

掺铒光纤吸收截面和辐射截面的简单估算方法

庞 勇 蒋佩璇 徐大雄

(北京邮电大学无线电工程系, 北京 100088)

摘 要 提出了一种利用损耗谱测试数据直接计算吸收和辐射截面的近似方法, 并实际计算了一些掺铒光纤的截面特性。这对掺铒光纤放大器的理论分析和优化设计有着重要的意义。

关键词 掺铒光纤, 吸收截面, 辐射截面。

1 引 言

研究掺铒光纤的吸收和辐射截面对掺铒光纤放大器的理论分析是非常重要的。掺铒光纤放大器的优化设计及增益与噪声谱特性的研究^[1, 2]都需要这方面的数据, 此外, 掺铒光纤放大器具有很大的增益带宽, 能够满足光纤波分复用系统的带宽要求, 但是, 因为由一般的掺铒光纤构成的放大器的增益谱总是不均匀的, 所以实际应用中必须采取一些增益平坦技术^[3]使得放大器增益在所需带宽内变为均匀的, 设计这些特殊结构的掺铒光纤放大器也离不开吸收和辐射截面数据。

铒离子掺杂到光纤中后, 由于本地电场的影响, 铒离子简并的能级产生了分裂, 构成了准能带结构(分裂能级之间的间隔较大), 因而其吸收和辐射截面特性在一定带宽内形成了谱分布, 并且两截面之间存在着位移(辐射截面相对于吸收截面向长波长方向移动了), 这是掺铒光纤放大器具有较大增益带宽的原因, 也是能够采用 1480 nm 泵浦的原因。

要对掺铒光纤放大器进行理论分析, 就必须了解掺铒光纤的吸收和辐射截面特性。吸收和辐射截面数据可以通过不同的方法得到^[4, 5], 通常是首先测试其中某一个截面数据, 然后利用两截面之间的关系推算另一个截面数据。

例如, 可以利用掺铒光纤的吸收系数的测试结果计算其吸收截面^[4], 或者通过自发辐射强度谱分布的测试计算其辐射截面^[5], 再得到其它需要的数据。但是, 由于测试手段以及掺铒光纤制造水平的差异, 这些方法通常是不合适的, 特别是后者。

光纤损耗谱的测试是比较简单的, 而且由于测试用的光源的功率很小, 利用掺铒光纤的损耗谱数据计算吸收截面数据可以提供较好的精度, 因此本文提出了一种通过损耗谱测试数据计算得到吸收截面谱数据, 然后再利用 McCumber 关系式^[6]计算辐射截面谱数据的方法。

2 理 论

假设掺铒光纤在波长 λ 处的损耗系数为 $\alpha(\lambda)$ (dB/m), 则沿光纤轴线坐标 z 方向传输的功率为 $P(\lambda, z)$ 的光在光纤中的传播方程可以写成:

$$\frac{dP(\lambda, z)}{dz} = -\frac{1}{4.343} \alpha(\lambda) P(\lambda, z) \quad (1)$$

另外, 考虑掺铒光纤中的光与铒离子的相互作用, 光传播方程也可以写作如下形式:

$$\frac{dP(\lambda, z)}{dz} = \Gamma(\lambda) \{[\sigma_a(\lambda) + \sigma_e(\lambda)] N_2(z) - \sigma_e(\lambda) N\} P(\lambda, z) - \frac{1}{4.343} \alpha_b(\lambda) P(\lambda, z) \quad (2)$$

其中, $\Gamma(\lambda)$ 是掺铒光纤中铒离子分布与光分布之间的重叠因子, $\sigma_a(\lambda)$ 、 $\sigma_e(\lambda)$ 分别是掺铒光纤的吸收截面和辐射截面, N 、 $N_2(z)$ 分别是掺杂铒离子的总粒子数密度(ions/m³)和掺铒光纤上能级的粒子数密度, $\alpha_b(\lambda)$ (dB/m) 是光纤的背景损耗。(2)式右边第一项表示光纤中铒离子对光的作用, 第二项是光纤的背景损耗。虽然掺铒光纤的损耗主要由铒离子吸收引起, 但是因为目前制作掺铒光纤一般采用水解法, 所以也有可观的背景损耗, 在分析问题时应考虑在内。

因为测试掺铒光纤损耗谱时所用的光源的发射功率非常小, 所以有 $N_2(z) \leq N$, 作为一个较好的近似, 忽略 $N_2(z)$ 是合理的, 那么由(1)式和(2)式就可以得到吸收截面与损耗系数的关系式如下:

$$\sigma_a(\lambda) = \frac{1}{4.343} \frac{\alpha(\lambda) - \alpha_b(\lambda)}{\Gamma(\lambda) N} \quad (3)$$

由于掺铒光纤的铒离子掺杂浓度通常以重量比或粒子数比(ppm)的形式给出, 而(3)式中要求的是单位体积中的粒子数, 所以还必须进行转换。如果已知掺杂浓度为 x (ppm), 则对于重量比和粒子数比, 其转换关系分别表示为(4a)式和(4b)式。

$$N = x \times 10^{-6} \times \frac{N_0 \rho_0}{167.3} \quad (4a)$$

$$N = x \times 10^{-6} \times \frac{N_0 \rho_0}{60.09} \quad (4b)$$

式中 N_0 是阿弗伽德罗常数, ρ_0 是拉制光纤的玻璃密度(g/m³), 167.3 和 60.09 分别是铒的原子量和二氧化硅的分子量。

一个方便而且更为精确的方法是利用 McCumber 关系式表示吸收截面和辐射截面的关系, 这一关系式可以写为:

$$\sigma_e(\lambda) = \sigma_a(\lambda) \exp [hc(\lambda_0^{-1} - \lambda^{-1})/kT] \quad (5)$$

式中 h 、 c 、 k 、 T 分别是普朗克常数、光速、玻尔兹曼常数和绝对温度, λ_0 是两截面相等时的波长。

McCumber 关系式要求的条件是多重态上建立热平衡的时间远小于该多重态的寿命, 由于掺铒光纤的上能级具有约 10 ms 的寿命, 因此这个条件是满足的。McCumber 关系式的一个主要困难是确定 λ_0 , 要精确地得到 λ_0 , 就必须了解各亚能级的位置, 但是即使采用近似值, 也可以得到较好的结果。对于掺铒光纤放大器来说, 可以利用测量得到的增益谱来确定 λ_0 , 因为吸收截面与辐射截面相等时, 对应波长的光信号获得的增益最大^[6]。

根据上面的说明, 本文已建立了利用损耗系数测试结果来获得掺铒光纤的吸收和辐射截面数据的一种简单方法, 下面介绍这种方法实际应用的情况。

3 实 验

测量普通光纤损耗系数的有效方法是剪断法(Cut-Back),它能够提供很好的精度,对掺铒光纤来说更是如此,所以一般采用剪断法测量掺铒光纤的损耗谱。实验装置如图 1 所示。

利用图 1 所示的测试系统,测量了由天津四十六所研制的一系列掺铒光纤的损耗谱,其典型谱形如图 2 所示。

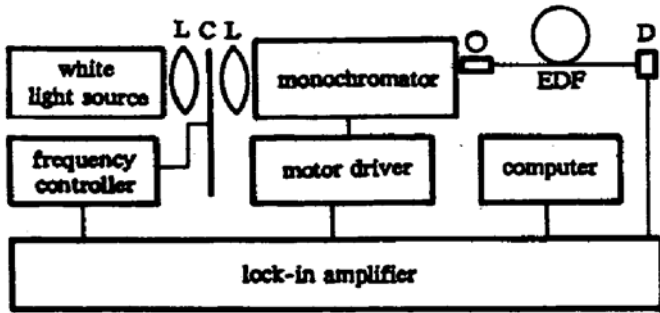


Fig. 1 Diagram of the experimental setup for measurement of loss spectrum of erbium-doped fibers. L: lens, C: chopper, O: objective, D: detector, and EDF: Erbium-doped fiber

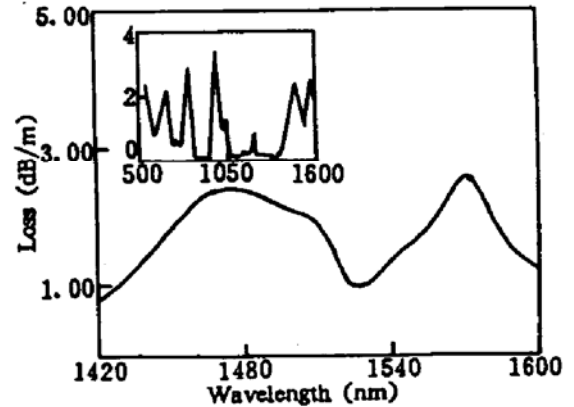


Fig. 2 Loss spectrum in the 1500 nm band of an erbium-doped fiber. The inset shows the measured spectrum from 500 nm to 1600 nm, and the peak absorption in the 980 nm band

图 2 给出了通过测量得到的掺铒光纤在 1500 nm 波段内的损耗谱,并在插图中给出了其从 500 nm 到 1600 nm 波长范围内的损耗系数谱形。可以看到,掺铒光纤在此波长范围内存在着几个吸收峰,本文中关心的是 980 nm 和 1500 nm 两个波段中的吸收峰。需要注意的是,在波长 1200 nm 附近也有一个小峰,它不是掺铒光纤的吸收峰,国外文献提供的损耗谱曲线中也没有这个峰。引起这个峰的原因尚未确定,但有两个可能的因素,其一是由于模式截止产生,因为这批掺铒光纤的截止波长恰好在 1200 nm 附近,而国外掺铒光纤的截止波长一般不在此波长处,由于剪断法是对长光纤和短光纤进行两次测试,所以模式截止引起的损耗的影响可能是比较大的;另一个可能的原因是光纤中存在其它杂质。本文认为前者的可能性更大。

利用损耗谱数据可以直接计算掺铒光纤的吸收截面谱,但是要进一步计算辐射截面谱,则还需要确定 λ_0 , 上节说明了可以由测量增益谱的方法确定 λ_0 , 由于这种方法需要宽带的连续可调信号源,所以很不方便。实际上,可以利用放大的自发辐射谱来近似决定 λ_0 , 因为放大的自发辐射是在掺铒光纤获得增益后发射的,所以,它不仅近似地反映了掺铒光纤的自发辐射特性,而且也近似地反映了其增益特性,因此可以认为当被测光纤很短时放大的自发辐射谱趋向于自发辐射谱,而当被测光纤很长时放大的自发辐射谱趋向于增益谱;实验中也发现掺铒光纤的放大的自发辐射谱的峰值会随光纤长度的变化而发生移动(没有特定的规律),说明用较长光纤的放大的自发辐射谱来近似代替增益谱的方法是合理的。

图 3 是一根约 2 m 长的掺铒光纤的前向放大的自发辐射谱,可以看出其峰值大约在 1560 nm 处。图 3 是根据光谱分析仪的分析结果得出的,曲线短波长处的斜坡是由于 1480 nm 泵浦源的剩余光造成的。作为一个近似计算的实例,本文中将令 $\lambda_0 = 1560$ nm, 要更精确

地确定 λ_0 , 可以使用更长的掺铒光纤, 并提高泵浦源的功率, 为了避免泵浦源的影响, 可以采用其它波段的泵浦源, 或者利用后向放大的自发辐射谱。

由于未得到这批掺铒光纤的掺杂浓度, 所以只能根据经验估计, 经验表明, 在 980 nm 波段的吸收峰, 大约 0.005 dB/m 的损耗相当于 1 ppm 重量比, 对于本文所考虑的光纤, 其浓度约为 640 ppm。掺铒光纤的密度经测量约为 $1.358 \times 10^6 \text{ g/m}^3$ 。另外, 从图 2 的插图中可以看出, 此掺铒光纤的背景损耗约为 0.1 dB/m。 $\Gamma(\lambda)$ 取为 0.4。

根据(3)式、(4a)式和(5)式计算出此掺铒光纤在 1500 nm 波段的吸收截面谱和辐射截面谱, 如图 4 所示, 其中实曲线是吸收截面谱, 虚曲线是辐射截面谱。从图中可以看到, 在 1450~1510 nm 这段波长范围内, 掺铒光纤有较大的吸收截面和较小的辐射截面, 这意味着 1480 nm 波段泵浦源的线宽要求可以不必非常严格, 除非是在对噪声特性有特殊要求的系统中, 才需要对泵浦波长进行优化选择(例如前置放大器, 可将泵浦波长选得较短, 以提高粒子数反转率, 降低放大器的噪声指数); 在 1540~1600 nm 波长范围内, 则辐射截面接近或大于吸收截面, 这就是信号的增益带, 实际上这个范围可以扩展到 1600 nm 以外, 但是因为测试仪器的限制, 图中未能表示出来。

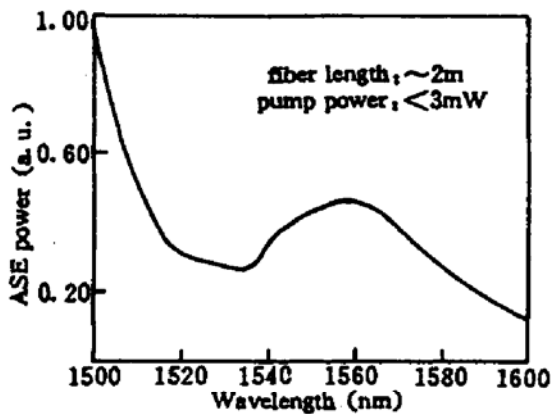


Fig. 3 ASE spectrum in the 1500 nm band of an erbium-doped fiber

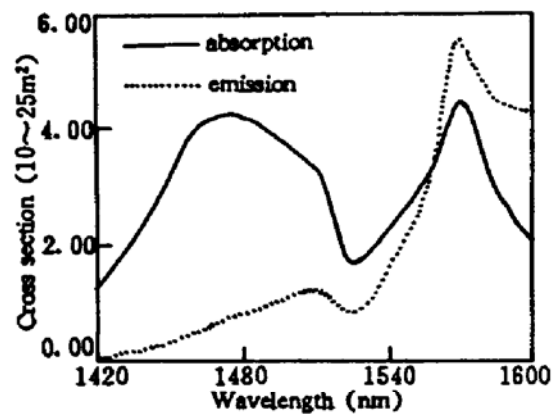


Fig. 4 Cross section spectra in the 1500 nm band of an erbium-doped fiber

利用本文提出的方法计算了掺铒光纤在 1500 nm 波段的吸收截面和辐射截面谱, 这些截面数据均在 10^{-25} m^2 的数量级, 与文献中的结果符合, 说明这种方法是比较有效的。

4 结 论

1) 从光在掺铒光纤中的传播特性出发, 得出了掺铒光纤的吸收截面与其损耗系数之间的关系, 并利用这一关系得到掺铒光纤的吸收截面谱, 进而通过 McCumber 关系式计算出其辐射截面谱, 这些结果都与文献中的符合, 说明本文提出的方法是有效的。

2) 提出了利用放大的自发辐射谱来确定 McCumber 关系式中的 l_0 的方法, 这是基于信号增益最大处的吸收截面与辐射截面相等的条件近似得到的, 因此尚需增益测量实验的证实。

3) 还对掺铒光纤损耗谱中在 1200 nm 附近的奇怪吸收峰进行了初步的解释, 认为是模式截止引起的附加损耗产生的, 如果的确是这个原因的话, 那么用其它方法(例如量热法)测出的损耗谱中应该没有这个峰。

参 考 文 献

- [1] C. R. Giles, D. DiGiovanni, Spectral dependence of gain and noise in erbium-doped fiber amplifiers. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1992, 2(11): 797~800
- [2] E. Desurvire, J. W. Sulhoff, J. L. Zyskind *et al.*, Study of spectral dependence of gain saturation and effect of inhomogeneous broadening in erbium-doped aluminosilicate fiber amplifiers. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1990, 2(9): 653~655
- [3] M. Tachibana, R. I. Laming, P. R. Morkel *et al.*, Erbium-doped fiber amplifier with flattened gain spectrum. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1990, 3(2): 118~120
- [4] M. Ohashi, Design considerations for an Er^{3+} -doped fiber amplifier. *J. Lightwave Technol.*, 1991, 9(9): 1099~1104
- [5] B. Pedersen, A. Bjarklev, J. H. Povlsen *et al.*, The design of erbium-doped fiber amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1991, 9(9): 1105~1112
- [6] B. Pedersen, K. Dybdal, C. D. Hansen *et al.*, Detailed theoretical and experimental investigation of high-gain erbium-doped fiber amplifier. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1990, 2(12): 863~865

A Simple Method for Estimating Absorption and Emission Cross Sections for Erbium-Doped Fibers

Pang Yong Jiang Peixuan Xu Daxiong

(Department of Radio Engineering, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100088)

(Received 28 September 1994)

Abstract Information of the erbium-doped fiber's absorption and emission cross sections is very important for theoretical analysis and optimum design of erbium-doped fiber amplifiers. In this paper, we offered a approximate method for estimating these cross sections, which performed a direct calculation using the experimentally measured data of loss spectrum.

Key words erbium-doped fiber, absorption cross section, emission cross section.