

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

H01S 3/067

H01S 3/13



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 95191692.0

[45] 授权公告日 2004 年 3 月 10 日

[11] 授权公告号 CN 1141764C

[22] 申请日 1995.2.20 [21] 申请号 95191692.0

[30] 优先权

[32] 1994. 2. 18 [33] GB [31] 94301184. 1

[86] 国际申请 PCT/GB95/00346 1995. 2. 20

[87] 国际公布 WO95/22847 英 1995. 8. 24

[85] 进入国家阶段日期 1996. 8. 19

[71] 专利权人 英国电讯有限公司

地址 英国伦敦

[72] 发明人 珍妮弗·马西科 理查特·怀亚特

审查员 杨 哲

[74] 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司

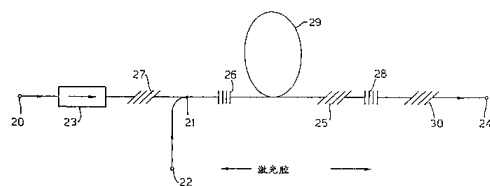
代理人 蹇 炜

权利要求书 6 页 说明书 15 页 附图 6 页

[54] 发明名称 增益控制光纤放大器

[57] 摘要

在一种增益控制的掺铒光纤放大器中，通过钳制激光器的增益等于整个光腔的损耗，并将放大器的振荡波长固定在第一个波长上的方法，使其增益得到控制。 当一个具有不同于第一个波长的第二个波长的光信号通过光放大器而被放大时，该信号的增益完全取决于光腔的增益，而不取决于信号强度。 如果第一个波长设定在铒的吸收与发射截面之和的峰值处波长，则放大器表现出对环境温度变化最不敏感。



ISSN 1008-4274

1、一种光学放大器，包括：

共振光腔（26, 29, 28），其调谐成在第一个波长上共振，该光腔包括由含有稀土掺杂物质的光纤基质构成的增益介质（29）；

将一个或多个待放大的光学信号耦合进光腔的输入端的装置（21），其中该一个或多个光信号的波长不同于所述的第一波长；

将放大后的光信号从光腔中耦合输出的装置（24）；以及

将光泵浦能量施加给光腔以便在稀土掺杂的光纤基质内形成净反转粒子数的装置，其特征是，

所述的光腔被配置成：使所述的净反转粒子数分布在所述光腔的从光腔输入端（26）处高局部反转到其输出端（28）处的低局部反转。

2、如权利要求1的光放大器，其中所述光腔在朝向输出端的方向包括至少一个侧刻光栅（25）以使反转粒子数分布显著地不对称，其中该光栅在第一波长处提供比在信号波长处大得多的损耗。

3、如前述任一权利要求的光放大器，其中该光腔由第一光栅（26）和第二光栅（28）限定，这些光栅在第一波长处具有很高的反射率。

4、如权利要求1或2的光放大器，其中第一波长基本等于所述掺杂物质的吸收与发射横截面之和的峰值波长。

5、如权利要求 1 或 2 的光放大器，其中掺杂物质包括氟化物基质内的镨，以及使用时这些信号波长之一基本等于所述掺杂物质的吸收与发射横截面之和的峰值波长，其中第一波长介于 1250 n m 至 1350 n m 之间，而信号波长与第一波长间隔足够远以便可由放大器的相关波长选择元件对其区分。

6、一种光放大器，包括：

由第一反射装置（26）和第二反射装置（28）限定的光腔，该光腔包括由含有稀土掺杂物质的光纤基质构成的增益介质（29）并被调谐成在第一个波长上共振，；

将不同于第一波长的第二波长的光信号耦合进该光腔的装置（21）；

用于从光腔中耦合放大后的光信号的装置（24）；以及

泵浦装置，用于光学地泵浦该增益介质以提供反转粒子数；

其特征是所述的光腔被配置成：沿其长度提供非对称的激光光通量分布，以及第一波长基本等于掺杂物质的吸收与发射横截面之和的峰值波长。

7、如权利要求 6 的光放大器，其中在使用时光腔中反转粒子数沿光腔长度从第一反射装置（26）向着第二反射装置（28）方向减少。

8、如权利要求 6 或 7 的光放大器，包括作为掺杂物质的铒，其中

第一波长位于 1510nm-1560nm 的范围内。

9、如权利要求 8 的光放大器，其中用于铟掺杂物质的光纤基质是 Al/Ge 硅光纤，以及第一波长介于 1.52 μ m-1.55 μ m 之间。

10、如权利要求 8 的光放大器，其中泵浦源提供波长基本为 1480nm 的光。

11、如权利要求 6 或 7 的光放大器，其中光纤基质包括主要掺杂镨的氟化物光纤。

12、如权利要求 11 的光放大器，其中第一波长介于 1250nm 与 1350 之间。

13、如权利要求 6 或 7 的光放大器，其中第一波长与所述的峰值波长至少相距 5nm。

14、如权利要求 6 或 7 的光放大器，其中光放大器包括至少一个侧刻光栅，该光栅在第一波长处提供比在第二波长处大得多的损耗。

15、如权利要求 6 或 7 的光放大器，其中第二反射器在第一波长处具有高反射率。

16、如权利要求 6 或 7 的光放大器，进一步包括一个用于控制从放大器中输出的信号光波长谱的增益平坦光栅装置。

17、一种光放大器，包括：

由第一和第二反馈装置限定的光腔，该光腔被调谐成在第一个波长上共振，其中第一反馈装置是一个在所述第一波长上反射的宽带反射器，而第二反馈装置是一个在所述第一波长上反射的窄带反射器；

光纤增益介质，包含设置在光腔的光学路径上的稀土掺杂物质；

输入端口，用于将具有不同于第一波长的第二波长的光学输入信号耦合进该光腔；

输出端口，经过放大的输入信号通过该输出端口射出所述的光腔；
以及

光源，用于泵浦增益介质以在其中产生维持稳态激射的净反转粒子数，其特征在于，该光腔配置成：使所述的净反转粒子数分布在所述光腔的从光腔输入端处高局部反转到其输出端处的低局部反转，以及所述的第一波长配置成基本位于掺杂物质的吸收与发射横截而之和的峰值处。

18、如权利要求 17 所述的光放大器，其中输出端口包括所述的第二反馈装置，第二反馈装置在第二波长处具有低的反射率。

19、如权利要求 17 或 18 所述的光放大器，其中第二反馈装置对

第一波长处具有至少 90%的反射率。

20、如权利要求 17 或 18 的光放大器，其中该放大器包括第二反馈装置的下游装置，以便在第一波长处提供显著的传输损耗，但在第二波长处没有显著的传输损耗。

21、一种利用光纤放大器放大光信号的方法，包括步骤：

泵浦光纤基质以产生反转粒子数，该基质包括一个稀土掺杂物质并被结合进一个光腔中，所述的光腔被调谐成在第一波长处共振；

将第二波长的光信号耦合进光腔的输入端；以及

将经过放大的光信号从光腔的输出端耦合出，

其特征在于，所述的反转粒子数是非对称的并且从光腔的输入端到输出端是由高水平到低水平。

22、一种用于对通信网络中波分复用光信号提供稳定增益放大的方法，包括：

将该波长分割复用信号从通信网络的光纤中耦合进稀土掺杂光纤放大器的输入端，所述放大器包括在第一波长处共振的光腔，其中第一波长不同于任何其它光信号的波长；以及

将从放大器的输出端输出的放大光信号耦合进该通信网络的另一个光纤，其特征在于，该光腔在使用时沿光腔具有非对称的反转粒子数分布，其中该分布为从放大器输入端的高水平到放大器输出端的低

水平。

23、如权利要求 21 或 22 的方法，其中第一波长基本等于掺杂物质的吸收与发射横截面之和的峰值波长。

24、如权利要求 21 或 22 所述的方法，其中稀土掺杂物质是氟化物光纤基质中的镨。

25、如权利要求 21 或 22 所述的方法，其中稀土掺杂物质是铒。

增益控制光纤放大器

本发明涉及一种光放大器，更具体地，但非排它地涉及一种稀土元素掺杂的改进工作性能的光纤放大器。

做为再生器、前置放大器或光通讯中的其它类似应用，稀土元素掺杂的光纤放大器十分理想。这种放大器所要求的特征包括低噪声系数、偏振不敏感及低的插入损耗。使用稀土掺杂的一个突出优点是其表现出很窄的光谱特性。相反，过渡金属离子掺杂的介质则表现出很宽的吸收及荧光光谱。在稀土掺杂物中，当在石英光纤中以铒为掺杂物，则在其光通讯中所需要的1550nm窗口处具有受激特性。同样，镨掺杂则可工作在所需的1300nm窗口。仅为方便起见，下面所描述的仅指掺铒及掺镨的石英光纤，尽管应当强调下面的描述同样适用于其它稀土掺杂及宿主结构。

在铒中，放大跃迁过程中的上能级荧光寿命相对于其它物质，如半导体激光器的跃迁过程，要更长一些，由此可以有很多重要结论。第一个结论是：用来泵浦掺铒光纤放大器的半导体泵浦激光器的。偏置的电噪声将会在放大器的增益上引入一个低于100KHz的泵浦噪声调制。所以，提供给泵浦激光器的电偏置至少在低频部分应没有噪声。另一个结论是：当一个信号通过掺铒光纤放大器时，将引起载流子反转粒子数的变化，从而引起其自身及其它波长信号的增益变化。这种效果在脉冲工作时尤其明显，因为其具有使增益饱和的足够光强度。从而引起脉冲的严重变形。

在多波长复用传输中，例如波分复用(WDM)系统，某一个复用信号对放大器增益的调制将引起其它信号的低频交调，这个后果在改变信道接通或断开状态的瞬态效应中特别严重，其将对其它波长产生严重干扰。如果放大器的增益及相应的增益谱能够独立于输入信号水平而受到控制，则这个影响可以被排除。

已知的构成独立的放大器增益控制的系统，采用光电或全光反馈环的方式进行自动增益控制(AGC)。如果考虑到降低复杂度及成本的要求，全光方式更符合要求。而且，光电反馈环将受到响应速度的限制，同时使放大器噪声响应潜在地恶化。

一种采用全光反馈环来使放大器增益独立于输入信号的方法在欧洲专利申请 9 2 3 0 0 5 1 9 · 3 中提出。这个方法采用半导体激光器泵浦的掺铒光纤放大器 (E D F A) , 其中耦合了一个可将放大器输出反馈到放大器输入的光的反馈环, 光反馈环中耦合了一窄带滤波器, 它允许被选择的自发辐射放大的控制波长通过放大器的输出端到达放大器的输入端, 反馈信号具有一个控制波长, 它不同于泵浦波长, 也不同于被放大的各个信号波长。反馈控制信号实际上将放大器锁定成环型激光器的结构。因此, 激射条件受到反馈控制信号波长及反馈环路的衰减控制, 而不是由输入泵浦功率或信号波长控制。环型激光器的结构需要用一个波长选择耦合器 (W S C) 和 3 个 3 d B 耦合器。也可替代地用 3 个 W S C, 如果考虑到制造, 这是一个很复杂的装置。

一个可选择的方法是在“通过在光纤端部写入光感应布拉格光栅引起 1 4 8 0 n m 激射来控制掺铒光纤放大器的增益” Gain control in erbium-doped fibre amplifiers by lasing at 1480nm with photoinduced Bragg grating written on fibre ends) 一文中提出 (Delevaque 等著, “电子快报”杂志, 10th June, Vol. 29 NO. 12)。这种方法采用对 E D F A 的二端光纤端部种控制波长写入布拉格反射光栅。这样除了反射器损耗及因焊接带来的耦合损耗外, 不再有其它固有损耗机制。

根据第一方面, 本发明提供了一种光放大器, 它包括

由第一个和第二个反射装置所确定的一个光腔, 该光腔包括一个含有稀土掺杂物的光纤基质构成的光增益介质, 并被调谐在第一个波长上振荡;

将不同用于第一个波长的第二个波长的光信号耦合入光腔中的装置;

将放大后的光信号由光腔中耦合输出的装置;

对增益介质进行光泵浦以形成粒子数反转的泵浦装置;

其特征在于, 光腔配置得沿其长度方向形成不对称的激光流分布, 以及其中第一个或第二个波长之一大致等于掺杂物质的吸收及发射截面之和的峰值处波长。

稀土元素的发射和吸收特性已经被研究得相当深入, 这些元素 (或其离子)

可以在石英光纤或氟化合物光纤中做为掺杂物已被公认（见参考文献1）

如下面更详尽地描述的，申请人认为通过将振荡波长置于掺杂物吸收与发射截面之和的峰值点附近，可以使放大腔对外界变化，例如温度变化的敏感度降到最小。

当铒做为掺杂物质时，申请人确认将振荡腔的波长大体放在1530nm峰值是可能的，也是符合要求的。因为信号波长可以在1500nm到1600nm之间的任何波长上。

对于镱，吸收和发射截面之和的峰值波长和1300nm附近最佳信号传输波长基本上是一致的。因此，在这种情况下，一般不可能将振荡波长置于峰值位置，因为信号波长和振荡波长必须不同。但是，即使信号波长位于峰值位置，也可以设计光腔使之振荡在一个很接近峰值的波长上。

使用掺铒来支持在石英光纤通讯中重要的1550nm窗口处实现受激振荡并产生放大，以及用掺镱支持在石英光纤通讯中重要的1300nm窗口处实现受激振荡并产生放大是十分有优势的。

其它掺杂物及基质的配置可以在其它感兴趣的各种波长范围内产生增益。例如钕元素可以工作在1300nm窗口，而铥则可以工作于1500nm。

有很多种输入输出端口及泵浦的结构，都能达到要求的效果。要被放大的输入信号或放大后的输出信号可以直接耦合入腔中，或通过第一个或第二个反射器输入腔中。同样，泵浦源也可以直接耦合入腔中或通过第一个或第二个反射器。很清楚，无论采用何种方式，一定要有合适的耦合器和反射器。

更为可取的是，按照本发明的光放大器，其泵浦和要放大的信号通过波分复用方式复合在一起，然后通过第一个反射器将复合信号耦合进腔中。

光腔的激光波长被反射器强制而固定于所需要的波长上，典型的手段是通过已知的方法将光纤光栅写到光纤芯上，从而在光纤放大器两端的光纤上形成反射器。一个方法已由Kashyap等在《电子快报》上做了详细描述，(Electronic Letters, page 730~731, 24, May, 1990 vol. 26 no.11)，其内容在这里作为参考文献。光

栅可以有很高的、针对特定波长的反射率，而且不同于反射镜，光栅可以很容易并牢固地与光纤及光纤系统连接在一起。

泵浦装置为激光器的光泵浦提供能量。为了连续而可靠地泵浦，泵浦源可以用大功率半导体激光二极管，它们通常采用量子阱 (MQW) 结构，当铟做为稀土掺杂物时，工作于1480 nm 波长或980 nm 波长，用别的波长，例如807 nm，也可能泵浦铟离子。但是807 nm 泵浦时，因为激发态的吸收而使泵浦效率下降。而对1480 nm 和980 nm 的泵浦而言，1480 nm 更好一些，因为1480 nm 可能在标准的1550 nm 光纤中实现单模传输。而980 nm 则在标准的1550 nm 光纤中具有几个模式。从而导致泵浦功率的使用效率下降。

在较为可取的本发明实施例中，一个侧刻光栅被置在第一个反射器与第二个反射器之间的光纤中，紧挨在第二个反射器旁边。这个光栅的作用是将激光波长的一部分光耦合进光纤的包层，因此就将特定波长的损耗引入光腔。而且，第一个与第二个反射器对激光波长均为高反射。这两个高反射的反射器阻止激光波长处的杂散光从外部进入激光腔。

在更进一步的实施例中，侧刻光栅在外部加入腔的两侧。这是一个很有效的改进。因为即使光纤中的高反射光栅也只具有大约95%的反射率。进一步的侧刻光栅还能衰减掉激光波长处的残余光，否则这些光将从激光腔中泄漏到网络光纤包层中。

与Delevaquis 等提出的系统不同，本发明的放大器的控制参数是针对工作于1550 nm 光通信窗口的铟光纤和工作于1300 nm 窗口的镨光纤进行了优化。提出了对掺铟光纤放大器的一个特例所做的完全的特性分析，使激光波长和加于特定信号的增益损耗具有最优值。技术人员会体会到这一分析是针对掺铟的铝锗石英光纤放大器的，但适用于具有其它稀土掺杂和基质结构的情况。

下面将参照附图中的例子说明本发明的实施例。附图中：

图1 是本发明的放大器实施例示意图。

图2 是表示不同泵浦功率时，放大增益与输入信号水平之间的关系。

图3 是表示本发明的放大器对突然开启输入信号（阶跃信号）的瞬态响应。

图4 是一个掺铒光纤放大器实例中，在不同反转粒子数时相对增益随激光波长变化的关系图。

图5 是在不同激光波长下，1550 nm 输入信号的增益变化。

图6 是表示在不同的腔内损耗时，1550 nm 的输入信号增益与激光波长的关系。

图7 表示在采用了优化方法降低了受激波长频移效应后，输入的1550 nm 信号增益与激光波长的关系。

图8 是一个可替换的光纤光栅单元实例的示意图。

图9 是本发明更进一步的实施例。

图1 表明本发明的一个实施例，对于工作于1550 nm 通信窗口的光放大器，一个掺铒光纤放大器29 为激光腔提供光增益介质；该腔由第一个光栅26 和第二个光栅28 构成；第一和第二个光栅对要求的激光波长具有高反射率，对其它波长（尤其是对泵浦和输入信号波长）具有高透过率。在这个实施例中，由反射光栅确定的光腔激光波长为1520 nm。一个WDM21 将一个由端口22 输入的1480 nm 泵浦光和由端口20 输入的欲放大的1550 nm 信号复合起来。复合后的信号接着通过第一个光栅26 被耦合进光腔。在增益控制工作时，激光腔对激光波长的增益等于激光腔的损耗，而且既不受与激光波长不同的信号光强度影响，也不受泵浦光强影响。放大后的1550 nm 的信号通过第二个光栅28，经端口24 输出该放大器。

在图1 的实施例中还包括隔离器23，它隔离了杂散反射、与放大器传输方向相反的自发辐射（ASE）以及可能的前面几级放大器的干扰。

在工作中，侧刻光栅25 用来将激光波长的一部分光耦合到光纤包层中。这部分反射为稳定的激光器工作提供了必要的损耗。提供合适的损耗大小意味着光栅26 和光栅28 在激光波长处都可能是，也最好是高反射镜。

高反射光栅26 和28 放在掺铒光纤放大器两侧，以提供光反馈，形成激光腔。在激光条件下放大器对激光波长的增益由损耗决定。如果放大器介质是均匀

展宽，这对室温下铝镨石英光纤中的铒元素是一个很好的近似，在一个波长上钳制一定的增益则确定了在增益光谱内的所有光波长的增益。光栅2 6 和2 8 写在掺铒光纤放大器的两端光纤芯上，由于三个主要原因被用做光反馈件。第一其使放大器成为全光栅器件，这在考虑避免准直问题和成本时是一个很大优势。第二，光栅可以有一个相当窄的反射光谱，从而非常精确地确定了激射波长。光放大器的反转粒子数因此也可以被钳制在一个精确的水平上。这一点十分重要，因为即使对相同的腔损耗，不同的激射波长将使建立的净反转粒子数不同，因此也将在不同的波长上产生不同的增益。第三，对光子感应光栅而言，其带外反射及损耗特别低，这对于放大器的稳定工作十分重要。

为保证光放大器的噪声降到尽可能低，必须使放大器激光腔输入端处控制波长的功率减到最小，从而本地反转粒子数在这点上不致于过份减少。这个效果是通过控制腔不对称来实现的。这样，靠近输入端的反射器的反射率接近于1，而选择输出反射器或侧刻光栅和高反射器的组合提供合适的控制增益的数值。在实际装置中，包括增加的侧刻光栅2 7 和3 0 或某些其它对激射波长的损耗源也可能是必要的。在激光腔外进一步衰减残余激光能量，避免系统中其它地方反向传播的干扰。本发明的可控放大器的基本性能表示在图2 中。其显示了不同泵浦功率下放大器的增益随输入信号功率的变化情况。

图2 表示了一个典型的增益控制掺铒光纤放大器的特性。在这里，放大器包括2 5 米光纤，其在折射率差为0 . 0 1 3 的 $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{GeO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$ 基质玻璃中掺杂铒。LP₀₁ 模式截止在1 . 2 μm ，芯径5 . 3 μm ，Er³⁺ 的掺杂浓度保证室温下1 5 3 2 nm 的峰值吸收是6 . 1 dB / m，假设放大介质是均匀展宽，这对实际情况是很好的一阶近似，图中表明对低于约 -1 0 dB m 的信号光，控制信号增益水平是1 6 dB，此时泵浦功率2 0 mw，低于1 3 mw，由于由泵浦提供的净反转粒子数不能提供足够的增益维持激光波长激射，因此放大器不再处于控制区。

从图中可以看出，对泵浦功率超过4 7 mw，增益一直到输入功率为 -2 dB m 时仍保持在所要求的1 6 dB 的1 dB 范围之内，在大部分区域变化量不到 0 . 2 dB。

没有增益控制时，在这个泵浦功率下 (4 7 mw)，不受控的放大器的小信号增益 (即增益对反转程度的影响可以忽略) 大约为3 0 dB 左右。这表明按照本发明的增益控制机制明显有效，保证增益在很宽的输入功率范围内保持一个常数。

这里还可以看到一个优点，对泵浦功率的变化在控制区之内相对不敏感。从图中可见，对输入信号低于 -10 dBm ，情况的确如此，比如 20 mW 到 47 mW 的曲线。

实际上，在 1550 nm 附近，有用的信号增益大约在 10 dB 和 25 dB 之间，但在其它范围内控制也是同样可能的，对激光波长的限制取决于是否有足够的增益可以使器件达到饱和，这在下面的一个示例中讨论。其表明例如要获得 16 dB 的信号增益，对给定的放大器，激光波长必须长于 1510 nm 。

另一个增益控制机制效能的测量是通过观察放大器对输入信号的瞬态响应。图3 显示当输入数据信号简单地关闭然后打开时放大器的响应。图中以输入信号做为参考，描绘出从 -10 dBm 至 $+2 \text{ dBm}$ 的不同输入信号的响应曲线。曲线之间相对位置为观察方便起见做了调整。受控的情况下，曲线与输入信号十分接近。而其它超出被控区域的情况则曲线表现出不同程度的过冲。没有控制时， -10 dBm 的信号表现出较大的过冲，正是这个过冲导致导致无控制光纤放大器中的瞬态饱和。

实际上，按照本发明的增益控制放大器的优化十分重要。两个可以优化的参数是腔内损耗及激光波长。在评估增益控制放大器的潜在应用时，也有必要对其对环境变化的敏感度及结构参数进行评估。本发明能够使增益控制放大器最优化，特别是对于稳定性及对外部环境变化的不敏感性。

在受控范围内的放大器增益不取决于泵浦功率和信号功率，而仅仅取决于激光腔的参数。改变腔的损耗（稳态下等于激光波长的增益）和激光波长，则改变掺杂光纤的反转粒子数，因而会改变在放大器带宽内的其它波长的增益。对增益介质温度的改变也将轻微地影响激光增益及激光增益与其它波长增益之间的关系。

腔损耗的改变可能由于光纤或光栅反射器性能长时间的退化，或一些短期因素的影响，如温度变化可能引起两个光纤光栅的反射峰值彼此失谐。在信号波长的增益 g_s 。随着激光腔损耗 γ 的变化可以表示为：

$$\frac{dg_s}{d\gamma} = \frac{\sigma_{as} + \sigma_{es}}{\sigma_{al} + \sigma_{el}} = \frac{\sigma_{as}}{\sigma_{al}} R$$

公式1

$$\text{其中: } R = \frac{(1 + e^{\frac{h}{kT}(\nu_o - \nu_s)})}{(1 + e^{\frac{h}{kT}(\nu_o - \nu_l)})}$$

其中: γ 是信号经过光腔的损耗 ($= 1/g$ 激光波长增益)。

N_t 是掺杂离子浓度。

δ_{a_l} , δ_{a_s} 是激光波长与信号波长的吸收截面。

δ_{e_l} , δ_{e_s} 是激光波长与信号波长的发射截面。

γ_l , γ_s 是激光频率及信号频率。

γ_o 是吸收截面与发射截面相等时的频率。

h 是普朗克常数

k 是波尔兹曼常数

T 是标准开氏温度

按照本发明的光放大器在增益稳定工作时激光腔波长处必须有足够的增益以产生激光。一旦激光产生,腔内激光粒子流的饱和将迫使激光波长处的总增益(两次通过增益介质)等于整个腔的损耗(两次通过)。按照光腔波长选择的腔损耗要保证信号波长得到所需的增益。在Delevalaque等人所写的文章中,其所提出的放大器的激光波长位于的那部分光谱区对于很高的反转粒子数只有非常小的增益。因此,很显然,在实际应用中不可能将这个放大器的腔损耗降得很多。而且即使可能将腔内的损耗降低为零,最大的可能反转粒子数仍然在65%左右而只具有很小的增益抑制。因此,不停止激射就不可能大大提高增益控制的信号输入。

本发明的光放大器的增益实际工作中是由激光波长的增益决定的,因为放大器的增益介质主要是均匀展宽的。只要有激光流,激光波长的增益则固定等于腔的损耗。激光流功率的改变将补偿信号功率的改变。如果信号功率超一个临界值,将使反转粒子数降低到不足以维持激光工作,这时激光波长的增益下降到低于腔内损耗,从而使激射停止。信号功率高于这个临界值时,放大器的性能将等同于不受控的光放大器。

使用测出的吸收截面的数据，将 $dg_s / d\gamma$ 的值绘于图5。图5 表示出对于激光波长为1480 nm 的增益控制放大器，如象Delevaque 提出的那样，光腔损耗改变0.1 dB 将导致1550 nm 信号增益改变0.22 dB。而对激光波长为1530 nm 的放大器，同样的腔损耗只引起信号增益改变0.055 dB。从图中可以清楚地看到，激光器运行于1520 nm（如我们例子中的那样）并非最佳工作波长，尽管其明显优于1480 nm，但是这一结果清楚地表明了什么是最优工作区域。

从前面的论述中可以清楚说明：尽可能使激光器工作于发射和吸收截面之和的峰值点处有很大的优越性。如图5 所示，对掺铒的铝锗石英光纤，这个波长在1.52 μm 到1.55 μm 之间。

考虑到激光波长的优化，对于一个具有一定增益 g_i 的激光腔，信号波长的增益 g_s 的值可表示为：

$$g_s = \frac{\sigma_{as}}{\sigma_{al}} R\gamma + \sigma_{as} N_t (R - 1)$$

公式2

其中 N_t 为掺杂离子浓度。

在石英光纤基质中的铒离子的浓度可以由光纤的吸收峰值、峰值吸收截面、长度、峰值波长模式与光纤芯经中离子径向分布的重迭程度计算出来。我们在计算中采用的数值是每平方米 3×10^{25} 个离子。

图6 表示了激光腔的损耗从1 dB 到3.7 dB 时的 g_s 值。在曲线中的转折点给出的激光波长处，激光波长的任何变化所引起的信号增益变化最小。所期望的增益做为单程腔损耗的函数在图中表示出来。从这张图上看，可以比较具有相同增益但具有不同激射波长的放大器的灵敏度。例如，在放大器工作于2.8 dB 的信号增益时，980 nm 泵浦，激射波长1480 nm 的情况下，激光器的激射波长移动1 nm，其增益改变0.7 dB。做为比较，一个泵浦于1480 nm，激射波长1531 nm 的放大器，激射波长同样移动1 nm 时，信号增益改变0.25 dB，又例如，一个器件工作于1.6 dB 的较低增益的条件下，对1

n m 的激光波长移动, 信号增益变化仅仅不到 0.1 dB。

从公式2 的微分表达可以导出一个放大器工作在任何特定增益下信号增益对波长不敏感的激光波长。其微分表达如下:

$$\frac{dg_s}{d\nu_l} = \sigma_{as} R \left[\frac{h}{kT} \left(\frac{g_l}{\sigma_{al}} + N_t \right) Z_l(\nu) - \frac{g_l}{\sigma_{al}^2} \frac{d\sigma_{al}}{d\nu_l} \right]$$

公式3

其中

$$Z_l(\nu) = \frac{e^{\frac{h}{kT}(\nu_0 - \nu)}}{(1 + e^{\frac{h}{kT}(\nu_0 - \nu)})}$$

在一个限定的范围内, 可能找到一个或多个、激光波长, 其在一级近似时, 激光频率的变化不引起信号增益的变化。

设定 $dg_s / d\nu_l = 0$, 则可以得到

$$g_s = \sigma_{as} N_t \left[R \left(\frac{kT}{h Z_l(\nu) \sigma_{al}} \frac{d\sigma_{al}}{d\nu_l} \right)^{-1} + R - 1 \right]$$

其曲线绘于图7 中。

公式4

频率随着构成激光腔的光栅温度变化而移动, 在 $1.5 \mu\text{m}$ 处典型值为 $0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 所以 100°C 温度变化将引起波长变化 1 nm 。从图6 中定性分析可以看出, 如果激光器的波长是根据图7 选定的, 这个激光波长的移动对信号增益的影响可以忽略不计。

增益由于掺杂离子吸收截面与温度的关系所发生的变化是很小的。在室温左右, 对于典型的温度变化, 增益变化大致是线性的。这种变化可以被忽略, 或通过对优化的激光波长值做一个小的移动来补偿。

图4 表示出一个典型的掺铈铝锗石英光纤的相对增益系数曲线。它们是通过将相对发射和相对吸收截面数据依次对白光吸收测量值做归一化处理及侧逸光（由光纤侧部泄漏）的完全转换为荧光谱得出的。在两个极端曲线之间绘出了对于多种反转粒子数的相对增益系数的曲线。

这组曲线表明对于特定的反转数在带宽范围内的不同波长的增益之间的关系。例如一个放大器工作于70%的反转粒子数条件，其相对增益系数在1520 nm时约为0.2，而在1560 nm时约为0.35。

本发明的增益控制放大器，其激射波长及光腔损耗决定粒子的反转程度。例如如果腔损耗为0.4（以图4中的相对单位），那么对于激射波长为1532 nm的放大器，其工作在粒子数反转为72%处。而对1520 nm，其粒子数反转可能在90%左右。但对于波长短于1515 nm或波长长于1570 nm，因为在这样的波长上系统中没有足够的增益来维持激射，激射将不会产生。

对于一个无损腔，激光波长为1510 nm，放大器可以工作在控制状态的最小粒子数反转大约是60%。激光器的波长越短，最小粒子数反转变得越高。例如，如果要求的粒子数反转为70%，则在波长短于1490 nm时不可能得到这样的激光器。

上面的机理是对于典型的三能级放大器。四能级增益系统例如与镨有关的系统，则对于无损腔基本没有这样的限制。因为没有更低的激光能级态吸收，因而在激光波长上总有一定的增益，这意味着激光波长可以在增益带宽中的任何位置。

在三能级放大器的特定点处的信噪比的下降决定于那一点处的增益介质的反转粒子数。这对于具有寄生损耗机制的四能级激光器同样适用。

对于将粒子直接泵浦到上激光能级的放大器，可以得到的最大反转粒子数是由泵浦源的波长所控制的。较短的泵浦波长可以获得较多的粒子数反转。波长长于泵浦源的激光流的存在使反转粒子下降，从而降低信噪比。将这个因素减到最小在设计增益控制激光腔时十分重要。

放大器的噪声特性主要取决于其输入端的条件。通过减少放大器输入端的激光功率到最低程度，在这点上保持较高的反转粒子数，从而改善整个放大器的噪

声特性。这可以靠将激光腔的损耗主要集中到光纤的输出端，从而使之成为非对称腔来实现。这样，激光流量在放大器输入端较低，而在输出端较高，从而可能在放大器的输入端取得较高的反转粒子数，同时保证整个腔的净反转粒子数维持在给定的水平上。

一种实现这种非对称的方式是在光腔的输出端增加一个侧刻光栅，将特定激光波长的光从光纤芯中耦合出去，并在光纤包层中泄漏。侧刻光栅可以通过诸如 K a s h y a p 等人所写的上面提到过的参考文献中所说的方法制做。在这篇文献中，靠使一段光纤对紫外光敏感，和用紫外光使这段光纤印刻上干涉图形，从而在光纤上写入反射光栅。如果这段光纤与干涉条纹是正交的，则一个标准的反射光栅就形成了，如果光纤部分与干涉条纹呈一定的角度，则一个有角度的或称侧刻光栅就形成了。

激光波长的侧刻光栅可以置于激光腔中掺铒光纤光放大器及第二个光栅之间，以决定腔的损耗，通过这种方式，第一和第二个光纤腔光栅可能实现对激光波长的高反射。用高反射光栅构成激光器的优点在于激光腔对激光波长的杂散光干扰不敏感。这些杂散光可能在周围网络中传输，来自例如其它器件的自发辐射 (A S E) 或外部反射。进一步的好处是减小了来自激光腔的激光波长光对外部系统的影响。

本发明的增益控制放大器的一个重要优点是其对反转粒子数的独特设定，同时可以构造一个无源滤波器来均衡放大器带宽内的增益。

参考图8 中的光栅结构的例子，如果具有较宽的反射带宽的高反射光栅2 6 用在放大器的输入端，那么激光器的波长将由输出端的窄带反射光栅2 8 的反射波长唯一地决定。侧刻光栅3 9 控制腔的损耗。一组增益平坦光栅4 0 与输出端光栅3 8 共同控制从放大器中输出的信号光波长谱。增益平坦光栅4 0 由多个侧刻光栅构成，每个侧刻光栅在不同的波长上将不同数量的光耦合到光纤包层，从而均衡放大器输出光的增益谱。

放大器能够重构在其固定增益下使用可能很有用。实现这一点的一个有效方法是将图8 中所有器件构成在一个单一的可替换的单元里形成一个单一元件。从而通过更换这个元件实现增益的改变。这个放大器及这个可替换器件包括一些合适的可拆装的连接器。

将输出光栅设定为对激光波长只产生部分反射是可能的。实际上这样做有一

个缺陷，在激光腔外边需要有一个高效率的在激光波长上的衰减器与放大器相连，从而阻止激光波长的光从放大器中泄漏到下一级光系统中。

通过在一组放大器的开始端及末端放置第一个和第二个光栅，就可能保证所有放大器的稳定工作。因此，一个几十或几百公里的长距离通信线路可组合成一个增益控制放大器系统，它包括一个输入及滤波装置，一个输出及滤波装置和许多不同长度的放大光纤。这些放大光纤之间的间隔取决于它们之间网络的损耗情况。如果必要的话，在线路中还可以加入额外的滤波器。这样的装置也可以应用于无源光纤网络（P O N）即那种针对本地分布网而提出的网络，这样的分布系统在WDM系统中可能十分重要。

通常，对任何一种光纤放大器，建立任何一种模型去得到实际要求增益的特定信息，都需要对光纤参数有详尽的了解，其中包括对所有感光趣的波长（至少是泵浦光和信号光）的截面数据、稀土掺杂离子浓度、光纤芯中的掺杂分布、泵浦和信号光在光纤芯及长度方向上的模分布等等。这些信息综合起来，使得我们可以得出相对增益系数的曲线（如图4），知道将其变换为实际增益时的变换因子。对一个普通的放大器，这意味着对任何工作条件均可知放大器的增益和其所在处的反转粒子数，因为增益是已知的。

从这里可能设计一种增益控制器件。首先从图中（图4）读出用来提供所要求的信号增益的激光波长的范围，这一点十分必要。知道了增益和波长范围，再来考虑腔的损耗进行十分必要的系统优化。第一级优化包括选择一个激光波长，使之接近于吸收截面与发射截面之和的峰值波长（图5）。实际上，对所有稀土掺杂光纤系统，吸收截面峰值与发射截面的峰值非常接近。因此，将激光波长置于两者中的任意一个都是一个很好的近似。更进一步，如果希望放大器能承受较大的温度变化，那么下一步优化包括寻求合适的最小信号增益（或等效的反转粒子数）与激光波长的关系（图7）。从图5和图7中可以看出，这个最小值在接近损耗最佳值处存在。因此，可以保证总的稳定性。更进一步，在通常的工作温度范围，截面由于温度的改变引起的变化与温度成线性关系，这一事实意味着附加一个小的波长变化可以减少温度影响到最小。

本发明的增益控制放大器的进一步应用是放大器的使用特别建立在饱和状态下。在饱和放大器中，放大信号的输出功率相对独立于输入功率，这说明信号功率提高时增益将下降。

通过在饱和放大器中附加增益控制，则放大器可提供的最大增益受到限制。

在正常工作时，反转粒子数由高的信号流量决定，在激光腔波长上没有激射。但如果输入信号功率下降，增益控制将阻止增益上升。这种增益上升在大功率放大器中可以达到很高。从而，防止了过冲行为。同时，避免了由于从接头、复用器及其它网络器件上很小的反射引起的传输波长的不希望的自发受激振荡。

如前面已经说明，对掺铒光纤放大器的描绘只是示范性的，其它稀土元素掺杂可以应用于别的工作波长范围。镱就是一个例子。

与铒不同，镱具有四能级激光系统，可以支持1300nm跃迁内的任意处的粒子数反转。因此，在1300nm（跃迁范围）内没有对激射波长的限制。而且镱的增益谱非常对称，这意味着在吸收截面和发射截面之和的峰值（对于镱，其等效于发射截面的峰值）附近的波长范围一般被信号占据。尽管对于镱掺杂放大器激射范围可以从1250nm到1350nm，但为避开可能的一般发生在较长波长上的基态能级吸收（GSA）效应，最佳波长在1275nm左右。

尽管不可能将镱掺杂的放大器激射波长置于吸收截面与发射截面之和的峰值处，尽可能使激射波长贴近这个峰值位置将使控制效果更好。

对镱掺杂放大器的合适光纤是氟化物光纤。例如ZBLAN光纤或ZHBLAYLINP（对大数值孔径光纤）光纤，掺杂度在500-2000ppm（重量），对芯合适的ZHBLAYLINP的成分 [Zr : Hf : Ba : La : Y : Al : Na : Li : Pb] 是 [51 : 0 : 19 : 3.7 : 3 : 2.3 : 0 : 1.4 : 7]（单位：克分子%）而对包层是 [8.7 : 39.3 : 19 : 2.5 : 2 : 4.5 : 24 : 0 : 0]（克分子%）。光纤合适的泵浦源是驱动在700mw左右的Nd : YLF激光器。其输出1047nm左右的激光，很好地位于镱的950nm到1070nm的泵浦范围。

图9a到9e表示本发明进一步的选择性结构，其优点是不言而喻的。要注意到图中的破折线代表任选的装置。

申请人认定：一般来说，一些掺杂物质，如铒，具有与所要求的信号传输窗口波长不一致的吸收与发射截面之和的峰值波长。这时，为了最佳的增益稳定，激射波长可以位于这个峰值。其它掺杂物质，如镱，其所要求的信号传输窗口波长与吸收和发射截面之和的峰值波长大体上一致，这样，这些掺杂物质要求放大器的激射波长不位于这个峰值位置，但尽可能与之接近。

信号光波长与激射波长分开的程度主要取决于放大器腔对波长的分辨能力, 或者由反射器、波长选择滤波器及耦合器这些确定光腔激射波长的器件和信号输入输出设备可能获得的波长选择性来决定。一般来说, 波长选择器件, 例如光栅, 可以分辨近到相差5 nm 的波长。所以, 如果一个波长被置于峰值位置, 其余波长可置于5 nm 以内的位置。但是, 波长选择器件已经可以做到区分间隔为1 nm 的波长。

显然, 对于WDM系统, 其信号由多个波长成分构成, 每个波长成分均与振荡波长不同, 上面的限制将是针对波长最贴近振荡波长的成分而言的。

参考文献

"用于光纤器件的稀土掺杂氟化物玻璃"

Rare earth doped fluorozirconate glasses for fibre devices S. T. Davey & P. W. France, BT Technology Journal, Vol. 7, No. 1 January 1989

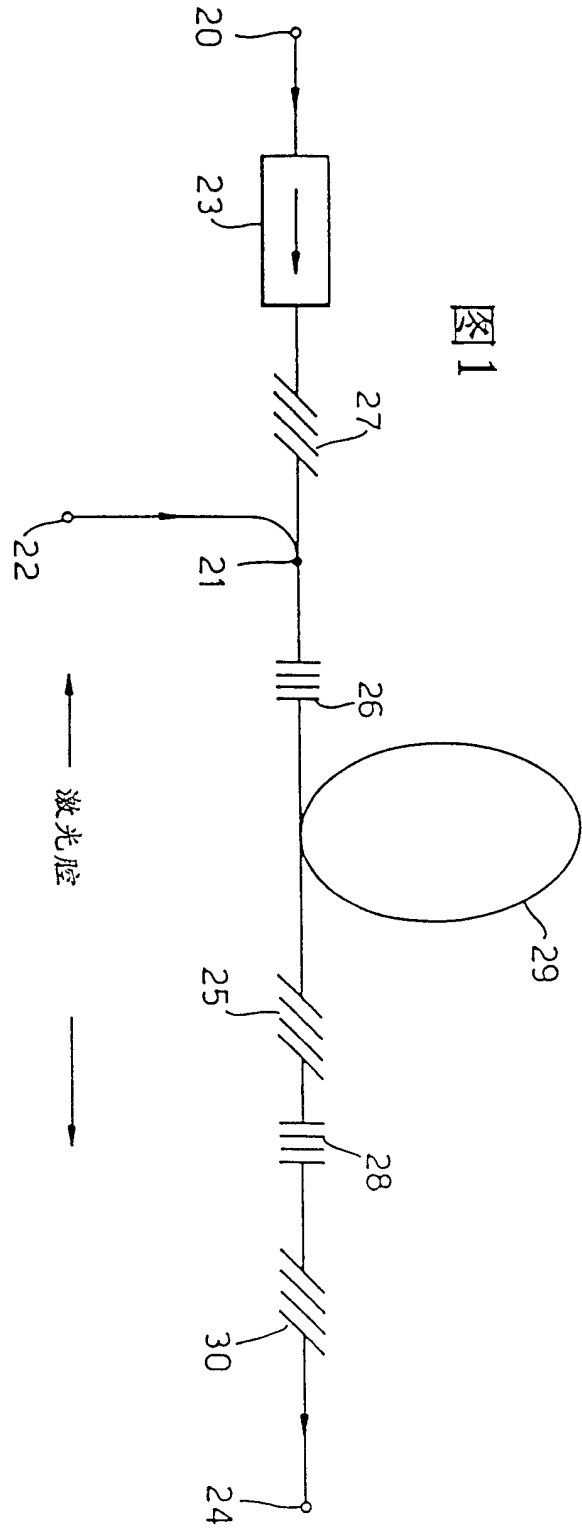


图1

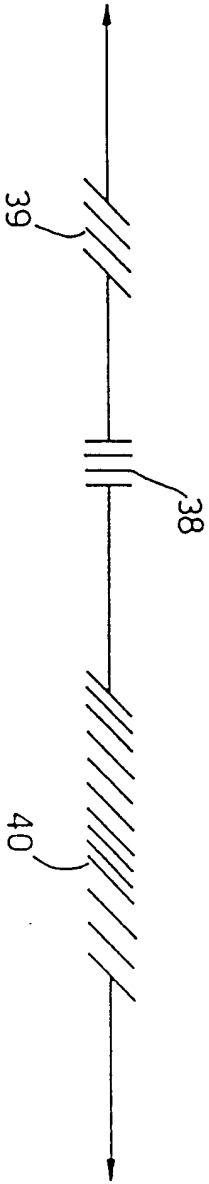


图8

图2

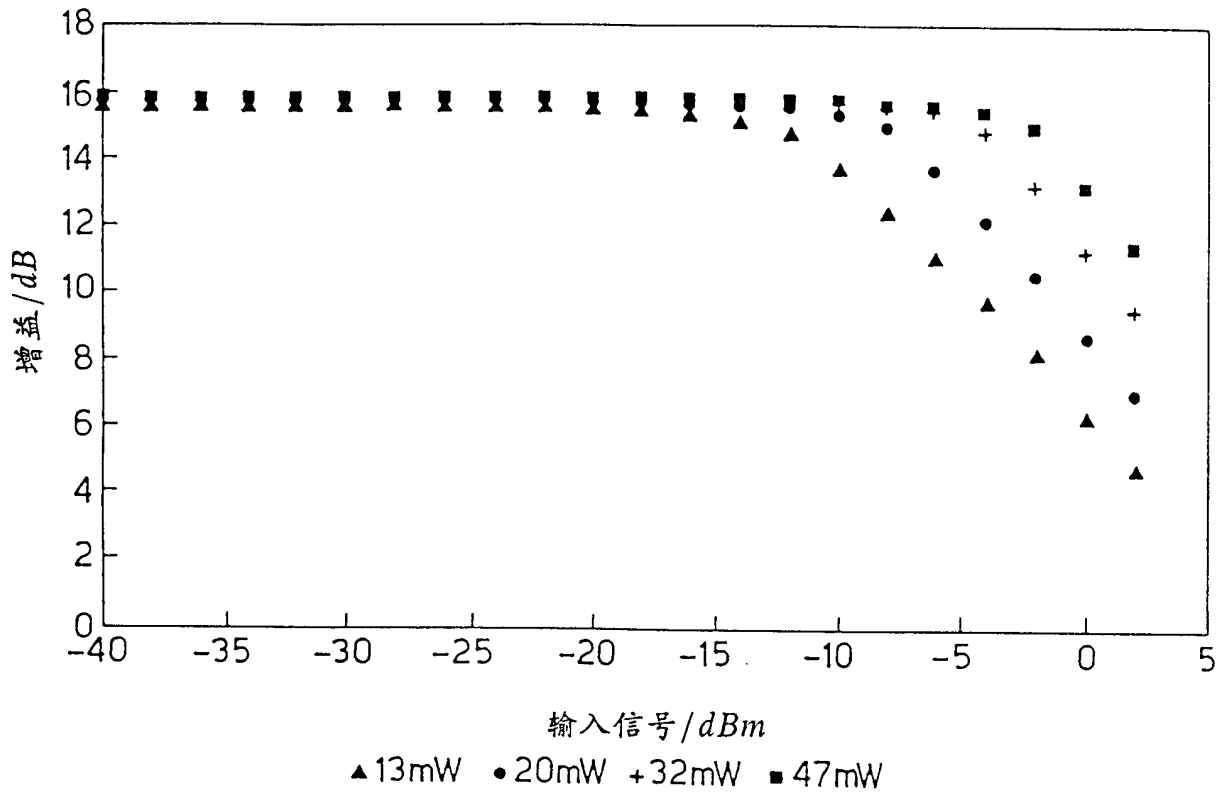


图3

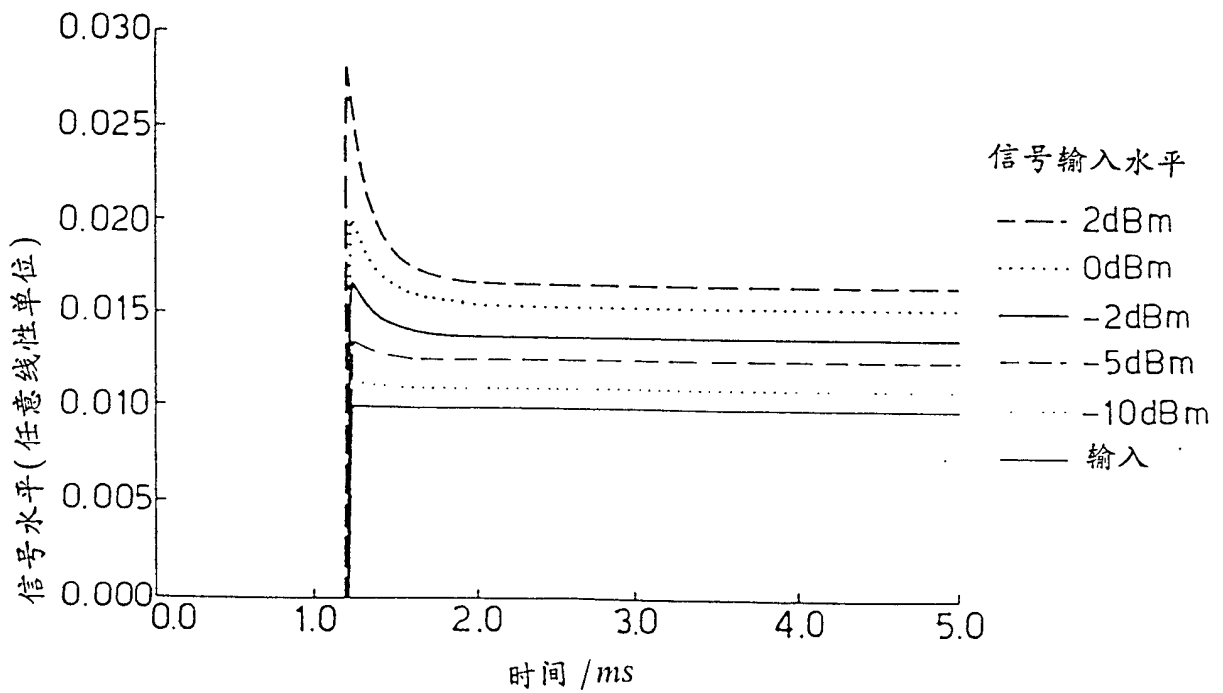


图4

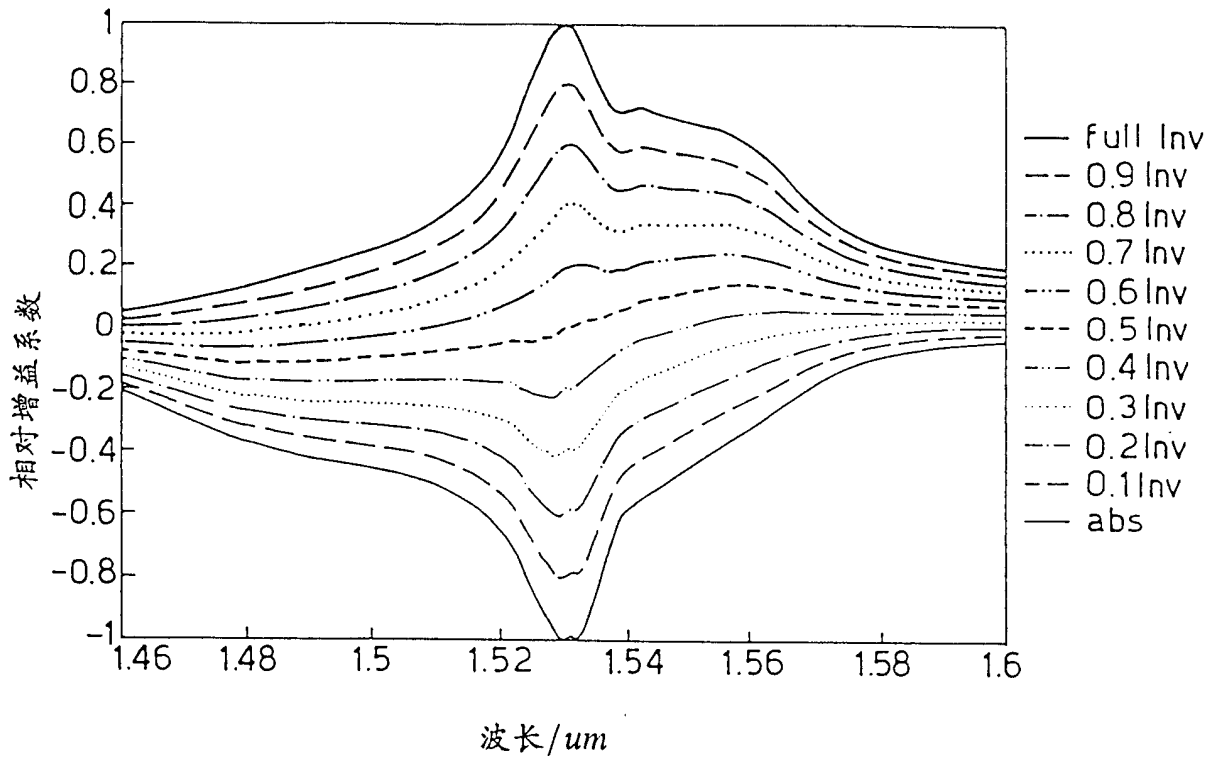


图5

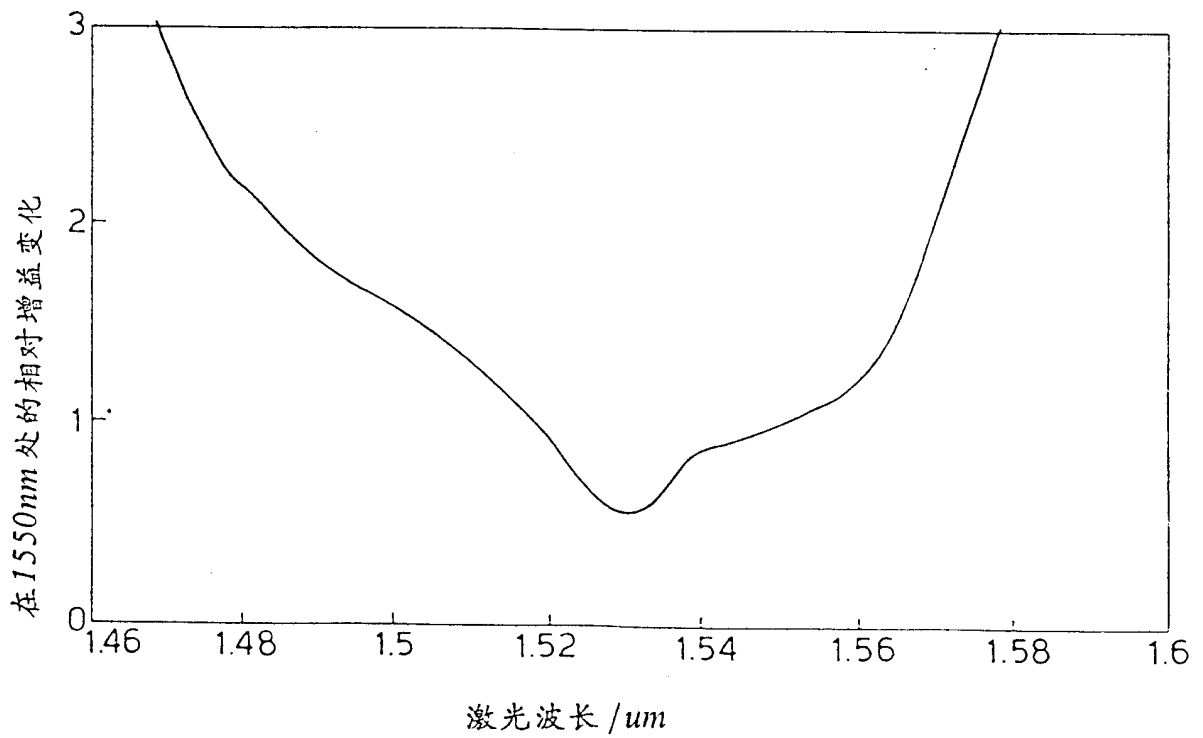


图6

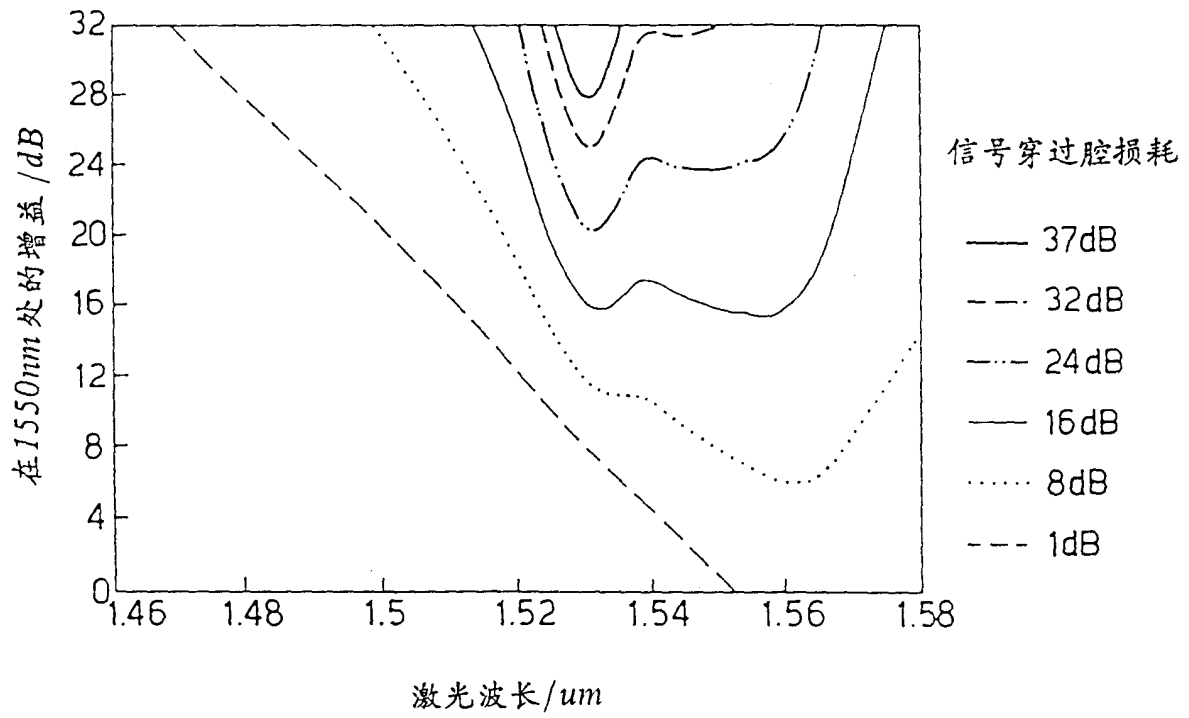
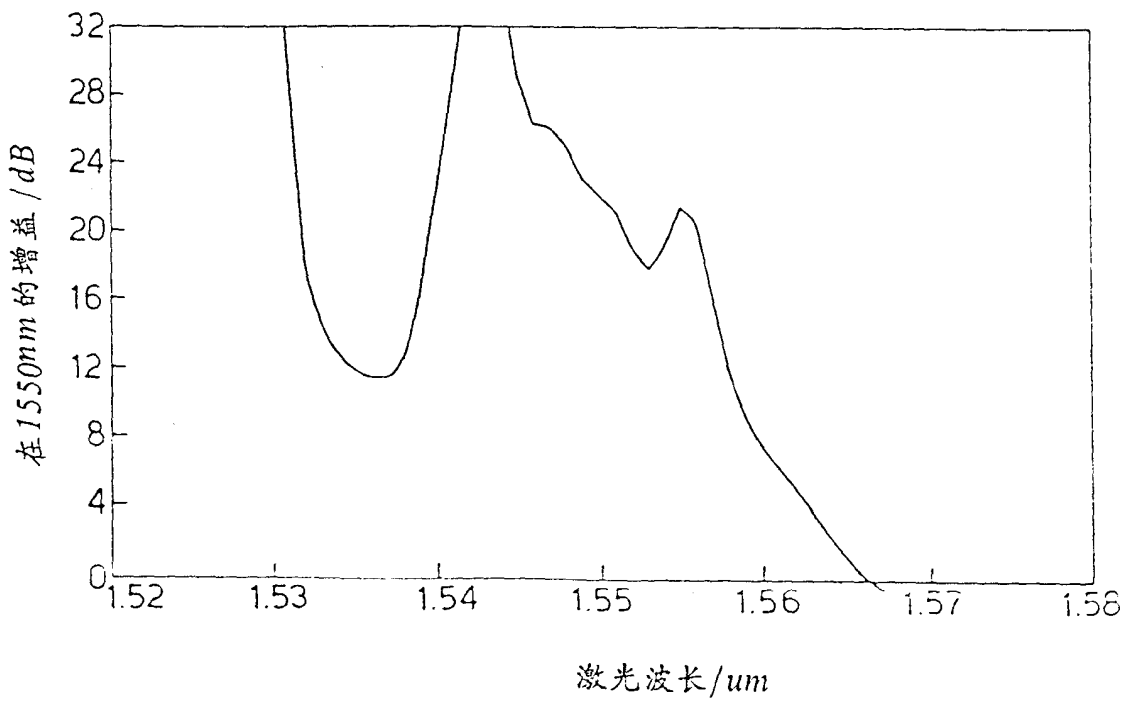


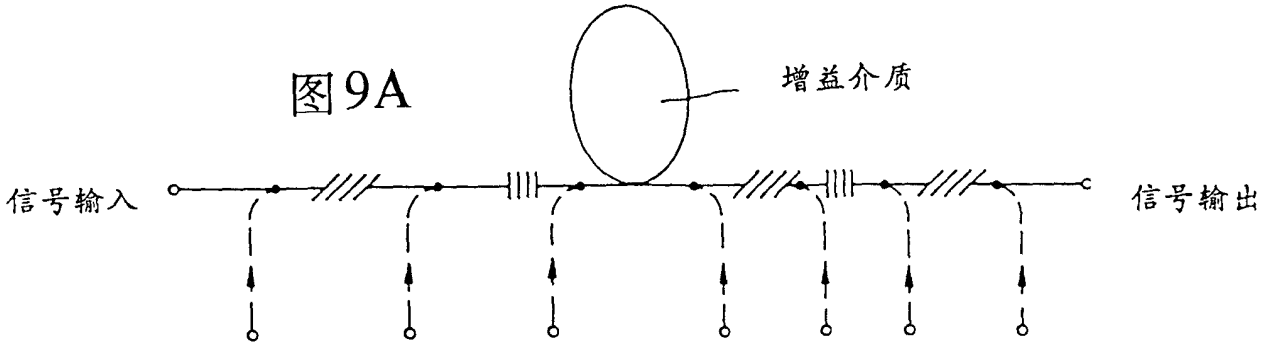
图7



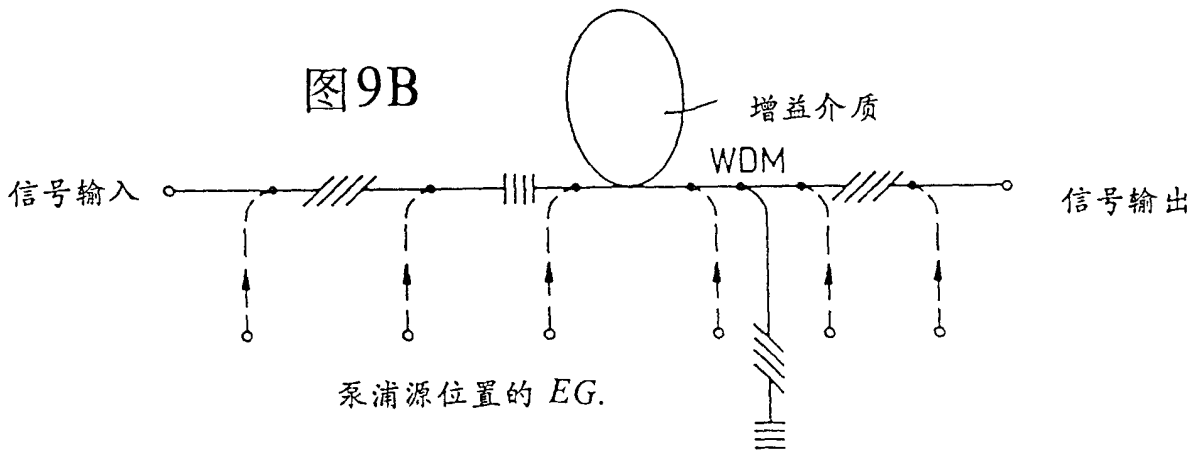
|||| 在激光波长的反射光栅

//// 在激光波长的侧刻光栅

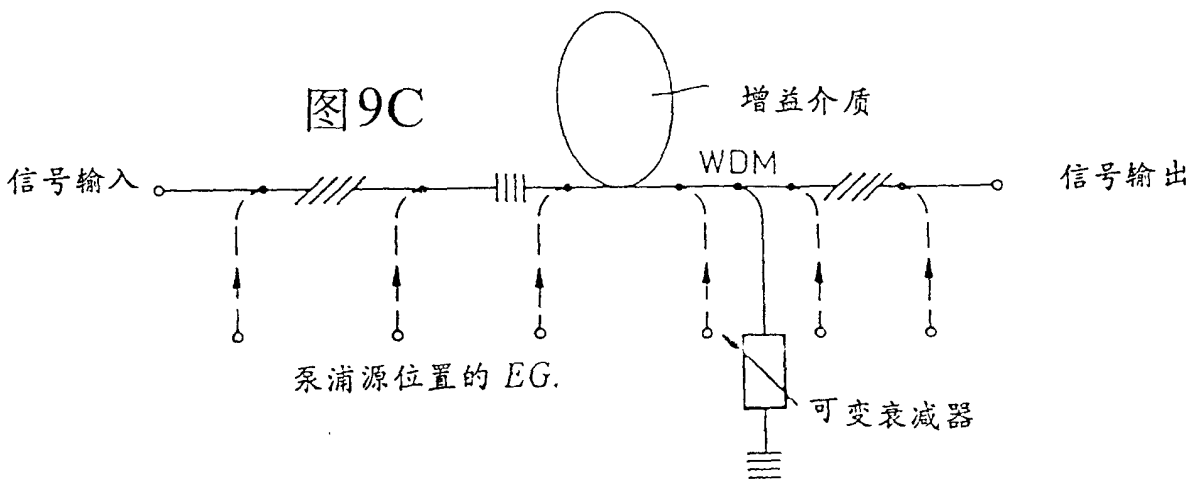
用于增益均衡的侧刻光栅可加在增益介质中或后的任意位置



泵浦源位置的EG.



泵浦源位置的EG.



泵浦源位置的EG.

图9D

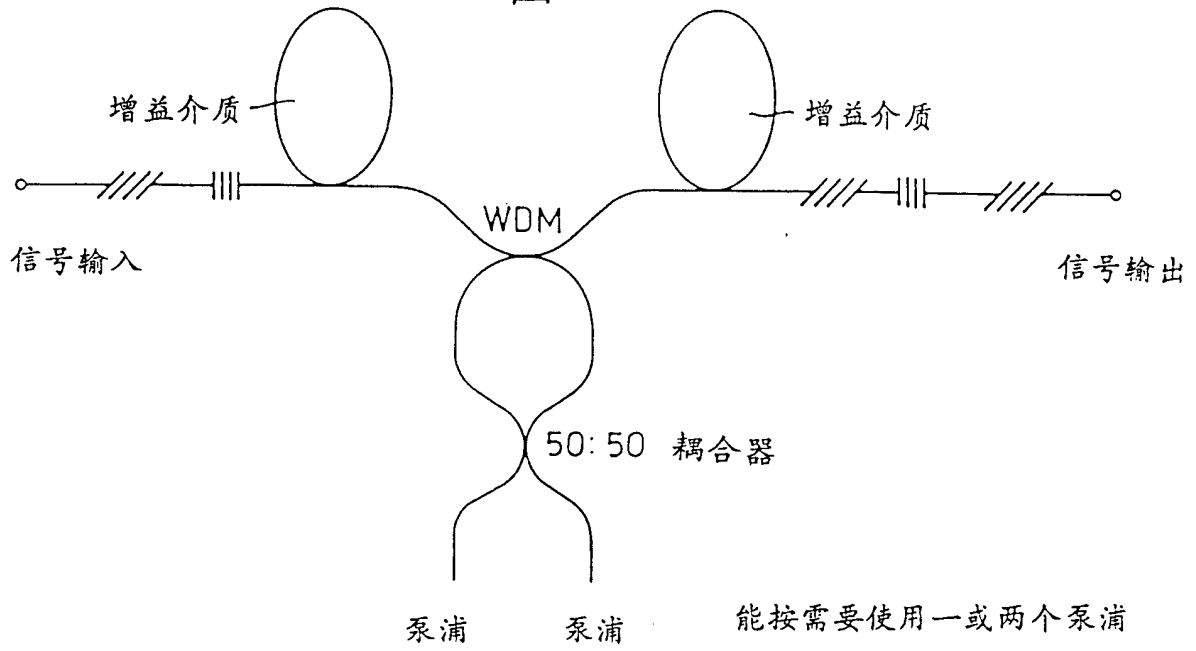


图9E

