



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 98801191.3

[45] 授权公告日 2004 年 1 月 28 日

[11] 授权公告号 CN 1136637C

[22] 申请日 1998. 8. 18 [21] 申请号 98801191. 3

[30] 优先权

[32] 1997. 8. 20 [33] US [31] 08/915,129

[86] 国际申请 PCT/US98/17137 1998. 8. 18

[87] 国际公布 WO99/09622 英 1999. 2. 25

[85] 进入国家阶段日期 1999. 4. 20

[71] 专利权人 迪泰克有限公司

地址 美国加利福尼亚州

[72] 发明人 萨利姆·N·贾布尔

审查员 肖霞

[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所

代理人 张政权

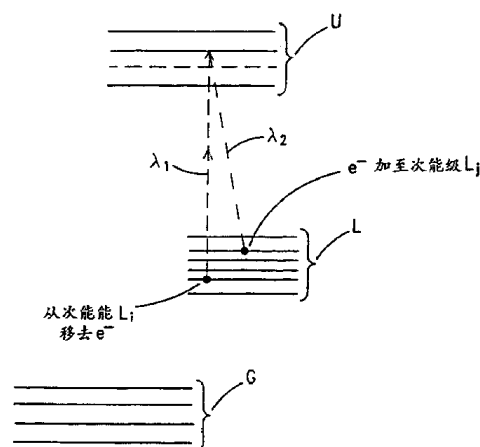
权利要求书 4 页 说明书 7 页 附图 6 页

[54] 发明名称 具有动态成形的增益的光放大器

[57] 摘要

揭示了一种系统和方法，通过有选择地控制光放大器的有源增益元素的电子能级的至少一个斯塔克次能级的电子粒子数，调节包括抽运激光器和有源增益元素的光放大器的增益曲线。通过动态地控制选出的斯塔克次能级的电子粒子数，可以使有源增益元素的增益曲线平直。在控制电子粒子数的第一种方法中，在有源增益元素的同一能量簇的一对斯塔克次能级之间引起双光子跃迁。通过两个附加的抽运激光器激发双光子跃迁，该抽运激光器工作于这样的波长，其差接近于被移动的电子之间的成对斯塔克次能级中的能量差。在控制电子粒子数的第二种方法中，在有源增益元素的不同能量簇的一对斯塔克次能级之间引起单光子跃迁。通过附加的抽运激光器激发单光子跃迁，该抽运激光器工作于接近能级对之差的频率差。另外，通过以选出的波长操作放大器的抽运激光器激发单光

子跃迁，以同时产生从有源增益元素的基能级到较高能级的电子跃迁，和从选出的上激光能级的斯塔克次能级到更高的能级的电子跃迁。



1. 一种光放大器, 其特征在于包括:

抽运激光器;

掺有稀土离子的放大光纤, 该稀土离子具有电子基能级、下激光能级、上激光能级和多重较高电子能级;

光导器件, 用于同时把来自抽运激光器的光和输入信号光导入放大光纤;

电子粒子数重新分布系统, 它被构造成使光放大器的增益分布变平坦, 包括至少一个附加的抽运激光器, 结构成有选择地通过至少一个双光子喇曼跃迁将电子从稀土离子的电子能级的一个斯塔克次能级转移到第二斯塔克次能级, 所述喇曼跃迁包括从一个斯塔克次能级至第二能级的第一跃迁以及从第二能级至第二斯塔克次能级的第二跃迁, 第一能级不同于包括第一和第二斯塔克次能级的第二能级, 以及

至少一个附加的光导器件, 用以将光从附加的抽运激光器引导至放大光纤。

2. 如权利要求 1 所述的光放大器, 其特征在于, 构造电子重新分布系统以通过有选择地调节稀土离子的电子能级的至少一个斯塔克次能级的电子粒子数, 在整个波长范围内调节光放大器的增益曲线, 该至少一个斯塔克次能级是从包含下激光能级和上激光能级的组中选出的。

3. 如权利要求 1 所述的光放大器, 其特征在于, 光导器件包括至少一个组合器, 稀土离子包括钕和镨氧化物中一种或多种, 通过有选择地调节稀土离子的电子能级的至少一个斯塔克次能级的电子粒子数, 构造电子重新分布系统以使光放大器随波长的增益分布变平坦至少一个斯塔克次能级从包含下激光能级和上激光能级的组中选出。

4. 如权利要求 1 所述的光放大器, 其特征在于, 至少一个附加的抽运激光器包括分别工作于第一和第二光波长的两个抽运激光器, 这样, 第一与第二波长的光子能量之间的差值接近于一对斯塔克次能级之间的能量差。

5. 如权利要求 4 所述的光放大器, 其特征在于该对斯塔克次能级从稀土离子的上激光能级的一组电子能级中选出。

6. 如权利要求 4 所述的光放大器, 其特征在于第一光波长从 504 至 525nm, 600 至 650nm, 700 至 750nm, 750 至 820nm, 1110 至 1170nm, 1650 至 1700nm 的

范围之一中选出,第二光频率对应于从 504 至 525nm, 600 至 650nm, 700 至 750nm, 750 至 820nm, 1110 至 1170nm, 1650 至 1700nm 的范围之一中选出的波长。

7. 如权利要求 1 所述的光放大器,其特征至少在于一个附加的抽运激光器包括工作于选出的波长的一个抽运激光器,使电子从上激光能级中选出的斯塔克次能级跃迁到较高的能级。

8. 如权利要求 1 所述的光放大器,其特征在于所述光纤中的稀土离子包括铒氧化物,抽运激光器波长为包括 980nm 和 1480nm 的组中的一个,附加的抽运激光器波长从包括 504 至 525nm, 600 至 650nm, 700 至 750nm, 750 至 820nm, 820 至 870nm, 1110 至 1170nm, 1650 至 1700nm 范围的组中选出。

9. 如权利要求 1 所述的光放大器,其特征在于所述光纤中的稀土离子从包括铽和镨氧化物的组中选出,抽运激光器波长从包括 490nm, 520nm, 550nm, 910nm, 1015nm 和 1060nm 的组中选出。

10. 如权利要求 1 所述的光放大器,其特征在于电子粒子数重新分布系统进一步包括控制器,该控制器能够监视放大器输入和输出功率的至少一个,并调节抽运激光器功率和波长,以达到所需的增益曲线。

11. 如权利要求 10 所述的光放大器,其特征在于该控制器包括用以监视光放大器输出的光谱分析仪。

12. 如权利要求 10 所述的光放大器,其特征在于该控制器包括用以监视光放大器输出的一组滤光器。

13. 一种光放大器,其特征至少在于包括:

具有稀土离子的放大光纤,该稀土离子具有电子基能级、下激光能级、上激光能级和多重较高电子能级;

具有经选择的波长的抽运激光器,以同时使电子从稀土离子的基能级跃迁到较高能级之一,并使电子从上激光能级中选出的斯塔克次能级跃迁到更高能级;以及

光导器件,用于同时把来自抽运激光器的光和输入信号光引导到放大光纤。

14. 如权利要求 13 所述的放大器,其特征至少在于所述光纤中的稀土离子包括铒氧化物,抽运激光器波长为包括 960 至 990nm, 800 至 850nm, 630 至 670nm, 500 至 530nm 一组范围内的一个范围。

15. 如权利要求 14 所述的放大器,其特征至少在于所述光纤中的稀土离子从包

括铒和镨氧化物的组中选出,抽运激光器波长从包括490nm, 520nm, 550nm, 910nm, 1015nm 和 1060nm 的组中选出。

16. 在包括抽运激光器、放大光纤和光导器件的光放大器中,一种控制次能级电子粒子数的方法,所述放大光纤用具有电子基能级、下激光能级、上激光能级和多重较高电子能级的稀土离子掺杂,每个电子能级具有多重次能级,所述光导器件用于同时把来自抽运激光器的光和输入信号光引导到放大光纤,其特征在于所述方法包括如下步骤:

通过至少一个双光子喇曼跃迁实现能级之一的次能级之间的跃迁,所述双光子喇曼跃迁包括从一个能级中的第一斯塔克次能级至第二能级的第一跃迁,以及从第二能级至第一能级中的第二斯塔克次能级的第二跃迁,该一个能级不同于第二能级。

17. 如权利要求16所述的方法,其特征在于进一步包括通过有选择地控制稀土离子的电子能级的至少一个斯塔克次能级的电子粒子数,在整个波长范围内调节光放大器增益曲线的步骤,该至少一个斯塔克次能级从包括下激光能级和上激光能级的一组中选出。

18. 如权利要求17所述的方法,其特征在于调节光放大器增益曲线的步骤包括使光放大器的增益曲线平直。

19. 如权利要求18所述的方法,其特征在于所述光纤中的稀土离子包括铒氧化物,抽运激光器波长为包括980nm 和 1480nm 的组中的一个波长。

20. 在包括抽运激光器、放大光纤和光导器件的光放大器中,一种控制次能级粒子数的方法,所述放大光纤用具有电子基能级、下激光能级、上激光能级和多重较高电子能级的稀土离子掺杂,每个电子能级具有多重次能级,所述光导器件同时把来自抽运激光器的光和输入信号光引导到放大光纤,其特征在于所述方法包括如下步骤:

通过单光子跃迁实现能级之一的次能级之间的跃迁,所述单光子跃迁从一个能级中的第一斯塔克次能级跃迁到第二能级,并从第二能级衰变到一个能级中的第二斯塔克次能级,该一个能级不同于第二能级。

21. 如权利要求20所述的方法,其特征在于进一步包括通过有选择地控制稀土离子的电子能级的至少一个斯塔克次能级的电子粒子数,在整个波长范围内调节光放大器增益曲线的步骤,该至少一个斯塔克次能级从包括下激光能级和上

激光能级的组中选出。

22. 如权利要求 21 所述的方法，其特征在于调节光放大器增益曲线的步骤包括使光放大器的增益曲线平直。

23. 如权利要求 22 所述的方法，其特征在于所述光纤中的稀土离子包括铒氧化物，抽运激光器波长为包括 980nm 和 1480nm 的组中的一个波长。

24. 如权利要求 20 所述的方法，其特征在于在次能级之间使单光子跃迁的步骤包括以选出的波长操作抽运激光器，由此同时造成从稀土离子的基能级到较高能级之一的电子跃迁，以及从选出的上激光能级的斯塔克次能级到更高的能级的电子跃迁。

25. 如权利要求 24 所述的方法，其特征在于所述光纤中的稀土离子包括铒氧化物，抽运激光器波长为包括 960 至 990nm, 800 至 850nm, 630 至 670nm, 500 至 530nm 的一组范围中的一个范围。

26. 如权利要求 1 所述的光放大器，其特征在于，所述光导器件包括组合器。

具有动态成形的增益的光放大器

发明背景

近年来，工作波长范围宽达 1520 至 1580nm 光谱区域的光放大器被引入光纤通信系统。此举使密集型波分复用技术 (DWDM) 成为可行。在 DWDM 系统内，与 16 个甚至多达 64 个波长的一组波长同时在光纤内传输，每个波长由快到 10Gb/s 的数据流调制。此大容量通信系统包括光发射器、光缆、光放大器、波长多路复用器和光接收器，它需要得到严密监视以检测可能破坏信息传输的任何故障。误码率 (BER) 是这样一个量度，它定义为给定时间间隔内出错的比特数除以接收到的比特总数的一个量。BER 对传输系统的若干参数敏感，诸如接收机处的光功率、发射机的质量等，但尤其对接收机处的信号功率与噪声功率之比（称为信噪比 (SNR)）敏感。而 SNR 又取决于接收机热噪声散粒噪声的相加以及因系统中光放大器而增添的噪声。

光放大器最重要的参数之一在于其各个波长的增益。为了正常工作，人们期望工作于各个波长的接收机有共同的且实际相等的光信号噪声比以及实际相等的光功率。由于发射机通常在各个波长输出基本等值的功率，故人们期望系统中的放大器能够在各个信道波长提供相等的增益。

使光放大器增益均等或平整的几种方法已披露于某些文献。由 Emmanuel Desurvire 撰写的《掺铒光放大器》一书第 480 页讨论了此种增益平整技术。由 Bertrand Clesca 在“光放大器及其应用”会议上发表的“平坦增益放大器以及在 WDM 网络内的传输”一文（论文编号 FA1-1）也比较了增益平整技术。在掺铒光纤中，任何给定波长处的增益具有来自若干加宽的原子共振的贡献。这些共振的每一个以稍微不同的波长居于 1520 至 1580nm 波长范围内，并且由铒离子电子能级的不同的 Stark 次能级对产生。含铒的玻璃基质的材料以及该基质内的掺杂物对铒中原子共振的位置和加宽产生影响。用以平整增益曲线的一种已知技术是采用掺铒光纤的同时掺铝。另一种技术是利用氟化物玻璃替代二氧化硅玻璃作为光纤材料。例如，当掺铒时使用氟化锆玻璃在波长范围内得到更为平坦的增益是众所周知的。以氟化锆为基质的掺杂光纤可以从马萨诸塞州的 Sturbridge 的

伽利略公司得到。氟化物光纤的缺点在于其熔点低，使其制造以及与系统中的其他光纤连接非常困难，而且其吸湿性质使之容易因潮湿而受到损坏。

另一种技术是在具有放大器的线路中插入特定成型的光谱滤波器，以补偿不同波长处的增益的差异。授权给 Di Giovanni 和 Giles 的第 5,050,949 号美国专利披露了采用两级光纤放大器实现平坦增益。该两级方式的缺点是仍然对 1520 至 1535nm 光谱区域内的增益缺乏足够的抑制而难以实现所需的平坦度。

最近，授权给 Huber 的第 5,557,442 号美国专利披露了一种技术，它包括采用环行器、刻入光纤内的一连串光纤布喇格(Bragg)反射器以及一组衰减器以实现增益平坦。环行器是具有 3 或多个光纤端口的光学器件，它将光从端口 I 引导到端口 I+1。布喇格光栅是通过紫外光刻入光纤纤芯的周期折射率光栅，它反射与光栅周期匹配的特定波长的光纤传播光。在第 5,557,442 号美国专利中，光进入放大器，然后进入环行器并引导到布喇格反射器和衰减器链。具有第一波长 w_1 的光在放大器中增益较低，它由第一布喇格光栅反射，在返回环行器和被引出之前未受到衰减。具有第二波长 w_2 的光增益比波长 w_1 的光稍高一些，它由后面的布喇格光栅反射，在其返回环行器和被引出之前必须通过一或多个衰减器。具有波长 w_3 的光在放大器中增益最高，它由光纤中的最后的布喇格光栅反射回来，在其到达环行器和被引出之前使其两次通过整个衰减器链。

Huber 专利的主要缺点在于它需要复杂的可变衰减器以动态地调节损耗量，以修正因输入功率变化而引起的放大器增益的变化。控制增益(响应于输入至放大器的功率变化)的其它动态方法已见诸于文献。例如，授权给 Zirngibl 的第 5,088,095 号美国专利利用反向传播光束来钳制增益。然而，因功率转移至反向传播的光束，这种方法减少了放大器中的有用功率而对增益的平整得很少。

因此，从对现有技术的评价来看显然需要这样一种方法，它能在响应于输入功率变化在整个波长范围内平整放大器的增益。

因此，本发明的首要目的在于提供一种方法，它能在整个波长范围内均衡或平整掺杂光纤放大器的增益，而不会影响放大器的光学特性，诸如平均增益和噪声指数。

本发明的次要目的在于与输入放大器的功率电平无关地平整放大器的增益。

发明概述

稀土掺杂光纤在特定波长处的光增益是两个主要的多重能级或簇中斯塔克次能级之间的若干电子跃迁贡献的组合总和。例如，如果增益原子仅有两个斯塔克次能级，能量为 e_2 和 e_1 ，则增益基本上等于特定次能级之间的电子跃迁概率 σ_{12} 乘以两个次能级的电子数之差 $(P_2 - P_1)$ ，乘以共振函数(当光的频率进一步与能量之差 $e_2 - e_1$ 谐振时它更小)的乘积。这一共振函数通常为高斯形，数学上写作 $\exp\{-h\omega - (e_2 - e_1)\}$ ，其中， $\omega = 2\pi c/\lambda$ ， h 为 Planck 常数。一对斯塔克次能级之间的每一跃迁与不同的波长谐振，谐振条件为 $h\omega = 2\pi(e_2 - e_1)$ 。

由于诸如稀土原子(铒、钕、镨等等)具有许多斯塔克次能级，任何波长处的增益是许多能级对贡献的组合总和。使增益具有一定形状的现有技术的以往的努力集中于通过利用含有稀土离子的玻璃基质的影响改变跃迁概率 σ_{ij} 。

在本发明中，我们认识到，使具有高的跃迁概率 σ_{ij} 的斯塔克次能级具有成比例的较低的粒子数，将在整个有限的波长范围内产生基本恒定的增益系数。通过在合适的波长利用一或多个泵浦激光器有选择地抽运斯塔克次能级 j (动态地使稀土离子的基态能级或受激态能级的斯塔克簇内的电子重新分布)实现次能级中粒子数 $P(j)$ 的成形。在一个实施例中，采用两个激光器经由两步骤过程在同一电子能级簇的斯塔克次能级之间转移电子，该两步骤过程称为双光子跃迁，首先使电子跃迁到上簇，然后使它们返回到起始簇中的不同的斯塔克次能级。在物理上，这种通过光抽运的重新分布过程相当于将簇中的电子的温度提升到一个极高的温度，使它们在斯塔克次能级中间更均等地分布。在第二个实施例中，来自上放大器簇中次能级的电子通过单个抽运激光器的作用转移到上能量簇，由此衰变为基态。

附图简述

从以下结合附图对说明书的详细描述和所附的权利要求书将能更清楚地看到本发明的其它目的和特征，其中：

图 1 是一个示意图，它表示稀土离子的光放大所包含的 4 个电子能级；

图 2 表示玻璃基质中铒离子的若干电子跃迁的贡献的组合导致的非平坦增益的曲线图；

图 3 是一个示意图，它表示应用于本发明、在斯塔克次能级之间重新分布电子的双重电子跃迁类型；

图 4 表示根据本发明的掺铒光纤中经过平整的组合增益的曲线图；

图 5 表示本发明的第一物理实施例的示意图；

图 6 表示本发明一个不同的实施例的示意图。

较佳实施例描述

参见图 1，它表示一个示意图，示出提供激光放大的原子中的 4 个能级。每个能级的垂直位置表示该能级的能量。每个能级包括称之为斯塔克簇的多重次能级。基能级标为 G，激光能级标为 L，抽运能级标为 P，更高能级标为 U。连接起始能级和终止能级的弯曲箭头，表示光产生的电子跃迁。虚线箭头表示声子引起或振动引起的跃迁。每个能级中的次能级用诸如 i 或 j 的整数标出。次能级 j 的能量为 e_j 。电子由抽运激光常规地从基态 G 抽运到抽运能级 P，它们由那里衰变到上激光能级 L 并布居于所有次能级 L_i 。 L_i 次能级中电子的正常热分布 $P(i, j)$ 由下式给出：

$$p(i, j) = \exp\{-(e_j - e_i)/kT\} / \sum_{ij} \exp\{-(e_j - e_i)/kT\}$$

其中， e_i 为第 i 能级相对于基能级的能量，k 为玻耳兹曼常数，T 为绝对温度。

将 λ 定义为波长， $\omega = 2\pi/\lambda$ 定义为光频率，作为光频率的函数每单位长度增益 $G(\omega)$ 由下式给出：

$$G(\omega) = \sigma_e N_2 - \sigma_a N_1 \quad (1)$$

其中， N_1 和 N_2 分别为基能级和上激光能级中的平均电子数，且

$$\sigma_a = h\nu \sum_{ij} \sigma_{ij} g(i, j) p(1, j); \quad (2)$$

$$\sigma_e = h\nu \sum_{ij} \sigma_{ij} g(i, j) p(i, 2);$$

$$g(i, j) = \exp\{-(e_j - e_i - h\omega/2\pi)\}$$

Σ 符号表示对能级指标求和，并且求和对所有次能级对 (i, j) 进行，其第 i 个能级来自基能级簇，而第 j 个能级来自受激能级簇。 $\nu = \omega/2\pi$ 和 σ_{ij} 为归一化

电子跃迁截面。

参见图 2，它表示波长范围为 1520 至 1560nm 内增益对波长的曲线，由抽运激光抽运玻璃基质内的铒离子形成。这里，铒用作可以用于放大系统的更普遍一类的掺杂离子的例子。图 2 示出用 1 至 4 标出的 4 条虚线曲线。曲线 1 至 4 的每条曲线都表示来自铒离子中的特定一对能级的增益贡献。实线曲线 5 为总的组合增益的曲线，它是所有 4 对次能级的贡献的总和。曲线 5 表示上述等式(1)中的增益 $G(\omega)$ 。可见，该增益在 1530nm 波长区域为较高。

使等式 2 中的总和 $\sum_{ij} \sigma_{ij} g(ij) p(i, j)$ 与 ω 无关可在诸如 1530 至 1560nm 的波长范围内产生基本为常数的增益。这是通过对函数 $p(ij)$ 整形使之对所有次能级 j 基本上相同而实现的。对粒子数 $p(ij)$ 的整形是通过利用一或多个抽运激光器对斯塔克次能级作有选择的抽运而实现的。该激光器对稀土离子的基能级或受激能级的斯塔克簇内的电子动态地进行再分布。

参见图 3，它表示借助于波长 λ_1 的光子使电子从次能级 L_i 移到上能级 U ，并借助于波长 λ_2 的光子使电子返回到次能级 L_j 的过程。利用两个光子而不是直接从 L_i 跃迁到 L_j 的主要原因是通常难于找到进行 L_i 至 L_j 跃迁的所需合适波长的抽运激光器。对波长 λ_1 和 λ_2 有大量的选择，使相应能量差匹配能量差 $e_i - e_j$ ，因此，可以容易地找到一对抽运激光器实现所需的跃迁。

注意到中间电子能量无需对应于实际能级 U ，使 λ_1 和 λ_2 的选择范围变得更宽。本领域众所周知，尽管量子概率较低，具有虚拟中间态的双光子过程物理上是允许的。当中间电子能量接近实际能级 U 时，此双光子跃迁的物理概率引人注目地增加了。这种非共振双光子跃迁用以产生光和放大光，这在文献中称之为喇曼型放大器。

通过减少形成图 2 中的曲线 1 的斯塔克次能级的粒子数，而达到图 4 中的曲线 1'，使总的增益曲线 5 修改为 5' 如图 4 所示，图中，整个波长范围内的增益变化大大减小。

现在参见图 5，它表示本发明的第一个实施例，其中，载带信号的光经由光纤 12 进入放大器，并通过波长敏感组合器 13 与来自第一抽运激光器 10 的光组合。进一步，组合器 13 的输出通过第二组合器 14 再与来自第二抽运激光器 11 的光组合，全部 3 种光(信号光、第一抽运光、第二抽运光)的总和进入掺杂增益光纤 16。在光纤 16 的另一端，第三抽运激光器 22 将波长 λ_2 的光经由第三组合

器 18 送入掺杂光纤 16。经放大的信号经由光纤 20 从放大器出射。第一抽运激光器 10 将电子抽运到抽运能级 P。波长 λ_1 的第二抽运激光器 11 使电子从次能级 L_i 移到 U，波长 λ_2 的第三激光器 22 使电子从 U 转移到 L_j 。所述的两个步骤过程称为双光子跃迁。

光纤耦合器 24 引出小部分输出光到光纤 26，后者将光引导到控制器 28。控制器 28 包含必要的滤波器或光谱分析仪以评估输出端的增益平坦度。这样一种光谱分析仪在本发明人 96 年 1 月 30 日提交的题为“监视光放大器的输入和输出的方法”的第 08/593899 号美国专利申请中作了描述，其作为参考资料结合于此。控制器 28 可以为抽运激光器引入电流和温度控制，这在第 5594748 号美国专利中已经作了描述，该专利引用于此作为参考。控制器 28 分别经由电线 23 和 21 连接到抽运激光器 10 和 11 并控制激光器电流和温度。温度控制能精细调节有选择地减少特定斯塔克次能级粒子数所需的抽运波长。输入组合器 13 的第四条支路(为了清楚起见，图 5 中未图示)可以用来监视至放大器的输入功率，并使控制器 28 相应调节抽运激光功率或波长。这里，把组合器及其相关的光纤的任何组合称为光导器件。附加的抽运激光器(例如抽运激光器 11 和 22)及其相关的光导器件称为电子粒子数再分布系统。在至少一个实施例中，电子粒子数再分布系统被配置成使光学放大器的增益分布变平坦。

下文中，每当给出特定的原子实例时，总是采用用于原子能级的经典光谱符号，其中，大写字母诸如 S、H、I 表示原子能级的轨道角动量，上标表示其自旋角动量，下标表示其总的角动量，如 $^4I_{13/2}$ 。具有角动量 J 的能级具有 $2J+1$ 个斯塔克次能级并将称为一个簇。

作为实现本发明的一个特定实例，利用 980nm 激光将玻璃光纤内的铒离子抽运到 $^4I_{11/2}$ 能级，由那里它们衰变为 $^4I_{13/2}$ 上激光能级。波长为 850nm 的第二抽运激光器用来将电子从位于基能级上方的能量 6540cm^{-1} 处的 $^4I_{13/2}$ 簇内的最低次能级转移到 $^4S_{3/2}$ 簇。波长为 855nm 的第三激光器用以将电子从 $^4S_{3/2}$ 转移到 6644cm^{-1} 处的 $^4I_{13/2}$ 簇内的第二能级。也可选择波长为 514nm, 630nm, 715nm, 790nm, 850nm, 1140nm 和 1680nm 的其它激光器，每个都从 $^4I_{13/2}$ 引导到不同的上能级 U。用于放大光纤中的其它稀土离子诸如钕和镨需要选择不同的抽运激光波长。例如钕需要 1060nm 的主抽运。

在本发明的第二个实施例中，电子通过单个抽运激光器的作用从位于上放大

器簇 L 中的次能级 L_i 转移到更高能量簇 U，它们从那里衰变到基态。此导致减少次能级 L_i 的粒子数，该次能级 L_i 被选择为具有高跃迁概率的次能级。在此情况下，仅有两个抽运激光器被采用，第一个抽运激光器使上激光能级 L 的粒子数增加，第二个抽运激光器有选择地使具有高增益贡献的次能级的粒子数减少。

参见图 6，它表示本发明第二个实施例的示意图，其中，信号光经由光纤 32 进入放大器，并通过组合器 36 与来自第一抽运激光器 34 的抽运光组合。经组合的光束进一步通过第二组合器 39 与来自第二抽运激光器 38 的光组合，并进入放大光纤 40。低损耗耦合器 42 出放大器的一小部分光输出并将其送到控制器 46 内的光谱分析仪 60。在本发明人于 96 年 1 月 30 日提交的题为“监视光放大器输入和输出的方法”的第 08/593899 号美国专利申请(在此结合为参考资料)中描述了这样一种光谱分析仪。控制器 46 可以为第 5,594,748 号美国专利(在此结合为参考资料)中所述的抽运激光器引入电流和温度控制。控制器 46 分别通过电线 50 和 48 连接到抽运激光器 34 和 38，并控制激光器的电流和温度。温度控制能够精细调节有选择地减少特定斯塔克次能级粒子数所需的抽运的波长。输入耦合器(图 6 中未图示)也可以用来监视至放大器的输入功率，并使控制器能相应地调节抽运激光器。

可以采用多个抽运激光器来控制上簇内斯塔克次能级的粒子数，然而对抽运激光器的良好选择将使所需的抽运激光器局限于 1 或 2 个。事实上，可以采用单个抽运激光器来增加上激光能级 L 的粒子数，以及将电子转移到更高能级。目的是发现匹配所需能级跃迁的激光波长。作为一个特例，在掺铒二氧化硅玻璃光纤的情况下，可以采用波长为 800 至 830nm 范围的激光器将电子从 $I_{16/2}$ 基态抽运到 $I_{9/2}$ 抽运能级，电子由那里自然地衰变到 $I_{13/2}$ 上激光能级。同一个 820nm 激光可以再激励电子到更高能级 $S_{3/2}$ 。

在设计和开发过程中可以预先设定实现平坦增益所需的功率设置和波长，这些参数可以存储在控制器 28 或 46 的存储器内，控制装置实现合适的操作。

尽管以上参照几个特定实施例对本发明作了描述，但这种描述仅仅用以说明本发明而并非用于限制本发明。在不脱离所附权利要求书限定的本发明的实际精神和范围的情况下，本领域的熟练人员还可对此作出各种变更。例如，可能有抽运激光器其它结构，包括将抽运激光器设置在掺杂光纤的输入侧，在掺杂光纤的输出侧或在两个位置处。

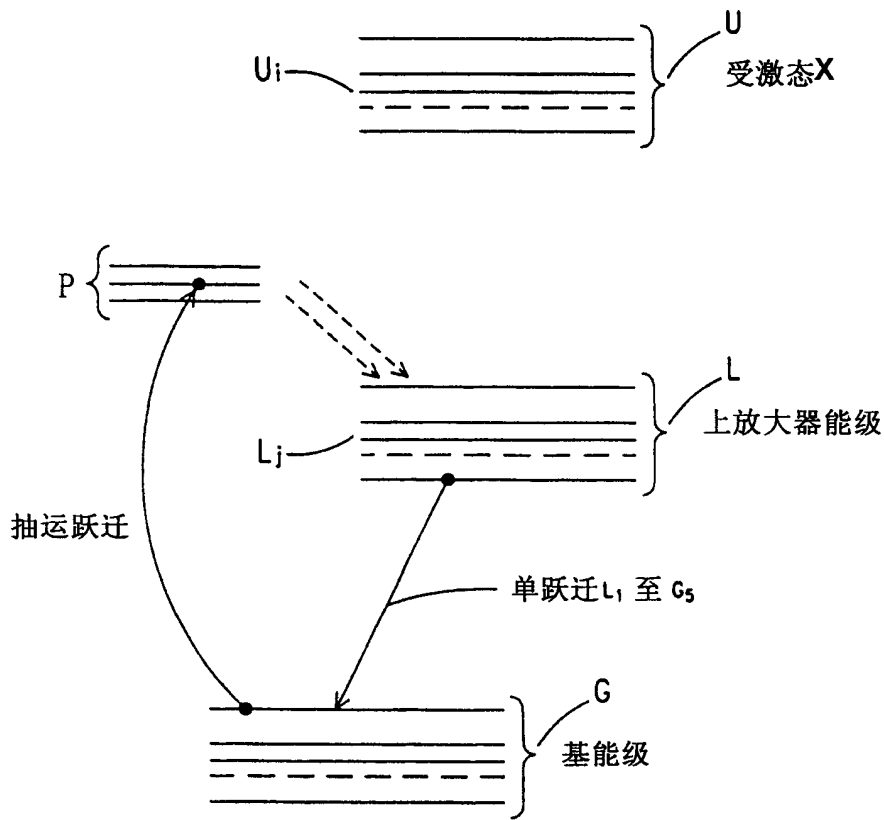


图 1

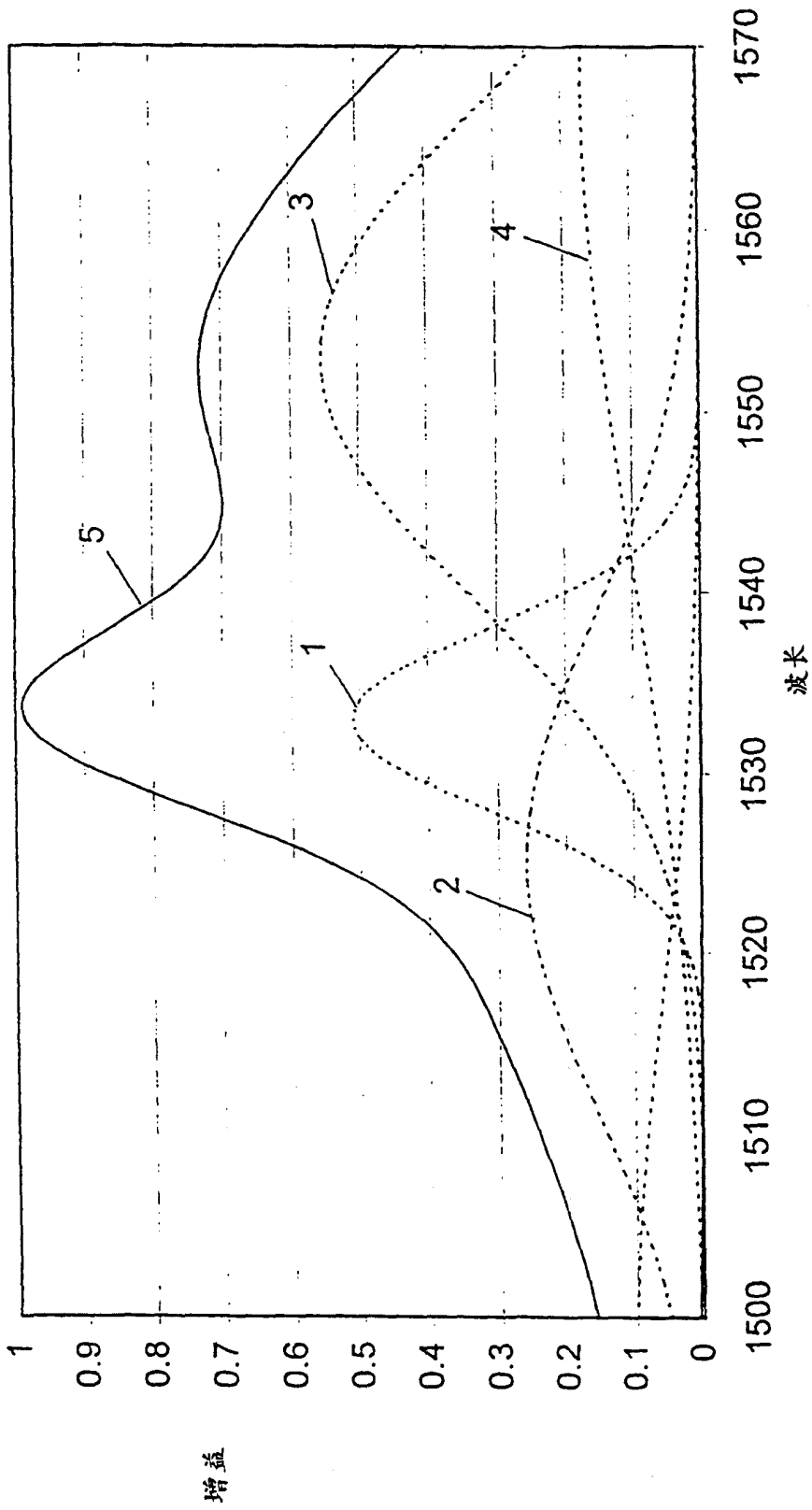


图 2

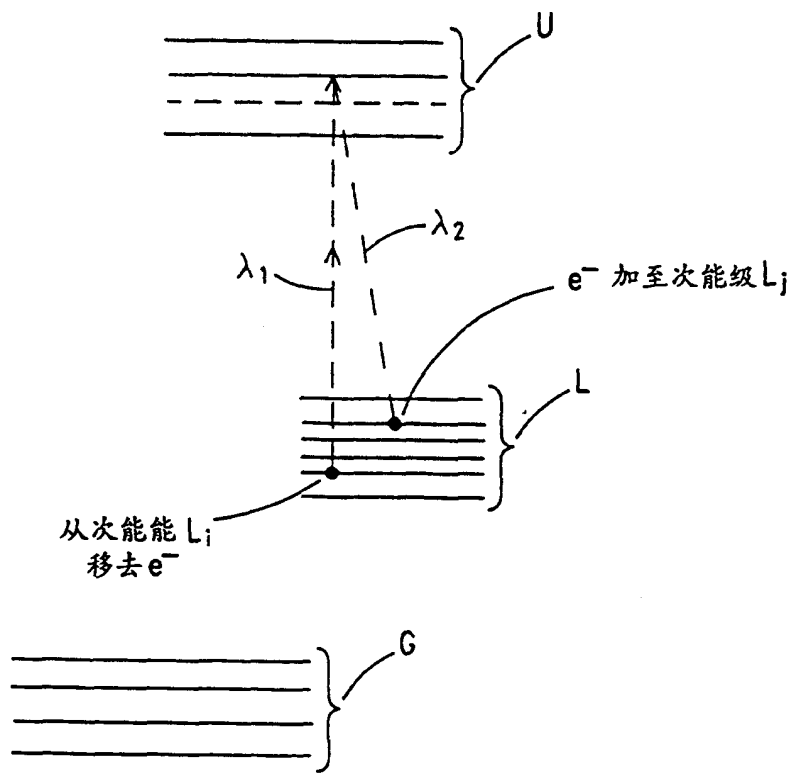


图 3

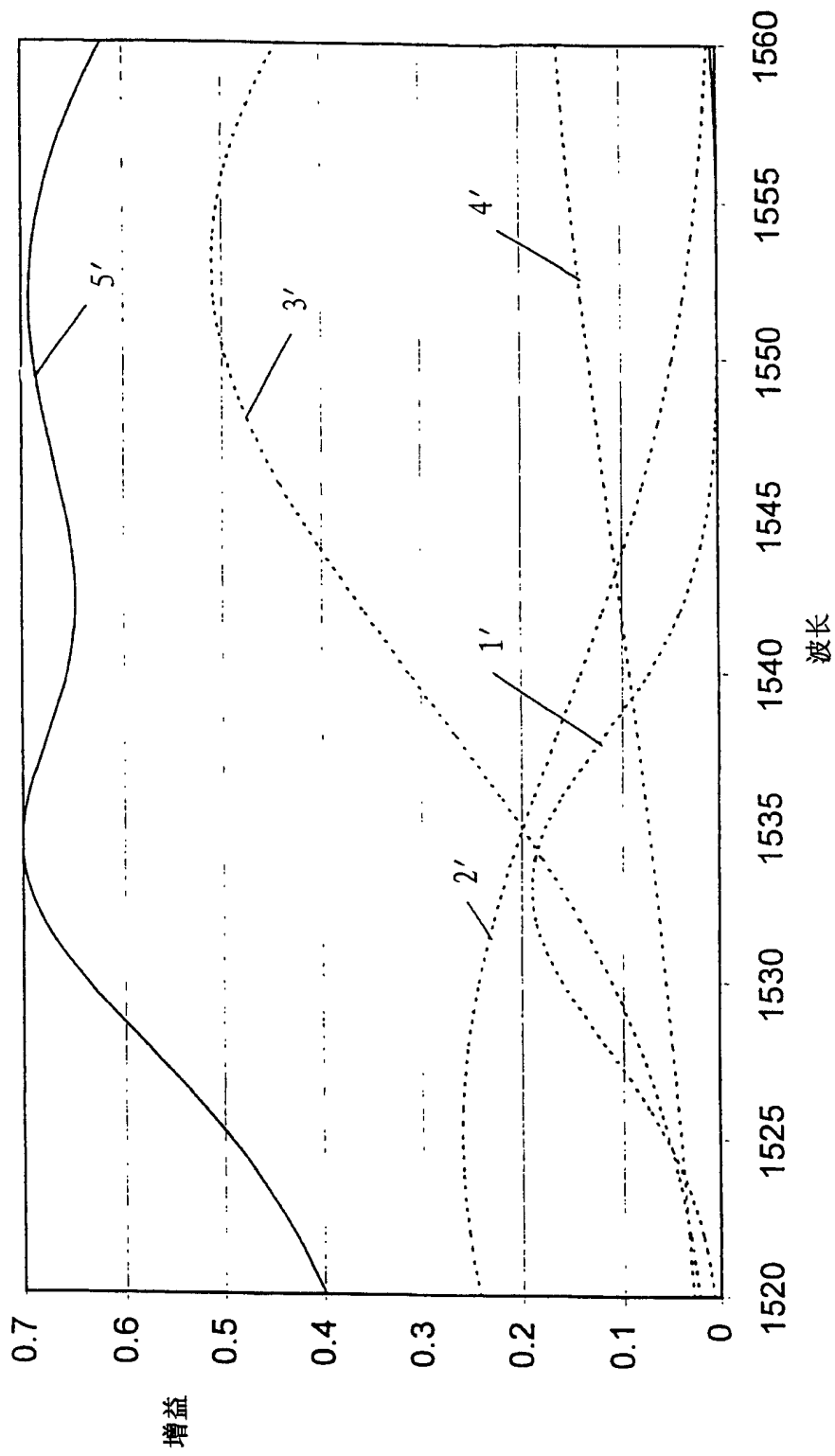


图 4

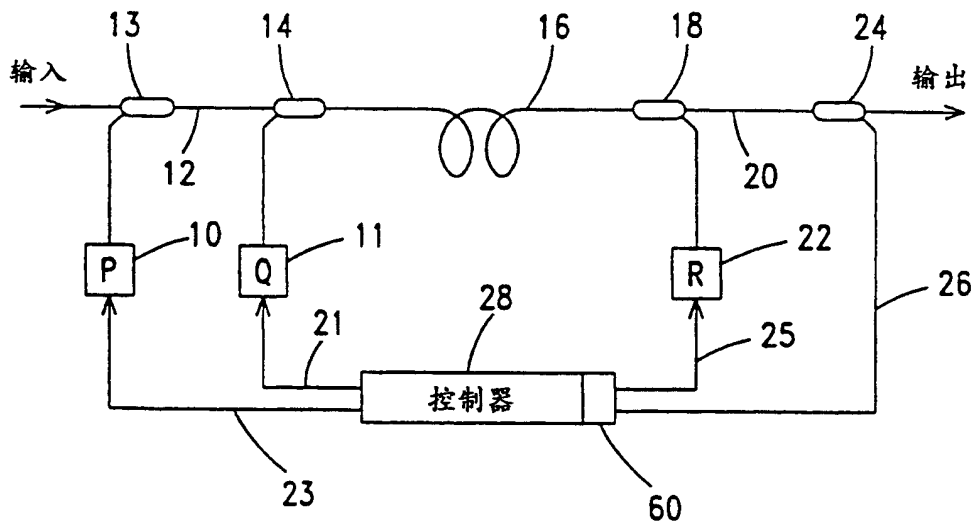


图 5

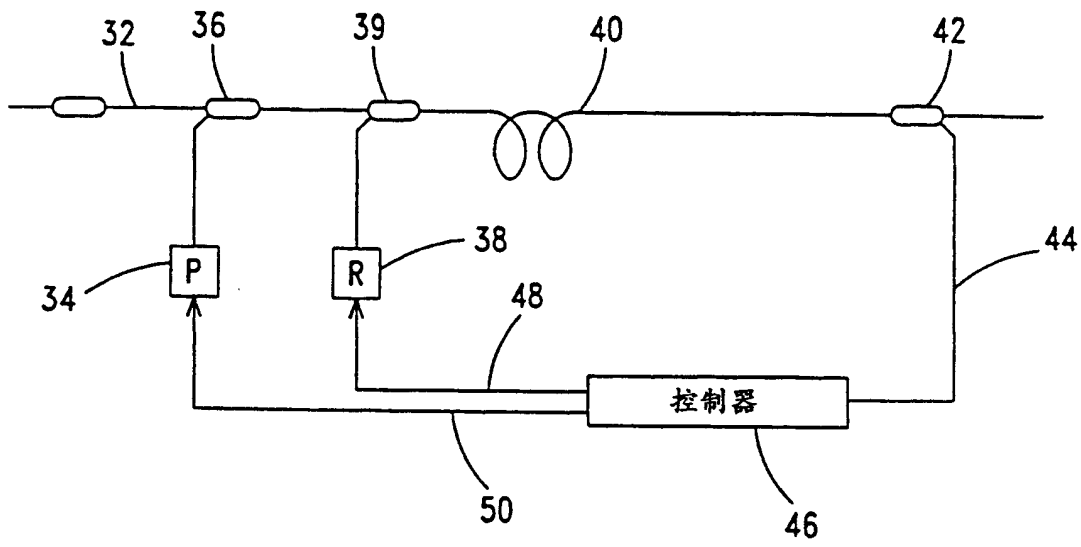


图 6