

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

H04B 10/17 (2006.01)

H01S 3/131 (2006.01)



## [12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200480041698.6

[43] 公开日 2007年2月21日

[11] 公开号 CN 1918830A

[22] 申请日 2004.12.15

[21] 申请号 200480041698.6

[30] 优先权

[32] 2003.12.15 [33] DE [31] 10358698.9

[86] 国际申请 PCT/EP2004/053511 2004.12.15

[87] 国际公布 WO2005/057813 德 2005.6.23

[85] 进入国家阶段日期 2006.8.15

[71] 申请人 西门子公司

地址 德国慕尼黑

[72] 发明人 L·拉普

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 卢江 魏军

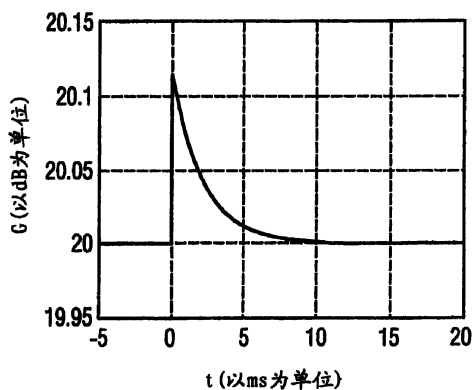
权利要求书2页 说明书12页 附图8页

### [54] 发明名称

用于调节光放大器的泵功率的方法

### [57] 摘要

本发明涉及一种用于调节光放大器的泵功率的方法，利用该放大器在某一增益值时放大具有多个信道的宽带光复用信号，并且在该放大器中检测在放大器的输入端或者输出端处的功率的变化。在检测到功率变化之后，以光放大器的先前存在的稳定的增益状态为出发点如此来计算出并且调整新的泵功率，使得在某一时间间隔期间增益值的偏差作为预先确定的时间干扰瞬变保持最小。在此，新的泵功率根据模型非常精确并且快速地被计算出来，该模型考虑当前增益值、有效信道的波长依赖性、老化效应和非线性放大效应。



1. 用于调节光放大器的泵功率的方法，利用所述放大器放大具有多个不同波长的信道的的光波长复用信号，并且在所述放大器中检测输入功率或者输出功率的变化，

其特征在于，

在所述输入功率变化之后，在小于所述放大器的反应时间的的时间间隔内，测量总输入功率和总输出功率，并且由此以先前存在的优选地稳定的增益状态为出发点计算并且调整所述泵功率的新的值，使得所述放大器的增益变化曲线尽可能保持恒定。

2. 按照权利要求1所述的方法，其特征在于，用于计算在使所述输入功率变化的开关过程之后的新的泵功率  $P_{\text{pump}}^{\text{nach}}$  的模型通过以下公式来定义：

$$P_{\text{pump}}^{\text{nach}} = P_0 \cdot \left[ \exp\left\{ \frac{P_{\text{eff}}^{\text{nach}}}{P_0} \right\} - 1 \right] \text{ 其中}$$

$$P_{\text{eff}}^{\text{nach}} = P_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{\bar{\mu}_{\text{signal}}}{\mu_{\text{pump}}} \cdot \frac{1}{G_{\text{norm}}} \cdot \{ P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}} + P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}} \} \text{ 和}$$

$$P_{\text{eff}}^{\text{vor}} = P_0 \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{P_{\text{pump}}^{\text{vor}}}{P_0} \right\}$$

其中量  $(P_{\text{sig,out/in}}^{\text{nach}})$  是在所述开关过程之后的数十  $\mu\text{s}$  的时间间隔内所采用的被测量，在所述时间间隔内所述放大器的增益只是微小地发生变化，并且

$(P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}})$  表示在所述开关过程之后的总输出功率，

$(P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}})$  表示在所述开关过程之后的总输入功率，

$(P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}})$  表示在所述开关过程之前的总输出功率，

$(P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}})$  表示在所述开关过程之前的总输入功率，

$(\bar{\mu}_{\text{signal}})$  和  $(\mu_{\text{pump}})$  表示在所述开关过程之后的平均信号波长以及泵波长， $(G_{\text{norm}}, P_0)$  表示所述光放大器的两个校准参数， $(P_{\text{pump}}^{\text{vor}})$  表示在所述开关过程之前所测量的泵功率，以及  $P_{\text{eff}}^{\text{vor/nach}}$  表示不考虑损耗机理的有效功率。

3. 按照权利要求2所述的方法, 其特征在于,  
在不具有平滑滤波器的 EDFA 放大器的平均增益的前提下, 根据以下公式

$$P_{\text{eff}}^{\text{nach}} = P_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{\bar{\mu}_{\text{signal}}}{\mu_{\text{pump}}} \cdot \frac{G_{\text{sig}} - 1}{G_{\text{norm}}} \cdot \{P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}\}$$

进行新的有效泵功率  $P_{\text{eff}}^{\text{nach}}$  的计算, 其中比例  $(G_{\text{sig}} = \frac{P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}}}{P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}})$  表示在整个波长范围内的平均增益, 并且在所述开关过程之前和之后被假设为接近恒定。

4. 按照上述权利要求之一所述的方法, 其特征在于,  
在所述输入功率缓慢变化时, 逐步执行所述泵功率的计算和调整。

5. 按照上述权利要求之一所述的方法, 其特征在于,  
在稳定状态期间, 所述泵功率的新的值被计算并且被读入表格中, 所述表格用作内插的采样点, 该内插用于在开关过程时调整新的泵功率。

6. 按照上述权利要求之一所述的方法, 其特征在于,  
针对 N 个泵源, 利用平均信号波长  $\bar{\mu}_{\text{signal}}$  和相应的泵波长  $\mu_{\text{pump}}$  的商根据以下公式

$$\mu_{\text{eff}}^{\text{vor}} = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_{\text{pump}}}{\mu_{\text{signal}}} \cdot P_{\text{eff},i}^{\text{vor}}$$

对每个泵源的在所述开关过程之前的有效泵功率  $P_{\text{eff},i}^{\text{vor}}$  进行加权并且进行累加, 并且根据在所述开关过程之前和之后所测量的总输入功率和总输出功率以及所述校准参数  $G_{\text{norm}}$  来计算在所述开关过程之后的有效总泵功率  $X_{\text{eff}}^{\text{nach}}$ :

$$\mu_{\text{eff}}^{\text{nach}} = \mu_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{1}{G_{\text{norm}}} \cdot \{P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}} + P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}\}$$

## 用于调节光放大器的泵功率的方法

本发明涉及按照权利要求1的前序部分的用于调节光放大器的泵功率的方法。

波长复用技术(WDM技术)提供以下可能性,即直接经由网络的光路径来连接位于不同地点的发射机和接收机,而无需在节点位置处的电光转换。在将来也可能借助于光开关矩阵任意地建立和拆除光路径。与当前的现有技术相比,这能够实现明显的成本节约,而不必削减连接的灵活性。

然而,由于在多路复用传输系统的信道中切断和接通所传输的信号,在各个子线路上出现剧烈的功率波动。为了在线路的末端避免比特误差,继续被传输的或者被接通的信道的放大器增益不应该改变。图1针对单个放大级并且针对两种不同的情况示出在时间 $t$ 上所有信道的平均增益 $G$ ,其中假设输入功率在时刻零由于切断信道而降低了19dB。

如果使泵功率保持恒定(参见实曲线),则增益 $G$ 从切断过程之前的20dB上升为切断过程之后的恒定值30dB。为了图解说明,这里用虚线画出的另一曲线示出在使用简单的积分调节器时增益的时间变化,所述积分调节器导致,平均增益在具有超过20ms的持续时间的起振过程之后重新为20dB。所示的上冲或者下冲可以通过更复杂的调节来大大降低,但是不能完全被消除。因此,在放大器的级联中可能发生功率波动的累加,并且因此发生比特误差或者甚至发生接收二极管的损坏。

如果在输入信号改变之后为了在稳定的条件下维持增益所需的那个泵功率在输入端处的负载变化的时刻已经是已知的,则几乎完全可以消除上冲和下冲。真正的困难在于,以尽可能高的准确度预先计算该泵功率。

对此的最简单的解决方案规定,将所需的泵功率的线性估计选择作为光放大器处的信号输入功率的函数。在US 6414788 B1和US 6341034 B1中描述了该方面。在此,使用两个恒定的参数。但是,在该方法中,以下主要的影响因素不被考虑:

- 所需的泵功率不仅依赖于输入功率、而且也依赖于相应放大级的增益。因为放大器的级可以根据使用和信道占用而具有明显不同的增益值，所以产生明显的偏差，该偏差影响要调整的正确泵功率的确定。

- 不考虑，所需的泵功率依赖于在切断时继续存在的信道的波长。这同样适用于所谓的“增益波动 (Gain Ripple)”。

- 用于确定要调整的泵功率值的“拟合参数 (Fitting Parameter)”在运行开始时被确定，以便具有增加的运行持续时间的老化效应导致增加的偏差。

- 光纤放大器的放大光纤中的非线性效应、诸如EDFA的掺铒光纤中的“激发态吸收”保持不被考虑，并且因此导致附加的偏差。

为了考虑光谱依赖性，在US 6341034 B1中建议将光谱滤波器安装在光放大器处的输入监控器之前。因此，即使该方法的波长依赖性不完全被消除，该方法的波长依赖性也可以被改善。但是，由于高的元件成本，该方法的使用是几乎不可能的。

如在前述文献中那样，在US 6 366 393 B1中介绍了光放大器的增益的控制单元，该控制单元将所需的泵功率的线性估计选择作为光放大器处的信号输入功率的函数。在该解中所包含的误差借助于校正回路来校正，所述校正回路位于放大器之后并且包含微处理器。该校正逐信道地来计算，并且不包含波长依赖性，由此该方法变得缓慢并且不精确。

在US 2003/0053200 A1中，光放大器的泵功率借助于前馈控制回路来调整。在此，WDM信号的一小部分通过滤波器被引导，该滤波器的滤波器传递函数与放大器的特性相匹配。由该滤波器根据波长选择性地对信号输入功率进行加权。具有平均水准以上效应的波长对放大器的激发能级的衰变率的影响在此情况下被放大或者被削弱。在滤波器之后，信号到达光电探测器，该光电探测器与放大器的泵功率的控制单元相连接。

在US 2001/0043389 A1中，借助于前向和反向回路来控制放大器增益。前向回路 (feed forward loop) 借助于测量输入功率的快速光电二极管来控制放大器。反向回路缓慢地根据放大器的输出功率来调节放大器增益。两个回路相互连接，用于控制泵激光单元。放大器

的增益基本上通过反向回路来调整，而前向回路包括对光放大器的增益变化曲线的偏差的补偿。

在US 6 407 854 B1中示出WDM系统中的光放大器的前馈控制。放大器的泵功率借助于控制单元来调整，该控制单元测量放大器的输入功率并且根据测量电平线性地控制泵激光二极管的电流。在此，可以通过与因数相乘或者通过添加偏差来改变泵激光二极管的电信号，以便保证放大器的在整个波长范围上恒定的增益变化曲线。利用该方法获得小于200  $\mu$ s的起振过程。

在Nakaji H.、Nakai Y.、Shigematsu M和Nishimura M.的“Superior high-speed automatic gain controlled erbium doped fiber amplifier” (Optical Fiber Technology 9 (2003), 第25 - 35页) 中描述一种用于在接通或切断WDM信号的其它信道时抑制该WDM信号的继续存在的信道在时间上的增益波动的方法。为了放大WDM信号，使用EDFA，该EDFA利用980nm泵源或者利用1480nm泵源工作。在使用1480nm波长范围内的泵激光器并且最佳地调整特殊应用情况的调节参数时，可以几乎完全避免在切断信道时的上冲。与此相反，在使用980nm波长范围内的泵激光器时在切断信道之后发生微小的上冲。如果现在泵功率不像上面所假设的那样在开关过程的时刻、而是已经更早一些例如借助于连接在放大器之前的延迟元件被降低或者被匹配为新的值，则可以在使用980nm泵源的情况下几乎完全消除上冲。该方法基于以下方面，即输出功率的降低（结果）迟于输入功率的降低（原因）被检测到，因此在对应于延迟的时间间隔内用增益调节来伪装增益的剧烈增长，该增益调节以泵功率的降低来对增益的剧烈增长作出反应。可以由该文献来证明通过实验的增益测量。然而，总是还出现很短的持续时间的下冲。

下面被称为“反馈方法”的该方法非常好地适用于实验室实验，但是几乎不能被用于商业系统，因为最佳的时间延迟依赖于继续存在的信道的数量，用于预先确定该最佳的延迟的规定是未知的，并且调节参数只对于特殊的事件来说是优化的。实际上，任意事件、也即例如信道的不同数量的下降（分接/断开/切断）必须被考虑。为此，时间延迟总是应被重新计算和调整，但是这不能实时地进行或者不能实时地实现。因此，在一个或者多个继续存在的信道的情况下，依赖

于波长的增益变化曲线不可避免地得到偏差，所述继续存在的信道除了与信道有关的增益的已知的波动之外还影响宽带放大。由于该原因，该方法不适用于当前的光开关网络。

本发明的任务是给出一种方法，所述方法保证最佳地调节用于放大具有多个信道的光复用信号的光放大器的泵功率，以便在光放大器处的输入功率或者输出功率变化时，有效信道的要放大的信号的、依赖于波长的增益变化曲线被保持。

该任务的解决方案通过具有权利要求1的特征的方法来实现。

根据本发明，在输入功率变化之后，所测量的泵功率的新的值以尤其是光放大器的相应泵功率的例如借助于调节装置所调整的稳态为出发点这样来计算和调整，使得放大器的增益变化曲线只是最小限度地变化，其中利用所述光放大器来放大具有多个信道的光波长复用信号，并且在所述光放大器中检测波长复用信号的输入功率或者输出功率的变化。

新的要调整的泵功率可以在切断或者接通有效信道之后的短时间内被计算出并且还及时地被调整，因为作为波长的函数的EDFA的增益在短的时间间隔内在一定程度上保持恒定。

本发明的有利的改进方案在从属权利要求中给出。

本发明方法的主要的优点在于，在计算新的要调整的泵功率时，考虑多个主要的影响量、例如当前增益值、有效信道的波长依赖性、老化效应和非线性放大效应，使得快速地进行最佳的泵功率的高度精确的确定，并且因此有效地抑制干扰瞬变、也即上冲的幅度和持续时间。

有利地，新的泵功率例如可以连续地被计算出并且被调整，以及也可以预先被计算并且被调整。在这些情况下，内插值此外也可以根据预先计算的泵功率来确定。

通过在检测到阶跃之后的短时间内测量输出功率，可以完全考虑波长依赖性。老化效应被补偿，因为相对于先前存在的稳定的放大状态进行泵功率的预先计算。同样计算当前的放大器增益，并且考虑放大光纤（例如在“激发态吸收”情况下）的非线性效应。“增益波动”也不导致各个信道的增益的变化。特别有意义的是，除了已经在现有技术中所使用的测量装置或者元件之外，该方法不需要附加的测量装

置和元件，并且因此从成本的角度看也是非常有吸引力的。

在下面的描述中，主要针对包含掺铒光纤的放大级来说明本发明方法。但是，该方法也可以被用于多个具有可能不同的放大光纤和/或泵源的级联放大级。多个泵源在放大级中的使用的实施例甚至也明确地被描述。

在本发明中，以下模型是有利的，该模型能够根据光放大器的先前存在的稳定状态实现重新需要的泵功率的确定或者计算。为此同样考虑其它的受限制的方面并且分析其对该模型的影响。

下面，根据附图进一步描述本发明的实施例。

其中：

图2示出在切断具有前馈调节的有效信道时的时间增益变化曲线，

图3示出在80个有效信道的情况下EDFA的增益谱，

图4示出继续存在的信道的的时间增益变化曲线（图2的片段），

图5示出在切断时间之后的10ms内信道的的时间增益偏差，

图6示出在切断时间之后的25  $\mu$ s内信道的的时间增益偏差，

图7示出作为输入功率的函数的、额定泵功率和与模型有关的要调整的泵功率，

图8示出额定泵功率值和与模型有关的要调整的泵功率值之间的偏差，

图9示出动态调节方案，

图10示出在其它信道的不同切断持续时间的情况下继续存在的信道的的时间增益变化曲线：

(a) 切断持续时间：1  $\mu$ s

(b) 切断持续时间：10  $\mu$ s

(c) 切断持续时间：100  $\mu$ s

(d) 切断持续时间：1ms

(e) 切断持续时间：10ns至1ms

图11示出在信道的不同切断持续时间的情况下上冲的幅度，

图12示出三级光纤放大器的受调节的功率分布。

在图2中示出了在切断单级掺铒光纤放大器中具有前馈调节的有效信道时的时间增益变化曲线G，其中在输入功率降低时维持增益所需



的泵功率在负载变化的时刻被调整。在此，下冲完全被抑制。

下面说明：怎样能够以光纤放大器的已知运行状态为出发点来计算在开关过程之后维持增益所需的泵功率  $P_{\text{pump}}^{\text{reach}}$ 。

根据对掺铒光纤中的放大过程的适当建模来描述该方法。下面，所有性能参数都涉及掺杂光纤的起点或者终点。但是，现有的测量装置（包括光电二极管）通常被如此校准，以致该测量装置检测在放大器或放大器卡的输入端或者输出端处所存在的功率。在大多数情况下还有无源元件、例如耦合器和隔离器位于放大器卡的输入端和输出端以及放大光纤的相应末端之间。在该情况下，还需要校正关于前置和后置元件的衰减损耗的性能参数。同样必须考虑用于泵光的测量装置和掺铒光纤中的耦合输入点之间的损耗。由校正得出实际耦合输入到掺杂光纤中或者耦合输出的功率。

此外，还需要另一校正步骤，以便确定实际起作用的泵功率，因为基于光纤的损耗机理不是所有耦合输入到掺杂光纤中的光子都参与放大过程。这尤其在使用具有在980nm范围内的发射波长的泵源时是必要的，因为在这种情况下已经被激发的处于较高能级的离子也可能吸收泵功率，由此泵光子失去原本的放大过程。该过程被称为“泵激发态吸收（ESA）”。为了区分，下面引入有效泵功率  $P_{\text{eff}}$  的概念，该概念表明可有效地供放大过程使用的泵功率。

应按线性比例（mW）使用接下来所说明的所有功率量。

可以以耦合输入到光纤中的泵功率  $P_{\text{pump}}$  为出发点借助于公式

$$P_{\text{eff}} = P_0 \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{P_{\text{pump}}}{P_0} \right\}$$

来计算有效泵功率  $P_{\text{eff}}$ ，其中符号  $P_0$  代表校正参数。当在传输系统中运行放大器时该校正参数必须是已知的，并且最好在调准放大器卡时已经被确定。

因此，在该计算方法之前，表征参数  $P_0$  与第二表征参数  $G_{\text{norm}}$  一起在光纤放大器的校准过程的范围内通过测量被确定。在该测量中，相对于光纤放大器的输入或输出功率来描绘维持预先确定的增益值所需的泵功率。在此，有利的是，不改变信道占用并且通过所有信道的相同衰减来实现不同的输入功率。

该测量方法利用以下事实，即不具有损耗机理的掺铒光纤的维持

预先确定的增益值所需的泵功率是输入功率的线性函数。对于较大的泵功率值来说出现与直线的偏差。该偏差由泵ESA决定。现在通过拟合来确定参数 $P_0$ 。为此，针对 $P_0$ 的不同值计算由所测量的泵功率得出的有效泵功率，并且根据最小误差平方的准则用直线来近似曲线。误差平方和被表示为 $P_0$ 的函数。现在，导致最小误差平方和的那个值被选择为 $P_0$ 的值。利用该值得出曲线，该曲线描绘作为放大器的输入功率的线性函数的有效泵功率 $P_{eff}$ 。现在可以从如此确定的直线的斜率推导出对于光纤放大器来说第二表征参数 $G_{norm}$ 。有效泵功率 $P_{eff}$ 的变化通过比例常数

$$\alpha = \frac{\bar{\lambda}_{signal}}{\lambda_{pump}} \cdot \frac{G_{sig} - 1}{G_{norm}}$$

与输入功率的相应变化相联系，其中两个波长 $\bar{\lambda}_{signal}$ 和 $\lambda_{pump}$ 表示平均信号波长以及泵波长。参数

$$G_{sig} = \frac{P_{sig,out}}{P_{sig,in}}$$

通常代表输入和输出信号功率比。因为除了 $G_{norm}$ 之外的所有其它量都是已知的，所以现在第二表征参数也可以唯一地被确定。 $G_{norm}$ 的值典型地位于0.95和1.00之间的范围内。

在确定了两个校正参数 $P_0$ 和 $G_{norm}$ 之后，现在计算在开关过程之后维持增益所需的泵功率 $P_{pump}^{nach}$ 。可以在开关过程之前所测量的泵功率 $P_{pump}^{vor}$ 为出发点利用以下公式

$$P_{eff}^{vor} = P_0 \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{P_{pump}^{vor}}{P_0} \right\} \quad (1)$$

来计算有效泵功率 $P_{eff}^{nach}$ 。利用在开关过程之前的总信号功率 $P_{sig}^{vor}$ 得出在开关过程之后的信号功率 $P_{sig}^{nach}$ 的有效泵功率的值为

$$P_{eff}^{nach} = P_{eff}^{vor} + \frac{\bar{\lambda}_{signal}}{\lambda_{pump}} \cdot \frac{1}{G_{norm}} \cdot \{ P_{sig,out}^{nach} - P_{sig,in}^{nach} - P_{sig,out}^{vor} + P_{sig,in}^{vor} \} \quad (2)$$

其中在此出现的公式符号具有以下意义：

$P_{sig,out}^{nach}$ 是在开关过程之后在增益不变（也即稳定状态）时所得出的总输出功率，

$P_{sig,in}^{nach}$  是在开关过程之后的总输入功率，

$P_{sig,out}^{vor}$  是在开关过程之前的总输出功率，

$P_{sig,in}^{vor}$  是在开关过程之前的总输入功率，

两个波长  $\lambda_{signal}$  和  $\lambda_{pump}$  代表在开关过程之后的平均信号波长以及泵波长。现在可以根据在开关过程之后要调整的有效泵功率通过公式 (1) 的转换来确定实际要由光纤输入端处的控制装置调整的泵功率，这导致以下结果

$$P_{pump}^{nach} = P_0 \cdot \left[ \exp\left\{ \frac{P_{eff}^{nach}}{P_0} \right\} - 1 \right] \quad (3)$$

通常，在开关过程之后的准确的信道占用以明显的延迟才变为已知，并且因此不可供调节使用。在这种情况下，可以将完全占用放大带时信号的平均波长用于平均信号波长。

在确定的前提下可以简化公式 (2)，使得放大器结构的简化成为可能。下面说明两种可能的简化：

按照公式 (2)，为了计算在开关过程之后的泵功率  $P_{pump}^{nach}$ ，在开关过程之前和在开关过程之后的输入和输出侧的总功率必须是已知的。由于所要求的几个  $\mu s$  的调节时间，所以在放大级的输入端处的测量装置以及在输出端处的那个测量装置必须具有短的测量时间。当然，这种对短的测量时间的要求可以被限制于在开关过程之后的时刻，因为假设以稳定状态为出发点进行开关过程。各个放大级典型地具有 20dB 或者更多的增益，这意味着输出功率比输入功率高大约两个数量级。此外，总输入功率并且因此总输出功率也剧烈降低（例如降低 10dB 以上）的开关过程在动态特性方面尤其是关键的。但是这意味着，公式 (2) 的弧形括号中的第二项  $P_{sig,in}^{nach}$  明显小于其它项并且因此可以被忽略。因此，该公式可以被简化为

$$P_{eff}^{nach} \approx P_{eff}^{vor} + \frac{\lambda_{signal}}{\lambda_{pump}} \cdot \frac{1}{G_{norm}} \cdot \left\{ P_{sig,out}^{nach} - P_{sig,out}^{vor} + P_{sig,in}^{vor} \right\} \quad (4)$$

在该公式中， $P_{sig,out}^{nach}$  是只有短的持续时间可用于测量的唯一的量。因此，尽可能快速的光电二极管只还被用于测量总输出功率，而较慢的测量装置可被用于测量总输入功率。这是有益处的，因为通过放弃偏压能够基于更小的暗电流而提高光电二极管的灵敏度。

另一方面，针对以下情况得到公式(2)的简化，即平均放大器增益不发生变化，这对于计算在开关过程之后在增益变化曲线保持相同时所得出的输出功率来说是重要的问题。在这种情况下，公式(2)可以被转换为

$$P_{\text{eff}}^{\text{nach}} = P_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{\bar{\lambda}_{\text{signal}}}{\lambda_{\text{pump}}} \cdot \frac{G_{\text{sig}} - 1}{G_{\text{norm}}} \cdot \{P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}\} \quad (5)$$

$$\text{其中 } G_{\text{sig}} = \frac{P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}}}{P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}}$$

在这种情况下又只需要快速的测量装置来测量总输入功率。但是，该公式可以被这样改写，使得短测量时间仅仅对于掺铒光纤的输出端处的测量装置来说是必要的。

但是这里要说明的是，EDFA的放大级的增益一般情况下、尤其在所述放大级不包含平滑滤波器时对于各个信道来说是不同的。

当在光放大器中采用多个泵源时，原理方法与在仅有一个泵源的情况下的方法是相同的。首先，在基准状态中存在的泵功率根据公式(1)单独地被换算成有效泵功率，其中也许必须针对各个泵源使用不同的参数 $P_0$ 。于是随后利用平均信号波长 $\bar{\lambda}_{\text{signal}}$ 和相应的泵波长 $\lambda_{\text{pump}}^i$ 的商对有效泵功率 $P_{\text{eff},i}^{\text{vor}}$ 进行加权。这些量的总和得出辅助量 $X_{\text{eff}}^{\text{vor}}$ ：

$$X_{\text{eff}}^{\text{vor}} = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_{\text{pump}}^i}{\bar{\lambda}_{\text{signal}}} \cdot P_{\text{eff},i}^{\text{vor}}$$

其中N表示泵源的数量。相应地得出在开关过程之后要调整的辅助量 $X_{\text{eff}}^{\text{nach}}$ 为：

$$X_{\text{eff}}^{\text{nach}} = X_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{1}{G_{\text{norm}}} \cdot \{P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}} + P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}\}$$

各个泵源在何种程度上为该额定值作出贡献，对于增益的维持来说是无关紧要的。但是，可以存在优先级，该优先级例如可以由对尽可能最佳的噪声系数的要求得出并且依赖于所选择的泵配置。如果各个泵源的贡献被确定，则使这些贡献与平均信号波长 $\bar{\lambda}_{\text{signal}}$ 和相应的泵波长 $\lambda_{\text{pump}}^i$ 的商相乘。因此，现在又存在相应的有效泵功率，该有效泵功率根据公式(3)被换算成实际的泵功率 $P_{\text{pump}}^{\text{nach}(i)}$ 。

前述方法基于在一定程度上总是满足的假设，即在放大器光纤的

某一位置处耦合输入的泵功率分别具有不同吸收带的波长。

图3针对WDM信号的80个信道示出作为波长的函数的、增益G的变化曲线的例子。现在示例性地考察以下情况，即除了所标记的继续存在的信道UK之外的所有信道都被切断。调节的真正目的不是使如由级的输入端处和输出端处的总功率测量所得出的平均增益保持恒定。更确切地说必须设法使增益变化曲线在波长上不发生变化，因为只有那时落在相应的接收机上的功率才在时间上保持不变。在上述例子中，这取决于平均增益的变化。

在确定新的额定增益时掺铒光纤的动态特性是有益的。甚至在输入功率阶跃变化时，平均粒子数反转发生变化，并且因此增益变化曲线也只缓慢地变化。图4针对在输入功率有19 dB的阶跃时保持恒定的泵功率并且例如针对继续存在的信道UK示出已经在图1中示出的实曲线的时间增益片段，其中所述增益片段在大的时间间隔内渐进地接近于极限值30 dB。然而，在开关过程之后的最初10  $\mu$ s内，所考察的信道的增益只是微小地发生变化。因此，可以利用该时间间隔来确定在开关过程之后的所期望的输出功率和在光谱功率分布被改变时相应的平均增益。

针对上面介绍的、80个信道中除了1531.9nm信道之外的所有其它信道都被切断的实施例，在其它的图5和6中示出了光纤放大器EDFA的动态特性。根据在 $t = 0$  ms时在开关过程之前的状态，在不同波长时信道独特的时间增益变化 $DG(t)$ （在0 dB的范围内所示的曲线）以及平均增益的变化（在大约2 dB处所示的具有阶跃的曲线）被示出。在大约2 dB处用虚线示出的水平线说明在达到起振状态之后的增益变化。图6是在信道的开关过程之前和之后的几毫秒的范围内图5的慢动作。

随后的图7现在示出作为光纤放大器的输入功率 $P_{-IN}$ 的函数的、通过实曲线KA、KB、KC、KD所示的所需要的泵功率、即额定泵功率 $P_{-PUMP}$ ，其中为了在开关过程之后维持不同的平均增益值5、10、15、20dB，应该根据图4至6调整所述输入功率。为了验证上述方法，分别以具有最大输入功率的数据点为出发点按照上述方法根据公式（1）至（6）确定了泵功率，并且在图7中通过点示出了相应的结果。在此，引人注目的是通过仿真所确定的泵功率与预先计算的值的非常好的一致性。

为了进行说明，图8根据图7中的曲线KA、KB、KC、KD和所记入的

点示出所需要的额定泵功率和泵功率的按照本发明的预先计算之间的相对误差DEV。在此，相对误差最大大约为5%。

迄今出发点为，在切断信道时输入功率立即从起始值下降为终值。现在在下面的段中针对以下情况描述对增益的剩余上冲产生影响的方法，即在切断时间“下降时间”期间（大概参见图10a至10e以及图11），输入功率线性地从其起始值下降为终值。在该假设下，图9示出用于执行该方法的动态调节方案。

首先，检查输入功率从预先确定的时间间隔起是否已经是恒定的（步骤1）。如果情况如此，则利用具有反馈的传统调节方案来运行放大器（步骤11）（关于此请参见例如Mann、Schiffelgen、Froriep的“Einführung in die Regelungstechnik”，Hanser-Verlag，慕尼黑，第7版，1997年）。如果在此达到稳定状态（步骤12），则该稳定状态被定义为新的基准状态（步骤13）。如果与此相反输入功率不是恒定的，也即如果在预先确定的时间间隔内检测到输入功率的变化（步骤1），则被转换为根据本发明的前馈运行（步骤21）。在此，在每个时间间隔之后根据最后的基准状态和输入功率以及输出功率的当前值来计算（步骤22）和调整（步骤23）要调整的泵功率。随后，又再次检查输入功率从预先确定的时间间隔起是否已经是恒定的（步骤1）。

现在，如先前那样研究以下情况，即以80个信道为出发点除了1531.9nm信道之外的所有信道都被切断。在 $1\mu\text{s}$ 、 $10\mu\text{s}$ 、 $100\mu\text{s}$ 、 $1\text{ms}$ 的不同切断时间或者切断持续时间的情况下继续存在的信道的增益变化在图10a、10b、10c和10d中借助于实曲线被示出、以及在图10e中针对在10ns和1ms之间的切断时间被相互叠加，其中最大增益变化 $G_{\text{max}}$ 的时刻和值用点示出。为了更好地理解，用虚线示出的曲线按线性比例示出下降的输入功率的时间变化。如前述研究已表明的那样，在输入功率阶跃变化时并且在精确地预先计算在稳定状态中所需的泵功率时得出微小的上冲。原则上存在以下可能性：在使用当前所测量的输出功率的情况下，在重复地应用泵功率的预测的调整时，这些误差累加并且产生该方法的偏差。但是，情况不是如此。

在图10e中彼此叠加地示出了针对在10ns至1ms的范围内的不同切断时间所得出的“继续存在的”信道的增益变化，其中点再次标记相

应的最大增益变化 $G_{\max}$ 。值得注意的是，在大的时间间隔内起振过程只是微小地依赖于切断时间。

对图10e进行补充，图11示出作为切断时间 $T_{\text{fall}}$ 的函数的、出现的上冲 $DEV_{\max}$ 。在切断时间小于 $1\mu\text{s}$ 的情况下得出恒定值，而在较大的切断时间的情况下上冲的强度随着变大的切断时间越来越大地减小。

此外，图12示出三级光纤放大器的受调节的功率分布OPT-POW，其中所述三级光纤放大器由放大级S1、S2和S3组成，所述放大级的增益可以借助于连接在第一放大级S1、S2中间的可变衰减器att来改变。在两个最后的级S2、S3之间可以插入另一光模块DCF，该光模块例如能够实现接通和耦合输出与波长有关的信道或补偿线路衰减。

在此，针对不同的运行状态示出沿整个光纤放大器的功率分布OPT-POW。功率曲线POW1示出在光纤放大器中在开关过程之前存在的功率分布，所述功率分布已经达到稳定状态，并且为现有的信道占用提供最佳的噪声系数。为了避免上冲和下冲或者使上冲和下冲保持尽可能小，直接在开关过程之后借助于前馈调节使各个放大级保持为恒定的增益，使得直接在开关过程之后得出所示的第二功率变化POW2。

但是因为该功率变化就噪声系数而言不是最佳的，所以在输入信号稳定之后缓慢的调节装置负责使功率变化缓慢地从第二功率变化POW2转变为这里作为虚曲线POW3示出的另一功率变化。该过程缓慢地进行，使得该功能可以借助于传统的调节装置来执行。

因为各个放大级S1、S2、S3的增益在第一时间间隔中不应该发生变化，所以在开关过程之后在每级的输入端处调整的总信号功率可以独立于彼此来计算。为此所需的泵功率可以直接根据已经说明的公式来确定。

可用的计算性能可能不足以在开关过程之后实时地计算所需要的新的泵功率。在这种情况下适合于直接在达到稳定状态之后预防性地编制表格，该表格针对足够数量的信号输入功率包含维持增益所需的泵功率，所述信号输入功率在开关过程中用作内插的基准值。

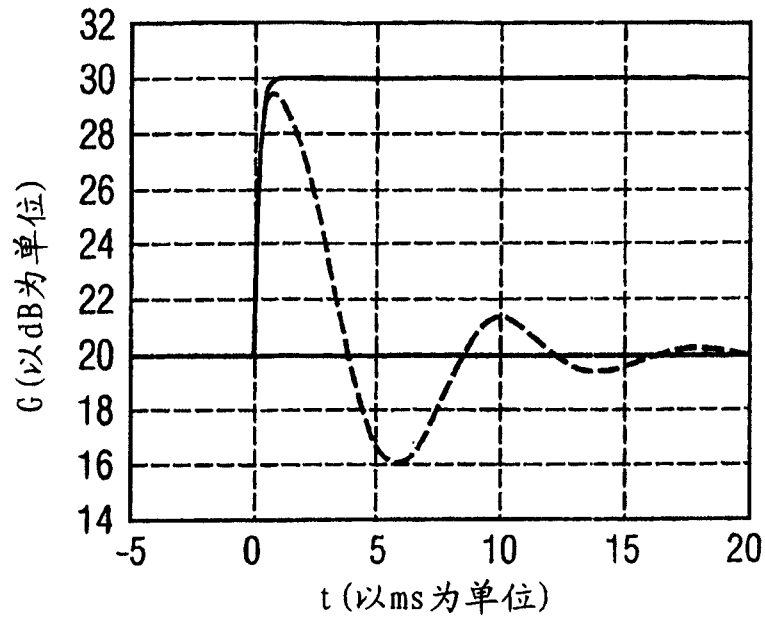


图 1

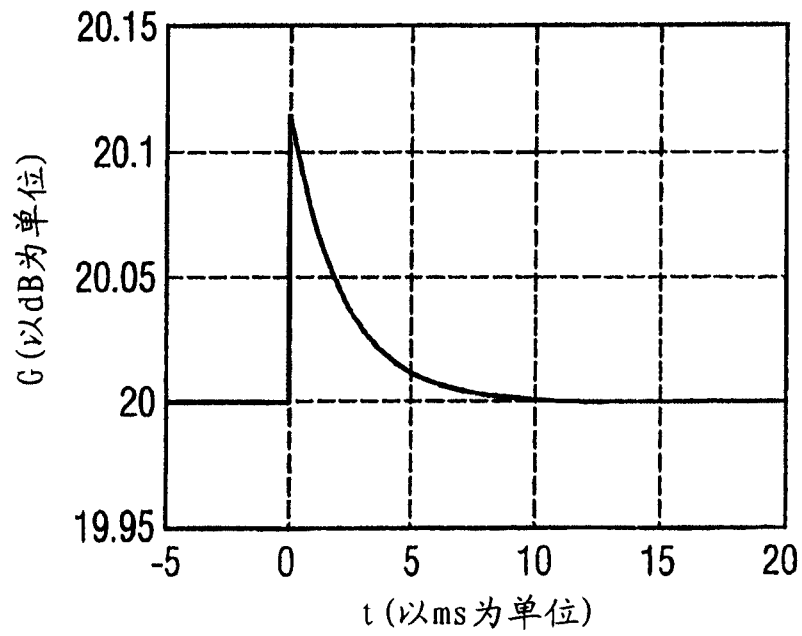


图 2



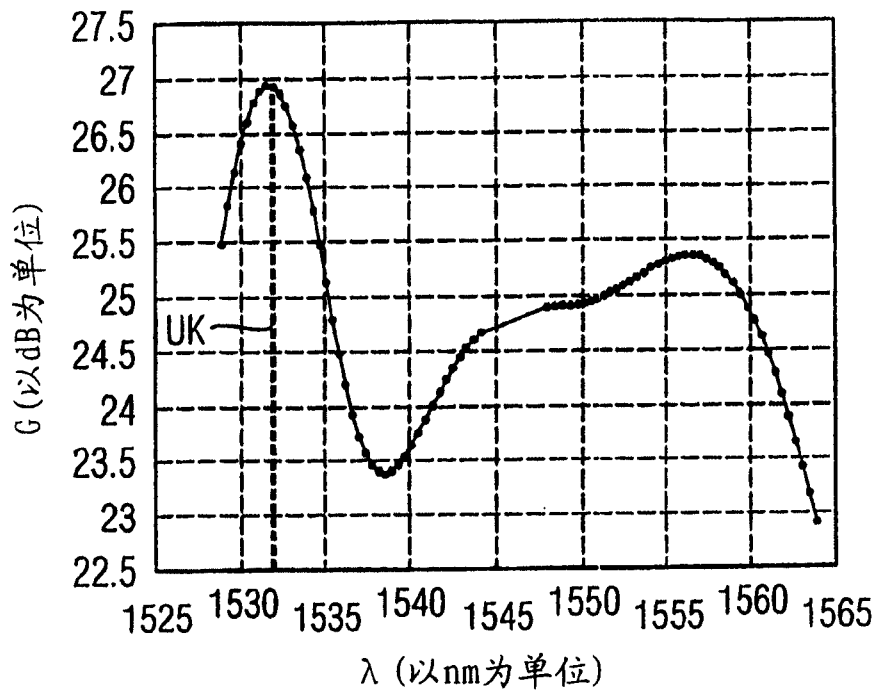


图 3

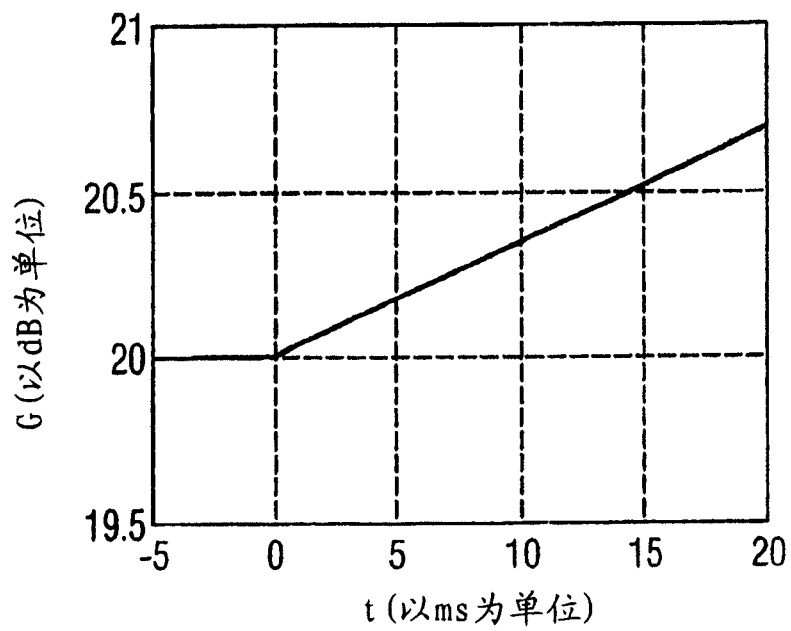


图 4

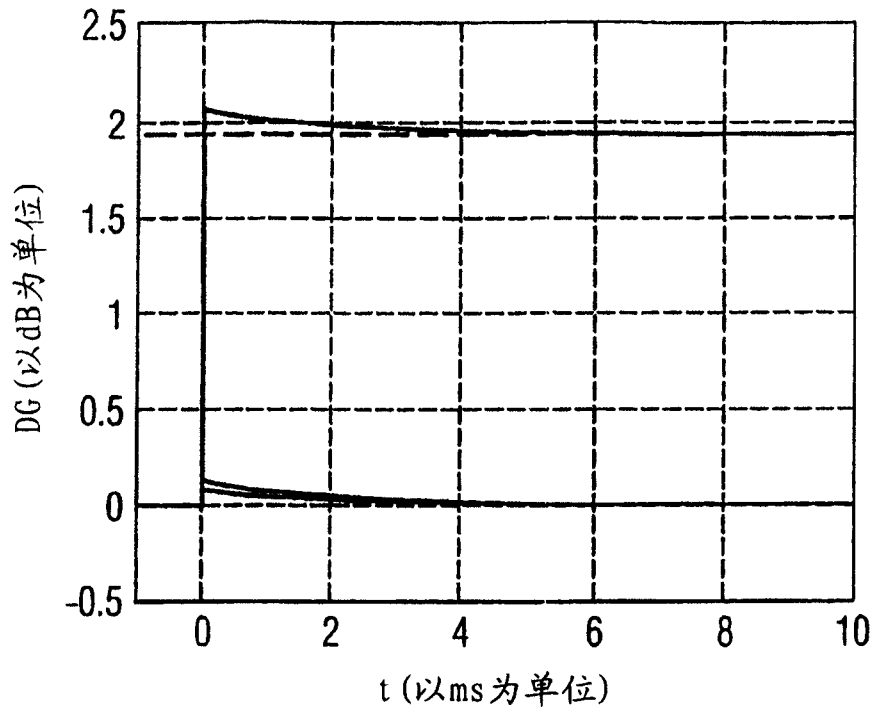


图 5

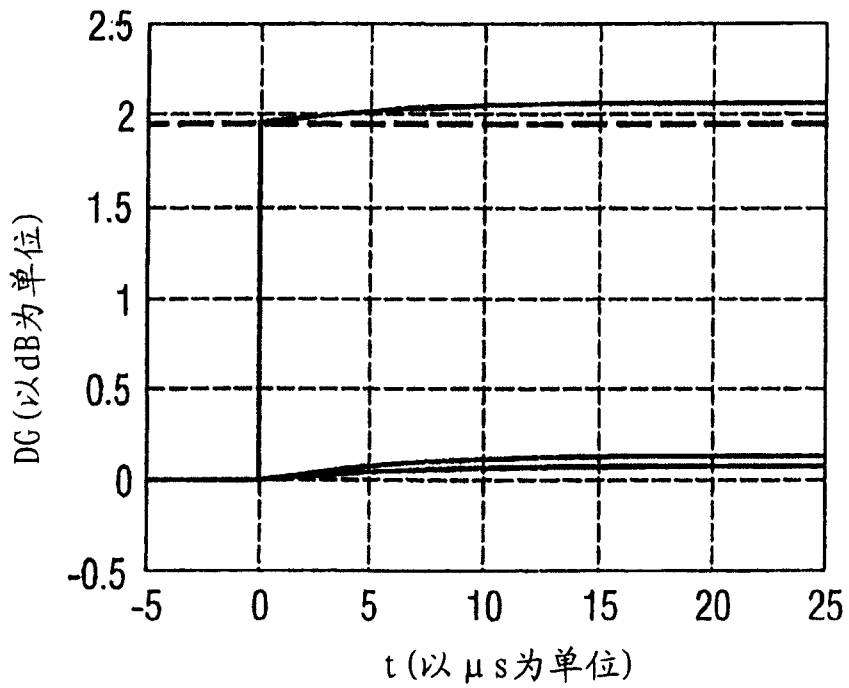


图 6

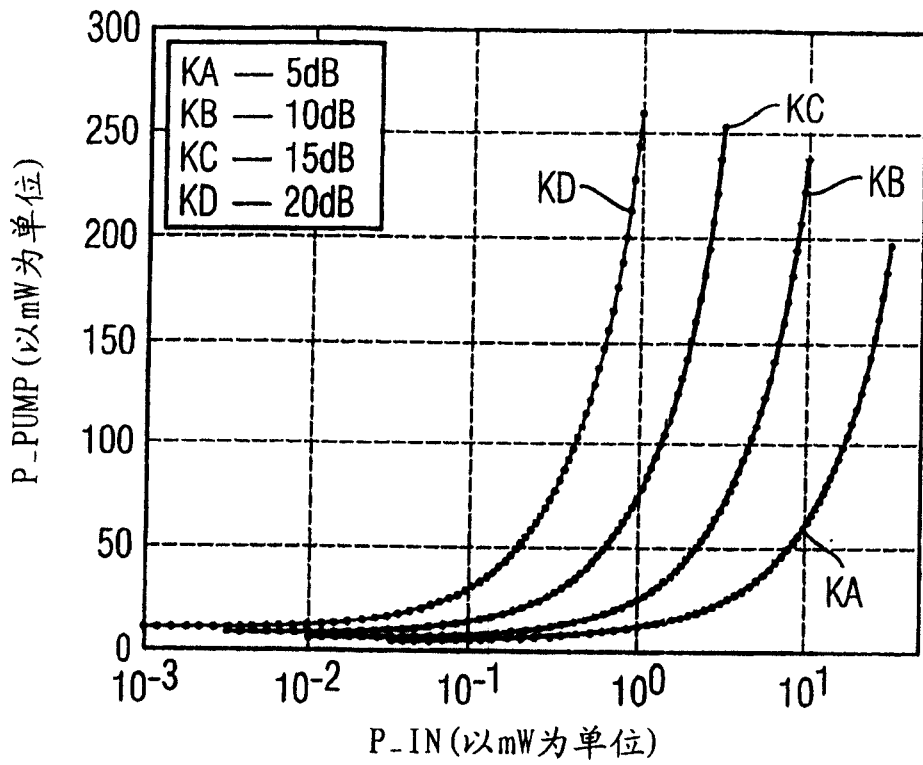


图 7

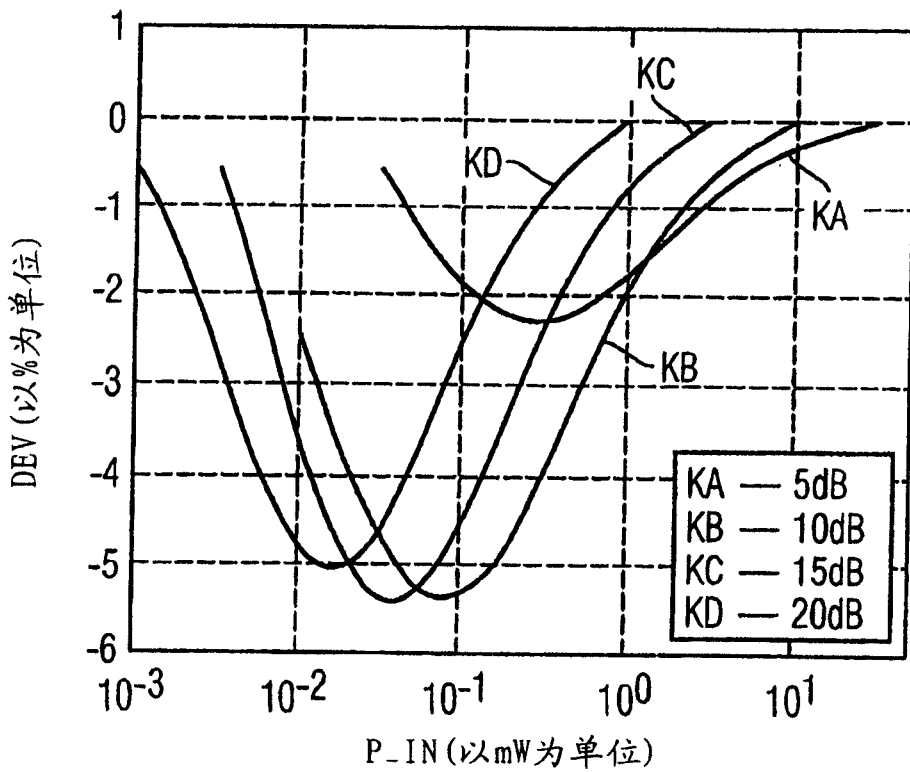


图 8

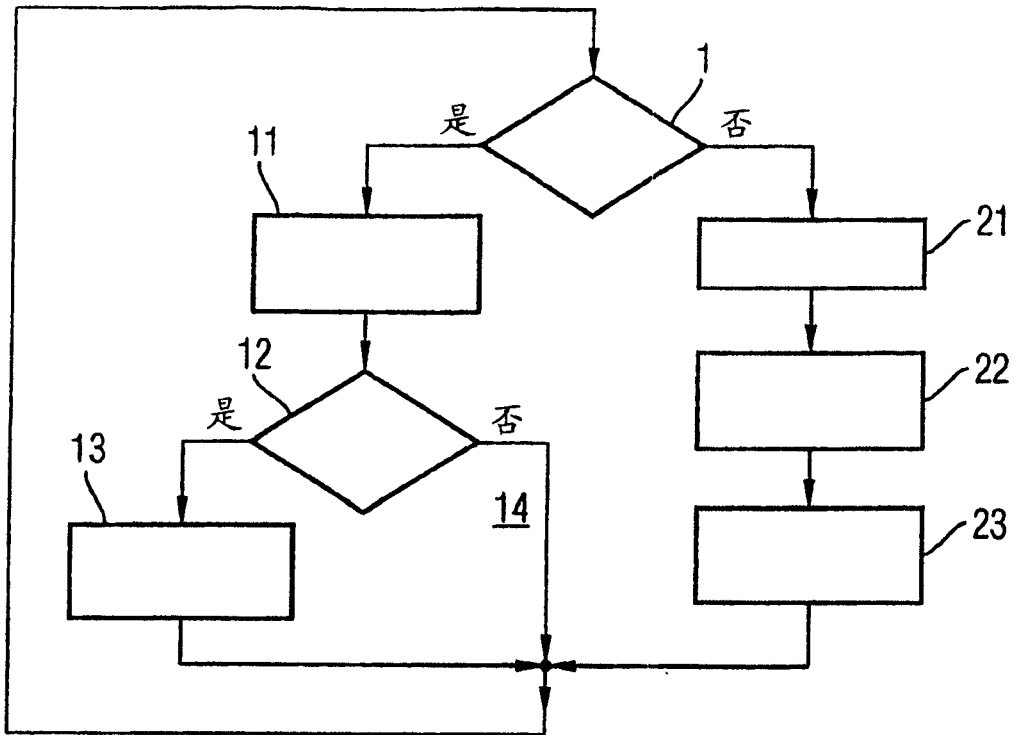


图 9

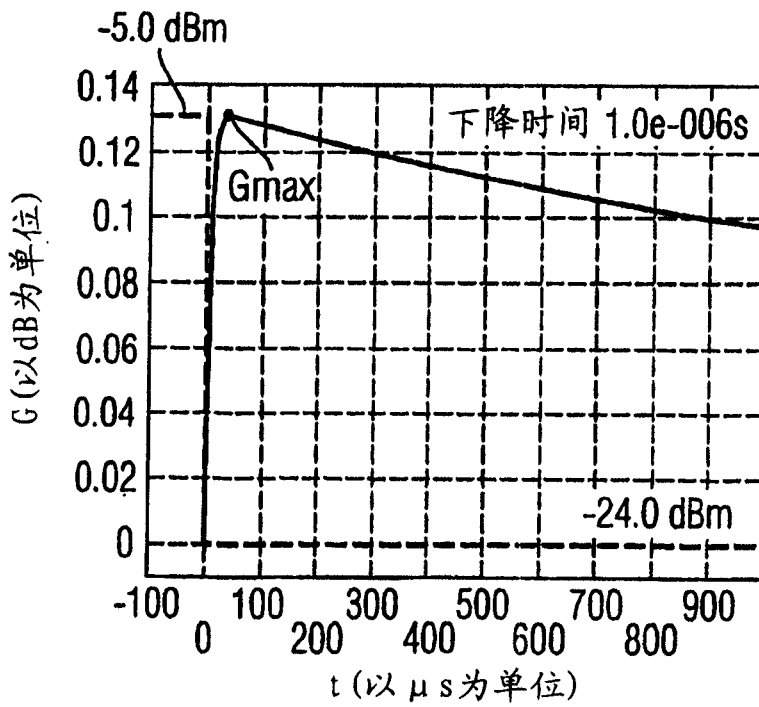


图 10A

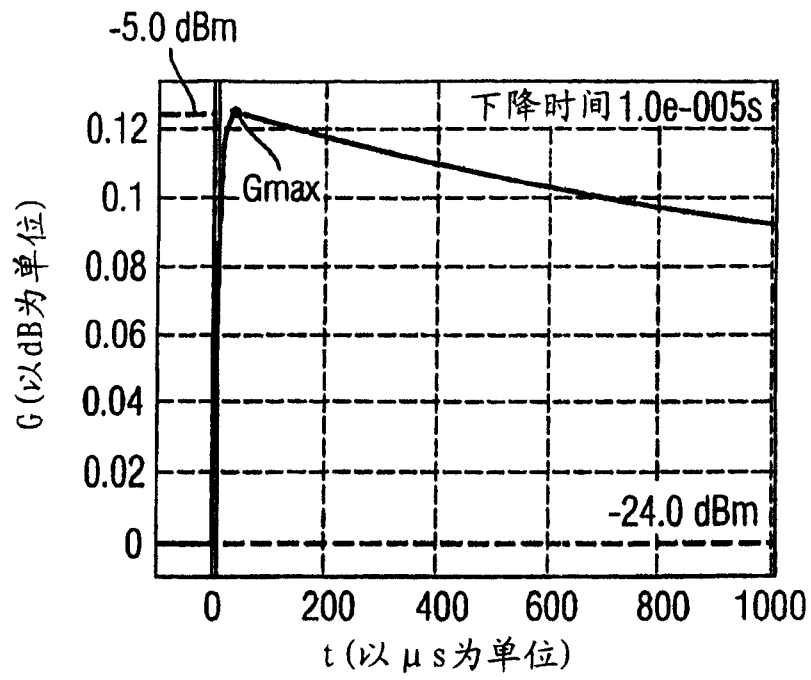


图 10B

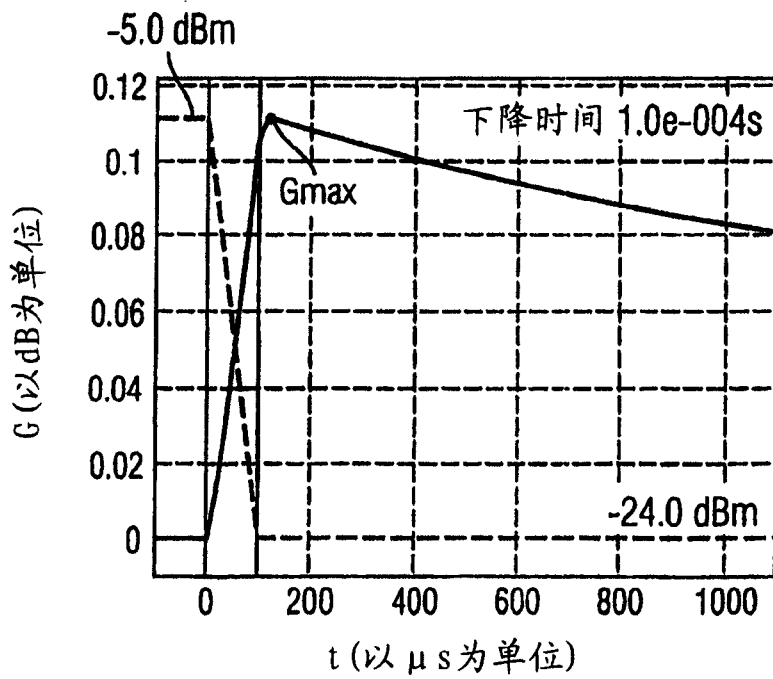


图 10C

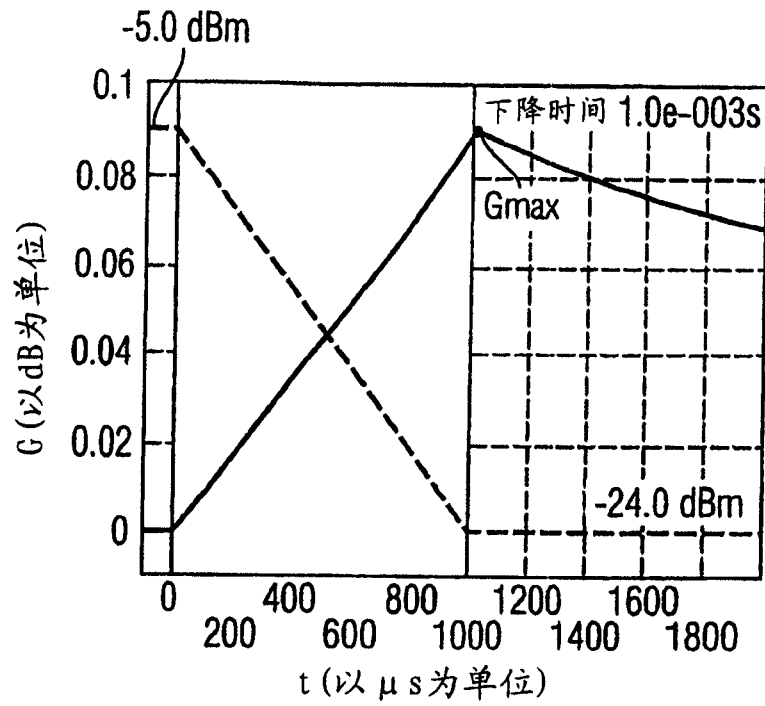


图 10D

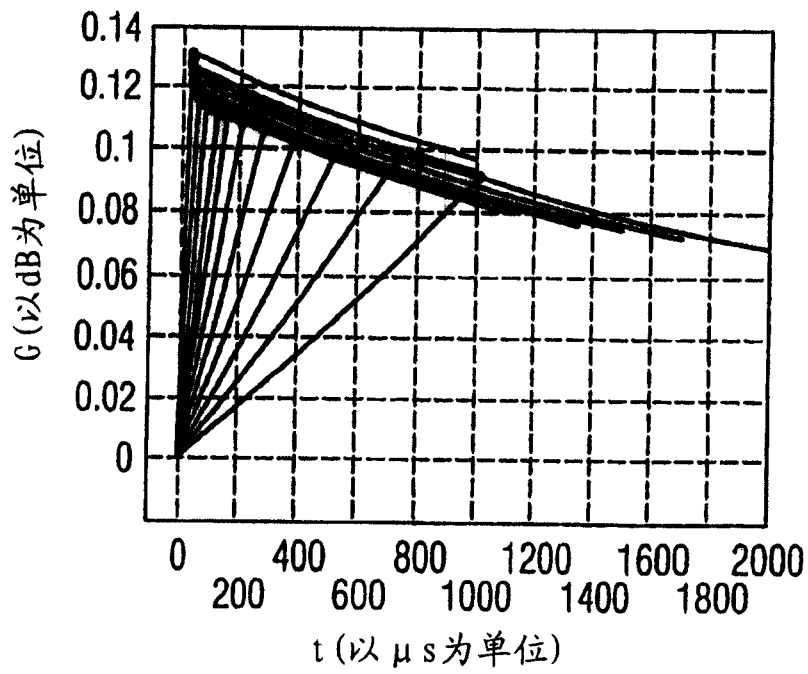


图 10E

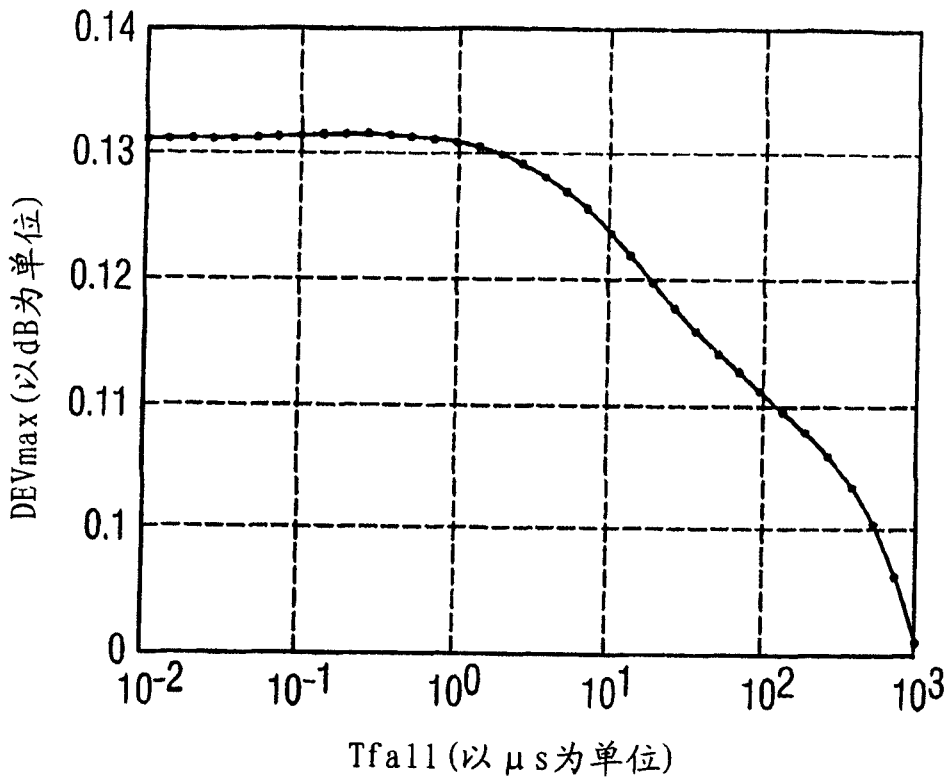


图 11

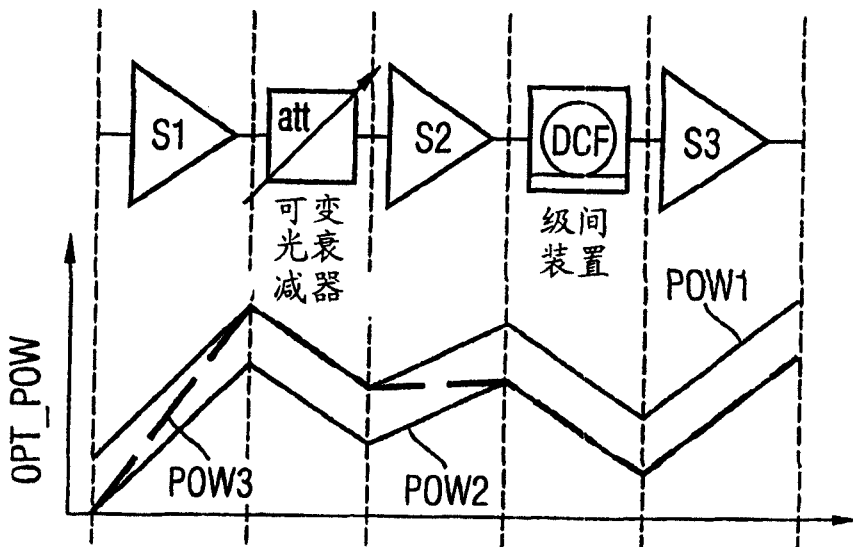


图 12