

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 02106427. X

[51] Int. Cl.

H01S 3/067 (2006.01)

H04J 14/02 (2006.01)

H04B 10/17 (2006.01)

[45] 授权公告日 2006 年 10 月 11 日

[11] 授权公告号 CN 1279663C

[22] 申请日 2002.2.28 [21] 申请号 02106427. X

[30] 优先权

[32] 2001.6.14 [33] JP [31] 180779/2001

[71] 专利权人 富士通株式会社

地址 日本神奈川

[72] 发明人 尾中美纪 菅谷靖 林悦子

宿南宣文 渡边学

审查员 谢有成

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利  
商标事务所

代理人 蒋世迅

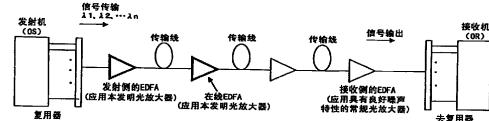
权利要求书 3 页 说明书 26 页 附图 22 页

[54] 发明名称

放大多波长光的光放大器

[57] 摘要

多波长光输入到作为光放大媒体的掺铒光纤。泵浦光提供给这个掺铒光纤。当多波长中短波长区上信号光输入到掺铒光纤的一种状态转变到没有输入信号光的另一种状态时，多波长光中长波长区上信号光的输出功率可以发生变化。按照如下的方法选择泵浦光波长，当功率发生变化时，长波长区上信号光的输出功率不可能是负值。



1. 一种用于放大 L 波段的多波长光的光放大器，包括：  
掺铒光纤，用作放大多波长光的光放大媒体；和  
泵浦光源，给所述光纤提供泵浦光，该泵浦光源的波长在 1400nm 到 1430nm 之间，其中

所述光纤的长度使得所述泵浦光可以传播到所述光纤的末端，并且使得，对于所述多波长光中波长最短的第一光和波长长于所述第一光的第二光，当在 AGC 控制下发生从所述第一光输入到所述光纤的状态到所述第一光不输入到所述光纤的状态的转变时，从所述光纤输出的所述第二光的功率偏差小于预定的阈值。

2. 按照权利要求 1 的光放大器，其中第一光的波长短于第二光的波长。

3. 按照权利要求 1 的光放大器，其中泵浦光在所述光纤中能传播的距离使得切断第一光时从所述光纤输出的第二光功率不小于第一光输入到所述光纤中时从所述光纤输出的第二光功率。

4. 按照权利要求 1 的光放大器，其中所述泵浦光源输出的泵浦光的波长使得泵浦光在所述光纤中能传播的距离大于最小距离。

5. 按照权利要求 1 的光放大器，还包括：

光器件，把从所述光纤输出的剩余泵浦光引导到传输线，用于传输连接到所述光放大器输入侧的多波长光。

6. 按照权利要求 1 的光放大器，其中所述光纤是石英光纤。

7. 按照权利要求 1 的光放大器，其中所述光纤是掺铒光纤。

8. 一种用于放大 L 波段的多波长光的光放大器，包括：

掺铒光纤，用作放大多波长光的光放大媒体；和

泵浦光源，给所述光纤提供泵浦光，该泵浦光源的波长在 1400nm 到 1430nm 之间，其中

所述光纤的长度使得所述泵浦光可以传播到所述光纤的末端，并且使得，对于所述多波长光中波长最短的第一光和波长长于所述第一光的第

二光，当在 AGC 控制下，所述第一光的功率减小时，从所述光纤输出的所述第二光的功率偏差小于预定的阈值。

9. 一种用于放大 L 波段的多波长光的光放大器，包括：

掺铒光纤，用作放大多波长光的光放大媒体；和

泵浦光源，给所述光纤提供泵浦光，该泵浦光源的波长在 1400nm 到 1430nm 之间，其中

泵浦光的功率和波长使得在所述光纤输出端处获得最小反转粒子数比率，该最小反转粒子数比率使得对于所述多波长光中波长最短的第一光和波长大于所述第一光的第二光，当在 AGC 控制下发生从所述第一光输入到所述光纤的状态到所述第一光不输入到所述光纤的状态的转变时，从所述光纤输出的所述第二光的功率偏差小于预定的阈值。

10. 按照权利要求 9 的光放大器，其中第一光的波长短于第二光的波长。

11. 按照权利要求 9 的光放大器，其中所述光纤输出端处的反转粒子数比率使得，切断第一光时从所述光纤输出的第二光功率不小于第一光输入到所述光纤中时从所述光纤输出的第二光功率。

12. 按照权利要求 9 的光放大器，其中基于所述光放大器增益确定最小反转粒子数比率。

13. 一种用于放大 L 波段的多波长光的光放大器，包括：

掺铒光纤，用作放大多波长光的光放大媒体；和

泵浦光源，给所述光纤提供泵浦光，该泵浦光源的波长在 1400nm 到 1430nm 之间，其中

所述泵浦光的功率和波长使得在所述光纤输出端处获得最小反转粒子数比率，该最小反转粒子数比率使得对于所述多波长光中波长最短的第一光和波长大于所述第一光的第二光，当在 AGC 控制下所述第一光的功率减小时，从所述光纤输出的所述第二光的功率偏差小于预定的阈值。

14. 一种配备多个光放大器的光传输系统，光放大器用于放大发射机与接收机之间的 L 波段多波长光，多个光放大器中至少一个的每个光放大器包括：

掺铒光纤，用作放大多波长光的光放大媒体；和

泵浦光源，给所述光纤提供泵浦光，该泵浦光源的波长在 1400nm 到 1430nm 之间，其中

所述光纤的长度使得所述泵浦光可以传播到所述光纤的末端，所述泵浦光的功率和波长使得在所述光纤输出端处获得最小反转粒子数比率，所述距离或最小反转粒子数比率使得，对于所述多波长光中波长最短的第一波和波长长于所述第一波的第二波，当在 AGC 的控制下发生从所述第一光输入到所述光纤的状态到所述第一光不输入到所述光纤的状态的转变时，从所述光纤输出的所述第二光的功率偏差小于预定的阈值。

15. 一种用于放大 L 波段的多波长光的光放大器，包括：

掺铒光纤，用作放大多波长光的光放大媒体；和

泵浦光源，给所述光纤提供泵浦光，该泵浦光源的波长为 1430nm，其中

所述光纤的长度使得所述泵浦光可以传播到所述光纤的末端，并且使得，对于所述多波长光中波长最短的第一光和波长长于所述第一光的第二光，当在 AGC 控制下发生从所述第一光输入到所述光纤的状态到所述第一光不输入到所述光纤的状态的转变时，从所述光纤输出的所述第二光的功率偏差小于预定的阈值。

## 放大多波长光的光放大器

### 技术领域

本发明涉及用在 WDM（波分复用）传输系统中的光放大器。

### 背景技术

最近以来，随着互联网技术的发展，通过网络发射的信息量一直以很快的速度增长。所以，特别是在中继线路的光传输系统中，要求传输线路有更大的容量和灵活的网络结构。作为满足这些要求的一种最有效方法，WDM（波分复用）传输系统已经商业化。波分复用传输系统是通过一条光纤同时发射多个信号的一种技术，它可以通过复用多个不同波长的信号光而实现。在北美等地，已经实现了波分复用传输系统的商业化。

目前，在波分复用传输系统所用的光放大器中，掺稀土光纤光放大器得到最普遍的使用。通过添加稀土元素到光纤中，掺稀土光纤光放大器实现光放大。例如，掺铒光纤光放大器（EDFA）是大家所熟知的。由于掺稀土光纤光放大器有宽的增益波段，并可以集体地放大多波长光，这种放大器广泛地用作实现波分复用传输系统的重要元件。

通常，掺铒光纤光放大器主要是放大称之为“C 波段（常规波段）”的 1530-1565 nm 波段，然而，当前放大称之为“L 波段（长波长波段）”的 1570-1610 nm 波段的光放大器也正在得到发展。目前，把 C 波段和 L 波段合在一起，利用掺铒光纤光放大器的波分复用传输系统能够复用约 200 个波（信道）。

在掺铒光纤光放大器的设计中，必须正确地选择反转粒子数比率（或反转粒子数密度），因此，波段中复用的每个信号光的增益可以是恒定的。以下简要地描述掺铒光纤光放大器的设计方法。

图 1 表示掺铒光纤光放大器的增益系数与波长之间的关系，其中铒的反转粒子数比率作为一个参数。反转粒子数比率是跃迁到激发态的铒元素数目与添加到光纤中铒元素总数之比。增益系数是单位长度掺铒光纤

得到的增益。所以，在增益系数为正的区域中输入光被放大，而在增益系数为负的区域中输入光功率退化。

如图 1 所示，掺铒光纤的增益不但与波长有关，而且还与反转粒子数比率有关。具体地说，反转粒子数比率越大，增益就越高。反转粒子数比率越小，增益就越低。根据图 1 所示的特性，我们知道以下的性质。

(1) 在集体放大 C 波段的情况下，由于该信号波段的增益-波长特性必须是平坦的，掺铒光纤的反转粒子数比率最好是约“0.7”。若反转粒子数比率是“0.7”，则可以得到相当高的增益系数。所以，使用相当短的光纤，放大 C 波段的掺铒光纤光放大器可以保证足够的增益。

(2) 在集体放大 L 波段的情况下，由于该信号波段的增益-波长特性必须是平坦的，掺铒光纤的反转粒子数比率最好是约“0.4”。若反转粒子数比率是“0.4”，则增益系数是相当地低。所以，为了使 L 波段的增益与 C 波段的增益相当，放大 L 波段的掺铒光纤光放大器的长度必须相应地长一些。

图 2 表示放大 L 波段的掺铒光纤光放大器的基本配置。这种光放大器通常称之为增益移位型掺铒光纤光放大器。该放大器包括：作为光放大媒体的掺铒光纤 1，光隔离器 2-1 和 2-2，波分复用器（例如，WDM 耦合器）3 和泵浦光源 4。从传输线输入的多波长光通过光隔离器 2-1 和 WDM 耦合器 3 输入到掺铒光纤 1。此处，泵浦光源 4 产生的泵浦光提供给掺铒光纤 1。所以，多波长光是被掺铒光纤 1 放大的。然后，放大的多波长光通过光隔离器 2-2 之后输出。放大 C 波段的掺铒光纤光放大器的配置与放大 L 波段的这种放大器的配置基本相同。然而，作为光放大媒体的两种光纤长度是不同的。

在这种光放大器中，例如，泵浦光源 4 的输出功率是受反馈系统的控制，反馈系统用于保持多波长光输出功率的恒定。具体地说，从掺铒光纤 1 输出的部分多波长光被分光器 11 引导到控制电路 12。于是，这个控制电路 12 按照如下的方法控制泵浦光源 4，使接收的多波长光可以保持在特定的电平上。

在波分复用传输系统中，可以给每个波长设置通信信道。所以，在不

安装新的光纤或改变光纤之间连接的条件下，可以灵活地改变传输系统的配置。为了建立灵活的传输网，在具有多个不同波长的多个复用光信号中，必须实现分插特定波长光信号的光通信系统。

然而，当切断 L 波段多个信号光中的一个信号光时，剩余信号的掺铒光纤光放大器的增益发生变化。具体地说，与输入上述短波长区上信号光得到的光功率比较，若切断 L 波段中短波长区上的信号光时，则从掺铒光纤光放大器输出的 L 波段中长波长区上信号光的光功率就减小。在此情况下，长波长区上剩余信号光的光功率减小 10 dB 或更多，它与各种条件有关。所以，若发生这种现象，则接收机不能接收长波长区上的剩余信号光是可能的，这就是个问题。

我们认为，这种现象是由于这样一个事实，L 波段中短波长区上的信号光成了长波长区上信号光的泵浦光。在以下的描述中，这种现象称之为“输出功率变化现象”或“偏差”。

理论上，利用图 2 所示的反馈系统可以解决偏差问题。具体地说，当掺铒光纤 1 的输出光功率减小时，借助于控制电路 12 增大泵浦光源 4 的功率以补偿偏差。然而，为了补偿这种偏差，必须准备响应速度为微秒量级的反馈系统，实现这种装置是困难的。即使可以实现这种反馈系统，控制系统的稳定性也是个问题。由于这种方法的目的是补偿光放大媒体中因泵浦光反馈控制引起的偏差，但从掺铒光纤光放大器的光静态特性观点考虑，这不可能是一种基本的解决方法。具体地说，这种方法不能避免偏差本身。

为了避免偏差，例如，有缩短掺铒光纤光放大器中光纤长度的一种配置。然而，若缩短光纤的长度，则如参照图 1 所描述的，不能得到足够的增益。为了使短光纤有足够的增益，就要求较高的反转粒子数比率。然而，在改变反转粒子数比率的情况下，增益随波长而变化，不能以相同的增益放大多波长光中复用的每个信号。

作为另一种解决方法，有多个短掺铒光纤互相串联连接的一种配置。然而，在这种配置中，由于必须给每个掺铒光纤准备泵浦光源，实现光放大器的小型化和低成本是困难的。

这种问题不仅发生在掺铒光纤光放大器中，也可以发生在其他形式的光放大器中。

#### 发明内容

本发明的目的是，即使在用于放大多波长光的光放大器中一部分的多波长光被切断，也可以防止剩余光输出功率的减小。

本发明提供一种用于放大 L 波段的多波长光的光放大器，包括：掺铒光纤，用作放大多波长光的光放大媒体；和泵浦光源，给所述光纤提供泵浦光，该泵浦光源的波长在 1400nm 到 1430nm 之间，其中所述光纤的长度使得所述泵浦光可以传播到所述光纤的末端，并且使得，对于所述多波长光中波长最短的第一光和波长长于所述第一光的第二光，当在 AGC 控制下发生从所述第一光输入到所述光纤的状态到所述第一光不输入到所述光纤的状态的转变时，从所述光纤输出的所述第二光的功率偏差小于预定的阈值。

本发明还提供一种一种用于放大 L 波段的多波长光的光放大器，包括：掺铒光纤，用作放大多波长光的光放大媒体；和泵浦光源，给所述光纤提供泵浦光，该泵浦光源的波长在 1400nm 到 1430nm 之间，其中所述光纤的长度使得所述泵浦光可以传播到所述光纤的末端，并且使得，对于所述多波长光中波长最短的第一光和波长长于所述第一光的第二光，当在 AGC 控制下，所述第一光的功率减小时，从所述光纤输出的所述第二光的功率偏差小于预定的阈值。

在光放大器中，泵浦光可以传播的距离（有效长度）超过阈值时，光纤能够充分地吸收泵浦光的能量。所以，多波长光可以从泵浦光接收足够的能量。具体地说，在多波长光的第一光与第二光之间不需要转移能量。所以，即使切断第一光，第二光的输出功率略微发生变化（通常是减小）。

可以设计泵浦光源输出这样一种波长的泵浦光，该泵浦光在光纤中可以传播的距离超过最小距离。

本发明提供一种用于放大 L 波段的多波长光的光放大器，包括：掺铒光纤，用作放大多波长光的光放大媒体；和泵浦光源，给所述光纤提供泵浦光，该泵浦光源的波长在 1400nm 到 1430nm 之间，其中泵浦光的功率和波长使得在所述光纤输出端处获得最小反转粒子数比率，该最小反转粒子数比率使得对于所述多波长光中波长最短的第一光和波长长于所述第一光的第二光，当在 AGC 控制下发生从所述第一光输入到所述光纤的状态到所述第一光不输入到所述光纤的状态的转变时，从所述光纤输出的所述第二光的功率偏差小于预定的阈值。

在这种配置中也是如此，即使切断第一光，第二光的输出功率以相同的函数略微发生变化（通常是减小）。

本发明还提供一种用于放大 L 波段的多波长光的光放大器，包括：掺铒光纤，用作放大多波长光的光放大媒体；和泵浦光源，给所述光纤

提供泵浦光，该泵浦光源的波长在 1400nm 到 1430nm 之间，其中所述泵浦光的功率和波长使得在所述光纤输出端处获得最小反转粒子数比率，该最小反转粒子数比率使得对于所述多波长光中波长最短的第一光和波长长于所述第一光的第二光，当在 AGC 控制下所述第一光的功率减小时，从所述光纤输出的所述第二光的功率偏差小于预定的阈值。

本发明另外提供一种配备多个光放大器的光传输系统，光放大器用于放大发射机与接收机之间的 L 波段多波长光，多个光放大器中至少一个的每个光放大器包括：掺铒光纤，用作放大多波长光的光放大媒体；和泵浦光源，给所述光纤提供泵浦光，该泵浦光源的波长在 1400nm 到 1430nm 之间，其中所述光纤的长度使得所述泵浦光可以传播到所述光纤的末端，所述泵浦光的功率和波长使得在所述光纤输出端处获得最小反转粒子数比率，所述距离或最小反转粒子数比率使得，对于所述多波长光中波长最短的第一波和波长长于所述第一波的第二波，当在 AGC 的控制下发生从所述第一光输入到所述光纤的状态到所述第一光不输入到所述光纤的状态的转变时，从所述光纤输出的所述第二光的功率偏差小于预定的阈值。

本发明另外提供一种用于放大 L 波段的多波长光的光放大器，包括：掺铒光纤，用作放大多波长光的光放大媒体；和泵浦光源，给所述光纤提供泵浦光，该泵浦光源的波长为 1430nm, 其中所述光纤的长度使得所述泵浦光可以传播到所述光纤的末端，并且使得，对于所述多波长光中波长最短的第一光和波长长于所述第一光的第二光，当在 AGC 控制下发生从所述第一光输入到所述光纤的状态到所述第一光不输入到所述光纤的状态的转变时，从所述光纤输出的所述第二光的功率偏差小于预定的阈值。

#### 附图说明

图 1 表示掺铒光纤的增益系数与波长之间的关系；

图 2 表示放大 L 波段的 EDFA 基本配置；

图 3 表示掺铒光纤的反转粒子数比率；

图 4 表示位于 L 波段中多波长光的光功率分布；

图 5 表示偏差与 EDF 长度之间的关系；

- 
- 图 6 表示铒离子的能级和跃迁；  
图 7 表示短波长区上信号光的泵浦效应；  
图 8A 表示泵浦光波长变化时得到的偏差；  
图 8B 表示泵浦光波长与它的有效长度之间的关系；  
图 9 表示掺铒光纤中泵浦光的衰减特性；  
图 10 表示泵浦光波长与噪声系数之间的关系；  
图 11 表示获得预定增益所需的泵浦光功率与泵浦光波长之间的关系；  
图 12 表示偏差与反转粒子数比率之间的关系；  
图 13A 和 13B 表示泵浦光波长和信号光输入功率变化时得到的模拟结果；  
图 14A 和 14B 表示改变光放大器增益时反转粒子数比率与偏差之间关系的模拟结果；  
图 15 表示反转粒子数比率的阈值与增益之间的关系；  
图 16 表示反转粒子数比率的阈值与泵浦光波长之间的关系；  
图 17A 表示 EDF 长度与泵浦光波长之间的关系；  
图 17B 表示剩余泵浦光功率与泵浦光波长之间的关系；  
图 18A 和 18B 表示配备用于切断剩余泵浦光的光滤波器的光放大器；  
图 19A 表示利用剩余泵浦光作喇曼放大的光放大器；  
图 19B 和 19C 表示去复用器的损耗特性；  
图 20 表示 EDFA 和喇曼放大共享泵浦光源的光放大器；  
图 21 表示利用该实施例光放大器的长途光传输系统的配置；和  
图 22 表示应用该实施例光放大器的光放大设备配置。

#### 具体实施方式

参照附图描述本发明的几个实施例。在以下的描述中，我们主要描述掺铒光纤光放大器，用作放大 L 波段中多波长光的光放大器。添加了铒的光纤是掺铒光纤，它可以称之为“EDF”。掺铒光纤光放大器可以称之为“EDFA（EDF 放大器）”。

首先，我们研究掺铒光纤光放大器的特性和现有技术中引起偏差的原

因。

放大多波长光的光放大器一般设计成满足以下两个条件。

- (1) 可以获得所需的增益。
- (2) 增益在多波长光所在的整个波段内是平坦的。

所以，在设计放大 L 波段的掺铒光纤光放大器中，设定掺铒光纤的平均反转粒子数比率约为“0.4”以满足条件(2)。例如，通过控制泵浦光的光功率，可以控制反转粒子数比率。设定掺铒光纤的长度为这样的长度，在平均反转粒子数比率约为“0.4”的状态下，条件(1)得到满足。

图 3 表示掺铒光纤的反转粒子数比率。通过模拟得到这个反转粒子数比率，其中通过正向泵浦把预定光功率的泵浦光提供给掺铒光纤。

反转粒子数比率在靠近泵浦光的输入端是高的。具体地说，在从输入端直到约 10 m 的区域，反转粒子数比率大约为“0.5”至“0.9”。然而，离泵浦光输入端的距离越大，泵浦光的衰减就越大，相应地反转粒子数比率就越小。在图 3 所示的例子中，在离输入端 40 m 的位置处，反转粒子数比率大约为“0.2”。

以下是根据图 3 和图 1 得到的结论。

(1) 在放大 C 波段的情况下，平均反转粒子数比率一定是在“0.7”附近。所以，在图 3 所示的例子中，掺铒光纤的长度约为 10 m。此处，在放大 C 波段的掺铒光纤光放大器中，反转粒子数比率在整个掺铒光纤中是高的。具体地说，在掺铒光纤的输出端，泵浦光功率也是足够地高。

(2) 在放大 L 波段的情况下，平均反转粒子数比率一定是在“0.4”附近。所以，在图 3 所示的例子中，掺铒光纤的长度约为 40 至 50 m。此处，在放大 L 波段的掺铒光纤光放大器中，反转粒子数比率在掺铒光纤输出端附近是低的。就是说，在掺铒光纤输出端附近也不能提供足够的泵浦光。

图 4 表示位于 L 波段中多波长光的光功率分布。在图 4 中，在间隔约为 4 nm 的 1570 nm 至 1605 nm 的波段中复用 80 个波。然而，在图 4 中，为了容易明白附图中的曲线，在该图中只画出 80 个波中大致等间隔

的 7 个波。

每个波长的多个输入光功率是相等的。位于 1570 nm 至 1605 nm 波段内 80 个波中每个波用作信号光，利用这些信号光的通信信道称之为“ch1”至“ch80”。

如图 4 所示，每个信号光的光功率分布与波长有很大的关系。具体地说，在掺铒光纤输入端附近，短波长区（约 1570 nm）上的光被快速地放大，且光功率达到峰值，然后，在直到输出端之前光功率逐渐地下降。然而，长波长区（约 1605 nm）上光的光功率从掺铒光纤输入端开始直到输出端是单调地增大。

参照图 3 和 4 所示的特性，我们发现，掺铒光纤中增益的波长特性与反转粒子数比率有关。具体地说，在高反转粒子数比率区域（例如，从泵浦光的输入端开始直到 10 m 的区域），位于 L 波段中所有的波（ch1 至 ch80）都被放大。然而，在低反转粒子数比率区域，虽然 L 波段中长波长区上的光被放大，而短波长区上光的光功率是减小。根据这个事实可以判断，在低反转粒子数比率区域，L 波段中短波长区上的光作为长波长区上光的泵浦光。具体地说，在低反转粒子数比率区域，我们推测泵浦光的能量是不够的，L 波段中短波长区上的部分光能量被长波长区上的光吸收。

所以，若泵浦光的光功率是恒定的，则短波长区上有信号光情况下的长波长区上信号光的光功率高于短波长区上没有信号光情况下的信号光光功率。具体地说，例如，若 L 波段中短波长区上的信号光（例如，ch1）被切断，而利用掺铒光纤光放大器放大位于 L 波段中多波长光，则长波长区上剩余信号光的光功率就减小。这种现象称之为“偏差”。

图 5 表示偏差与 EDF 长度之间的关系。在图 5 中，在 ch1 信号光和 ch80 信号光都输入的状态转变成仅有 ch80 信号光输入的状态时，画出光功率的偏差。

若掺铒光纤是短的，则不发生偏差。在图 5 所示的例子中，若光纤长度是在 20 m 以下，则基本上没有偏差。然而，若光纤长度超过预定值，则发生偏差。

可以利用泵浦光的光功率或反转粒子数比率解释这个事实。就是说，若掺铒光纤是长的，则在输出端附近不能提供足够的泵浦光，相应地，反转粒子数比率是低的。所以，在掺铒光纤输出端附近，长波长区上的信号光不能从泵浦光吸收足够的能量，而从短波长区上的信号光接收能量。因此，若掺铒光纤是长的，则当切断短波长区上的信号光时，长波长区上信号光的光功率就减小。

图 6 表示铒离子的能级和它的跃迁。在这个例子中，我们假设  $0.98 \mu m$  泵浦光， $1.48 \mu m$  泵浦光和 L 波段中的多波长光输入到掺铒光纤中。

铒离子借助于  $0.98 \mu m$  泵浦光从状态 I ( $15/2$ ) 跃迁到状态 II ( $11/2$ )，以及借助于  $1.48 \mu m$  泵浦光从状态 I ( $15/2$ ) 跃迁到状态 I ( $13/2$ )。若铒离子从状态 I ( $13/2$ ) 跃迁到状态 I ( $15/2$ )，则在  $1.55-1.57 \mu m$  的波段中产生自发辐射光 (ASE)。此外，状态 I ( $15/2$ ) 通过基态吸收 (GSA) 跃迁到状态 I ( $13/2$ )。这种基态吸收包括这样的一种现象，铒离子吸收 L 波段中短波长区上部分的信号光能量。具体地说，若泵浦光的光功率不够，则铒离子有时吸收 L 波段中短波长区上部分的信号光能量。于是，若铒离子从状态 I ( $13/2$ ) 跃迁到状态 I ( $15/2$ )，则在  $1.55 \mu m$  至  $1.61 \mu m$  波段中的感应光 (位于 L 波段中的信号光) 引起感应发射，从而放大 L 波段。

如图 1 所示，若反转粒子数比率小于 0.3，则 L 波段中的增益系数变成负的。这种现象意味着，图 6 中的 GSA 大于感应辐射。此处，如图 3 所示，在掺铒光纤输出端附近（离输入端  $20 m$  或更长的区域），反转粒子数比率小于 0.3。所以，根据这个事实可以判断，在掺铒光纤输出端附近，L 波段中短波长区上信号光的 GSA 放大长波长区上的信号光。

图 7 表示短波长区上信号光的泵浦效应。在这个例子中，我们假设利用图 4 中所示的 ch1 和 ch80。特性 “a” 指出 ch1 和 ch80 都输入到掺铒光纤时得到的 ch1 光功率。特性 “b” 指出 ch1 和 ch80 都输入到掺铒光纤时得到的 ch80 光功率。特性 “c” 指出仅有 ch80 输入到掺铒光纤时得到的 ch80 光功率。在此情况下，泵浦光的光功率是恒定的。

在比较特性 “b” 与特性 “c” 时，我们发现，ch80 的信号光被 ch1

的信号光泵浦。具体地说，当切断 ch1 的信号光时，ch80 信号光的光功率在掺铒光纤输出端附近大大地衰减了，而当输入 ch1 的信号光时，不能检测到这种衰减。这意味着，ch80 的信号光被 ch1 信号光的 GSA 放大。

如上所述，在利用掺铒光纤光放大器放大多波长光的系统中，若由于某种原因切断短波长区上的信号光，则长波长区上信号光的输出功率就减小。即使该光放大器配备 ALC（自动电平控制）电路或 AGC（自动增益控制）电路，避免暂时的偏差是困难的。所以，按照常规的系统，有这样一种可能性，从这种光放大器接收多波长光的接收机不能接收长波长区上的信号光，因此可能发生接收差错。

若放大器是按照如下方法配置的，通过设定低的平均反转粒子数比率，使作为光放大媒体的光纤长度变长，则这种现象不但出现在掺铒光纤光放大器中，而且还出现在完成三级跃迁的其他掺稀土光纤光放大器中。例如，相同的偏差还发生在完成膺三级跃迁的掺铥（Tm）氟化物光纤光放大器中。

考虑到掺稀土光纤的特性，按照如下的方法设计本发明光放大器，可以不发生上述的偏差。具体地说，在光放大器设计中使用某些参数阈值，其中包括掺稀土光纤中泵浦光的有效长度，给掺稀土光纤提供的泵浦光波长，掺稀土光纤输出端处的反转粒子数比率，等等，可以不发生这种偏差。

以下，描述本发明的几个实施例（模拟结果）。模拟条件是如下所述。

（1） 使用信道：

在图 4 所示的 ch1 至 ch80 中，使用 ch1( 1570.41 nm ) 和 ch33( 1583.69 nm )。

（2） 偏差定义：

偏差是在从仅输入 ch33 信号光情况下的 ch33 光功率电平减去输入 ch1 信号光和 ch33 信号光情况下的 ch33 光功率电平得到的值。所以，若这个值是正的，则它指出 ch33 的输出功率没有减小（没有偏差）。若这个值是负的，则它指出 ch33 的输出功率减小，且这个值的绝对值越大，ch33 光功率的减小就越大（偏差是大的）。

(3) 掺铒光纤光放大器:

(a) 光放大媒体: 掺铒石英光纤

(b) 泵浦方法: 一级正向泵浦

(c) 泵浦光波长: 在  $0.98 \mu m$  至  $1.46 \mu m$  范围内变化

(d) 每个信道输入电平: 在  $-14.3 dBm/ch$  至  $-21.3 dBm/ch$  之间的范围内变化

(e) 光放大器增益: 在  $16.1 dB$  至  $29.1 dB$  范围内变化

(f) 控制方法: AGC (自动增益控制)

注意: 在 AGC 系统中, 若信号光的输入光功率发生变化, 则输出功率也相应地发生变化。虽然图 2 中画出 ALC 的反馈系统, 基于光放大器的输入光功率和输出光功率, 通过控制泵浦光源可以建立 AGC 系统。

(g) EDF 长度: 这是用作光放大媒体的掺铒光纤长度。按照如下的方法优化 EDF 长度, 当 ch1 信号光和 ch33 信号光输入时, 使 ch1 信号光的增益与 ch33 信号光的增益相等或几乎相等。若泵浦光波长或信号光输入电平发生变化, 则 EDF 长度可以相应地发生变化。

在上述的条件下, 我们模拟泵浦光有效长度与偏差之间的关系。“泵浦光有效长度”是泵浦光在掺铒光纤中可以传播的距离。在这个例子中, 这个长度定义为掺铒光纤输入端与泵浦光光功率衰减到它输入端光功率  $1/e$  (约 0.368) 的位置之间的距离。

以下是因为检查泵浦光有效长度与偏差之间关系的原因。如上所述, 偏差是由于在直到掺铒光纤输出端附近之前不能提供足够的泵浦光。我们估计, 是否发生偏差与在掺铒光纤中可以提供足够泵浦光的距离 (即, 泵浦光有效长度) 有密切的关系。所以, 我们判断, 泵浦光有效长度是用作设计没有偏差的光放大器参数。

可以利用以下的三种方法调整泵浦光有效长度。

(1) 改变泵浦光波长。

(2) 改变激励密度。

(3) 改变光放大媒体。

首先, 给出通过改变泵浦光波长调整泵浦光有效长度的模拟结果。

图 8A 表示改变泵浦光波长时得到的偏差。图 8B 表示泵浦光波长与其有效长度之间的关系。此外，图 9 表示掺铒光纤中泵浦光的衰减特性。在图 8A 和 8B 所示的模拟结果中，展示改变光放大器增益时( 16dB, 23.5dB 和 29.1dB) 得到的三组数据。

如图 8A 所示，当泵浦光波长约为 1430 nm 时，偏差变成零。当泵浦光波长是在 1400 nm 至 1430 nm 的范围内时，这个偏差是正值。换句话说，输出功率没有减小。在这个波长范围内，泵浦光波长越短，正向的偏差就越大。然而，偏差值在 1 dB 附近饱和。所以，即使切断 ch1 的信号光，ch33 信号光的光功率变化很小，这不是个问题。

若泵浦光波长大于 1430 nm，则偏差变为负值。换句话说，输出功率减小。在此情况下和在这个波长范围内，泵浦光波长越长，偏差的绝对值越快地增大。特别是，若光放大器的增益很小，则偏差的绝对值变得相当地大。所以，若泵浦光波长大于 1460 nm，则在切断 ch1 的信号光时，ch33 信号光的光功率大大地减小。

EDF 输入端纵向方向上泵浦光的功率分布与泵浦光波长之间有很强的依赖关系。利用  $0.98\mu m$  和  $1.46\mu m$  作为泵浦光波长，以下描述信号光的输入条件与输出条件相同的情况。由于  $0.98\mu m$  泵浦光的增益效率（增益/EDF 长度/泵浦光功率）高于  $1.46\mu m$  泵浦光的增益效率，当使用  $0.98\mu m$  泵浦光时，信号光的光功率剧烈地增大，在 EDF 的输入端附近达到峰值，并沿 EDF 的纵向方向快速地衰减。在此情况下，由于  $0.98\mu m$  泵浦光被快速地吸收，它在 EDF 的输入端附近剧烈地衰减。

所以，在必须使用 EDF 长度很长的 L 波段 EDF 中，泵浦光不能传播到 EDF 的输出端，它取决于泵浦光波长。参照图 9 描述这种情况（沿 EDF 输入端纵向方向上的泵浦光功率分布）。此处，泵浦光波长小于  $1.48\mu m$ ，这是 EDF 的通用泵浦光波长。如图 9 所示，泵浦光在 EDF 中按照  $1.43\mu m$ ,  $1.46\mu m$  和  $0.98\mu m$  的顺序传播得更远些。具体地说，泵浦光的有效 EDF 长度按照以上的顺序延长。

图 8B 表示与常规的通用泵浦光波长 ( $1.48\mu m$ ) 比较的较短波长泵浦光 ( $1.40\mu m$  至  $1.46\mu m$ ) 的 EDF 泵浦光有效长度。此处，“泵浦光

“有效长度”定义为 EDF 输入端与泵浦光光功率衰减到其输入端初始泵浦光功率  $1/e$  (约 0.368) 的位置之间的距离。泵浦光有效长度基本上是基于一般光放大器的宽增益范围和宽输入范围的相应泵浦光波长确定的。例如，在泵浦光波长为  $1.46 \mu m$ ,  $1.43 \mu m$  和  $1.40 \mu m$  时得到的泵浦光有效长度分别是约 7m, 20m 和 50m。然而，具体地说，由于反转粒子数比率随增益而变化，泵浦光有效长度与增益有关（图 8B）。所以，在仔细的设计中，必须注意泵浦光有效长度与增益之间的关系。例如，在 16 dB 至 29 dB 的增益范围内，若泵浦光波长为  $1.43 \mu m$ ，则泵浦光有效长度几乎是恒定的；然而，若泵浦光波长为  $1.40 \mu m$  和  $1.46 \mu m$ ，则泵浦光有效长度分别有约 10 m 和 5 m 的误差。

泵浦光有效长度与输入之间也有某种程度的关系。由于反转粒子数比率在 EDF 的信号输入端附近随输入功率而变化，泵浦光波长的增益系数越高，泵浦光有效长度就越短。所以，泵浦光有效长度是受输入功率的影响。就是说，输入功率越高，EDF 输入端附近的反转粒子数比率就越小，泵浦光有效长度往往就延长。例如，在 -36.34 dBm 至 +6.1 dBm 的范围内，若泵浦光波长为  $1.40 \mu m$ ，则泵浦光有效长度几乎是恒定的；然而，若泵浦光波长为  $1.43 \mu m$  和  $1.46 \mu m$ ，则其误差分别有约 1 m 和 6 m。与此类似，输入功率变得与增益效率非常有关。所以，若使用有高增益效率的泵浦光波长，且输入功率过高，则必须注意输入功率以确定泵浦光有效长度。

把这些因素考虑进去，我们发现，若泵浦光有效长度设计成大于放大 L 波段的掺铒光纤光放大器的预定值，则可以实现没有偏差的光放大器。在上述的例子中，若泵浦光有效长度设计成大于 20 m，则可以避免偏差。为了得到 20 m 或更长的泵浦光有效长度，泵浦光波长应当等于或小于 1430 nm。然而，考虑到以下描述的噪声特性，泵浦光波长最好应当等于或大于 1400 nm。这种设计方法可应用于很宽的工作范围（光放大器的增益和泵浦光的输入功率）。

对于放大 L 波段的掺铒光纤光放大器的泵浦光波长，我们主要使用  $0.98 \mu m$  和  $1.48 \mu m$  的波段。由于这些波段没有激发态吸收（激励电子

被泵浦光激励到更高能级的一种现象），并可以获得高的增益，已经实现了商业化。对于  $1.48 \mu m$  波段的泵浦光源，我们已开发了波长范围在 1460 nm 至 1490 nm 的半导体激光器。换句话说，通常，我们不使用 1400 nm 至 1460 nm 范围内的泵浦光波长。

使用 1460 nm 至 1490 nm 范围内泵浦光波长的理由主要是很小的噪声。因为本发明试图解决的偏差没有被确认，在使用 1460 nm 至 1490 nm 范围内泵浦光波长时通常不存在问题。换句话说，通常不需要使用 1460 nm 至 1490 nm 范围之外的泵浦光波长。

然而，该实施例中光放大器使用小于 1460 nm 范围的泵浦光波长以抑制放大 L 波段时产生的偏差。特别是，使用 1400 nm 至 1430 nm 范围内泵浦光波长可以避免偏差。

作为调整泵浦光有效长度的其他方法，一种方法是改变光放大媒体的激励密度，另一种方法是改变光放大媒体的材料，如上所述，任何方法中的基本设计原理是相同的。以下简要地描述这些方法。

激励密度是与增益效率密切相关的参数。即，激励密度越小，增益效率就越低。此处，增益效率越低，泵浦光有效长度就越长。所以，通过抑制掺铒光纤的激励密度到预定值以下，可以使泵浦光有效长度超过预定值。

通常我们知道，使光放大媒体中信号光与泵浦光之间的重叠变窄可以减小激励密度。作为使光放大媒体中信号光与泵浦光之间的重叠变窄的一种方法，例如，引入低 NA 纤心或大直径纤心到光放大媒体的结构，光放大媒体的大范围掺杂，等等是适宜的。因为按照这些结构，可以避免稀土离子集中到高激励光强度的区域中，从而可以减小激励密度。

通过改变模场直径与掺稀土直径之间的比率，这些直径是掺稀土光放大媒体的通用参数，也可以延长泵浦光有效长度，相应地也可以防止偏差。

我们知道光放大媒体的基质玻璃不仅仅是石英类型，还可以是氟化物类型，碲化物类型，铋类型，磷酸类型和硅酸盐类型，等等。所以，通过适当地选择基质玻璃的材料，可以调整泵浦光有效长度。

虽然我们介绍三种方法作为独立调整泵浦光有效长度的手段，也可以把这些方法进行组合。例如，也可以调整泵浦光波长和激励密度以获得预定的泵浦光有效长度。

若使泵浦光有效长度大于预定值以避免偏差，则可能使噪声特性和增益效率成为问题。所以，必须考虑到这些值。

以下，描述泵浦光波长与噪声之间的关系。

当掺铒光纤光放大器用在光通信系统中时，该光放大器最好有高饱和输出和低噪声（低的噪声系数 NF）。与  $0.98 \mu m$  波段泵浦比较， $1.48 \mu m$  波段泵浦有较高的饱和输出和较大的噪声。具体地说，在  $0.98 \mu m$  波段泵浦情况下，噪声系数约为 3 dB；然而，在  $1.48 \mu m$  波段泵浦情况下，噪声系数约为 5 dB。通常我们知道，激励电平与高电平之差越接近，噪声系数就越大。

在该实施例中，为了抑制偏差，使用小于  $1460 nm$  的较短波长泵浦光。然而，若使用这个波长范围内波长的泵浦光，与使用  $1460 nm$  至  $1490 nm$  范围内波长的泵浦光比较，则其噪声系数就减小了。

图 10 表示泵浦光波长与噪声系数之间的关系。此处，在 ch1 信号光和 ch33 信号光都输入时得到的 ch1 噪声系数的模拟结果。还画出光放大器增益变化时得到的结果。在这个例子中，该图展示每个信号光输入功率是  $16.34 dBm$  的情况。然而，即使信号光的输入功率发生变化，泵浦光波长与噪声系数之间的关系几乎是相同的。

如图 10 所示，在  $1400 nm$  至  $1460 nm$  波长的范围内，泵浦光波长越短，噪声系数就越大。在这个例子中，与泵浦光波长为  $1460 nm$  的情况比较，在泵浦光波长为  $1400 nm$  的情况下，噪声系数约下降 2 dB。光放大器中噪声系数的退化严重影响光通信系统的传输特性。若噪声系数下降 2 dB 或更大，则在通信系统中使用光放大器是困难的。所以，最好是，泵浦光波长超过  $1400 nm$ 。

如上所述，泵浦光波长的变化严重影响偏差和噪声系数。所以，在掺铒光纤光放大器的设计中，必须考虑偏差抑制与噪声系数退化之间的权衡。以下描述设计掺铒光纤光放大器的指导原则。

如图 8B 所示, 使泵浦光有效长度为 20 m 至 40 m, 可以防止发生偏差。如图 8A 所示, 让泵浦光的波长为 1400 nm 至 1430 nm, 可以满足这个条件。然而, 若在这个范围内使用泵浦光, 则与使用  $1.48 \mu\text{m}$  波段 (1460 nm 至 1490 nm) 的一般泵浦光波长时得到的结果比较, 噪声系数退化的最大值约 2 dB。所以, 必须小心谨慎。

如图 8B 所示, 若泵浦光有效长度为 5 m 至 20 m, 则在抑制偏差的同时可以使噪声系数最小。如图 8A 所示, 让泵浦光波长为 1430 nm 至 1460 nm, 可以满足这个条件。若在这个条件下设计光放大器, 则可以得到比使用 1400 nm 至 1430 nm 泵浦光波长时更佳的噪声系数, 且可以比使用  $1.48 \mu\text{m}$  波段中一般泵浦光波长时抑制更多的偏差。

图 11 表示得到预定增益所需的泵浦光功率与泵浦光波长之间的关系。此处, 展示光放大器中得到增益为 16 dB 所需的泵浦光功率。考虑到与单位长度增益效率的关系, 在 1400 nm 至 1460 nm 波段中, 基本上是泵浦光波长越短, 所需的泵浦光功率就越大。然而, 例如, 在应当使用较长光放大媒体的 L 波段 EDFA 的情况下, 考虑到这样一个事实, 泵浦光有效长度越长, 泵浦效率 (=信号光功率/泵浦光功率) 就越高。在 1400 nm 至 1460 nm 波段内的这些模拟条件下 (EDF 长度, 等等), 在 1430 nm 附近得到最低值。具体地说, 使用 1430 nm 的泵浦光波长, 利用最小光功率可以得到所需的增益。

以下, 描述偏差与反转粒子数比率之间的关系。

图 12 表示偏差与反转粒子数比率之间的关系。在这个例子中, 泵浦光波长是在  $0.98 \mu\text{m}$  的波段内。光放大器的增益是 16 dB。当仅有输入功率为 21.34 dBm 的信号光 (ch33) 时, 得到图 12 中所示的反转粒子数比率。

如以上参照图 3 时所描述的, 基本上是 EDF 长度越长, 反转粒子数比率就越小。然而, 若 EDF 长度是短的, 则 ch33 信号光的偏差是正值; 若 EDF 长度超过预定的长度, 则偏差变成负值。就是说, 若 EDF 长度超过预定值, 则发生偏差 (输出功率减小)。在这个例子中, 当 EDF 长度大约超过 35 m 时, 发生偏差 (输出功率减小)。

如上所述，EDF 长度超过预定值时发生偏差。对应于阈值的反转粒子数比率既与信号光输入功率无关，也与泵浦光波长无关，反转粒子数比率变成恒值。在这个例子中，当 EDF 长度大约为 35 m 时，偏差是零，而输出端处的反转粒子数比率是 0.17。

图 13A 和 13B 表示改变泵浦光波长和信号光输入功率时得到的模拟结果。在图 13A 和 13B 中，两个信号光的输入功率分别是 -21.34 dBm/ch 和 -14.34 dBm/ch。对于每种输入功率设定三种泵浦光波长。

在这些模拟结果中，我们确认，当反转粒子数比率为 0.17 时，偏差变成零；而当反转粒子数比率小于 0.17 时，发生负偏差（减小输出功率）。若图 13B 中的泵浦光波长是  $1.43 \mu\text{m}$ ，则反转粒子数比率总是大于 0.17，且没有偏差。

如上所述，在光放大媒体输出端处的反转粒子数比率下降到特定阈值以下时发生偏差。在图 12 所示的例子中，在掺铒光纤输出端处的反转粒子数比率小于 0.17 时发生偏差。所以，若掺铒光纤输出端处的反转粒子数比率设计成超过阈值，则没有偏差。具体地说，在图 12 所示的例子中，若掺铒光纤输出端处的反转粒子数比率设计成大于 0.17，就没有偏差。

虽然与发生偏差有关的反转粒子数比率的阈值既与信号光输入功率无关，也与泵浦光波长无关，但该阈值与光放大器的增益有关。图 14A 和 14B 表示在改变光放大器增益时进行图 12, 13A 和 13B 所示模拟得到的结果。图 14A 和 14B 分别表示光放大器增益为 16 dB 和 29.1 dB 情况下的模拟结果。

在这些模拟结果中，若光放大器增益是低的，则与发生偏差有关的反转粒子数比率的阈值也是低的；若光放大器增益是高的，则反转粒子数比率的阈值也是高的。具体地说，如图 15 所示，反转粒子数比率的阈值几乎与光放大器的增益成正比。若反转粒子数比率的阈值和光放大器的增益分别是“Y”和“X”，则满足以下的公式。

$$Y=0.007X+0.062$$

所以，在掺铒光纤光放大器的设计中，首先，按照以上公式计算反转粒子数比率的阈值。然后，按照以下的方法设定泵浦光波长和激励密度，

掺铒光纤输出端处的反转粒子数比率可以大于阈值。若按照这个过程设计光放大器，则在无须降低其他特性（噪声系数，等等）的条件下可以有效地抑制偏差。

反转粒子数比率是利用感应辐射根据光放大媒体放大特性导出的一个简单参数。所以，可以判断，即使基质玻璃从石英改变成氟化物，反转粒子数比率的阈值几乎不发生变化。

图 16 表示反转粒子数比率阈值与泵浦光波长之间的关系。此处，当一个信道的信号光输入到光纤时，在用作光放大媒体的掺铒光纤输出端处得到反转粒子数比率。

如以上参照图 15 时所描述的，光放大器的增益越高，反转粒子数比率的阈值就越大。在这个实施例中，当光放大器的增益为 29.1dB 时，该阈值是 0.26。所以，若放大器设计成掺铒光纤输出端处的反转粒子数比率为 0.26 或更大，则在增益小于 29 dB 的范围内没有偏差。然而，如图 16 所示，为了在掺铒光纤输出端处得到的反转粒子数比率大于或等于 0.26，泵浦光波长应当小于 1415 nm。如以上参照图 10 时所描述的，为了抑制噪声系数的退化小于现有技术配置 2 dB，泵浦光波长应当大于 1400 nm。所以，为了在很宽的增益范围内避免偏差和在允许的范围内抑制噪声系数的退化，泵浦光波长最好应当在 1400 nm 至 1415 nm 的范围内。

这个实施例中的光放大器（特别是，参照以上图 8A 和 8B 时所描述的光放大器）是这样配置的，通过得到大于现有光放大器的泵浦光有效长度，可以抑制偏差。然而，在泵浦光有效长度很长的情况下，即使在掺铒光纤输出端的泵浦光能量仍保持不变。所以，在这个实施例的光放大器中，从掺铒光纤输出端输出剩余的泵浦光。

图 17A 表示 EDF 长度与泵浦光功率之间的关系。在 1400 nm 至 1460 nm 的波长范围内，泵浦光波长越长，在掺铒光纤中吸收的泵浦光能量就越多。换句话说，在这个波长范围内，泵浦光波长越短，泵浦光就传播得越远。在图 17A 所示的例子中，若 EDF 长度是 40 m，则波长为 1460 nm 的泵浦光输出功率几乎为零；然而，波长为 1400 nm 的泵浦光输出功率大约为 50 mW。

图 17B 表示剩余泵浦光功率与泵浦光波长之间的关系。图 17B 表示调整 EDF 长度和泵浦光输入功率而可以得到预定增益 (16 dB, 23.5 dB 和 29.1 dB) 时从掺铒光纤输出端处得到的剩余泵浦光功率。在 1400 nm 至 1460 nm 的波长范围内，泵浦光波长越短，剩余泵浦光功率就越高。特别是，在 1400 nm 至 1430 nm 的波长范围内，从 EDF 输出的泵浦光功率是相当地高。

当剩余泵浦光功率很高时，光放大器的控制误差变得很大，就有这样的可能性，完成喇曼放大且非线性效应使传输线上的传输特性退化。所以，在这个实施例的光放大器中，最好是，消除从 EDF 输出的剩余泵浦光的影响。

在图 18A 所示的例子中，在光放大器的输出侧配备截去泵浦光波长的光滤波器 21。在这种配置中，从发射信号光的传输线上去掉泵浦光因素。

在图 18B 所示的例子中，配备截去来自分支光的泵浦光因素的光滤波器 22，该分支光用于控制光放大器的输出功率或增益。具体地说，从光传输媒体（掺铒光纤）1 输出的光（包括信号光和剩余泵浦光）被分光器 11 分割。光滤波器 22 截去来自分光器 11 分割的分支光部分的泵浦光因素。然后，光电二极管（PD）23 检测泵浦光因素被截去的光功率。所以，基于没有剩余泵浦光的多波长光功率，控制电路 12 可以控制泵浦光源（LD）4。在完成增益控制时，控制电路 12 必须检测输入光功率，因为输入光不包含泵浦光，所以，在光放大器的输入侧不需要提供光滤波器。

在图 19A 所示的例子中，剩余泵浦光用于喇曼放大。具体地说，去复用器 31 把输入的多波长光分解成 C 波段和 L 波段信号。如图 19B 所示，去复用器 31 的 L 波段端口有截去 C 波段的损耗特性。如图 19C 所示，C 波段端口有仅仅传送 C 波段的损耗特性。C 波段 EDFA 32 放大去复用器 31 分解的 C 波段信号，而 L 波段 EDFA 33 放大 L 波段信号。然后，复用器 34 复用相应放大器放大的 C 波段信号和 L 波段信号并输出复用光。在这个设备中，由于 L 波段 EDFA 33 是这样设计的，泵浦光的有

效长度可以大于预定值，从而输出相当强的剩余泵浦光。

在 L 波段 EDFA 33 的输出侧，WDM 耦合器 35 用于从信号光中分解泵浦光。这个 WDM 耦合器 35 引导信号光到复用器 34 和引导泵浦光到 L 波段 EDFA 33 输入侧上的 WDM 耦合器 36。WDM 耦合器 36 引导来自去复用器 31 的信号光到 L 波段 EDFA 33 和引导来自 WDM 耦合器 35 的泵浦光到去复用器 31。此处，去复用器 31 的 L 波段端口有图 19B 所示的损耗特性。所以，从 L 波段 EDFA 33 输出的剩余泵浦光通过 WDM 耦合器 35，WDM 耦合器 36 和去复用器 31 被引导到光放大器输入侧上的传输线。

喇曼放大有增益的频带比提供给传输媒体的泵浦光频率小 13.2THz。此处，在  $1.55 \mu m$  波段，13.2THz 相当于约 100 nm。所以，若喇曼放大的泵浦光波长是 1430 nm，则可以得到的增益是在 1530 nm 附近的波段。所以，在此情况下，完成 C 波段的喇曼放大。

另一方面，对于 L 波段 EDFA 33，使用 1400 nm 至 1460 nm 范围内的泵浦光波长。在此情况下，若 L 波段 EDFA 33 中使用的泵浦光波长是 1430 nm，则剩余泵浦光可用作 C 波段喇曼放大的泵浦光。所以，如图 19A 所示，若从 L 波段 EDFA 33 输出的剩余泵浦光被引导到光放大器输入侧上的传输线，则完成 C 波段的喇曼放大。

按照这种方法，在图 19A 所示的光放大器中，避免剩余泵浦光与信号光一起发射到输出侧的传输线上。与此同时，剩余泵浦光用作信号光的喇曼放大。所以，这种配置不仅抑制传输特性的退化，而且有利于提高传输特性。

在通过长距离发射多波长光的系统中，短波长区上信号光的光功率被传输线上信号之间的喇曼效应移向长波长区，从而使短波长区上的信号退化。例如，在集体发射 C 波段和 L 波段的系统中，位于 C 波段的信号可能退化。退化量随信号光功率，各个信号之间的波长间隔等而发生变化，退化量有时可达到约 5 dB。所以，在上述的系统中，提供放大 EDFA 输入侧上 C 波段的喇曼放大器（集中型或分布型）是有效的，可以补偿短波长区（C 波段）上信号光的增益退化。

图 20 表示 EDFA 和喇曼放大共享泵浦光源的光放大器。这种光放大器包括：C 波段 EDFA 32 和 L 波段 EDFA 33。L 波段 EDFA 33 使用的泵浦光波长为 1430 nm。喇曼放大是在输入侧的传输线上完成的，喇曼放大使用的泵浦光波长也是 1430 nm。

泵浦光源 41 产生并输出波长为 1430 nm 的泵浦光。可以用光耦合器实现的分光器 42 分割产生的泵浦光。例如，分割比是“10:1”。此处，一个分割后的泵浦光通过可变光衰减器 43 被引导到复用器 44。然后，复用器 44 给传输线提供泵浦光。因此，在传输线上可以完成 C 波段中信号光的喇曼放大。另一个分割后的泵浦光通过可变光衰减器 45 被引导到 L 波段 EDFA 33。因此，L 波段中的信号光被 L 波段 EDFA 33 放大。另一个泵浦光源给 C 波段 EDFA 32 提供泵浦光，图 20 中没有画出这个泵浦光源。

例如，基于从这个光放大器输出的多波长光功率，可以调整可变光衰减器 43 和 45 的衰减值。在此情况下，按照如下的方法可以独立地控制可变光衰减器 43 和 45，例如，正确地调整 C 波段和 L 波段中的每个光功率。

如上所述，在图 20 所示的光放大器中，由于 EDFA 的泵浦光和喇曼放大的泵浦光是由一个泵浦光源产生的，可以实现光放大器的小型化，并可以预期降低元件成本。

图 21 表示利用这个实施例中光放大器的长途光传输系统的配置。

在长途光传输系统中，传输线上往往配备多个光放大器。此处，若这些多个光放大器的任何一个光放大器中发生偏差，则在这个系统中发生传输误差。所以，在这个系统中最好使用以上实施例中的光放大器，作为传输线上的全部光放大器。

然而，如以上参照图 10 时所描述的，在该实施例的光放大器中噪声特性可能退化。所以，在传输系统的设计中，必须综合地考虑偏差抑制效应，噪声特性，成本，等等。

具体地说，该实施例的光放大器配备在不要求严格噪声特性的位置上。例如，如图 21 所示，这些实施例中光放大器用作发射侧上的关放大

器或位于传输线上的在线光放大器。然而，在要求严格噪声特性的接收侧，应当利用以下描述的多级 EDFA 单元。虽然多级 EDFA 单元是在保持良好噪声特性的同时避免偏差的光放大器，但是它不仅体积庞大，而且生产成本也高。所以，为了降低整个系统的成本，必须尽可能减少多级 EDFA 单元的数目。

如上所述，在有多个光放大器的光传输系统中，通过在合适的位置上配备该实施例中光放大器，在降低整个系统的成本的同时，又可以避免偏差。

图 22 表示包含该实施例光放大器的光放大设备的配置。这个光放大设备包括：串联连接的四个光放大器。多级 EDFA 单元是在第一级和末级中实现的。该实施例的光放大器是在第二级和第三级中实现的。

多级 EDFA 单元还包括：串联连接的两个 EDF。此处，由于在第一级放大中要求良好的噪声特性和相当高的增益，在第一级放大器中使用波长为  $0.98 \mu m$  波段的泵浦光和波长为  $1.48 \mu m$  波段的泵浦光。另一方面，由于在末级放大中要求高的增益和良好的噪声特性，在末级放大器中配备多个泵浦光源，每个泵浦光源产生波长为  $1.48 \mu m$  波段的泵浦光。

在第二级和第三级放大中，不要求严格的噪声特性。所以，该实施例的光放大器用在第二级和第三级。例如，在该实施例的光放大器中，使用波长为  $1.43 \mu m$  的泵浦光。

在第一级放大器与第二级放大器之间配置增益均衡器 GEQ1 和可变光衰减器 ATT1，以及在第三级放大器与末级放大器之间配置增益均衡器 GEQ2 和可变光衰减器 ATT2，增益均衡器用于均衡包含在多波长光中多个信号光的光功率，而可变光衰减器用于调整多波长光的光功率并完成恒定输出控制。在第二级放大器与第三级放大器之间配置图 22 中没有展示的色散补偿光纤。

从第一级到末级中的每个放大器是按照如下方法实现的。

第一级光放大器：

在第一级光放大器中，EDF 是利用第一 EDF (EDF1 (a)) 和第二 EDF (EDF1 (b)) 实现的，该 EDF 是在得到  $1.58 \mu m$  波段 ( $1570 nm$

至 1605 nm) 中平坦波长特性所需的反转粒子数比率下得到预定的增益。

第一 WDM 耦合器 (WDM1) 引导第一泵浦光源 (Pump1) 的 0.98  $\mu\text{m}$  泵浦光和传播通过第一光分支耦合器 (BS1) 和光隔离器 (ISO1) 的多波长光的复用光到第一 EDF (EDF1 (a))。

第一 EDF (EDF1 (a)) 利用该泵浦光放大多波长光，并通过光隔离器 (ISO2) 输出放大的多波长光到第二 WDM 耦合器 (WDM2)。

第二 WDM 耦合器 (WDM2) 复用多波长光和第二泵浦光源 (Pump2) 的 1.48  $\mu\text{m}$  泵浦光，并输出复用光到第二 EDF (EDF1 (b))。

第二 EDF (EDF1 (b)) 利用第二泵浦光源 (Pump2) 的泵浦光放大多波长光。

第一光监测器 (PD1) 和第二光监测器 (PD2) 分别监测第一光分支耦合器 (BS1) 和第二光分支耦合器 (BS2) 分出的相应分支光。然后，基于监测结果控制第一泵浦光源 (Pump1) 和第二泵浦光源 (Pump2) 的输出功率，并调整第一 EDF (EDF1 (a)) 和第二 EDF (EDF1 (b)) 构成的多级 EDFA 单元的增益。

第一级光放大器 (多级 EDFA 单元) 放大的多波长光通过增益均衡器 (GEQ1) 和可变光衰减器 (ATT1) 被引导到第二级光放大器。

#### 第二级光放大器：

在第二级光放大器中，EDF 是利用第三 EDF (EDF2) 实现的，该 EDF 是在得到 1.58  $\mu\text{m}$  波段 (1570 nm 至 1605 nm) 中平坦波长特性所需的反转粒子数比率下得到预定的增益。

来自第一级光放大器的多波长光通过第三光分支耦合器 (BS3)，光隔离器 (ISO4) 和第三 WDM 耦合器 (WDM3) 输入到第三 EDF (EDF2)。第三 EDF (EDF2) 通过第三 WDM 耦合器 (WDM3) 接收第三泵浦光源 (Pump3) 产生的约 1.43  $\mu\text{m}$  泵浦光，并利用该泵浦光放大多波长光。

第三 EDF (EDF2) 放大的多波长光通过光隔离器 (ISO5) 和光分支耦合器 (BS4) 被引导到第三级光放大器。

光连接器连接第二级光放大器和第三级光放大器。第三光监测器 (PD3) 和第四光监测器 (PD4) 分别监测第三光分支耦合器 (BS3) 和

第四光分支耦合器（BS4）分出的相应分支光，并基于监测结果，通过控制来自泵浦光源（Pump3）泵浦光的光功率和波长，调整第二级光放大器的增益。

### 第三级光放大器：

在第三级光放大器中，EDF是利用第四EDF(EDF3)实现的，该EDF是在得到 $1.58\mu m$ 波段（1570 nm至1610 nm）中平坦波长特性所需的反转粒子数比率下得到预定的增益。

来自第二级光放大器的多波长光通过第五光分支耦合器（BS5），光隔离器（ISO5）和第四WDM耦合器（WDM4）输入到第四EDF(EDF3)。第四EDF(EDF3)通过第四WDM耦合器（WDM4）接收来自第四泵浦光源（Pump4）约 $1.43\mu m$ 泵浦光，并利用该泵浦光放大多波长光。

第四EDF(EDF3)放大的多波长光通过光隔离器（ISO6），增益均衡器（GEQ2），光分支耦合器（BS6）和可变光衰减器（ATT2）被引导到第四级光放大器。

第五光监测器（PD5）和第六光监测器（PD6）分别监测第五光分支耦合器（BS5）和第六光分支耦合器（BS6）分出的相应分支光，并基于监测结果，通过控制来自泵浦光源（Pump4）泵浦光的光功率和波长，调整第三级光放大器的增益。

### 末级（第四级）光放大器：

在末级（第四级）光放大器中，类似于第一级光放大器，EDF是利用第五EDF(EDF4(a))和第六EDF(EDF4(b))实现的，该EDF是在得到 $1.58\mu m$ 波段（1570 nm至1605 nm）中平坦波长特性所需的反转粒子数比率下得到预定的增益。

来自第三级光放大器的多波长光通过第七光分支耦合器（BS7），光隔离器（ISO7）和第五WDM耦合器（WDM5）输入到第五EDF(EDF4(a))。

第五WDM耦合器（WDM5）复用泵浦光源（Pump5和Pump6）产生的 $1.47\mu m$ 泵浦光和来自第三级光放大器的多波长光。此处，泵浦光是在偏振光束耦合器（PBS1）组合之后经第九光分支耦合器（BS9）

---

提供给第五 WDM 耦合器 (WDM5)。

第五 EDF (EDF4(a)) 利用来自第五 WDM 耦合器 (WDM5) 的泵浦光放大来自第三级光放大器的多波长光。第五 EDF (EDF4(a)) 的输出通过光隔离器 (ISO8) 和第六 WDM 耦合器 (WDM6) 被引导到第六 EDF (EDF4(b))。

第六 WDM 耦合器 (WDM6) 复用光分支耦合器 (BS9) 分出的泵浦光和第五 EDF (EDF4(a)) 的输出，并输出复用结果到第六 EDF (EDF4(b))。

第七 WDM 耦合器 (WDM7) 引导泵浦光源 (Pump7 和 Pump8) 产生并由偏振光束耦合器 (PBS2) 组合的  $1.47 \mu m$  泵浦光到第六 EDF (EDF4(b))。

第六 EDF (EDF4(b)) 利用来自 WDM 耦合器 (WDM6) 和 WDM 耦合器 (WDM7) 的泵浦光放大多波长光。然后，通过第七 WDM 耦合器 (WDM7)，光隔离器 (ISO9) 和光分支耦合器 (BS8) 输出第六 EDF (EDF4(b)) 放大的多波长光。

第七光监测器 (PD7) 和第八光监测器 (PD8) 分别监测第七光分支耦合器 (BS7) 和第八光分支耦合器 (BS8) 分出的相应分支光，并基于监测结果，通过控制来自泵浦光源 (Pump5-8) 泵浦光的光功率和波长，调整末级 (第四级) 光放大器的增益。

如上所述，通过设计该实施例的光放大器可以避免偏差的发生，因此，光放大媒体中的泵浦光有效长度大于预定值，或光放大媒体输出端处的反转粒子数比率大于预定值。

在以上的实施例中，我们描述当输入多波长光中短波长区上信号光的一种状态转变到切断信号光的另一种状态时发生偏差，然而，当短波长区上信号光的功率减小时也可以发生类似的偏差。在这种情况下，该实施例的光放大器可以有效地避免偏差的发生。此处，输入到光放大媒体的短波长区上信号光功率大大减小的一种状态可以看成是基本上切断信号光的一种状态。

在以上的实施例中，主要假设输出光功率的偏差应当等于零的状态，

我们确定光放大器设计中所用泵浦光有效长度的参考值或光放大媒体输出端处反转粒子数比率的参考值，然而，本发明不限制于这种方法。例如，可以按照以下方法确定泵浦光有效长度或反转粒子数比率，允许特定的偏差以避免噪声特性的退化。

此外，在以上的实施例中，我们集中讨论切断多波长光中短波长区上的信号光时，长波长区上的信号光功率减小的现象；本发明不限制于这种现象。具体地说，本发明也可应用于避免这样一种现象，当切断多波长光中任何波长的信号光时，其他信号光的功率发生变化。

此外，虽然光放大媒体的基质玻璃不仅可以使用石英类型，也可以使用氟化物类型，碲化物类型，铋类型，磷酸类型和硅酸盐类型，等等，但是从高增益，低噪声，可靠性和实用性的观点进行综合比较，当前的石英类型是最合适的。虽然添加到光纤中的材料不仅是铒，也可以使用镨等材料，但从上述的观点进行综合比较，铒是最合适的。

按照本发明，由于在放大多波长光的光放大器中，正确设计光放大媒体中的泵浦光有效长度或光放大媒体输出端的反转粒子数比率，即使切断多波长光中的部分光，剩余光的输出功率并没有减小或略微减小。所以，在接收从光放大器输出的多波长光的接收机中，可以避免传输误差。

图1

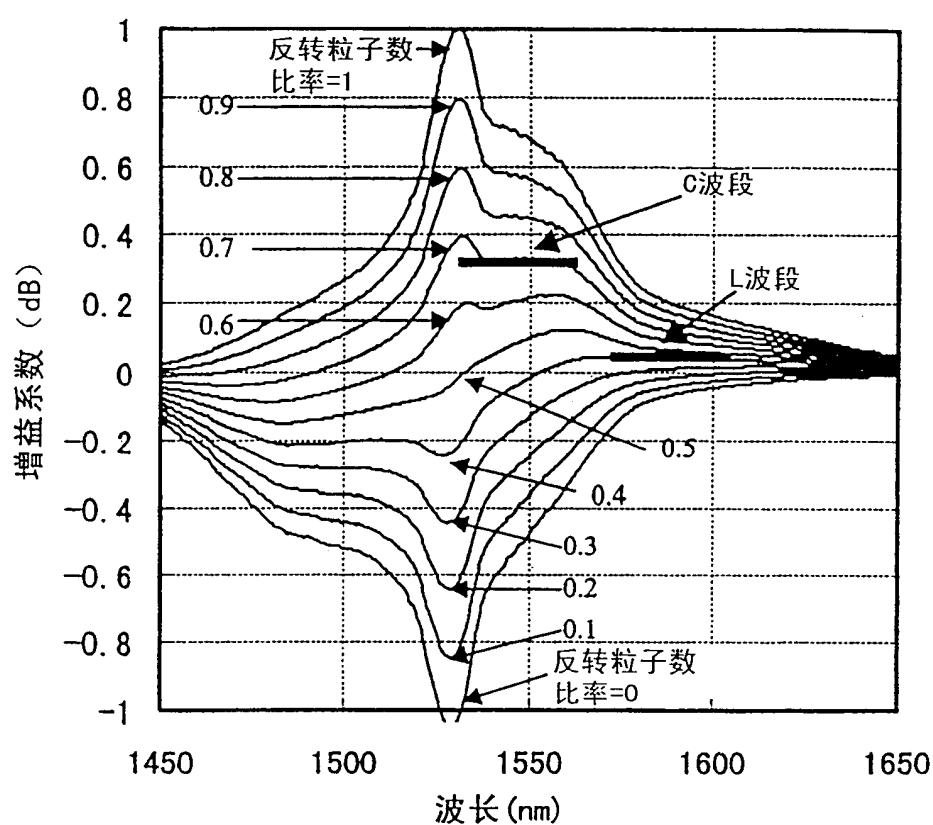


图2

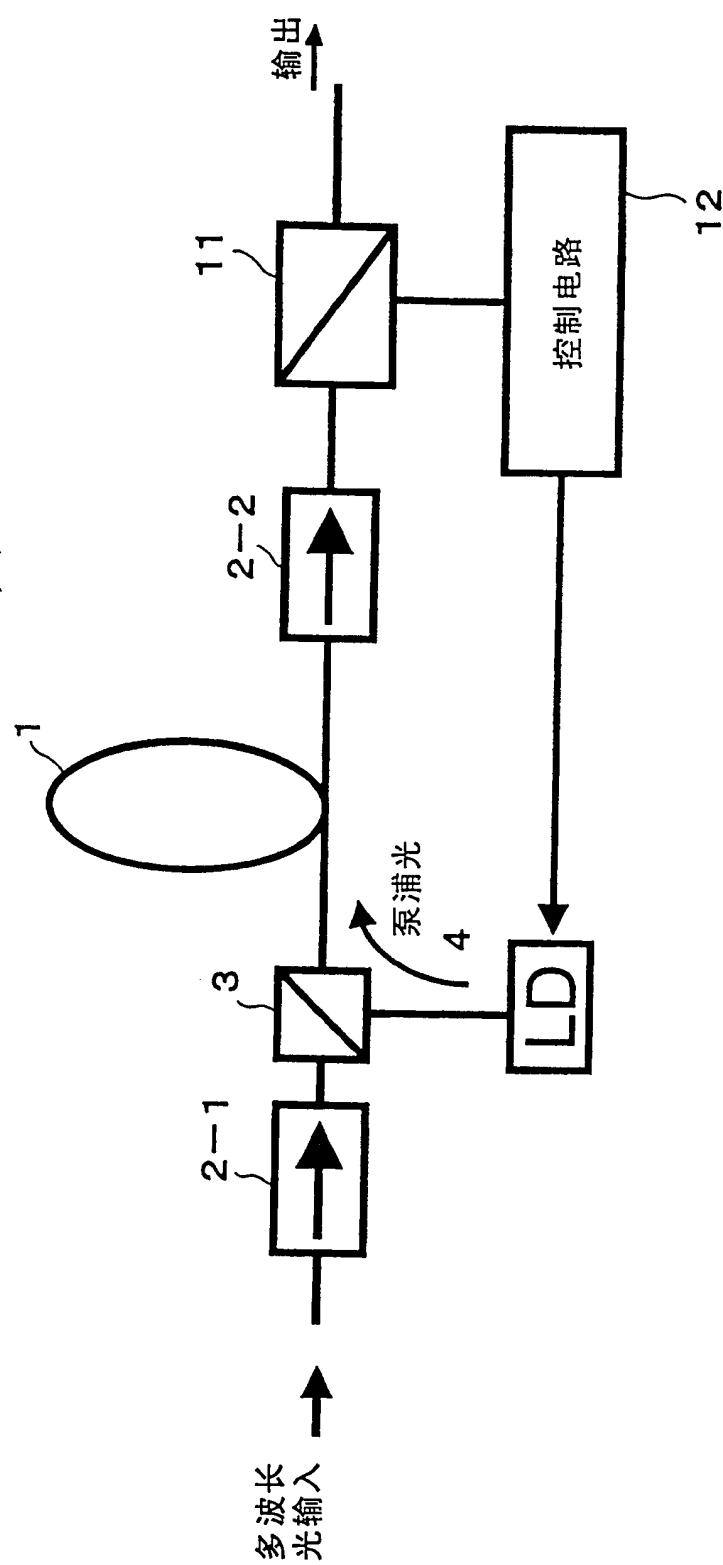


图3

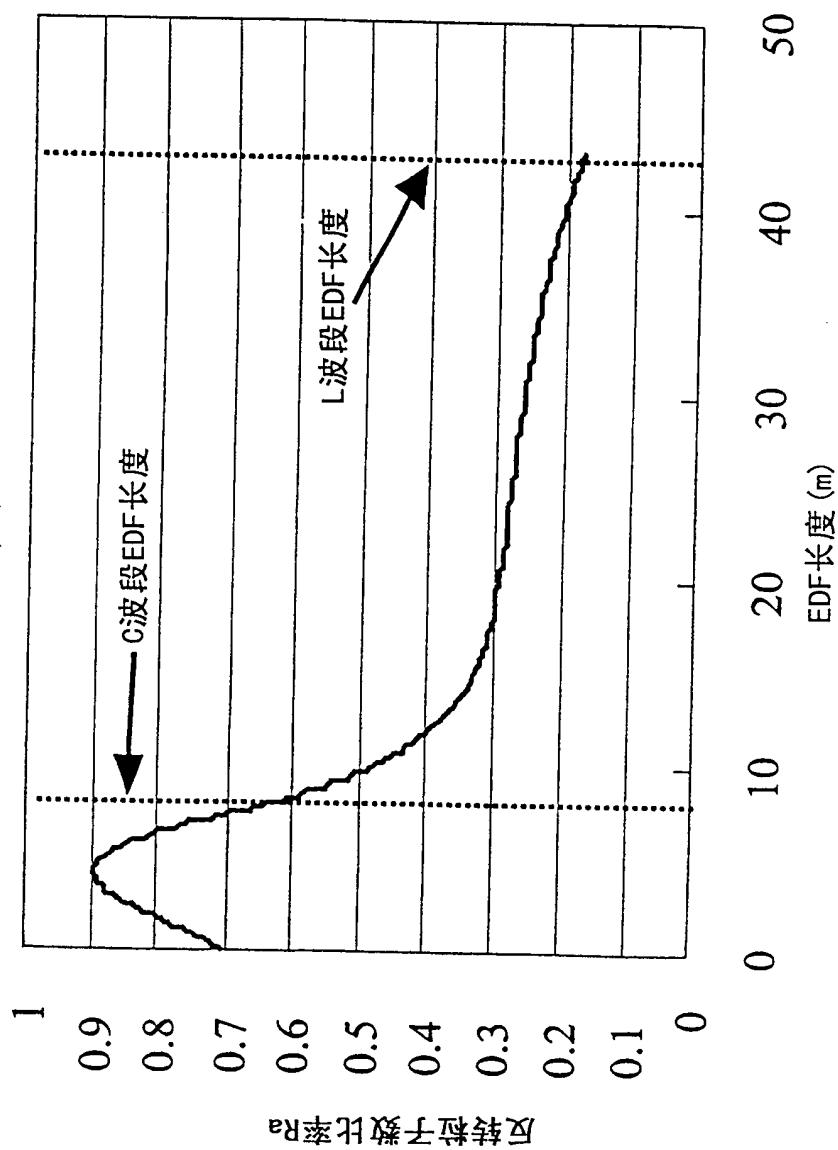


图 4

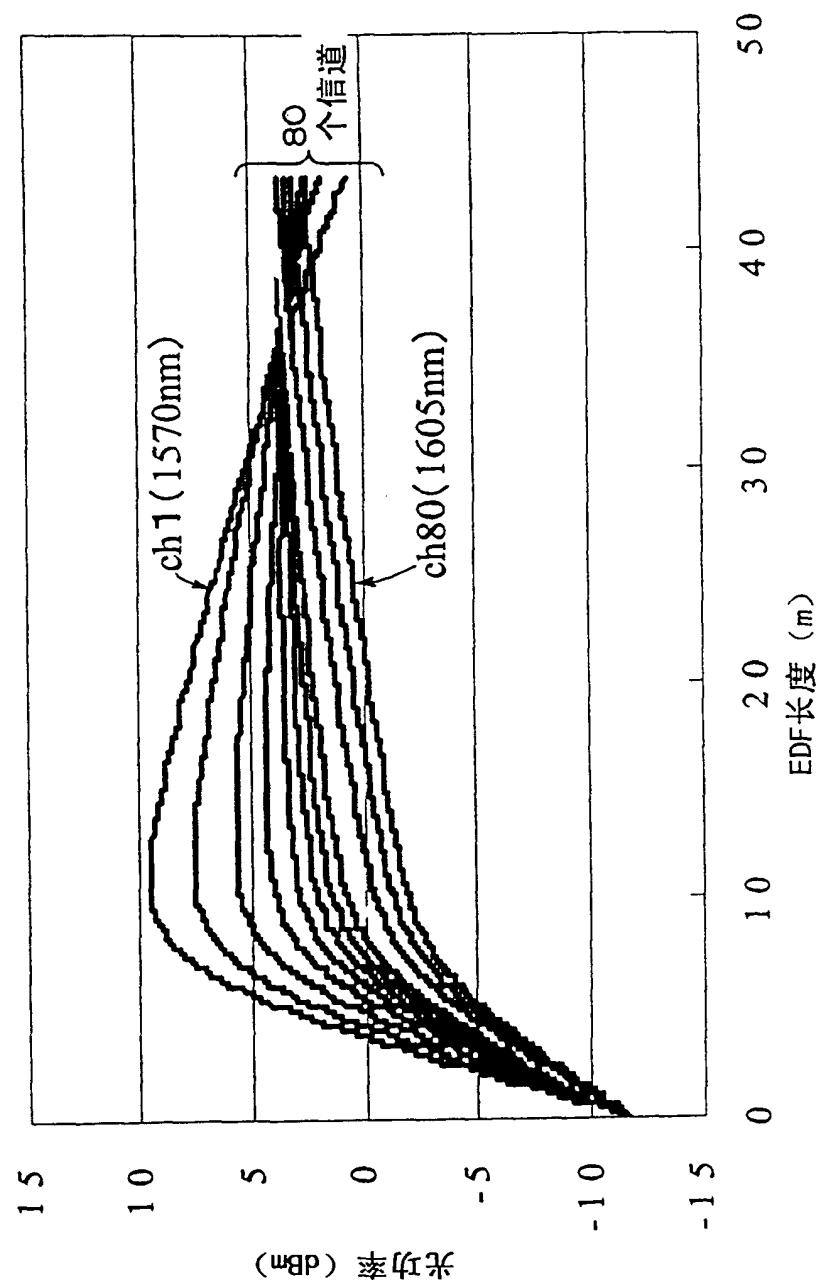
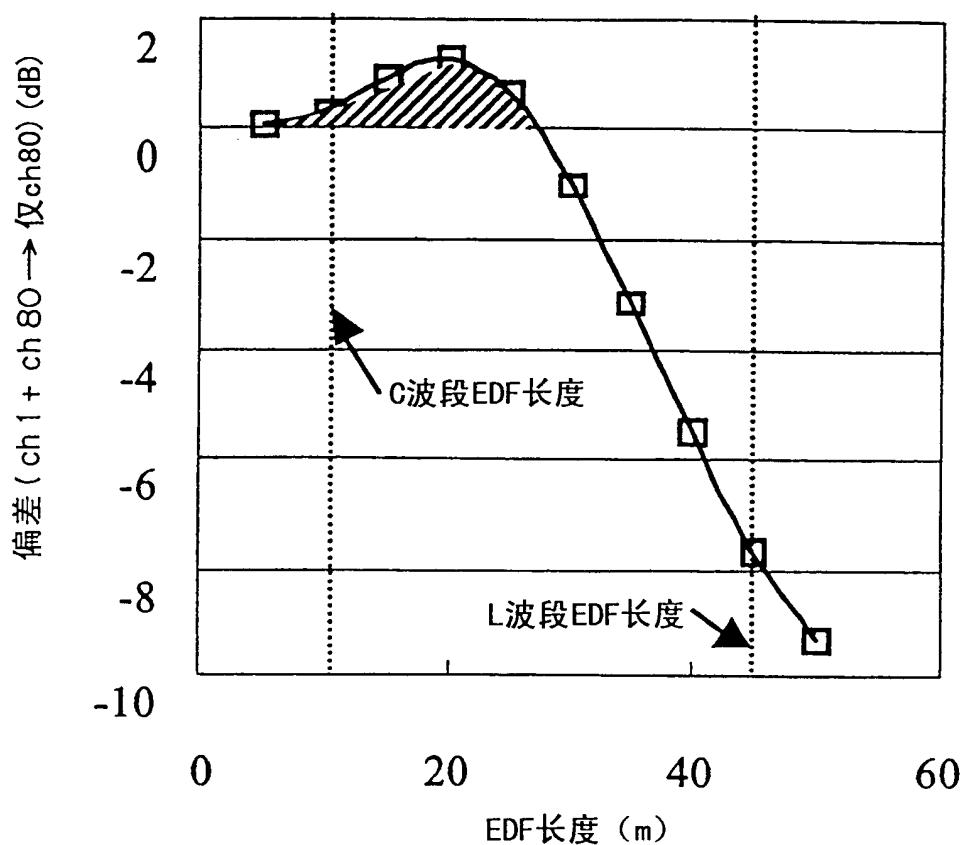


图5



偏差：从仅输入ch80情况下的ch80输出功率 减去输入  
ch1和ch80情况下的ch80输出功率得到的值

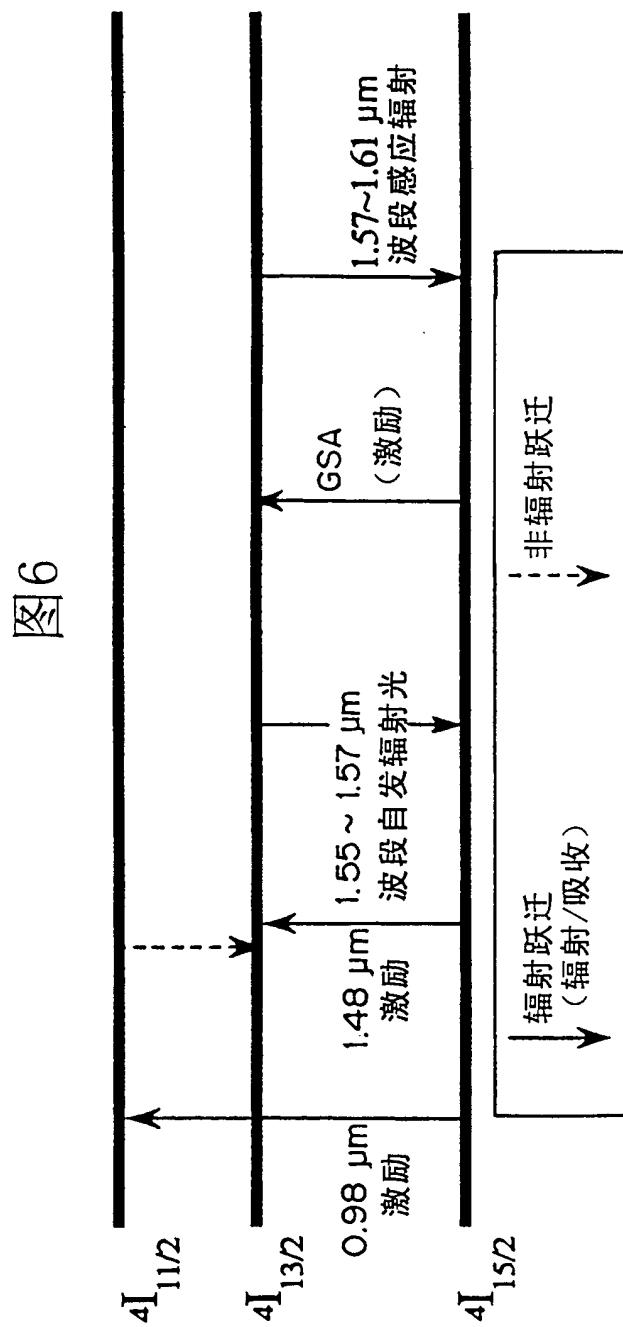
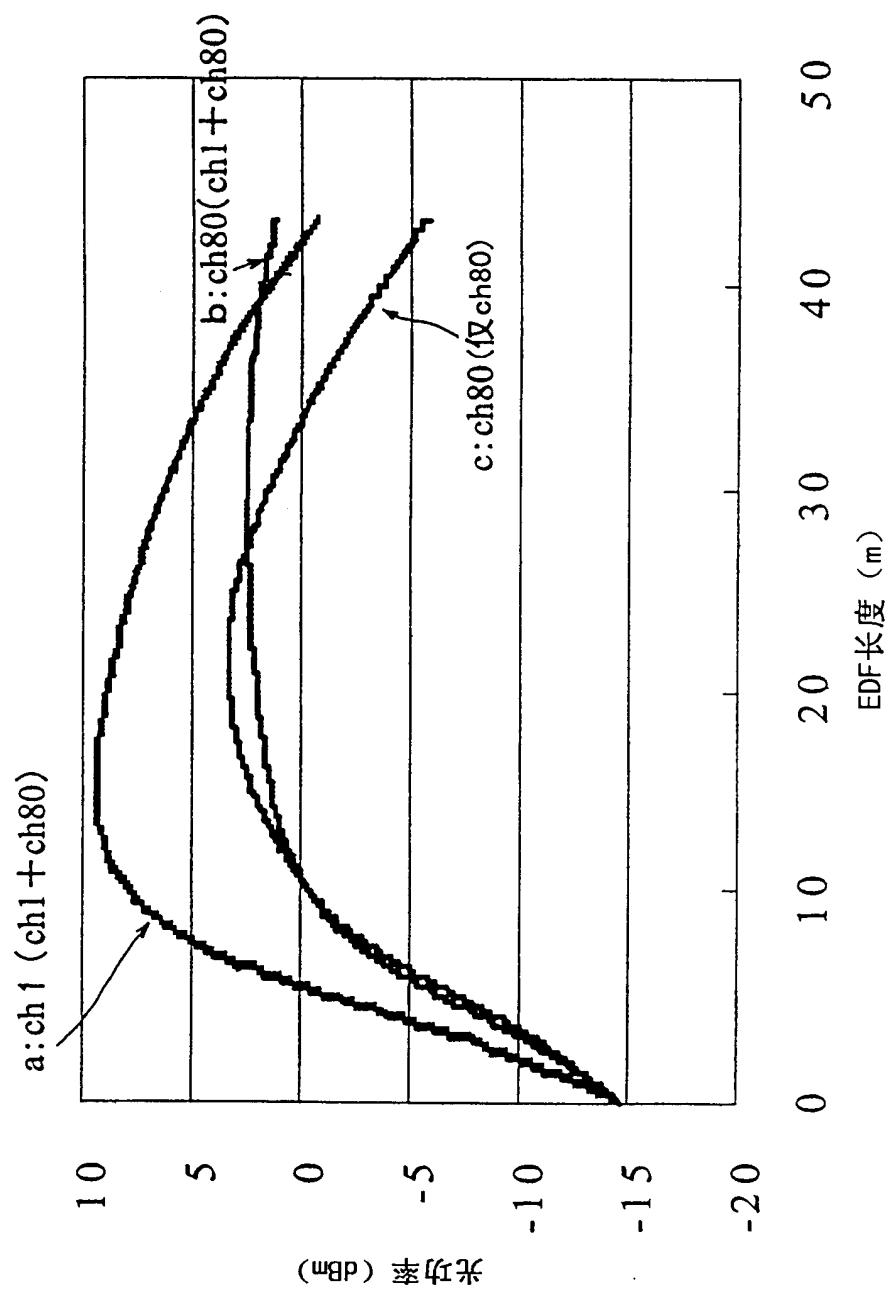


图7



在此图中“G”定义为DEF的增益

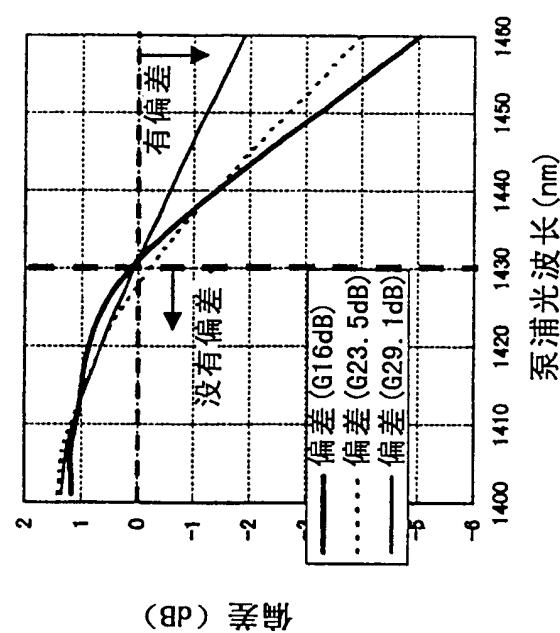


图8A

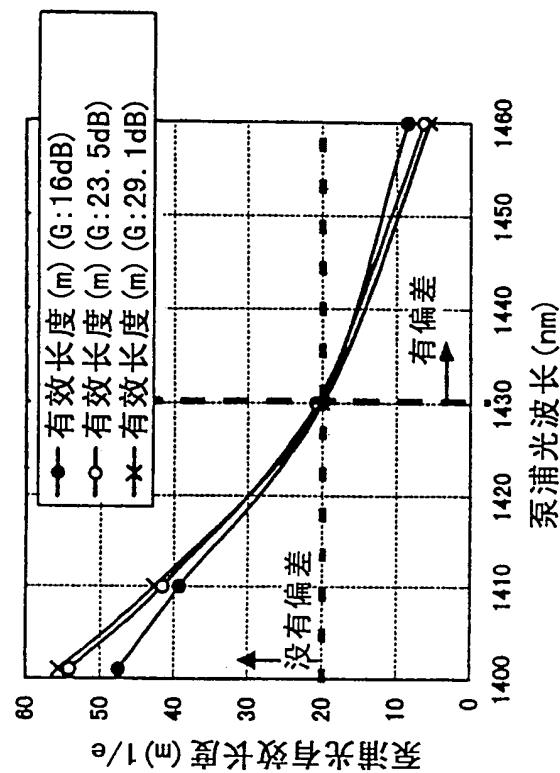


图8B

图9

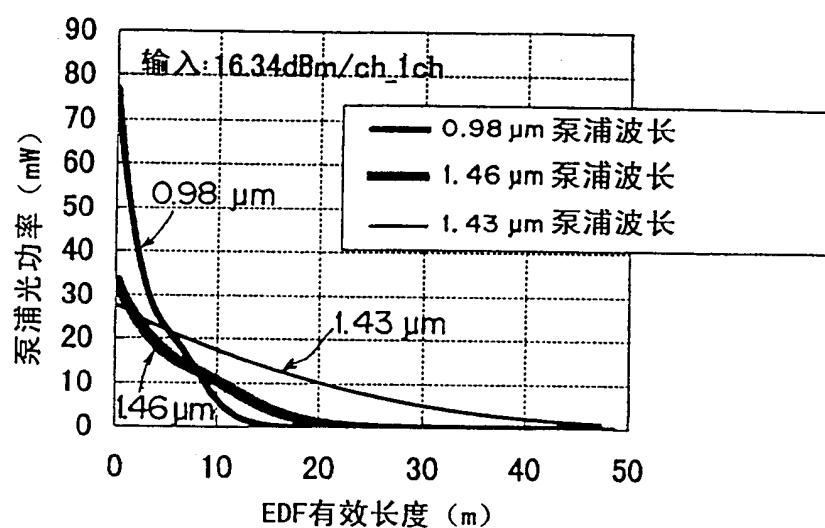


图10

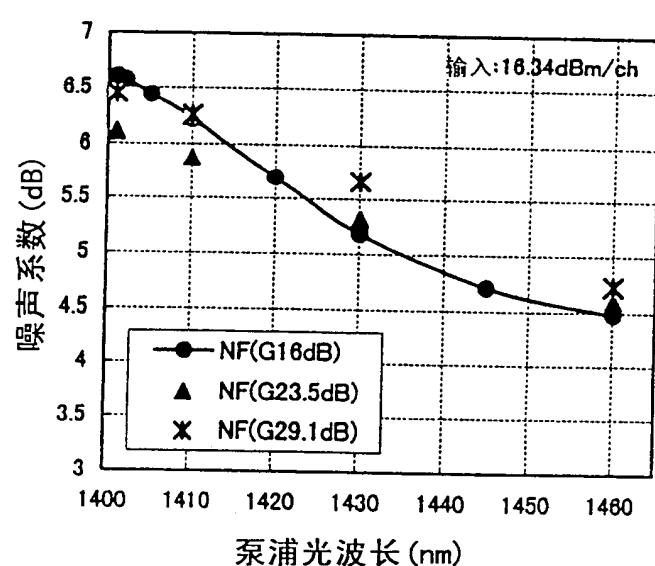


图11

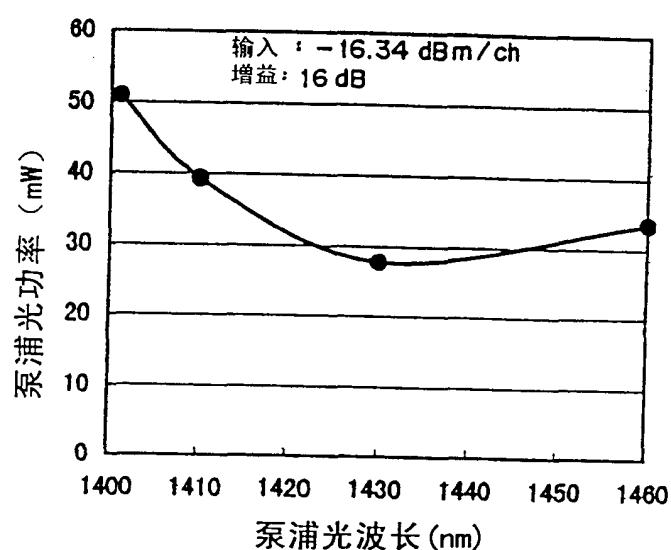


图12

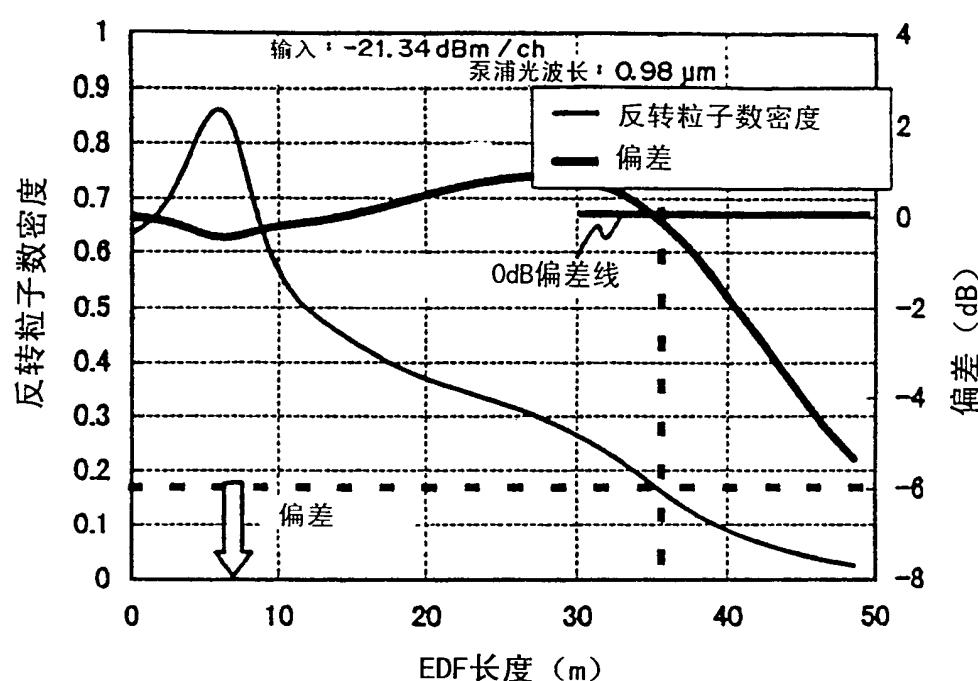


图13A

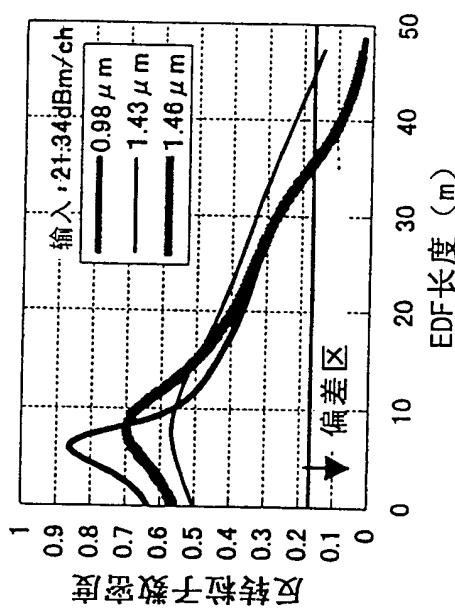


图13B

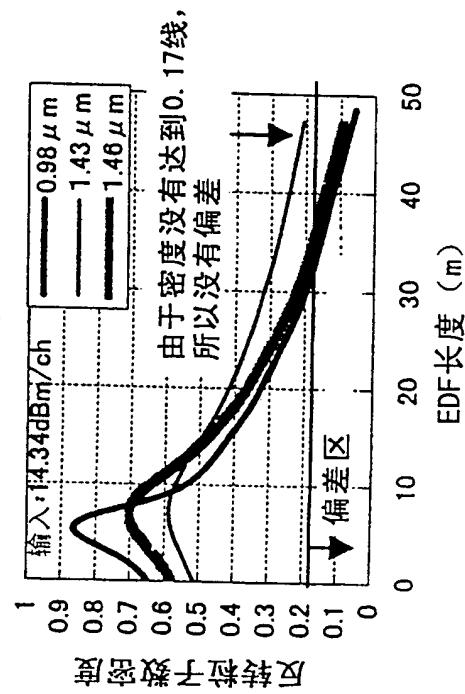


图 14A

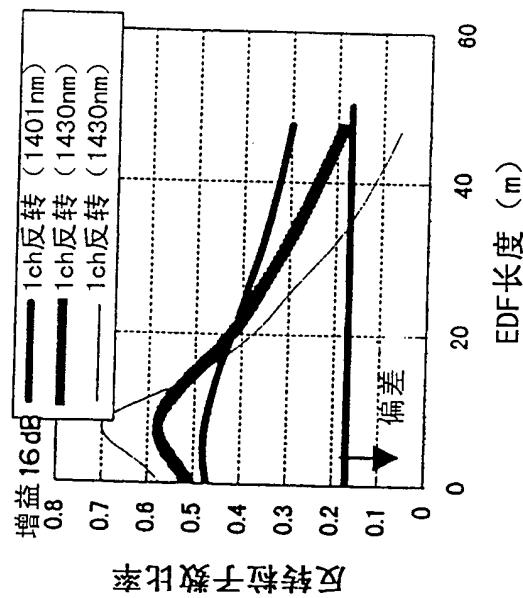


图 14B

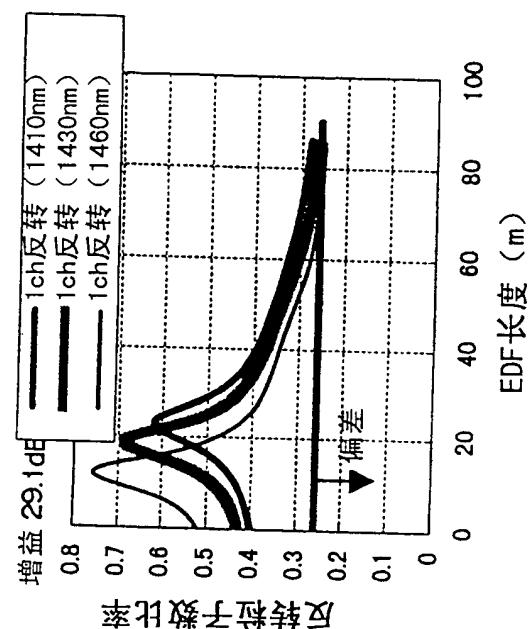


图15

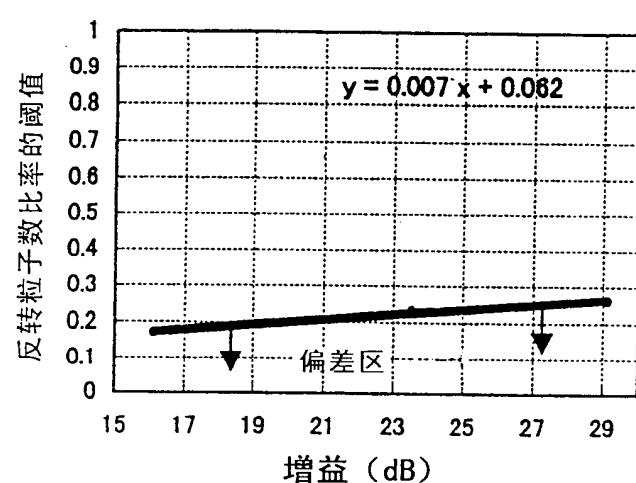


图16

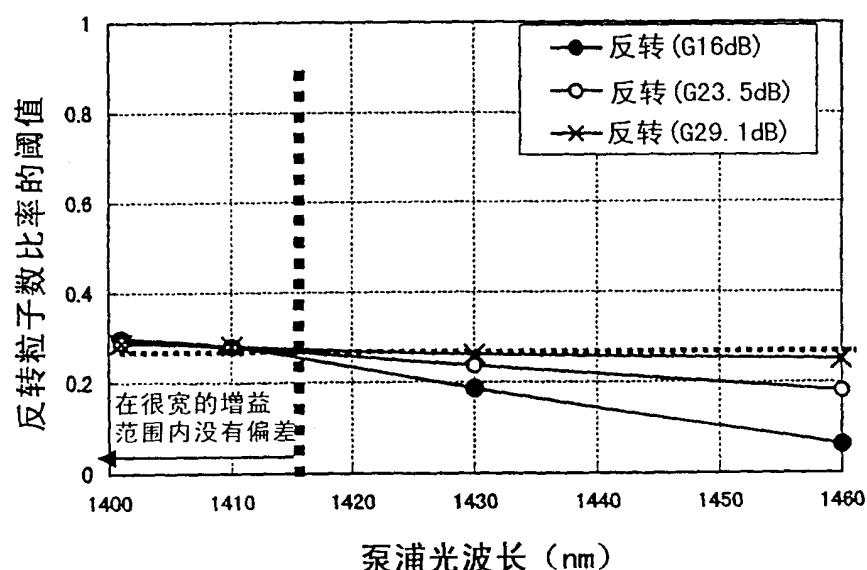


图 17B

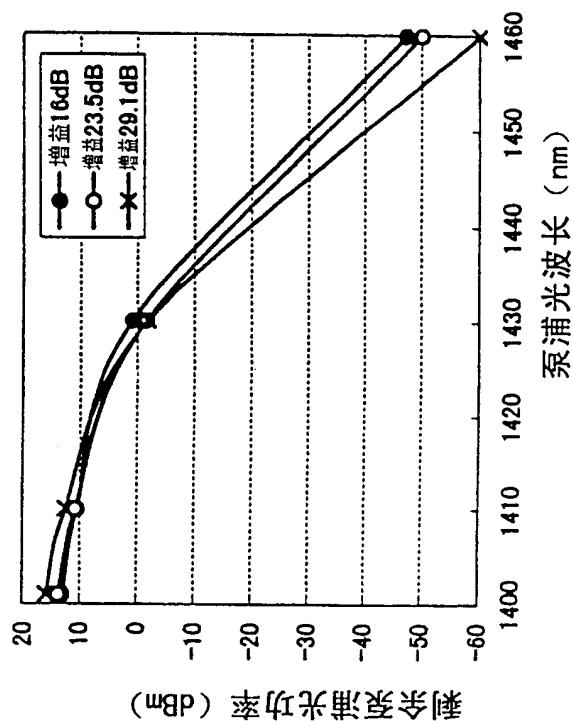


图 17A

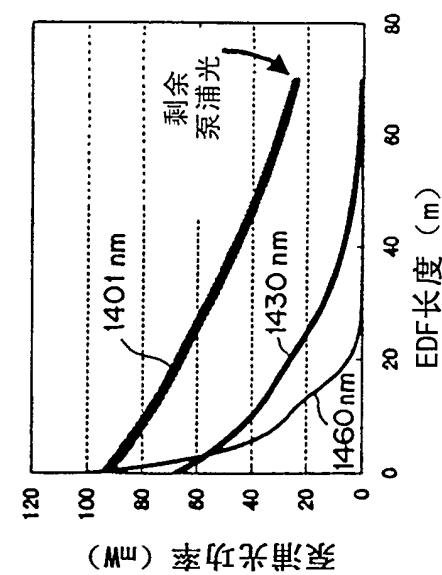


图18A

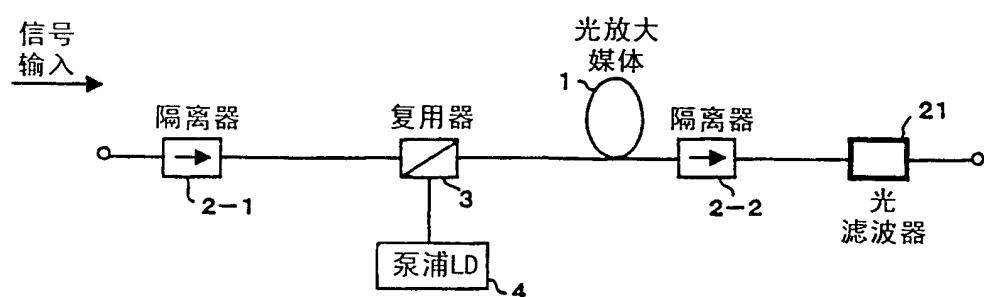


图18B

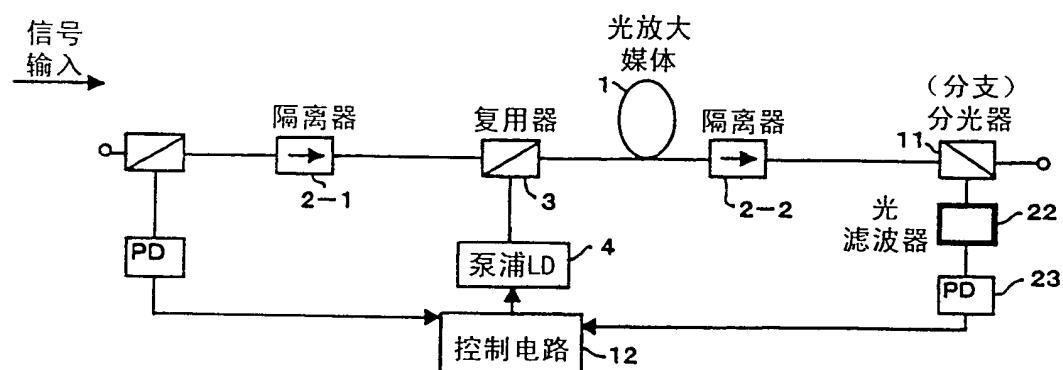


图19A

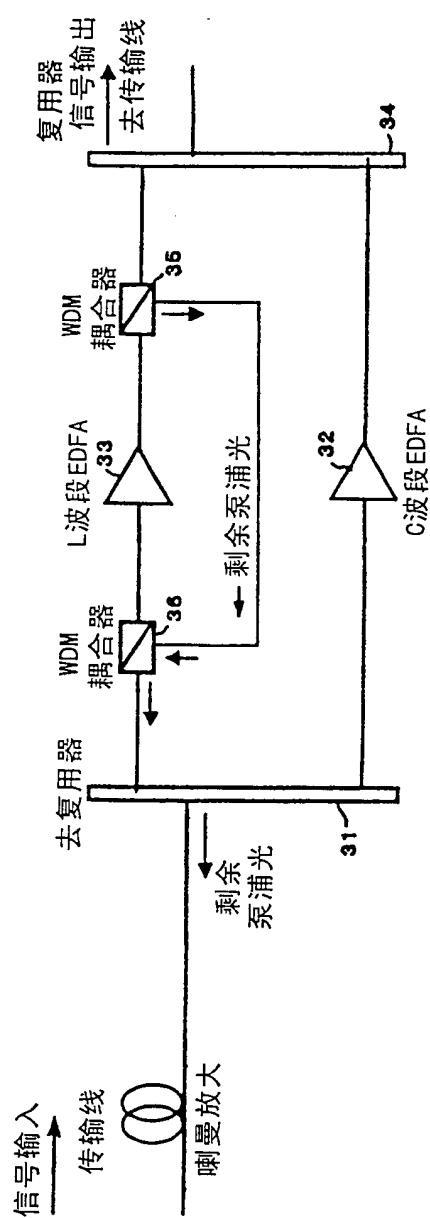


图19B

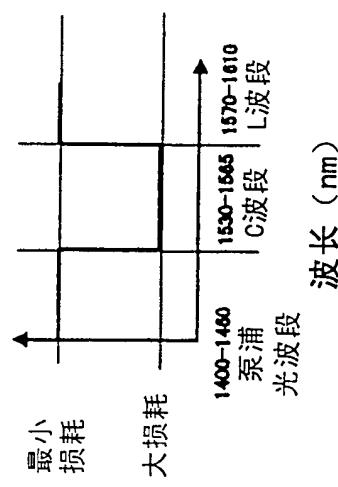


图19C

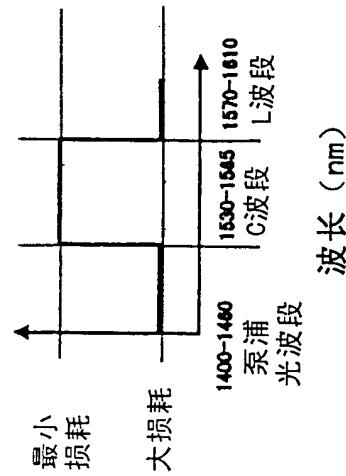
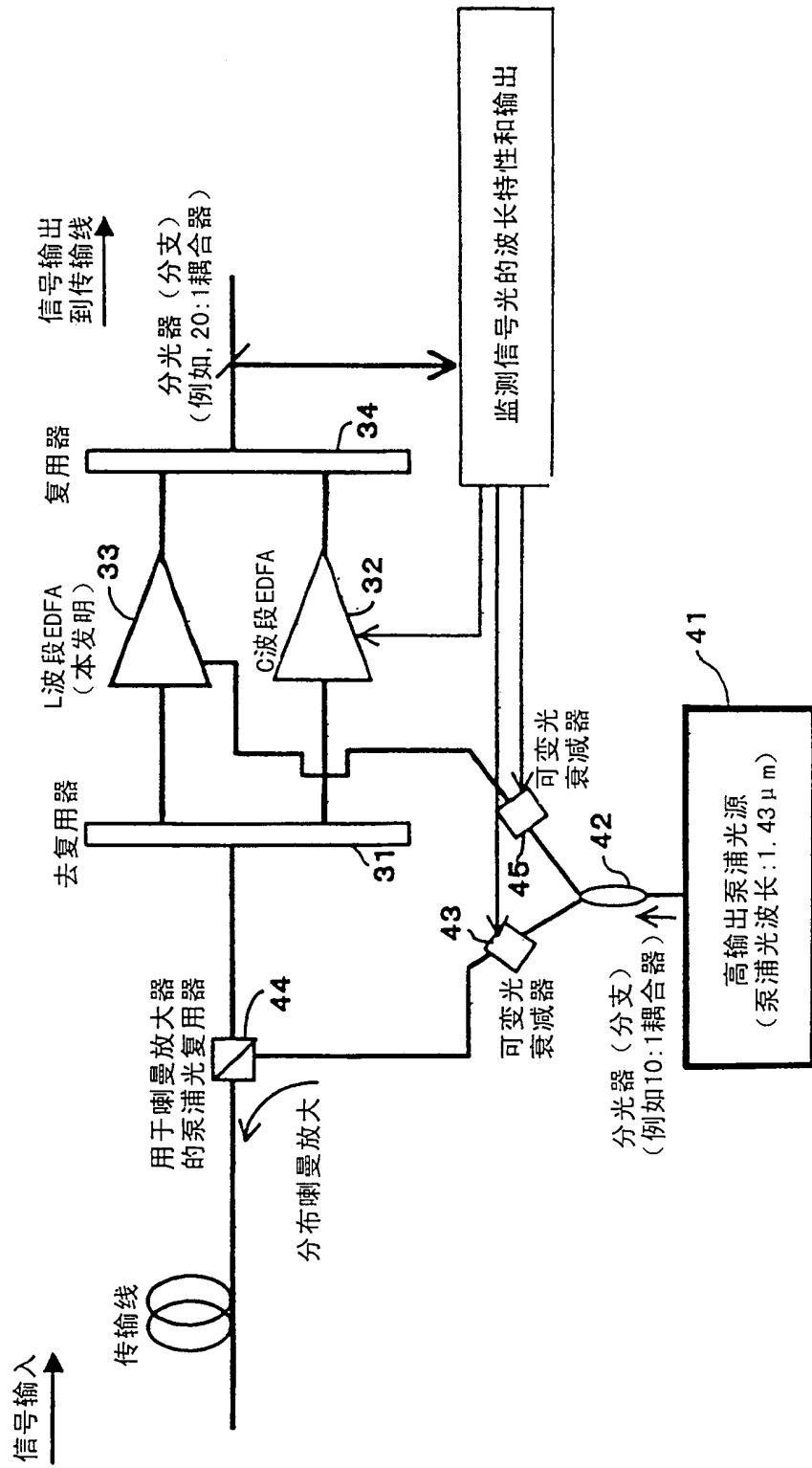


图20



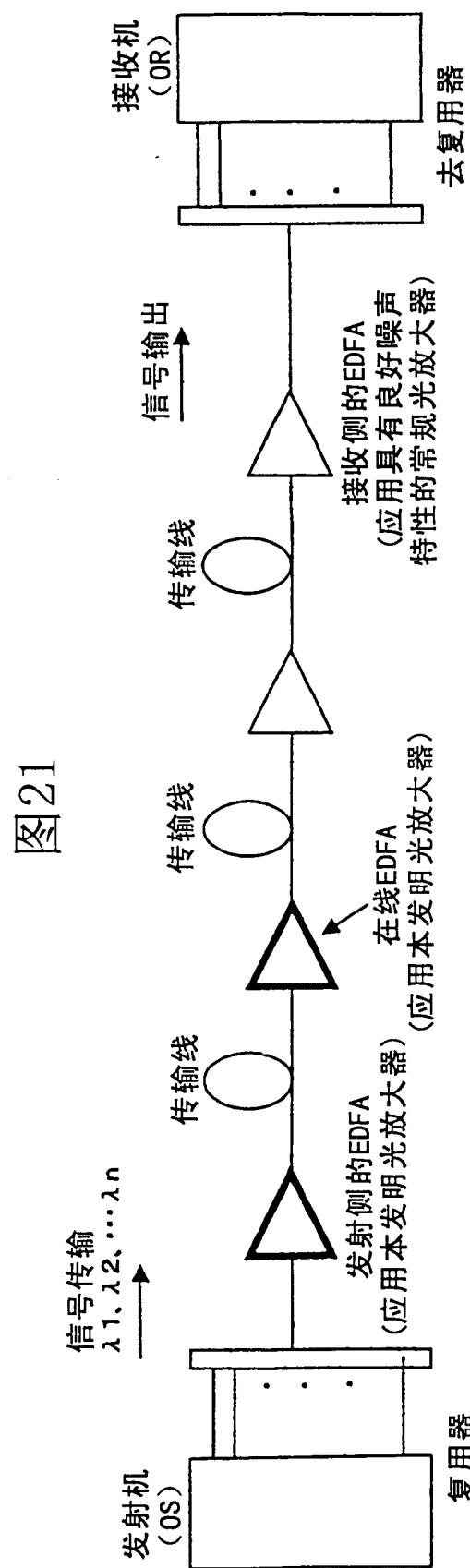


图22

