

波长可调谐环形腔钇镱共掺光纤激光器数值研究

赵 铭, 郭玉彬, 王天枢, 申铨国
(吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要:设计了一种新型的可调谐钇镱共掺光纤激光器,通过钇镱能级系统的速率方程,分析了环形腔内激光产生的原理。并在此基础上进行了仿真实验,得到了激光输出功率与掺杂光纤长度的关系,并对输出耦合器分光比进行了优化。

关键词:光纤激光器;钇镱共掺光纤;波长可调谐

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2006)02-0070-03

掺钇光纤激光器具有很宽的波长调谐范围和窄线宽输出,在光纤通信、光传感及光谱分析领域都具有广泛的应用。但是,在单掺钇光纤中,钇离子容易聚集,这样不仅导致激光器效率的降低,而且会产生脉冲展宽引起噪声的增加。为了保证激光器的工作稳定性,常采用降低钇离子掺杂度的方法,但会降低掺钇光纤的增益系数。一种简单而且有效的方法是采用钇/镱共掺光纤作增益介质,即在掺钇光纤的纤芯中同时掺入一些 Yb^{3+} 离子作为敏化剂,以达到抑制自发辐射的目的。由于 Yb^{3+} 离子的吸收截面很大,处于基态的 Yb^{3+} 离子被激发到高能级的效率很高。通过交叉弛豫,高能级上的 Yb^{3+} 离子将能量转移到 Er^{3+} 能量相近的能级上去,使 Er^{3+} 相关能级上的粒子数急剧增加。 Yb^{3+} 离子本身具有很高的峰值吸收效率,而且能为钇离子提供高效的泵浦源,因此,减少了抑制作用在钇光纤的消极作用,同时也达到了较高的泵浦吸收效率^[1-2]。

$\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤是光纤激光器的理想增益介质,具有很宽的吸收波长范围(800~1100 nm)和更高的泵浦吸收效率,而且能为光纤激光器提供单一频率的高效工作环境。在高功率抽运下,使用 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤可以获得高功率的输出^[3-4]。

1 工作原理及速率方程

图1为钇/镱共掺系统的能级图及相应的能量转移过程。在高钇/钇掺杂浓度比下,绝大部分抽运光并不直接激发 Er^{3+} 到其上能级($^4\text{I}_{11/2}$ 能级),而是由于掺入的 Yb^{3+} 与 Er^{3+} 形成 $\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ 离子对,主要是 Yb^{3+} 离子起着吸收800~1100 nm附近的抽运光作用。当抽运光射入时,基态 Yb^{3+} 吸收大部分抽运光后激发到上能级 $^2\text{F}_{5/2}$ 。相邻的 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 之间的交叉弛豫使能量通过 $\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ 离子对迅速转移给 Er^{3+} 离子,使 Er^{3+} 从基态 $^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁到激发态 $^4\text{I}_{11/2}$,以实现1550 nm

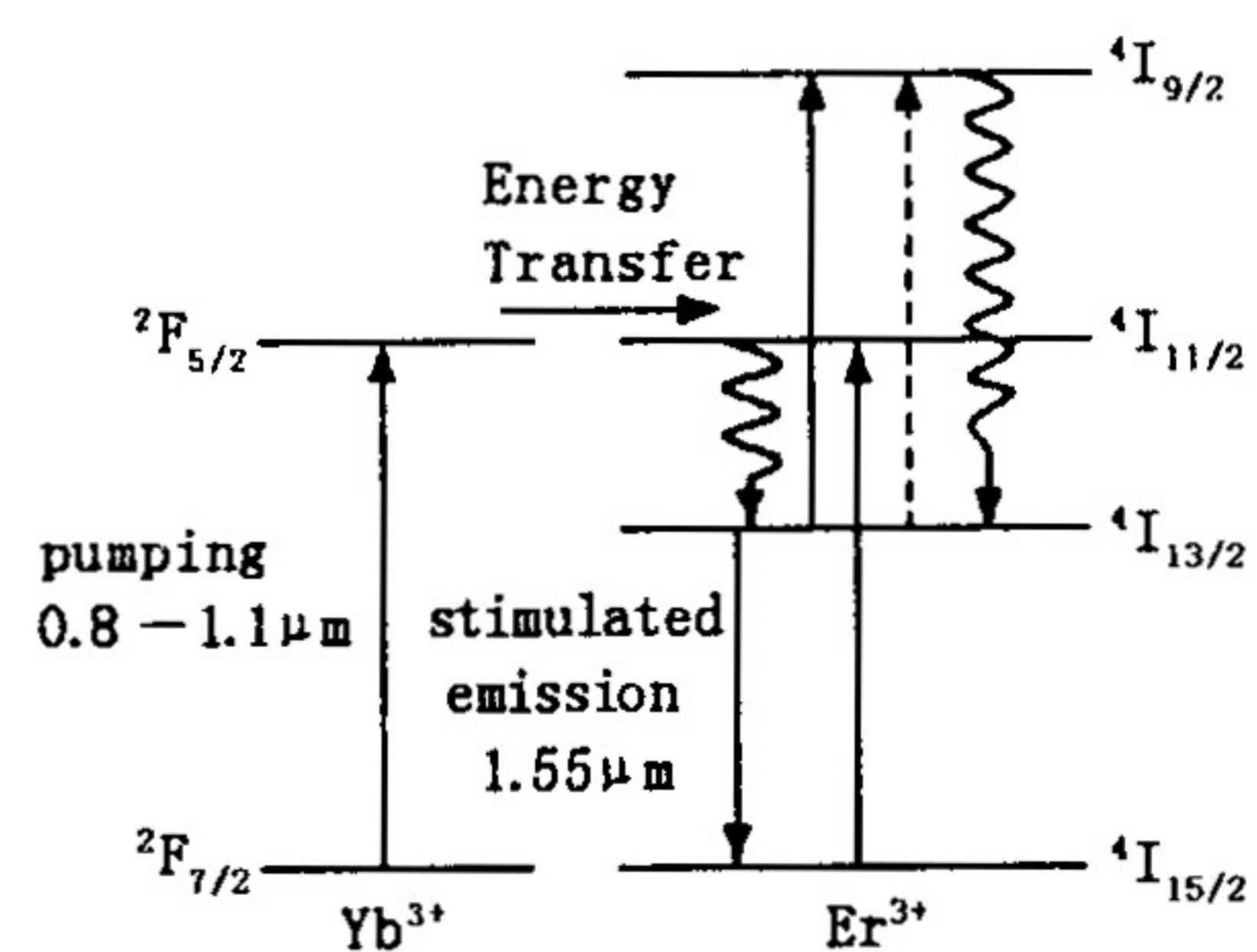


图1 Er/Yb系统能级图

区域光放大的作用。 Yb^{3+} 离子在1000 nm附近具有较大的峰值吸收截面^[5],可以吸收970~1100 nm抽运光,因而光纤对抽运光的吸收能力较单掺 Er^{3+} 的光纤提高了2个数量级。又因为 Yb^{3+} 为二能级系统,保证 Yb^{3+} 之间不会发生能量上转换。 Yb^{3+} 和 Er^{3+} 能级系统之间的相对失配量不会超过0.5%,所以 Yb^{3+} 到 Er^{3+} 的能量转移效率很高。

收稿日期:2005-10-11

基金项目:信息产业部信息产业科研计划资助项目

作者简介:赵 铭(1963-),男,长春市人,副教授,博士生,主要从事全光通信器件研究。

设单个 Er^{3+} 离子基态 $^4I_{15/2}$ 和激发态 $^4I_{13/2}$ 粒子数密度分别为 N_1 、 N_2 ,形成 Er^{3+} 离子对的3个态上的粒子数密度分别为 N_{11} 、 N_{12} 和 N_{22} ,总密度 N_0 中离子对部分的比例为 x ,则有 $N_1 + N_2 = (1 - 2x)N_0$, $N_{11} + N_{12} + N_{22} = xN_0$ 。 Yb^{3+} 的基态和受激发后上能级的粒子数密度分别为 M_1 和 M_2 ,则有 $M_1 + M_2 = M_0$, M_0 为总密度。 Er/Yb 光纤能量转移和激光动态行为的速率方程为^[6]:

$$dM_2/dt = \Lambda_p^{\text{Yb}}(M_0 - 2M_2) - \rho M_2 N_2 [(1 - 2x)(1 - n_2) + x(1 - n_{22})] - M_2/\tau_{\text{Yb}} \quad (1)$$

$$dn_2/dt = (\Lambda_p^{\text{Er}} + \rho M_2)(1 - n_2) - q r_q [(\chi + 1)n_2 - 1] - n_2/\tau_2 \quad (2)$$

$$dn_{11}/dt = (\Lambda_p^{\text{Er}} + \rho M_2)n_{11} + q \alpha r_q [\chi - (\chi + 1)n_{11} - \chi n_{22}] + (1 - n_{11} - n_{22})/\tau_2 \quad (3)$$

$$dn_{22}/dt = (\Lambda_p^{\text{Er}} + \rho M_2)(1 - n_{11} - n_{22}) - q \alpha r_q [n_{11} + (\chi + 1)n_{22} - 1] - n_{22}/\tau_{22} \quad (4)$$

$$dq/dt = q r_q N_0 \{ (1 - 2x)[(\chi + 1)n_2 - 1] + \alpha x(\chi - 1 - \chi n_{11} + n_{22}) \} - q/\tau_c \quad (5)$$

式中: $q(t)$ 为激光腔内光子密度; $\Lambda_p^{\text{Yb}} = P_p \sigma^{\text{Yb}}/h\nu_p A_{\text{eff}}$ 和 $\Lambda_p^{\text{Er}} = P_p \sigma_p/h\nu_p A_{\text{eff}}$ 为 Yb^{3+} 、 Er^{3+} 抽运效率; $r_q = c\sigma_a/n_{\text{ref}}$; $n_i = N_i/(1 - 2x)N_0$ ($i = 1, 2$)和 $n_{ij} = N_{ij}/xN_0$ ($ij = 11, 12, 22$)为归一化 Er^{3+} 密度; P_p 为抽运光功率, A_{eff} 为有效模场面积, $h\nu_p$ 为抽运光子能量; c 为光速; n_{ref} 为光纤折射率; σ^{Yb} 为 Yb^{3+} 的吸收截面; σ_p 、 σ_a 分别为 Er^{3+} 在抽运和激光波长处的吸收截面; $\chi = \sigma_e/\sigma_a$ 为 Er^{3+} 在发射波长处的发射和吸收截面之比; τ_{Yb} 为 Yb^{3+} 激发态寿命; τ_2 为孤立 Er^{3+} 激发态寿命; τ_{22} 为 Er^{3+} 离子对激发态寿命; τ_c 为腔内光子寿命; ρ 为从 Yb 到 Er 的能量转移概率系数。

2 激光器结构

可调谐环形腔铒镱共掺光纤激光器结构见图2。波长为1 064 nm的Nd:YAG泵浦激光经1 060/1 550 nm WDM耦合进一段铒镱共掺光纤中,在光纤中形成粒子数反转产生受激发射光。经过1×2光纤耦合器,一端提供激光输出,另一端经过窄带可调谐滤波器滤出所需要波长的光并提供反馈,经WDM耦合进铒镱共掺光纤进行再放大、再输出,因而形成环

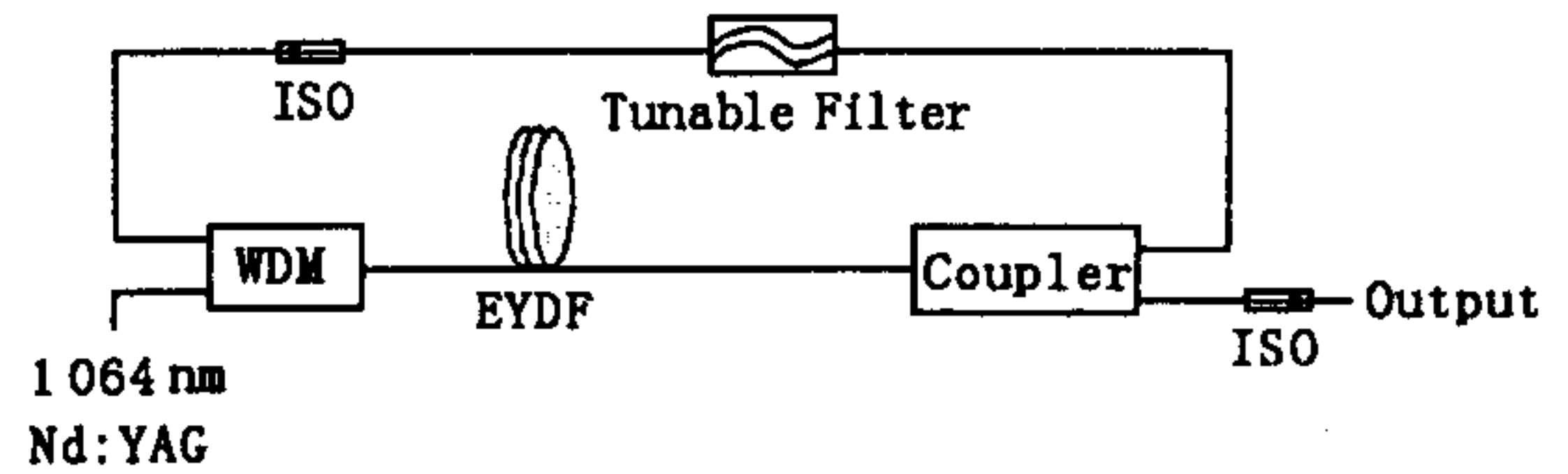


图2 可调谐环形掺铒光纤激光器结构示意图

形光纤激光器。随着泵浦功率的逐渐增加,噪声随之下降,这是由于泵浦功率的增加使粒子数反转加剧,从而抑制了自发辐射。DWDM系统中要求信噪比越高越好,环形光纤激光器中的噪声主要是由铒镱共掺光纤的放大自发辐射(ASE)引起的,隔离器的作用是抑制ASE噪声,保证1 550 nm激光在环形腔中的单向运转,提高激光输出的稳定性。可调谐光滤波器工作波长为1 530 nm - 1 570 nm,选用光纤型隔离器加在光纤激光器输出端,防止光纤端面反射对其性能造成影响。

3 数值仿真分析

仿真实验中用波长为1 064 nm的Nd:YAG激光泵浦 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤,选择合适浓度配比的铒镱共掺光纤能够有效地缩短腔长而提高输出功率。我们选用Fibercore - DF1500Y铒—共掺光纤,其主要参数是:铒/镱掺杂比例为45:1,对于1 550 nm的模场直径为5.9 μm ;包层尺寸约125 μm ,截止波长950 - 1 050 nm;工作在单模状态,其数值孔径0.23;泵浦光波长吸收(1 064 nm):3.9 dB/m;工作波长吸收(1 532 nm):20 dB/m;其背景损耗为200 dB/km(1 200 nm);工作波段:1 535 nm - 1 560 nm。

采用图2所示结构对系统进行数值仿真。 $\text{Er}:\text{Yb}$ 共掺光纤的长度是影响激光功率的主要因素,首先通过软件仿真分析其在固定泵浦及固定输出分光比的情况下,输出最大时的最佳长度。图3为最大输出功率随铒镱共掺光纤长度的变化曲线(泵浦功率100 mW,输出分光比0.8)。在数值仿真模拟中,逐步缩短掺杂光纤,仿真试验了30个长度。可见,随着光纤长度的增加有望在1.6 m附近获得最大输出功率。当光纤长度不断增大时,1 550 nm的激光会被掺杂光纤吸收,造成输出功率的下降。

当泵浦功率为100 mW、光纤长度分别为1.2 m、1.6 m和2.0 m时,数值仿真得到的激光输出功率与输出分光比的关系见图4。可见,随着输出分光比的增加,得到的激光输出功率也越来越高;在相同分光比时,光纤长度为1.6 m时的输出功率最大。当输出分光比太大时,得到的反馈太小,腔内激光振荡强度将减弱,

输出功率反而下降,严重时停止振荡。由此可以看出输出分光比存在一最佳值,该最佳值约位于0.7左右。当采用具有最佳分光比的输出耦合器时,同样的泵浦功率会得到较高的激光输出功率。

通过软件仿真得到的环形腔铒镱共掺光纤激光器在1550 nm的激光输出光谱见图5,其增益谱宽大约30 nm,选用可调谐窄带宽透射式滤光器(调谐范围1530 nm-1560 nm)进行选频,即可调谐激光器的输出激光波长,满足实验及工程需要。图5为泵浦功率100 mW、光纤长度1.6 m、耦合器输出分光比0.8时,增益带宽上激光输出波长调谐范围数值仿真结果。

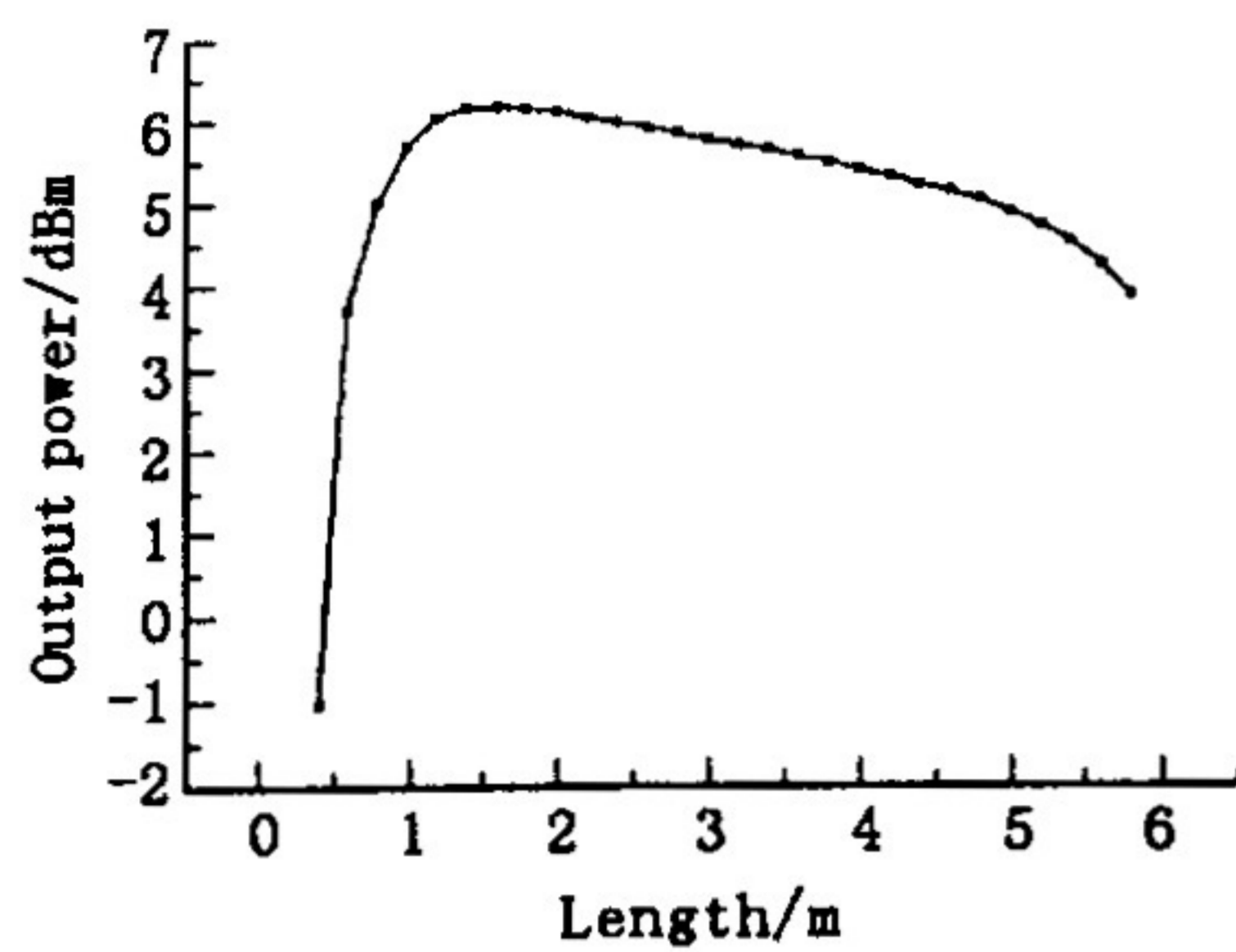


图3 输出功率随铒镱共掺光纤长度的变化

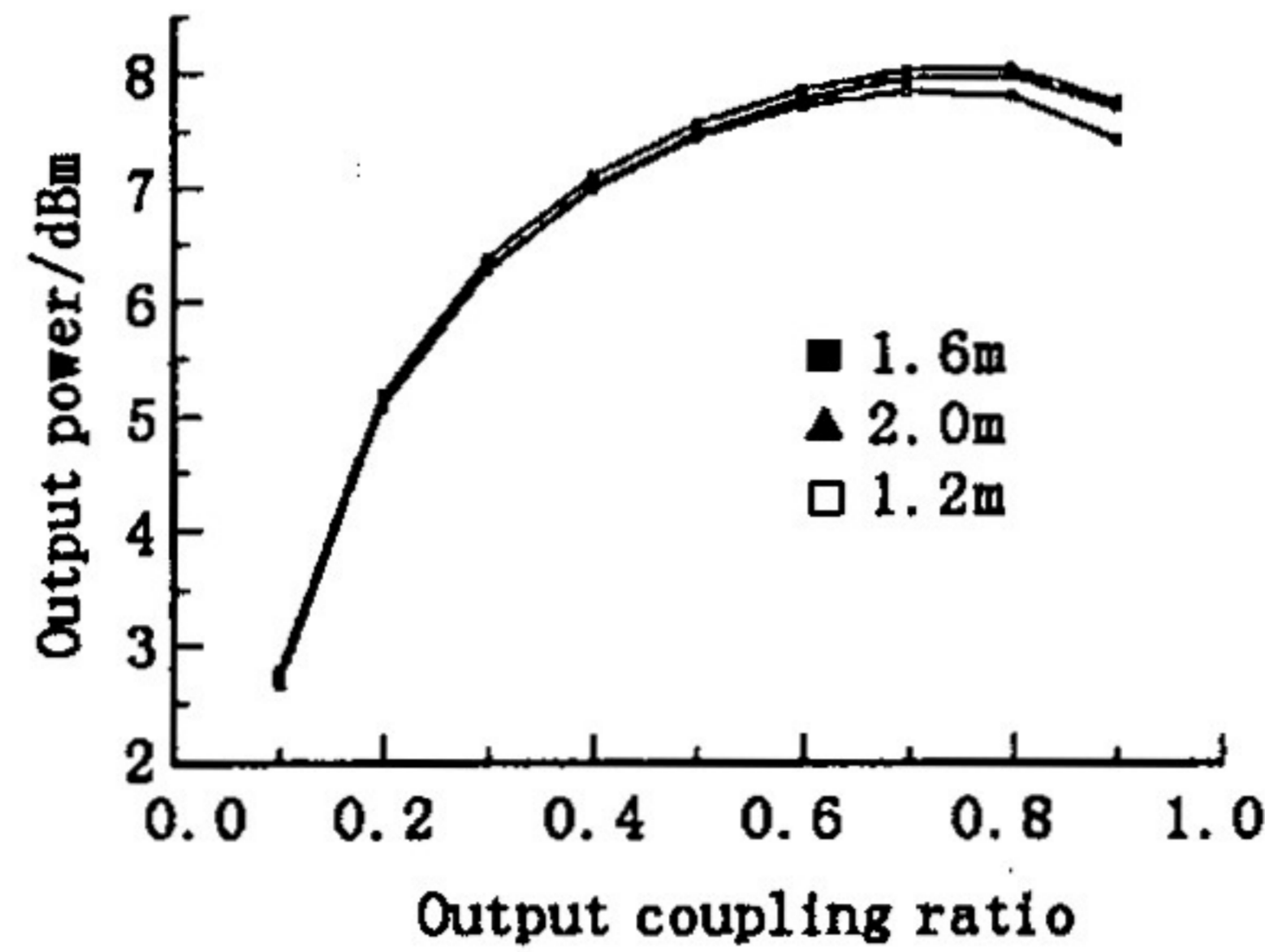


图4 输出功率与耦合器输出分光比的关系曲线

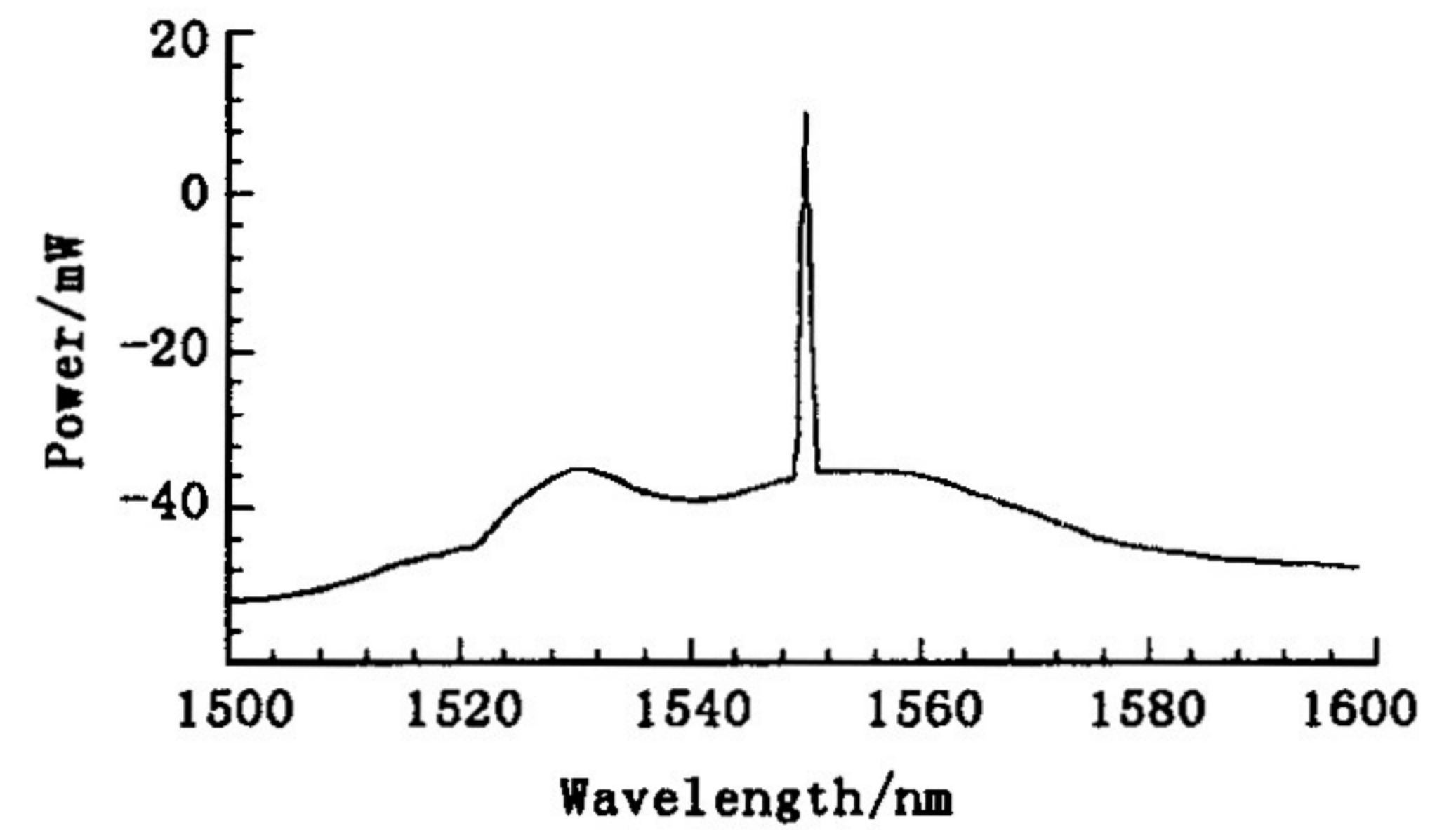


图5 可调谐环形掺铒光纤激光器输出光谱

4 结论

设计了一种新型的可调谐铒镱共掺光纤激光器,通过铒镱能级系统的速率方程,分析了环形腔内激光产生的原理,并在此基础上进行了仿真实验,得到了激光输出功率与掺杂光纤长度的关系,铒镱共掺光纤对于输出功率的最佳长度为1.6 m;最佳输出耦合器分光比约为70%。这种可调谐铒镱共掺光纤激光器适应了WDM全光通信系统的发展和需要,具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] Townsend J B, Barnes W L, Jedrzejewski K P, et al. Yb³⁺ sensitized Er³⁺ doped silica optical fiber with ultrahigh transfer efficiency and gain[J]. Electron Lett, 1991, 27(21):1958-1959.
- [2] 王天枢,郭玉彬,李军. 高信噪比可调谐环形掺铒光纤激光器的研究[J]. 激光杂志,2003,24(6):25-26.
- [3] Chen Z J, Minelly J D, Gu Y. Compact low cost Er³⁺/Yb³⁺ Co-Doped Fiber Amplifiers Pumped by 827nm Laser Diode[J]. Electron Lett, 1996, 32(19):1812-1813.
- [4] Grubb S G, Humer W H, Cannon R S, et al. +24.6dBm Output Power Er/Yb Codoped Optical Amplifier Pumped By Diode-Pumped Nd:YLF laser[J]. Electron Lett, 1992, 28(13):1275-1276.
- [5] 王天枢,郭玉彬,李军. 全光纤型Er/Yb共掺光纤短腔激光器[J]. 中国激光,2004,31(10):1161-1164.
- [6] Ming Ding, Peter K. Effects of Yb:Er-Codoping on Suppressing Self-Pulsing in Er-Doped Fiber Lasers[J]. IEEE Photonics Tech Lett, 1997, (3):324-326.

(编辑:姚树峰)

Numerical Investigation of Wavelength - tunable Er: Yb - co - doped Fiber Ring Laser

ZHAO Ming, GUO Yu - bin, WANG Tian - shu, SHEN Xuan - guo

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract: A new - style wavelength tunable Er: Yb - co - doped fiber ring laser is proposed. The principle of creating laser in the ring cavity is analyzed by means of rate equation. Based on the rate equation model emulation experiment is made. The relationship between the output power and the length of Er: Yb - co - doped fiber is analyzed and the coupling ratio of the coupler is optimized.

Key words: fiber laser; Er: Yb - co - doped fiber (EYDF); wavelength tunable