

文章编号: 0258-7025(2009)03-0653-05

环形腔掺铒光纤激光器的理论研究

肖鸿飞¹ 任建华²

(¹ 沈阳大学物理系, 辽宁 沈阳 110044; ² 北京邮电大学安立光电检测研究中心, 北京 100876)

摘要 从基本激光理论出发,建立了掺铒光纤激光器的传播方程。掺铒光纤在 1550 nm 波长处具有很高的增益,正对应低损耗通信窗口,具有潜在的应用价值。抽运光模强度分布与纤芯铒离子分布的重叠积分因子是对激光器非常重要的参数,将对光纤的模式进行分析,根据各个模式的模场来判断该模式是否与纤芯铒离子分布有重叠,研究了与介质吸收截面有关的重叠积分的影响因素;对放大自发辐射(ASE)噪声特性进行理论分析,给出增益、阈值功率和斜率效率等的解析形式,建立输出特性计算模型。针对这种环形腔掺铒光纤激光器,编写专门的计算程序,在输出特性等方面进行理论计算仿真,对该结构布局所带来的影响进行详细分析讨论。

关键词 光纤激光器; 环形腔; 掺铒光纤; 阈值功率

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093603.0653

Theoretical Investigation of Erbium-Doped Optical Fiber Ring Laser

Xiao Hongfei¹ Ren Jianhua²

¹ Department of Physics, Shenyang University, Shenyang, Liaoning 110044, China

² LBUPT-Anritsu Research Center of Optic-Electronic Inspection, Beijing University of Post and Telecommunication, Beijing 100876, China

Abstract A spread equation of erbium-doped optical fiber laser was derived from the basal theory of laser. The experimental results showed that erbium-doped optical fiber exhibited gas gain when the wavelength was 1550 nm, corresponding to a low-loss communication window, possessed potential application value. It was very important parameter for the laser that influencing factor of overlap integral of the distribution of pumping fiber mode intensity and erbium doped fiber ions. Whether mode waist overlapped with the distribution of erbium-doped fiber ions was determined by various mode fields. This might contribute to an analyse of fiber mode. Influencing factors of overlap integral with medium absorption cross section were investigated. Theoretical analysis of the noise characteristics (ASE) was conducted. the analytical formula of gas gain, threshold power and slope efficiency was prescribed and a numerical model with output characteristic was developed. It were obtained by working out special computation procedure for this laser, performing theoretical arithmetic and emulation for output characteristic and discussing the effect of the configuration.

Key words optical-fiber laser; ring cavity; erbium-doped optical fiber; ; threshold power

1 引言

随着光通信网络及相关领域技术的飞速发展,光纤激光器技术正在不断向广度和深度方面推进。光纤材料特别是掺稀土元素光纤材料和新抽运技术的发展,促进了光纤激光器的发展。所掺稀土元素包括 15 种,目前比较成熟的在光纤中掺入的稀土离子为 Er, Nd, Pr, Tm 和 Yb。光纤激光器可以提供

许多输出波长^[1],就掺铒光纤激光器而言,其输出波长对于光通信具有非常重要的价值。输出光波长由掺杂到纤芯中的稀土元素离子所决定。在光谱段上 1.31 μm 波长的输出是最重要的,因为他们对应于光通信中的两个低损耗窗口。掺铒光纤在 1.55 μm 波长处具有很高的增益,正对应低损耗通信窗口,其潜在的应用价值使其发展十分迅速。1.55 μm 的输出

收稿日期: 2008-08-10; 收到修改稿日期: 2008-10-25

基金项目: 沈阳市科技攻关重点项目(040454)资助课题。

作者简介: 肖鸿飞(1961—),女,教授,主要从事激光物理与光电子等方面的研究。E-mail: xhfsydx@yahoo.com.cn

可以利用半导体器件作为抽运源,因此意味着用较低的成本即可实现有价值的激光输出。除了在通信和医学方面的应用之外,随着功率光纤激光器技术的进步,它在工业上的应用日益体现出优势,目前光纤激光器的开发研制正向多功能化、实用化方向发展^[2]。

2 铒离子能级结构和光谱特性

利用掺铒光纤介质的受激吸收过程,通过连续光抽运将铒离子从 $^4I_{15/2}$ 基态激励到 $^4I_{13/2}$ 能级(1480 nm 抽运)或者更高能级(980 nm 抽运、800 nm 抽运等),在1.5 μm 附近的受激辐射跃迁发生在 $^4I_{13/2}$ 能级和 $^4I_{15/2}$ 基态能级之间,这是对信号进行光放大的基础,但同时该二能级之间又产生自发辐射跃迁,自发辐射光也通过介质放大(ASE),成为光放大系统的主要噪声源^[3]。

光纤激光器最佳抽运源有两条选择标准:1) 抽运效率高;2) 激发态吸收(ESA)效应要小。

激发态吸收的最佳波长为532 nm,980 nm 和

1480 nm。虽然532 nm的抽运源可以选用YAG倍频固体激光器,但由于该激光器体积较大,稳定性也较差,只在早期科研实验中使用过。

因此980 nm是理想的抽运源。掺铒光纤吸收带和荧光带在1550 nm处重合表明这是一个典型的三能级结构。

3 掺铒光纤激光器速率方程

抽运波长为980 nm时, Er^{+3} 可以作为一个三能级系统来考虑^[4]。设总 Er^{+3} 的浓度为 ρ ,基态离子浓度为 N_1 ,亚稳态离子浓度为 N_2 ,激发态离子浓度为 N_3 ,由于从激发态到亚稳态的跃迁基本上都是非辐射跃迁,并且跃迁速率非常大,因此 $N_3 \approx 0$,则

$$N_1 + N_2 = \rho, \quad (1)$$

在稳态时有,三能级系统的离子数分布满足(2)式:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(W+R) & W+\gamma_{21} & R+\gamma_{31} \\ W & -(W+\gamma_{21}) & \gamma_{32} \\ R & 0 & -(R+\gamma_{31}+\gamma_{32}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

在通常情况下可以取近似, $W \ll \gamma_{32}, \gamma_{12} \ll \gamma_{32}, \gamma_{31} \ll \gamma_{32}$;或者 $\gamma_{32}/(\gamma_{31}+\gamma_{32}) \approx 1, N_3 = 0$ 。

定义

$$P_{\text{pm, sat}} = \left[\frac{h\nu_{\text{m}}}{\sigma_{\text{p}}(\lambda_{\text{m}})\tau} \right] \frac{A}{A_{\text{p}}}, \quad (3)$$

$$P_{\text{sk, sat}} = \left[\frac{h\nu_{\text{k}}}{\sigma_{\text{E}}(\lambda_{\text{k}})\tau} \right] \frac{A}{A_{\text{s}}}, \quad (4)$$

式中 A_{p} 和 A_{s} 分别表示抽运光和信号光模场与掺铒光纤截面的归一化积分。若取 z 表示光沿光纤的纵向坐标,“ \pm ”表示与 z 轴同向或反向; s 表示放大介质的横截面; P_{sk}^{\pm} 和 P_{pm}^{\pm} 分别表示在波长 λ_{k} 和 λ_{m}

处受激信号光与抽运光功率; $\sigma_{\text{A}}(\lambda_{\text{j}})$ 与 $\sigma_{\text{E}}(\lambda_{\text{j}})$ 分别表示在 λ_{j} 处铒离子的吸收截面和发射截面; ψ_{sk} 表示信号光和 ψ_{pm} 抽运光包络分布函数, $\bar{\psi}_{\text{sk}} = \psi_{\text{sk}}/(\pi\omega_{\text{sk}}^2)$ 和 $\bar{\psi}_{\text{pm}} = \psi_{\text{pm}}/(\pi\omega_{\text{pm}}^2)$ 表示归一化的信号光与抽运光的包络分布函数; τ_{sk} 和 τ_{pm} 表示信号光与抽运光功率的模场半径; P_{ASEK}^{\pm} 表示中心波长 λ_{k} 处带宽 $\delta\lambda$ 内的自发辐射功率。

由于激光器的增益介质长度较短,可忽略其损耗,则掺铒光纤激光器三能级速率方程为^[5]

$$\frac{dP_{\text{sk}}^{\pm}}{dz} = \pm P_{\text{sk}}^{\pm} \int_s [\sigma_{\text{E}}(\lambda_{\text{k}})N_2 - \sigma_{\text{A}}(\lambda_{\text{k}})N_1] \bar{\psi}_{\text{sk}} ds, \quad (5)$$

$$\frac{dP_{\text{pm}}^{\pm}}{dz} = \pm P_{\text{pm}}^{\pm} \int_s [\sigma_{\text{E}}(\lambda_{\text{k}})N_2 - \sigma_{\text{A}}(\lambda_{\text{m}})N_1] \bar{\psi}_{\text{pm}} ds, \quad (6)$$

$$\frac{dP_{\text{ASEK}}^{\pm}}{dz} = \pm P_{\text{ASEK}}^{\pm} \int_s [\sigma_{\text{E}}(\lambda_{\text{k}})N_2 - \sigma_{\text{A}}(\lambda_{\text{k}})N_1] \bar{\psi}_{\text{sk}} ds \pm 2P_{\text{ok}\sigma_{\text{E}}(\lambda_{\text{k}})} \int_s N_2 \bar{\psi}_{\text{sk}} ds, \quad (7)$$

假定均匀掺杂,则上述各式可简化为

$$\frac{dp_{sk}^{\pm}}{dz} = \pm p_{sk}^{\pm} [\sigma_E(\lambda_k) N_2 - \sigma_A(\lambda_k) N_1] A_s, \quad (8)$$

$$\frac{dp_{pm}^{\pm}}{dz} = \pm p_{pm}^{\pm} [\sigma_E(\lambda_k) N_2 - \sigma_A(\lambda_m) N_1] A_p, \quad (9)$$

$$\frac{dP_{ASEK}^{\pm}}{dz} = \pm P_{ASEK}^{\pm} [\sigma_E(\lambda_k) N_2 - \sigma_A(\lambda_k) N_1] A_s \pm 2P_{ok} \sigma_E(\lambda_k) N_2 A_s. \quad (10)$$

4 掺铒光纤激光器放大自发辐射噪声分析

在激光器中,不可避免的存在着放大自发辐射,放大自发辐射的存在增加了激光器的噪声^[6]。同时,自发辐射引起的受激辐射将使上能级寿命减少。当放大自发辐射引起的上能级离子衰减率与其驰豫过程造成的衰减率可以比拟时反转粒子数将显著下降,因而增益系数也随之下降,这就是放大自发辐射造成的增益饱和效应。工作物质长度越长,激光器的自发辐射就越严重。

若定义

$$\Gamma_{sk} = \frac{1}{\rho_0} \int \rho \bar{\psi}_{sk} ds, \quad (11)$$

式中 Γ_{sk} 为信号光与铒离子的重叠积分因子; ρ_0 为掺铒光纤中心处的铒离子浓度,则

$$\frac{dP_{ASEK}^{\pm}}{dz} = \pm P_{ASEK}^{\pm} \frac{d \ln(P_{sk}^{\pm})}{dz} \pm A \pm B \frac{d \ln(P_{sk}^{\pm})}{dz}, \quad (12)$$

由常数变易法,最后可得掺铒光纤激光器输出端的 ASE 功率为

$$P_{ASEK}^{\pm}(l) = \frac{B}{P_{sk}^{\pm}(0)} [P_{sk}^{\pm}(l) - P_{sk}^{\pm}(0)] + AP_{sk}^{\pm}(l) \int_0^l \frac{dz}{P_{sk}^{\pm}(z)}. \quad (13)$$

5 重叠积分因子的分析

抽运光模强度分布与纤芯铒离子分布的重叠积分因子是对激光器非常重要的参数。将对光纤的模式进行分析,根据各个模式的模场来判断该模式是否与纤芯铒离子分布有重叠,也就是各模式能否被吸收。对于 LP_{mm} 模,其横向场的径向分量 $R(r)$ 满足方程

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{dR}{r dr} + k_r^2 R = 0. \quad (14)$$

如果是传输的模式,在纤芯内必须是驻波, k_r 为实数,即 $k_r^2 > 0$, 否则它是迅衰波,以 $k_r^2 = 0$ 为分

界,分界条件 $r = r_c = (ma/u)$ 称之为焦散半径,它表示在 $r_c \leq r \leq a$ 范围内,光波为驻波,在 $r \leq r_c$ 以及 $r \geq a$ 范围,光波为迅衰波。当 $m=0$,模场分布具有轴对称特性,此时 $r_c = 0$,模场分布于整个纤芯横截面。随着 m 的增加,焦散半径越来越大,当达到其最大值时,波便截止。

每个 LP_{mm} 模的 u 值可以由本征值方程

$$u \frac{J_{m+1}(u)}{J_m(u)} = \sqrt{V^2 - U^2} \frac{K_{m+1}(\sqrt{V^2 - u^2})}{K_m(\sqrt{V^2 - u^2})} \quad (15)$$

得到,这样所有模式的焦散半径都可以求出。对于多模光纤,抽运光分别由多个 LP_{mm} 模式传输,每个模式被限制在一个环形的区域里 $r_c \leq r \leq a$, r_c 越大(模指数越高),该模式的功率分布越远离光纤中心,如果掺稀土纤芯与这一环形区域交叠,则该模式可能被稀土离子吸收,而且交叠的面积大小决定抽运光被吸收的快慢,如果掺稀土光纤足够长,该模式可以被认为全部吸收。如果掺稀土纤芯与这一环形区域不相交,则该模式就一点也不能被吸收。

对于单模光纤,抽运光由 LP_{01} 模式传输,模场分布具有轴对称特性,此时模场分布于整个纤芯横截面。 LP_{01} 模肯定被稀土离子吸收,重叠积分因子大小决定着抽运光被吸收的快慢。

增加掺稀土元素半径可以增加吸收率,因为纤芯与抽运光的交叠面积增加,但是如果增大过多,则会带来其它问题。

6 环形腔光纤激光器输出特性分析

环形腔与线形腔不同,抽运光和受激发射产生的激光在环形腔内沿光纤方向是行波,激光和抽运光在掺铒光纤内的传播方程可以写为^[7]

$$\frac{dP_{sk}}{dz} = P_{sk} [\sigma_E(\lambda_k) N_2 - \sigma_A(\lambda_k) N_1] A_s - \alpha_s P_{sk}, \quad (16)$$

$$\frac{dP_{pm}}{dz} = -P_{pm} \sigma_A(\lambda_m) N_1 A_p - \alpha_p P_{pm}, \quad (17)$$

根据(1)式,(5)式,(8)式,(9)式,(16)式和(17)式,可联立求解出 $P_{sk}(L)$ ^[8]。

多元微分方程组的直接求解比较困难,一般采用数值方法求解。仅对损耗和增益相平衡情况求其解析解^[9]。

环形腔激光器中的损耗主要分为两部分,一部分是耦合器的分光损耗 γ 。假设光纤耦合器的耦合输出比为 T ,则

$$\gamma = \frac{P_{sk}(L)}{P_s} = \frac{1}{1-T}, \quad \gamma > 1 \quad (18)$$

另一部分是来自腔的内部损耗

$$\Gamma = \frac{P_s}{P_{sk}(0)}, \quad \Gamma < 1, \quad (19)$$

所以激光器的总损耗为

$$\Gamma_{tot} = \gamma\Gamma, \quad \delta = -\ln \Gamma_{tot}, \quad (20)$$

若忽略抽运光的受激辐射,则对掺铒光纤的增益积分可得到

$$G(\lambda) = g(\lambda)l + \frac{g(\lambda) + \alpha(\lambda)}{\alpha_p} \ln \left[\frac{P_p(l)}{P_p(0)} \right], \quad (21)$$

当激光器实现稳态工作时,激光器的增益与谐振腔的损耗相平衡,即有

$$G(\lambda) = \delta(\lambda), \quad (22)$$

结合(5)式,积分后化简得

$$P_{sk}^+(l) = \frac{\lambda_p P_{P,sat}}{\lambda_s T} \left\{ \frac{P_p^{\text{in}}}{P_{P,sat}} \left[1 + \frac{1-T}{\exp(\psi) - T + 1} \right] \left[\frac{P_p^+(l)}{P_p^+(0)} - 1 \right] - \alpha_p l + \psi(\lambda) \right\}, \quad (23)$$

输出光功率为

$$P_{laser} = TP_{sk}^+(l), \quad (24)$$

取 $P_{laser} = 0$, 可得阈值抽运功率

$$P_p^{\text{th}} = \frac{\alpha_p l - \psi(\lambda)}{\{1 + (1-T)/[\exp(\psi) - T + 1]\} \{1 - \exp[-\psi(\lambda)]\}} P_{P,sat}, \quad (25)$$

斜率效率为^[10]

$$\eta = \frac{dP_{laser}}{dP_p^{\text{in}}} = \frac{\lambda_p}{\lambda_s} \left[1 + \frac{1-T}{\exp(\psi) - T + 1} \right] \{1 - \exp[-\psi(\lambda)]\}. \quad (26)$$

根据(2)式还可推出阈值抽运功率的简单表达式^[11]。

当抽运光增大到一定程度,以致使能级 E_2 上的粒子数 N_2 大量积累,满足粒子数反转条件时,则

$$I_p > \frac{h\nu_p}{\sigma_A(\lambda_m)\tau_{21}}, \quad (27)$$

式中 I_p 为本地抽运光强, $\sigma_A(\lambda_m)$ 为抽运吸收截面。 $\tau_{21} = 1/\gamma_{21}$ 表示从能级 E_2 跃迁到能级 E_1 的自发辐射寿命,于是阈值抽运功率为^[12]

$$P_p^{\text{th}} \approx \frac{h\nu_p}{\sigma_A(\lambda_m)\tau_{21}}. \quad (28)$$

7 结 论

随着光通信技术的发展,对光通信系统的光源要求越来越高,光纤激光器以其显著的优势受到广泛的关注。从铒离子能级结构和光谱特性出发,对环形腔掺铒光纤激光器进行理论研究。该研究取得理论和技術上的突破,由于采用了全光纤化结构,大大降低了激光器的内部损耗和激光阈值,所以,斜率效率可达 30%,输出功率达到光放大器输出端量级;由于采用了窄带光纤光栅滤波器和环形器,所以既保证了激光的单模特性和输出功率的稳定性,又解决了功率与模式的矛盾,在窄线宽下实现了宽带调谐和高稳定度的高功率输出,其优良的工作特性将为光通信领域和科研单位提供理想的网络监控所必备的检测光源,它必将成为下一代高速大容量光通信系统中理想的激

光光源,并且在大幅提高性能指标的同时,成倍地降低同类型光源的费用。

参 考 文 献

- 1 Yu Li, Song Yuejiang, Zhang Xuping. Single-longitudinal-mode and wavelength-switchable fiber laser with linear cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1455~1458
俞力,宋跃江,张旭苹. 单纵模、波长可开关的线性腔光纤激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1455~1458
- 2 Guo Peiji, Yu Jingchi, Fan Zhongwei. Design of pick-up objective lens for DVD[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(1): 426
郭培基,余景池,樊仲维. DVD 光学头读出物镜设计[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(1): 426
- 3 Kang Pingsheng, Liu Xiaoming, Liu Dan *et al.*. Experimental study of two stage erbium doped fiber amplifiers pumped by 980 nm and 1480 nm LD[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **24**(9): 797~801
唐平生,刘小明,刘丹等. 980 nm 和 1480 nm LD 混合泵浦两段级联掺铒光纤放大器实验研究[J]. *中国激光*, 1997, **24**(9): 797~801
- 4 Peng Jiande, Yu Chaoyu, Huang Yidong *et al.*. Tunable Er³⁺/Yb³⁺-doped all-fiber ring laser with wavelength tuning range of >70 nm[J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(10): 922~926
彭江得,岳超瑜,黄翊东等. Er³⁺/Yb³⁺ 掺杂全光纤环形激光器[J]. *光学学报*, 1990, **10**(10): 922~926
- 5 Zhao Tonggang, Ren Jianhua, Zhao Ronghua *et al.*. Theory and experiment analysis of fiber grating external cavity semiconductor lasers[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2004, **12**(10): 1186~1189
赵同刚,任建华,赵荣华等. 光纤光栅外腔半导体激光器的理论和实验分析[J]. *光电子激光*, 2004, **12**(10): 1186~1189
- 6 Yu Benli, Zhen Shenglai, Zhu Jun *et al.*. Experimental study on low-noise fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 217~220
俞本立,甄胜来,朱军等. 低噪声光纤激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 217~220
- 7 Liu Lihua, Ren Jianhua, Pei Wenzhe *et al.*. Research on output characteristic of a new of ring and tunable doped-Er fiber laser[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(5): 731~733

- 刘丽华,任建华,裴文哲等. 一种新型可调谐环型腔掺铒光纤激光器输出特性的研究[J]. 光学技术, 2007, **33**(5): 731~733
- 8 Zhao Tonggang, Ren Jianhua, Wang Lili *et al.*. Study of the characteristics fiber grating external cavity semiconductor lasers[J]. *Chinese J. Electron Devices*, 2004, **27**(9): 502~504
- 赵同刚,任建华,王丽丽等. 光纤光栅外腔半导体激光器特性的分析[J]. 电子器件, 2004, **27**(9): 502~504
- 9 Wang Zihua, Zhang Hui, Xu Cheng. Calculation of the absorption efficiency for double-clad fiber by using modal analysis method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1321~1323
- 王子华,张辉,徐晟等. 双包层光纤激光器泵浦吸收效率的模场计算方法[J]. 光子学报, 2004, **33**(11): 1321~1323
- 10 Kagi N. Gain characteristics of ErP 3+P-doped fiber with a quasi-confined structure[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(9): 1235
- 11 Chen Wei, Zhang Yan, Ren Min *et al.*. Experimental study of single-longitudinal-mode Brillouin erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1740~1744
- 陈伟,张艳,任民等. 单纵模布里渊掺铒光纤激光器的实验研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1740~1744
- 12 Zhang Xin, Chen Wei, Liu Yu *et al.*. Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 50~54
- 张欣,陈伟,刘宇等. 单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及其稳定性[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 50~54