

文章编号: 0253-2239(2003)07-0823-5

掺铒光纤环形激光器输出特性的研究*

夏江珍 蔡海文 任虹 李琳 赵岭 陈高庭 方祖捷
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

Insoo S. Kim

(韩国电气技术研究所, 韩国 昌原 641-600)

摘要: 根据掺铒光纤激光器的速率方程,对环形腔光纤激光器的输出特性进行了理论分析,得到了光纤激光器在稳态条件下阈值抽运功率、激光输出功率和斜率效率的解析表达式。利用数值模拟结果对光纤激光器的这些基本特性参量进行了分析和讨论,为光纤环形激光器的优化设计提供了依据。并进行了 980 nm 抽运的掺铒光纤激光器的实验,实验证明理论分析得到的基本特性是合理的。

关键词: 激光器; 掺铒光纤环形激光器; 速率方程; 稳态特性

中图分类号: TN24 文献标识码: A

1 引 言

掺铒光纤激光器(EDFL)具有许多突出的优点和特点,其辐射波长与通信光纤最低损耗窗口相匹配;可用带宽较宽;与光纤元件的天然兼容性;与半导体激光器相比,光束质量较好,噪声较低;由于光纤放大器(EDFA)的广泛应用,掺铒光纤激光器相关元器件的产业化水平高,等等。因而它在光纤通信、光纤传感等领域具有重要的应用前景,受到了国际上科技界、产业界的广泛重视,成为研究的热点。

人们对掺铒光纤激光器在实验和理论上已经做了不少研究。文献[1]系统地给出了光纤激光器的基本理论。文献[2]给出了在线性激光谐振腔情况下,掺铒光纤激光器在稳态条件下输出特性主要参量的解析表达式。文献[3,4]讨论了光纤激光器中的自发辐射噪声问题。文献[5]讨论了设计光纤激光器时的最佳光纤长度问题。从器件的性能考虑,环形激光器具有许多优点。本文拟从光纤激光器的速率方程和光传输方程出发,对环形腔掺铒光纤激光器的稳态输出特性进行理论分析,利用解析表达式和数值模拟方法,对掺铒光纤激光器的阈值、输出功率、斜率效率等主要性能,及其同材料和结构参量的关系进行分析和讨论,为掺铒光纤激光器的优化

设计提供依据。并进行了 980 nm 抽运的掺铒光纤激光器的实验,理论与实验结果基本一致。

2 理论分析

2.1 器件结构和模型

掺铒光纤激光器在 980 nm 抽运下是三能级系统,图 1 给出了 Er^{3+} 的能级简图。由于在玻璃或晶体受主中, Er^{3+} 能级受到周围电场或一个动态扰动的影响,能级产生斯塔克分裂,导致能级展宽。每个能级均由多个子能级构成^[3]。由 Er^{3+} 能级图可知,980 nm 抽运对应于 ${}^4I_{11/2}$ 与 ${}^4I_{15/2}$ 之间的跃迁,处于基态(${}^4I_{15/2}$)的电子吸收抽运光子,跃迁到 ${}^4I_{11/2}$ 能级。然后很快从 ${}^4I_{11/2}$ 能级无辐射跃迁到激发态(${}^4I_{13/2}$)能级。通过自发发射或受激发射过程,电子从激发态跃迁到基态,发射一个光子。图中 τ_{32} 为能级 3 至能级 2 的驰豫时间, τ_{21} 为能级 2 至能级 1 的驰豫时间。一般来说, τ_{32} 典型值为 10 ns 左右,而 τ_{21} 为 10 ms 量级。由于 $\tau_{21} \gg \tau_{32}$,因此能级 3 上粒子

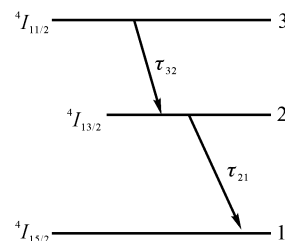


Fig. 1 Energy level diagram of Er^{3+} ion

* 韩中科学技术部,韩中光技术研究中心基金资助课题。

E-mail: xiajzs@sina.com

收稿日期:2002-06-20; 收到修改稿日期:2002-08-16

数可近似认为零,从而可将 980 nm 抽运的掺铒光纤激光器当作两能级来处理。此外,为了简化,本文将不讨论激发态吸收的问题。

器件的结构如图 2 所示,这是一种环形腔光纤激光器的结构。假设抽运光单向抽运,从 $z=0$ 点通过波分复用器(WDM)注入掺铒光纤(EDF)。在掺铒光纤的另一端, $z=l$,考虑不设置对抽运光反射的元件的情况,抽运光不存在反向传输。因为铒光纤的增益带宽很大,在激光腔内通过耦合器(FL)连接了一个光纤光栅(FBG),以便选择需要的波段激射。为了避免双向激射,发生模式竞争,在腔内接入了隔离器(ISO)或环行器(Circulator)。

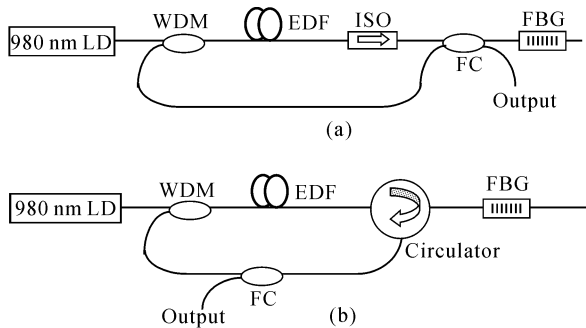


Fig. 2 Schematic diagram of the ring cavity erbium-doped fiber laser

2.2 速率方程

在光纤中,光场可以写成场横向分布与纵向变化的两个函数之积,即

$$P(r, \phi, z) = f_p(r, \phi)P(z),$$

$$S(r, \phi, z) = f_s(r, \phi)S(z),$$

其中 $P(r, \phi, z), S(r, \phi, z)$ 分别表示抽运光和腔内传输的受激发射光子密度。 $f_{p,s}(r, \phi)$ 为归一化的场横向分布函数,即满足

$$\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\infty} f_{p,s}(r, \phi) r dr = 1.$$

类似地,粒子数分布也可写成

$$N_0(r, \phi, z) = g(r, \phi)N_0(z),$$

其中 $g(r, \phi)$ 为归一化的掺杂横向分布函数, $N_0(z)$ 为 Er^{3+} 掺杂粒子数浓度。在本文中为使问题简化,假设光纤均匀掺杂,掺杂浓度为 $N_0(z) = N_0, N_1 + N_2 = N_0, N_1, N_2$ 为 1、2 能级的粒子数浓度。同时抽运光子与发射光子密度也可写成为 $P(z), S(z)$ 。

抽运光子密度、掺铒光纤中上、下能级的粒子密度和发射的光子密度应满足如下的速率方程^[5]

$$\frac{dP}{dz} = -aP = -a(N_0 - N_2)P, \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = aPN_1 - \frac{N_2}{\tau} - (b_2N_2 - b_1N_1)S = 0, \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dz} = (b_2N_2 - b_1N_1)S + \frac{\gamma N_2}{\tau}, \quad (3)$$

这里, τ 为自发发射寿命, a, b_2, b_1 分别为抽运光吸收截面、受激发射截面、受激吸收截面和光速及模体积分同掺杂离子分布重叠系数的乘积。 γ 为自发发射因子,其物理意义是自发发射进入激光模式的比例。在光纤放大器中它是自发辐射噪声的根源。虽然这是一个小量,但是对于光纤放大器和光纤激光器的性能有着重要的影响。

设掺铒光纤的长度为 l ,腔内的抽运光子和激光光子密度应当满足如下的边界条件:

$$P(0) = P_{in}, \quad P(l) = P_{out}, \quad (4)$$

$$S(0) = S(l)R_g(\lambda)\exp(-\alpha), \quad (5)$$

式中 R_g 为光纤光栅的反射率, α 为腔内总损耗。记

$$G = \int_0^z (b_2N_2 - b_1N_1) dz,$$

单程增益为

$$G_0 = \int_0^l (b_2N_2 - b_1N_1) dz.$$

激射光子密度可以表示为以下的公式:

$$S(z) = S(0)\exp G + \frac{\gamma}{\tau}\exp G_0 \int_0^z N_2(z)\exp(-G) dz.$$

因此,由边界条件可得

$$S(l) = S(0)\exp G_0 + \frac{\gamma}{\tau}\exp G_0 \int_0^l N_2 \exp(-G) dz =$$

$$S(l)R_g(\lambda)\exp(G_0 - \alpha) +$$

$$\frac{\gamma}{\tau}\exp G_0 \int_0^l N_2 \exp(-G) dz,$$

$$\frac{\gamma}{\tau}\exp G_0 \int_0^l N_2 \exp(-G) dz$$

$$S(l) = \frac{0}{1 - R_g \exp(G_0 - \alpha)}.$$

由此激光器的阈值条件可以表示为

$$G_{th} = \alpha + \ln(1/R_g) = \int_0^l (b_2N_2 - b_1N_1) dz =$$

$$(b_1 + b_2) \int_0^l N_2 dz - b_1N_0l, \quad (6)$$

这一式子表明,在器件激射后,粒子数反转总和将趋向于一个极限,其值是掺铒光纤长度、铒离子浓度、腔内损耗和选频元件的反射率的函数。在阈值以上进一步增加抽运功率将不再提高粒子数反转程度。

上能级粒子数总和又是注入抽运功率的函数。由(1)式得到

$$P = P_{\text{in}} \exp\left(-a \int_0^z N_1 dz\right) = P_{\text{in}} \exp\left[a \left(\int_0^z N_2 dz - N_0 z\right)\right],$$

可得

$$\ln\left(\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}}\right) = aN_0 l - a \int_0^l N_2 dz,$$

由(6)式结合上式可得

$$\ln\left(\frac{P_{\text{in}}^{\text{th}}}{P_{\text{out}}^{\text{th}}}\right) = \zeta(b_2 N_0 l - \alpha - \ln R_g^{-1}),$$

式中 $P_{\text{in}}^{\text{th}}$ 、 $P_{\text{out}}^{\text{th}}$ 为阈值时输入、输出抽运光功率, $\zeta = a/(b_1 + b_2)$ 。在低于阈值和阈值附近, 激光光子密度很小的情况下, 有关系式

$$\ln(P_{\text{in}}/P_{\text{out}}) + a\tau(P_{\text{in}} - P_{\text{out}}) = aN_0 l,$$

代入上式可得

$$P_{\text{in}}^{\text{th}} = P_{\text{out}}^{\text{th}} + \tau^{-1}(b_1 N_0 l + G_{\text{th}})/(b_1 + b_2).$$

因此阈值抽运功率可表示为

$$P_{\text{in}}^{\text{th}} = \frac{(b_1 N_0 l + G_{\text{th}}) h \nu_p A}{\tau(b_1 + b_2) [1 - \exp\zeta(G_{\text{th}} - b_2 N_0 l)]}, \quad (7)$$

其中 ν_p 为抽运光的频率, A 为纤芯有效面积, h 为普朗克常量, 由(7)式可知, 对于有限的阈值抽运功率, 掺铒离子总量有一个最小值:

$$N_0 l|_{\min} = G_{\text{th}}/b_2. \quad (8)$$

由速率(2)式, 在稳态下对光纤长度积分, 可得

$$P(l) - P(0) + S(l) - S(0) + \frac{1}{\tau} \int_0^l N_2 dz = 0,$$

将(5)式代入上式得

$$[1 - R_g \exp(-\alpha)]S(l) = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} - \frac{1}{\tau} \int_0^l N_2 dz.$$

这样, 阈值以上从掺铒光纤输出端获得的光子密度为

$$S(l) = \frac{1 - \exp[\zeta(G_{\text{th}} - b_2 N_0 l)]}{1 - \exp(-G_{\text{th}})} (P_{\text{in}} - P_{\text{in}}^{\text{th}}), \quad (9)$$

实际输出功率再乘以输出耦合器的分束比。

由(8)式可得激光器的斜率量子效率为

$$\eta = \frac{1 - \exp[\zeta(G_{\text{th}} - b_2 N_0 l)]}{1 - \exp(-G_{\text{th}})}. \quad (10)$$

可见, 随着阈值增益的下降, 阈值降低, 效率提高。随着腔内总掺铒离子量 $N_0 l$ 的增加, 效率也增加。但是逐步趋向于一个常量, 其值决定于阈值增益和铒离子的发射和吸收截面。

阈值随 $N_0 l$ 的变化是先降后升, 有一个最小值。这一最小值对应的掺铒离子总量 $N_0 l$ 由下面的超越方程给出

$$b_1 = [b_1 + b_2 \zeta(c_1 N_0 l + G_{\text{th}})] \times \exp[\zeta(G_{\text{th}} - b_2 N_0 l)].$$

这一最小值对应的从掺铒光纤输出端泄漏的抽运光子密度为

$$P_{\text{out}}^{\text{th}}|_{\min} = b_1/(ab_2\tau).$$

由稳态速率(2)式可以得到, 这一数值对应于在掺铒光纤输出端 $z = l$ 处的净增益等于零的情况^[6], 即 $b_2 N_2(l) = b_1 N_1(l)$ 。显然, 这与直观的物理分析完全一致。

2.3 数值模拟与分析

根据上述理论分析结果, 可以计算环形光纤激光器的一些基本特性。在模拟计算中, 采用了以下的典型的结构参量:

$$N_0 = 1.0 \times 10^{25} \text{ m}^{-3},$$

$$a = 3.6 \times 10^{-17} \text{ m}^3/\text{s},$$

$$b_2 = 1.3 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{s},$$

$$b_1 = 1.4 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{s},$$

$$\tau = 12 \text{ ms}.$$

光纤光栅峰值反射率取为 1。腔内元件的损耗为: 采用隔离器的结构, 隔离器插入损耗 0.5 dB, 光纤耦合器损耗 3 dB, 输出耦合损耗 3 dB; 采用环形器结构, 环形器插入损耗 2×1 dB, 耦合器输出损耗 3 dB。器件的总损耗可以写为腔内损耗 α_1 和输出损耗 α_2 两部分: $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ 或 $\exp(\alpha) = K_1 K_2$ 。对于二种结构, 输出损耗均为 3 dB, 即 $K_2 = 0.5$ 。而 K_1 则分别为 0.22 和 0.63。实际器件还可能存在波分复用的插入损耗和光纤连接损耗等。本文以这二种结构的环形激光器的不同损耗的 K_1 值为参量, 对器件的阈值和微分效率随掺铒光纤长度变化的关系进行了模拟计算。

1) 光纤激光器的抽运阈值

图 3 为抽运阈值功率与光纤长度的关系, 以 $K_1 = 63\%$ (a) 和 22% (b) 为参量。从图中可以看出, 抽运阈值随腔长的变化是先降后升, 有一个极小值。极小值对应的光纤长度随腔内损耗的增加而增加, 阈值抽运功率也随之上升。同时还可以看到, 无论谐振腔镜的损耗多小, 掺铒光纤均有最短长度。

2) 光纤激光器的微分量子效率

图 4 为光纤激光器微分量子效率随光纤长度变化的关系, 同样以 $K_1 = 63\%$ (a) 和 22% (b) 为参量。计算表明激光器要实现振荡, 掺铒光纤必须有一个

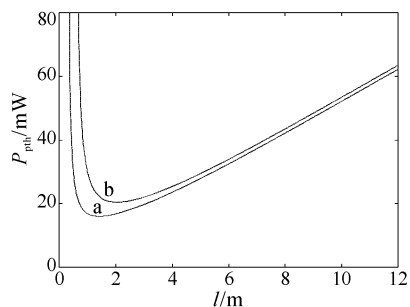


Fig. 3 Variation of pump threshold as a function of fiber length. a: $K_1=63\%$; b: $K_1=22\%$

最短长度。如果掺铒光纤的长度小于最短长度,微分效率趋向于零。在大于该最小值时,效率随光纤长度很快增加;但是到一定程度之后,掺铒光纤长度继续增加时,效率的提高变慢,而趋向于一个常量。

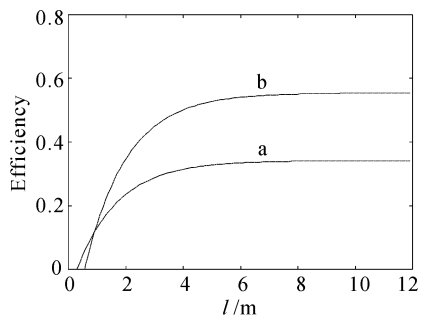


Fig. 4 Variation of differential quantum efficiency as a function of fiber length. a: $K_1=63\%$; b: $K_1=22\%$

光纤激光器的功率效率还同抽运光子能量与激光光子能量的比值有关,要获得较高的能量效率,抽运光频率与激光频率越接近越好。因此采用 1480 nm 抽运光比用 980 nm 抽运光可以获得高的能量效率。但是二者的吸收截面有较大差别。另一方面,提高掺铒浓度可以缩短光纤长度。掺杂量的提高受到材料溶解度的限制。已经发展了 Er/Yb 双掺的技术^[7]来消除浓度淬灭,提高增益。有关问题将另行分析讨论。

从上面的图 3 和图 4 可以看出,要优化光纤激光器的掺铒光纤长度,要综合考虑光纤激光器的抽运阈值和微分量子效率,使其在较低的阈值时,获得较大的功率效率。

3 实验结果

采用图 2(b)所示的装置进行了掺铒光纤激光器的实验研究。980 nm 的抽运光通过一 980/1550 nm 波分复用耦合器耦合到掺铒光纤中。环形器(Circulator)将光纤光栅的反射光引入激光

腔中。光纤光栅的中心波长为 1555.10 nm,反射率为 99.9%。1 m 长掺杂浓度为 $\rho=1.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的光纤作为增益介质。图 5 为器件的输出特性。可以看到阈值抽运功率为 13 mW。在 100 mW 的抽运功率下可获得 3.2 mW 的激光输出。掺铒光纤激光器的输出激光光谱如图 6 所示。激光波长为 1555.10 nm,与光纤光栅的布拉格波长一致。激光输出谱宽为 0.12 nm,此时抽运功率为 60 mW。

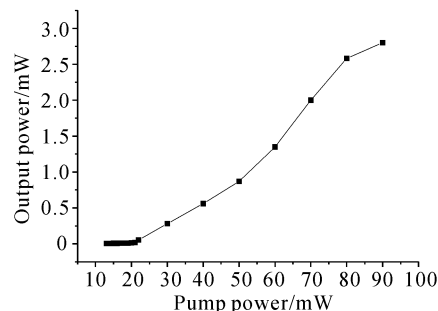


Fig. 5 Output characteristics of the erbium-doped fiber laser

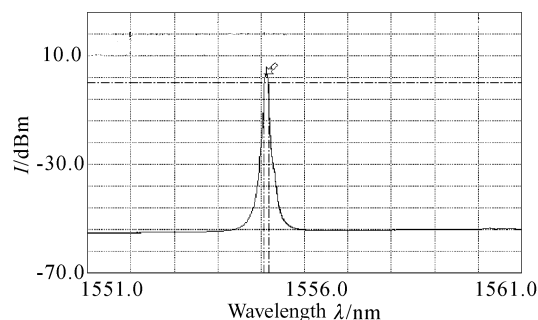


Fig. 6 Output spectrum of the erbium-doped fiber laser

结论 本文从理论和实验上对环形腔掺铒光纤激光器的工作特性进行了分析。得到了光纤激光器在稳态条件下的阈值、输出功率、微分量子效率等基本特性的解析表达式。对掺铒光纤激光器的抽运阈值、斜率效率等进行了模拟计算和分析讨论,为环形腔掺铒光纤激光器的优化设计提供了依据。

参 考 文 献

- 1 Nie Qiuhua. *Fiber Laser and Amplifier* (光纤激光器和放大器技术). Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1997 (in Chinese)
- 2 Wu Zhengmao, Xia Guangqiong, Chen Jianguo. Analytical studies on output characteristics of erbium-doped fiber lasers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(12): 1676~1680 (in Chinese)
- 3 Desurvire M, Simpson J R. Amplification of spontaneous emission in erbium-doped single-mode fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(5): 835~845
- 4 Mignon M, Desurvire E. An analytical mode for the

- determination of optimal output reflectivity and fiber length in erbium-doped fiber lasers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(8):850~852
- 5 Giles C R, Desuivire E. Propagation of signal and noise in concatenated erbium-doped fiber optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2):147~154
- 6 Peroni M, Tamburrini M. Gain in erbium-doped fiber amplifiers: a single analytical solution for the rate equations. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(15):842~844
- 7 Kringlebotn J T, Archambault J L, Reekie L *et al.*. Er³⁺: Yb³⁺-codoped fiber distributed-feedback laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(24):2101~2103

Study on Output Characteristics of Erbium-Doped Fiber Ring Lasers

Xia Jiangzhen Cai Haiwen Ren Hong Li Lin Zhao Ling Chen Gaoting Fang Zujie
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Insoo S. Kim

(Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon 641-600 Korea)

(Received 20 June 2002; revised 16 August 2002)

Abstract: Based on the rate equations applicable to the erbium-doped fiber laser, a continuous erbium-doped fiber laser of ring cavity has been studied, and analytical expressions on threshold pump power, laser output power and slope efficiency under stationary condition have been derived. Variations of these basic parameters with the length of erbium-doped fiber have been analyzed by the analytic expressions and demonstrated by simulation, which will be help full to the optimization of designing a practical erbium-doped fiber ring laser. The experimental study on erbium-doped fiber laser pumped by 980 nm source has shown that the output characteristics were in good agreement with the theoretical calculations.

Key words: laser; erbium-doped fiber laser of ring cavity; rate equation; stationary characteristics