

掺铒光纤吸收截面和发射截面温度特性研究

徐宏杰 杜赛辉*

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 为了获得不同温度下掺铒光纤的吸收截面谱和发射截面谱,理论分析了掺铒光纤损耗系数、吸收截面和发射截面与温度的关系。实验研究了损耗谱,吸收截面和发射截面谱随温度的变化。利用截断法测量掺铒光纤的损耗谱,通过损耗谱得到吸收截面谱,然后利用McCumber关系算出发射截面谱,研究表明波长小于1536 nm时,损耗系数随着温度降低而增大,波长大于1536 nm时损耗系数随着温度的升高而增大。

关键词 光纤光学; 温度; 损耗系数; 吸收截面; 发射截面

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.100601

Temperature Dependence of Absorption and Emission Cross Sections in Erbium-Doped Fibers

Xu Hongjie Du Saihui

School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract In order to obtain absorption and emission cross sections spectrum, the relationship between loss coefficient, absorption, emission cross sections and temperature are theoretically analyzed. Spectra for loss, absorption and emission are studied experimentally at various temperatures. The loss spectrum is measured by the cut-back method. The absorption spectrum is attained by the loss spectrum. Then based on absorption spectrum, the emission spectrum via the McCumber relation is received. Experiment shows that the loss coefficient are decreased when the wavelength is less than 1536 nm and increased when the wavelength is larger than 1536 nm as temperature increased.

Key words fiber optics; temperature; loss coefficient; absorption cross sections; emission cross sections

OCIS codes 060.2270; 060.2300; 060.2410

1 引言

掺铒超荧光光纤光源(SFS)是一种相干性低、输出功率高的宽带光源,它是基于掺铒光纤(EDF)的放大自发辐射,具有很好的温度稳定性,中心波长位于1550 nm波段,是惯性导航级光纤陀螺(FOG)的首选光源^[1]。

掺铒光纤光源的关键部分是掺铒光纤,掺铒光纤对掺铒光纤光源的温度稳定性影响很大。与掺铒光纤放大器(EDFA)相比,掺铒光纤光源对波长及功率的温度稳定性有更高的要求,波长的温度稳定性需要达到 10^{-6} 量级。

国内对掺铒光纤的温度性能研究较少,缺少定量的计算^[2]。在研究温度对光源波长稳定性的过程中,没有从理论上对其进行分析,都是从工艺摸索的角度来提高光源的稳定性能。国外对掺铒光纤放大器的温度特性研究较多,早在90年代就开始研究,尤其是日本对EDFA增益随温度的变化有深入的研究^[3-7]。

本文从理论上分析温度对掺铒光纤的影响,并对掺铒光纤的相关参数进行测量,吸收截面和发射截面随温度的变化是测量的关键。研究不同温度下(-40 °C~70 °C)掺铒光纤的吸收截面和发射截面对掺铒光纤光源的理论研究是非常重要的,此外对光源的优化设计和波长温度稳定性的研究具有指导作用。通过测量不同温度下EDF的损耗谱,计算吸收截面数据,然后利用McCumber关系式计算发射截面谱数据,来研究温度对掺铒光纤光源的影响。

收稿日期: 2014-04-01; 收到修改稿日期: 2014-05-18; 网络出版日期: 2014-08-06

作者简介: 徐宏杰(1968—),男,博士,副研究员,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: 18911906570@189.com

*通信联系人。E-mail: dusaihui@126.com

2 理 论

由于晶格环境的影响^[8-10], 铷离子能级存在 Stark 分裂, 因而其辐射截面和吸收截面特性在一定带宽内形成了谱分布。辐射和吸收同时存在, 而且这两个过程是彼此独立的, 这是 McCumber 关系式的假设条件, 由于粒子的玻尔兹曼分布和各能级的粒子占有率与温度的变化成非线性关系, 因此温度变化对这两个过程的影响是不同的。温度降低时, 上能级和下能级的低亚能级上粒子占有率升高, 即高能量的铷离子数减少, 低能量的铷离子数增加, 铷离子吸收占主导地位。相反温度升高时上能级和下能级的高亚能级上粒子占有率升高, 即高能量的铷离子数增加, 低能量的铷离子数减少, 铷离子发射占主导地位。

当输入功率很小时铷离子数不能发生反转, 波长为 λ 的光波在光纤中传播时, 不同温度下的损耗系数为 $\alpha_{\text{db}}(\lambda, T)$, 沿着 z 轴方向传输的功率 $P(\lambda, z)$ 在光纤中的传播方程为^[11-12]

$$\frac{dP(\lambda, z)}{dz} = -\frac{1}{4.343} \alpha_{\text{db}}(\lambda, T) P(\lambda, z). \quad (1)$$

此外, 光在掺铷光纤中传播时光与铷离子产生相互作用, 光传播的方程又可以写成

$$\frac{dP(\lambda, z)}{dz} = \Gamma(\lambda) [\sigma_e(\lambda, T) N_2(z) - \sigma_a(\lambda, T) N_1(z)] P(\lambda, z), \quad (2)$$

$$N = N_2(z) + N_1(z). \quad (3)$$

在单模条件下有

$$\Gamma(\lambda) = 1 - \exp[-2(A/W_s)^2], \quad (4)$$

式中 $\Gamma(\lambda)$ 为信号光模场与铷离子掺杂之间的重叠积分; $\sigma_e(\lambda, T)$, $\sigma_a(\lambda, T)$ 分别为铷纤的发射截面和吸收截面; N , $N_1(z)$, $N_2(z)$ 分别为光纤 z 处铷离子的总粒子数密度、上能级和下能级的粒子数密度; A 为铷纤芯径; W_s 为信号光的模场直径。

在测量光纤的损耗谱时, 光源的功率非常小, 跃迁到上能级的粒子数很少, 所以 $N_2(z) \approx 0$, 可以忽略。

由(2)~(4)式可得到吸收截面和损耗系数的关系, 即

$$\sigma_a(\lambda, T) = \frac{1}{4.343} \frac{\alpha_{\text{db}}(\lambda, T)}{\Gamma(\lambda) N}, \quad (5)$$

$$N = x \times 10^{-6} \times \frac{N_0 \rho_0}{167.3}, \quad (6)$$

式中 x 为铷离子掺杂浓度; N_0 为阿伏伽德罗常数; ρ_0 为光纤的玻璃密度 (g/m^3)。利用 McCumber 关系^[13]计算发射截面面积为

$$\sigma_e(\lambda, T) = \sigma_a(\lambda, T) \exp[hc(\lambda_0^{-1} - \lambda^{-1})/(kT)], \quad (7)$$

式中 h 为普朗克常数; c 为光速; k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; λ_0 为两截面相等时的波长。

多重态上建立热平衡的时间远小于该多重态的寿命是 McCumber 关系式要求的条件, 由于掺铷光纤上能级的寿命约为 10 ms, 所以这个条件是满足的。可以用光纤的增益谱来确定 λ_0 。

3 实 验

光纤波导中光功率损耗是吸收过程, 散射机制和波导效应共同作用的结果。测量光纤损耗有插入法和截断法。截断法是使用相同的输入耦合光功率, 测量经过一段长的和短的不同光纤的光功率。插入损耗法没有截断法精确, 但它不是破坏性方法。插入法是先测量短光纤的输出功率, 然后通过光纤连接器接入被测光纤, 测量光纤的输出功率。

利用图 1 所示的测试系统, 测量的掺铷光纤为烽火公司的 SE070725M001004。其中光源是自制的, 功率计为拓普光研的 AV6334, 光谱仪为 Yokogawa 公司的 AQ6375。本实验为单模实验, 保持光源输出的光功率不变, 只改变光纤的长度记录下输出光谱, 记录光纤为 100 cm 的光谱 A_1 , 将光纤截断为 20 cm 并记录下光谱数据 A_2 。损耗系数 $\alpha = (A_2 - A_1)/0.8$ (dB/m)。

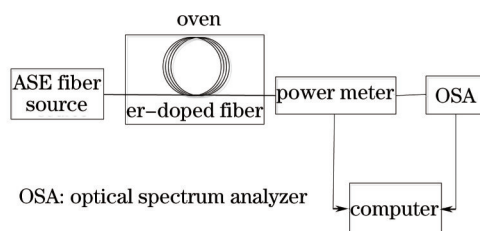


图1 掺铒光纤损耗谱测量的实验装置

Fig.1 Diagram of experimental setup for measurement of loss spectrum of Er-doped fiber

图2给出了在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围内,掺铒光纤在 1500 nm 波段内的损耗谱。可以看到,在波长小于 1536 nm 时损耗系数随着温度升高而减小,而大于 1536 nm 时损耗系数随着温度升高而增大。当温度发生变化时,铒离子的上能级和下能级宽度发生变化,加宽的机制主要是均匀加宽和非均匀加宽,其中均匀加宽主要是声子加宽,声子的能量对温度有依赖性且也光子有关,升高温度会增加声子数,均匀加宽加强。非均匀加宽主要是基质电场引起的加宽,与温度无关。随着温度的升高,因为声子能量增大,能级的展宽有增大趋势。由于温度升高时,多态能级上的低能级的铒离子数增多,波长向长波方向移动,所以在长波方向上,随着温度的升高,长波的损耗系数增大;而在短波方向上,损耗系数减小。

从图2中可以看出当波长为 1529 nm 时损耗达到最大值,温度从 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化时的损耗差值为 0.9265 dB/m 。当波长为 1536 nm 时损耗差值最小为 0.0586 dB/m 。在长波段内,当波长为 1561 nm 时,损耗差值最大为 0.7204 dB/m 。

图3为铒纤在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的损耗差值,从图中可以看出 1560 nm 波段的波长对温度没有 1530 nm 波段的波长敏感,即 1560 nm 波段比 1530 nm 波段的波长温度稳定性好。波长 1536 nm 的损耗差值最小,稳定性最好。

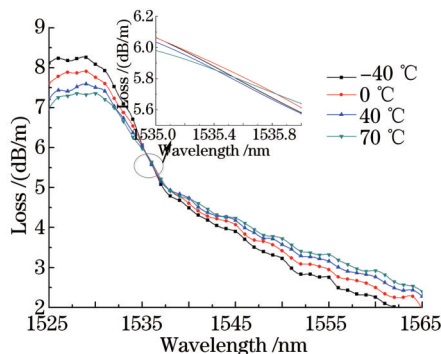
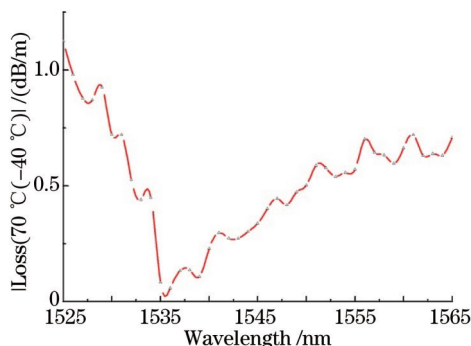


图2 铒纤不同温度下的损耗谱

Fig.2 Loss spectra of an erbium-doped fiber at various temperatures

图3 铒纤 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的损耗差值Fig.3 Loss difference between $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ of an erbium-doped fiber

根据损耗谱数据,再利用(4)~(6)式可算出吸收谱,其中纤芯芯径 $A=3.6\text{ }\mu\text{m}$, $W_s=6.2\text{ }\mu\text{m}$, $x=5035\times 10^{-6}$,掺铒光纤的密度 ρ_0 测量为 $1.498\times 10^6\text{ g/m}^3$,吸收截面谱如图4所示。根据(7)式可得到光纤的发射截面谱,其中 λ_0 根据烽火公司提供的增益谱获得,当 $\lambda_0=1545\text{ nm}$ 时有最大增益。发射截面谱如图5所示。利用本方法计算在 1500 nm 波段的吸收截面和发射截面数据均在 10^{-25} m^2 的数量级,与文献[2-3]中的结果相符合,证明这种方法测量是可行的。

从图4和图5中可以看出,掺铒光纤的发射截面和吸收截面在 1530 nm 处最大,光纤处于强增益状态,各个频率的光都得到增益。另一方面,随着温度降低,短波长的发射截面较长波长的发射截面大,短波光长的受激发射占主导,波长偏向短波方向。从图中还可看出,短波光的吸收截面比发射截面大,而长波光的发射截面比吸收截面大。

本方法是通过实验测量温度-损耗关系,再计算得出温度与吸收截面和发射截面的关系,计算出的参数肯定会存在一定的误差。在测量损耗的时候也不可避免地存在误差,损耗系数的误差主要有两个:1)截断法测量损耗谱时,掺铒光纤需要两次进行熔接,两次和光谱仪连接,每次损耗不同,带入误差。2)掺铒光纤

的输入光是混合光不是单色光,光在掺铒光纤的传播过程中不同波长光之间的相互作用,可能会引入误差。吸收截面和发射截面的误差来源:1) (5)式中系数4.343是近似的;2) 重叠因子 $\Gamma(\lambda)$ 在光传输过程中会发生变化,本方法中设定为定值,在计算中只考虑了光纤轴向的一维光强传输的情况,没有考虑铒离子分布和光场强度的径向变化所引起的重叠因子变化;3) 背景损耗很小,忽略了背景损耗;4) 发射截面是根据 McCumber 关系计算而来,这个公式是在假设能级粒子数满足玻尔兹曼分布条件下讨论的,在推理过程中直接将上能级和下能级的统计权重之比近似为1。

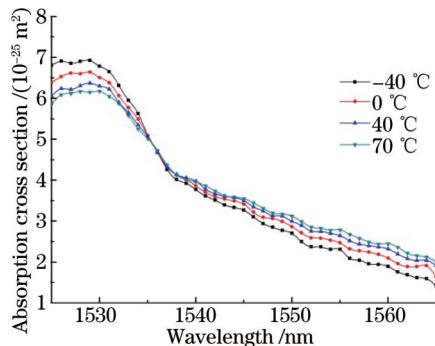


图4 铒纤不同温度下的吸收截面

Fig.4 Absorption cross section spectra of an Er-doped fiber at various temperatures

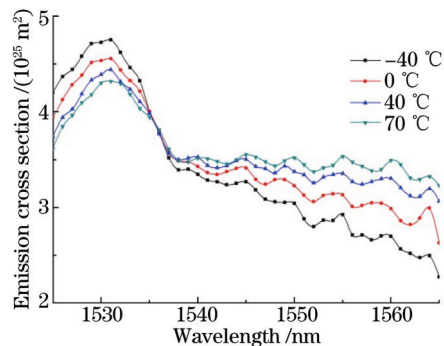


图5 铒纤不同温度下的发射截面谱

Fig.5 Emission cross section spectra of an Er-doped fiber at various temperatures

4 结 论

通过实验测得在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内光纤的损耗系数谱,在波长小于 1536 nm 时,温度升高时,损耗系数减小,在波长大于 1536 nm 时,温度升高时,损耗系数增加。根据测量的损耗系数谱通过计算得到掺铒光纤的吸收截面谱和发射截面谱。吸收截面,发射截面和损耗系数随温度变化具有相同的趋势。在吸收谱计算中忽略了光纤的背景损耗和熔接损耗。如果改善光源的谱质量,实验效果会更好。误差的影响程度将是本文后续的研究工作。

参 考 文 献

- 1 Zhang Guicai. The Principles and Technologies of Fiber-Optic Gyroscope[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 324-326.
张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 324-326.
- 2 Liang Quanting, Granpayeh N. Temperature dependence of the gain in Er-doped fiber amplifiers[J]. Acta Optica Sinica, 1995, 15(8): 1115-1118.
梁铨廷, Granpayeh N. 掺铒光纤放大器增益的温度依赖关系[J]. 光学学报, 1995, 15(8): 1115-1118.
- 3 Nobuyuki Kagi, Akira Oyobe, Kazunori Nakamura. Temperature dependence of the gain in erbium-doped fibers[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(2): 261-26.
- 4 Kemtchou J, Duhamel M, Chatton F, *et al.*. Comparison of temperature dependences of absorption and emission cross sections in different glass hosts of Erbium-doped fibers[J]. Optical Amplifiers and Their Applications, OSA Trends Photon, 1996, 5: 129-132.
- 5 Makoto Yamada, Makoto Shimizu, Masaharu Horiguchi, *et al.*. Temperature dependence of signal gain in Er^{3+} -doped optical fiber amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28 (3): 640-649.
- 6 Suyama M, Laming R I, Payne D N. Temperature dependent gain and noise characteristics of a 1480 nm-pumped erbium-doped fiber amplifier[J]. Electronics Letters, 1990, 26(21): 1756-1758.
- 7 P F Wysocki, M J F Digonnet, B Y Kim, *et al.*. Characteristics of erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(3): 550-567.
- 8 Paul F Wysocki, Nicholas Conti, Douglas Holcomb. Simple modeling approach for the temperature dependence of the gain of erbium-doped fiber amplifiers[C]. SPIE, 1999, 3847: 214-223.
- 9 Maxim Bolshtyansky, Paul Wysocki, Nicholas Conti. Model of temperature dependence for gain shape of erbium-doped fiber amplifier[J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(11): 1533-1540.

- 10 Wysocki Paul F, Byoung Yoon Kim, Digonnet Michel J F, *et al.*. Temperature stabilized broadband light source[P]. European Patent: 0476914A2, 1996-01-17
- 11 Pang Yong, Jiang Peixuan, Xu Daxiong. A simple method for estimating absorption and emission cross sections for erbium-doped fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(12): 1721-1725.
庞 勇, 蒋佩璇, 徐大雄. 掺铒光纤吸收截面和辐射截面的简单估算方法[J]. *光学学报*, 1995, 15(12): 1721-1725.
- 12 An Haozhe, Pang Yong, Jiang Peixuan, *et al.*. Design optimization for Erbium-doped fiber amplifier[J]. *Acta Photonica Sinia*, 1996, 25(1): 68-74.
安浩哲, 庞 勇, 蒋佩璇. 掺铒光纤放大器的优化设计[J]. *光子学报*, 1996, 25(1): 68-74.
- 13 McCumber D E. Theory of phonon-terminated optical masers[J]. *Phy Rev*, 1964, 134(2A): 299-306.