

文章编号: 1001-3806(2009)04-0381-03

掺铒光纤环形激光器输出波长的研究

王练¹, 雷芳²

(1. 重庆邮电大学 计算机科学与技术学院, 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 为了得到掺铒光纤环形激光器的激光运行波长与掺铒光纤长度和耦合比之间对应关系, 基于3能级的速率方程采用解析方法进行了理论分析, 并通过实验给予验证, 分别取得了激光运行波长随掺铒光纤长度和耦合器耦合比变化的数据。结果表明, 随着光纤长度的增加, 激光的输出波长往长波方向移动, 输出波长为1563nm时输出功率最大, 掺铒光纤最佳长度大约为11.5m, 耦合比越大, 激光的输出波长越短。这一结果对改变耦合比进行光纤激光器激光波长调谐的设计有很大帮助。

关键词: 光纤光学; 掺铒光纤环形激光器; 掺铒光纤长度; 耦合比

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.013

Analysis of lasing wavelengths for erbium-doped fiber ring lasers

WANG Lian¹, LEI Fang²

(1. School of Computer and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to analyze the relationship among the lasing wavelength, length and coupler ratio of erbium-doped fibers, the rate equation based on 3rd energy state was solved and confirmed in experiments. The lasing wavelengths changing with the length and coupler ratio of erbium-doped fibers were obtained. The result shows that the lasing wavelength is shifted to longer wavelength with the decrease of the length of the erbium-doped fiber. The maximum output power occurs at 1563nm when the optimum length of the erbium-doped fiber is 11.5m. In addition, the lasing wavelength becomes shorter wavelength with the decrease of the coupler ratio. These are good for the optimized design of a tunable erbium-doped fiber laser by varying coupler ratio.

Key words: fiber optics; erbium-doped fiber ring laser; length of erbium-doped fiber; coupler ratio

引言

掺铒光纤激光器由于能激射波长为1.55μm左右的光成为光纤通信系统的光源而得到广泛的应用^[1-5]。由于铒离子亚稳态寿命长达10ms, 所以, 掺铒光纤激光器常作为单纵模激光^[6]或皮秒、飞秒量级的脉冲光^[7], 要使掺铒光纤激光器处在最佳的工作状态, 必须对激光器的主要参量和谐振腔进行优化设计。MIGNON, CHEN等人^[8-9]在不考虑腔内损耗的情况下, 讨论了2能级和3能级光纤激光器的阈值特性和斜率效率。对于掺铒光纤激光器的激光运行波长与光纤长度及腔内损耗有关已得到实验验证。作者根据3能级的速率方程, 利用解析方法研究并推得了激光运行波长与掺铒光

纤(erbium-doped fiber, EDF)长度和耦合比的对应关系, 并通过实验给予了论证, 这对利用改变耦合比进行激光波长调谐的光纤激光器的设计具有实际的指导意义。

1 理论分析

对于掺铒光纤激光器, 由于980nm的抽运系统的抽运效率和增益系数高而常被采用, 它的工作原理可看作3能级系统, 激光下能级为⁴I_{15/2}, 设其粒子数密度为N₁, 上能级为⁴I_{13/2}, 其粒子数密度为N₂, 掺杂浓度为N, 则有:

$$N = N_1 + N_2 \quad (1)$$

信号在光纤中运行长度为l时获得总增益表示为:

$$G(\lambda, l) = \int_0^l g(z, \lambda) dz = \int_0^l [N_2(z)\sigma_e(\lambda) - N_1(z)\sigma_a(\lambda)] dz \quad (2)$$

式中, g(z, λ)为小信号增益系数, σ_e(λ), σ_a(λ)分别为发射和吸收截面积, z为位置, λ为波长。

粒子数速率方程为:

$$\frac{dN_2(z)}{dt} = R(z) - \frac{P_s(z)g(z, \lambda)}{hc\lambda^{-1}} - \frac{N_2(z)}{\tau} \quad (3)$$

基金项目: 重庆邮电大学自然科学基金资助项目(A2008-48)

作者简介: 王练(1976-), 女, 硕士, 主要研究领域为光通信和无线网络。

E-mail: wanglian88@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-07-21; 收到修改稿日期: 2008-11-10

式中, R 为抽运速率, τ 为受激粒子在上能级的寿命, h 为普朗克常量, c 为光速, $P_s(z)$ 为信号光功率, t 为时间。下面设光纤中 z 处单位体积内抽运光子数为 $\phi(z)$, 抽运功率为 $P_p(z)$, 则有:

$$R(z) = -\frac{d\phi(z)}{dt} = -\frac{dP_p(z)}{dt} \cdot \frac{1}{hc\nu_p} = -\frac{dP_p(z)}{dz} \cdot \frac{1}{h\nu_p} \quad (4)$$

式中, ν_p 为抽运光频率, 考虑到一般情形:

$$dP_p(z) = -P_p(z)\sigma_a(z)N_1(z)dz - P_p(z)N_2(z)\sigma_e(z)dz \quad (5)$$

对于小信号, 粒子数速率方程简化为:

$$\frac{dN_2(\tau)}{dt} = R(z) - \frac{N_2(z)}{\tau} \quad (6)$$

在稳态条件下, 上式左边为 0, 则得:

$$R(z) = N_2(z)/\tau \quad (7)$$

在 $P_p(0) \gg P_p(L)$ 近似条件下, 由(4)式、(5)式、(7)式可得:

$$P_p(L) = P_p(0) \exp\left[\frac{P_p(0)}{P_e} - N\sigma_{a,p}L\right] \quad (8)$$

式中, L 为光纤长度。发射功率 P_e 为:

$$P_e = \frac{h\nu_p}{(\sigma_{a,p} + \sigma_{e,p})\tau} \quad (9)$$

式中, $\sigma_{a,p}$ 和 $\sigma_{e,p}$ 分别表示抽运光的吸收截面和发射截面。在掺铒光纤激光器中, 与荧光发射和吸收有关的能级为 $^4I_{15/2}$ 和 $^4I_{13/2}$ 两能级, 其中前者为基态能级, 此 2 能级在基质势场作用下分裂而成两组能级, 由此而产生的荧光发射和吸收谱为二宽带谱。对于宽带发射和吸收, 其微分截面间有如下关系^[10]:

$$\sigma_e(\lambda) = \sigma_a(\lambda) \frac{Z_1}{Z_u} \exp\left(\frac{E - hc\lambda^{-1}}{kT}\right) \quad (10)$$

式中, Z_1 和 Z_u 为多重态中较低能级和较高能级的分配函数, E 为激光上下能级因斯塔克分裂而成的两组能级中最低的能级差, k 为玻耳兹曼常数, T 为温度。

于是可求得信号光通过长度为 L 光纤的总增益为:

$$G(\lambda, L) = \frac{\tau\sigma_a P_p(0)}{h\nu_p} \left[1 + \frac{Z_1}{Z_u} \exp\left(\frac{E - hc\lambda^{-1}}{kT}\right)\right] \times \left[1 - \exp\left(\frac{P_p(0)}{P_e} - N\sigma_a L\right)\right] - N\sigma_a L \quad (11)$$

由(11)式可获得最大增益的荧光波长满足如下方程:

$$1 + \frac{Z_1}{Z_u} \cdot \exp\left(\frac{E - hc\lambda^{-1}}{kT}\right) = \exp\left\{LN\sigma_{a,p} - \ln\left[\beta_{\min} \cdot \frac{P_p(0)}{P_e}\right] - \frac{P_p(0)}{P_e}\right\} \quad (12)$$

$$P_p(0) = \frac{\lambda_s}{\lambda_p} \cdot \frac{\alpha_s L - \ln(V \cdot R)}{1 - (V \cdot R \cdot G_{\max})^{-\delta}} \cdot P_{s,\text{sat}} \quad (13)$$

其中,

$$\delta = \frac{P_{s,\text{sat}}/h\nu_s}{P_{p,\text{sat}}/h\nu_p} \quad (14)$$

$$G_{\max} = \exp\left[\left(\frac{\alpha_p}{\delta} - \alpha_s\right)L\right] \quad (15)$$

$$\beta_{\min} = \frac{\sigma_{a,p}}{\sigma_{a,p} + \sigma_{e,p}} \quad (16)$$

式中, β_{\min} 表示若要使抽运光透明所需的上能级粒子数与总粒子数的最小百分比^[11], $P_p(0)$ 为抽运光透明时的抽运功率, λ_s 和 λ_p 分别表示为信号光与抽运光波长, α_s 和 α_p 为信号光和抽运光的衰减系数, δ 为饱和功率比率, G_{\max} 为最大增益, $P_{s,\text{sat}}$ 和 $P_{p,\text{sat}}$ 为信号光和抽运光的饱和功率, V 为体积。(12)式是在小信号条件下得出的表达式, 可由此得出阈值以上激励波长与输出耦合、光纤长度及损耗的变化关系。

2 实验结果与讨论

根据游标效应, 利用主腔和子腔的长度差很多的方法来实现单模输出, 由于子腔的长度很短, 主要起选模作用, 通过耦合器 C_2 与主腔构成了复合腔, 这种结构简单易行。实验装置如图 1 所示。其中主腔是由

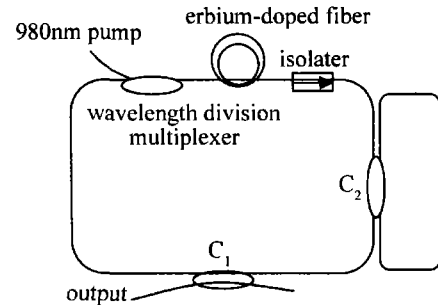


Fig. 1 Schematic diagram of composite cavity ring laser

980nm/1550nm 波分复用器、掺铒光纤、隔离器及输出耦合器 C_1 等组成的, 其中 EDF 的掺杂浓度以吸收系数反映, 对 979nm 抽运光和 1531nm 信号光的吸收系数分别为 4.7dB/m 和 5.7dB/m, 数值孔径为 0.23, 截止波长为 905nm, 抽运源为单模半导体激光器, 其中心波长为 974.5nm, 最大输出功率为 100mW。为了使腔内激光单向运行, 避免驻波引起的空间烧孔形成的多模振荡, 在腔内插入了隔离器, 子腔的长度约为 13cm。实验中所用耦合比为 20:80, 30:70, 40:60, 50:50 4 种耦合器, 其中把输出端对调就可以得到 7 种输出比。

2.1 激光的输出波长与 EDF 长度之间的关系

激光的输出波长随 EDF 长度的变化如图 2 所示。对于给定的抽运波长, 随着光纤长度的增加, 激光的输出波长往长波方向移动。从图中可以看出, 当光纤的长度小于最佳长度时, 实验结果和(12)式的理论值相吻合, 当光纤的长度大于最佳长度时, 实验值比理论值小, 这是因为光纤对腔内激光信号的再吸收, 使得腔内

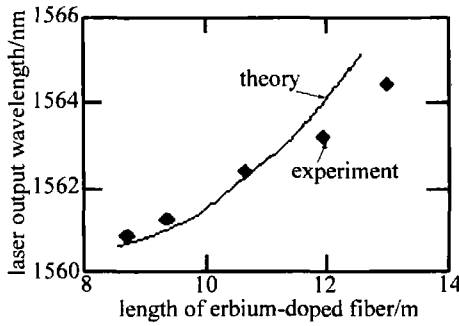


Fig. 2 The laser output wavelength versus the length of erbium-doped fiber
损耗增大引起的。由图 3 可知,输出波长为 1563nm 时,输出功率最大,为 28.2mW。比较图 2 与图 3 可知,最佳长度大约为 11.5m。

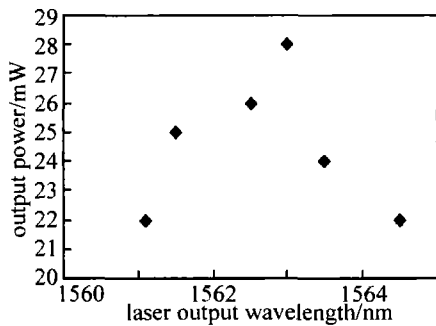


Fig. 3 Ring laser output power versus the laser output wavelength

2.2 激光波长与耦合器 C_1, C_2 耦合比之间的关系

激光波长随 C_1, C_2 的耦合比的变化如图 4 和图 5 所示,在测量时 C_2 和 C_1 耦合比分别都为 0.4。从图

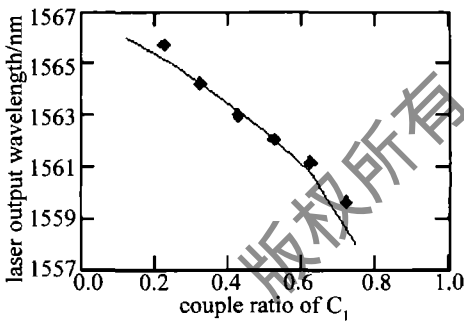


Fig. 4 The laser output wavelength versus coupler ratio of C_1

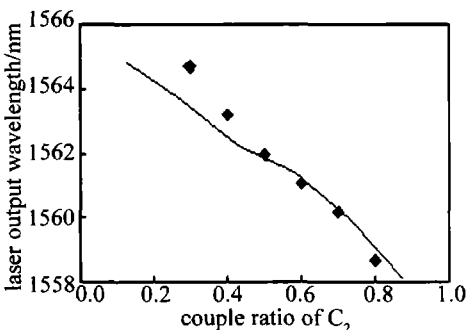


Fig. 5 The laser output wavelength versus coupler ratio of C_2

中可以看出,实验值和理论值基本符合,耦合比越大,激光的输出波长越短,反之亦然,这是因为耦合比越大,腔内的损耗越大,即腔内的激射功率就越小,此时需要更大的抽运功率才能有信号光满足阈值条件,但是抽运功率的增加将使更短波长的信号光获得更大增益而先满足阈值条件而起振。所以,如果采用耦合比可调的磨抛型光纤耦合器就可获得激光波长可调的掺铒光纤激光器。

3 结 论

从 3 能级速率方程出发,利用解析的方法推导出光纤激光器主要参量之间的关系式,并从实验上给予验证,所得的数值与理论值一致,这对激光器参量选择及其结构的设计具有重要的指导意义,并且可以利用改变耦合比来实现波长可调谐的复合腔光纤激光器。

参 考 文 献

- [1] YONG W L, BYOUNDAHO L. Wavelength-switchable erbium-doped fiber ring laser using spectral polarization-dependent loss element [J]. IEEE Photonics Technology Letter, 2003, 15(6): 795-797.
- [2] CAO L, YANG L Z, GUO X Y, et al. Experimental study Er³⁺-doped fiber laser based on the nonlinear optical loop mirror [J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 613-615 (in Chinese).
- [3] DONG J L, SUN J Q. Multiwavelength erbium-doped fiber laser based on frequency shift and polarization hole burning [J]. Laser Technology, 2008, 32(2): 210-212 (in Chinese).
- [4] SHEN H, DING G L, WANG Y S, et al. Simulation and experimental study of double-cladding Er-doped fiber lasers [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 70-72 (in Chinese).
- [5] DONG S F, CHEN G F, ZHAO S H, et al. Research of high-power multi-mode Er³⁺/Yb³⁺ co-doped double-cladding optical fiber lasers [J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 366-369 (in Chinese).
- [6] SCHMUCK H, PFEIFFER T, VEITH G. Widely tunable narrow linewidth erbium doped fiber ring laser [J]. Electron Lett, 1991, 27(23): 2117-2119.
- [7] ZIRNGBIL M, STULZ L W, HUGI J, et al. 1.2ps pulses from passively mode-locked laser diode pumped Er-doped fiber ring laser [J]. Electron Lett, 1991, 27(19): 1734-1735.
- [8] MIGNON M, DESURVIRE E. An analytical model for the determination of optimal output reflectivity and fiber length in erbium-doped fiber lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letter, 1992, 4(2): 850-852.
- [9] CHEN J, ZHU X, SIBBET W. Derivation of the threshold pump power of erbium-doped fiber lasers [J]. Opt Lett, 1992, 17(7): 926-928.
- [10] PAYNE S A, CHASE L L, SMITH L K, et al. Infrared cross-section measurements for crystals doped with Er³⁺, Tm³⁺ and Ho³⁺ [J]. IEEE J Q E, 1992, 28(17): 2619-2630.
- [11] ZOU X L, TORATANI H. Evaluation of spectroscopic properties of Yb³⁺-doped glasses [J]. Phys Rev, 1995, B52(22): 889-896.