



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200680006361.0

[45] 授权公告日 2009 年 7 月 29 日

[11] 授权公告号 CN 100520464C

[22] 申请日 2006.2.27

US7082234B2 2006.7.25

[21] 申请号 200680006361.0

审查员 丁 沙

[30] 优先权

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

[32] 2005.2.28 [33] US [31] 60/657,125

代理人 程天正 王小衡

[86] 国际申请 PCT/US2006/007528 2006.2.27

[87] 国际公布 WO2006/094164 英 2006.9.8

[85] 进入国家阶段日期 2007.8.28

[73] 专利权人 泰科电讯(美国)有限公司

地址 美国新泽西州

[72] 发明人 蔡金星 D·福尔萨

C·R·戴维森

A·N·皮利佩特斯基 M·尼索夫

N·S·伯加诺

[56] 参考文献

US6324317B1 2001.11.27

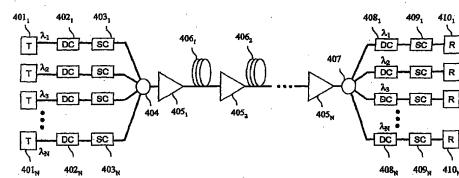
权利要求书 4 页 说明书 11 页 附图 6 页

[54] 发明名称

包括色散斜率补偿的光传输系统

[57] 摘要

WDM 光传输系统和方法使用在发送端和/或接收端处的斜率补偿。该系统和方法可以与具有短脉冲宽度和宽频谱的调制格式一起使用。



1. 一种波长分割复用的光通信系统，包括：

发射机，被配置成提供多个光信号，每个所述光信号具有被调制在其上的相关的数据和具有小于约 40% 的与所述数据相关的比特时间的脉冲宽度，所述发射机包括：

光信号源，被配置来生成至少一个所述光信号；

数据调制器，被耦合到所述光信号源和被配置成把所述数据以数据调制频率调制在所述至少一个所述光信号上；以及

幅度调制器，被耦合到所述光信号源和被配置成对所述至少一个所述光信号提供在幅度调制频率下的周期性强度调制；

接收机；

光纤传输路径，用于把所述发射机耦合到所述接收机，所述传输路径确定在从所述发射机发送到所述接收机的波长的范围内的端到端色散斜率；以及

至少一个色散斜率补偿器，被配置来补偿至少一部分所述端到端色散斜率，所述至少一个色散斜率补偿器被放置在所述发射机或所述接收机处。

2. 按照权利要求 1 的系统，其中至少一个所述光信号具有小于约 31% 的与所述数据相关的所述比特时间的脉冲宽度。

3. 按照权利要求 1 的系统，其中所述数据调制器被配置成通过使用 DPSK 调制格式把所述数据调制在所述至少一个所述光信号上。

4. 按照权利要求 1 的系统，所述系统还包括：幅度调节器，用于有选择地调节所述至少一个所述光信号的所述周期性强度调制深度。

5. 按照权利要求 1 的系统，其中所述幅度调制器被配置成提供约等于 100% 的强度调制深度的所述周期性调制。

6. 按照权利要求 1 的系统，其中所述幅度调制频率等于所述数据调制频率。

7. 按照权利要求 1 的系统，其中所述幅度调制频率由耦合到所述幅度调制器的时钟所确定。

8. 按照权利要求 1 的系统，其中幅度调制器被配置成以规定的相位对所述至少一个所述光信号提供所述周期性强度调制。

9. 按照权利要求 1 的系统，其中至少一个色散补偿器被放置在所

述接收机中。

10. 按照权利要求 1 的系统，所述系统包括被放置在所述接收机中的多个色散补偿器，每个所述色散补偿器被耦合来用于接收波长的至少一个相关频带，用于补偿在波长的所述相关频带上确定的所述端到端色散斜率。

11. 按照权利要求 1 的系统，所述系统包括被放置在所述发射机中的至少一个发射机色散补偿器，和被放置在所述接收机中的至少一个接收机色散补偿器。

12. 按照权利要求 1 的系统，所述系统包括至少一个色散补偿器，被配置成补偿通过传输线而施加到至少一个所述光信号上的至少一部分色散的幅度。

13. 按照权利要求 1 的系统，其中所述至少一个色散斜率补偿器包括一个光环形器，其包括第一、第二、和第三端口，所述第一端口被配置成用于接收至少一个所述光信号，所述第二端口被耦合到光纤光栅和被配置成用于接收从所述光纤光栅反射的所述至少一个所述光信号的至少一部分，以及所述第三端口被配置成用于提供所述至少一个所述光信号的一部分以作为所述色散斜率补偿器的输出。

14. 按照权利要求 13 的系统，所述系统还包括色散补偿光纤，其被耦合到所述第一端口和被配置成补偿通过传输线被施加到所述至少一个所述光信号上的至少一部分色散的幅度。

15. 一种波长分割复用的光通信系统，包括：

发射机，被配置成提供多个光信号，每个所述光信号具有通过使用 DPSK 调制格式而被调制在其上的相关的数据和在其上具有以约等于 100% 的强度调制深度的周期性强度调制的光信号，以建立小于与数据相关的比特时间的约 31% 的脉冲宽度，所述发射机包括：

光信号源，被配置来生成至少一个所述光信号；

数据调制器，被耦合到所述光信号源和被配置成把所述数据以数据调制频率调制到所述至少一个所述光信号上；以及

幅度调制器，被耦合到所述光信号源和被配置成在所述至少一个所述光信号上提供所述周期性强度调制，

接收机；

光纤传输路径，用于把所述发射机耦合到所述接收机，所述传输路

径确定从所述发射机发送到所述接收机的波长的范围上的端到端色散斜率；以及

至少一个色散斜率补偿器，被配置来补偿所述至少一部分所述端到端色散斜率，所述至少一个色散斜率补偿器被放置在所述发射机或所述接收机处。

16、一种在包括用于通过光纤传输路径把多个光信号发送到接收机的发射机的系统中传送波长分割复用的光信号的方法，所述光纤传输路径确定在从所述光信号上的端到端色散斜率，所述方法包括：

在所述发射机或所述接收机处补偿至少一部分所述端到端色散斜率；以及

把数据调制在所述光信号上，该光信号的脉冲宽度小于当不存在所述补偿步骤时使 Q 值达到最大所需要的脉冲宽度。

17. 按照权利要求 16 的方法，其中小于在不存在所述补偿步骤时使 Q 值达到最大所需要的脉冲宽度的所述脉冲宽度小于与所述数据相关的比特时间的约 31%。

18. 按照权利要求 16 的方法，其中所述调制包括使用 DPSK 调制格式把所述数据调制在所述光信号上。

19. 按照权利要求 16 的方法，其中所述调制包括在所述光信号上施加周期性幅度调制。

20. 按照权利要求 18 的方法，所述方法还包括以大于当不存在所述补偿步骤时使 Q 值达到最大所需要的那样的功率电平发送所述光信号。

21. 一种改进现有的波长分割复用的通信系统性能的方法，该系统包括发射机，该发射机用于通过光纤传输路径发送具有以现有的脉冲宽度调制在其上的数据的多个光信号到接收机，所述光纤传输路径确定在从所述光信号上的端到端色散斜率，所述方法包括：

在所述发射机或所述接收机处，补偿至少一部分所述端到端色散斜率；以及

把所述现有脉冲宽度减小到小于当不存在所述补偿步骤时使 Q 值达到最大所需要的新的脉冲宽度。

22. 按照权利要求 21 的方法，其中所述新的脉冲宽度小于与所述数据相关的比特时间的约 31%。

23. 一种改进现有的波长分割复用的通信系统性能的方法，该系统包括发射机，该发射机用于通过光纤传输路径发送具有以现有的脉冲宽度调制在其上的数据的多个光信号到接收机，所述光纤传输路径确定在从所述光信号上的端到端色散斜率，所述方法包括：

在所述发射机或所述接收机处，补偿至少一部分所述端到端色散斜率；

减小所述现有的脉冲宽度；以及

把对于所述数据的调制格式改变到 DPSK 调制格式。

24. 一种改进现有的波长分割复用的通信系统性能的方法，该系统包括发射机，该发射机用于通过光纤传输路径发送具有以现有的脉冲宽度调制在其上的数据的多个光信号到接收机，所述光纤传输路径确定在从所述光信号上的端到端色散斜率，所述方法包括：

在所述发射机或所述接收机处，补偿至少一部分所述端到端色散斜率；

减小所述现有的脉冲宽度；以及

对所述光信号施加周期性幅度调制。

25. 按照权利要求 21 的方法，所述方法还包括增加与每个所述光信号相关的功率电平。

包括色散斜率补偿的光传输系统

相关专利申请的相互参考

本专利申请要求 2006 年 2 月 28 日提交的美国临时专利申请序列号 No.60/657,125 的提交日期的权益，该专利申请的教导整体地在此引用以供参考。

领域

本发明涉及信息的光传输，更具体地，本发明涉及包括色散斜率补偿的光传输系统。

背景

诸如铒掺杂光纤放大器（EDFA）那样的高性能光学放大器的可利用性促进用于光传输系统的波长分割复用（WDM）技术的不断的进展。在 WDM 传输系统中，两个或多个数据载送信道被合并到一个公共的路径上以便传输到远端接收机。在长跨距的光纤系统中，波长信道组可以在基于光放大器的转发器中同时被放大。EDFA 在这种应用于中是特别有用的，因为它具有放大多个波长信道的能力而不具有或很少具有作为代价的串扰。

通常，在长跨距的传输系统中每个信道运行在高数据速率下是有利的。长跨距系统可以例如在同步数字分级结构（SDH）标准下以高达 40Gb/s 或更高的速率运行。当比特速率上升到每秒千兆比特范围时，需要把发射到传输光纤的光功率增加到每个信道 1mW 或更高。正如由 Cai 等说明的（“RZ-DPSK field trial over 13 100km of installed non-slope-matched submarine fibers(在 13 个 100 公里的安装的非斜率匹配的水下光纤的 RZ-DPSK 野外试验)”，Journal of Lightwave Technology in Vol.23, No.1, January 2005 pp.95-103），归零（RS）调制格式的变例对于在光放大光纤路径上传送大量数据是特别有用的。

然而，对于以更高的数据速率的长距离的运行（例如，40Gb/s RZ-DPSK 信道），需要控制色散和色散斜率，以确保低色散的代价。在需要控制色散的场合，色散偏移的光纤是优选的传输媒体。长距离传输、

低色散和高信道功率的组合，会通过传输光纤的轻微的非线性而导致信道的串扰或混合。在越洋距离上许多 WDM 信道的传输受到在信道之间的非线性相互作用限制，它进而受到色散量影响。这个主题已由 Tkach 等人作了评述（Journal of Lightwave Technology in Vol.13, No.5, May 1995 pp.841-849）。

对于在信道之间的非线性交互作用的问题的一个解决方案被称为“色散映射”，其中混合产物的生成通过把传输光纤中的零色散波长从发射机的工作波长偏移开而得到减小。在这种建立的技术中，几个放大器部分可以具有带有正或负色散的经色散偏移的光纤跨距。色散在许多放大器跨距上，例如在 500 到 1000 公里的距离上积累，并且在积累的色散后面跟随着具有相反色散的光纤，以便使得平均色散（在光缆的长度上取均值）回到零。这种方案的一个问题是，传统的色散映射仅补偿在有限的带宽（或 WDM 信道的子组）上传输光纤的色散，而对于大多数 WDM 信道会使色散积累到大的数值。为了缓解这个问题，可以当信道在发射机处被复用之前或在信道在接收机处去复用之后，在终端（例如发射机和/或接收机）处施加使用色散补偿光纤的附加的色散补偿。然而，这个色散补偿方法一般不能补偿在数据信道的光学带宽内色散斜率的积累。

使用这些传统的色散控制方案，40Gb/s 信道的长跨距传输受到色散斜率的损害。高速光学数据信道为了良好的信号噪声比（SNR）而需要高信道功率。正如熟知的，受到光纤非线性损害的长距离光传输系统可以在窄脉冲传输格式（诸如 RZ,CRZ, 和 RZ-DPSK）下良好地工作。不幸地，窄的光脉冲具有宽的光谱。色散斜率在具有宽频谱的脉冲的信号的带宽上会使色散改变，这引起信号失真，并限制这样的系统提高每个信道的比特速率的能力。

一种改进 40Gb/s 运行的方法是使用被称为“色散平整”的光纤的传输光纤。不幸地，绝大多数被设计成以较低比特速率运行的现有系统使用的是具有高积累的色散斜率的传统的光纤。因此，需要能改进例如与传统的色散映射一起使用的高速信号的性能的系统和方法。

附图简述

当参照附图进行以下的详细说明时，将明白要求得到专利权保护的

主题的实施例的特性和优点，其中相同的标号表示相同的部件，图上：

图 1 显示能结合本发明使用的示例性光学传输路径的分段的简化框图；

图 1a 显示与图 1 所示的光学传输路径分段有关的积累的色散图；

图 2 显示在光传输系统的整个长度上色散与波长的关系图；

图 3 显示图 1 所示的系统的群延时与波长的关系图，以及发送的信号的光谱；

图 4 显示 WDM 传输系统的一个示例性实施例的简化框图，该系统与本发明一致并具有位于每个信道路径中的色散斜率补偿器；

图 5 显示可以与按照本发明的色散斜率补偿系统相组合地使用的发射机的一个示例性实施例的简化框图；

图 5a 显示从使用 DPSK 调制格式和不同级别的幅度调制的、按照本发明的示例性发射机输出的示例性波形；

图 6 显示对于 6250 公里的传输路径的传输性能与脉冲宽度的关系图；

图 7 显示对于 6250 公里的传输路径的传输性能与平均信道功率的关系图；以及

图 8 显示可以补偿色散和色散斜率的设备的一个实施例的简化框图。

详细说明

为了简化和易于说明，这里描述各种示例性实施例。然而，应当看到，这里描述的实施例作为说明给出，而不作为限制。

图 1 显示包括与色散光纤部分 111、112 级联的光放大器 110_N 的光学传输路径的 500 公里分段的例子，这样，端到端积累的色散是相对较小的，但保持着大的局部色散。对于高性能长跨距系统，希望具有大的局部色散（例如，为了减小非线性混合）和低的端到端色散（例如，为了高的信号保真度）。这两个特性可以通过使用“色散控制的”放大器光缆（也被称为“色散映射”）而被满足。色散映射的一个例子是非零色散偏移光纤（NZ-DSF）色散映射。在色散控制的光缆中，可以使用具有相反正负号的色散的两种不同类型的光纤。在本例中，负色散的光纤 111_N 具有 -2ps/km-nm 的平均色散以及正色散的光纤 112 具有 +17ps/km-

nm 的平均色散。两种光纤类型的长度可按正比于色散值的比值而选择。

对于三个示例性信道的积累的色散在图 1a 上以曲线 101, 102 和 103 被显示。对于这种安排, 色散首先积累负的色散, 然后是正的色散, 而最后在色散周期的末端回到零。在某些类型的光纤中, 对于曲线 101 的回到零的特性(对于积累的色散)仅对位于平均零色散波长的信道才是成立的。曲线 102 显示较高的波长信道可能积累净正色散(由 104 表示), 以及曲线 103 显示较低的波长信道可能积累净负色散(由 105 表示)。

这个被称为色散斜率的特性, 被显示于图 2 的各种光纤类型的色散与波长的关系的图中。曲线 201 显示负色散光纤 111N 的色散与波长的关系, 曲线 202 显示正色散光纤 112 的色散与波长的关系, 以及曲线 203 显示整个跨距的色散与波长特性的关系。即使在曲线 203 的积累色散是零的点(在图上表示为 λ_0), 仍旧有大的色散斜率, 这是由于两种光纤类型都具有正的色散斜率的结果。色散的这种线性变化可以由公式(1)近似表示:

$$D = SL(\lambda_{sig} - \lambda_0) \quad (1)$$

其中 λ_{sig} 是信号波长(图 2 上独立的变量), λ_0 是光纤零色散波长, S 是光纤的色散斜率, 典型地以 ps/km-nm² 单位计, 以及 L 是光纤的长度。在给定光纤色散的这个线性近似式后, 作为波长的函数的群延时的变化($\Delta\tau$)可以由公式(2)近似表示, 它给出熟知的抛物线形状:

$$\Delta\tau = \frac{SL}{2}(\lambda_{sig} - \lambda_0)^2 \quad (2)$$

在图 3 上, 群延时曲线 301 表示具有类似于图 1 的色散映射的传输光纤的 6250 公里的跨距所计算出的公式(2)。在该公式中用以产生曲线 301 的值是 S=0.075 ps/km-nm², L=6250km, 和 $\lambda_0=1550$ nm。曲线 302 表示载波对边带比为 0dB 的、对于 43Gb/s 的 RZ 光信号的光谱(其中脉冲宽度约为 6.7 psec)。示例性曲线 301, 302 显示在数据信号的光谱上

群延时的变化占了比特周期的一个大的份额。43Gb/s 数据信号的比特时间约为 23.3 psec。因此，具有由曲线 302 所表示的频谱的数据信号将受到很大的损害，如果要通过这个色散斜率量进行传输的话。

图 4 显示按照本发明的一个实施例的示例性 WDM 光传输系统的简化框图。如图所示，光传输系统包括多个发射机 401_1-401_N ，用于生成 WDM 光信号，以便在相关的信道上通过光路径发送到远端接收机。发射机 401_1-401_N 可以是技术上已知的类型，例如包括 RZ, CRZ, 和/或 RZ-DPSK 发射机。发射机 401_1-401_N 的输出可以用光学方式连接到色散补偿单元或色散补偿器 402_1-402_N ，然后连接到色散斜率补偿单元或色散斜率补偿器 403_1-403_N 。这里使用的术语“光连接”或“光耦合”是指任何连接、耦合、链接等等，通过它们，由一个光系统单元载送的光信号入射到“连接”的或“耦合”的单元。这样的“光连接”或“光耦合”装置不一定互相直接连接，而是可以由光学部件或装置分隔开。同样地，这里在物理连接或耦合方面使用的术语“连接到”或“耦合到”是相对性的术语，它不一定是直接物理连接。

多个 WDM 信道可以通过耦合器 404 被复用到公共的光纤。耦合器 404 例如可以是简单的 $N \times N$ 定向耦合器或波长路由器装置。多个 WDM 信道然后通过包括光放大器 405_1-405_N 和光纤部分 406_1-406_N 的光路径被发送。在示例性实施例中，光路径可以类似于图 1 所示的设计。替换地，放大器级可以是基于 Raman (拉曼) 放大和/或 EFDA 与 Raman 放大器的组合。在本示例性传输系统中使用的光纤跨距可以是非斜率匹配的，如图 1 所示；或者可包括色散平整的光纤跨距，或两种类型的组合。

在接收机端，光传输系统可包括耦合器 407，用于把 WDM 多路去复用到分开的路径。光传输系统的接收机端还可包括多个色散补偿器 408_1-408_N 、色散斜率补偿器 409_1-409_N 和接收机 410_1-410_N 。接收机 410_1-410_N 可以是诸如本领域技术人员已知的那种类型的平衡接收机。色散补偿器 408_1-408_N 和色散斜率补偿器 409_1-409_N 可以通过使用本领域技术人员已知的技术被实施，正如下面更详细地描述的。

图 4 所示的光传输系统的说明的示例性实施例包括位于发射机端和接收机端的色散补偿器 402 和 408 与色散斜率补偿器 403 和 409 的组合。本领域技术人员将会看到，把一种类型（或两种类型）的这种补偿器只放置在系统的一端可能更经济。例如，传输系统的另一个实施例可

包括在发射端的色散补偿器 402_1 - 402_N 、在接收端的色散补偿器 408_1 - 408_N 、和仅在接收端的色散斜率补偿器 409_1 - 409_N 。本领域技术人员将会看到，色散补偿器和色散斜率补偿器的次序是可互换的。

在系统工作时，在色散补偿器 402_1 - 402_N 和 408_1 - 408_N 中的色散补偿量可被做成基本上补偿系统中任何积累的色散。例如在图 1 上，高波长信道在约 500 公里后积累由 104 表示的色散量。因此，在传送通过约 6000 公里后（或 12×500 公里），高波长信道将积累要被色散补偿器大量补偿的大量色散。

在色散斜率补偿器 403_1 - 403_N 和 409_1 - 409_N 中的色散斜率补偿量可被做成基本上补偿系统中任何积累的色散斜率。在图 3 上的群延时曲线 301 例如显示相当于约 480 ps/nm^2 的积累的色散斜率的群延时如何随波长改变。斜率补偿器 403_1 - 403_N 和 409_1 - 409_N 的组合可被做成具有在幅度上基本上等于群延时曲线 301、但符号相反的群延时曲线。

说明的示例性实施例包括作为两个分开的装置的色散补偿器和色散斜率补偿器。正如本领域技术人员将会看到的，色散补偿和斜率补偿函数可以组合成一个共同的装置，如下面描述的，和例如在图 8 上显示的。在一个实施例中，二次型线性调频光纤光栅可被设计成提供正确的数量的色散补偿和色散斜率补偿。

说明的示例性实施例包括用于每个 WDM 光信道的分开的光路径。正如本领域技术人员将会看到的，可把信道分组为各个子频带，它们可以在公共的装置中被补偿。另外，公共色散补偿装置的数目不一定等于色散斜率补偿装置的数目。根据图 2 的曲线这是明显的，在图上可以看到，如曲线 203 所示的积累的色散量在感兴趣的波长范围上是明显不同的。然而，色散斜率的数量（即，曲线 203 的斜率）对所有的信道几乎是相同的。因此，某些信道可以使用斜率补偿器，但不用色散补偿器。

按照传输系统的另一个实施例，色散斜率补偿器也可以例如通过使得色散斜率补偿器的中心波长是可调谐的而起到色散补偿器的一个细调谐单元的作用。通过把色散斜率补偿器的中心波长调谐到偏离信号的中心波长，就可以得到连续的色散调节，这可用来使得 WDM 信道的性能最佳化。通过调节或调谐中心波长，可调节一阶色散而同时保持二阶色散不变。色散斜率补偿器的色散也可以如上所述以细微的剩余色散的形式加以调谐，以便匹配于链路剩余色散。40Gb/s 信号对于剩余色散非

常敏感，由于温度变化，链路色散会随时变化。

图 5 显示可以在图 4 所示的传输系统中使用的发射机的一个实施例的简化框图。在说明的示例性实施例中，激光器 500 产生在连接到数据调制器 502 的路径 501 上的连续光信号。数据调制器 502 可以调制光信号，以便以熟知的方式把信息加到其上。用于施加各种调制格式的各种各样的数据调制器结构是本领域技术人员熟知的。例如，数据调制器 502 可被配置成通过使用诸如 NRZ、RZ、移相键控 (PSK)、差分移相键控 (DPSK) 等等的熟知的格式调制光信号，然而，该方法不限于特定的调制格式，也可以使用其它格式（例如，OOK, DBPSK, DQPSK 等等）。把色散斜率补偿器包括在光传输系统内，可以给出更大的灵活性，使得在多个发射机中使用的传输格式最佳化。

在数据调制器 502 被配置成调制光信号以通过使用 DPSK 格式把信息加于其上的实施例中，数据调制器 502 可以接收要从数据源 504 加到光信号 501 的数据，并以由时钟 506 确定的频率去调制光信号，以便以熟知的方式形成 DPSK 调制信号 503。DPSK 调制的光信息信号 503 可以从数据调制器 502 发送到幅度调制器 507，后者把一个同步的强度调制加到光信息信号 503 上。

由幅度调制器 507 施加的强度调制可以是周期性的。为了施加周期性幅度调制，调制器 507 可以被诸如正弦或方波信号那样的周期性信号驱动。在一个实施例中，幅度调制器 507 可被配置成施加幅度调制而不施加相位调制到信号上。幅度调制器 507 因此可以重新调制 DPSK 调制的信号 503，其速率等于数据被加到光信号 501 的速率，如由生成正弦信号的时钟源 506 所规定的。由幅度调制器对 DPSK 调制的光信号施加的强度调制的一个例子在美国专利 No.6,556,326 和待决的美国专利申请序列号 No.10/780,830 中更详细地描述，这些专利全部在此引用以供参考。

在这样的实施例中的 DPSK 数据调制器 502 可包括 Mach-Zehnder 型光调制器，它例如是如在 T.Chikama 等的“Modulation and Demodulation Techniques in Optical Heterodyne PSK Transmission Systems (在光学超外差 PSK 传输系统中的调制与解调技术)”，Journal of Lightwave Technology, Vol.8, No.3, March 1990 pp.309-322 中描述的。在这样的配置中，来自数据调制器的 DPSK 调制信号 503 的光的相位在不

同的比特之间的过渡点处从 0° 突变到 180° （或从弧度 0 到 π ），因此提供高保真的数字相位调制。

在其中数据调制器 502 是 DPSK 调制器的实施例中，提供电可变延时 509 和幅度调节 510 也可能是有利的。可变延时 509 可用来相对于由数据调制器 502 施加的数据调制的相位，有选择地调节由幅度调制器 507 施加的幅度调制的相位。幅度调节 510 可用来设置由幅度调制器 507 对信号 593 施加的调制的深度。对于这些调节的最佳设置值将取决于系统中的许多参数，并可以由经验确定。在一个实施例中，由可变延时 509 提供的延时可被设置为用由幅度调制器 507 提供的同步幅度调制的峰值幅度点对准线 503 上的数据比特的中心。同样，在 WDM 系统中，每个信道的最佳设置值可以不一定是相同的，因此，各信道可以单独最佳化。

使用在图 4 所示的示例性色散斜率补偿的 WDM 系统中图 5 所示的示例性发射机的组合，有可能通过调节发射机的脉冲宽度而使得传输性能最佳化。图 5a 还显示一系列波形 520-525，其中每个显示的波形是从由幅度调制器 507 施加的不同深度的幅度调制而得出的。从 520 开始和进行到 525 的波形的进行过程显示幅度调制逐渐加深，因此得到更短的脉冲宽度。波形 520 是对于传统的 DPSK 波形的强度分布的一个例子，并且有时被称为表示非归零 DPSK(NRZ-DPSK)。波形 521, 522, 523, 524 和 525 分别显示 20%, 40%, 60%, 80%, 和 100% 的幅度调制深度。这些不同程度的幅度调制例如可以通过幅度调节机制 510 来建立。波形 525 的光强度在邻接的二进制 0 或 π 块期间基本上返回到零，因此有时称为表示归零 DPSK (RZ-DPSK)。

图 6 显示通过使用类似于图 1 的放大器链和类似于图 5 的 43Gb/s RZ-DPSK 发射机在 6250 公里的距离上进行的传输实验的结果。图上显示对于带有色散斜率补偿器（曲线 601）和不带有色散斜率补偿器（曲线 602）的情形下，测量的 Q 值与脉冲宽度（在发射机处设置的）的关系，脉冲宽度是 43Gb/s 脉冲的比特时间的百分数。在说明的示例性实施例中，脉冲宽度在约 25% 和约 40% 的比特时间之间进行调节，该比特时间与按照图 5 说明的发送信号相关。

这些曲线显示：当在接收机端使用斜率补偿器时，对于在约 25% 和约 40% 之间的脉冲宽度的性能改进。另外，这些曲线显示，当使用色散

斜率补偿器时，有可能以更短的脉冲宽度来运行系统。具体地，曲线 601 显示当使用斜率补偿时，对于在约 27-31%之间的脉冲宽度时最大 Q 值约为 13.5dB，而曲线 602 显示当不使用斜率补偿时，对于在约 31-33% 之间的脉冲宽度时最大 Q 值约为 11.5dB。当使用斜率补偿时，Q 值以较大的数值和较短的脉冲宽度得以最大化。在图 6 所示的实施例中，例如，在低于约 31% 的脉冲宽度时，非斜率补偿系统的 Q 值减小，而斜率补偿系统的 Q 值增加。因此，当把现有系统升级时，通过补偿色散斜率和把现有的脉冲宽度减小到例如小于在现有的系统中的最佳脉冲宽度而不斜率补偿，可以提高性能。另外，如图所示，在斜率补偿系统中，在小于约 40% 的脉冲宽度下，与当不使用斜率补偿时具有相同的脉冲宽度相比较，Q 值性能仍有很大的改进。

图 7 显示在与图 6 的相同距离上进行的传输实验的结果。一个实验的传输是在具有色散斜率补偿器和具有 RZ-DPSK 调制格式时进行的，而另一个实验的传输是在不具有色散斜率补偿器和具有 CSRZ-DPSK 调制格式时进行的。图上显示测量的 Q 值与平均光信道功率（以 dBm 计）的关系。曲线 701 是在具有色散斜率补偿（RZ-DPSK）时测量的，而曲线 702 是在不具有色散斜率补偿（CSRZ-DPSK）时测量的。按照实验，具有色散斜率补偿器的性能在每个功率电平都有改进，并且增加色散斜率补偿器能允许 WDM 信道以更高的光功率运行。另外，以具有较高的光功率的窄脉冲宽度运行的能力使信道得到更好的接收信号-噪声比和导致改进的性能。

图 8 显示可用来补偿色散和色散斜率的补偿器的一个实施例的简化框图。在工作时，这个设备可以用作为在图 4 所示的传输系统的接收机部分的色散补偿器 408 和斜率补偿器 409 和/或作为在发射机部分的色散补偿器 402 和斜率补偿器 403。输入光信号在路径 801 上进入补偿器设备和然后传送到色散补偿光纤 802。色散补偿光纤 802 的一个例子是 OFS Rightwave® 色散补偿模块。接着，信号进入光环形器 803 的端口 810。信号从端口 820 上的环形器处发出，然后进入光纤光栅 804，诸如二次型线性调频（chirped）光纤光栅。从光栅 804 反射出的信号进入环形器 803，回到端口 820，并在环形器 803 的端口 830 发出到路径 806 上。在工作时，色散补偿光纤 802 可被设计成补偿在包括放大器 405 和光纤部分 406 的光路径上积累的色散（见图 4）。从光栅 804 反射出的信号的

群延时特性被设计成补偿上述的光路径的色散斜率。

按照图 8 所示的补偿器的另一个替换例，色散补偿光纤 802 可以位于光环形器 803 和光纤光栅 804 之间。通过这样做，色散补偿光纤 802 的所需长度可以缩短一半。按照传输系统的另一个实施例，斜率补偿器也可以用作为信道选择滤波器，类似于本领域技术人员熟知的当前的 3 端口信道丢弃滤波器（drop filter）。

因此提供了一种用于色散控制的系统、设备和方法，它为 WDM 光传输系统产生改进了的传输性能。按照本发明的一个方面，色散斜率补偿单元或斜率补偿器在接收机端和/或在发射机端处用来补偿积累的色散斜率。这允许在较高的光功率电平下使用窄的光脉冲（即，具有宽的光带宽）。

按照本发明的另一方面，WDM 光传输系统包括一个发射机，它被配置成提供多个光信号，每个光信号具有被调制在其上的相关的数据和具有与数据相关的比特时间（例如，小于约 40% 的）的窄脉冲宽度；接收机；用于把发射机耦合到接收机的光纤传输路径，该传输路径确定在从发射机发送到接收机的波长的范围内端到端色散斜率；以及至少一个色散斜率补偿器，它被配置来补偿至少一部分端到端色散斜率，该至少一个色散斜率补偿器被放置在发射机或接收机。色散斜率补偿器可以补偿至少一个信道或各信道块的斜率。斜率补偿器也可以用作为信道选择滤波器。光路径可包括非斜率匹配的光纤和/或色散平整的光纤。

按照本发明的另一方面，补偿设备包括输入路径、色散补偿光纤、光环形器、补偿单元、和输出路径。补偿单元可以是光纤光栅。色散补偿滤波器可以位于输入路径与光环形器之间或在光环形器与补偿单元之间。

按照本发明的另一方面，WDM 光传输系统包括发射机、接收机、把发射机耦合到接收机的光学传输路径，该传输路径确定在从发射机发送到接收机的波长的范围内端到端色散斜率；以及至少一个色散斜率补偿器，它被配置来补偿至少一部分端到端色散斜率，该至少一个色散斜率补偿器位于发射机或接收机。发射机可被配置成提供多个光信号，每个光信号具有通过使用 DPSK 调制格式而被调制在其上的相关的数据和在其上具有以等于约 100% 的强度调制深度的周期性强度调制的光信号，以确定与数据相关的小于约 31% 的比特时间的脉冲宽度。发射机可

包括：光信号源，被配置来生成至少一个光信号；数据调制器，被耦合到光信号源和被配置成把数据以数据调制频率调制在至少一个光信号上；以及幅度调制器，被耦合到光信号源和被配置成提供至少一个光信号的周期性强度调制。使用具有短脉冲宽度或宽的光谱的调制格式以及斜率补偿器，允许缓和非线性和能使每个信道以更高的功率运行，特别是对于初始部署仅仅几个信道的系统。

按照本发明的另一方面，在 WDM 光传输系统中传送光信号的方法包括当发送和/或接收光信号时补偿在一个或多个信道或各信道块中的色散斜率。该方法可包括通过使用具有短脉冲宽度或宽的光谱的调制格式来调制光信号。调制格式可包括 RZ, CSRZ, CRZ 和 RZ-DPSK。短脉冲宽度可以是这样的脉冲宽度，它小于在不存在补偿步骤时达到最大 Q 值所需要的脉冲宽度。该方法还可包括对 DPSK 调制信号进行强度调制以产生被发送的光信号。该方法还包括调节或调谐斜率补偿器的中心波长以补偿传输线中积累的色散改变。

按照本发明的再一方面，一种使 WDM 系统升级以增加每个信道的比特速率的方法包括在发送端和/或接收端添加斜率补偿和减小与在系统上传送的光信号有关的现有的脉冲宽度。短脉冲宽度可以被减小到小于当不存在补偿步骤时达到最大 Q 值所需要的新的脉冲宽度。要被升级的 WDM 系统可包括传统的（非斜率匹配的）光纤。

这里描述了各实施例，但其中利用本发明的某几个实施例在这里作为说明而不是作为限制阐述的。可以在不背离本发明的精神和范围的条件下作出本领域技术人员将容易看到的许多其它实施例。

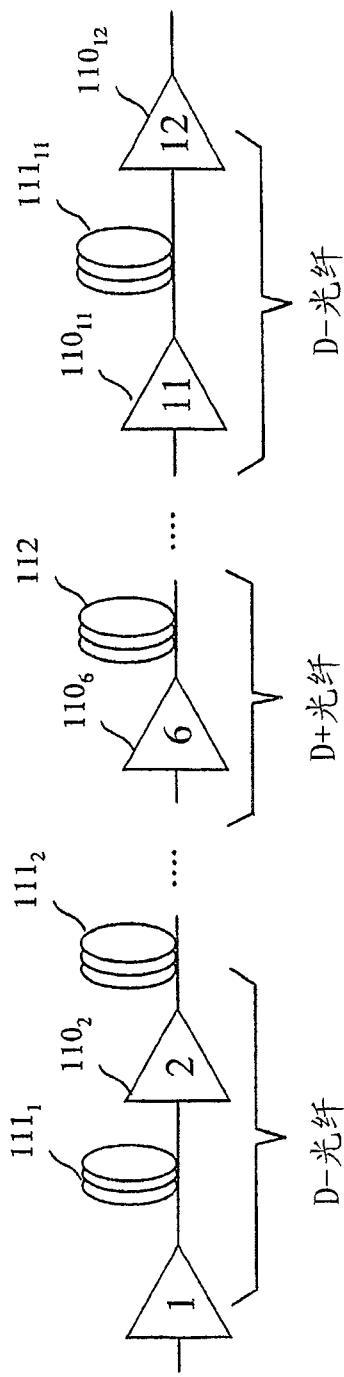


图 1

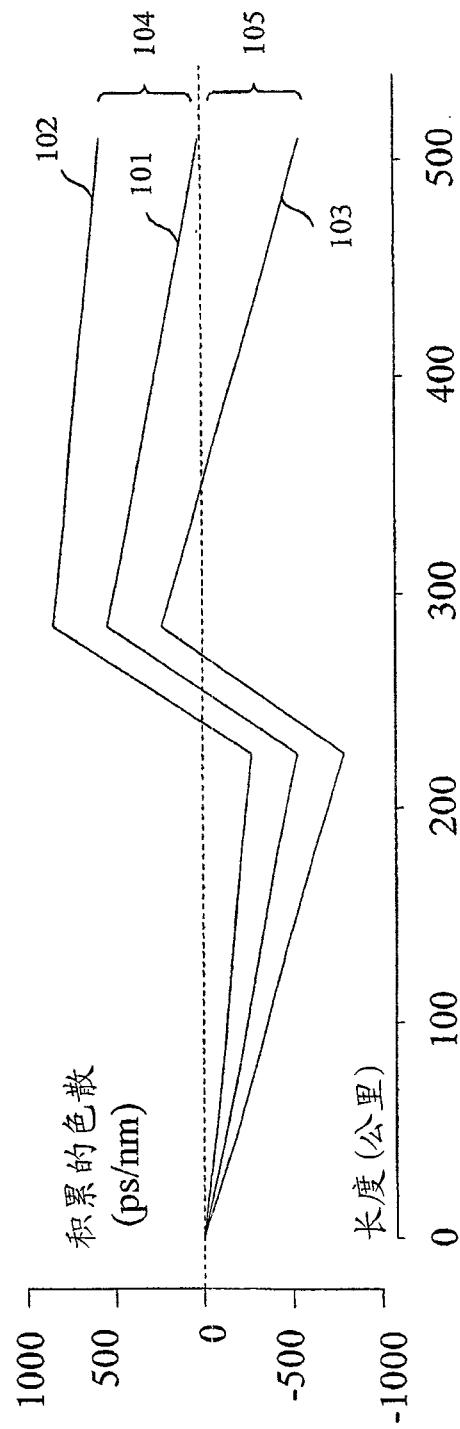


图 1A

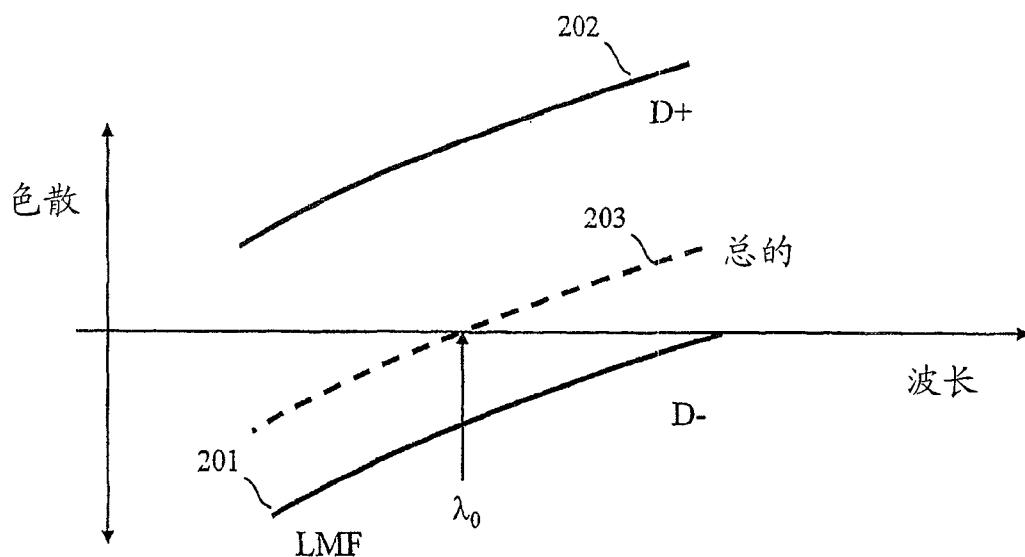


图 2

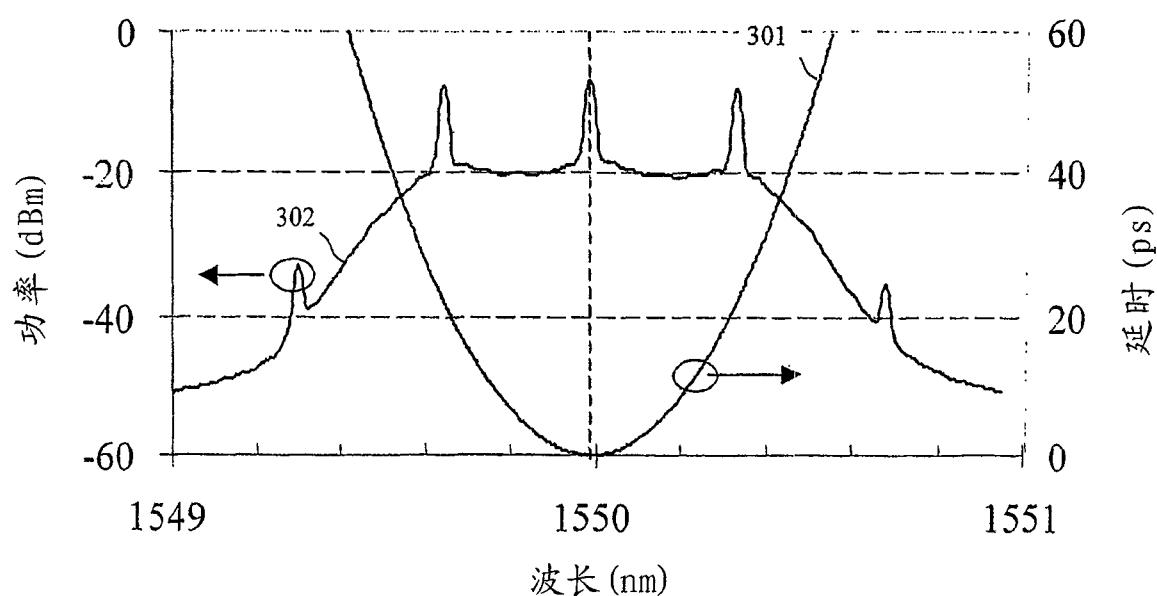


图 3

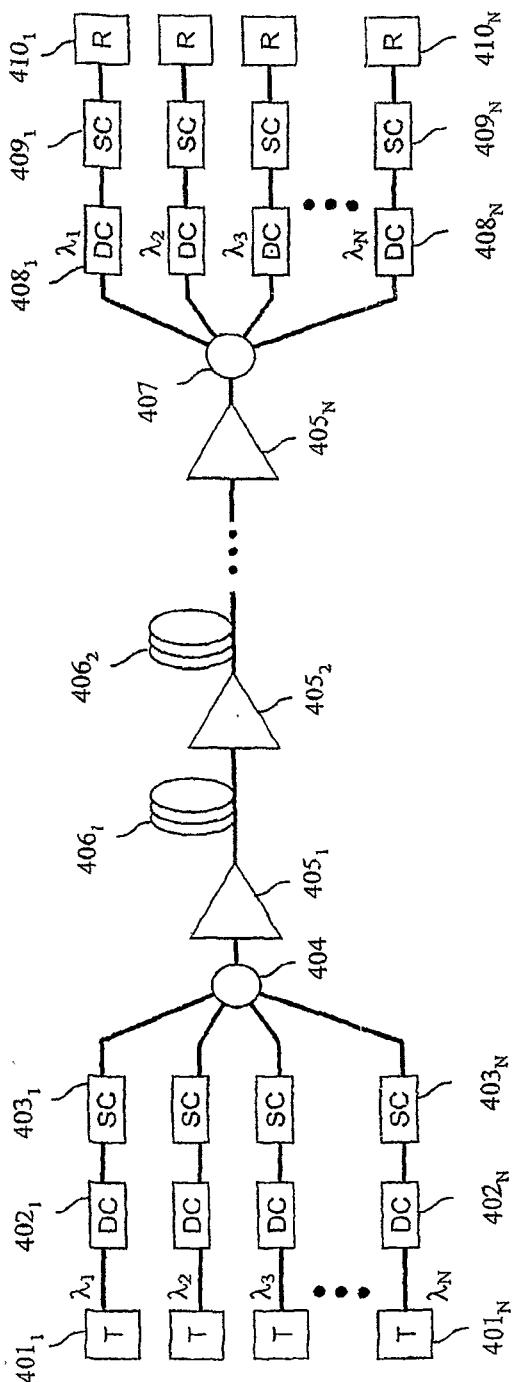


图 4

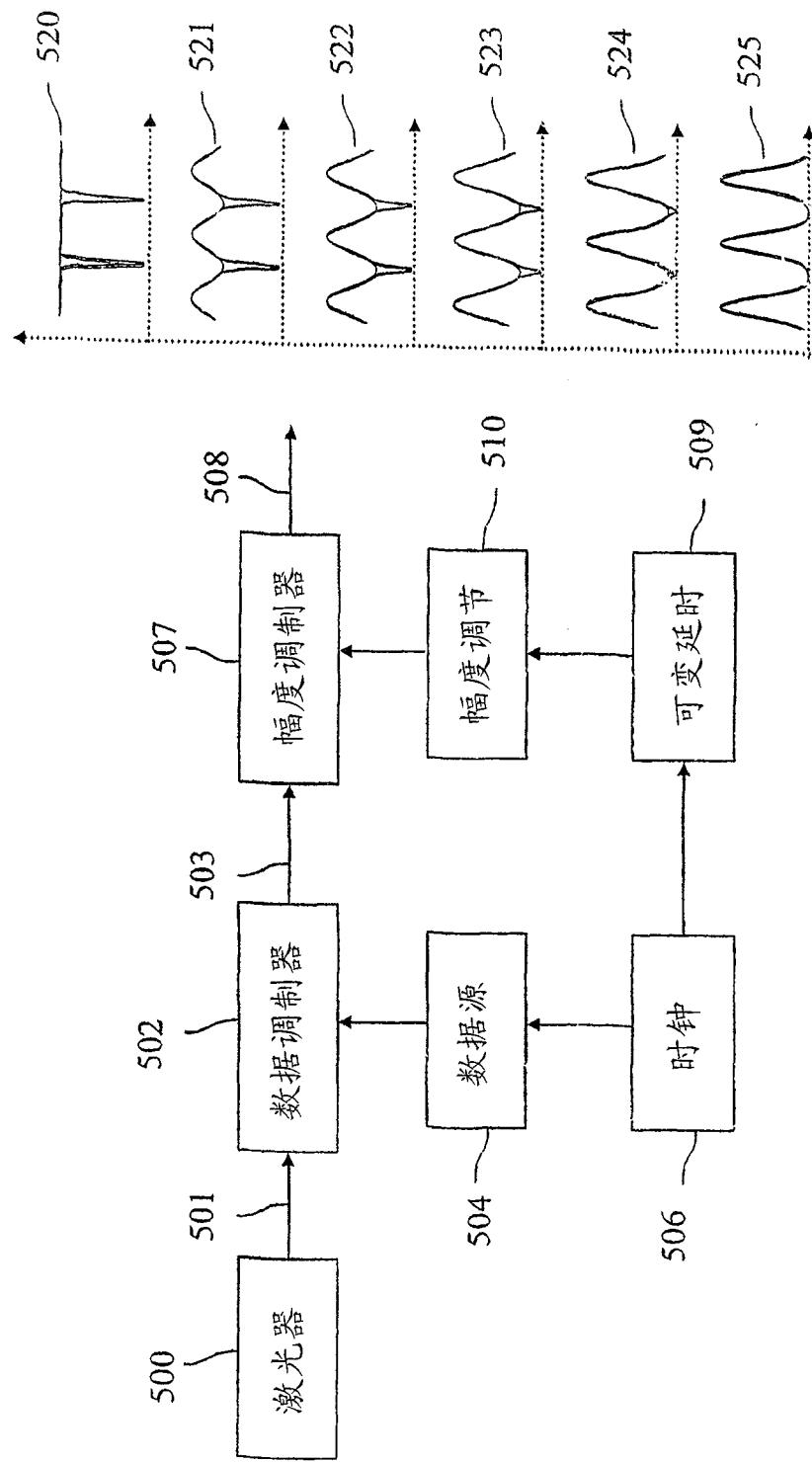


图 5A
图 5

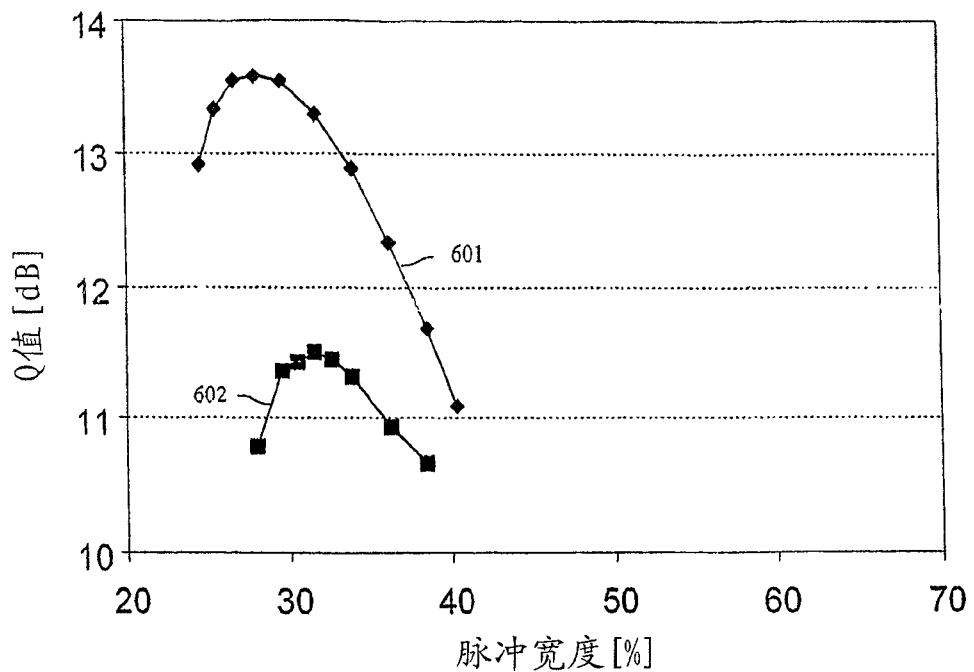


图 6

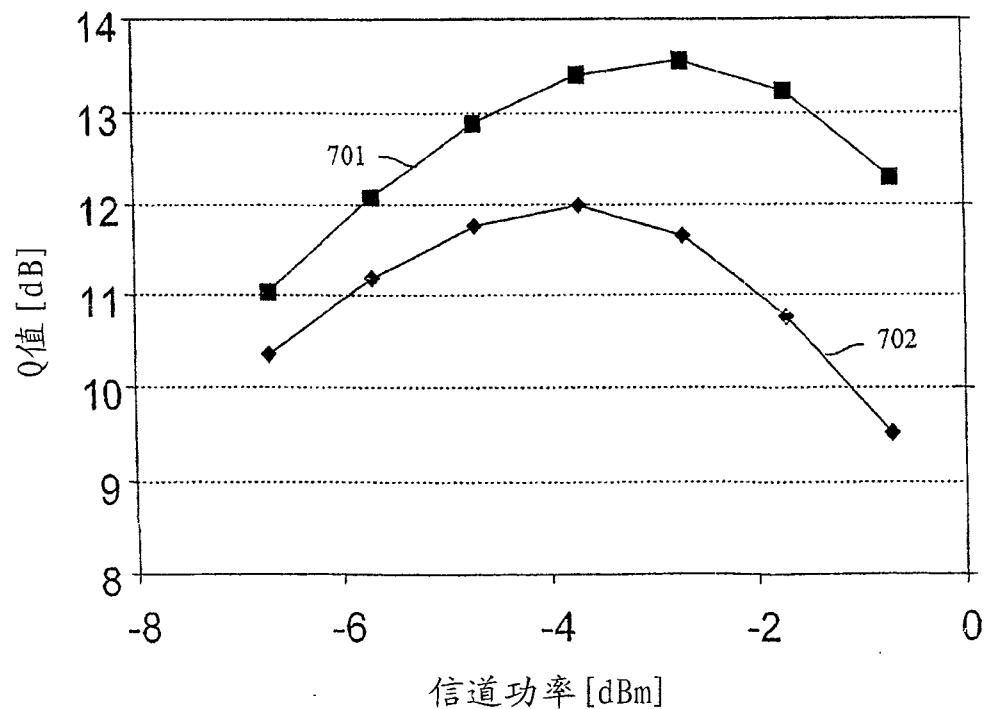


图 7

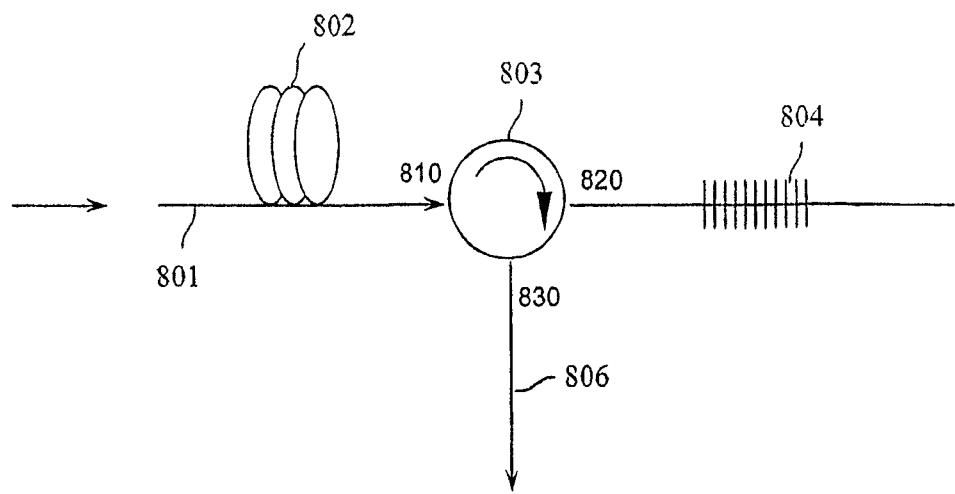


图 8