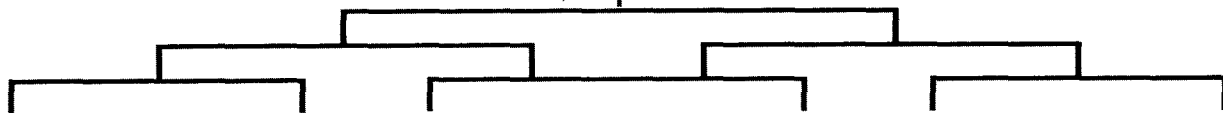


EDFA光纤放大器原理及应用(1)



丁 炜 济南历泰信息科技有限公司

第一部分 掺铒光纤的放大原理

全光通信,一直是人类追求的目标,而作为全光通信技术的核心,光放大器一直是关注的焦点。光放大器的优越性主要表现在如下几个方面:(1)直接对光信号作低噪声放大,使中继站简单化、小型化,也更为价廉;(2)线路的分支损耗很容易补偿,信号可以直接以光的形式处理,因而使光纤传输网络极为灵活可变;(3)对信号“透明”,其性能与所传输电信号的形式、比特率和调制方式无关,更新系统只需更换终端设备;(4)频带极宽,达1~4THz,便于超高速传输、波分复用和光频分复用,可更有效的利用光纤的带宽资源。1987年,英国南安普敦大学首次报道了掺铒光纤放大器(EDFA)的研制成功,把光纤放大器的研究和开发推进到了一个新的阶段。EDFA的实用化引发了一场光纤通信技术的革命,它促进和推动了光纤通信领域中几项重大新技术的发展,可望使光纤通信的整体水平上一个新的台阶,它已经、也必将继续对光纤通信的发展产生深远的影响。

EDFA是固体激光技术与光纤制造技术结合的产

.....
 挥着更加重要的作用,它可以提供路由调度、保护、恢复等作用。OXC在未来全光网中扮演着重要的角色,虽然目前它还处于实验阶段,但是预计在未来的几年里必将走向实用化^[2]。

3 结束语

DWDM系统中的光器件技术远不止这些,还有激光器、泵浦光、探测器、波长转换器、耦合器、偏振器、均衡器等在DWDM的全光通信系统中都不可缺少,随着DWDM系统应用的不断加强,人们对光器件

物,其关键技术有二:其一是掺铒光纤,其二是泵浦源。

1 掺铒光纤的物理特性

1.1 光纤的掺杂

掺铒光纤是使EDFA具有放大特性的关键技术之一,它多用石英光纤作为基质,也有采用氟化物光纤的。在细微的光纤芯中掺入固体激光工作物质——三价铒离子,与铒一起掺在纤芯部分作为折射率提升元素的通常还有锗或铝。Al/Er光纤与Ge/Er光纤的性质有很大不同:(1)Ge/Er光纤因锗和铒不能彼此连接,故只允许较低浓度的铒掺杂,而Al/Er光纤允许更高的铒掺杂浓度,同时因为铒离子与铝-氧群形成了一个复合体,故铒离子被紧紧束缚于铝的位置,易于控制,而且三氧化二铝在预制棒缩棒过程中不挥发,在中心不产生折射率的凹陷,也避免了铒离子的减少,直接改善了有源光纤的效率。(2)Ge/Er光纤的峰值发射波长为1535nm,而Al/Er光纤的发射波长

的研究也在不断的深入。总之,新型光器件的出现将促进全光网络的快速发展,而全光网络的实用化又将给光器件的发展带来机遇。

参考文献

- 1 DWDM shaping the future communications network, Stamatis V. Kartalopoulos, October 2004
- 2 徐荣、龚倩.高速宽带光互联网技术.人民邮电出版社
- 3 杨祥林等.光放大器及其应用.电子工业出版社.1999
- 4 Carena A, Curri V, Poggiolini P. Comparison between different configurations of Hybrid Raman/Erbium-Doped Fiber Amplifiers. OFC 2001, Anaheim, California, March 2001, paper TUA3
- 5 毛谦.新型光纤及其标准.电信工程技术与标准化▲

为 1530nm, 且其荧光谱平坦得多, 但 Ge/Er 光纤的发射截面比 Al/Er 光纤的高, 荧光寿命也比 Al/Er 光纤的长, 因此现在商用的掺杂光纤往往是 Al/Ge/Er 共掺。光纤的掺杂有一个最佳掺杂浓度的问题, 一般用光纤中掺杂粒子的质量占光纤芯总质量的比例来衡量掺杂浓度, 以 ppm 表示。如果掺杂浓度低, 入射光子数超过了掺杂离子数, 处于基态的离子有可能被耗尽, 从而限制了信号的放大, 要想提高增益需加大离子浓度, 但离子浓度增高会带来两方面的问题: 第一是浓度猝灭, 即较高的掺杂浓度将导致相邻能级无辐射交叉弛豫, 使激光上能级的粒子数下降, 产生猝灭; 第二, 在掺杂光纤中, 非晶体的稀土元素离子, 在荧光谱中出现附加的窄线谱, 材料中的微晶结构将受到泵浦激光波长的精确度的影响。为获得最好的激光输出, 最佳掺杂比一般为数百 ppm。

1.2 掺铒光纤的工艺制造

掺铒光纤的制造是以传统的改进化学气相沉积工艺、气相轴向沉积工艺、外气相沉积工艺为基础, 结合气相掺杂技术或液相掺杂技术来完成的, 其中液相掺杂技术使用的更为普遍。在掺铒光纤放大器技术中, 掺铒光纤工艺至关重要, 在光纤中可认为信号光与泵浦光的场近似高斯分布, 在光纤芯轴线上的光强最强, 所以掺杂时尽量使杂质粒子集中在近轴区域, 以使光与物质的作用最充分, 从而提高能量转换效率。一般单模光纤纤芯直径在 9 微米左右, 如果将掺杂光纤拉得比常规光纤更细, 可提高信号光和泵浦光的能量密度, 从而提高其相互作用的效率。但芯径的减小将会带来新的问题, 芯径小的掺杂光纤与常规光纤的模场不匹配, 从而带来较大的反射和连接损耗。通常的解决办法是在光纤中掺氟元素, 以降低其折射率(并不改变半径), 从而改变模场直径, 使之增大到与常规光纤可匹配程度, 此时连接损耗可以降至 0.5dB 以下, 这种方法称为扩散成锥法, 即在光纤尾端形成模场直径锥。

在掺铒光纤的制造过程中还有一个最佳掺杂光纤长度的问题。掺杂光纤太短, 掺杂离子对泵浦光的吸收不充分, 不能形成离子数反转; 掺杂光纤太长, 在输出端介质吸收激光光子, 使输出功率下降。因而掺铒光纤存在一个最佳长度, 以获得最小的阈值功率, 使所能得到的泵浦光子数和离子反转数在泵浦端达到最大值, 以充分得到高的泵浦光转换效率。

2 掺铒光纤的放大特性

2.1 掺杂光纤放大机理

掺稀土元素的光纤是增益介质。当光束入射进光纤, 由于介质的吸收, 入射光所携带的能量将介质中的电子激发到较高的能级, 通过弛豫, 电子从高能级跃迁到基态而释放能量, 发射出光子。光子的发射有两种形式: (1) 自发辐射, 即原来处于激发态的上能级的电子数随时间指数减少, 产生自发辐射; (2) 受激辐射, 即一个能量等于激发能级与基态能级之差的光子入射到介质中时, 激发一个与入射光子同相位的光子, 其具有相干性, 产生受激辐射。用光子能量较高的光源进行泵浦, 使受激辐射所占的比例大于自发辐射。在存在增益的条件下, 受激辐射所产生的光子继续诱发受激辐射, 使光子流增强, 当满足如下条件时, 产生放大和产生激光: (1) 离子数反转, 处于激光上能级的粒子数超过处于激光下能级的离子数, 介质受激辐射, 产生增益和放大; (2) 高于阈值功率进行泵浦, 形成离子数反转, 产生激光输出, 且输出功率基本正比于输入的泵浦功率。

2.2 掺铒光纤的放大原理

在常态下, 所有的粒子均处于基态能级, 当泵浦光能量足够时, 被泵浦光抽运到上能级而停留在亚稳态能级上的粒子数会超过基态上剩余的粒子数, 这就被称为离子数反转, 基态上的粒子数越少则反转程度越高, 基态离子数被抽空时即为全反转。当信号光通过光纤时, 会引起亚稳态粒子的受激发射和基态粒子的受激吸收, 粒子数反转条件满足时, 受激发射大于受激吸收, 信号光被放大, 反转程度越高, 放大能力越强。掺铒光纤放大器成功的一个关键就在于所需的泵浦功率很低。

铒离子的外层电子是三能级结构, 利用铒离子作为激光工作离子对 1550nm 波信号的光放大, 其能级模型为三能级系统, 如图 1 所示。

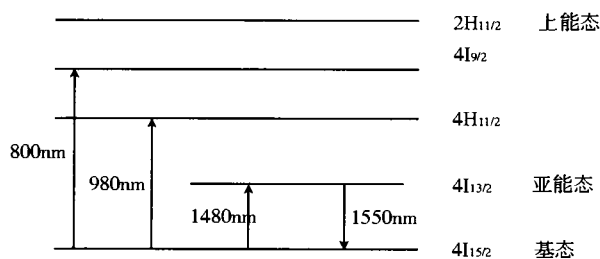


图 1

当用高功率泵浦源来激励掺铒光纤时, 使铒离子形成离子数反转, 处于受激的亚稳态的电子数多于基态, 亚稳态与基态之间的能级为 0.8eV, 与 1550nm 波

长的光子能量相近。当 1550nm 波长的信号光的光子入射进已被泵浦光激发至离子数反转的掺铒光纤时,两者之间存在量子力学的谐振效应,导致亚稳态离子返回基态,释放出与入射波长相同的额外光子,形成光放大;相反,入射光也可能激发处于基态的离子到亚稳态而被吸收,但只要铒离子处于粒子数反转分布态,则谐振辐射总是大于吸收,导致入射光的增强,产生光放大。离子数的变化可以用速率方程描述在每个能级上,离子数变化的速率由自发跃迁和受激跃迁这两个速度决定,三个能级 E1、E2、E3 上的离子数分别为 N1、N2、N3,以矩阵形式表示离子数的变化为:

$$d[N1\ N2\ N3]/dt = \begin{pmatrix} -(W+R) & (W+r_{31}) & (r_{31}+R) \\ W & -(r_{31}+W) & r_{32} \\ R & V & -(r_{31}+r_{32}+R) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N1 \\ N2 \\ N3 \end{pmatrix}$$

式中 R 表示泵浦速率,与泵浦强度成正比;W 表示能级激发功率;r 表示材料参数;V 表示泵光频率。

在铒离子的情况下:(1)离子不会在能级 E3 停留很久,即迅速弛豫到能级 E2;(2)在没有信号场存在的情况下,能级 E2 上的离子要停留很长的时间;(3)E1 能级的离子数不受受激辐射的干扰,类似于工作在小信号情况下,可得到:

$$\begin{cases} dN_1/dt = -(W+R)N_1 + (W+r_{21})N_2 \\ dN_2/dt = WN_1 + (W+r_{21})N_2 \end{cases}$$

考虑到:(1)在稳态情况下,能级的离子数变化率为零;(2)处于三能级的离子密度之和必等于总的离子浓度 Nt,即: $N1+N2+N3=Nt$,由上面两式可得到: $N1 = (W+r_{21})Nt/(2W+R+r_{21})$, $N2 = (W+R)Nt/(2W+R+r_{21})$, N1、N2 表达式描述了在给定泵浦速率 R 下铒离子的离子数密度的特性,式中的材料特性参数 r_{21} 依赖于光纤波导特性、光纤泵浦与信号场的重叠情况,以及纤芯中掺杂离子的浓度分布。

泵浦速率是沿光纤轴 Z 而变化的,离子数浓度 N 也随 Z 而变化。当泵浦光沿掺铒光纤传输时,泵浦波的功率转换到信号光,产生增益使信号光放大。光增益用增益系数来度量,增益系数 $g(z) = N_2(z)\delta k(V) - N_1(z)\delta A(V)$,式中 δk 为频率 V 时的发射截面, δA 为频率 V 时的吸收截面。

在掺铒光纤中,除受激发射外,亚稳态能级上的粒子还存在着自发发射。自发发射无规律性,而且向各个方向,其中被掺铒光纤波导俘获而在光放大器中传输的那部分自发发射光也被放大器放大,这就是被放大的自发发射,简称为 ASE。与信号同向传输的被称为前向 ASE,相对于信号反向传输的被称为后向

ASE。自发辐射与光信号伴生毫无益处,它与待放大的光信号一起参与激光物质粒子的受激辐射,与信号竞争,自身得到放大,同时消耗高能级的粒子,降低信号增益。更严重的是放大的自发辐射传到接收端,在对光信号进行检波时与信号光一起形成拍频噪声,这将降低系统的信噪比,限制光接收机的灵敏度。

3 掺铒光纤的泵浦原理及泵浦源

掺铒光纤之所以有放大作用是由于其中的掺杂离子在泵浦光的作用下形成离子数反转,从而对入射光信号提供光增益。对于波长为 980nm 的泵浦源,铒离子通过受激吸收入射波长为 980nm 的光子的能量,从基态能级跃迁到高能态能级。由于高能态能级到亚稳态能级的弛豫时间很短,高能态能级上的粒子很快跃迁到亚稳态能级,高能态上的粒子数基本上可以认为是 0。亚稳态能级到基态能级的弛豫时间比较长,为 ms 量级,当有波长为 1550nm 左右的信号光子输入时,亚稳态能级的粒子受激辐射向基态能级跃迁,产生与入射光子同频、同相、同方向的光子,于是入射光就得到放大。

光纤放大器的实质是光能从泵浦波长到信号波长的转换,因而泵浦源是掺铒光纤放大的核心。掺铒光纤放大器的泵浦源必须满足两个条件:即其波长与铒离子能级跃迁相适应,同时要有足够高的输出功率。

铒离子 E_r^{+3} 有许多吸收带,在这些吸收带上,它能够吸收光子。从铒离子的吸收谱可以看到,其吸收带在 0.65 μm 、0.80 μm 、0.98 μm 、1.48 μm ,这些频带都可以用来泵浦一个 EDFA。选用的原则是:泵浦效率要高,同时还必须有相应频率的激光器作泵浦源。0.65 μm 、0.80 μm 都曾用过,但这些方案泵浦效率低,泵浦光源的体积也大,不适合在光通信中应用。0.98 μm 和 1.48 μm 大功率半导体激光器的研制成功,是 EDFA 实用化的前提。

常用泵浦效率 W_p 来衡量泵浦的有效性。泵浦效率定义为放大器增益与所吸收的泵浦功率之比: $W_p = \text{放大器增益(dB)}/\text{泵浦功率(mW)}$ 。不同吸收频率处,泵浦效率相差较大,表 1 中一组数据说明了不同吸收频率泵浦效率的差异。

选用泵浦工作频带的一个重要因素是无激发态吸收。在理想的系统中,处于激发态的粒子,在受到外来光的激发时,应是向低能级跃迁而发出光子。激发吸收是指处于激发态的粒子吸收泵浦光(或信号光)

表 1

泵浦波长	泵浦效率
0.532 μm	1.35dB/mW
0.8 μm	0.8dB/mW
0.98 μm	4.9dB/mW
1.48 μm	3.9dB/mW

后向更高的能级跃迁, 这些离子或者立即回到亚稳态, 一个光子被浪费掉转换成光纤中的热量; 或者跃迁到基态, 辐射出短波长的荧光。无论如何变换, 它都造成泵浦能量的损耗。除此之外, 造成泵浦能量浪费另一个原因是上转换。当掺铒光纤浓度和泵浦效率较高时, 由于亚稳态能级上粒子与粒子之间十分接近, 相互作用的结果是双向的能量转移和交叉弛豫。一个粒子将能量传递给另一个粒子后跃迁进到基态, 另一个粒子接收到能量后跃迁到更高能态。更高能态上的粒子同样有两种去向: 发出一个声子回到亚稳态或者辐射荧光回到基态, 均造成泵浦能量的损失。抑制上转换可以通过降低掺杂浓度来实现。

由于激发态吸收一般要影响到泵浦光的利用率及信号光的衰减, 因而泵浦源应选在无激发态吸收的那些能带。0.96 μm 、1.48 μm 泵浦对应着铒离子无激发态吸收的那些能带, 因而是备受重视的两个泵浦波长。铒离子的跃迁在 970~980nm 有一个吸收带, 有相当大的吸收截面, 不存在激发态吸收且其受激发射截面是零。在这个波长的泵浦放大器已被证明有最佳的性能, 其最高泵浦效率可达 11dB/mW, 噪声也比较低(接近 3dB 量子极限)。铒离子能被 1480nm 波长的泵浦直接激发到亚稳态, 它能产生增益的原因是其吸收截面和发射截面之间有一个错位。它的泵浦波长范围很宽, 1480nm 波长是一个最优值。当泵浦波长低于 1480nm 时, 泵浦吸收降低, 从而使增益降低; 当泵浦波长移向长波长时, 虽然泵浦吸收增加, 然而泵浦波长的发射亦增加, 同样导致增益下降。1480nm 激光器可以采用 InGaAs 量子阱, 也可以采用基于 InP 基底的 InGaAsP。这个泵浦波段也不存在激发态吸收, 放大器性能也很好, 最高泵浦效率可达 6.5dB/mW。但由于泵浦波长上的受激发射截面不为零, 不可能达到离子数全反转, 因而其噪声比 980nm 泵浦高约 1dB 左右。

0.98 μm 和 1.48 μm 比较起来, 增益高、泵浦效率高、噪声小(噪声系数可低至 3dB), 具有很大的吸引力, 是目前光纤放大器的首选泵浦波长。1.48 μm 的优点是: 它和信号光的波长相近, 因为 1.55 μm 的单模光

纤对信号光和泵浦光都是单模传输, 从而可用单模光纤制成正向耦合器, 将信号光和泵浦光低损耗的导入光纤。特别是在制造低掺杂分布型掺铒光纤放大器时, 应用这一波段的泵浦更为有利, 因此 1.48 μm 波长也得到了高强度的开发和研究。由能级图可以看出, 0.98 μm 泵浦属三能级系统; 1.48 μm 所对应的能级与工作的高能级 1.55 μm 属同一准能带。泵浦源将基态粒子泵浦到与 1.48 μm 相应的能级上, 它是不稳定的, 将很快衰减到工作能级 E2 上, 与基态间形成离子数反转分布。因而, 它属于二能级系统。

4 掺铒光纤的泵浦方式

泵浦源为光放大器源源不断地提供能量, 在放大过程中将能量转换为信号光的能量。对泵浦源的要求: 一是效率高, 二是简便易行。目前实用化的有同向泵浦、反向泵浦、多重泵浦三种。

(1) 同向泵浦。该种方式泵浦光与信号光从同一端注入掺杂光纤。在掺铒光纤的输入端, 泵浦光较强, 故粒子翻转激励也强, 其增益系数大, 信号一进入光纤即得到较强的放大。但由于吸收, 泵浦光将沿光纤长度而衰减, 这一因素使在一定的光纤长度上达到增益饱和而使噪声增加。同向泵浦的优点是结构简单, 缺点是噪声性能不佳。

(2) 反向泵浦, 也称为后向泵浦。在这种方案中, 泵浦光与信号光从不同的方向输入掺铒光纤, 两者在光纤中反向传输。其优点是: 当光信号放大到很强时, 泵浦光也很强, 不易达到饱和, 因而噪声性能很好。

(3) 多重泵浦。为了使 EDFA 中杂质离子得到充分激励, 必须提高泵浦功率, 可用多个泵浦源激励掺铒光纤, 几个泵浦源可同时前向泵浦, 同时后向泵浦; 或部分前向泵浦, 部分后向泵浦。后者称为双向泵浦。在有线电视系统应用中, 光放大器一般都采用双泵浦源双向泵浦结构。这种泵浦结构结合了同向泵浦和反向泵浦的优点, 使泵浦光在光纤中均匀分布, 从而使其增益在光纤中均匀分布。

光纤放大器, 特别是掺铒光纤放大器是有线电视发展过程中的一项主要的推进技术。掺铒光纤与泵浦源是光放大器的核心器件与关键技术。在实际的光放大器应用中, 还有掺镨氟化物光纤放大器、拉曼放大器和半导体光放大器等, 但这些光放大器在有线电视网络中的应用还受到技术和经济方面的挑战。▲

(未完待续)