

含滤波器多模光纤激光器有效反射率的分析

周继芳^{1,3}, 段志春^{2*}, 高曾辉², 陈建国³

(1. 成都医学院 人文信息管理学院, 四川 成都 610081; 2. 宜宾学院 计算物理四川省高校重点实验室, 四川 宜宾 644000; 3. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要:基于改善多模光纤激光器输出光束质量目的,提出了其含有抑制高阶模输出的光纤滤波器的理论模型.运用模式耦合理论,对此模型进行了理论分析,导出了滤波器与端面反射镜构成系统有效反射率的表达式.并根据其表达式作了数值模拟,结果为:对于含滤波器的多模光纤激光器,其高阶模的有效反射率较小,低阶模的有效反射率较大.结论表明,在多模光纤激光器系统中设置一个光纤滤波器,使得低阶模比高阶模更容易起振,可以有效地改善其输出光束的质量,为实验研究提供了一定的理论依据.

关键词:光纤滤波器;多模光纤激光器;有效反射率;光束质量

中图分类号:O164 文献标志码:A 文章编号:1001-8395(2011)04-0551-05

doi:10.3969/j.issn.1001-8395.2011.04.022

在诸多应用领域中,由于光纤激光器件具有高效率、高输出功率、高光束质量,以及结构紧凑等特性,其地位十分重要^[1-2].然而,由于存在大量的非线性效应,限制了高功率光纤激光器的输出功率和光束质量^[3-4].在国内外大量的研究中,已经报道了许多新方法和新技术运用于削减这些有害影响^[5-14].目前,应用大模面积光纤是比较有效的抑制有害效应的一种方式,其中,采用多模光纤是获得大模面积光纤的常用方法^[8-12].为了解决输出光束质量水平,人们尝试了在多模光纤放大器和激光器中运用模式滤波器来进行研究^[10-12].

本文运用模式耦合理论和多模光纤激光器稳态速率方程组,分析了含抑制高阶模输出光纤滤波器的多模光纤激光器系统,导出了此系统有效反射率的表达式.并选择了两种多模光纤来进行分析和讨论,结果显示,滤波器的存在,有力地抑制了高阶模的输出,提高了多模光纤激光器的输出光束质量.

1 理论模型的解析分析

在图1中,给出了含光纤滤波器多模光纤激光器系统的装置简化图.从该图可以看到,此系统包含一个作为工作介质的多模光纤(multimode fiber, MF)和一个光纤空间滤波器(spatial filter, SF).令

MF的长度为 L_M ,SF的长度为 l_f ,其腔由两个反射率分别为 R 和 R_s 的反射镜(其中反射率为 R_s 的镜面紧贴于滤波器面)所构成.

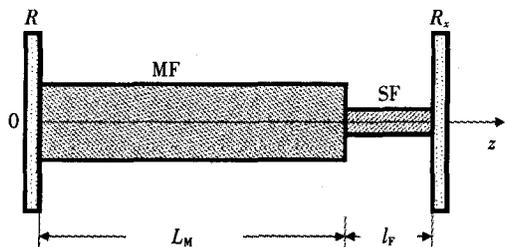


图1 含光纤滤波器的多模光纤激光器装置系统
Fig. 1 The system configuration of the multimode fiber (MF) laser containing a spatial filter (SF)

对于一个光纤参数为已知前提下的阶跃型分布的多模光纤,若光学频率给定,则其本征函数 $u_m(r)$ 和本征值 β_m 可以通过计算得到.对于光纤空间滤波器,根据麦克斯韦理论,其本征函数 $f_n(r)$ 和相应的本征值 γ_n 原则上也可以得到,然而,在很多实际情况下, $f_n(r)$ 的解析表达式是很难得到的.以免混淆,在下面的分析中,用下标“ m ”来表示多模光纤的模式,下标“ n ”表示光纤滤波器的模式.

首先,考虑多模光纤中第 m 阶模 $u_m(r)$ 的传输.假设该模的频率为 ω_m ,振幅为 A_m ,采用合适的单位,可以使振幅的平方 $|A_m|^2$ 代表通过激光器和滤波器的模式功率.若忽略光纤和滤波器界面上的反射,并

收稿日期:2010-12-28

基金项目:四川省教育厅自然科学重点基金(10ZA063)资助项目

*联系作者简介:段志春(1972—),女,副教授,主要从事激光与光通信的研究

且假定 $u_m(\mathbf{r})$ 和 $f_n(\mathbf{r})$ 均为归一化函数,即

$$\int u_m(\mathbf{r}) u_m^*(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = \int f_n(\mathbf{r}) f_n^*(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = 1. \quad (1)$$

运用模式耦合理论^[12,15],可以很容易得到在滤波器输入端第 m 阶光纤模耦合进入第 n 阶滤波器模的那部分场为

$$E_{in(mn)}^{(F)}(\mathbf{r}) = \eta_{mn} A_m(L_M) f_n(\mathbf{r}). \quad (2)$$

其中, $A_m(L_M)$ 为滤波器输入端的第 m 阶光纤模的振幅,上标“(F)”表示滤波器,而 η_{mn} 可表示为

$$\eta_{mn} = \int u_m(\mathbf{r}) f_n^*(\mathbf{r}) d\mathbf{r}. \quad (3)$$

由此很容易得到,在滤波器的右端面(the right hand side, RHS),由第 m 阶光纤模造成的输出场为

$$E_{out(m)}^{(F)}(\mathbf{r}, \omega_m) = A_m(L_M) \sum_n \eta_{mn} f_n(\mathbf{r}, \omega_m) \times \exp[-\alpha_F l_F/2 + i\gamma_n(\omega_m) l_F]. \quad (4)$$

求和项包含所有的滤波器波导模,其中 α_F 为滤波器的功率损耗系数.在方程(4)中,保留了运行频率 ω_m ,以此来标明从滤波器右端面输出的输出场是由第 m 阶光纤模引起的,并且也标明了 $f_n(\mathbf{r}, \omega_m)$ 和 $\gamma_n(\omega_m)$ 应该是由光频率 ω_m 得到的.当然,若设计的滤波器只支持一个波导模式(如基模),并且滤波器的长度 l_F 足够长的话,那么在滤波器输出端,就可以忽略第 m 阶光纤模耦合进滤波器的辐射模的那部分能量.在这种情况下,(4)式中的代数和就可以去掉.通常 α_F 很小,而 l_F 也并不大^[11],因此, $\exp(-\alpha_F l_F/2)$ 可以用 1 来代替.在下边的讨论中,不再保留这个因子.

如果在多模光纤激光器中有 M 个横模同时振荡,更接近物理事实的描述应该是认为这 M 个横模具有不同的频率,它们之间应该没有什么相干性.于是,在图1所示的滤波器输入端,可以认为包含有 M 种波长略有不同的波,每一种波都具有其自己的频率 ω_m .对于滤波器而言,每一个 ω_m 的波却可能会导致相当多的滤波器模式 $f_n(\mathbf{r}, \omega_m)$.另外,在器件中传播的第 n 阶滤波器模可能会有 M 个,它们分别来自于多模光纤的 M 个横模.由于这 M 个横模频率略有不同,因而在滤波器中传输的具有同一下标的 M 个横模应该是不相干的.

下面分析通过滤波器右端面反射镜反射回来的第 m 阶激光模式.基于(4)式所导出的同样论证,根据图1,可以得到,从反射率为 R_x 的腔镜反射

回多模光纤增益介质右端的反射场为

$$E_{return}^{(F)} = \sum_n A_m(L_M) r_x \eta_{mn} f_n(\mathbf{r}, \omega_m) \times \exp[i2\gamma_n(\omega_m) l_F], \quad (5)$$

其中, r_x 为滤波器右端面的反射系数(反射率 $R_x = r_x^2$).

在这些反射波再次进入多模光纤激光器的增益介质中时,一个滤波器模式 $f_n(\mathbf{r}, \omega_m)$ 同样可以被耦合进入所有的 M 个激光器模式之中去.事实上,只有耦合进具有相同频率的 $u_m(\mathbf{r}, \omega_m)$ 的部分才是有用的反馈.对于频率为 ω'_m 的波来说,耦合进 $u_m(\mathbf{r}, \omega_m)$ 中去的部分却只能被认为是一种损耗.由于这部分波与 ω_m 波不相干,因而也不能认为对 ω_m 波的有效反射率有什么实质上的贡献.

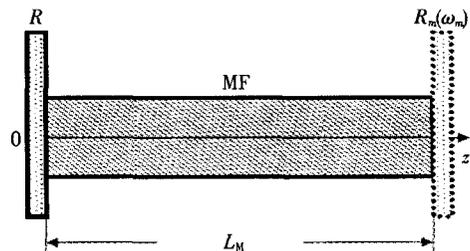


图2 含滤波器多模激光器装置系统等效示意图
Fig. 2 The equivalent system configuration of the multimode fiber laser containing a spatial filter

在图2中,给出了含滤波器多模激光器装置系统等效示意图,令 $R_m(\omega_m)$ 为多模光纤激光器等效系统右端面的有效反射率.考虑到图2中给出的有效反射率以及反射回来的光与激光模式的耦合,可以得到从右端滤波器反射回激光器的频率为 ω_m 的场是

$$E_{RHS}^{(Laser)} = \sum_n A_m(L_M) r_x |\eta_{mn}|^2 \times \exp[i2\gamma_n(\omega_m) l_F] f_n(\mathbf{r}, \omega_m) u_m(\mathbf{r}, \omega_m). \quad (6)$$

其中,上标“(Laser)”表示激光器.由此,可以导出第 m 阶激光模式的反射系数为

$$r_m(\omega_m) = \sum_n r_x |\eta_{mn}|^2 \exp[i2\gamma_n(\omega_m) l_F]. \quad (7)$$

若用功率来进行计算,则可得含滤波器的激光器反射镜面系统的有效反射率为

$$R_m(\omega_m) = R_x \left| \sum_n |\eta_{mn}|^2 \exp[i2\gamma_n(\omega_m) l_F] \right|^2. \quad (8)$$

至此,可以认为激光器是由一个 L_M 长的多模光纤和反射率分别为 R 以及 $R_m(\omega_m)$ 的两个反射镜所构成.据此,可以对含有滤波器的多模光纤激光器系统的有效反射率进行数值模拟分析,并可根据所得结果来判定此系统是否能够改善输出光束的质量.

2 讨论和分析

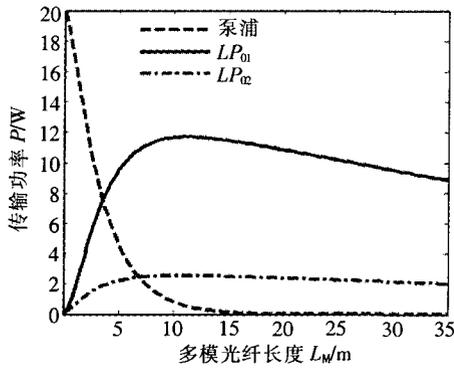
根据表1所给出的参考数据,选择两种多模光纤作为分析和讨论的例子,其归一化频率 V 分别为 4.960 4(纤芯半径 $a = 12 \mu\text{m}$) 以及 7.440 6(纤芯半径 $a = 18 \mu\text{m}$). 换句话说就是,第一种情况的光纤支持 4 个波导模式,即分别为 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 和 LP_{02} . 第二种情况支持 9 个模式,即分别为 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 、 LP_{02} 、 LP_{31} 、 LP_{12} 、 LP_{41} 、 LP_{22} 和 LP_{03} . 如前所述,对于多种空间滤波器的本征模式的解析表达式是很难得到的. 在这些情况下,人们可以运用麦克斯韦方程组来得到数值分析结果. 为了量化计算分析,假定滤波器是一段单模的光纤,这意味着在激光器中只有 LP_{0m} 模式才可能耦合进滤波器中去.

在对各种激光器和放大器的研究中,人们常采用速率方程^[11-12,15-21]进行讨论. 图3中,运用多模光纤激光器稳态速率方程、模式理论以及四阶龙格库塔法,计算出了 LP_{0m} 模在多模光纤激光器中的传输功率随其长度 L_M 的变化关系. 可以看出,不管在 4 模光纤,还是在 9 模光纤中, LP_{01} 模的传输功率都

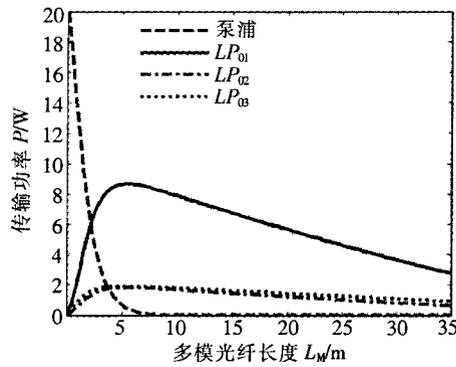
是最大的. 对于 4 模光纤激光器, LP_{01} 最大功率对应的激光器最佳长度约为 10 m; 对于 9 模光纤激光器, LP_{01} 最大功率对应的激光器最佳长度约为 5 m. 鉴于此,在以下的讨论中,均选取 LP_{01} 最大输出功率对应的激光器最佳长度值进行分析.

表1 含滤波器的掺 Yb 多模光纤激光器数值计算所用参数
Table 1 Parameters in calculations for simulations of Yb-doped multimode fiber laser containing a spatial filter

参数及其数值	参数及其数值
滤波器纤芯半径 $a_F = 5 \mu\text{m}$	上能级粒子数寿命 $\tau_0 = 10^{-3} \text{ s}$
信号光波长 $\lambda_s = 1064 \text{ nm}$	信号光吸收截面 $\sigma_{as} = 6.4 \times 10^{-27} \text{ m}^2$
反射率 $R = 0.98$	信号光发射截面 $\sigma_{es} = 3.2 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
泵浦功率 $P_p = 20 \text{ W}$	泵浦光波长 $\lambda_p = 975 \text{ nm}$
泵浦损耗 $\alpha_p = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	泵浦光吸收截面 $\sigma_{ap} = 25 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
信号光损耗 $\alpha_s = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	泵浦光发射截面 $\sigma_{ep} = 25 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
滤波器长度 $l_F = 4 \text{ cm}$	掺杂浓度 $N_0 = 4 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
纤芯折射率 $n_{co} = 1.4580$	多模光纤包层折射率 $n_{cl} = 1.4563$
数值孔径 $NA = 0.07$	滤波器光纤包层折射率 $n_{cl} = 1.4558$



(a) 4 模光纤



(b) 9 模光纤

图3 泵浦功率和 LP_{0m} 模的功率随多模激光器腔长 L_M 的变化
Fig. 3 The pump power and the power of LP_{0m} mode versus multimode fiber laser's length L_M

根据(8)式,由于上文中假定光纤滤波器为单模光纤,只有 LP_{0m} 可以耦合进滤波器,所以,可以将其改写为

$$R_m(\omega_m) = R_x | \eta_m |^4 | \exp[i2\gamma_{01}(\omega_m)l_F] |^2 \quad (9)$$

根据(9)式,分别对 4 模和 9 模情况下的有效反射率进行了讨论. 由于只有 LP_{0m} 模耦合进单模滤波器,因此,4 模情况下,只需讨论 LP_{01} 和 LP_{02} 模;9 模情况下,只需讨论 LP_{01} 、 LP_{02} 和 LP_{03} 模. 在图4中,分别给出了两种情况下, LP_{0m} 模对应的有效反射率 R_m 与滤波器右端面反射率 R_x 的变化关系. 从图 4

可以看到,模式越多的激光器,其各阶模式的有效反射率越小;随着 R_x 的增大,各种激光器的各阶模式的有效反射率亦增大;对于不同模式的激光器,其中 LP_{01} 模的有效反射率最大,高阶模的有效反射率较小,说明了此情况下基模最容易起振. 由此可见,在多模光纤激光器系统中设置一个单模光纤滤波器后,总可以选取适当的 R_x 值,使高阶模的有效反射率远远小于基模的有效反射率,达到抑制高阶模振荡的目的,从而使得多模光纤激光器系统输出光束的质量得以改善.

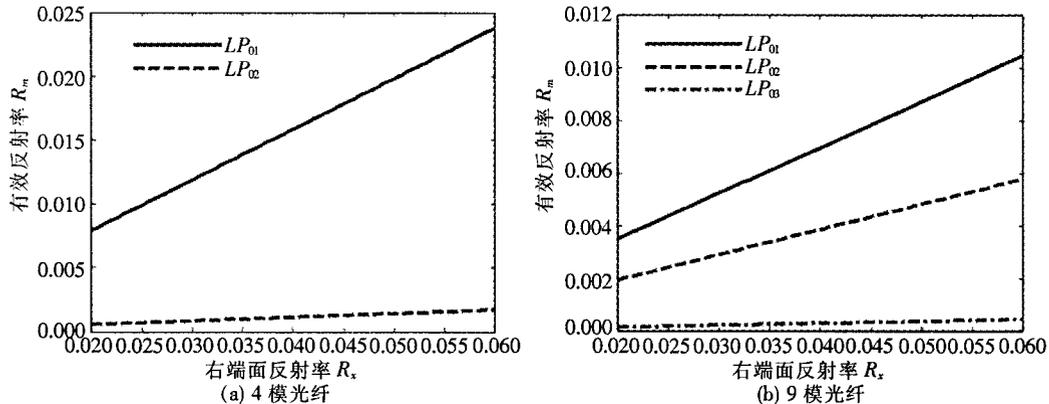


图 4 LP_{0m} 模的有效反射率 $R_m(\omega_m)$ 随滤波器右端面反射率 R_r 的变化

Fig. 4 The effective reflectivity $R_m(\omega_m)$ of LP_{0m} modes versus the right end face's R_r of the filter

3 结语

本文运用模式耦合理论和多模光纤激光器稳态速率方程组,对含单模光纤滤波器的多模光纤激光器系统进行了分析和讨论,并导出了其有效反射率的表达式.总的说来,对于含滤波器的多模光纤激光器,模式越多,其各阶模的有效反射率越小,且

高阶模的有效反射率较小,低阶模有效反射率较大.结果说明了,在多模光纤激光器系统中设置一个光纤滤波器,使得低阶模比高阶模更容易起振,可以有效地改善输出光光束质量.这给在实验条件下对含有光纤滤波器的多模光纤激光器输出性能进行研究提供了一定的依据.

参考文献

- [1] Hardy A, Oron R. Singnal amplification in strongly pumped fiber amplifiers[J]. IEEE J Quantum Electron, 1997, 33: 307 - 313.
- [2] Kelson I, Hardy A. Optimization of strongly pumped fiber lasers[J]. J Lightwave Tech, 1999, 17: 891 - 897.
- [3] Zenteno L. High - power double - clad fiber lasers[J]. J Lightwave Tech, 1993, 11: 1435 - 1446.
- [4] Ortaç B, Hideur A, Chartier T, et al. Influence of cavity losses on stimulated brillouin scattering in a self - pulsing side - pumped Ytterbium - doped double - clad fiber laser[J]. Opt Commun, 2003, 215: 389 - 395.
- [5] Broderick N G R, Offerhaus H L, Richardson D J, et al. Large mode area fibers for high power applications[J]. Opt Fiber Tech, 1999, 5: 185 - 196.
- [6] Baker H J, Lee J R, Hall D R. Self - imaging and high - beam - quality operation in multi - mode planar waveguide optical amplifiers[J]. Opt Express, 2002, 10: 297 - 302.
- [7] Yoda H, Polynkin P, Manusuripur M. Beam quality factor of higher order modes in a step - index fiber[J]. J Lightwave Tech, 2006, 24: 1350 - 1355.
- [8] Gong M L, Yuan Y Y, Li C, et al. Numerical modeling of transverse mode competition in strongly pumped multimode fiber lasers and amplifiers[J]. Opt Express, 2007, 15: 3236 - 3246.
- [9] Yuan Y Y, Gong M L, Li C, et al. Theoretical and experimental study on transverse mode competition in a partial - coiled multimode fiber laser[J]. Fiber Opt, 2008, 18: 52 - 57.
- [10] Andermahr N, Fallnich C. Modeling of transverse mode interaction in large - mode - area fiber amplifiers[J]. Opt Express, 2008, 16: 20038 - 20046.
- [11] Liao S Y, Gong M L, Zhang H T. Influence of mode distortion on the transverse mode competition in large - mode - area amplifiers[J]. Opt Commun, 2009, 282: 406 - 412.
- [12] Gong M L, Liao S Y, Yuan Y Y, et al. High - order modes suppression in large - mode - area fiber amplifiers and lasers by controlling the mode power allocations[J]. J Opt A: Pure Appl Opt, 2009, 11: 1 - 6.
- [13] Jung Y, Jeong Y, Brambilla G, et al. Adiabatically tapered splice for selective excitation of the fundamental mode in a multimode fiber[J]. Opt Lett, 2009, 34: 2369 - 2371.
- [14] Zhao H C, Ma H T, Zhou P, et al. Multimode fiber laser beam cleanup based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J].

Opt Commun,2011,284(2):613-615.

- [15] 傅玉青,段志春,陈建国. 多模光纤放大器输出光分析[J]. 强激光与粒子束,2010,22(7):1453-1456.
- [16] 戴特力. 端面泵浦的瞬态过程[J]. 重庆师范学院学报:自然科学版,1993,10(3):1-4.
- [17] 李松柏,邓涛,杨敏. 光纤光栅外腔半导体激光器的输出谱特性研究[J]. 四川师范大学学报:自然科学版,2010,33(2):216-219.
- [18] 罗涛,郑泰玉,戴振文. 基于能量传递的 $\text{Pr}^{3+}:\text{Ce}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤中上转换激光器的研究[J]. 东北师大学报:自然科学版,2010,42(2):68-72.
- [19] Duan Z C, Zhang L P, Chen J C. Analytical solutions of rate equations including losses describing threshold pumped fiber lasers[J]. Optik,2008,119:395-399.
- [20] 傅玉青,冯国英,张大勇,等. 阶跃光纤低阶线偏振模的 M^2 因子分析[J]. 光子学报,2008,37(7):1342-1345.
- [21] Fu Y Q, Feng G Y, Zhang D Y, et al. Beam quality factor of mixed modes emerging from a multimode step-index fiber[J]. Optik,2010,121(5):452-456.

Analysis of Effective Reflectivity about Multimode Fiber Laser Containing Spatial Filter

ZHOU Ji-fang^{1,3}, DUAN Zhi-chun², GAO Zeng-hui², CHEN Jian-guo³

- (1. Department of Humanistic Information Management, Chengdu Medical College, Chengdu 610081, Sichuan;
2. Computational Physics Key Laboratory of Sichuan Universities and Colleges, Yibin College, Yibin 644000, Sichuan;
3. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, Sichuan)

Abstract: Based on improving the output beam quality of the multimode fiber lasers, the theoretical model of the system containing a spatial filter which depresses the output of the higher-order mode has been sketched. Using the coupling theory of the modes, the performances of the system have been discussed, and the analytical expression for the effective reflectivity of the system with the filter and the end face mirror has been derived. After the calculations and discussions, it is found that, for the fiber laser with a filter, the effective reflectivity of the higher-order modes is smaller than that of the lower-order modes. The result indicates that the lower-order modes are more likely to oscillate when the spatial filter is inserted in the multimode fiber laser system, which can improve the output beam quality, and may offer the theoretical basis for the experiment.

Key words: fiber filter; multimode fiber lasers; effective reflectivity; beam quality

(编辑 余毅)