

文章编号: 0258-7025(2008)06-0827-03

掺镱光纤激光器温度特性分析

蒋秋洁 闫平 张金戈 巩马理

(清华大学精密仪器与机械学系光子与电子研究中心摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 温度对于光纤激光器的影响是多方面的,着重对光纤吸收截面、发射截面及激光器激射波长的温度特性进行了深入的研究,更加精确、全面地描述温度对光纤激光器系统的影响。当温度变化时,掺镱光纤各子能级上的粒子数分布发生变化,从而导致相应的吸收截面和发射截面发生变化。通过拟合方法可以得到光纤吸收截面与温度的关系。并利用任意温度下,吸收截面与发射截面的特定关系式,得到发射截面在各温度点上的取值。进一步推导出了激射波长与工作温度、光纤长度、腔的损耗、掺杂浓度等系统参数的关系;并将不同工作温度下激射波长的计算结果与实验结果比较,得到两种方法下的相似结论。

关键词 光纤光学;光纤激光器;拟合;温度与激射波长关系

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Analysis on Thermal Characteristic of Ytterbium-Doped Fiber Lasers

Jiang Qiujie Yan Ping Zhang Jinge Gong Mali

(The State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics,

Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Fiber lasers are impacted by temperature in various ways. This article studies on thermal characteristic of absorption cross section, luminescence cross section and lasing wavelength and describes the thermal impact on fiber lasers in details. As the temperature varies, the distribution of the particles in all sub energy levels changes, which makes the absorption cross section and luminescence cross section different. The relationship between temperature and absorption cross section is calculated by a fitting method. The luminescence cross section is the function of temperature and absorption cross section by which the luminescence cross section in different temperatures can be calculated. Relationships between lasing wavelength and temperature, fiber length, cavity loss, doping concentration are deduced. Furthermore, the article compares the numerical result of lasing wavelength under different temperatures with the experiment data, which match with each other well.

Key words fiber optics; fiber laser; fitting; relationship between temperature and lasing wavelength

1 引言

光纤激光器由于其良好的导波能力、散热能力和光谱特性等,已经成为一种非常重要的固体激光器。光纤激光器同其他固体激光器一样对温度非常敏感^[1]。为了进行光纤激光器的热管理,需要对光纤激光器各组成部分的热特性进行研究^[2,3]。

本文利用现有实验数据,推导出光纤吸收截面与发射截面关于温度的解析解,并给出了不同温度

下光纤激光器自由运转的激射波长。

2 理论推导与计算

2.1 温度对光纤吸收截面与发射截面的影响

由于光纤各能级粒子数随温度的变化而变化,这导致了光纤吸收截面与发射截面的温度特性。以下能级第二子能级为例,由玻尔兹曼(Boltzmann)分布可以得到,其粒子数100℃时约为0℃时的两倍,

收稿日期:2007-08-16;收到修改稿日期:2007-11-01

作者简介:蒋秋洁(1983—),女,北京人,硕士研究生,现主要从事光纤激光器的研究。

E-mail:jiangqj02@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介:巩马理(1959—),男,四川人,教授,主要从事激光技术、光信息存储的研究。

E-mail:gongmali@mail.tsinghua.edu.cn

即吸收截面增加为 0 °C 的近两倍。

要得到吸收截面和温度的关系可以采用拟合法,拟合关系为^[4]

$$\sigma_a(\lambda, T) = \sigma_a(\lambda, \infty) \exp[\beta(\lambda)/kT], \quad (1)$$

式中 $\sigma_a(\lambda, T)$ 为温度 T 下的吸收截面, $\sigma_a(\lambda, \infty)$ 和 $\beta(\lambda)$ 为待定的函数。当已知 T_1 和 T_2 下的吸收截面 $\sigma_a(\lambda, T_1)$ 和 $\sigma_a(\lambda, T_2)$ 时,分别代入(1)式可得

$$\beta(\lambda) = \frac{k \cdot \ln[\sigma_a(\lambda, T_1)/\sigma_a(\lambda, T_2)]}{1/T_1 - 1/T_2}, \quad (2)$$

$$\sigma_a(\lambda, \infty) = \sigma_a(\lambda, T_1) / \exp[\beta(\lambda)/kT_1], \quad (3)$$

计算中使用了图 1 所示的 20 °C 和 100 °C 下光纤吸收截面数据^[5],确定 $\sigma_a(\lambda, \infty)$ 和 $\beta(\lambda)$,进而可计算出任意温度下的光纤吸收截面。

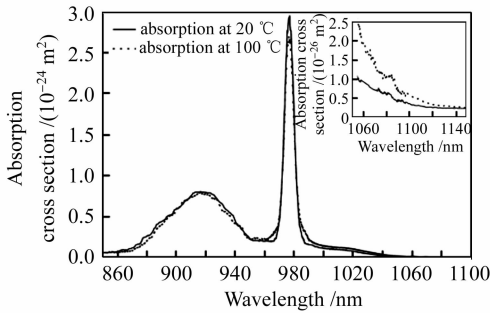


图 1 20 °C 和 100 °C 下掺镱光纤的吸收截面曲线

Fig. 1 Absorption cross section curves of Yb-doped fiber under 20 °C and 100 °C

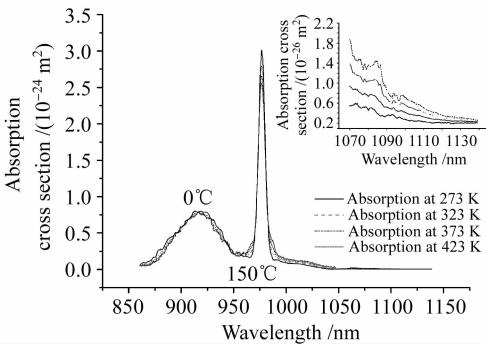


图 2 温度 0~150 °C 时每间隔 50 °C 的光纤吸收截面

Fig. 2 Fiber absorption cross section under 0~150 °C with the temperature interval of 50 °C

通过计算得到 0~150 °C 时每间隔 50 °C 的光纤光栅吸收截面,如图 2 所示。

光纤发射截面与吸收截面在任意温度点下满足麦肯伯(McCumber)关系^[6]

$$\sigma_e(\lambda) = \sigma_a(\lambda) \exp\left[\frac{\epsilon(T) - hc/\lambda}{kT}\right], \quad (4)$$

式中 $\epsilon(T)$ 表示与温度相关的激发能,求得 $\epsilon(T)$ 即可利用吸收截面系数求出各温度点下的发射截面。激发能与温度 T 下热平衡时上下能级的镱离子布居

数的关系为

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\left[\frac{\epsilon(T)}{kT}\right], \quad (5)$$

由玻尔兹曼分布有

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\sum_{j=1}^4 \exp(-E_{1j}/kT)}{\sum_{j=1}^3 \exp(-E_{2j}/kT)}, \quad (6)$$

式中 E_{1j} 与 E_{2j} 分别表示上、下能级各斯塔克子能级的能量。

将(6)式代入(5)式可以得到激发能为

$$\epsilon(T) = kT \cdot \ln \left[\frac{\sum_{j=1}^4 \exp(-E_{1j}/kT)}{\sum_{j=1}^3 \exp(-E_{2j}/kT)} \right], \quad (7)$$

再联立(4)和(7)式即可得到任意温度下的发射截面。通过计算得到,0~120 °C 时每间隔 40 °C 的光纤发射截面,如图 3 所示。

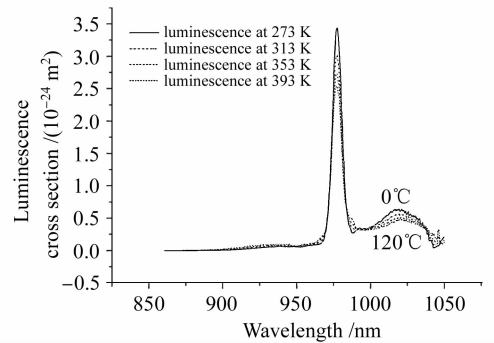


图 3 20~120 °C 时每间隔 40 °C 的光纤发射截面

Fig. 3 Fiber luminescence cross section from 20 °C to 120 °C with the temperature interval of 40 °C

2.2 温度对激光波长的影响

在激光器起振过程中,随着抽运功率的增加,某个波长(设为 λ_0)的增益最先达到此波长对应的损耗,这个波长就会起振^[7]。尽管抽运功率继续增大,但由于均匀展宽介质的增益饱和和效应,其他波长不会起振,激光波长始终被钳制在 λ_0 ^[8]。该激光波长与吸收截面和发射截面的关系为

$$\frac{\partial(\sigma_{as} + \sigma_{es})}{\partial \lambda} \delta - (\sigma_{as} + \sigma_{es}) \frac{\partial \delta}{\partial \lambda} + \left(\frac{\partial \sigma_{es}}{\partial \lambda} \sigma_{as} - \sigma_{es} \frac{\partial \sigma_{as}}{\partial \lambda} \right) NL = 0, \quad (8)$$

式中 δ 为系统的损耗, N 为光纤掺杂浓度, L 为光纤长度。温度的影响隐含在吸收截面和发射截面中。对于特定激光器,确定光纤吸收截面、长度、掺杂浓度和系统损耗后就可以通过求解(8)式得到激光波长。

利用已有实验数据验证此方法计算的激光波长。在实验^[9]中, $L = 50 \text{ m}$, $N = 1 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $R_1 = 0.99$, $R_2 = 0.04$, $\delta = -0.5 \ln(R_1 R_2)$ 。将本文 2.1 节的光纤吸收截面和发射截面在不同温度下的取值代入(8)式中, 可以计算出环境温度在 $0 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 变化下的激光波长, 如图 4 所示。

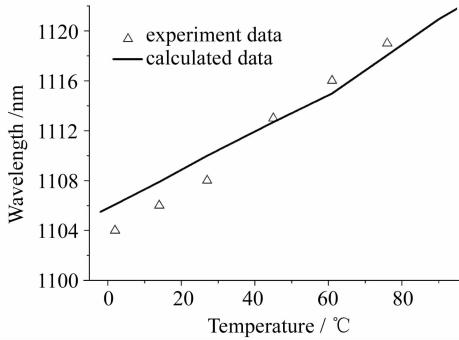


图 4 激光波长随工作温度的变化关系

Fig. 4 Relationship between lasing wavelength and working temperature

3 结 论

建立了温度与光纤吸收截面、发射截面的关系。采用两种不同温度下的光纤吸收截面数据, 利用拟合法, 求出不同温度下的吸收截面。再利用麦肯伯关系, 建立各温度下发射截面与吸收截面的关系。在相关文献描述的激光波长与光纤长度^[10]、激光波长与腔的损耗的关系式^[11]的基础上, 利用激光波长的理论模型, 通过模型中的吸收截面和发射截面引入温度对激光波长的影响, 进一步阐述温度对激光波长的影响, 并利用实验数据进行验证。本文给出的结论具有普适性, 选择适当的光纤参数, 可以将结论应用到其他稀土掺杂光纤激光器的温度特性上。

参 考 文 献

1 Cheng Can, Xin Guofeng, Pi Haoyang *et al.*. Measurement of

thermal relaxation time of high power semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12):1671~1674

程 灿, 辛国锋, 皮浩洋 等. 大功率半导体激光器热弛豫时间的测量[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12):1671~1674

2 Gao Xuesong, Gao Chunqing, Lin Zhifeng *et al.*. Numerical analysis of the temperature distribution of high power double cladding fiber laser [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2005, (11):61~65

高雪松, 高春清, 林志锋 等. 高功率双包层光纤激光器温度分布的数值分析[J]. *北京理工大学学报*, 2005, (11):61~65

3 Liu Chuanxian, Wu Wenyuan. Research progress of double-cladding fiber laser [J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(3):85~88

刘传先, 武文远. 双包层光纤激光器的研究进展[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(3):85~88

4 Maxim Bolshtyansky, Paul Wysocki, Nicholas Conti. Model of temperature dependence for gain shape of erbium-doped fiber amplifier [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(11):1533~1540

5 D. A. Grukh, A. S. Kurkov, V. M. Paramonov. Effect of heating on the optical properties of Yb^{3+} -doped fibres and fibre lasers [J]. *Quantum Electronics*, 2004, **34**(6):579~582

6 M. Bell, N. Kairova, A. Divochiy *et al.*. On the nature of resistive transition in disordered superconducting nanowires [J]. *IEEE Transactions on Applied Super Conductivity*, 2007, **17**(2):267~271

7 Guo Wei, Liu Ying, Xiao Lifeng *et al.*. Study on characteristics of acoustooptical tunable erbium-doped fiber ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):877~881

郭 巍, 刘 迎, 肖立峰 等. 基于新型两级集成光学声光可调谐滤波器的环形腔掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7):877~881

8 Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W [J]. *Quantum Electronics*, 2007, **37**(3):546~551

9 Nathan A. Brilliant, Kalliroi Lagonik. Thermal effects in a dual-clad ytterbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21):1669~1671

10 Fu Shengui. Theoretical and Experimental Research on Double-Clad Fiber Lasers [D]. Tianjin: Nankai University, 2005

付圣贵. 高功率双包层光纤激光器的理论与实验研究[D]. 天津:南开大学, 2005

11 Luo Shaojun, Guo Wengang, Yang Xiufeng *et al.*. A novel fiber strain sensor based on laser's transient regime [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(4):1889~1893

罗绍均, 郭文刚, 杨秀峰 等. 基于激光器激光特性的新型应变传感系统[J]. *物理学报*, 2006, **55**(4):1889~1893