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract A rapid optimization algorithm to determine the selective value area of input mirror reflectivity and output mirror reflectivity for the optimum of high power fiber lasers is proposed. Under slope efficiency optimization selection criterion, taking Yb³⁺-doped fiber lasers as examples, the numerical simulation results indicate that computing time using the rapid optimization algorithm of reflectivity in high power fiber lasers is less than 8% of time using traditional algorithm, ladder errors are well avoided and improvement of precision is obtained. The numerical simulation results also indicate that under the conditions, the selective area of mirror reflectivity of fiber lasers with forward pumping is largest, the selective area of mirror reflectivity of fiber lasers with bidirectional pumping takes second place and the selective area of mirror reflectivity of fiber lasers with backward pumping is smallest.

Key words communication technology; fiber lasers; mirror reflectivity; optimum fiber length; optimization algorithm

1 引 言

相对于传统固体激光器,光纤激光器由于具有结构紧凑、效率高、光束质量高及散热性好等优点^[1],而得到了国内外学者的广泛研究^[2~6]。高功率光纤激光器,由于其功率衍射极限比传统固体激光器大 2 个数量级而成为长期的研究热点,例如掺镱双包层光纤激光器的调 Q 技术^[7]、温度特性^[8]与受激拉曼散射效

应及布里渊散射效应^[9]得到了国内学者的深入研究。同时高功率光纤激光器可广泛应用于军事设施、半导体制造、手术、科学仪器等^[10],且在钢焊接与铝合金焊接中将有很广泛的应用前景^[11]。

然而在光纤激光器中,端面发射系数的选择设计对激光器的输出性能影响很大,现有的文献报道仅仅研究特定端面反射系数如输入端面反射系数或

收稿日期: 2008-12-12; 收到修改稿日期: 2009-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(60771008)、北京市自然科学基金(4082024)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0076)、留学回国人员基金(教外 2008890)、教育部博士点基金(200800040002)和北京交通大学校科技基金(2006XM003)资助课题。

作者简介: 胡旭东(1978—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: huxudongqychen@163.com

导师简介: 宁提纲(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信,光纤激光器, Radio over Fiber 和光纤传感等方面的研究。E-mail: tgning@bjtu.edu.cn

输出端面反射系数对光纤激光器的影响^[12],却没有全面讨论端面反射系数对光纤激光器的影响。为了全面讨论端面反射系数对光纤激光器的影响,提出了两种选择准则用于端面反射系数的优化选取^[13],然而,其采用的计算方法通常需要较大的计算量而影响了实际研究的应用,因此,本文提出了一种光纤激光器端面反射系数快速优化算法,能极大地加快光纤激光器端面反射系数优化选择区域的获得。

2 端面反射系数快速优化算法

光纤激光器模型及近似解法的非线性常微分方程组来自文献[14],采用的计算方法为配点法^[15]。其正确性已在文献[13]中得到证实。

将文献[13]中的选择准则1即斜率效率优化选择准则复述如下:

斜率效率优化选择准则: (R_1, R_2) 集合中的元素对应的最佳光纤长度对应的输出功率大于等于最佳光纤长度集合对应的输出功率集合的最大值的 K 倍, K 取 $[0.5, 1]$ 。

这里,对应的 (R_1, R_2) 集合所有元素中满足斜率效率优化选择准则的元素构成的集合,称为端面反射系数 (R_1, R_2) 优化选择集合。

为了快速得到端面反射系数的优化选择区域,提出了计算方法即端面反射系数快速优化算法,其步骤如下:

1) 输入端反射系数 R_1 取 0.01, 输出端反射系数 R_2 取 0.5, 计算此时的光纤激光器的最佳光纤长度,并将得到的最佳光纤长度作为光纤长度选择集合的最大值;

2) 输入端反射系数 R_1 取 0.99, 输出端反射系数 R_2 取 0.99, 计算此时的光纤激光器的最佳光纤长度,并将得到的最佳光纤长度作为光纤长度选择集合的最小值;

3) 输入端反射系数 R_1 取 0.99, 输出端反射系数 R_2 取 0.01, 计算此时的光纤激光器的最佳光纤长度及对应的输出功率,并将得到的最佳光纤长度对应的输出功率作为输出功率最大值 P_{\max} ;

4) 对 K 值进行设定,对输入端反射系数 R_1 的取值集合进行设定,输入端反射系数 R_1 的取值集合需要包含 0.01 与 0.99;

5) 输入端反射系数 R_1 取其取值集合的一个新元素, R_{2_new} 取 0.01;

6) 输出端反射系数 R_2 取值集合设定为初值为 0.1, 取值间隔为 0.1 的递增数列,其中集合的最大

值小于等于输入端反射系数 R_1 ;

7) 输出端反射系数 R_2 按从小到大的顺序取其取值集合的一个新元素,计算光纤激光器的最佳光纤长度及对应的输出功率;设定光纤激光器的最佳光纤长度对应的输出功率小于等于 $K \times P_{\max}$ 的判断条件,若满足此判断条件,则取此时 R_2 赋给 R_{2_new} , 转到 9);

8) 设定输出端反射系数 R_2 取值集合元素未取完的判断条件,若满足此判断条件,则转到 7); 若不满足此判断条件,则转到 11);

9) 设定 R_{2_new} 等于 0.1 的判断条件,若满足此判断条件,则输出端反射系数 R_2 新取值集合设定为初值为 0.01, 取值间隔为 0.01 的的递增数列,其中新取值集合的最大值为 0.1, 若不满足此判断条件,则输出端反射系数 R_2 新取值集合设定为初值为 $R_{2_new} - 0.1$, 取值间隔为 0.01 的的递增数列,其中新取值集合的最大值为 R_{2_new} ;

10) 输出端反射系数 R_2 遍取输出端反射系数 R_2 新取值集合元素,计算光纤激光器的最佳光纤长度及对应的输出功率,求得光纤激光器的最佳光纤长度对应的输出功率与 $K \times P_{\max}$ 之差的绝对值的最小值对应的输出端反射系数 R_2 , 作为 R_{2_new} ;

11) 将 (R_1, R_{2_new}) , 作为 (R_1, R_2) 优化集合中的一个元素,

12) 设定输出端反射系数 R_1 取值集合元素未取完的判断条件,若满足此判断条件,则转到 5);

13) 得到 (R_1, R_2) 优化集合。

在端面反射系数快速优化算法中, 1), 2) 与 3) 的顺序可任意排列。

显然,通过端面反射系数快速优化算法得到的 (R_1, R_2) 优化集合的元素,只是端面反射系数优化取值集合的一部分。通过此 (R_1, R_2) 优化集合可以得到完整的 (R_1, R_2) 优化集合取值边界,进而,得到的满足斜率效率优化准则的完整的 (R_1, R_2) 优化集合。

3 数据分析与讨论

采用端面反射系数快速优化算法,以掺镱光纤激光器为例,研究光纤激光器端面反射系数优化选择取值区域的性质。在下面的讨论中,输入端反射系数 R_1 的取值集合设定为: $\{0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.99\}$ 。

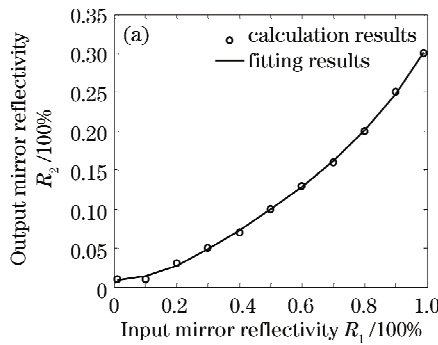
抽运功率 20 W 的抽运光从 $z=0$ 处耦合到光纤中,其他参数严格来自文献[14]中的 Table 2, K 取 0.8, 实际上光纤激光器的参数与文献[13]中完

全相同。计算得到的光纤激光器中端面反射系数优化选择取值区域为图 1(a)中所示的拟合曲线的下方,表示为

$$R_2 \leq 0.43596R_1^4 - 0.80186R_1^3 + 0.67537R_1^2 - 0.010464R_1 + 0.0086671. \quad (1)$$

图 1(a)中,已经看不到文献[13]中的阶梯误差,由于文献[13]的计算精度,输入端反射系数为 0.02,输出端反射系数为 0.01,出现了由于计算精度造成的阶梯误差,而图 1(a)中,虽然输入端反射系数为 0.1,而输出端反射系数为 0.01,但由于采用拟合的方式,减少了计算量的同时,避免了阶梯误差,提高了运算精度。

图 1(b)表示图 1(a)中的光纤激光器输出端面



反射系数拟合误差与输入端面反射系数的函数关系,很容易发现,输出端面反射系数拟合误差小于 0.005,而采用的端面反射系数的精度为 0.01,因此,可以忽略这种拟合误差,说明采用 4 阶拟合足够满足要求。

将掺镱离子浓度减小一半时,抽运功率 20 W 的抽运光从 $z=0$ 处耦合到光纤中,其他参数严格来自文献[14]中的 Table 2, K 取 0.8,与文献[13]中的参数相同,计算得到的光纤激光器中端面反射系数优化选择取值区域为图 2(a)中所示的拟合曲线的下方,表示为

$$R_2 \leq 0.33618R_1^4 - 0.7133R_1^3 + 0.58975R_1^2 + 0.01082R_1 + 0.010891. \quad (2)$$

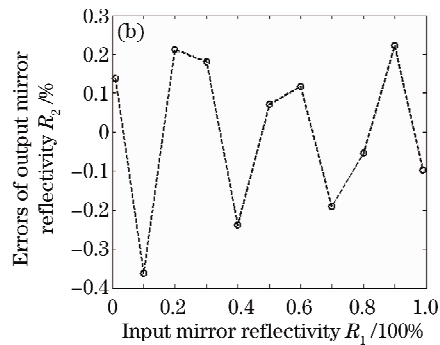


图 1 (a)正向抽运时光纤激光器中端面反射系数优化选择取值区域;(b)正向抽运时输出端面反射系数拟合误差与输入端面反射系数的函数关系

Fig. 1 (a) Optimum selective value area of mirror reflectivity of fiber lasers when the pumps is injected at $z=0$;
(b) fitting errors of output mirror reflectivity as a function of input mirror reflectivity

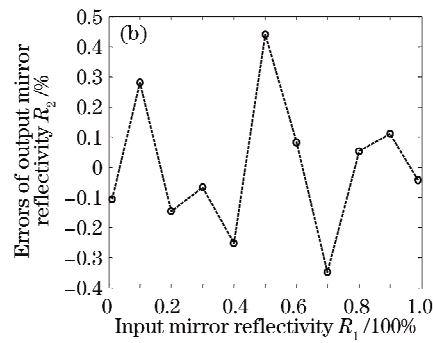
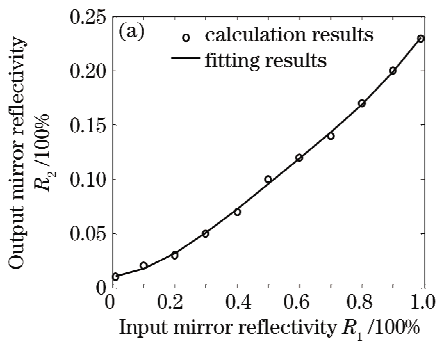


图 2 (a)掺镱离子浓度为图 1 的一半时光纤激光器中端面反射系数优化选择取值区域;(b)掺镱离子浓度为图 1 的一半时输出端面反射系数拟合误差与输入端面反射系数的函数关系

Fig. 2 (a) Optimum selective value area of mirror reflectivity of fiber lasers with half Yb^{3+} concentration of Fig. 1;
(b) fitting errors of output mirror reflectivity as a function of input mirror reflectivity

图 2(b)表示图 2(a)中的光纤激光器输出端面反射系数拟合误差与输入端面反射系数的函数关系,很容易发现,输出端面反射系数拟合误差小于 0.005,而采用的端面反射系数的精度为 0.01,因此,可以忽略这种拟合误差,说明采用 4 阶拟合足够满足给定精度要求。

为比较本文的优化方法对文献[13]中计算方法的改进,假设所采用的光纤长度取值集合和光纤激光器的参数都是相同的,这样,很自然得到结论,计算得到最佳光纤长度与其对应的输出功率的计算量是相等的,也就是说,计算得到最佳光纤长度的计算时间是相等的。因此,从计算文献[13]和本文的

(R_1, R_2) 集合元素对应的最佳光纤长度的次数来衡量计算时间的长短是合理的。文献[13]中图 6 总的最佳光纤长度的计算次数为 1602 次,而本文图 1 总的最佳光纤长度计算次数为 127 次;文献[13]中图 7 总的最佳光纤长度的计算次数为 1602 次,而本文图 2 总的最佳光纤长度计算次数为 125 次。因此,本文中图 1 或图 2 的计算时间将至少缩短为采用传统算法的文献[13]中相应图形的计算时间的 8%。

抽运功率 20 W 的抽运光从 $z = L$ 处耦合到光纤中,其他参数严格来自文献[14]中的 Table 2, K 取 0.8。计算得到的光纤激光器中端面反射系数优化选择取值区域为图 3(a)中所示的拟合曲线的下方,用数学表达式表示为

$$R_2 \leq 0.33835R_1^4 - 0.64807R_1^3 + 0.51812R_1^2 - 0.033709R_1 + 0.0098404. \quad (3)$$

最佳光纤长度的计算次数为 119 次,光纤激光器输出端面反射系数拟合误差与输入端面反射系数的函数关系如图 3(b)所示。

从图 3(a)中可以发现 $R_1 \leq 0.1$ 时,对应的 R_2 等于 0.01,而我们的算法精度设定为 0.01,实际上,这正好说明了 R_1 的取值范围,即图中为 $R_1 \geq 0.1$,基于这种认识,对 $R_1 \geq 0.1$ 后的数据重新进行拟合,得到的端面反射系数优化取值区域表示为

$$R_2 \leq 0.25178R_1^4 - 0.44757R_1^3 + 0.36011R_1^2 + 0.0053733, \quad 0.1 \leq R_1 < 1. \quad (4)$$

抽运功率 10 W 的抽运光从 $z = 0$ 处耦合到光纤中且抽运功率 10 W 的抽运光从 $z = L$ 处耦合到光纤中,其余参数严格来自文献[14]中的 Table 2, K 取 0.8。计算次数为 125。计算得到的光纤激光器中端面反射系数优化选择取值区域为图 4(a)中所示的拟合曲线的下方,则端面反射系数优化选择取值区域表示为

$$R_2 \leq -0.074811R_1^4 + 0.39212R_1^3 - 0.3065R_1^2 + 0.25447R_1 - 0.012107, \quad 0.1 \leq R_1 < 1. \quad (5)$$

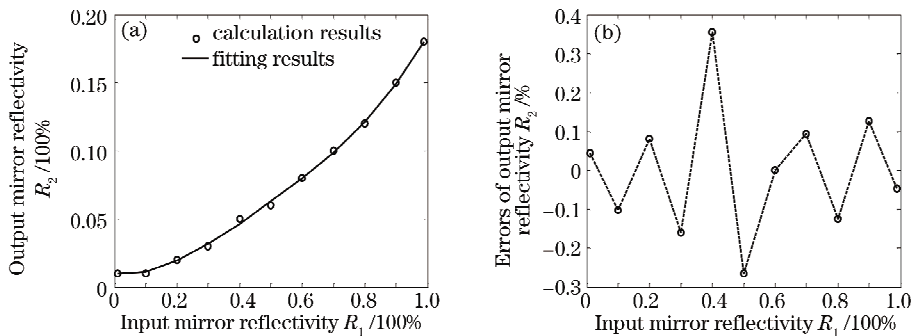


图 3 (a)反向抽运时光纤激光器中端面反射系数优化选择取值区域;(b)反向抽运时输出端面反射系数拟合误差与输入端面反射系数的函数关系

Fig. 3 (a) Optimum selective value area of mirror reflectivity of fiber lasers when the pump is injected at $z = L$; (b) fitting errors of output mirror reflectivity as a function of input mirror reflectivity

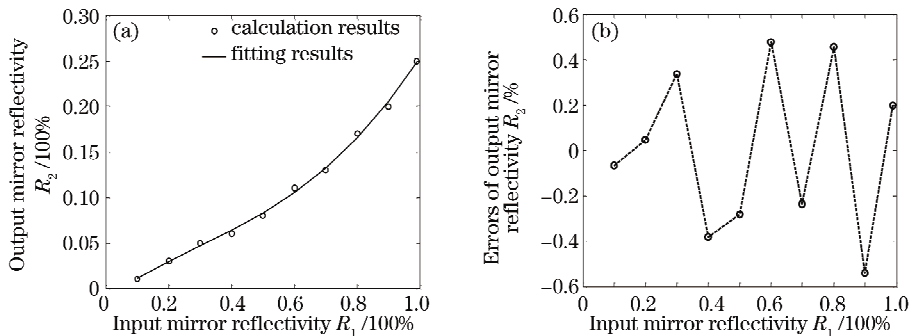


图 4 (a)双向抽运时光纤激光器中端面反射系数优化选择取值区域;(b)双向抽运时输出端面反射系数拟合误差与输入端面反射系数的函数关系

Fig. 4 (a) Optimum selective value area of mirror reflectivity of fiber lasers when the pump is injected at $z = 0$ and $z = L$; (b) fitting errors of output mirror reflectivity as a function of input mirror reflectivity

光纤激光器输出端面反射系数拟合误差与输入端面反射系数的函数关系如图 4(b)所示, 只有个别点的拟合误差大于 0.005, 说明采用 4 阶拟合基本满足给定精度要求, 这说明, 算法中的输入端反射系数取值集合只需 4 个元素即可。由上面的数值计算结果很容易发现, 通常输入端反射系数取 $[0.1, 1)$, 因此, 算法中的输入端反射系数取值集合应该包含 0.1 与 0.99。

比较图 1, 图 3 与图 4 发现, 在相同的参数条件下, 正向抽运时, 光纤激光器的端面反射系数优化选择取值区域最大, 双向抽运时, 光纤激光器的端面反射系数优化选择取值区域次之, 而反向抽运时, 光纤激光器的端面反射系数优化选择取值区域最小。

4 结 论

根据掺镱光纤激光器实例分析, 可以得到: 在相同的参数条件下, 正向抽运时, 光纤激光器的端面反射系数优化选择取值区域最大, 双向抽运时, 光纤激光器的端面反射系数优化选择取值区域次之, 而反向抽运时, 光纤激光器的端面反射系数优化选择取值区域最小。采用端面反射系数快速优化选择算法, 将计算时间至少缩短为传统算法的 8%, 较好地避免了图像中阶梯的产生, 提高了计算精度。数值计算结果还表明, 通常采用 4 阶拟合就可以达到设定的精度, 也就是说, 算法中输入端反射系数 R_1 的取值集合除了两个端点 0.1, 0.99 外, 只需选择集合 $(0.1, 0.99)$ 之间的任两个数即可, 这样可将计算时间进一步缩短而不影响计算精度, 能快速获得光纤激光器的端面反射系数取值区域。

参 考 文 献

- 1 B. Rossi. Commercial fiber lasers take on industrial markets[J]. *Laser Focus World*, 1997, 33(5): 143~149
- 2 L. Li, Q. Lou, J. Zhou *et al.*. Transverse-mode controlling of a large-mode-area multimode fiber laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, 5(9): 524~526
- 3 H. Zhao, Q. Lou, J. Zhou *et al.*. An acousto-optic Q-switched fiber laser using China-made double-cladding fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, 5(9): 522~523
- 4 Y. Tang, Y. Yang, X. Cheng *et al.*. Short Tm^{3+} -doped fiber lasers with watt-level output near 2 microns[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, 6(1): 44~46
- 5 P. Zhou, Z. Chen, X. Wang *et al.*. Synchronization and coherent combining of two pulsed fiber lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, 6(7): 523~525
- 6 Chu Xingchun, Zhao Shanghong, Zhan Shengbao *et al.*. Spectral beam combination of fiber lasers based on cascaded volume gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1538~1542
- 7 楚兴春, 赵尚弘, 占生宝 等. 基于级联体光栅的光纤激光阵列谱组束[J]. *光学学报*, 2008, 28(8): 1538~1542
- 7 Ning Jiping, Zhang Weiyi, Shang Lianju *et al.*. All-fiber Q-switched ytterbium-doped double-clad laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, 35(4): 483~487
- 8 宁继平, 张伟毅, 尚连聚 等. 掺镱包层光纤激光器的全光纤调 Q 技术[J]. *中国激光*, 2008, 35(4): 483~487
- 8 Jiang Qijie, Yan Ping, Zhang Jing *et al.*. Analysis on thermal characteristic of ytterbium-doped fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, 35(6): 827~829
- 8 蒋秋洁, 闫平, 张金戈 等. 掺镱光纤激光器温度特性分析[J]. *中国激光*, 2008, 35(6): 827~829
- 9 Hu Shuling, Zhang Chunxi, Gao Chunqing *et al.*. Stimulated Raman scattering and stimulated Brillouin scattering effects in ytterbium doped double clad fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, 35(1): 6~10
- 9 胡姝玲, 张春熹, 高春清 等. 包层抽运掺镱光纤激光器中受激拉曼散射和受激布里渊散射效应[J]. *中国激光*, 2008, 35(1): 6~10
- 10 A. Galvanauskas. High power fiber lasers[J]. *Optics and Photonics News*, 2004, 15(7): 42~47
- 11 C. Thorny, T. Seefeld, F. Vollertsen. Application of high-power fibre lasers in laser and laser-MIG welding of steel and aluminium[J]. *Welding in the World*, 2005, 49(9 SPEC ISS): 88~98
- 12 E. Yabeh, A. A. Hardy. Modeling and optimization of short Er^{3+} - Yb^{3+} codoped fiber lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, 39(11): 1444~1451
- 13 Liu Xudong, Ning Tigang, Chen Qingyan. Novel method to determine the optimum selective value area of reflectivity in high power fiber lasers[C]. *The Sixth Annual Academic Doctoral*, 2008
- 13 胡旭东, 宁提纲, 陈青艳. 高功率光纤激光器端面反射系数优化取值区域确定方法[C]. 第六届博士生学术年会, 2008
- 14 I. Kelson, A. A. Hardy. Strongly pumped fiber lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, 34(9): 1570~1577
- 15 P. Deulhard. Newton Methods for Nonlinear Problems; Affine Invariance and Adaptive Algorithms[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 315~368