

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G02F 1/35 (2006.01)

H01S 3/30 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200380103858.0

[45] 授权公告日 2008 年 4 月 9 日

[11] 授权公告号 CN 100380225C

[22] 申请日 2003. 11. 21

[21] 申请号 200380103858.0

[30] 优先权

[32] 2002. 11. 21 [33] US [31] 60/428,001

[32] 2003. 4. 28 [33] US [31] 60/465,990

[86] 国际申请 PCT/JP2003/014925 2003. 11. 21

[87] 国际公布 WO2004/049054 日 2004. 6. 10

[85] 进入国家阶段日期 2005. 5. 23

[73] 专利权人 古河电气工业株式会社

地址 日本东京都

[72] 发明人 五十岚浩司 江森芳博 小栗淳司

并木周 麻生修 忠隈昌辉

[56] 参考文献

EP1237304A2 2002. 9. 4

EP863630A2 1998. 9. 9

EP1130704A2 2001. 9. 5

JP62 - 1332A 1987. 1. 7

10 - GHz 1.3 - ps Pulse Generation Using Chirped Soliton Compression in a Raman Gain Medium. Murphy, T. E. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 14 No. 10. 2002

审查员 李玉林

[74] 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司

代理人 李香兰

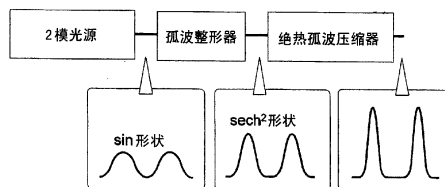
权利要求书 1 页 说明书 51 页 附图 57 页

[54] 发明名称

光脉冲串发生装置

[57] 摘要

提供一种脉冲串发生装置，其包括：产生 2 模拍频信号的 2 模拍频信号光源；将 2 模拍频信号光源的输出光进行孤波整形的孤波波形整形器；以及将该孤波波形整形器的输出光进行绝热孤波压缩的绝热孤波压缩器。提供一种波形整形器，其是在该脉冲串发生装置上所使用的波形整形器，具有配设多个高非线性光传输线路和低非线性光传输线路的结构，低非线性光传输线路具有比高非线性光传输线路更低的非线性系数并且其 2 次色散值的绝对值与高非线性光传输线路不同。还提供一种光源，其包括：多个连续光光源，至少一个光源在多模下振荡；复用器，复用该连续光光源的输出光；非线性现象发生器，在该复用器的输出光上产生非线性现象，由此抑制受激布里渊散射。



1、一种光脉冲串发生装置，与产生光信号的光源结合使用，具有：
整形器，与所述光源结合，整形来自所述光源的光信号，产生整形了的光信号；

压缩器，与所述整形器结合，压缩来自整形器的整形了的光信号，以光脉冲串形式产生整形、压缩了的光信号，

所述整形器由交互配置了非线性媒介和色散媒介的 CPF 所构成，

所述压缩器由交互配置了非线性媒介和色散媒介的 CPF 所构成，

所述整形器的平均色散分布沿着光信号的传播方向增大，

所述压缩器的平均色散分布沿着光信号的传播方向减小。

2、根据权利要求 1 所述的光脉冲串发生装置，其特征在于，所述非线性媒介用 $L_{NL} < L_D$ 表示，所述色散媒介用 $L_{NL} > L_D$ 表示， L_{NL} 、 L_D 分别由下式表示：

$$L_D = \frac{T_0^2}{\beta_2}, L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0}$$

T_0 : 脉冲 $1/e^2$ 宽度

P_0 : 脉冲峰值功率

γ : 非线性系数

β_2 : 色散值。

3、根据权利要求 1 所述的光脉冲串发生装置，其特征在于，所述非线性媒介中的非线性效应引起的相位偏移是 1 弧度以下，所述色散媒介中的色散效应导致的相位偏移是 1 弧度以下。

4、根据权利要求 1 所述的光脉冲串发生装置，其特征在于，所述非线性媒介具有 5 /W/km 以上的非线性系数。

5、根据权利要求 1 所述的光脉冲串发生装置，其特征在于，在孤波周期以内还具有隔离器。

6、根据权利要求 1 所述的光脉冲串发生装置，其特征在于，所述光源发生拍频光作为所述光信号。

7、一种 SBS 抑制器，其特征在于，通过使用权利要求 1 所述的光脉冲串发生装置来抑制 SBS。

光脉冲串发生装置

技术领域

本发明涉及光传输系统中的连续光光源以及光源的控制方法、在脉冲发生技术中被适用的装置以及光再现系统。

背景技术

在光传输系统中，作为限制进入光纤之输入光功率的主要原因，要考虑由于发生受激布里渊散射（SBS: Stimulated Brillouin Scattering），使一部分输入功率向后散射，对传输系统施加不良影响。现有技术中，作为抑制 SBS 的技术，可分为（1）电控制光源的技术和（2）光学控制光源的技术。（1）在费希曼（Fishman）等人的 5329396，12/1994 中公开，其是电施加频率调制（FM 调制）或者振幅调制（AM 调制）以及高频调制的技术。（2）在堀内（Y.Horiuchi）等人的“在高功率 WDM 无重复传输中由交叉相位调制所引起的受激布里渊散射的抑制效果（Stimulated Brillouin scattering suppression effects induced by cross-phase modulation in high power WDM repeaterless transmission, , Electron.Lett., vol.34, No.4, pp.390-391, (1998).)”以及格林京衮（Glingener）等人的 6516113, B1 4/2003 中公开，其是通过使用在脉冲光中特别有效的交叉相位调制（XPM: Cross-Phase Modulation）或者自相位调制（SPM: Self-Phase Modulation）之类的光纤非线性现象来控制光的光谱的技术。

近年来，对光信号传输系统大容量化的要求越来越高。对此，作为追求大容量化的潮流，基于传输系统容量之万亿比特的试验正方兴未艾。实现该万亿比特的的主要方法是波分复用（WDM: Wavelength Division Multiplex）和光学时分复用（OTDM: Optical Time Division Multiplex）。前者是通过将波长不同的多个光信号加载成束来成批传输的方式，后者是提高光的自身传输速度（单位时间的传输容量）的方式。

在根据这些方式的光传输系统中，具有使用中继器的方法（光再现中继），其用于在传输线路上再现不是在电领域而是在光领域中的信号。在这种光再现中继中，报告了下述表 1 所示的技术。

表 1

	锁模光纤激光器		锁模激光二极管		(5)	特殊
	(1)有源	(2)无源	(3)有源	(4)无源	LD+EAM	要求
重复率	<40GHz	M~GHz	<40GHz	>10GHz	<40GHz	>10GHz
持续时间	>sub-ps	< sub-ps	> sub-ps	> sub-ps	>ps	<ps
时间起伏	小	大	小	大	小	小
稳定性	低	低	高	高	高	高
同步	容易	不容易	容易	容易	容易	容易

表 1 所示 (1)、(3) 和 (5) 方式是将电信号调制作为基础的方式。(2) 和 (4) 方式是将不需要电回路的全光技术作为基础的方式。(1) 由中沢(M.Nakazawa) 和吉田(E.Yoshida)在 IEEE Photon.Technol.Lett.,12, 1613(2000).、(2)由田村(K.Tamura)等人在 Opt. Lett., 18, 1080(1993).、(3) 由栗田 (H.Kurita) 等人在 IEICE Trans. Electron. E81-C, 129(1998).、(4) 由左藤 (K.Sato) 在 Electron. Lett., 37, 763 (2001).、(5) 由河谷 (H.Kawatani) 等人在 OFC2001,MJ3-1(2001).中分别公开。

作为表 1 之外的方法，还提出了通过孤波 (soliton) 压缩光纤将 2 模光变换成孤波脉冲串的方式 (E.M.Dianov 等人, OL, 14, 1008 (1989))。

为了信号传输的高速化，具有使用用于产生高位速率之光信号的光源的方法。作为该方法的一个例子，公知利用绝热孤波压缩的光脉冲压缩器，其在霍尔 (R.C.Reeves-Hall) 等人的“拉曼放大器中基于绝热压缩的皮秒孤波脉冲光源 (Picosecond soliton pulse-duration-selectable source based on adiabatic compression in Raman Amplifier)”、Electron. Lett.、2000 年第 36 卷 p622—624 中公开。

发明内容

鉴于上述背景，本发明的目的在于提供一种在光通信中具有 SBS 抑制

效果的光源，以及提供小型且结构简单的波形整形器、光脉冲串发生装置以及光再现系统。

本发明涉及光传输系统中的光源、波形整形器、光脉冲串发生装置以及光再现系统。

本发明涉及一种光脉冲串发生装置，与产生光信号的光源结合使用，具有：整形器，与所述光源结合，整形来自所述光源的光信号，产生整形了的光信号；压缩器，与所述整形器结合，压缩来自整形器的整形了的光信号，以光脉冲串形式产生整形、压缩了的光信号，所述整形器由交互配置了非线性媒介和色散媒介的 CPF（梳状色散分布光纤）所构成，所述压缩器由交互配置了非线性媒介和色散媒介的 CPF（梳状色散分布光纤）所构成，所述整形器的平均色散分布沿着光信号的传播方向增大，所述压缩器的平均色散分布沿着光信号的传播方向减小。

另外，本发明也涉及一种 SBS 抑制器，其特征在于，通过使用所述的光脉冲串发生装置来抑制 SBS。

作为本发明之一的光脉冲串发生装置由 2 模拍频光发生部、孤波（soliton）变换部和孤波压缩部构成。在图 1 所示现有技术的系统中，将 2 模拍频信号光直接引入绝热孤波压缩器。另一方面，在本发明中，如图 2 所示，在绝热孤波压缩之前，预先在孤波波形整形器中将拍频光从正弦波形变换到孤波波形。结果，不仅使孤波绝热压缩的压缩效率能够大大地提高，而且能够抑制压缩光纤中的受激布里渊散射（SBS：Stimulated Brillouin Scattering）。

用于确定光源性能的波形整形器和压缩部通过 CDPF 实现。CDPF 通过色散光纤和非线性光纤的组合构成，通过调整这些光纤对的平均色散值而使脉冲控制变成可能。通过该 CDPF 技术使孤波变换部和孤波压缩部的色散分布的最优化变得容易。在本光源中，作为最佳分布之一，在孤波变换部采用平均色散增大的分布，而在孤波压缩部采用平均色散减少的分布。

从实现理想 CDPF 来看，将非线性系数尽可能大的光纤有效使用为非线性光纤变得重要。根据这个观点，希望有效使用与传输所使用的 SMF 相比具有更大非线性系数的高非线性光纤（HNLF：Highly-Nonlinear

Fiber)。通过该低色散 HNLFF 的有效使用, 不仅色散而且非线性系数也变成梳状分布, 这是因为能够更理想的制作色散光纤和非线性光纤的组合即 CDPF。但是, 不可忽视作为剩余色散、色散斜率与非线性效应的相互作用结果而产生的噪声放大现象。在该抑制上正常色散 HNLFF 的有效使用是有效的。这是因为, 在正常色散区域, 作为非线性效应和色散的相互作用结果而产生的参量增益的发生被抑制了, 其结果, 抑制了噪声放大。

另外, 拍频光发生部的噪声降低也是重要的。一般通过复用 2 台半导体激光器(激光二极管: LD) 的输出 CW 光来获得拍频光。但是, LD 输出功率一般为数十 mW, 其在下一级孤波变换和孤波压缩中是不够的。因此, 虽然拍频光的放大是必要的, 但在该过程中一定要附加噪声。与此相对, 通过使用高输出($\geq 50\text{mW}$) LD 能够实现不需要光放大的换言之不附加噪声的拍频光发生部(图 7)。实际上, 已经开发了 100mW 输出的分布反馈 LD (distributed-feedback LD), 如果使用它就能够构筑低噪声光拍频发生部。

归纳上述, 本发明光脉冲串发生装置的特征如下。

(1) 对 2 模拍频信号光, 由 CDPF 波形整形和 CDPF 孤波压缩的组合产生孤波串。

(2) 色散增大 CDPF 波形整形器和色散减少 CDPF 孤波压缩器的组合。

(3) 将低色散 HNLFF 有效使用于 CDPF 波形整形器和 CDPF 孤波压缩器。

(4) 使用 2 台高输出 LD 伴随 EDFA 省略而噪声降低。

作为这些方式的结果, 能够实现不仅具有高质量而且具有高压缩性能的绝热孤波压缩部, 通过在光源上采用该压缩器, 能够产生具有上述重复频率和亚皮秒(sub-ps) 范围时间宽度的超高纯度孤波串。

另一方面, 在光传输系统应用中重要的、孤波串重复频率与外部信号(电、光) 的同步在本光源中也能够容易实现。图 8 示出了这种可外部同步的光源的结构。其是图 7 的光源和光锁相环(OPLL: optical phase locked loop) 部的组合结构。其是将参考光信号、在该图中由外部电输入信号驱动的调制器和 LD 的组合所获得的光时钟脉冲串以及在相对一部分光源输出光的光区域中的重复频率进行比较的结构。频率比较时, 有效使用光纤中的四波混合(FWM: four wave mixing)。调整拍频光发生部的 LD 波长使得所产生的 FWM 光的功率变为最大。特别应关注的是, 由于采用光区域中的频率比较, 因此对此没有上限。

上述光源也能够应用于光再现中继子系统的光时钟脉冲光源上。图 9 示出了这种情况。其是在将劣化的传输信号光进行波形整形之后将基于从光信号中抽出(时钟抽出) 的时钟频率所产生的时钟脉冲串通过光信号进行开关切换的结构。在该时钟抽出和时钟脉冲串发生中应用了图 8 所示的光源。这里的时钟脉冲串的品质是用于确定传输线路性能的极其重要的光

源性能。即，可以说，能够产生超高纯度孤波串的本光源适用于光再现中继中的光时钟脉冲光源。根据与上述同样的理由，本光源也适合应用于 OTDM-DEMUX 部。图 10 示出了这种情况。

而且，本发明涉及通过使用光纤的非线性现象即 XPM、SPM、四波混合（FWM）来抑制连续光光源的 SBS 的技术。如果具体说明，本发明能够提供通过利用非线性现象来加宽多模连续光光源之各个模式的光谱宽度或者通过抑制峰值功率大的模式的功率来抑制 SBS 的方法和装置。

相对于现有技术，本发明是涉及具有 SBS 抑制效果的光源的技术。特别在本发明中，能够不增加相对强度噪声（RIN: Relative Intensity Noise）来抑制 SBS。

为了产生 XPM、SPM 等非线性现象，由于在具有 3 次非线性敏感率的媒质中需要与所产生光的强度相适应的折射率变化，因此对于比较容易产生该效应的脉冲光，其能够适用。因此，对于作为本发明对象的连续光，不太被认识。

如果说明本发明其他实施方式，还可举出波形整形器。波形整形器能够兼有波形整形和压缩两者。就是说，如果连接 2 个这种波形整形器，就能够进行波形整形和压缩。

本发明波形整形器的一个实施方式的特征在于，在将所输入的光变换成孤波光的波形整形器中，其具有多个配设高非线性光传输线路和低非线性光传输线路的结构，低非线性光传输线路具有比上述高非线性光传输线路更低的非线性系数并且其 2 次色散值的绝对值与上述高非线性光传输线路不同。

根据该实施方式，由于配设多个高非线性光传输线路和低非线性光传输线路，因此能够等价实现色散减少传输线路以及能够实现通过使用高非线性光传输线路而作为整体具有高的色散特性的波形整形器。

本发明波形整形器另一实施方式的特征在于，在上述发明中，还将光隔离器安装在距输入端的距离为孤波周期以下的区域中。

根据本实施方式，由于将光隔离器配置在孤波周期以下的距离上，因此能够抑制波形整形器中的受激布里渊散射的发生以及能够输出强度高的孤波光。

本发明波形整形器再一实施方式的特征在于，在上述发明中，上述光隔离器配设在不同光传输线路的结合部上。

根据本实施方式，由于将光隔离器配设在光传输线路的结合部上，因此能够减少热粘结点数以及能够实现降低光损失的波形整形器。

本发明波形整形器又一实施方式的特征在于，在上述发明中，上述光隔离器配设在上述高非线性光传输线路的前级。

根据本实施方式，由于使光隔离器配设在高非线性光传输线路的前级，因此能够更有效地抑制受激布里渊散射的发生。由于受激布里渊散射是一种非线性光学效应，因此在高非线性光传输线路中容易发生。因此，通过将光隔离器配设在高非线性光传输线路的前级，能够更有效抑制受激布里渊散射的发生。

本发明光脉冲发生装置的一个实施方式的特征在于，包括非线性系数为 $3 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 以上的高非线性光传输线路，还包括：脉冲宽度压缩部件，其一边拉曼放大被输入的光一边通过绝热孤波压缩来压缩脉冲宽度；激发光源，其对该脉冲宽度压缩部件提供用于拉曼放大的激发光；光耦合部件，其将该激发光源与上述脉冲宽度压缩部件进行光耦合。

根据本实施方式，由于对在高非线性光传输线路中传输的光进行拉曼放大，因此在能够缩短高非线性光传输线路的传输线路长度的同时还能够更加压缩输出光的脉冲宽度。

本发明光脉冲发生装置的另一实施方式的特征在于，在上述发明中，还包括：在上述脉冲宽度压缩部件前级所配设的波形整形器以及在该波形整形器前级所配设的发光部件。

本发明光脉冲发生装置的实施方式的特征在于，在上述发明中，还包括在上述脉冲宽度压缩部件前级所配设的光放大器。

本发明光脉冲发生装置的实施方式的特征在于，在上述发明中，还包括在上述脉冲宽度压缩部件前级所配设的受激布里渊散射抑制部件。

本发明光脉冲发生装置的一个实施方式的特征在于，包括：时钟抽出装置，用于抽出被传输光的重复频率；光时钟脉冲串发生装置，其安装了波形整形器或者光脉冲发生装置；光快门装置，其基于在上述时钟抽出装置中所抽出的频率来调制从上述光时钟脉冲串发生装置所输出的光。

根据本实施方式，作为光时钟脉冲串发生装置，由于使用本发明的光脉冲发生装置，因此获得光脉冲强度起伏和时间起伏少的光时钟脉冲串。

附图说明

图 1 是现有技术用于通过 2 模拍频光的孤波压缩来实现产生超高交变孤波串的结构图。

图 2 是本发明通过组合孤波波形形成器和绝热孤波压缩器来实现产生来自 2 模光的高交变孤波串的结构图。

图 3 是表示在图 2 所示系统中在孤波波长形成器使用色散增大 CDPF、在绝热孤波压缩器使用色散减少 CDPF 的设备结构示意图。

图 4 是表示波形成形用 CDPF 以及孤波压缩用 CDPF 之光纤特性曲线的示意图。

图 5A 是表示因本发明光脉冲串发生装置引起的输入输出脉冲之自相关波形的示意图。

图 5B 是表示因本发明光脉冲串发生装置引起的输入输出脉冲之光谱波形的示意图。

图 6 是表示波形成形用 CDPF 和具有比图 3 更平稳色散减少的孤波压缩用 CDPF 的光纤特性曲线的示意图。

图 7 是使用了高输出 DFB-LD 的拍频光产生部的结构图。

图 8 是基本孤波激发需要的输入光强度对 2 次色散值 β_2 绝对值的依赖关系，是可与外部信号同步的光源的结构图。

图 9 是将本发明光源应用于光再现中继子系统的光时钟脉冲光源时的构成图。

图 10 是将本发明光源应用于 OTDM-DEMUX 部时的构成图。

图 11 是表示色散媒质和非线性媒质被交互配置的传输线路的示意图。

图 12 是表示 CPF 概念的示意图。

图 13 是表示在 HNLF 中使用拉曼放大器的波形整形器结构的示意图。

图 14 是表示基本孤波激发需要的输入光强度对 2 次色散值 β_2 绝对值的依赖关系的示意图。

图 15 是表示输出脉冲宽度的临界值和输入光强度的依赖关系的曲线。

图 16 是表示使用了波形整形器的脉冲串发生装置的示意图，该波形整形器在 CPF 和 HNLF 中使用了拉曼放大器。

图 17 是表示使用 CPF 的光脉冲串发生装置的结构示意图。

图 18 是表示波形成形用 CDPF 和具有色散减少的孤波压缩用 CDPF 的光纤特性曲线的示意图。

图 19A 是表示输入输出脉冲的自相关波形的曲线。

图 19B 是表示光谱波形的曲线。

图 20 是表示通过使用光调制器从 CW 光产生拍频光或者标准脉冲的标准脉冲发生器以及由脉冲波形整形器构成的光脉冲发生器的示意图。

图 21 是表示孤波长度和输入脉冲宽度之间关系的曲线。

图 22A 是表示 40GHz 脉冲串发生光源构成的示意图。

图 22B 是表示 CDPF 色散值和非线性系数的曲线的示意图。

图 23A 是表示 CPF 输入输出脉冲串的自相关波形的曲线。

图 23B 是表示 CPF 输入输出脉冲串的光谱波形的曲线。

图 24 是表示 CPF 输出脉冲的时间宽度和峰值基底 (pedestal) 比的输入波形依赖关系的曲线。

图 25 是表示自相关波形上相邻脉冲峰值之输入拍频的载波压制比依赖关系 CSR 的曲线。

图 26A 是表示 40GHz 脉冲串光源构成图的示意图。

图 26B 是表示 CDPF 色散值和非线性系数之分布图的曲线。

图 27A 是表示 CDPF 输入输出光脉冲串的自相关波形的曲线。

图 27B 是表示 CDPF 输入输出光脉冲串的光谱波形的曲线。

图 28 是表示无 EDFA 之光源的实施例的示意图。

图 29 是表示在 CPF 和 HNLF 中使用了拉曼放大器之波形整形器的光脉冲串发生器的示意图。

图 30 是表示在不使用 CPF 以及使用 CPF 时的 SBS 光功率和 SCRA 输出功率与 SCRA 输入功率之依赖关系的曲线。

图 31 是表示 SCRA 输出脉冲时间宽度与拉曼增益和输出功率之依赖关系的曲线。

图 32A 和图 32B 分别是在增益为 2.4、9.4、11.6、12.6dB 时 RA 输出

脉冲串的自相关波形和光谱波形。

图 33 是由 XPM 或者 SPM 引起的 SBS 抑制效果的模式图。

图 34 是由 FWM 引起的 SBS 抑制效果的模式图。

图 35 是在使用 HNLF 进行 SBS 抑制之光源的测量传输线路中用于验证 SBS 抑制效果的试验系统。

图 36 是在使用了 HNLF 但没有进行 SBS 抑制之光源的测量传输线路中用于验证 SBS 抑制效果的试验系统。

图 37 是表示 1455nm 半导体激光器的 SBS 测量结果的曲线。

图 38 是表示 1461nm 半导体激光器的 SBS 测量结果的曲线。

图 39 是表示当将 1455nm 半导体激光通过 HNLF 时的光谱的曲线。

图 40 是表示当 1455nm 半导体激光没有通过 HNLF 时的光谱的曲线。

图 41 是表示当将 1461nm 半导体激光通过 HNLF 时的光谱的曲线。

图 42 是表示当 1461nm 半导体激光没有通过 HNLF 时的光谱的曲线。

图 43 是表示当将 1461nm 半导体激光通过 HNLF 时以及没有通过 HNLF 时的 RIN 测量结果的示意图。

图 44 是拉曼放大器的结构图。

图 45 是使用 2 个连续光光源的 SBS 抑制光源的模式图。

图 46 是用于确认使用 2 个连续光光源的 SBS 抑制光源之效果的试验系统。

图 47 是表示在用于确认使用 2 个连续光光源的 SBS 抑制光源之效果的试验系统上所使用各个光源之 SBS 测量结果的曲线。

图 48A 是表示当使用 2 个连续光光源的 SBS 抑制光源的光在 TW-RS 光纤上传播之后的光谱的曲线。

图 48B 是表示当使用 2 个连续光光源的 SBS 抑制光源的光在 TW-RS 光纤上传播之后的光谱的曲线。

图 48C 是表示当使用 2 个连续光光源的 SBS 抑制光源的光在 TW-RS 光纤上传播之后的光谱的曲线。

图 48D 是表示当使用 2 个连续光光源的 SBS 抑制光源的光在 TW-RS 光纤上传播之后的光谱的曲线。

图 49A 是将图 48A 和图 48B 放大的曲线。

图 49B 是将图 48A 和图 48C 放大的曲线。

图 49C 是将图 48D 放大的曲线。

图 50 是使用 2 个连续光光源的 SBS 抑制光源之 SBS 抑制效果的模式图。

图 51 是当通过汇集具有多个波长的光源来进行 SBS 抑制时的 SBS 抑制光源的模式图。

图 52 是当具有多个波长的光源各自进行 SBS 抑制时的 SBS 抑制光源的模式图。

图 53 是用于通过 FWM 来检查功率变化的模拟构成图。

图 54A 是当使用其对 1460nm 的色散为 0ps/nm/km 的光纤时，通过模拟所估计总功率和峰值功率对光纤长度的关系的曲线。

图 54B 是当使用其对 1460nm 的色散为 1ps/nm/km 的光纤时，通过模拟所估计总功率和峰值功率对光纤长度的关系的曲线。

图 54C 是当使用其对 1460nm 的色散为 5ps/nm/km 的光纤时，通过模拟所估计总功率和峰值功率对光纤长度的关系的曲线。

图 55 是表示 $P_{\gamma L_{\text{eff}}}$ 和峰值功率的关系的曲线。

图 56 是描绘当峰值功率下降 3db 时 $P_{\gamma L_{\text{eff}}}$ 和色散的曲线。

图 57 是表示当改变各个 LD 的波长间隔时峰值功率的变化量和光纤长度的关系的曲线。

图 58A 是表示根据实施方式 1 的波形整形器的结构模式图。

图 58B 是表示根据实施方式 1 波形整形器的群速度色散的分布的一个例子的曲线。

图 59 是用于说明当通过实施方式 1 波形整形器进行孤波变换时输入光和输出光之自相关关系变化的曲线。

图 60 是表示在实施方式 1 波形整形器中群速度色散的分布的一个例子的曲线。

图 61 是表示根据实施方式 2 的波形整形器的结构模式图。

图 62A~图 62D 是用于说明根据有无隔离器 (isolator) 以及配置位置引起的回光强度变化的曲线。

图 63A 是表示输出光的自相关关系的曲线。

图 63B 是表示输出光的光谱波形的曲线。

图 64 是表示实施方式 3 光脉冲发生装置的结构模式图。

图 65 是表示基本孤波激发所需要的输入光的强度对 2 次色散值之绝对值的依赖关系的曲线。

图 66 是表示输入到脉冲压缩传输线路的光的强度和压缩脉冲宽度的临界值之间关系的曲线。

图 67 是表示实施方式 3 之变形例的光脉冲发生装置的结构模式图。

图 68 是表示配置了本发明波形整形器的光再现系统的一个构成例子的示意图。

图 69 是表示其他实施方式的结构概要图。

具体实施方式

下面参考附图详细说明实施本发明的最佳实施方式。

（光脉冲串发生装置的实施方式）

首先，说明本发明光脉冲串发生装置的实施方式。首先，图 2 和图 3 示出了本发明光脉冲串发生装置的实施例。

图 2 是表示本发明光脉冲串发生装置的总体系统构成的示意图。图 2 中，尽管从 2 模拍频信号光源（dual-frequency optical source）输出的信号光的波形是 sin 波形，但通过孤波波形整形器（soliton shaper），被孤波整形后的输出光成为 sech^2 波形的适合于绝热孤波压缩的形式。此后，通过绝热孤波压缩器（adiabatic soliton compressor），能够获得适用于万亿比特传输的脉冲光信号。与在压缩器前半部进行孤波变换的脉冲在后半部进行压缩的处理即现有方法相比，根据本方式，由于能够从压缩器开头产生压缩，因此能够实现压缩性能的提高。而且，通过孤波波形整形器，在 SBS 效应发生之前，能够有效地使光谱宽带化。结果，在 CDPF 整体上压制了 SBS 效应。

图 3 表示出将色散增大 CDPF 应用于孤波波形整形器和将色散减少 CDPF 应用于绝热孤波压缩器的实施例。在将波长不同的 2 台半导体激光器的输出光复用之后输入到掺铒光纤放大器和半导体光放大器中。其是将该被放大的拍频（beat）光输入到 2 级 CDPF 的结构。通过在该 2 级 CDPF

上灵活使用色散增大光纤和色散减少光纤的组合，能够实现不使脉冲品质劣化的高压缩率。而且，通过 CDPF 技术的有效使用，不仅能够容易地实现色散增大/色散减少分布图，而且还能够通过光纤长度调整来精致连续地控制色散值。

如果说明具体的设备，则本发明光脉冲串发生装置由下述设备构成。

(1) 2 模拍频信号光源 (dual-frequency optical source)，其包括用于发送模式不同的光信号的 2 台半导体激光输出器以及通过复用该光信号来生成 2 模拍频信号光的复用器 (Multiplexer)。

(2) 孤波波形整形器 (soliton shaper)，其由色散增大 CDPF 构成，用于将 2 模拍频信号光进行孤波变换。

(3) 绝热孤波压缩器 (adiabatic soliton compressor)，其由色散减少 CDPF 构成，用于将被孤波变换的信号光进行绝热孤波压缩，通过添加绝热孤波压缩器，在产生高品质孤波串方面，尽可能地有效使用非线性系数大的光纤即 HNLF 变得重要。在理想 CDPF 下的非线性光纤中，需要压制仅仅产生非线性特性的色散。在现有技术中，更多地将 2 次色散值极其小的色散转移化光纤使用于该非线性光纤中。在这种 2 次色散值极其小的光纤中，由于能够增强高次色散效应，因此一般地，脉冲品质劣化。与此相反，色散值小的 HNLF 不仅能够使色散效应小，还能增强非线性特性，以及作为更理想的非线性光纤来工作。作为其结果，CDPF 设计的自由度提高了，抑制压缩脉冲品质的劣化也变得容易。

该色散增大 CDPF 和色散减少 CDPF 通过 HNLF 和 SMF 的融化连接来制造。因此，这些 CDPF 仅仅通过调整 D 值在光纤长度方向为固定的 HNLF 和 SMF 这两种光纤的长度就能容易地构成，其结果，在现实制造、施工时具有很多优点。与此相对，对于现有技术的色散增大光纤和色散减少光纤，上述中就需要使用相对长度方向要精密调整了 D 之值的光纤。该光纤的制造是非常困难的，在实际制造、施工时需要很长的时间和很大的费用。

HNLF 是被称为正常色散 HNLF 的其色散值变为负的光纤，通过使用它的色散增大 CDPF 而构成的孤波波形整形器能够通过抑制由压缩光纤引起的 SBS 来抑制噪声。其与通过使用正常色散 HNLF 的 CDPF 而构成的

孤波压缩器之间的共生性也好，并能够获得噪声被抑制的输出光。

表 2 归纳了该 CDPF 的光纤特性。

表 2

	D_{ave} [ps/nm/km]	HNLF 长度[m]	SMF 长度[m]
第一对	3.5	40	10
第二对	5.8	40	20
第三对	7.5	40	30
第四对	3.5	100	25
第五对	1.6	100	10
第六对	0.8	100	5

表 2 表示在波形整形器和绝热孤波压缩中使用的 CDPF 的光纤特性。 D_{ave} 表示平均色散值。在第一对~第三对中，将 HNLF 的长度固定在 40m，通过加长 SMF 的长度来增加 D_{ave} ，从而实现色散增大 CDPF。将此使用作为波形成形器。

在第四对~第六对中，将 HNLF 的长度固定在 100m，通过缩短 SMF 的长度来减少 D_{ave} ，从而实现色散减少 CDPF。将此使用于孤波压缩应用中。

根据上述，通过调整 HNLF 和 SMF 仅仅这两种光纤的长度，就能够获得规定的色散增大 CDPF 和色散减少 CDPF。

这里，图 4 示出这些波长成形及孤波压缩用的 CDPF 的光纤分布图。图 4 上层的曲线表示理想色散分布图。曲线的纵轴表示色散值 D ，单位是 ps/nm/km。横轴表示光纤长度方向距离 z ，单位是 m。

图 4 中层的曲线示出表 2 所示 CDPF 的色散分布图。纵轴、横轴的单位是与图 4 上层曲线相同。虚线表示平均色散值 D_{ave} 。

图 4 下层的曲线示出表 2 所示 CDPF 的非线性系数 γ 的分布图。曲线的纵轴表示非线性系数 γ ，单位是 1/W/km。横轴表示光纤长度方向距离 z ，单位是 m。

首先，如从图 4 中层曲线所示的平均色散值 D_{ave} 知道，在将波形整形

作为目的 CDPF 上具有规定的色散增大分布图，在将绝热孤波压缩部作为目的的 CDPF 上具有规定的色散减少分布图。

这里应该关注的是，从图 4 下层曲线可以知道，通过将 HNLF 有效使用在 CDPF 上，能够实现不仅具有光纤色散而且非线性系数也具有梳状的分布图。由此，能够交互地产生非线性效应和色散效应，以及获得理想的分布图。

就是说，通过调整非线性媒质和色散媒质的尺寸，能够控制传输特性。在这里，所谓尺寸，即以光纤长度为首，其他如媒质长度、厚度等，对非线性特性、色散特性施加了影响的所有尺寸都属于此列。

这里，HNLF 的实际色散值和非线性系数分别是 0.8ps/nm/km 和 241/W/km 。通过该 HNLF 的色散值取负值的正常色散化，能够抑制孤波压缩中发生参量增益，作为结果，抑制了噪声增大。

下面，图 5 示出了将上述拍频光进行使用色散增大 CDPF 的孤波变换以及使用色散增大 CDPF 的孤波压缩的结果的值，就是说，示出了表示本发明光脉冲串发生装置之性能的输入输出脉冲波形。

图 5A 黑点示出输入输出脉冲的自相关波形。曲线的纵轴表示光强度，单位是任意单位 (arbitrary unit)。曲线的横轴表示时间延迟，单位是 ps。用虚线示出了理想的 sech^2 脉冲的自相关波形。

图 5B 示出了光谱波形。曲线的纵轴表示光谱，单位是 10dB/div 。曲线的横轴表示波长，单位是 nm。用虚线示出了理想的 sech^2 波形。

这里应该关注的是，试验结果和虚线不仅在自相关波形上一致，而且在光谱上也良好地一致。而且，从 CDPF 输入输出脉冲谱的模式宽度没有大的变化可以证明，在孤波压缩过程中噪声放大少了。

根据上述结果可以看出，通过本发明光脉冲串发生装置所获得的光脉冲是超高纯度的孤波。根据自相关波形拟合所换算的时间宽度是 830fs 。

因此，可以说，通过组合 2 模光光源、由使用正常色散 HNLF 的色散增大 CDPF 而构成的孤波波形成形器、由使用正常色散 HNLF 的色散减少 CDPF 而构成的孤波压缩器所得的光脉冲串发生装置，使得能够获得亚皮秒级的压缩超高纯度孤波，并使其大大地接近于万亿比特传输的实用化。

与图 4 实施例的 CDPF 相比，可以清楚，通过使用色散更缓慢减少的

CDPF，能够谋求孤波压缩性能的进一步提高。作为一个例子，表 3 示出了具有 6 对 CDPF 绝热孤波压缩部的孤波压缩器的光纤特性。

表 3

	D_{ave} [ps/nm/km]	HNLF 长度[m]	SMF 长度[m]
第一对	3.5	40	10
第二对	5.8	40	20
第三对	7.5	40	30
第四对	3.5	100	30
第五对	1.6	100	25
第六对	0.8	100	20
第七对	0.8	100	15
第八对	0.8	100	10
第九对	0.8	100	5

D_{ave} 表示平均色散值。在第一对~第三对中，将 HNLF 的长度固定在 40m，通过加长 SMF 的长度来增加 D_{ave} ，从而实现色散增大 CDPF。将此使用作为波形成形器。

在第四对~第九对中，将 HNLF 的长度固定在 100m，通过缩短 SMF 的长度来减少 D_{ave} ，从而实现色散减少 CDPF。与表 3 的情况相比，色散减少 CDPF 的长度变为 2 倍。将此使用于孤波压缩应用中。

图 6 示出 CDPF 的光纤特性分布图。图 6 上层的曲线表示表 3 所示 CDPF 的色散分布图。曲线的纵轴表示色散值 D ，单位是 ps/nm/km。横轴表示光纤长度方向距离 z ，单位是 m。

图 6 下层的曲线示出表 3 所示 CDPF 的非线性系数 γ 的分布图。曲线的纵轴表示非线性系数 γ ，单位是 1/W/km。横轴表示光纤长度方向距离 z ，单位是 m。

通过具有上述分布图的 CDPF 光纤，能够获得比图 5 所示输出光更加被压缩的超高纯度孤波。

拍频光发生部的噪声降低也是重要的。一般通过复用两台半导体激光

器 (LD) 的输出 CW 光来获得拍频光。但是, LD 输出功率一般是几十 mW, 其在下一级孤波变换和孤波压缩上是不够的。为此, 需要放大拍频光。而且, 该放大器的噪声也变成问题。

在图 3 光源部件中噪声附加最多的是 EDFA。换言之, 在不使用 EDFA 的方式中, 能够产生更高质量的孤波串。基于这个考虑, 图 7 示出了没有 EDFA 的光源的实施例。通过复用两台高输出 ($\geq 50\text{mW}$) LD 的输出 CW 光获得拍频光 ($\geq 50\text{mW}$)。由于该拍频光在下一级孤波变换和压缩中具有足够的光功率, 因此不需要光放大。因此, 能够产生噪声更少的孤波串。而且, 由于能够省略 EDFA 所使用的泵浦 LD 驱动电路, 因此装置自身的小型化也是优点之一。

下面, 如果考虑本光源在光传输系统中应用, 光源的外部同步是必需功能。本光源具有能够容易实现该功能的优点。

作为与此相关的实施例, 图 8 示出了该光源构成。其是将图 7 所示低噪声光源作为基础的孤波串发生部和 OPLL (光锁相环路: optical phase locked loop) 部组合的结构。下面详细说明该 OPLL 部的工作原理。

当将外部输入光作为参考信号时, 将该外部输入光的重复频率和 2 模光的拍频频率在光域上进行比较。在该比较上有效使用作为光纤非线性效应之一的四光波混合 (FWM: four wave mixing) 现象。将外部光和拍频光复用并输入到 HNLF, 产生 FWM 光。将该 FWM 光用滤波器切出, 并监控其功率。通过调整拍频光发生部的 LD 波长使得该 FWM 光功率变为最大, 能够获得频率同步。当取得与外部电信号之间的同步时, 最初基于该电信号产生时钟脉冲串。在这里使用带有简单且高速电吸收型半导体调制器 (EAM: electro-absorption semiconductor modulator) 的 DFBLD。而且, 如果需要, 使用 HNLF 进行脉冲压缩。通过与上述相同在光域上将该光时钟脉冲串与拍频光的重复频率进行比较而实现同步。

在中继点补偿在长距离传输中发生的信号光波形的紊乱以及信号光脉冲的时间偏差也是在万亿比特长距离传输中的重要课题。关于此, 上述光源也能够有效应用于再现中继子系统的光时钟脉冲光源上。图 9 示出了这种情况。

在再现中继的最初阶段, 通过除去已经劣化之传输信号光的噪声, 在

某种程度上能够成形波形。这能够通过使用具有阈值和饱和之输入输出特性的器件来实现。

但是，仅仅根据该功能不足以补偿信号光脉冲的时间偏差。作为用于补偿该信号光脉冲之时间偏差的功能，有下面所说明的重新定时（Retiming）。

在这里，通过基准重复频率的时钟脉冲串开关具有时间偏差的信号，其是用于实现重新定时功能。作为在光域上的开关实现法，一般可以是基于光纤非线性效应的方法。

将图 8 所示带有 OPLL 的孤波串发生装置有效使用于在该重新定时中成为必需的时钟脉冲的发生上是有效的。作为其输出脉冲，获得了与输入信号光的重复频率同步的孤波脉冲串。该光源输出脉冲是高纯度的信号光脉冲，其在高品质传输线路的构筑即在高性能传输线路和高品质传输脉冲的实现成为必须条件的万亿比特级 OTDM 传输系统上非常适用。

本发明光源即使在涉及使用于在 OTDM 系统接受部成为必需的 DEMUX 部的时钟脉冲串的发生时也是非常适用的。图 10 示出该实施例。

图 10 所示系统是分开并取出被传输的光信号以及用具有该信号重复频率之分频的时钟脉冲串对此进行开关切换的系统。在该时钟脉冲串的发生和时钟抽出上采用图 8 所示的光源。图 10 中，尽管用克尔快门（kerr-shutter）进行分开，显然，也能够通过其他装置和方法进行。

通过利用本发明光源，能够用更简单的构成实现 DEMUX 部。而且，与图 9 的再现中继相同，通过在开关之前预先进行噪声去除来成形波形，使得有可能更加高性能化。

如上述，本发明的光源是能够使用于发送部、中继部、接受部、传输系统的所有部分，根据本发明，其在万亿比特级 OTDM 传输系统的实现上将有很大的贡献。

（光脉冲串发生装置的其他实施方式）

光脉冲在时间、空间和频率领域具有兴趣深的特征。能量在时间和空间上汇集、光谱被宽带化等等是其代表例。已经提出了灵活使用该特征的各种应用，并期待在微细加工、多光子吸收加工、取样测量以及光纤通信

等上的应用。

光脉冲产生法的主流是以模式同步钛蓝宝石激光器为代表的大型固体激光装置。但是，由于使用空间光学系统，因此小型化困难，并且还缺乏稳定性。由于这些本质问题，该光源的产业应用一直被怀疑。另一方面，从小型和稳定性的观点来看，不存在胜于使用半导体激光器（LD: laser diode）和电介质/半导体光调制器方式的方法。特别是，在该方式中，与电信号的同步是容易的，可以说其是本质上包括在产业应用上所必需特征的方式。但是，由于根据该方式所获得的光脉冲的时间宽度顶多是 1ps 左右，因此为了进一步缩短时间宽度，就必需光脉冲压缩器。而且，由于 1 台 LD 的输出功率也仅仅为几百 mW 的极限，因此在瓦特级/微焦耳级放大中就需要外部光放大器。本发明是特别涉及前者脉冲压缩的技术。

作为简单且与 LD 输出脉冲之匹配性良好的脉冲压缩方式，具有使用光纤之非线性效应的方式。特别地，在低噪声性方面优良的是有效使用基本孤波的绝热孤波压缩。光孤波即使在光纤传输中存在扰动时，也使自己本身的波形变化，使得被称为孤波次数的由下式表达的参数 N 保持恒定。

$$N = \sqrt{\frac{\gamma P_0 T_0^2}{\beta_2}} = \sqrt{1.763 \times \gamma \frac{\epsilon_p T_0}{\beta_2}} \quad (1)$$

但是， γ 和 β_2 是光纤的非线性系数 [1/W/km] 和色散值 [ps²/km]。 P_0 、 T_0 和 ϵ_p 是光孤波的峰值功率 [W]、 $1/e^2$ 的脉冲宽度 [ps] 以及脉冲能量 [pJ]。作为扰动，当 β_2 减少时以及 ϵ_p 增大时，光孤波使 T_0 减少，以便 N 固定。这就是绝热孤波压缩的原理。

作为该绝热孤波压缩过程的实现方法，提出了灵活使用 (1) 在光纤长度方向色散值减少的色散减少光纤 (DDF: dispersion-decreasing fiber)、(2) 通过使不同种光纤组合来模仿 DDF 的光纤以及 (3) 在长轴方向上具有缓慢增益的光纤的方式。这里，总结一下各个特征。

(1) DDF 是理想的绝热孤波压缩光纤。但是，由于需要严格地控制局部色散值，其制作可以说不容易。色散起伏与噪声放大有关，并与压缩脉冲的品质劣化有关。对于输入脉冲特性，需要最优化 DDF 输入端色散值和色散减少率，因此决不可以说是灵活性高的方式。

(2) 通过连接色散恒定的几种光纤来模仿 DDF 是可能的。有连接了

几种具有不同色散值的色散偏移光纤（DSF: dispersion-shifted fiber）的阶梯状色散分布光纤（SDPF: step-like dispersion-shifted fiber）和交互配置了具有两种不同色散值的 DSF 的梳状色散分布光纤（comb-like dispersion-shifted fiber）。对于这些光纤，严格控制色散值是可能的，另一方面，由于存在光纤连接的热粘结损失，因此从压缩性能的观点看，其劣于其他方法。

（3）光纤放大器大致区别为掺铒光纤放大器（EDFA: Erbium doped fiber amplifier）和拉曼放大器。特别是后者，由于拉曼放大是通过利用非线性光学效应即受激拉曼散射进行光放大，因此与 EDFA 等不同，通过使激发光的强度和波长变动来调整放大增益是可能的。因此，通过控制放大增益使得补偿输入光的波形和 DSF 色散值的变动，能够容易地实现绝热孤波压缩。但是，当构成插入了拉曼放大的光脉冲压缩器时，存在光脉冲压缩器大型化之类的问题。这是因为，与 EDFA 相比，拉曼放大其放大效率低，在足够的光放大中，通常需要具有数十 km 光纤长度的 DSF 等，因此使构成它的装置的小型化变得困难。

这些压缩方式的共同问题是由受激布里渊散射（SBS: Stimulated Brillouin Scattering）现象引起的输入功率限制。所谓 SBS，是当光纤中的光波功率达到某个阈值时，产生了向后散射光的现象。由于这，限制了压缩光纤中可能传播的光波功率以及使有效实现绝热孤波压缩处理变得困难。

在以上 3 种形式的压缩光纤中，涉及本发明的是（2）中记述的 CDPF 和（3）的拉曼放大器。尽管也能够注意这些延伸形式和位置，但本发明更希望关注的是其全新的概念。在这里希望关注的是，在下面所使用的波形整形器意味着用于整形光波的时间和光谱区域的波形的装置，为此还包含光脉冲压缩和光谱宽带化器件。

作为用于整形光脉冲波形的方法，一般是通过传输线路的局部色散效应和局部非线性效应来控制光波的方式。在该方式中还包含光孤波、超级连续光等。与用于调整局部色散和非线性效应的现有方法不同，本发明是通过交互配置了色散媒质和非线性媒质的传输线路来控制光波的。图 11 示出了本发明的概念图。特别地，如果由各个色散媒质中的色散引起的相

位旋转和各个非线性媒质中的非线性感应相位旋转为 1 弧度以下，则调整这些媒质尺寸的情况是与控制局部色散和非线性的情况相等价的。在这里，所谓尺寸，即以光纤长度为首，其他如媒体长度、厚度等，对非线性特性、色散特性施加了影响的所有尺寸都属于此列。

用于实现色散媒质和非线性媒质被交互配置的传输线路的方法之一是光纤，这也是本发明。通过交互连接不仅色散值不同而且非线性系数也不同的两种光纤，能够实现色散媒质和非线性媒质被交互配置的传输线路。这种传输线路在这里称为 CPF（梳状分布光纤：comb-like profiled fiber）。图 12 是该 CPF 的概念图。近年来，实现了高非线性光纤（HNLF：highly-nonlinear fiber），与现有光纤相比，其具有成倍以上大的非线性系数。实现了不仅能够控制非线性系数而且与一般色散偏移光纤（DSF：dispersion-shifted fiber）相同还能够控制色散的具有各种各样色散值的 HNLF。如果使用这种 HNLF，则制作 CPF 是容易的。将具有零色散的 HNLF 用作为非线性媒质、将现有技术的单模光纤（SMF：standard single-mode fiber）假设为色散媒质的 CPF 是其一个例子。显然，通过使用 HNLF 之外的光纤例如反过来使用非线性系数小的光纤等也可以制作 CPF。

使用色散长度 L_D 和非线性长度 L_{NL} 来更加定量地表示该 CPF 所使用光纤的条件。 L_D 和 L_{NL} 分别表示因色散效应和非线性效应引起的相位旋转变为 1 弧度的光纤长度，由下式给出。

$$L_D = \frac{T_0^2}{\beta_2}, L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (2)$$

L_D 和 L_{NL} 分别表示因色散效应和非线性效应引起的相位旋转变为 1 弧度的光纤长度。在 CPF 中，将构成 $L_{NL} < L_D$ 的光纤使用作为非线性媒质，将构成 $L_{NL} > L_D$ 的光纤假设为色散媒质。

下面表示出该 CPF 的效果。

CPF 大的优点是能够严格控制局部色散值。一般地，在精密控制光纤的局部色散值时，需要高精度的光纤制作技术。另一方面，非线性媒质和色散媒质对为多级的 CPF 的局部色散值由该色散媒质的尺寸如果换言之由各个对的平均色散值决定。例如，在上述通过 HNLF 和 SMF 构成 CPF 的情况下，由于 CPF 的局部色散值能够通过 SMF 长度进行精密调整，因

此光色散值的控制是极其容易的。其结果，能够进行正确的光脉冲控制。例如，在脉冲传输方向色散值减少的光纤和与其相反的色散增大光纤也能够通过 CPF 容易地实现。不仅如此，那些不容易制作的组合的色散增大和减少光纤以及与其相反的色散先减少又增大的光纤也能够通过仅仅调节 CPF 色散光纤长度而容易地实现。而且，即使是长轴方向色散值的稳定性在制作上为困难的光纤，如果使用该 CPF，也能够近似地实现具有固定色散的光纤。

另外，CPF 具有包括 SBS 抑制效应之类的大的优点。一般地，在色散值和非线性系数大的不同的光纤中，布里渊增益频带也大大的不同。因此，CPF 上所使用的各种光纤具有大的不同的布里渊增益频带，作为其结果，CPF 的 SBS 阈值比与 CPF 相同程度之 CPF 构成的光纤的 SBS 阈值更为减少。在 SBS 阈值小的 CPF 中，由于 SBS 现象不会限制输入功率，因此光波控制变得容易。有效利用这个优点的是将 CPF 用作为 SBS 抑制器的方法。通过将光波的光谱宽带化，能够抑制 SBS。通过将 CPF 使用于该光谱的宽带化，能够使工作功率条件更高功率化。

能够通过插入隔离器来抑制 SBS。这是因为通过插入隔离器能够减少由 SBS 感应引起的向后方的散射光的积蓄。特别地，由于在光纤连接点多的 CPF 中容易插入隔离器，因此其插入位置的最优化也是容易的。一般地，当在波形整形中抑制 SBS 时，在光谱被宽带化之前插入隔离器是有效的。隔离器的光纤插入位置是以在孤波周期 Z_{soliton} 之内作为目标。

本发明另一方式是图 13 有效使用应用 HNLF 的拉曼放大器的波形整形器。其由成为拉曼增益媒质的 HNLF、泵浦 LD、以及用于将泵浦光输入到 HNLF 的 WDM 耦合器构成。作为在拉曼增益上所使用的光纤，特征是使用具有 $5 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 或者以上之非线性系数的 HNLF。由于 HNLF 具有高的非线性系数 γ ，因此对于所输入的孤波光，能够用短光纤长度来有效进行拉曼放大。拉曼放大由于是一种非线性光学效应，因此有可能使非线性系数 γ 的值越大，平均每单位光纤长度的放大效率越高。因此，有可能缩短所需要的光纤长度，能够使拉曼增益光纤的长度为 2km 左右，非常短。这种情况从波形整形器小型化的观点看是非常重要的优点，通过使用 HNLF 能够实现小型的波形整形器。具体地，与现有的波形整形器相比，

能够使拉曼增益光纤收缩 1/10 左右。

在本波形整形器中，相对于规定的 2 次色散值 β_2 的绝对值，能够使所输入光波的强度比现有技术更为降低。图 14 是表示基本孤波激发需要的输入光强度对 2 次色散值 β_2 绝对值的依赖关系的曲线。图 14 中，曲线 I1 表示现有技术光脉冲压缩器，曲线 I2 表示本发明。从图 14 还可清楚，例如，在 $|\beta_2|=1\text{ps}^2/\text{km}$ 的情况下，与现有技术需要输入光为 150mW 左右的强度相对，根据本发明，通过输入 20mW 左右强度的光就能够进行脉冲压缩。在将半导体激光元件作为光源时，如果是 20mW 左右的输出，则能够用低的注入电流来容易地实现，因此，在根据本发明光脉冲串发生装置中，在能够省略光放大器的同时，还能够实现低耗电的光脉冲发生装置。

在将 HNLF 应用于拉曼放大光纤上时，由于 HNLF 具有高的非线性系数 γ ，因此与现有技术光脉冲串压缩器相比，能够使用 2 次色散值 β_2 之值更大的光纤。如上述，所输入的孤波光优选满足基本孤波条件，具体地满足 (1) 式中的 $N=1$ 。因此，当非线性系数 γ 的值小时，由于使 2 次色散值 β_2 之值变大，从必需使所输入孤波光为高强度可知，一般需要抑制 2 次色散值 β_2 之值为低。从本发明的拉曼放大光纤非线性系数 γ 具有高的值可知，即使与此对应将 2 次色散 β_2 也设定为高的值，也不需要使所输入孤波光的强度变高，因此能够通过低强度的输入光来进行高效率的脉冲压缩。

说明根据使上述 2 次色散值 β_2 之值变高产生的有利点。尽管由绝热孤波压缩引起的脉冲宽度压缩基本上遵循上述的 (1) 式，但是实际上已经知道，高次色散值将限制脉冲宽度的压缩。具体地，在 3 次色散值 β_3 、4 次色散值 β_4 等与 2 次色散值 β_2 相比较具有规定以上的值时，变成不能够有效地进行孤波光脉冲宽度的压缩。从根据本发明能够使用具有大 2 次色散值 β_2 的拉曼增益光纤以及高次色散值之值相对降低可知，在进行孤波光脉冲压缩时能够排除高次色散值的影响。而且，HNLF 与现有技术相比能够更加降低 3 次色散值 β_3 之值。例如，能够使 β_3 之值为现有技术的 1/3 左右即 $0.03\text{ps}^2/\text{km}$ 左右。由此，能够将输出光的脉冲宽度压缩到迄今更小的值。

图 15 是表示拉曼放大器所输入的光的强度和压缩脉冲宽度的临界值之间关系的曲线。这里，曲线 13 是表示本发明的曲线，曲线 14 是表示用于比较的现有技术的使用了 DSF 之波形整形器的曲线。从曲线 13 和曲线

14 之间的比较可知,根据本发明能够对同一输入光强度进行迄今在更窄范围上的脉冲压缩。具体地,在使用现有技术 DSF 时,当输入光强度为 10mW 左右的情况下,即使压缩在数 ps 左右也是困难的,但与此相反,在本波形整形器中,能够压缩脉冲宽度直到 200fs 左右。

当将脉冲宽度压缩到 100fs 时,现有技术需要 250mW 左右的输入光强度,而与此相反,在本拉曼放大型波形整形器中,当非线性系数 $\gamma=15\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 、3 次色散值 $\beta_3=0.1\text{ps}^3/\text{km}$ 时仅仅 46mW 就足够了,当 $\gamma=15\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 、 $\beta_3=0.03\text{ps}^3/\text{km}$ 时仅仅 15mW 就足够了。而且,当 $\gamma=25\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 、 $\beta_3=0.03\text{ps}^3/\text{km}$ 时,即使输入光的强度为 8.3mW,也能够实现 100fs 的脉冲宽度。

而且,当将 HNLF 应用于拉曼放大光纤上时,与现有技术 DSF 比较,能够让高次色散值成为低的值。例如,对于 3 次色散值 β_3 之值,在 DSF 中一般为 $0.1\text{ps}^3/\text{km}$,与此相对,在 HNLF 中,能够将 3 次色散值降低到 $0.03\text{ps}^3/\text{km}$ 。从能够降低 3 次色散值等值可知,在 HNLF 中,对于高次色散值,相对提高了 2 次色散值的值。例如,当拉曼放大光纤的 3 次色散值为 $0.03\text{ps}^3/\text{km}$ 时,在将脉冲宽度压缩到 100fs 时所需要的 2 次色散值与在现有技术 DSF 中需要为 $2\text{ps}^3/\text{km}$ 相对,在 HNLF 中即使为 $0.6\text{ps}^3/\text{km}$ 也是足够的。

下面说明具体的实施例。

(实施例 1)

作为本发明,通过有效使用在 CPF 和 HNLF 中应用拉曼放大器的波形整形器能够实现高性能脉冲串发生装置。图 16 示出该装置的形式。其是光拍频光发生部、孤波变换部以及绝热孤波压缩部的组合。光拍频发生部是产生正弦波信号的装置。在接着的孤波变换部中孤波变换该拍频光。此后,在绝热孤波压缩部中进行低噪声脉冲压缩。通过将孤波变换部和压缩部分离,能够各自应用最佳的传输路径设计,其结果,能够进行高品质且高效率的孤波压缩。显然,在该孤波变换器和绝热孤波压缩器中,还能够使用上述 CPF 和拉曼放大器以及使用除此之外的光纤。

(实施例 2)

图 17 示出使用 CPF 波形整形器的光脉冲串发生装置。这是图 16 所示光源的一个形式，其成为由 2 台 CW-LD 构成的拍频光发生部、CPF 孤波变换部以及 CPF 孤波压缩部的结构。通过复用 2 台 CW-LD 输出 CW，获得具有与这些波长差相对应之重复频率的光拍频。在最初的 CPF 中，将该拍频光变换成最适合于下级脉冲压缩的波形即孤波，在下一个 CPF 中进行孤波压缩。通过不直接孤波压缩拍频光而通过使用 CPF 孤波变换器在变换到最适于压缩的孤波之后压缩拍频光，能够实现理想的绝热孤波压缩处理。

孤波变换/压缩所使用的 CPF 是 HNLF 和 SMF 的 3 对结构，即为总共 6 对结构。HNLF 的非线性系数是 24 1/W/km ，其色散值是 -0.8 ps/nm/km 。这里，希望注意 HNLF 的色散是负值的正常色散。通过使用正常色散 HNLF，能够抑制 HNLF 中调制不稳定性 (MI: modulation instability) 增益的发生。由于通过 MI 增益将增强噪声和光脉冲的相互作用，因此抑制 MI 增益的发生在低噪声脉冲串产生中是重要的。

图 18B 和 C 示出了 CPF 的色散值 D 和非线性系数 γ 的分布图。B 中的虚线是 CPF 各对的平均色散值。CPF 的初级 3 对相当于孤波变换部，后级 3 对相当于孤波压缩部。通过在 CPF 中使用低色散 HNLF 和 SMF，不仅色散值变成梳状，而且非线性系数也变成梳状，实现了非线性媒质和色散媒质交互配置的传输线路。希望关注的是，设计色散分布使得在 CPF 中各对的平均色散值先增大再减少。由于 CPF 中各对平均色散值成为局部色散值的目标，因此该 CPF 与图 18A 所示色散增大光纤和色散减少光纤的组合是等价的。与该色散增大光纤相当的 CPF 是孤波变换部，在这里，实现了从拍频光向孤波的有效变换。在此后与色散减少光纤相当的 CPF 中实现了绝热孤波压缩处理。表 4 列出该 CPF 各个光纤的长度和各对色散值 D_{ave} 。

表 4

	D_{ave} [ps/nm/km]	HNLF 长度[m]	SMF 长度[m]
第一对	3.5	40	10
第二对	5.8	40	20
第三对	7.5	40	30
第四对	3.5	100	25
第五对	1.6	100	10
第六对	0.8	100	5

在 CPF 的第一对和第二对之间以及在第四对和第五对之间插入了光隔离器。通过这抑制 CPF 中的 SBS。显然，虽然没有插入隔离器的 CPF 也具有 SBS 抑制效果，但为了进一步增强该效果而插入了 2 台隔离器。尽管根据目的容易增加隔离器台数，但相反显然也可以减少隔离器台数。

图 19 示出通过 CPF 将上述拍频光进行孤波变换/压缩结果的值，就是说，图 19 示出表示本发明光脉冲串发生装置性能的输入输出脉冲波形。图 19A 表示输入输出脉冲的自相关波形，曲线的纵轴表示光强度，单位是 a.u。曲线的横轴表示延迟，单位是 ps。图 19B 表示光谱波形。曲线的纵轴表示光谱，单位是 dB/div。曲线的横轴表示波长，单位是 nm。用虚线表示将脉冲波形拟合成 sech^2 波形的结果。这里应该注意的是，试验结果和虚线不仅在自相关波形上一致而且即使在光谱中也良好地一致。另外，从 CPF 输入输出脉冲谱的谱线宽度上没有大的变化可以证明，在孤波压缩过程中噪声放大少了。从自相关波形拟合所换算的时间宽度是 830fs。此时的时间带宽积 $\Delta t \Delta \nu$ 算出为 0.34，其表示几乎获得了傅立叶变换极限脉冲。根据上述结果看出，根据本发明光脉冲串发生装置所获得的光脉冲是超高纯度的孤波。

(实施例 3)

本发明另一方式是具有图 20 所示结构的光源。其是由使用光调制器从 CW 光产生拍频光或者标准脉冲的标准脉冲发生部以及将其时间宽度

缩短的脉冲波形整形部构成的光脉冲串发生器。

标准脉冲由高速光调制器例如 LiNbO_3 调制器 (LNM: LiNbO_3 optical modulator) 和电场吸收效应型半导体光调制器等产生。通过由外部电信号驱动高速光调制器例如 LiNbO_3 光调制器和电场吸收效应型半导体光调制器等, 能够容易地产生与电信号同步的光信号。当将电脉冲信号用作为电信号时, 可获得与该电脉冲同样的光脉冲。显然, 脉冲重复频率和脉冲时间宽度被电子电路的频带所限制, 现状是, 这些分别限于 40GHz 和 $>10\text{ps}$ 。

本光源中, 标准脉冲通过脉冲波形整形部进行时间宽度缩短。在将使用光调制器所产生的标准脉冲进行非线性光纤脉冲压缩方面所成为问题的是该光纤长度。由光调制器所得脉冲的时间宽度顶多是 10ps 。当压缩这种比较宽的光脉冲时, 需要数十 km 以上的压缩用光纤。这是因为, 对于光谱频带为 40GHz 的光脉冲, 当施加群速度色散效果的影响时, 需要长的光纤。一般在有效使用基本孤波特征的压缩器的情况下, 确定该光纤长度的参数是孤波长度 Z_{soliton} 。图 21 示出了该值和输入脉冲宽度 Δt 的关系。在这里将 $10\text{ps}^2/\text{km}$ 用作为光纤色散值进行计算。随着 Δt 增大, Z_{soliton} 以其 2 乘的比例增大。例如, 对于 20ps 脉冲压缩, Z_{soliton} 是 10km 。如果在绝热孤波压缩过程中考虑 Z_{soliton} 光纤中的压缩率是 $2\sim 3$, 则为了将 20ps 脉冲压缩到几个 ps , 则至少需要 20km 以上的光纤。由于在这种长光纤中损失变大, 因此实现理想的压缩变得困难。

另一方面, 如实施例 1 中所示, 在通过最优化各对平均色散值和使用 HNLF 而改善了 CDPF 性能的 CPF 中, 实现了压缩光纤缩短和压缩脉冲品质保持。尽管这是对 160GHz 拍频所设计的 CPF, 不能够直接适用于 40GHz 拍频光和 $>10\text{ps}$ 光脉冲, 但是, 能够对输入光进行最优化。一般地, 尽管压缩光纤长度与重复频率的 2 次方成反比, 但在 CPF 的情况下, 色散光纤具体地仅仅 SMF 变得加长了。因此, 当 CPF 压缩时, 即使对 $>10\text{ps}$ 脉冲和 40GHz 拍频光, 压缩光纤长度也能够变成数千米量级。实际上, 对于本实施例所示 40GHz 拍频光即 12.5ps 脉冲, CDPF 的光纤长度顶多是 1.8km 。

图 22A 示出了本发明的一个形式。通过由 20GHz RF 信号驱动的多电极 LNM 载波抑制调制波长可变激光器输出的 CW 光 (波长 λ_{in}) 并获得

40GHz 拍频光。通过最优化 LNM 的工作点，有可能产生具有驱动 RF 信号之 2 倍频率的脉冲串，该方式被称为载波抑制调制方式。其是通过 EDFA 将该 40GHz 拍频光放大到 24dBm 并输入到 CPF 的结构。图 23A 和 B 示出 CPF 输入的 40GHz 拍频光的自相关波形和光谱波形。光谱分析器的波长分辨率是 0.01nm。拍频光的载波抑制比 (CSR) 是 19dB。使用的 CPF 是 HNLF 和 SMF 的 6 对结构。该 HNLF 的色散值和非线性系数分别是 -0.7ps/nm/km 和 24 1/W/km。图 22B 示出了该 CDPF 的色散和非线性系数的分布图。虚线表示各对的平均色散值。与实施例 1 相同，构成了各对平均色散值在前半部 3 对中增大以及在后半部 3 对中减少的分布图。希望关注的是，通过最优化这种色散分布图，即使为将绝热孤波压缩作为基础的方式，也能够缩短压缩光纤直到 1.8km。表 5 归纳出该 CPF 的各光纤长度。

表 5 CPF 的各对光纤长度

	HNLF 的长度	SMF 的长度
第一对	50m	100m
第二对	50m	200m
第三对	50m	300m
第四对	100m	500m
第五对	100m	150m
第六对	100m	80m

图 23 下部示出在 $\lambda_{in}=1556\text{nm}$ 时 CPF 输出脉冲串的自相关波形和光谱波形。为了比较，用虚线示出了 sech^2 波形。根据自相关波形所计算的时间宽度 Δt 是 3.3ps，基底/峰值比 R_{pp} 是 13dB。尽管在自相关波形上的消光比是 15dB 以上，但这是测量临界值。而且，时间带宽积 $\Delta t\Delta\nu$ 是 0.36，其表示几乎获得了傅立叶变换极限脉冲。在这里，希望关注的是，不仅自相关波形而且在光谱波形上实验结果和虚线也是很好吻合的。而且，还示出了 CSR 增大也被抑制的情况。根据这些结果看出，通过 CPF 产生了低噪声/高纯度的皮秒孤波串。

图 24 是 CPF 输出脉冲的 Δt 、 $\Delta t\Delta\nu$ 和 R_{pp} 与 λ_{in} 的依赖关系。获得了在测量范围 1530~1560nm 中几乎恒定的 Δt 和 $\Delta t\Delta\nu$ 。即使对于 R_{pp} ，在 1540~

1560nm 内也确保 $>13\text{dB}$ 。但是，在短波长区内显示出基底量增大的情况。这是因为，在短波长区域内 SMF 色散量不充分，换言之 SMF 具有正色散斜率。从上面的测量结果可看出，本压缩器具有 1540~1560nm 的工作频带。但是，要预先补充的是，还具有覆盖在此次测量范围之外直到 $>1560\text{nm}$ 之频带的可能性。

对于低 CSR 的光度 (tone) 光，通过脉冲压缩能够增强 20GHz 脉冲串成分。为了使该压缩器的容许 CSR 清晰，图 25 示出了在自相关波形上邻接脉冲的峰值 P_{neigh} 与 CSR 的依赖关系。为了比较，用白圈描绘出对于 2 模 CW 拍频光的实验结果。其示出了随着 CSR 的减少， P_{neigh} 减少，以及 20GHz 脉冲串成分增长的情况。为了使 $P_{\text{neigh}} > 0.9$ ，需要 17dB 或者以上的 CSR。这个值是一般使用多电极 LNM 而容易获得的值。

(实施例 4)

在这里，作为本发明另一方式，表示出通过 CPF 压缩的不是拍频光而是标准脉冲的例子。图 26A 是其结构图。其由 CW 激光器、光调制器和 CPF 构成。通过光调制器从 CW 光中产生光脉冲。在这里，使用高速 LNM，通过 40GHz 正弦波状电信号驱动它。但是，由于 LNM 的非线性输入输出特性，光输出变成时间宽度比正弦波还窄的脉冲形状。图 27 的上部示出了其自相关波形和光谱波形。显示出产生了置于该光谱上的高次梳状成分，由自相关波形所计算的脉冲时间宽度是 8ps。通过 EDFA 将该光脉冲放大达到 24dBm 并输入到 CPF。本例使用了实施例 2 的 CPF 后级 3 对。这是因为，实施例 2 之 CPF 前级 3 对的任务是从拍频光变换到孤波串，而在本构成中，通过 LNM 输出已经获得既已存在的孤波的光脉冲，因此不需要前级 3 对。图 26B 示出在这里使用的 3 对 CPF 之色散值 D 和非线性系数 γ 的分布图。表 6 归纳出该 CPF 各对的光纤长度。

表 6 CPF 的各对光纤长度

	HNLF 的长度	SMF 的长度
第一对	100m	500m
第二对	100m	150m
第三对	100m	80m

图 27 下部表示出 CDPF 输出脉冲的自相关波形和光谱波形。虚线是孤波波形。其显示出在自相关波形和光谱波形中实验结果和虚线很好地一致。从自相关波形所换算的时间宽度是 2.3ps。此时的 $\Delta t \Delta \nu$ 为 0.32，几乎获得了傅立叶变换极限脉冲。

在图 13 光源部件中噪声附加最多的是 EDFA。换言之，在不使用 EDFA 的方式中，能够产生更高品质的孤波串。基于这个考虑，图 28 示出了没有 EDFA 的光源的实施例。通过复用两台高输出 ($>50\text{mW}$) LD 的输出 CW 光获得拍频光 ($>50\text{mW}$)。由于该拍频光在下一级孤波变换和压缩中具有足够的光功率，因此不需要光放大。因此，能够产生噪声更少的孤波串。而且，由于能够省略 EDFA 所使用的泵浦 LD 驱动电路，因此装置自身的小型化也是优点之一。

(实施例 5)

这里，说明使用了 CPF 和 HNLF 中之拉曼放大 (SCRA: soliton compression in Raman amplification) 的波形整形器的光脉冲串发生器。图 29 是表示其结构的示意图。其是将通过耦合器复用 2 台 DFBLD 的输出 CW 光所获得的 2 模式 100GHz 拍频光输入到由 CPF 和 SCRA 构成的压缩系统的结构。在这里，希望关注的是，为了抑制 SCRA 光纤中的 SBS，CPF 被配置于 SCRA 的前级。CPF 是 HNLF 和单模光纤的 6 对结构，图 18 示出了其色散分布图。为了增强 SBS 抑制效果，在 CPF 中插入了 2 个低损耗光隔离器。

通过将使用该 CPF 被孤波变换的脉冲输入到 SCRA 而能够抑制 SCRA 光纤中的 SBS。为了验证它，图 30 示出了在不使用 CPF 和使用 CPF 时 SBS 光功率 P_{SBS} 和 SCRA 输出功率 P_{out} 与 SCRA 输入功率 P_{in} 的依赖关系。

其示出当不使用 CPF 时（图 30 上部），SBS 阈值是 15mW，与此相对，当使用 CPF 时（图 30 下部），SBS 阈值增加到 40mW 或者以上。

通过 SCRA 压缩被孤波变换的脉冲。SCRA 由 2.4km 长的低斜率 HNLF、反向激发用泵浦 LD（输出功率 0.8W）以及 2 台 WDM 耦合器构成。HNLF 的非线性系数、色散值和色散斜率分别是 25 1/km/W、1.0ps/nm/km 和 0.013ps/nm²/km。应注意的是，通过有效使用 HNLF，SCRA 光纤长度被量化到数千米量级。如果与需要数十千米量级的光纤相比，其减少到 1/10。

SCRA 所输入的脉冲随着在 HNLF 中传输受到拉曼放大并被绝热孤波压缩。图 31 用黑圈描绘出 SCRA 输出脉冲时间宽度 Δt 与拉曼放大 G 和输出功率 P_{out} 的依赖关系。虚线表示构成基本孤波激发功率的 P_{out} 。其示出在该虚线以上的区域中产生脉冲压缩并且随着 G 增大 Δt 从 2.1ps 减少到 840fs 的情况。为了使该压缩机构变得清楚，白圈描绘出 $\Delta t \times G$ 。希望关注的是，在产生压缩的区域中， $\Delta t \times G$ 变成恒定。从在绝热孤波压缩中该值变为恒定可知，本方式基于绝热孤波压缩。

图 32A 和 32B 分别是在增益为 2.4、9.4、11.6 和 12.6dB 中的 RA 输出脉冲串的自相关波形和光谱波形。为了比较，用虚线示出了 sech^2 波形。可以看出，不仅在自相关波形上而且在光谱波形上虚线和实验结果都很好一致，产生了高纯度孤波。希望关注的是，光谱波形中心波长附近的光脉冲信号成分和噪声成分的比被确保在 40dB 或者以上。从上述结果可看出，RA 输出脉冲是低噪声且高纯度的孤波。

（连续光光源的实施方式）

如上述，在光传输系统中，作为限制输入到光纤之光功率的主要因素可举出非线性现象。在这之中，在比较小的输入功率上容易产生受激布里渊散射（SBS: Stimulated Brillouin Scattering），由于所输入功率的一部分反向散射，从而对传输系统施加了坏的影响。本发明公开了使用光纤的非线性效应来抑制连续光光源的 SBS 的方法。

作为抑制 SBS 的方法，能够举出 2 个。第一个是使光源的光谱宽度变宽，第二个是使光源的峰值功率变小。本发明通过使用光纤的非线性现象

即 XPM、SPM、四波混合 (FWM: Four-Wave Mixing) 来抑制 SBS。如果具体说明, 本发明是通过利用光纤的非线性现象来加宽多模连续光源之纵模的光谱宽度或者通过抑制峰值功率来抑制 SBS 的方法和装置。

XPM、SPM 具有加宽光源之光谱宽度的效果, 由此能够抑制 SBS。这是因为, 如果光谱宽度变宽, 则布里渊增益变小, 作为结果, SBS 阈值变大。图 33 是其机理的模式图。

一般地, 由于在连续光中通过光纤中的克尔 (Kerr) 效应难以引起折射率变化, 因此一般认为这些非线性现象几乎不发生。但是, 通过使用由将多模连续光应用在光源上引起的在多模之间发生的拍频, 能够容易地产生这些非线性现象。与此相对, 在现有技术的 SBS 抑制中, 其主要仅仅对脉冲光适用。但是, 根据本发明, 通过将多模连续光适用于光源, 即使连续光也能够产生非线性现象, 结果, 能够抑制 SBS。

图 34 是表示利用 FWM 抑制 SBS 的机理的模式图。图 34 中, 改变光源的多模式的功率分配, 由此使每一个模式的功率变小。结果, 能够通过使各纵模的布里渊增益变小来抑制 SBS。

(实施例 6)

用于抑制 SBS 的连续光源由在多模式下振荡的半导体激光器以及零色散波长 1461nm 的高非线性光纤 (HNLF: Highly Nonlinear Fiber) 构成。而且, 对于 HNLF, 其非线性常数 $\gamma=24.5$ /W/km, 使用光纤长度为 500m。尽管光纤越长和非线性常数越大就越容易产生非线性现象和越能够抑制 SBS, 但与此相伴, 在 HNLF 中也容易产生 SBS。而且, HNLF 变得越长, 插入损失就变得越大。在加入这些之后来确定 HNLF 的长度和非线性系数。为了抑制 HNLF 前后的反射光, 根据需要还可以配置隔离器。隔离器被配置在 HNLF 入射前后传输线路的任何一个或者两个上。

图 35 还示出 SBS 测量用结构。在 HNLF 出射侧, 顺序配置了 20dB 分接头 (tap)、测量 SBS 的作为被测量光纤的非零色散偏移光纤 (nonzero dispersion shifted fiber) 即 TrueWave[®]RS 光纤 (TW-RS)。TW-RS 其长度假设为 40km, 其为足以消除 SBS 的长度。20dB 分接头是将用于测量来自 TW-RS 之反射光功率的反射监控功率计 (Reflection Monitor Power Meter)

和用于测量入射光功率的通过量监控功率计 (Throughput Monitor Power Meter) 光学连接到 SBS 测量用传输线路上的装置。SBS 的值通过使用这些测量值算出。而且, SBS 的值作为 (Return Loss; SBS 值) [dB] = (Reflection Power) [dBm] - (Throughput Power) [dBm] 进行评价。

为了明确 SBS 的抑制效果, 测量如图 35 实验系统所示那样的当将在多模式下振荡的半导体激光器的连续光通过 HNLF 时的测量传输线路中的 SBS 值 (本实施例) 和如图 36 实验系统所示那样的当不通过 HNLF 时的测量传输线路中的 SBS 值 (比较例)。在图 35、图 36 的实验系统上引入了衰减器 (Attenuator), 这是因为, 为了测量在同一驱动条件下半导体激光器的 SBS 阈值, 要使得其输出能够改变。

下面表示使用图 35、图 36 的 SBS 测量用传输线路的实验结果。实验中, 进行了当将从半导体激光器输出的连续光通过 HNLF 时以及不通过 HNLF 时的 SBS 值、光谱和 RIN 特性的评价。

图 37、图 38 分别是表示通过使用 1455nm 和 1461nm 半导体激光器来测量 SBS 值的结果的曲线。确认出由通过 HNLF 所引起的 SBS 阈值变大。特别地, 在光纤零色散波长 1461nm 和半导体激光器中心波长相近的 1461nm 半导体激光器中, SBS 抑制效果是显著的。一般地, 由于光源波长越接近光纤的零色散波长就越容易产生 FWM, 因此最好使半导体激光器的波长与零色散波长一致。

图 39 到图 42 分别表示当将 1455nm 和 1461nm 半导体激光器的连续光通过 HNLF 时以及不通过 HNLF 时的光谱。此时, 纵轴的光输出刻度使用了以总功率被标准化到 0dBm 的值。从当使 1451nm 的半导体激光通过 HNLF 时以及不通过时的光谱即图 39 和图 40 的比较、以及当使 1461nm 的半导体激光通过 HNLF 时以及不通过时的光谱即图 41 和图 42 的比较中可知, 由于通过 HNLF, 整个光谱因 FWM 而变宽。特别是, 在与光纤零色散波长 1461nm 一致的 1461nm 半导体激光下, 光谱显著地变宽。可以知道, 该光谱变宽的波带和 SBS 被抑制的波带吻合。就是说, 可以认为, SBS 抑制效果的主要原因是因为通过 FWM 使光谱变宽了。

图 43 示出由 FWM 引起的光谱加宽的波带; 当将 1461nm 半导体激光通过 HNLF 时以及不通过 HNLF 时的 RIN 特性的测量结果。如图 43 所示,

从 RIN 特性的测量结果知道,通过 FWM 没有引起 RIN 的恶化。在根据电控制的 SBS 抑制技术中,在提供调制和低频扰动的频率下,存在 RIN 恶化的趋势,但在根据 FWM 的 SBS 抑制技术中,优点是几乎没有 RIN 的恶化。

从上述实验结果可知,通过将半导体激光模块输出的多模连续光通过 HNLF,抑制了 SBS。还知道当抑制 SBS 时几乎没有 RIN 的恶化。SBS 抑制的主要原因是通过 FWM,为了通过 FWM 使各纵模的峰值变小,通过控制光纤的非线性常数和光纤长度而能够进行有效抑制。

下面,说明使用了上述连续光光源的 SBS 的抑制装置和方法的拉曼放大器。

图 44 是拉曼放大器的结构图。拉曼放大器具有正向激发型、反向激发型和双向激发型。正向激发光源要求特别优良的 RIN 特性。这是因为,在来自正向的激发中,由于激发光和信号光在光纤上一起传输,激发光的 RIN 特性要在信号光上产生影响。就是说,当激发光的 RIN 特性坏时,恐怕信号光的 RIN 特性也要变坏。

因此,进行开发 RIN 特性优良的半导体激光器作为拉曼放大器的正向激发用光源。在一般起用于拉曼放大的激发光源中带有用于固定波长的光纤布拉格光栅(FBG: Fiber Bragg Grating),但是如果附加 FBG,则存在 RIN 恶化的趋势。因此,为了改善 RIN,开发了将光栅安装在半导体激光器芯片内部的半导体激光器,使得即使没有 FBG 也使波长固定。但是,如果将光栅附加在内部,则存在纵模的光谱变窄以及容易产生 SBS 的趋势。因此,如果将即使抑制 SBS 也不使 RIN 恶化的本发明应用于将光栅附加在其内部的半导体激光器上,则作为拉曼放大器的正向激发起用光源,这将是非常有效的手段。而且,能够获得能够解决 RIN 特性问题以及 SBS 问题两者的拉曼放大器。显然,将本发明 SBS 抑制部件应用于将光栅安装在内部的半导体激光器上的方式在用于改善 RIN 和 SBS 两者方面将是有效的,也可以将本发明的 SBS 抑制部件应用于在其内部没有光栅的半导体激光器中。

(实施例 7)

参考图 45，说明比实施例 6 更具有 SBS 抑制效果的利用光纤非线性现象的连续光光源的 SBS 的抑制装置和抑制方法。

SBS 抑制连续光光源由 2 个连续光光源、用于复用这两个光源之输出光的复用器、用于使通过复用器后的各个连续光光源的偏振光成为消偏振光的消偏振器以及用于引起非线性现象的非线性现象发生器构成。这里，不一定需要消偏振装置，但是，当非线性现象发生器具有偏振光依赖性时，为了能够更有效地产生非线性现象，还使用消偏振装置的方式将是有效的。

这里，在 2 个连续光光源当中至少一个使用在多模式下振荡的光源。另外一个光源选择多模或者单模光源，使得当将 2 个光源相加组合后的模式频率间隔不会成为等间隔。例如，可以将模式间隔不同的多模光源组合。而且，当使用模式间隔相同的 2 个多模光源时，可以使各个光源被相加组合后的模式频率不会变为等间隔。

复用器例如可以使用偏振波复用器。当偏振波复用时，为了更有效地复用，可以使光源的输出和偏振波复用器所使用的光纤变为偏振波保持光纤。

消偏振器既可使用晶体类型也可使用光纤类型。为了更有效地进行偏振波复用，可以使偏振波复用器的输出所使用的光纤成为偏振波保持光纤。

作为表示光纤中容易产生非线性现象的参数，一般使用非线性相移 (nonlinear phase shift)：

$$\Phi = \textcircled{C} \int P_s(z) dz$$

如该式所示，非线性常数 \textcircled{C} 越大或者光纤越长，则非线性现象变得越大。由于光纤零色散波长接近于 2 个光源的波长使得非线性现象之一即 FWM 容易产生，因此用于引起非线性现象的光纤能够更有效地抑制 SBS。由于光纤长度越长以及非线性长度越大就越容易产生非线性现象，因此能够更有效地抑制 SBS。

使用图 46 说明利用非线性现象的连续光光源的 SBS 的抑制装置和抑制方法的具体实施方法。这次使用传输线路用光纤本身作为非线性现象发生器。就是说，为了抑制在传输线路中的连续光光源的 SBS，使用在传输

线路中产生的非线性现象。使用非零色散偏移光纤（nonzero dispersion shifted fiber）即 TrueWave RS 作为传输线路。而且，TrueWave RS 使用零色散波长 1439.4nm、非线性常数 $\gamma=2 \text{ /W/km}$ 以及光纤长度 20km。使用 2 个在 1442nm 附近的在多模下振荡的半导体激光器作为连续光光源。连续光光源的发射波长与光纤的零色散波长一致，使得非线性现象之一即 FWM 容易产生。半导体激光器的输出使用用于保持偏振波的偏振波保持光纤。作为偏振波复用器，使用偏振波保持型复用器。作为消偏振器，使用光纤型消偏振器。使用用于使消偏振器（Depolarizer）的输出入射到 TrueWave RS 的 WDM 复用器。

图 47 示出单独驱动 LD1 和 LD2 时的 SBS 测量结果。对于 SBS 测量，在 TW-RS 的输入部中根据输入功率和反射光功率求得。可以知道，LD1 在 70~170mW 之间其回光损失（Return Loss）约-31dB，由 SBS 引起的反射光功率为瑞利（Rayleigh）散射水平以下。与此相对，可以知道，LD2 在 90~190mW 之间，由 SBS 引起的反射光功率为瑞利散射水平以上。但是，当通过各种组合进行驱动使得 LD1 和 LD2 的合计功率变为 250mW 时，回光损失为-31dB，由 SBS 引起的返回光功率为瑞利散射水平以下。就是说，通过驱动 LD1 和 LD2 两者，能够抑制 SBS。

图 48A~D 示出 TW-RS 传输后的光谱。图 48A 是用 LD1 单独将 125mW 输入到 TW-RS 时的光谱（条件 1-1）。图 48B 是用 LD2 单独将 125mW 输入到 TW-RS 时的光谱，调整使得 LD2 的纵模位置稍微与 LD1 的纵模位置偏离（条件 2-1）。图 49A 示出将图 48A 和图 48B 放大的图。图 48C 是用 LD2 单独将 125mW 输入到 TW-RS 时的光谱，调整使得 LD2 的纵模位置稍微与 LD1 的纵模中心偏离（条件 2-2）。图 49B 示出将图 48A 和图 48C 放大的图。图 48D 示出通过来自 LD1 的条件 1-1 和通过来自 LD2 的条件 2-1 同时将光输入到 TW-RS 时（条件 both-1）的光谱以及通过来自 LD1 的条件 1-1 和通过来自 LD2 的条件 2-2 同时将光输入到 TW-RS 时（条件 both-2）的光谱。图 49C 是将图 48D 放大的图。如果将单独驱动 LD 的图 48A-C 与 2 个同时驱动 LD 的图 48D 进行比较，可以知道光谱的包络线宽了。如果将放大图即图 49A-B 与图 49C 进行比较，可以知道由 2 个同时驱动 LD 引起的纵模的峰值功率变小了。特别是，

在条件 both-2 下，纵模变得几乎平坦。通过使包络线变宽以及纵模的峰值功率变小而具有抑制 SBS 的效果。包络线变宽是因为，由于通过驱动 2 个 LD 引起纵模的根数变多，使得容易产生 FWM。纵模的峰值功率变小是因为，如图 50 所示，在各个 LD 的纵模之间产生由 FWM 引起的新的波长，在各个 LD 的纵模和新的波长下又产生 FWM 和分配功率。

在这里，尽管将传输线路自身用作为非线性现象发生器，但也可以把非线性现象发生器假想为连续光光源。如果将非线性系数大的光纤用作为非线性现象发生器，则即使将光纤长度变短，也能够获得同等的效果。

（实施例 8）

为了获得由多个波长构成的 SBS 被抑制的连续光光源，如图 51 所示，可以在各个波长下进行 SBS 抑制，如图 52 所示，也可以在复用各个波长之后汇集进行 SBS 抑制。当复用各个波长时，可以使用 WDM 复用器，也可以使用马赫—曾德复用器。

（实施例 9）

在图 45 的 SBS 抑制光源中，为了求得用于抑制 SBS 的光纤条件，通过模拟研究 FWM。各连续光光源假定为纵模数 8 根、纵模间隔 0.2nm（35GHz）的光源。但是，由于由消偏振装置引起的各连续光光源的相邻纵模直行，相邻纵模假定为不会产生 FWM 的模式。就是说，根据模拟，将各连续光光源的纵模数作为 4 根、纵模间隔作为 0.4nm（70GHz）。图 53 示出模拟的结构图。

图 54A~C 表示在 1460nm 中当色散为 0, 1, 5 ps/nm/km 时的模拟结果。纵轴的“功率的变化”表示在输入到 HNLF 的前后功率的变化量。在这里，示出了总功率和峰值功率两者。作为 SBS 抑制光源，一边维持总功率一边降低峰值功率是有效的。从图中可以看出，非线性常数越大以及光纤长度越长就越具有峰值功率下降的趋势。而且可以知道，如果色散变大时，存在峰值功率不会大幅下降的趋势。

为了估计非线性常数、功率和光纤长度对功率的变化所施加的影响，图 55 示出了将非线性常数、功率和有效光纤长度 (L_{eff}) 的积 ($P\gamma L_{\text{eff}}$) 取

为横轴的情况。这里 $L_{\text{eff}} = (1 - \exp(-\alpha_p L)) / \alpha_p$, α_p 表示光纤损失。如图 55 所示可以知道, 当色散为 0 ps/nm/km 附近时, 即使在不同的非线性常数、光纤长度和纵模功率下也具有相同的动作。例如, 当希望纵模功率降低 3dB 时, 可以设计非线性发生装置的光纤使得 $P\gamma L_{\text{eff}}$ 变为 0.05 以上。从 $P\gamma L_{\text{eff}}$ 在 0.13 之前峰值功率具有减少趋势可知, 优选在比 0.13 更小的范围内设计 $P\gamma L_{\text{eff}}$ 。

为了估计色散对功率的变化施加的影响, 横轴为色散、纵轴为峰值功率降低 3dB 时的 $P\gamma L_{\text{eff}}$ (图 56)。所谓峰值功率降低 3dB 意味着在没有发生 SBS 的区域能够输入到光纤的功率变为 2 倍。从图 56 可知, 在具有某个非线性常数的光纤中, 如果色散超过某个值, 不会使 $P\gamma L_{\text{eff}}$ 急剧增大以及峰值功率不会降低。因此, 可以将具有比使 $P\gamma L_{\text{eff}}$ 急剧变大的色散值之更小色散的光纤用作为非线性发生装置。尽管没有进行负色散时的模拟, 但由于色散的绝对值是重要的, 因此示出与正色散相同的趋势。例如, 当非线性常数为 23 /W/km 时可以在 $-15 < \text{色散} < 15$ 的范围内设计, 当非线性常数为 11 /W/km 时可以在 $-5 < \text{色散} < 5$ 的范围内设计, 当非线性常数为 5 /W/km 时可以在 $-2 < \text{色散} < 2$ 的范围内设计。

(实施例 10)

在图 55 的 SBS 抑制光源中, 为了求得用于抑制 SBS 的各 LD 的间隔, 通过模拟研究 FWM。模拟条件与实施例 4 相同, 光纤使用在 1460nm 其色散为 0ps/nm/km、非线性常数为 23 /W/km 的光纤。图 57 示出当使纵模 $1-m$ 和纵模 $2-m$ ($m=1, 2, 3, 4$) 作为参数改变时峰值功率的改变量。如图 57 所示可知, 当各 LD 的波长间隔是纵模间隔 0.4nm (70GHz) 的 1/2 即 0.20nm (35GHz) 以及 1/4 即 0.10nm (17.5GHz) 时, 峰值功率没有太多减少。但是, 在变为 1/8 即 0.5nm (8.75GHz) 时, 仅仅能够抑制与当各 LD 的波长间隔不是纵模间隔 0.4nm (70GHz) 的整数分之一时相同的峰值功率。(当为 0.2nm、0.4nm、0.8nm 时, 根据波长, 变为 0.4nm 整数分之一, 但根据频率, 变成不是完全的整数分之一) 各 LD 的波长间隔为纵模间隔 0.4nm (70GHz) 的整数分之一的情况是因为复用后的纵模排列在等间隔的光栅上, 是因为在该光栅之外没有新产生的 FWM。因此, 为了抑

制峰值功率，可以使复用后的纵模不排列在等间隔的光栅上。

（光整形器、光再现系统的实施方式）

下面，说明波形整形器、光再现系统的实施方式。附图中，相同或者类似部分上给出了相同或者类似的标记。附图是模式图，需要注意其与实际情况有差别。而且很显然，即使附图之间，也包含尺寸关系和比率相互不同的部分。

波形整形器能够兼有波形整形和压缩两者。就是说，如果连接2个这种波形整形器，就能够进行波形整形和压缩。

（实施例 11）

首先说明涉及实施例 11 的波形整形器。该波形整形器是用于将输入光变换成孤波光的装置。图 58A 是表示波形整形器结构的模式图，图 58B 是表示实施方式 1 波形整形器的群速度色散 D 之分布的一个例子的曲线。

如图 58A 所示，本实施例 11 的波形整形器具有交互连接高非线性光传输线路 1a, 1b, 1c, 1d, 1e 和低非线性光传输线路 2a, 2b, 2c, 2d, 2e 的结构，高非线性光传输线路 1a, 1b, 1c, 1d, 1e 由非线性系数为例如 $3\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 以上优选为 $5.0\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 以上的例如高非线性光纤（Highly Non-linear Fiber）形成，低非线性光传输线路 2a, 2b, 2c, 2d, 2e 由非线性系数为例如 $3\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 以下优选为 $1\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 以下的例如单模光纤（Single Mode Fiber）形成。而且，在这里，高非线性光传输线路和低非线性光传输线路的个数不一定需要为 5 个，可以为 6 个以上，也可以为 4 个以下。

如图 58B 所示，高非线性光传输线路 1a~1e 被构成为其 2 次色散值 β_2 的绝对值具有 4.0 以上的相等的值，各个传输线路长度 $L_a\sim L_e$ 成为 $L_a > L_b > L_c > L_d$ 。例如，根据在长度方向行进使传输线路长度变短，使得为 $L_a=100\text{m}$, $L_b=50\text{m}$, $L_c=25\text{m}$ 等。

本实施例 11 的波形整形器通过在长轴方向上减少高非线性光传输线路 1a~1e 的传输线路长度来实现等价的色散减少光纤。具体地，当将高非线性光传输线路 1a 和低非线性光传输线路 2a、高非线性光传输线路 1b 和低非线性光传输线路 2b 等配对并且考虑各对中群速度色散 D ($=$ (—

$2\pi c/\lambda^2) \beta_2)$ 之值的平均值时, 在高非线性光传输线路和低非线性光传输线路对中 2 次色散值的绝对值能够看作为在长轴方向上减少。因此, 当将光输入到本实施方式 1 的波形整形器中时, 随着在波形整形器中传输而进行孤波绝热压缩, 所输出的光变为孤波光。

高非线性光传输线路 1a~1e 由于由非线性系数包括与例如 $3\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 以上优选为 $5.0\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 一样高的值的光传输线路形成, 因此能够使色散性能变高。一般地, 为了进行孤波绝热压缩, 需要在光传输线路中使非线性性能和色散性能平衡。因此, 与如现有技术中仅仅由低非线性性能光传输线路构成时需要抑制 2 次色散值为低的情况不同, 在本实施例 1 的波形整形器中, 与非线性系数增大相对应, 能够使色散性能具体地为 2 次色散值的绝对值增加。

因此, 在本实施例 11 的波形整形器中, 能够使 2 次色散值的绝对值增加, 以及通过使用 2 次色散值绝对值高的高非线性光传输线路 1a~1e 能够缩短光传输线路的传输长度。已经知道, 理论上为了将输入光整形为孤波光所需要的最低限度的传输线路长度即孤波周期一般与 2 次色散值的绝对值相对应而确定, 在 2 次色散值的绝对值增大的同时, 孤波周期变短。在本实施例 1 的波形整形器中, 由于使用高非线性光传输线路 1a~1e, 因此能够使 2 次色散值的绝对值变大, 其结果, 在整个波形整形器中, 能够使传输线路长度短和实现小型的波形整形器。

具体地, 下面说明输入了具有 100mW 峰值功率之 3ps 脉冲时的波形整形器结构的一个例子。使用非线性系数为 $15\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 的高非线性光纤作为高非线性光传输线路 1a~1e, 使用单模光纤作为低非线性传输线路 2a~2e。通过使用这些而进行最优化的结果, 波形整形器的特性如下。即, 非线性长度为 0.67km, 色散距离为 0.14km, 2 次色散值绝对值的平均值为 $4.3\text{ps}^2/\text{km}$, 孤波周期是 0.25km。由此, 整个波形整形器的传输线路长度为 $0.25\text{km}\sim 0.67\text{km}$, 与现有技术的 $8\text{km}\sim 20\text{km}$ 相比, 其能够做得非常短, 从而能够实现小型的波形整形器。

图 59 是表示使用这种结构波形整形器时自相关波形变化的曲线。图 59 上层表示波形整形器所输入的输入光的自相关波形, 图 59 下层表示从波形整形器输出的输出光的自相关波形。如图 59 下层曲线所示, 虽然传

输线路长度短，但通过上述结构的波形整形器仍获得了足够的孤波光。

下面，说明本实施例 11 波形整形器的优点。本实施例 11 的波形整形器通过使整个传输线路长度缩短，在能够使整体小型化的同时，还具有其他优点。首先，通过使传输线路长度变短，能够抑制因光损失引起的强度的降低。作为光传输线路，虽然一般所使用的光纤是低损失的，但当经过数 km 传输光时，就不能够忽视在光纤中的光损失。

但是，在本实施例 11 的波形整形器中，由于能够将输入光的传输距离抑制在 0.25km~0.67km，因此能够将光损失抑制在实用中不构成问题的程度。

通过使输入光传输距离变短，能够比现有技术更有效地抑制其他非线性效应例如受激布里渊效应地发生。通过抑制受激布里渊效应的发生，使得能够避免被输出孤波光的强度饱和，使得能够输出高强度的孤波光。

在本实施例 11 的波形整形器中，通过作为将高非线性光传输线路和低非线性传输线路组合的结构，还具有次要的优点。作为高非线性光传输线路，一般所使用的高非线性光纤目前不容易精密地进行色散控制，单独构成色散减少传输线路是困难的。但是，本实施例 11 的波形整形器由于通过控制高非线性光传输线路的传输线路长度来等价实现色散减少传输线路，因此虽然使用了高非线性光纤，但是仍然能够期待进行精密的色散控制。即，其具有的优点是，即使当没有获得希望的色散特性时，通过调整传输线路长度，仍然有可能进行等价的色散控制。

（实施例 11 的变形例）

下面，说明本实施例 11 波形整形器的变形例。变形例的波形整形器具有将非线性系数为例如 $3\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 以上优选为 $5\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 以上、2 次色散值的绝对值相互不同的多个高非线性光传输线路进行组合的结构。

图 60 是表示变形例的波形整形器之色散 D 分布的一个例子的曲线。如图 60 所示，变形例的波形整形器具有顺次连接高非线性光传输线路的结构，使得随着在长轴方向行进其 2 次色散值的绝对值减少。即使在通过这种结构构成波形整形器的情况下，也能够等价地实现色散减少传输线路。通过使用高非线性光传输线路，与图 58A 所示结构的波形整形器相同，

能够使传输线路长度变短。

(实施例 12)

下面,说明涉及实施例 12 的波形整形器。图 61 是表示涉及实施例 12 的波形整形器的结构的模式图。涉及实施例 12 的波形整形器是为了抑制受激布里渊散射的发生而在实施方式 1 的波形整形器中配置了光隔离器的装置。下面,参考图 61 说明本实施例 12 的波形整形器。

如图 61 所示,实施例 12 的波形整形器具有交互连接高非线性光传输线路 1a, 1b, 1c, 1d, 1e 和低非线性光传输线路 2a, 2b, 2c, 2d, 2e 的结构,高非线性光传输线路 1a, 1b, 1c, 1d, 1e 由非线性系数为例如 $5.01\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 的例如高非线性光纤形成,低非线性光传输线路 2a, 2b, 2c, 2d, 2e 由非线性系数为 $1\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 以下的例如单模光纤形成。而且,本实施例 12 的波形整形器具有将光隔离器 3a, 3b 配置在距输入端 4 的距离变得比孤波周期更短的位置上。具体地,在低非线性光传输线路 2a 和高非线性光传输线路 1b 之间插入光隔离器 3a,在低非线性光传输线路 2b 和高非线性光传输线路 1c 之间插入光隔离器 3b。而且,高非线性光传输线路 1a~1e 和低非线性光传输线路 2a~2e 由于具有与实施方式 1 相同的结构,因此这里说明省略。

光隔离器 3a, 3b 是在波形整形器内部用于抑制受激布里渊散射发生的装置。光隔离器 3a, 3b 具有透过在长轴方向上传输的光以及遮蔽回光的功能,其由例如折射率上具有各向异性的复折射晶体、波长板、法拉第旋光体等组合而形成。

下面,说明将光隔离器 3a, 3b 配置于距输入端 4 的距离比孤波周期更短的位置上的理由。本申请发明人测量了配置光隔离器的位置与发生受激布里渊散射的输入光强度(以下称为“SBS 阈值强度”)之间的相关关系,并进行了配置光隔离器位置的最优化。

首先,说明将本实施例 12 的波形整形器仅仅通过交互组合高非线性光传输线路 1a~1e 和低非线性光传输线路 2a~2e 的结构来构成而不配置光隔离器的情况。当不配置光隔离器时, SBS 阈值强度变为 50mW, 当输入光强度变为 50mW 以上时, 由受激布里渊散射引起的回光的强度急剧增

加，确认出从波形整形器输出的光的强度饱和。在低非线性光传输线路 2d 和高非线性光传输线路 1e 之间配置光隔离器并进行测量，结果，与没有配置光隔离器的情况相同，SBS 阈值强度还是 50mW。当使波形整形器更长、将光隔离器配置在距输入端 4 更远的位置时，SBS 阈值强度仍然是 50mW，没有发现因插入光隔离器引起 SBS 阈值强度的改善。

另一方面，当为在低非线性光传输线路 2c 和高非线性光传输线路 2d 之间配置光隔离器的结构的情况下，SBS 阈值强度被改善达到 75mW，显然，由于插入光隔离器改善了 SBS 阈值强度。进一步测量的结果，当在低非线性光传输线路 2b 和高非线性光传输线路 2c 之间配置光隔离器时 SBS 阈值强度为 100mW，当在低非线性光传输线路 2a 和高非线性光传输线路 1b 之间配置光隔离器时 SBS 阈值强度变为 150mW。从这些测量结果可知，当将光隔离器配置在距输入端 4 的距离变为一定值以下的位置上时，可以发现 SBS 阈值强度一定的改善。

从这些测量结果可以清楚，在研究了 SBS 阈值强度被改善的光隔离器插入位置之后知道，将光隔离器配置在距输入端 4 的距离比孤波周期还短的位置上是有效的。如以前说明的，孤波周期是在输入光被变换成孤波光之前与作为必要的传输线路长度相对应的值。即，受激布里渊散射主要在输入光被变换成孤波光的途中产生，通过将光隔离器配置在距输入端 4 的距离比孤波周期还短的位置上，能够抑制受激布里渊散射的发生。另一方面，输入光变换成孤波光之后，几乎没有受激布里渊散射的发生，即使将光隔离器配置在比孤波周期还远的地方，也几乎不会见到 SBS 阈值强度的改善。

因此，在本实施方式 2 的波形整形器中，采用这种结构，其通过将光隔离器 3a, 3b 配置在距输入端 4 的距离比孤波周期还短的位置上来改善 SBS 阈值强度，并能够输出光强度大的孤波光。

图 62A~图 62D 是用于说明因配置光隔离器引起 SBS 阈值强度改善的程度的曲线。具体地，图 62A 表示在为了比较而没有配置光隔离器的波形整形器中的回光的强度，图 62B~图 62D 分别表示在仅仅配置了光隔离器 3a 时、仅仅配置了光隔离器 3b 时以及配置了光隔离器 3a, 3b 时的回光的强度。

从图 62A 曲线可以清楚, 当没有配置光隔离器时, 在输入光强度为 50mW 以上时, 因受激布里渊散射引起的回光的强度急剧增加, 即 SBS 阈值强度为 50mW。另一方面, 如图 62B~图 62D 所示, 通过配置光隔离器而显著改善 SBS 阈值强度, 特别是, 当配置光隔离器 3a, 3b 两者时, SBS 阈值强度被改善达到 200mW 以上。从图 62D 的曲线可以清楚, 为了有效抑制受激布里渊散射的发生, 采用将光隔离器多个配置在距输入端 4 的距离为比孤波周期更短的区域上的结构也是有效的。

下面测量当输入高强度光时由本实施例 12 的波形整形器所获得的输出光的光特性。图 63A 是表示输出光自相关波形的曲线, 上层涉及没有安装光隔离器的波形整形器, 下层涉及本实施方式 2 的波形整形器。图 63B 是表示输出光的光谱的曲线, 上层涉及没有安装光隔离器的波形整形器, 下层涉及本实施例 12 的波形整形器。

当输入高强度的光时, 在没有光隔离器的波形整形器中, 由于发生受激布里渊散射而限制了光传输线路中的光强度的值。因此, 传输中的光强度值被限制在一定的值上, 由于没有获得足够的强度, 因此不能满意地进行孤波变换, 由此构成图 63A 的上层和图 63B 的上层所示那样的曲线。

另一方面, 本实施例 12 的波形整形器通过配置光隔离器而能够抑制传输中受激布里渊散射的发生。因此, 产生孤波压缩现象, 并且获得希望的皮秒孤波脉冲串, 能够获得图 63A 的下层和图 63B 的下层所示那样的曲线。

可以采用光隔离器 3a 或者光隔离器 3b 配置于高非线性光传输线路或者低非线性光传输线路途上的结构, 但优选配置于不同光传输线路的结合部上。通过配置于结合部, 不仅避免了波形整形器制造过程的烦杂化, 而且例如通过形成将不同光传输线路的端部作为各自两端尾光纤的光隔离器, 能够减少不同光传输线路间的热粘节点数。由于在光传输线路间的热粘节点部分中发生一定的光损失, 因此本实施例 2 的波形整形器具有这样的优点, 通过减少热粘节点数, 能够降低波形整形器中的光损失。

当如图 61 所示波形整形器由高非线性光传输线路和低非线性光传输线路之间的组合形成时, 优选将光隔离器配置于高非线性光传输线路的前级。由于受激布里渊散射是一种非线性光学效应, 因此在非线性系数高的

高非线性光传输线路中特别容易发生。因此，通过将隔离器设置在高非线性光传输线路的前级，能够通过遮蔽在高非线性光传输线路中发生的回光来更有效地抑制受激布里渊散射的发生。

将光隔离器插入实施例 11 之变形例的波形整形器中的结构对于抑制受激布里渊散射也是有效的。在这种情况下，通过将光隔离器配置于距输入端的距离比孤波周期更短的范围，能够改善 SBS 阈值强度，并且能够输出具有高的光强度的孤波光。

(实施例 13)

下面，说明实施例 13 的光脉冲发生装置。图 64 是表示本实施例 13 光脉冲发生装置结构的模式图。光脉冲发生装置的结构大致为孤波光源 6 和光脉冲压缩器 7。孤波光源 6 是对光脉冲压缩器 7 供给孤波光的装置，光脉冲压缩器 7 是对被输入的孤波光通过施加孤波绝热压缩来压缩脉冲宽度的装置。

孤波光源 6 包括用于输出例如拍频光的发光部 8 和将从发光部输出的光整形为孤波光的波形整形器 9。光脉冲压缩器 7 包括：用于从外部输入光的输入端 10；输入端 10 所连接的脉冲压缩传输线路 11；以及输出端 12。在脉冲压缩传输线路 11 和输出端 12 之间配置了复用器 13，激发光源 14 被连接在复用器 13 上，其具有可对脉冲压缩传输线路 11 提供激发光的结构。

首先说明孤波光源 6。构成孤波光源 6 的发光部 8 使用本实施方式 3 中输出拍频光的结构。具体地，发光部 8 具有这种结构，其包括：输出频率 f_0 激光的半导体激光元件 15；输出频率 $f_0 + \Delta f$ 激光的半导体激光元件 16；用于复用从半导体激光元件 15、16 输出的激光的复用器 17。通过复用频率 f_0 、 $f_0 + \Delta f$ 的激光，发光部 8 具有输出重复频率 Δf 之拍频波的功能。

构成孤波光源 6 的波形整形器能够使用任意结构的装置，但是优选使用实施方式 1 或者 2 记载的波形整形器。通过使用实施方式 1 或者 2 的波形整形器，能够使装置小型化以及提供高输出的孤波光。

下面，说明光脉冲压缩器 7 的结构。首先，脉冲压缩传输线路 11 由具有异常色散即正色散值的光纤形成。脉冲压缩传输线路 11 其非线性系

数 具有例如 $3\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 以上、优选为 $5\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 以上、更优选为 $15\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 的值。下面，作为脉冲压缩传输线路，进行说明非线性系数 成为 $15\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 的线路。

激发光源 14 是用于对脉冲压缩传输线路 11 提供激发光的装置。具体地，激发光源 14 由例如半导体激光元件构成，具有对脉冲压缩传输线路 11 输出规定波长激光的功能。而且，其做成具有这种结构，通过在本实施方式 3 中激发光前进方向和被放大光前进方向变为相反方向的所谓反向激发方式来进行拉曼放大。但是，可以采用激发光和被放大光的前进方向变为相同的正向激发方式，也可以采用使正向激发方式和反向激发方式组合的双向激发方式。

从激发光源 14 输出的光假设为相对被放大光的波长具有在 100nm 短波长侧偏移的波长的光。拉曼放大为的是相对激发光波长能够获得在 100nm 长波长侧偏移的波长中的放大增益峰值。

下面，说明本实施例 13 光脉冲压缩器的工作。首先，从外部将满足规定条件的孤波光通过介入输入端 10 输入到脉冲压缩传输线路 11。这里，作为一个例子，本实施例 2 的光脉冲压缩器所输入的孤波光假设为满足基本孤波条件的光，所输入的孤波光在脉冲压缩传输线路 11 中被绝热孤波压缩，被脉冲压缩的光从输出端 12 被输出到外部。

下面详细说明脉冲压缩传输线路 11 中的孤波绝热压缩。满足基本孤波条件的孤波光具有这样的性质，在其被输入到本实施方式 3 的光脉冲压缩器之后，将保持在脉冲压缩传输线路 11 中历经传输的基本孤波条件即孤波次数变为 1 的条件。孤波次数 N 由下面的 (1) 式给出。

$$N=(\gamma PT^2/|\beta_2|)1/2 \quad (1)$$

这里， γ 是脉冲压缩传输线路 11 的非线性系数， β_2 是脉冲压缩传输线路 11 的 2 次色散值。 P 是脉冲压缩传输线路 11 中孤波光的峰值强度， T 是脉冲压缩传输线路 11 中孤波光的脉冲宽度。

在脉冲压缩传输线路 11 中传输的孤波光由于具有使孤波次数保持在 1 的性质，历经整个脉冲压缩传输线路 11 中而使 (1) 式左边的值变为 1。在脉冲压缩传输线路 11 中，通过由激发光源 14 提供激发光而产生拉曼放大，传输的孤波光的峰值强度 P 增大。

因此，在（1）式的右边，随着孤波光传输， P 值增大。与此相对，由于维持了基本孤波条件，脉冲压缩传输线路 11 在传输中时维持 $N=1$ ，并且非线性系数 γ 不会特别改变。因此，由于维持了（1）的等号，使传输的孤波光的脉冲宽度 T 减少，由此进行了脉冲宽度 T 的压缩。

本实施例 13 的光脉冲压缩器由于具有高的非线性系数 γ ，因此对于输入的孤波光，能够用短的光纤长度来有效地进行拉曼放大。拉曼放大由于是一种非线性光学效应，因此非线性系数 γ 越大，每个单位光纤长度的放大效率可能越高。

因此，能够缩短用于获得规定峰值强度 P 的必要的光纤长度，能够使光脉冲压缩所使用的脉冲压缩传输线路 11 的光纤长度变得非常短，达到 2km。这种情况从光脉冲压缩器小型化观点看是非常重要的优点，其具有能够通过使用脉冲压缩传输线路 11 来实现小型光脉冲压缩器之类的优点。具体地，与现有技术光脉冲压缩器相比，能够使脉冲压缩传输线路 11 具有 1/10 的传输线路长度，能够通过小型的光脉冲压缩器来构成脉冲发生装置。

根据光脉冲压缩器 7，相对规定的 2 次色散值 β_2 的绝对值，能够比现有技术更加降低被输入的孤波光的强度。图 65 是表示基本孤波激发需要的输入光强度对 2 次色散值 β_2 的绝对值的依赖关系。图 65 中，曲线 11 表示现有技术的光脉冲压缩器，曲线 12 表示本实施例 13 的光脉冲压缩器 7。

从图 65 可知，在例如 $|\beta_2|=1\text{ps}^2/\text{km}$ 时，现有技术需要具有 150mW 的强度，而本实施方式 3 中的光脉冲压缩器 7 通过输入 20mW 强度光就能够进行脉冲压缩。由于在将半导体激光元件作为光源时 20mW 输出能够用低注入电流就容易实现，因此在本实施例 13 的光脉冲发生装置中，在能够省略光放大器的同时，还能够实现低耗电的光脉冲发生装置。

本实施例 13 的光脉冲压缩器 7 由于具有高的非线性系数 γ ，因此能够使用 2 次色散值 β_2 之值比现有技术光脉冲压缩器更大的光纤。如上述，被输入的孤波光优选满足基本孤波条件，具体地满足（1）式中的 $N=1$ 。因此，当非线性系数 γ 之值小时，由于使 2 次色散值 β_2 之值变大，从必需使所输入孤波光为高强度可知，一般需要抑制 2 次色散值 β_2 之值为低。在本

实施方式 3 的光脉冲压缩器中，从非线性系数 γ 具有高的值可知，即使与此对应将 2 次色散 β_2 也设定为高的值，也不需要使所输入孤波光的强度变高，因此能够通过低强度的输入光来进行高效率的脉冲压缩。

说明在脉冲压缩传输线路 11 中由使 2 次色散值 β_2 之值变高产生的有利点。尽管由绝热孤波压缩引起的脉冲宽度压缩基本上遵循上述的 (1) 式，但是实际上已经知道，高次色散值将限制脉冲宽度的压缩。具体地，在 3 次色散值 β_3 、4 次色散值 β_4 等与 2 次色散值 β_2 相比较具有规定以上的值时，变成不能够有效地进行孤波光脉冲宽度的压缩。如本实施例 13，从在使用 2 次色散值 β_2 之值变高的脉冲压缩传输线路 11 时高次色散值之值相对降低可知，在进行孤波光脉冲压缩时能够排除高次色散值的影响。而且，脉冲压缩传输线路 11 与现有技术相比能够更加降低 3 次色散值 β_3 之值。例如，能够使 β_3 之值为现有技术的 1/3 左右即 $0.03\text{ps}^3/\text{km}$ 左右。由此，能够将输出光的脉冲宽度压缩到迄今更小的值。

图 66 是表示脉冲压缩传输线路 11 所输入的光的强度和压缩脉冲宽度的临界值之间关系的曲线。这里，曲线 13 是表示本实施方式 3 的光脉冲压缩器的曲线，曲线 14 是表示用于比较的现有技术的使用了色散偏移光纤之光脉冲压缩器的曲线。从曲线 13 和曲线 14 之间的比较可知，本实施方式 3 的光脉冲压缩器能够对同一输入光强度进行迄今在更窄范围上的脉冲压缩。具体地，在使用现有技术色散偏移光纤时，当输入光强度为 10mW 左右的情况下，即使压缩在数 ps 左右也是困难的，但与此相反，在本实施例 13 的光脉冲压缩器中，能够压缩脉冲宽度直到 200fs 左右。

当将脉冲宽度压缩到 100fs 时，现有技术需要 250mW 左右的输入光强度，而与此相反，在本实施例 13 的光脉冲压缩器中，当非线性系数 $\gamma=15\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 、3 次色散值 $\beta_3=0.1\text{ps}^3/\text{km}$ 时仅仅 46mW 就足够了，当 $\gamma=15\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 、 $\beta_3=0.03\text{ps}^3/\text{km}$ 时仅仅 15mW 就足够了。而且，当 $\gamma=25\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 、 $\beta_3=0.03\text{ps}^3/\text{km}$ 时，即使输入光的强度为 8.3mW ，也能够实现 100fs 的脉冲宽度。

而且，与现有技术色散偏移光纤比较，脉冲压缩传输线路 11 能够具有让高次色散值低的值。例如，对于 3 次色散值 β_3 之值，在色散偏移光纤中一般为 $0.1\text{ps}^3/\text{km}$ ，与此相对，在脉冲压缩传输线路 11 中，能够将 3 次

色散值降低到 $0.03\text{ps}^3/\text{km}$ 。从能够降低 3 次色散值等值可知，在脉冲压缩传输线路 11 中，对于高次色散值，相对提高了 2 次色散值的值。例如，当脉冲压缩传输线路 11 的 3 次色散值为 $0.03\text{ps}^3/\text{km}$ 时，在将脉冲宽度压缩到 100fs 时所需要的 2 次色散值与在现有技术色散偏移光纤中需要为 $2\text{ps}^3/\text{km}$ 相对，在本实施例 13 的光脉冲压缩器中即使为 $0.6\text{ps}^3/\text{km}$ 也是足够的。

（实施例 13 的变形例）

下面，说明实施例 13 光脉冲发生装置的变形例。图 67 是表示变形例光脉冲发生装置结构的模式图。变形例具有这种结构，在孤波光源 6 和光脉冲压缩器 7 之间配置了用于抑制受激布里渊散射发生的 SBS 发生抑制部 20 和光放大器 21。这里，SBS 发生抑制部 20 尽管可以使用现有技术使用的结构，但也可以采用与实施方式 2 相同将光隔离器配置在光传输线路中的结构。还可以采用仅仅配置 SBS 发生抑制部 20 和光放大器 21 之任何一个的结构。

上面，尽管历经实施例 11~13 说明了本发明，但本发明不局限于这些实施方式，本领域技术人员能够想到各种变形例和实施例。例如，在实施例 11 和实施例 12 中，可以采用将另外一对的高非线性光传输线路和低非线性传输线路配设在输入端 4 前级的结构。这里，通过将前级所配设的高非线性光传输线路的传输线路长度做得比高非线性光传输线路 1a 更短，能够更有效地进行孤波变换。

尽管在实施例 13 中采用分开配置波形整形器 9 和光脉冲压缩器 7 的结构，但也可以将这些形成为一体。构成光脉冲压缩器 7 的脉冲压缩传输线路 11 从具有高的非线性系数可知，由于能够对拍频光进行孤波绝热压缩，因此通过例如增大脉冲压缩传输线路 11 的传输线路长度而能够将波形整形器 9 和光脉冲压缩器 7 形成为一体。

（实施例 14）

下面，说明实施例 14。实施例 14 的光再现系统是使用实施例 11 或者 12 的波形整形器或者实施例 13 的光脉冲发生装置的系统。图 68 是表示实

施方式 4 光再现系统结构的模式图。下面，参考图 68 说明使用上述波形整形器的光再现系统。

图 68 所示光再现系统 100 包括：放大装置 102；复用器 103；时钟抽出装置 104；由包括实施方式 1 或者 2 的波形整形器（参考图 58，图 62）的光脉冲发生装置或者实施例 3 的光脉冲发生装置（参考图 64，图 67）构成的光时钟脉冲串发生装置 106；以及光快门装置 108。放大装置 102 是用于放大衰减信号光的装置，能够使用例如掺铒光纤型放大器、拉曼放大器、半导体放大器以及参量放大器等。

时钟抽出装置 104 是抽出信号光脉冲之重复频率的装置，尽管没有图示，但能够通过包含由例如光接受元件、电时钟抽出电路、半导体激光器所构成的电子电路作为基础的装置而形成。除此之外，也可以使用由放大装置、非线性光学媒质和滤光器构成的全光型时钟抽出装置。这里，非线性光学媒质使用例如高非线性光纤和半导体元件。

光时钟脉冲串发生装置 106 是用于产生具有信号光脉冲重复频率的光时钟脉冲串的装置，其利用包括上述波形整形器（参考图 58，图 62）的光脉冲发生装置或者光脉冲发生装置（参考图 64，图 67）。由于已经叙述了其结构和功能等，这里省略其说明。

光快门装置 108 是用于通过由复用器 103 分用的信号光来光调制光时钟脉冲串发生装置 106 的输出光的装置。

在实施例 14 的光再现系统 100 中，将被传输的信号光首先通过放大装置 102 放大，将被放大的信号光通过复用器 103 分开，其中一个信号光直接传播后入射到光快门装置 108。其他信号光入射到时钟抽出装置 104。由时钟抽出装置 104 的输出电信号所控制的光时钟脉冲串发生装置 106 的输出光被入射到光快门装置 108。在光快门装置 108 中，通过用从复用器 103 传播的信号光来光调制光时钟脉冲串而再现信号光时序。

这样，作为光时钟脉冲串发生装置 106，如果使用本发明的光脉冲发生装置，则能够获得光脉冲强度起伏和时间起伏少的光时钟脉冲串。

（光整形器、光再现系统的效果）

如上述说明，根据本发明，由于多个配设高非线性光传输线路和低非

线性光传输线路以及使高非线性光传输线路和低非线性光传输线路的2次色散值之绝对值相互不同,因此获得了能够等价实现色散减少传输线路以及能够实现通过使用高非线性光传输线路而作为整体具有高的色散特性的波形整形器之类的效果。

根据本发明,由于将光隔离器配置在孤波周期以下的距离上,因此获得了能够抑制波形整形器中的受激布里渊散射的发生以及能够输出强度高的孤波光之类的效果。

根据本发明,由于将光隔离器配设在光传输线路的结合部上,因此获得了能够减少热粘结点数以及能够实现降低光损失的波形整形器之类的效果。

根据本发明,由于使光隔离器配设在高非线性光传输线路的前级,因此能够更有效地抑制受激布里渊散射的发生。由于受激布里渊散射是一种非线性光学效应,因此在高非线性光传输线路中容易发生。因此,通过将光隔离器配设在高非线性光传输线路的前级,获得了能够更有效抑制受激布里渊散射发生之类的效果。

根据本发明,由于对在高非线性光传输线路中传输的光进行拉曼放大,因此获得了在能够缩短高非线性光传输线路的传输线路长度的同时还能够更加压缩输出光脉冲宽度之类的效果。

根据本发明,作为形成光再现系统的光时钟脉冲串发生装置,由于采用使用上述波形整形器和/或者光脉冲发生装置的结构,因此获得了能够获得光脉冲强度起伏和时间起伏少的光时钟脉冲串之类的效果。

(本发明其他实施方式)

下面说明本发明其他实施方式。

本实施方式涉及根据单频光源来生成各种光脉冲串的方式。基本地,在组合一个或者多个单频光源之后,通过介入非线性光学媒体而产生相互相关的多个频率。将这些相互相关的多个频率通过阵列型波导光栅分别分用,在调整各自的相位和强度之后,通过介入同种阵列型波导光栅再次进行复用。此时,通过调整各自的相位和强度而能够实现希望的脉冲串,并且能够任意地改变该脉冲串的波形。

本实施方式的构成示于下。

如图 69 所示, 本发明由光源、用于增加谱线数的非线性媒质、用于对每个谱成分调整相位和强度的调整部、以及用于监视和控制它的部分构成。通过调整部的控制, 能够自由地操纵希望的时间波形。

本实施方式中, 由 2 波长或者具有相互相位相关的数个波长构成的光源的输出通过介入非线性媒质而产生使频率间隔保持固定的多个频率。这个过程由于入射光通过非线性相互作用而产生, 因此所生成的多个频率具有相互相位相关。通过原样保持该相位相关、控制各自频率成分的相位以及调整强度, 原则上能够合成具有与频率间隔的倒数相对应的重复频率的柔性脉冲波形。脉冲波形的时间宽度通过非线性媒质变宽, 由光谱包络线宽度的倒数给出。即, 本发明将自由调整和合成被傅立叶级数展开的脉冲串的傅立叶成分作为基础。

现有技术不能够自由地变更脉冲波形, 而是由媒质的非线性、色散、损失特性以及其频带和光谱等固定地确定。当根据现有技术材料实现包括这些的希望特性时, 存在频带和长度等限制。根据现有技术, 作为为了获得良好脉冲波形而需要使用绝热过程的这种脉冲整形器, 存在长度、尺寸变大之类的问题。根据本方式, 脉冲波形可变, 也能进行精密控制, 并且与现有方式相比, 由于没有频带引起的限制, 尺寸和长度以及耗电方面都是有利的。因此, 与现有技术相比, 本发明在脉冲波形的可变性、大小和耗电以及频带等方面具有优势。

作为本发明的实施例举出下列。

(实施例 15)

光源可以是具有 2 个不同振荡波长的 DFB 激光器等单频光源 (可以是可变波长) 复用的拍频光源, 也可以是由一个该单频光源和外部调制器构成的脉冲光源。非线性媒质使用 PPLN、光纤、光子晶体等。在相位/强度调整部上使用了应用 PLC 技术的阵列型波导光栅 (AWG)、应用热光学效应的可变光衰减器 (VOA) 以及移相器。移相器可以控制光波长的相位延迟。通过在基于 PLC 技术的集成电路上安装这些调整部, 能够飞跃地改善相位控制的稳定性和控制性。如果这些系统用偏振波保持系统实现, 也提高稳定性。

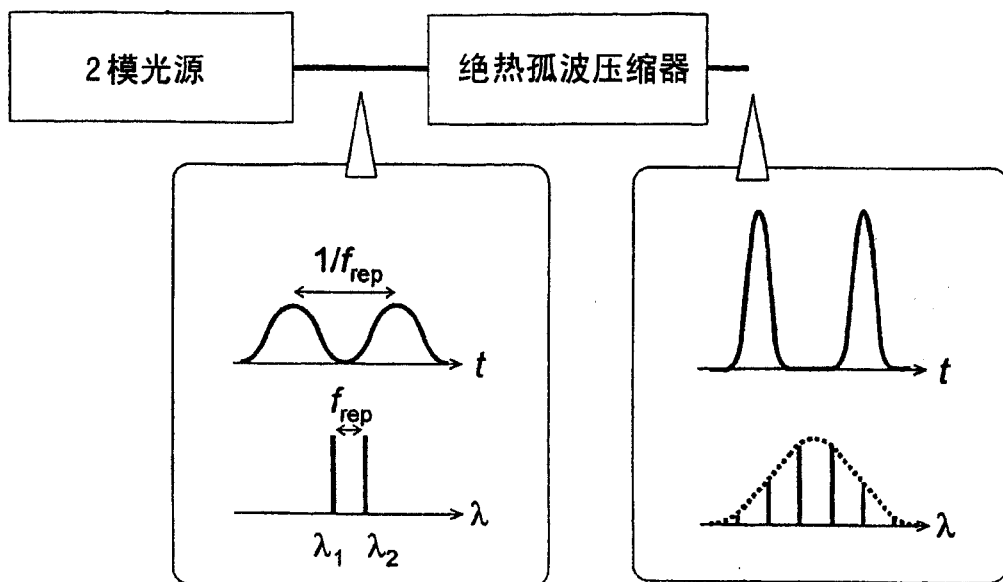


图 1

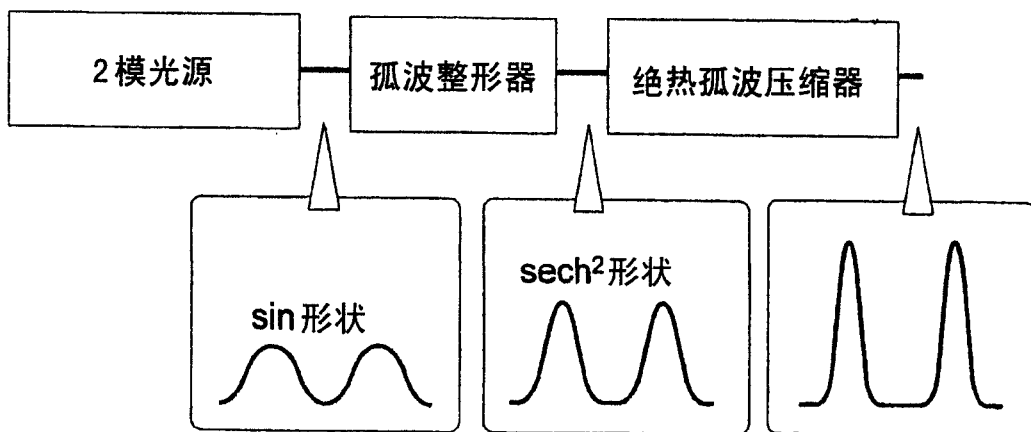


图 2

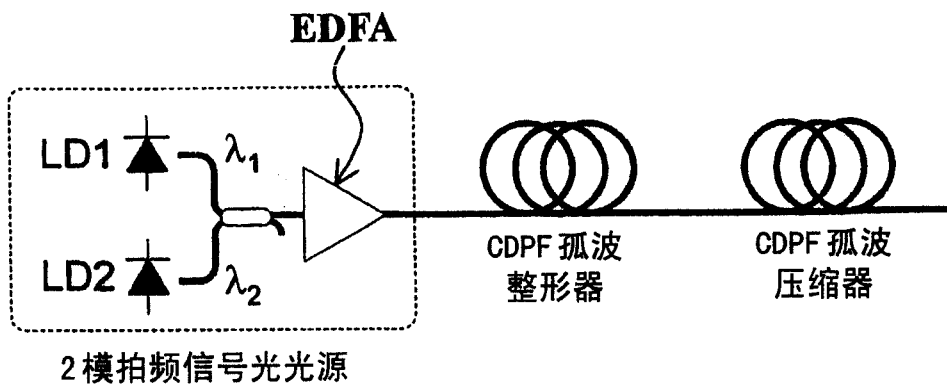


图 3

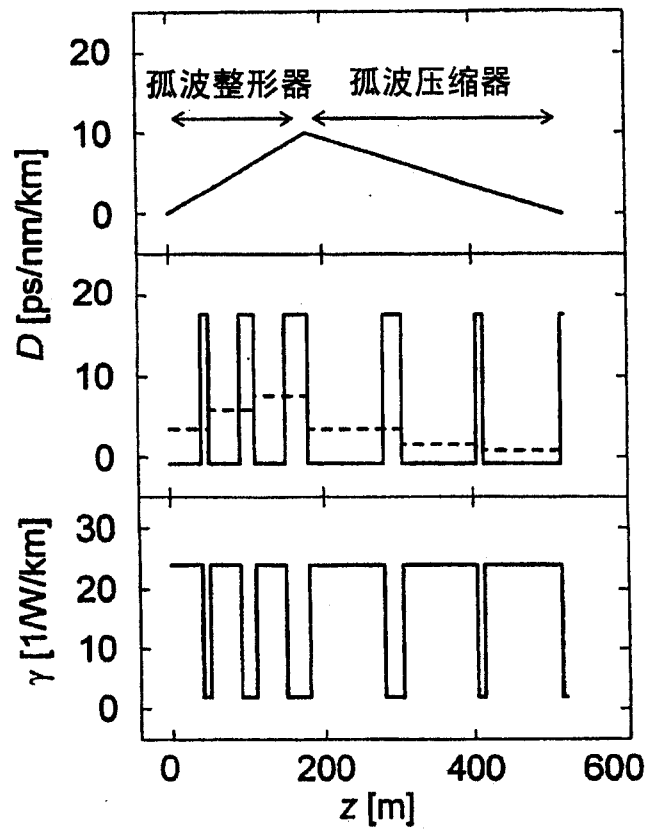


图 4

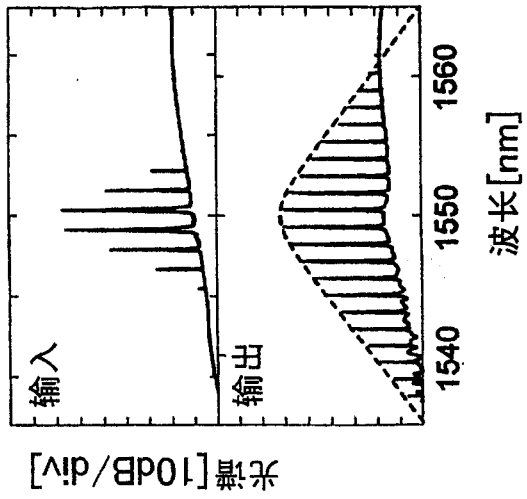


图 5B

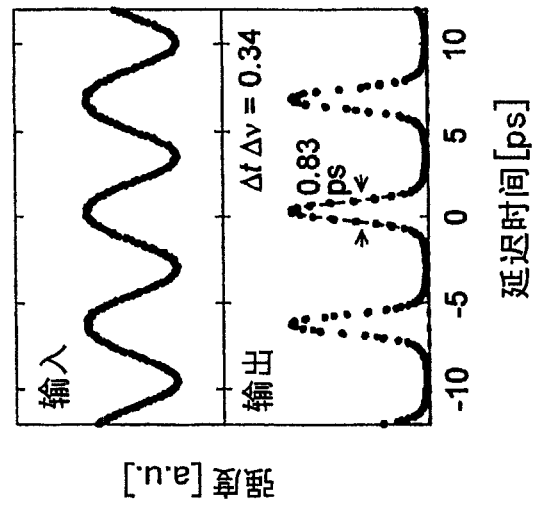


图 5A

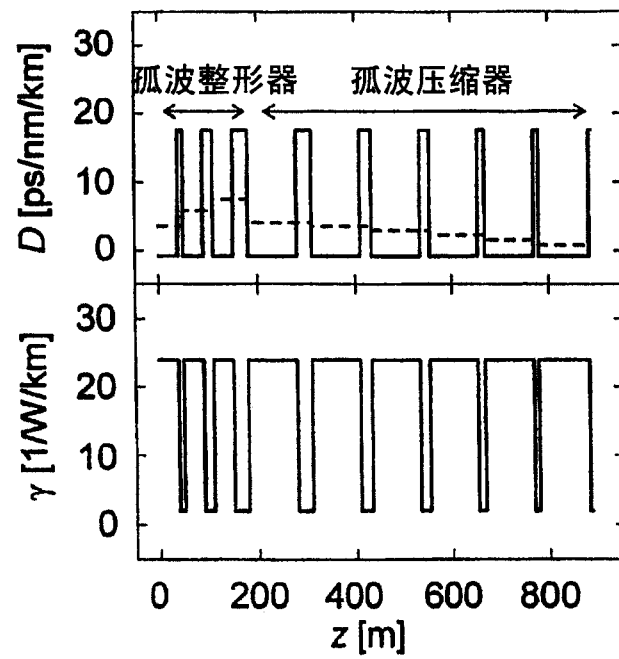


图 6

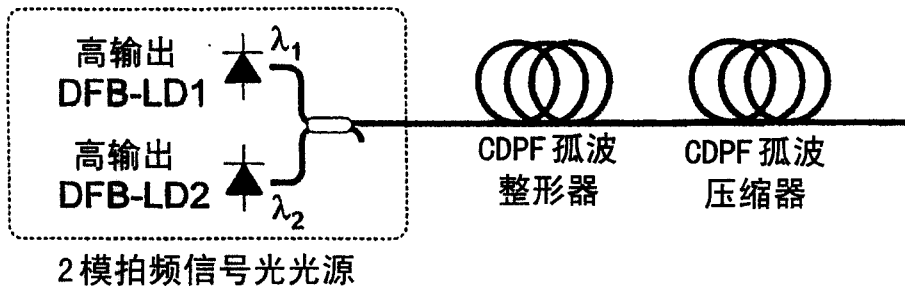


图 7

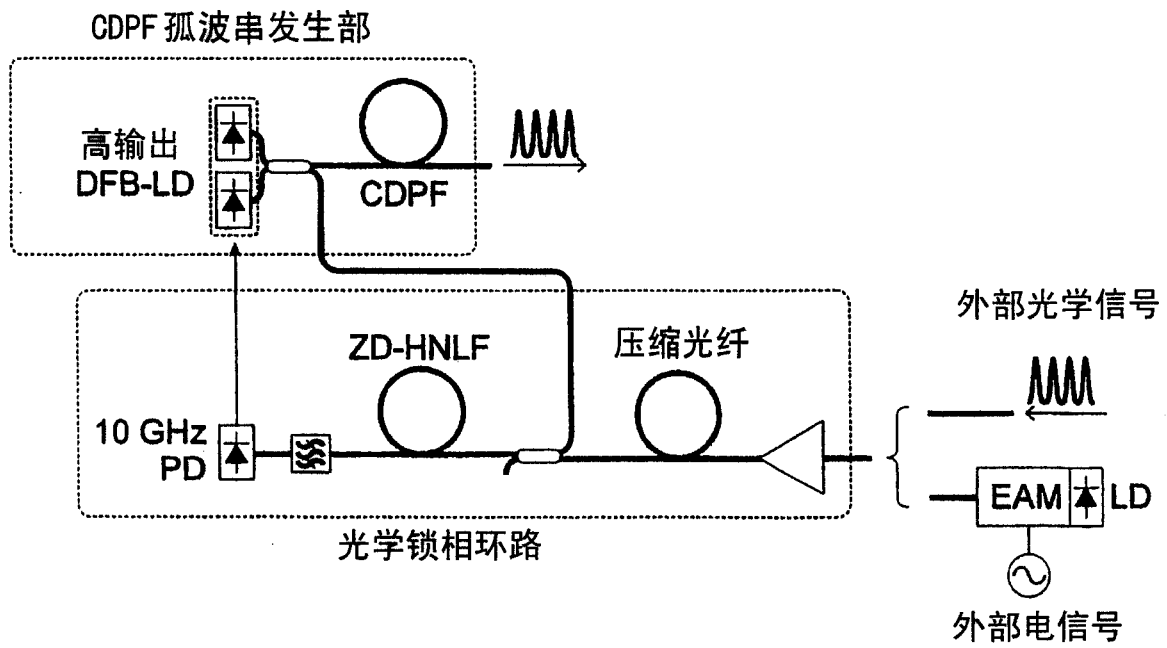


图 8

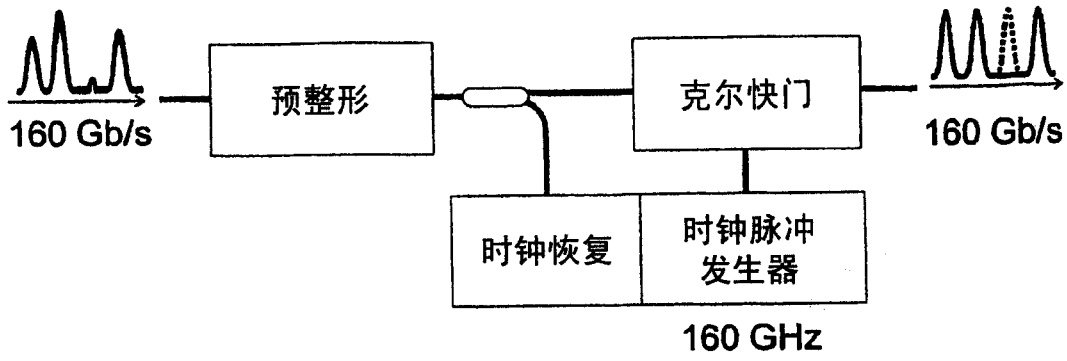


图 9

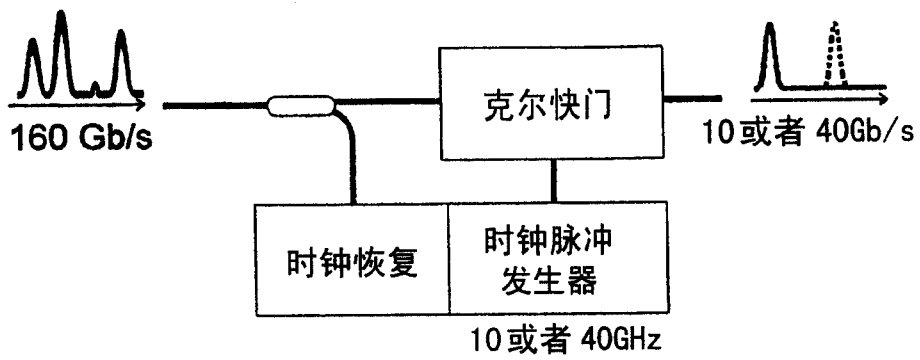


图 10

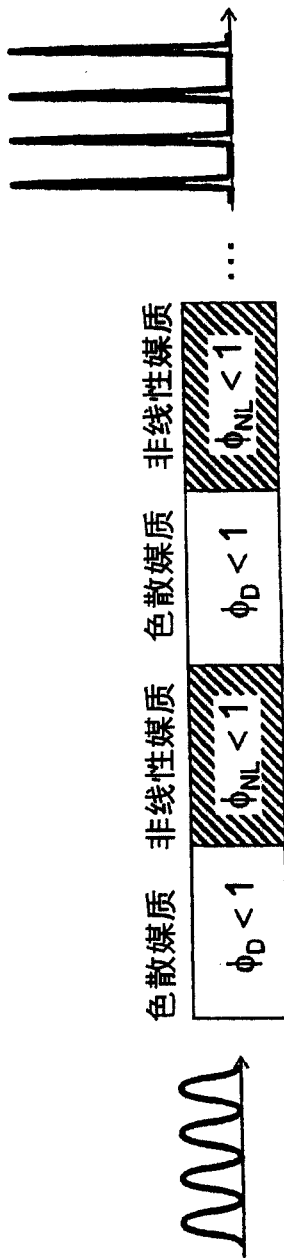


图 11

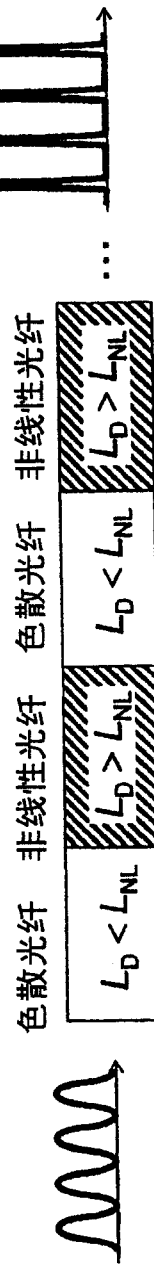


图 12

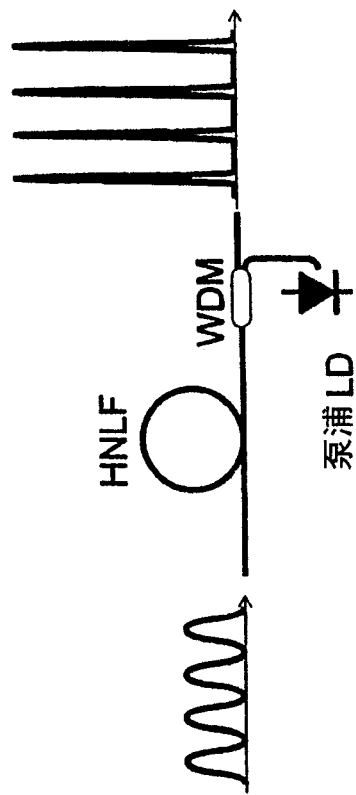


图 13

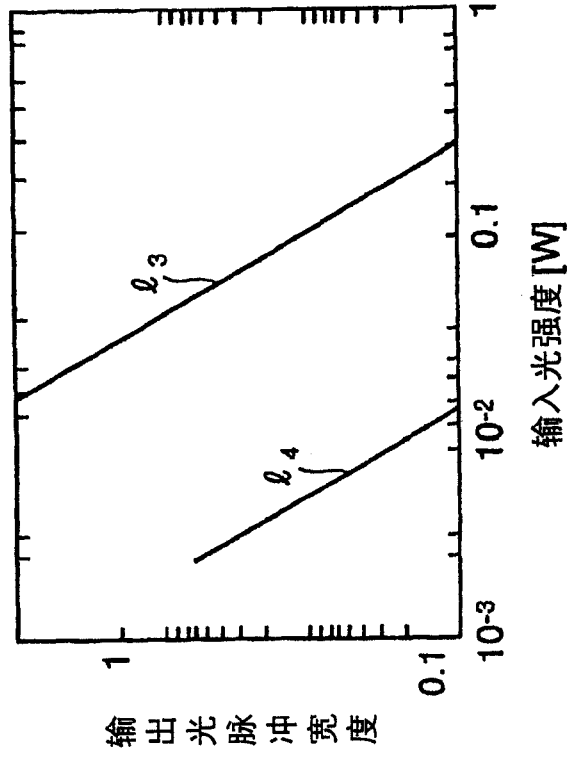


图 15

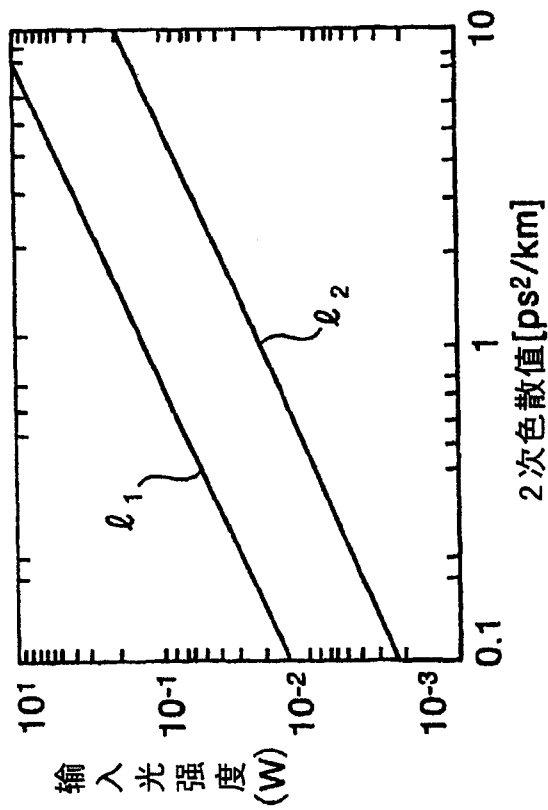


图 14

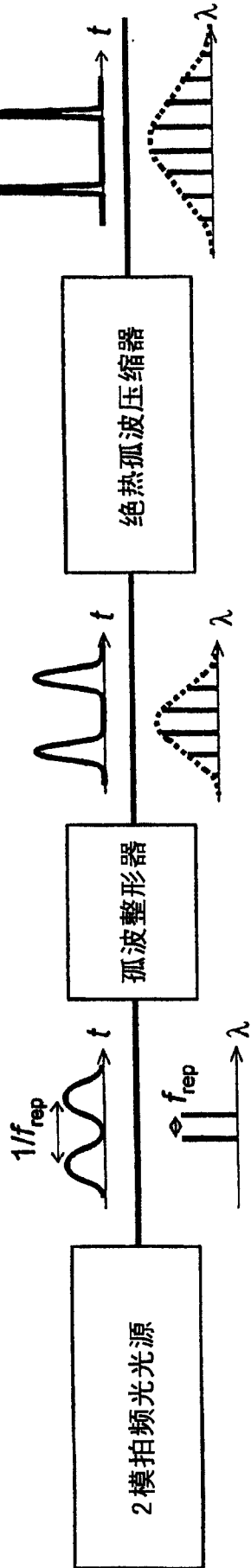


图16

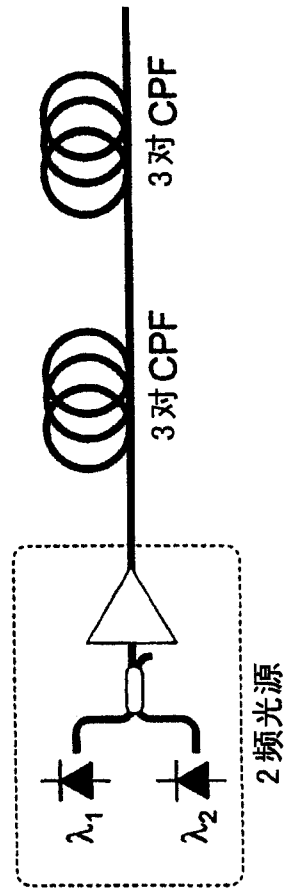


图17

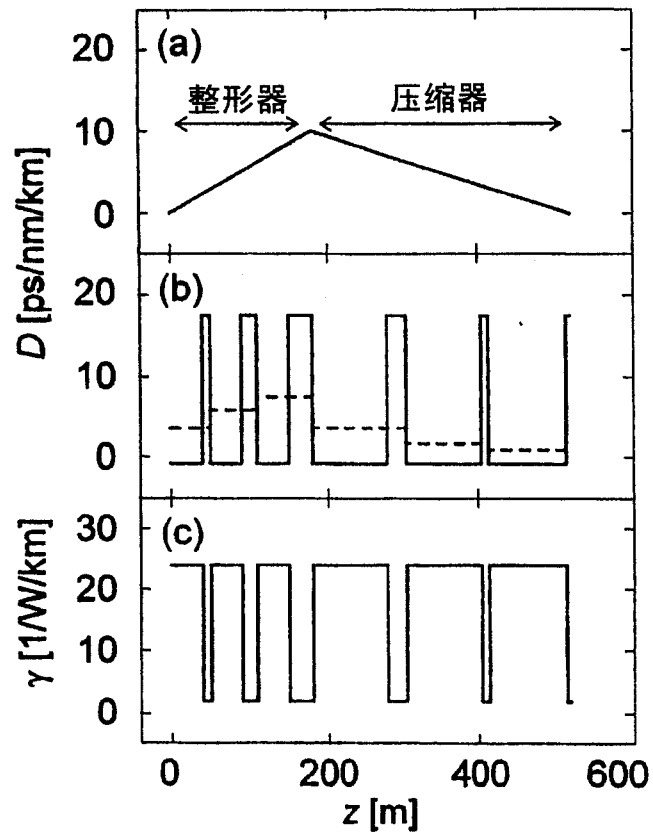


图 18

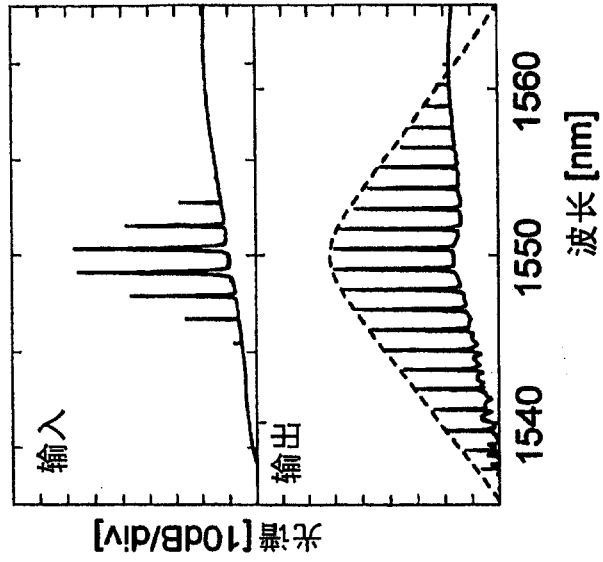


图 19B

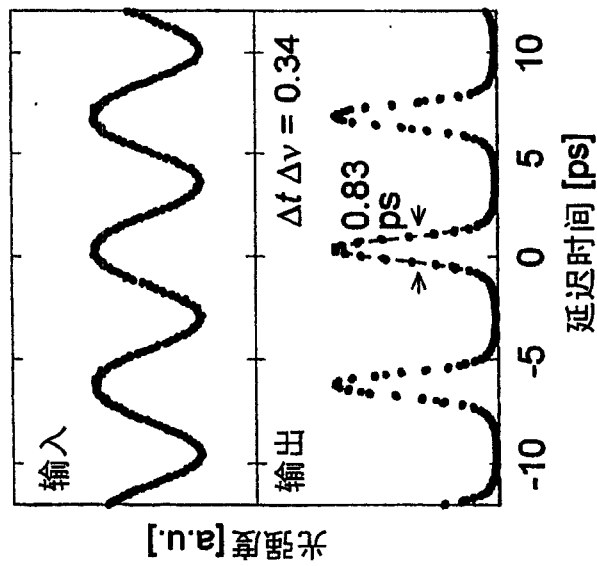


图 19A

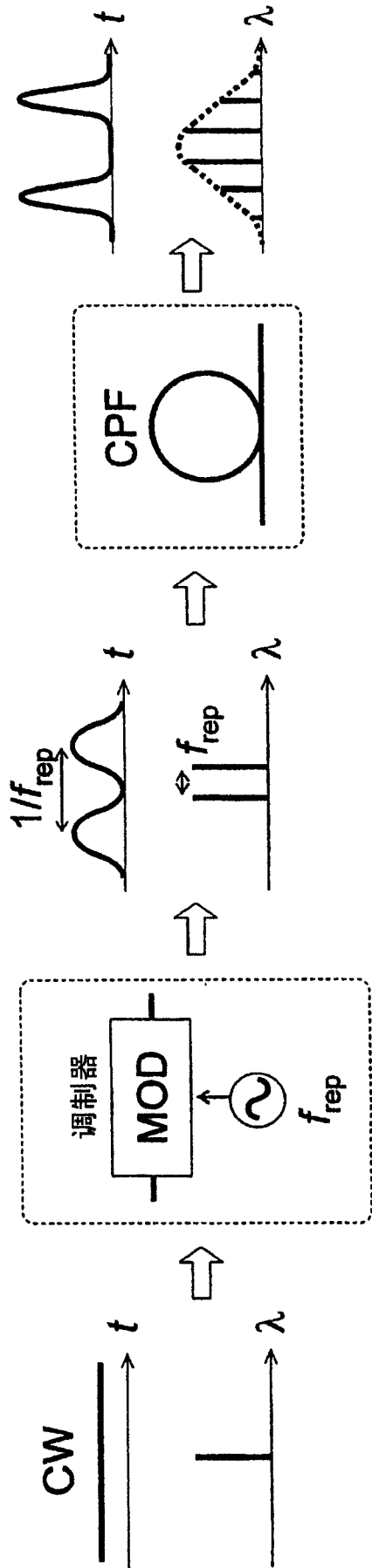


图 20

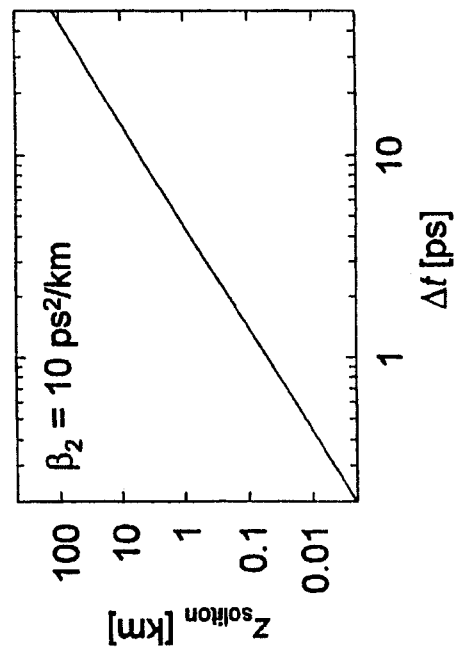


图 21

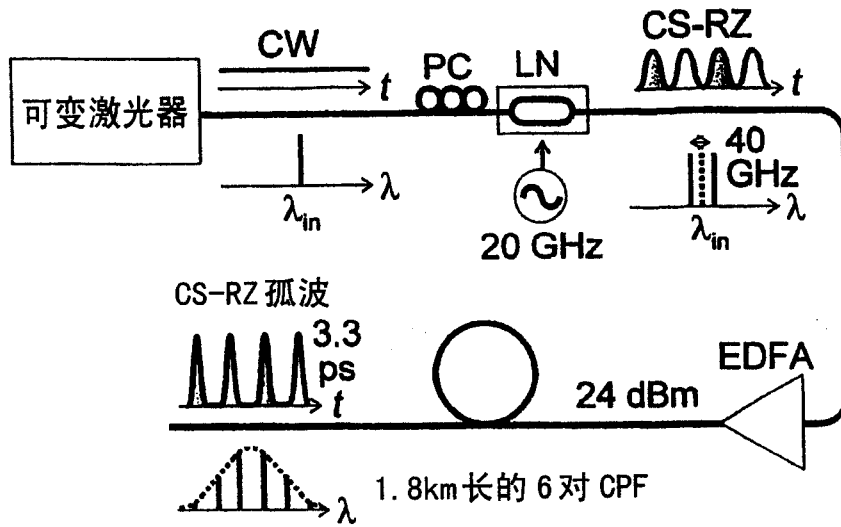


图 22A

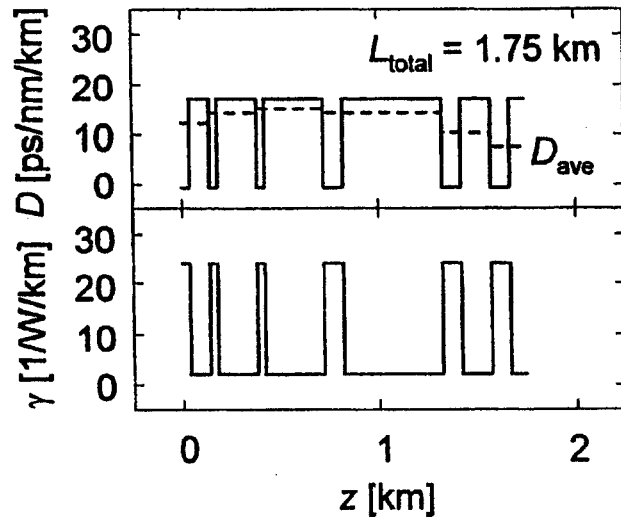


图 22B

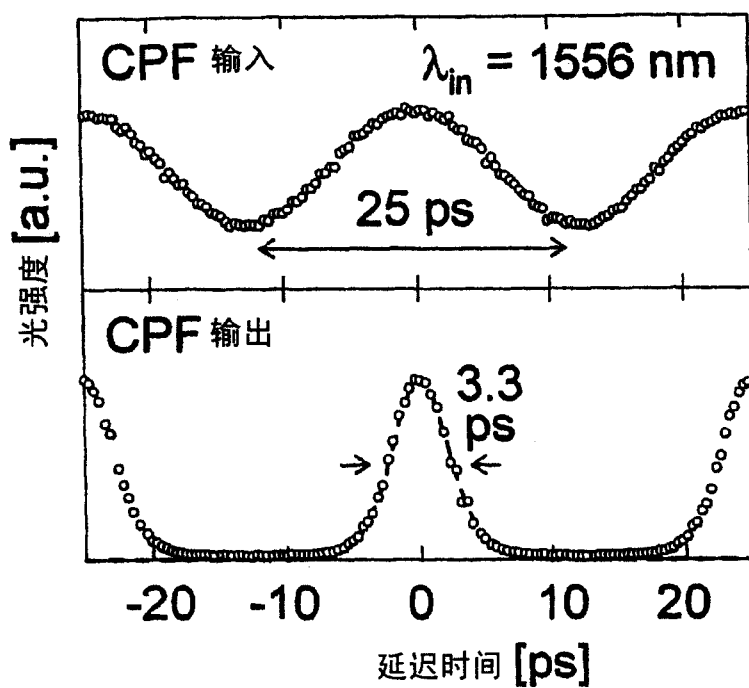


图 23A

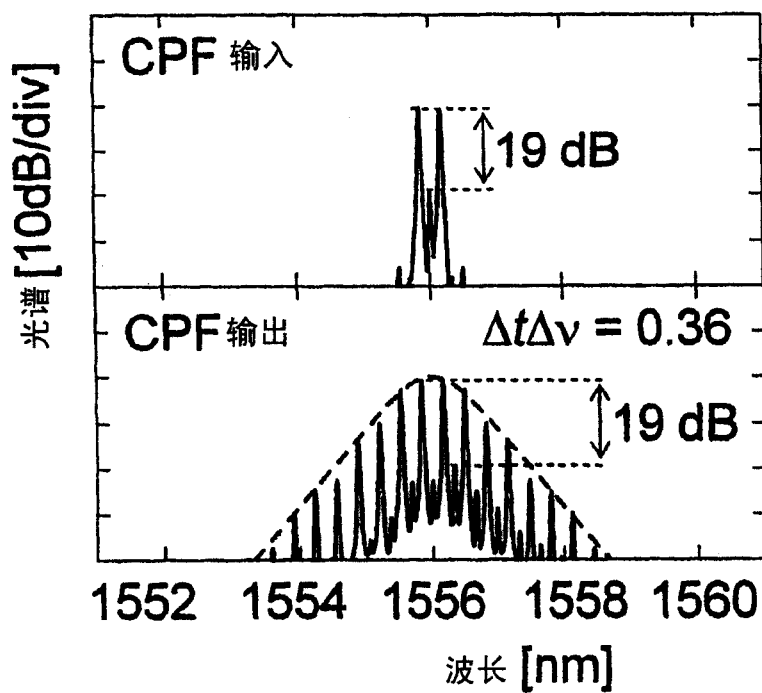


图 23B

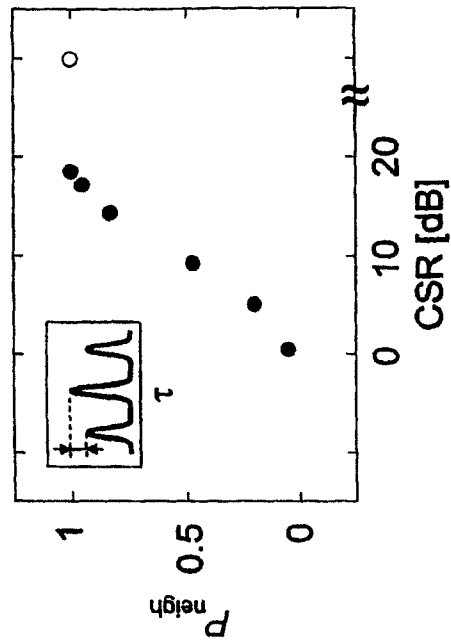


图 25

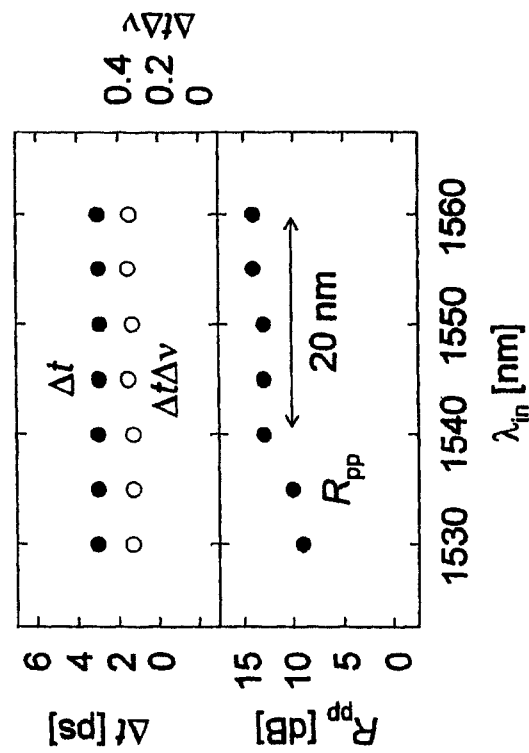


图 24

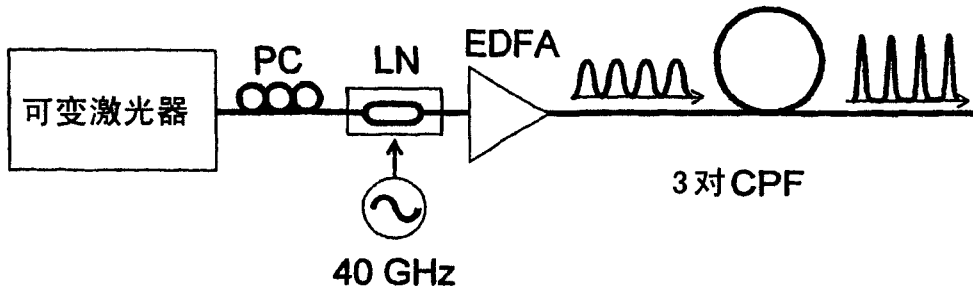


图 26A

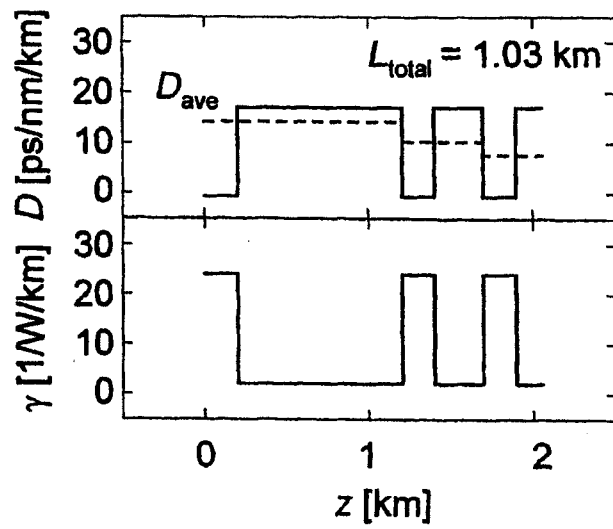


图 26B

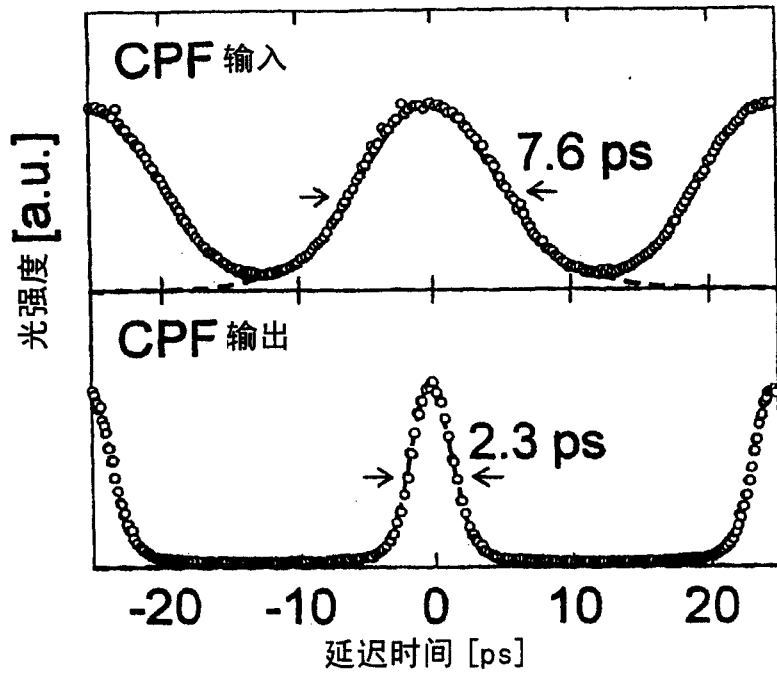


图 27A

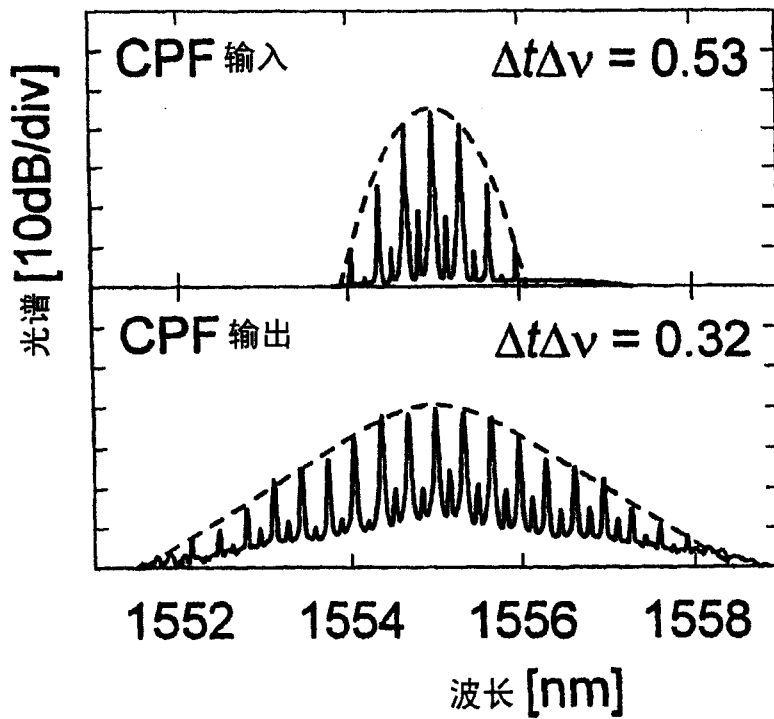


图 27B

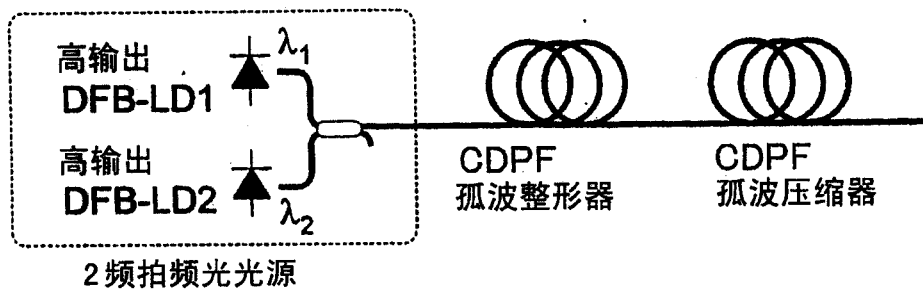


图 28

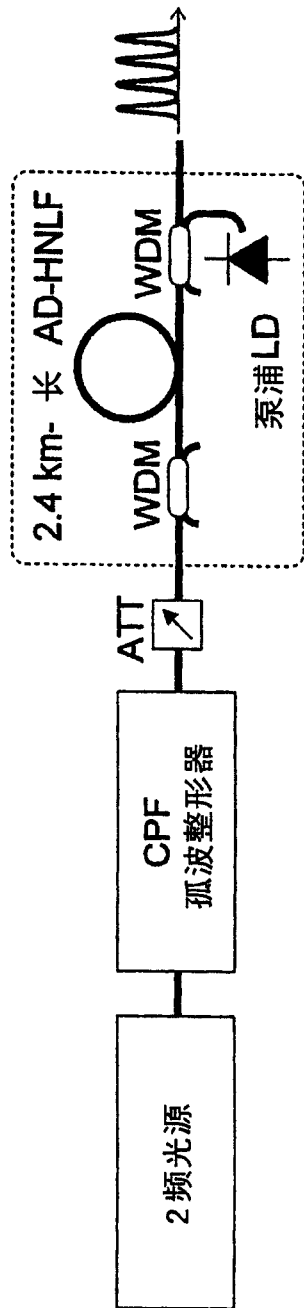


图 29

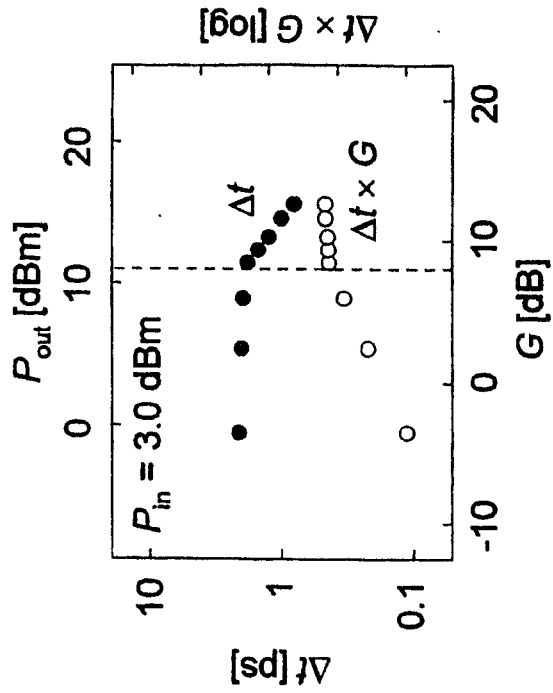


图 31

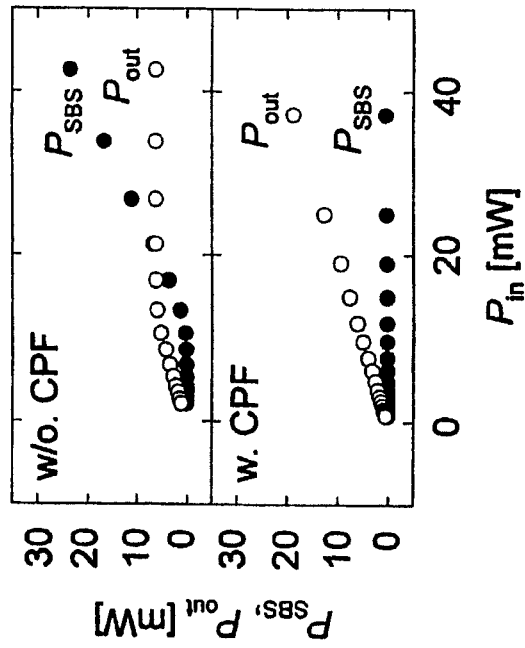


图 30

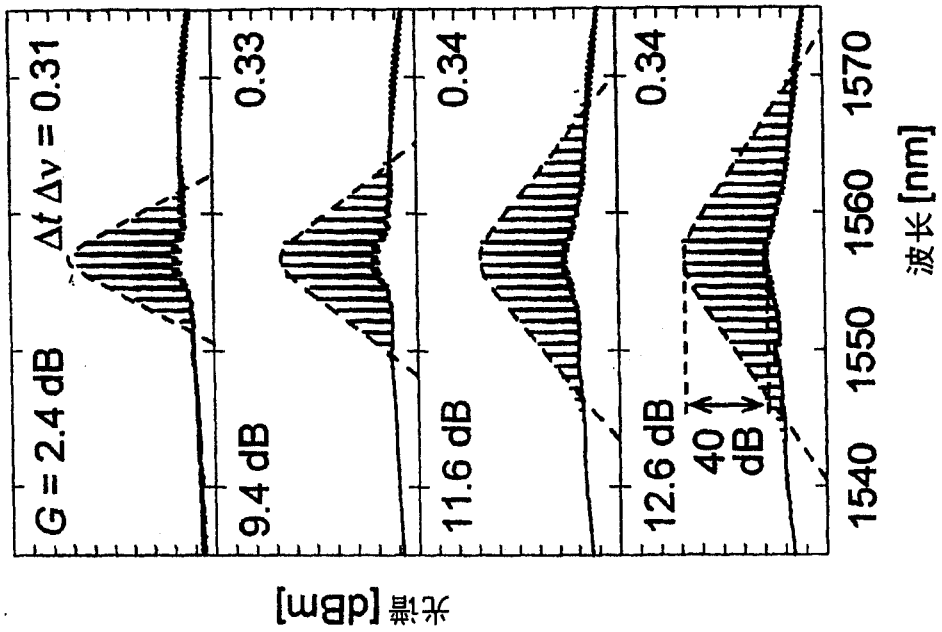


图 32B

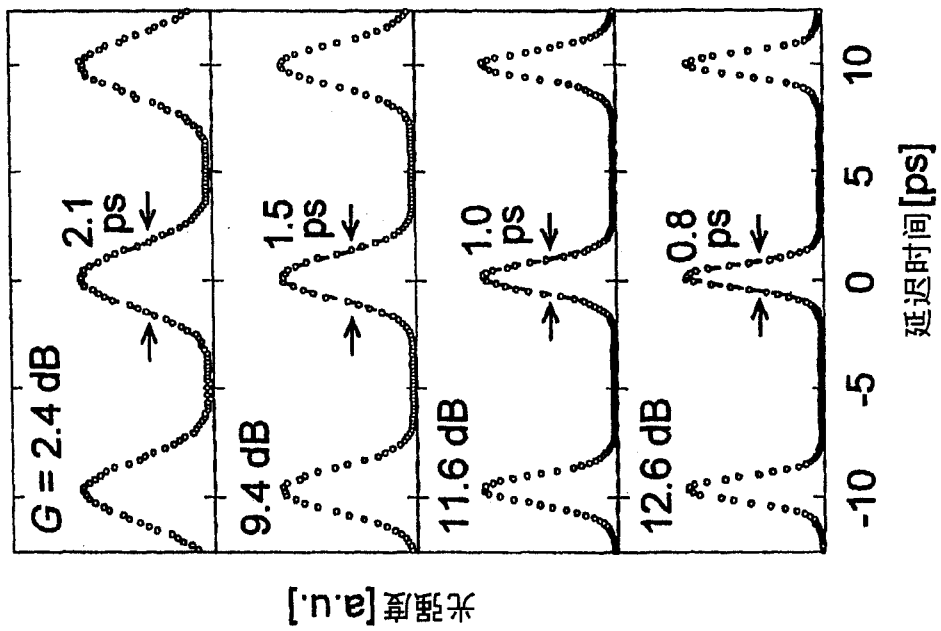


图 32A

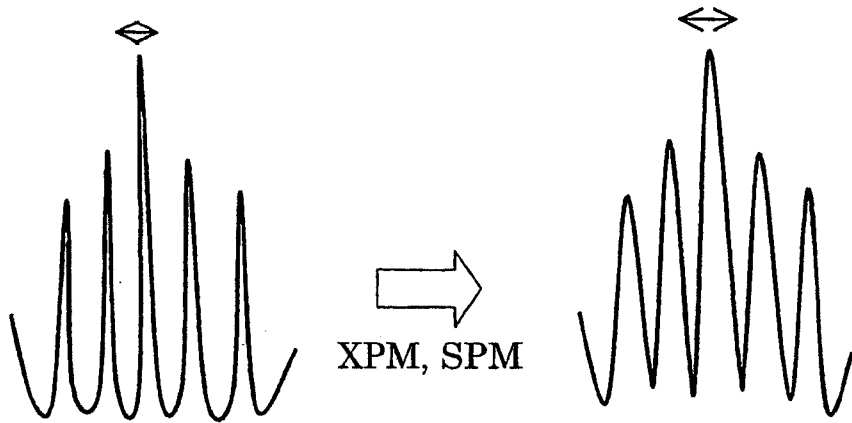


图 33

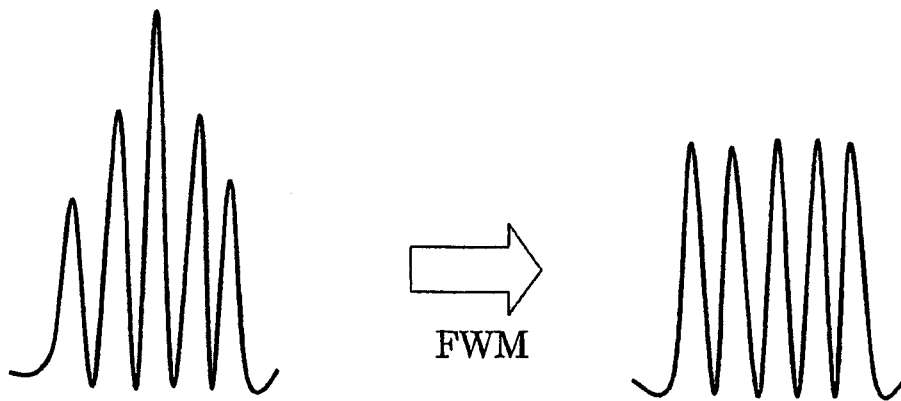


图 34

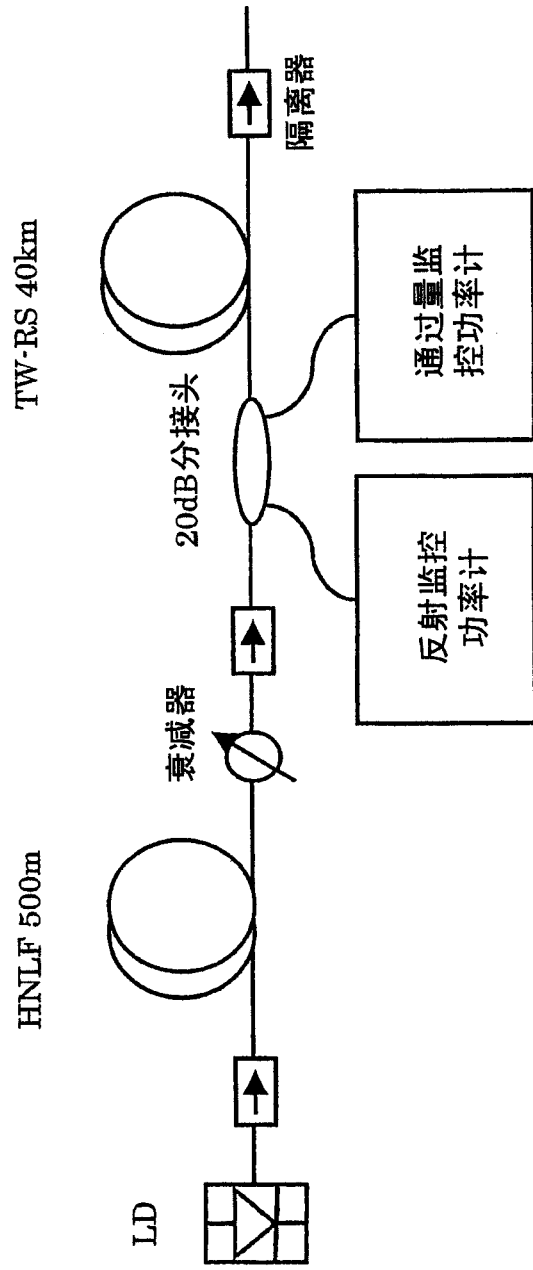


图 35

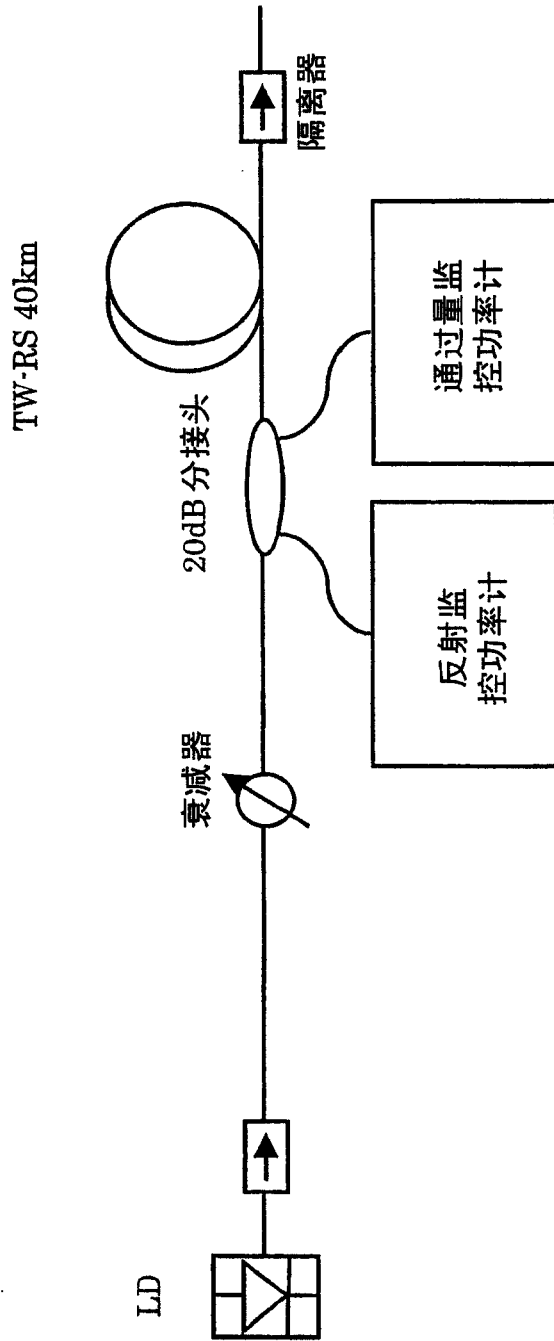


图 36

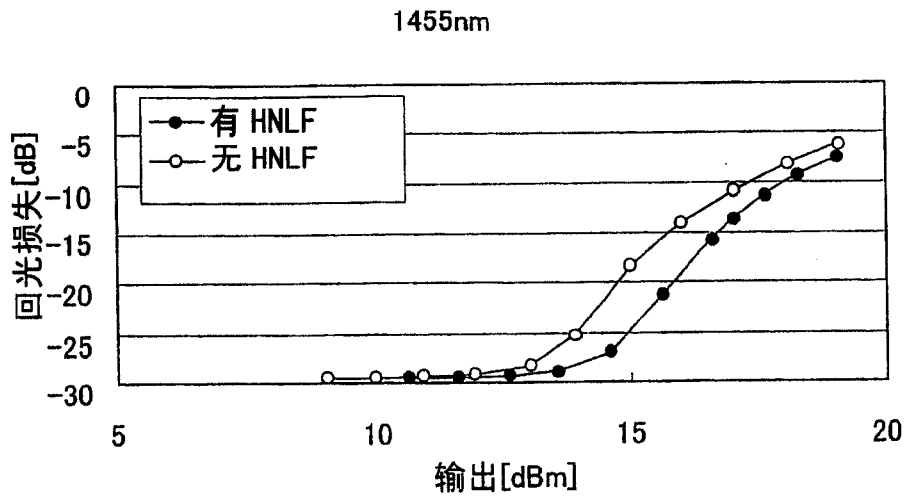


图 37

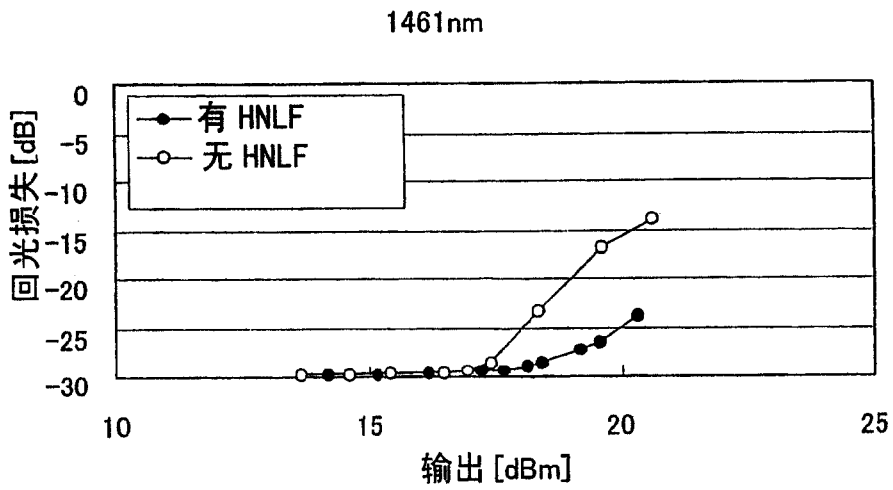


图 38

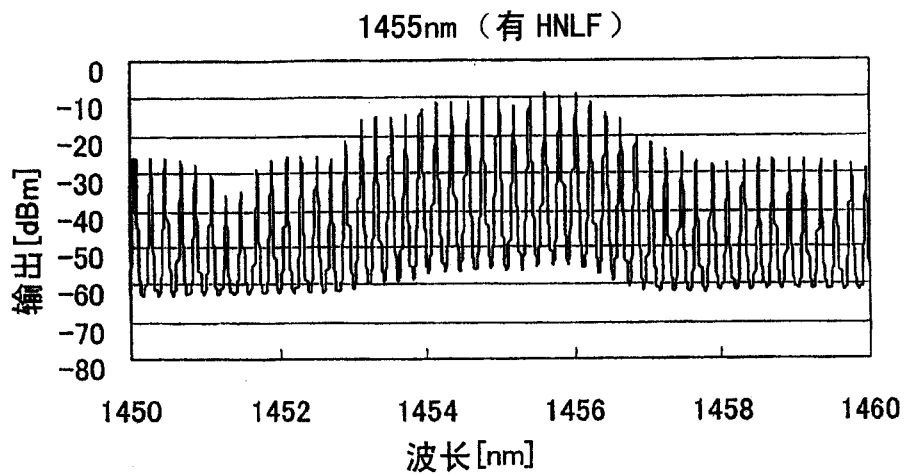


图 39

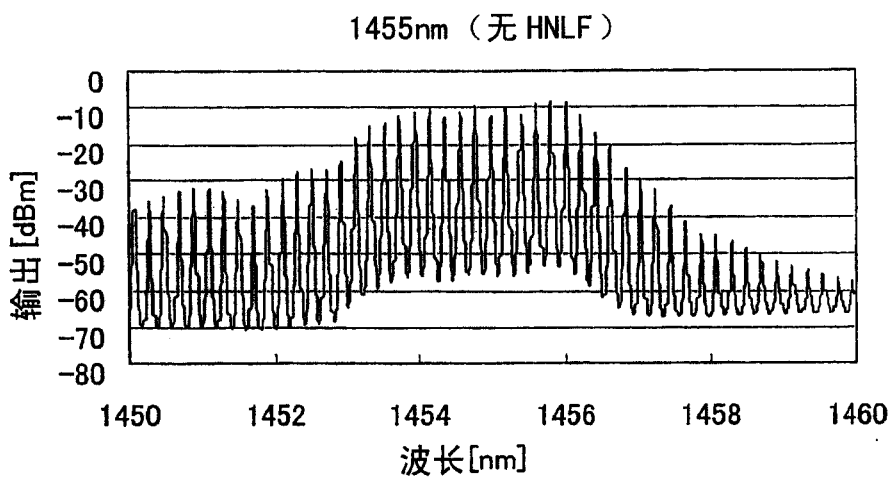


图 40

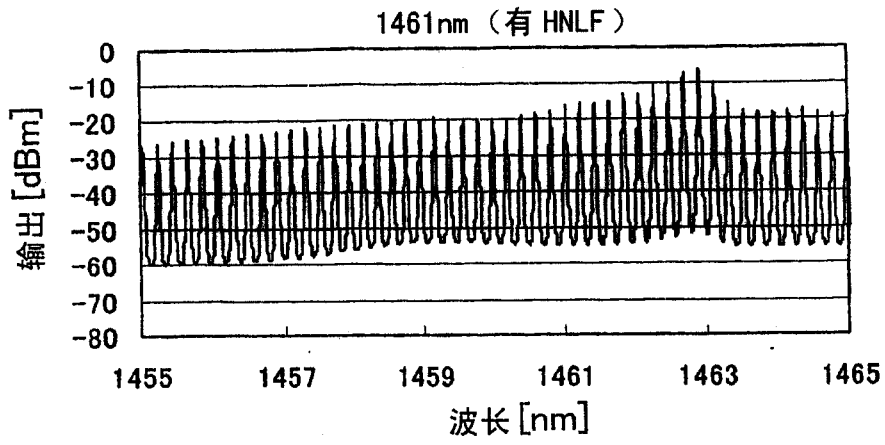


图 41

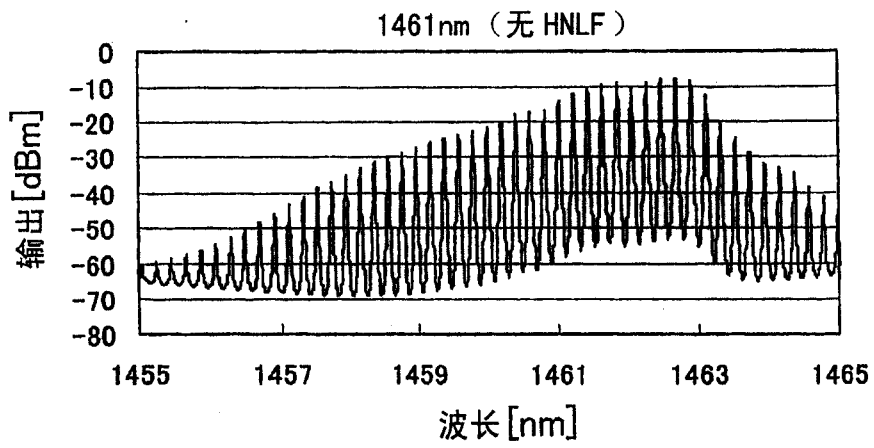


图 42

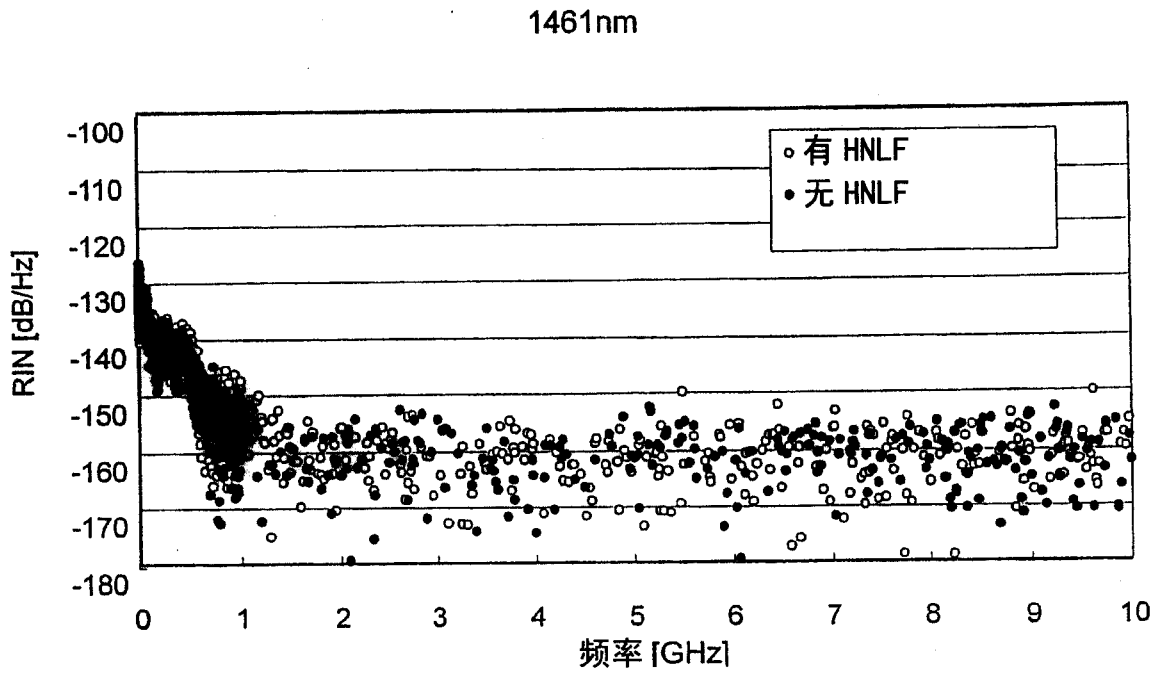


图 43

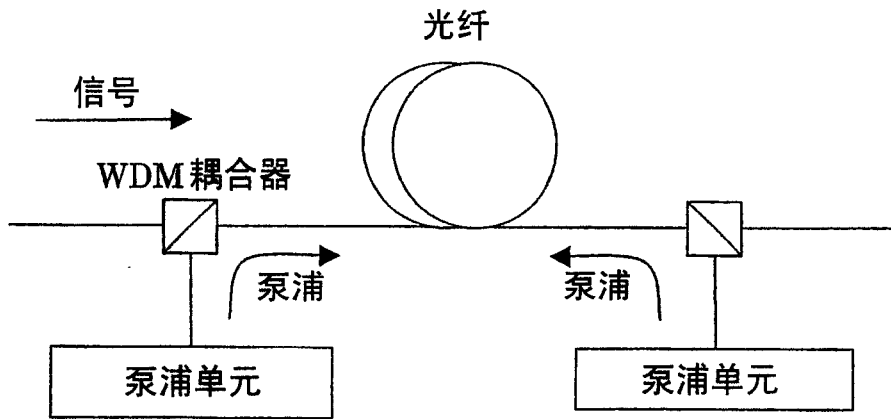


图 44



图 45

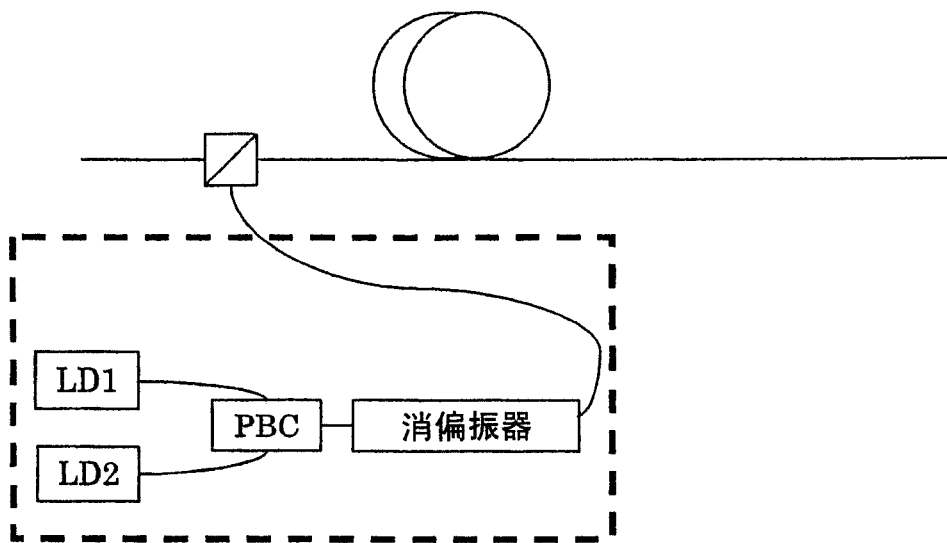


图 46

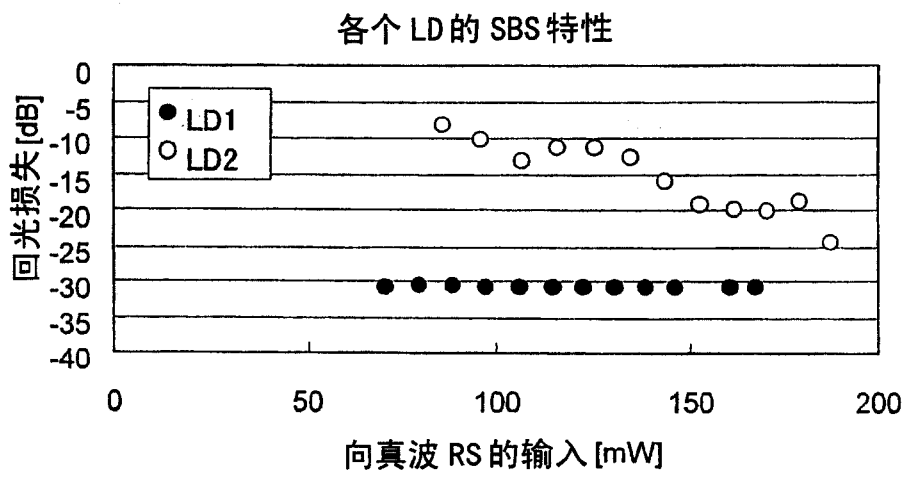


图 47

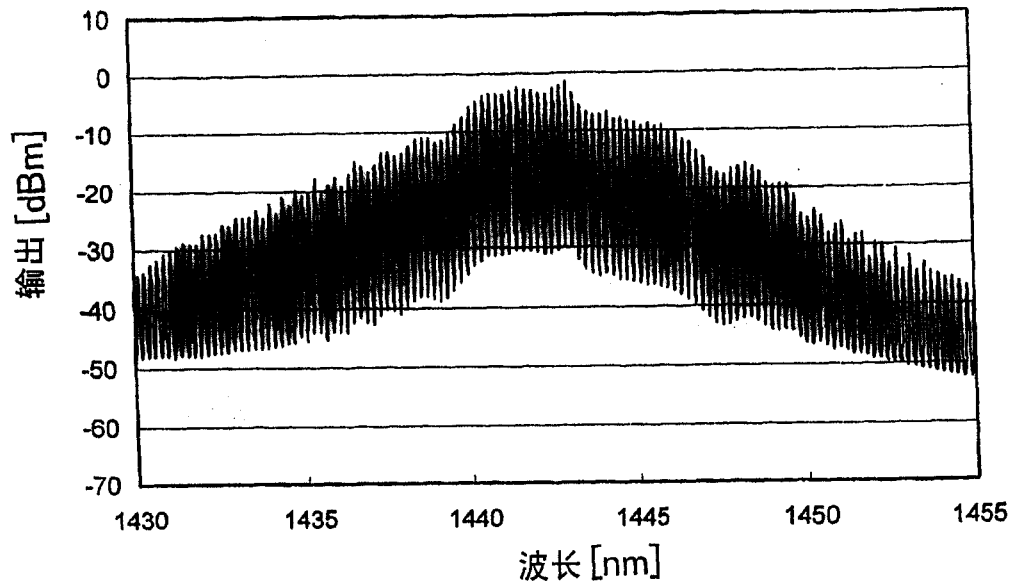


图 48A

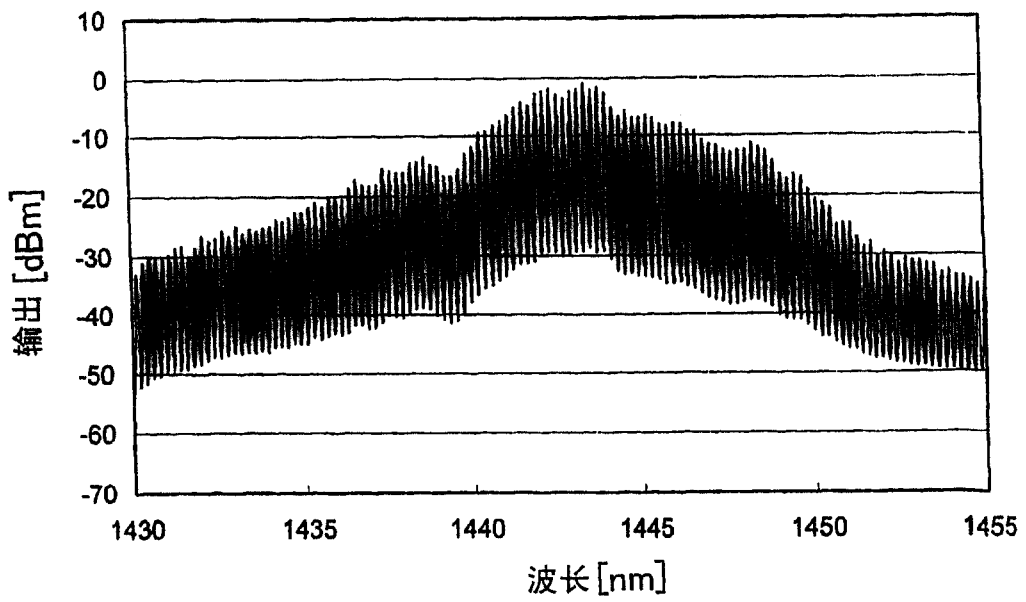


图 48B

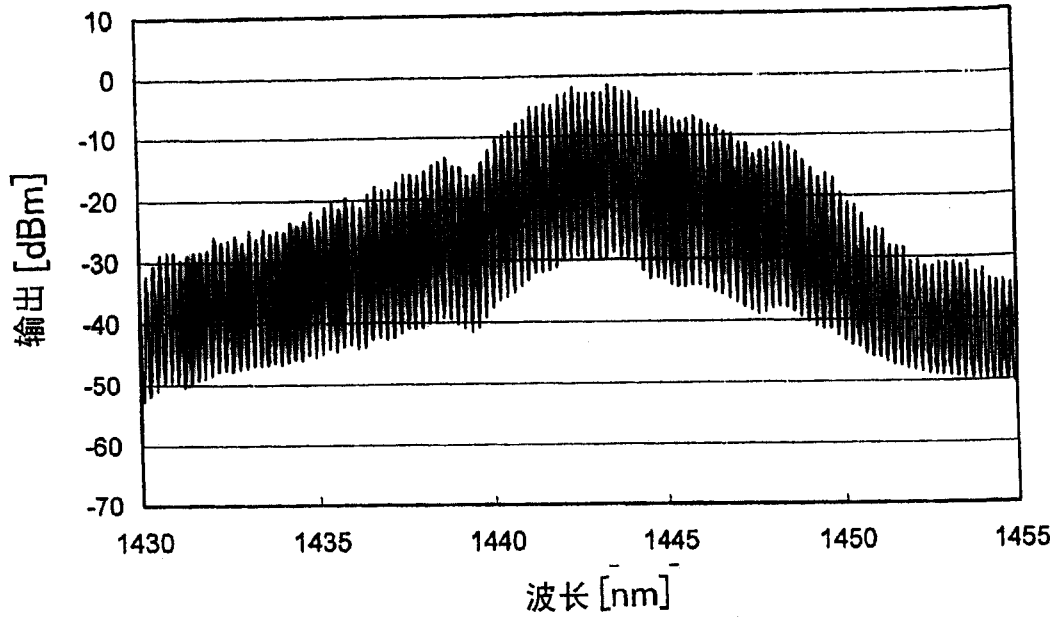


图 48C

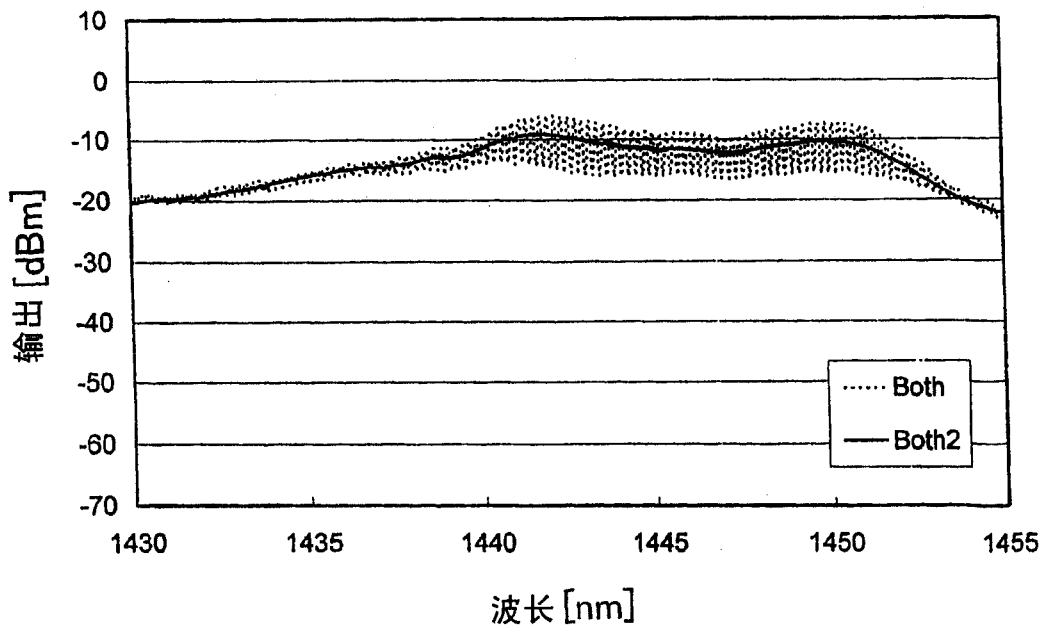


图 48D

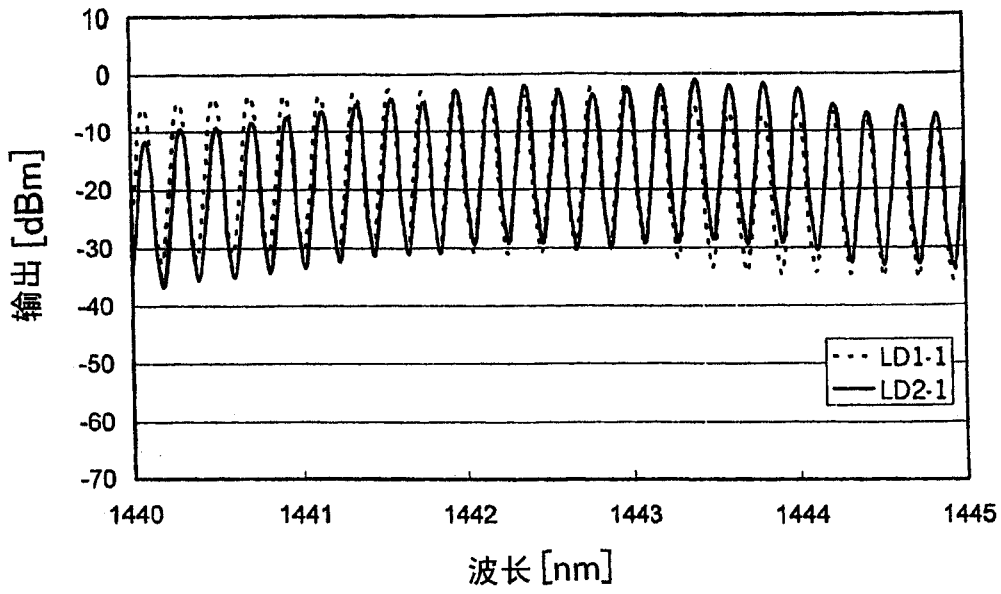


图 49A

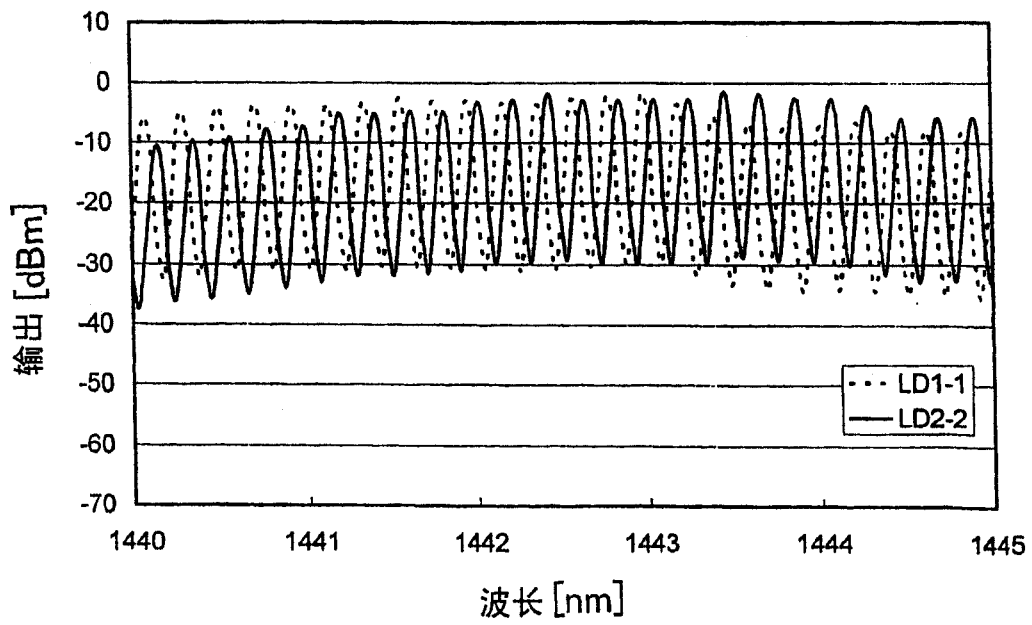


图 49B

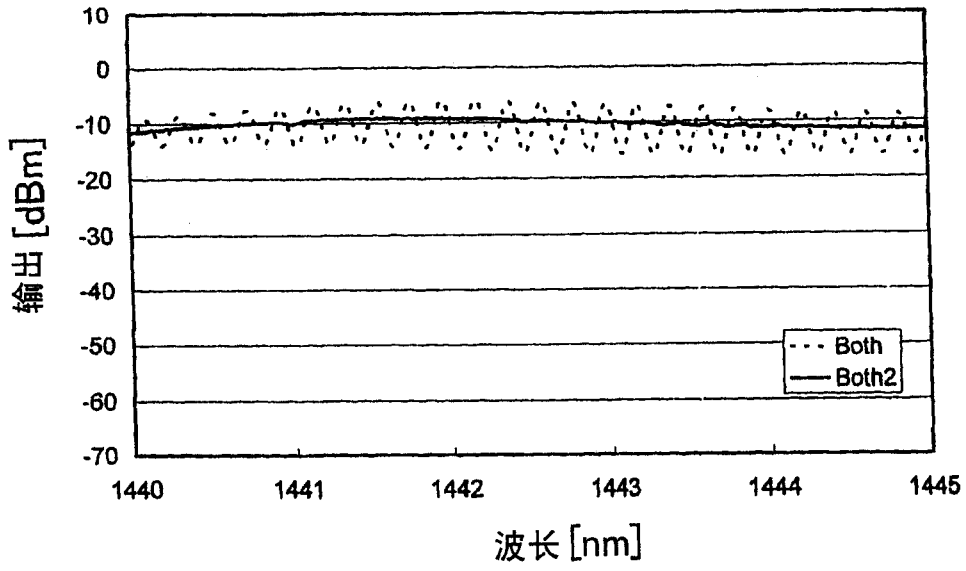


图 49C

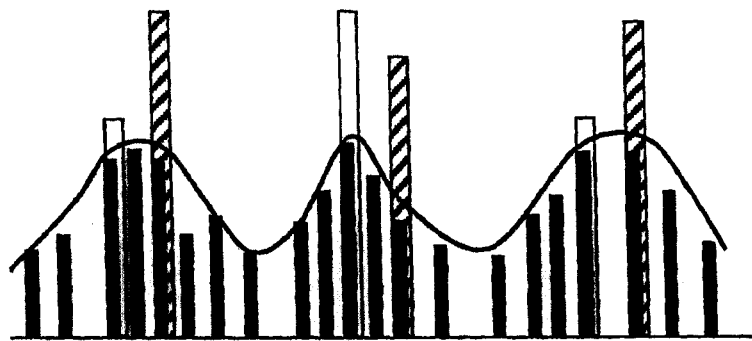


图 50

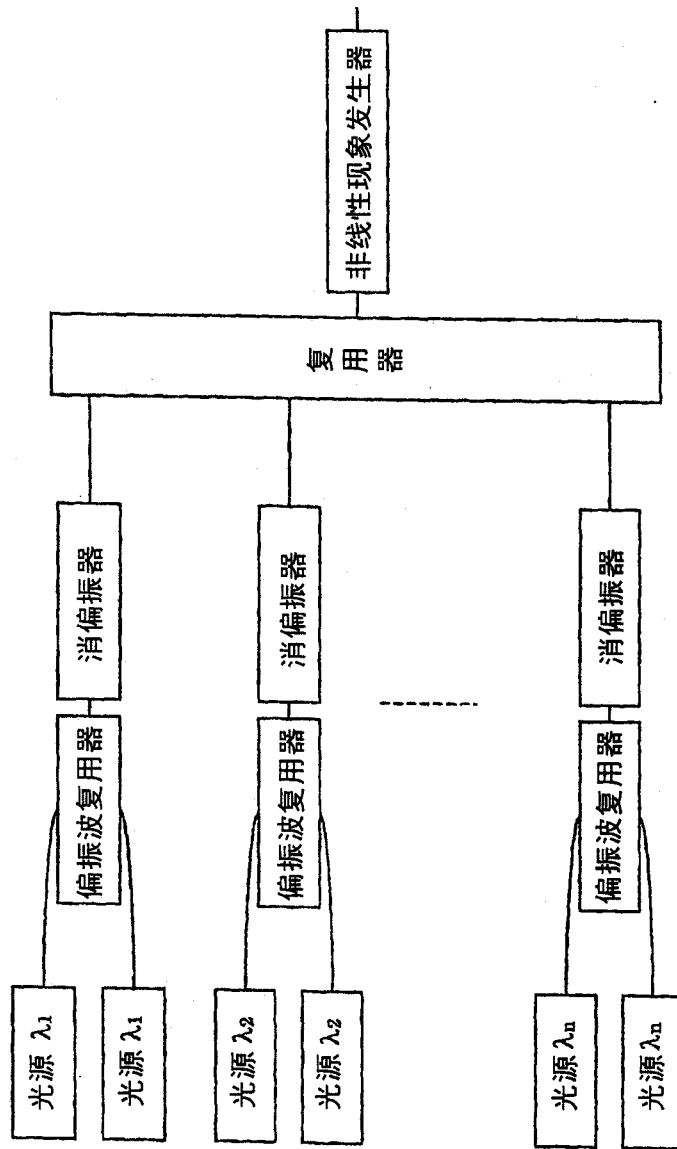


图 51

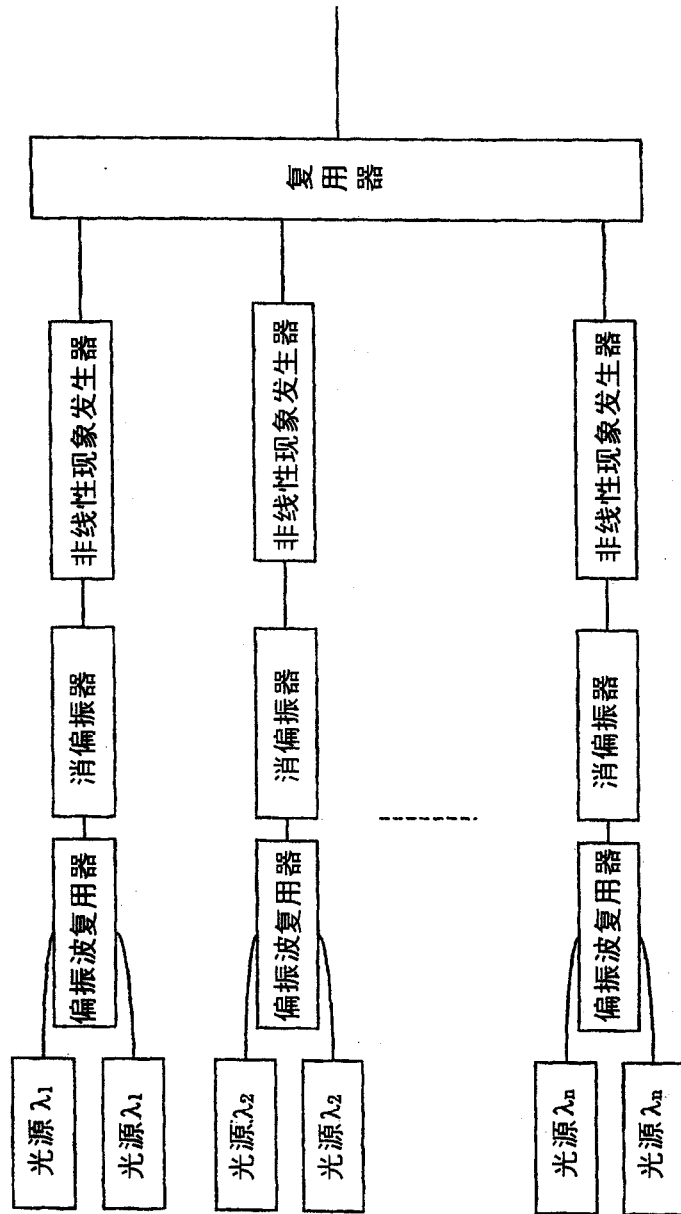


图 52

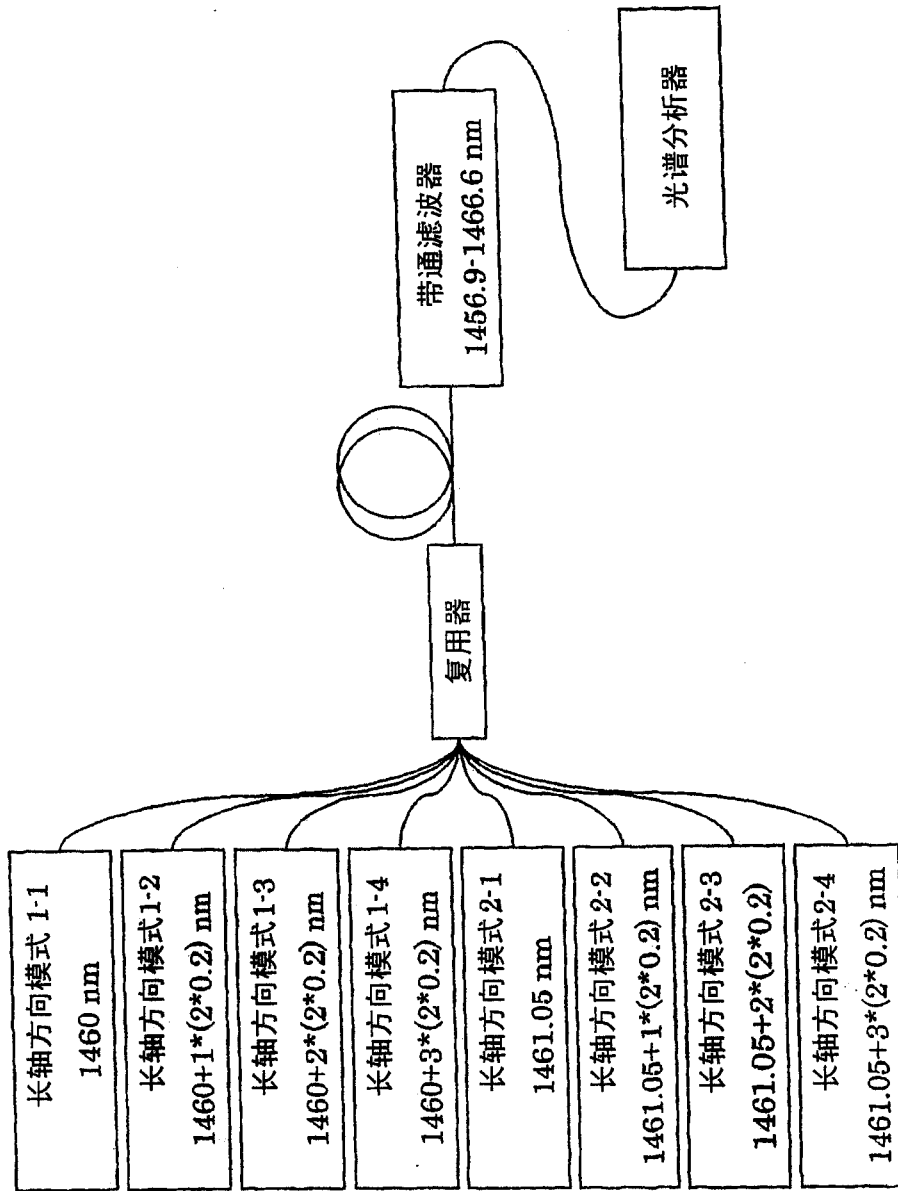


图 53

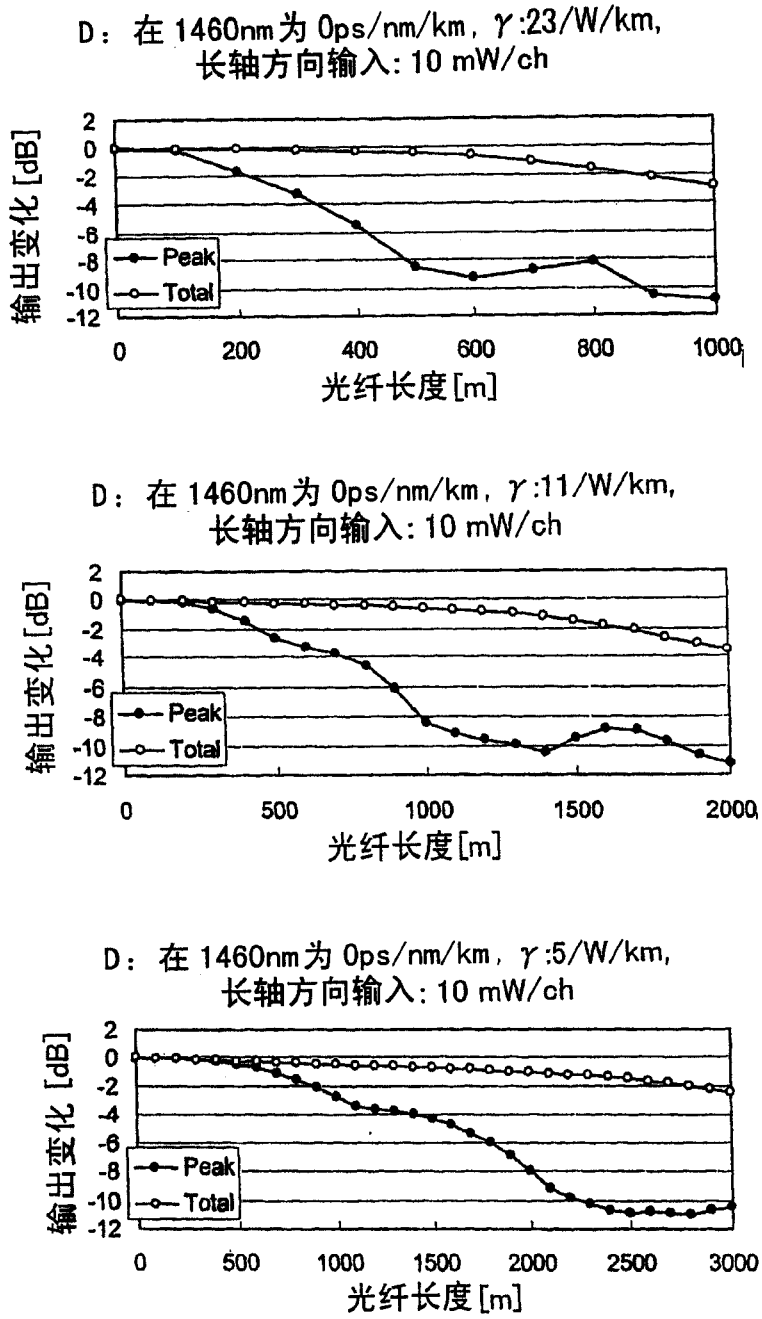


图 54A

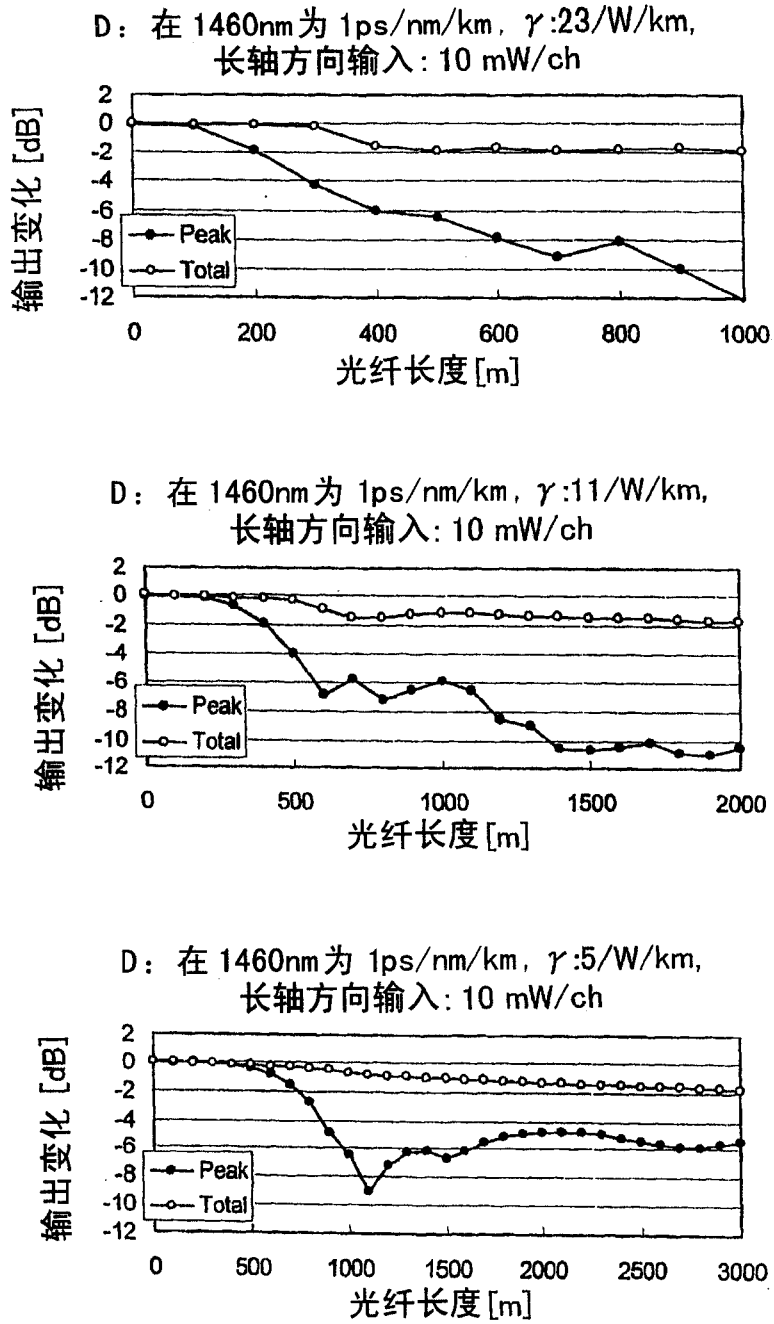


图 54B

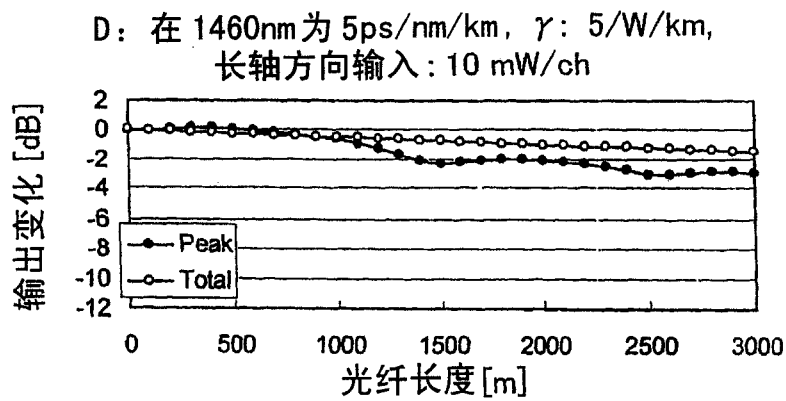
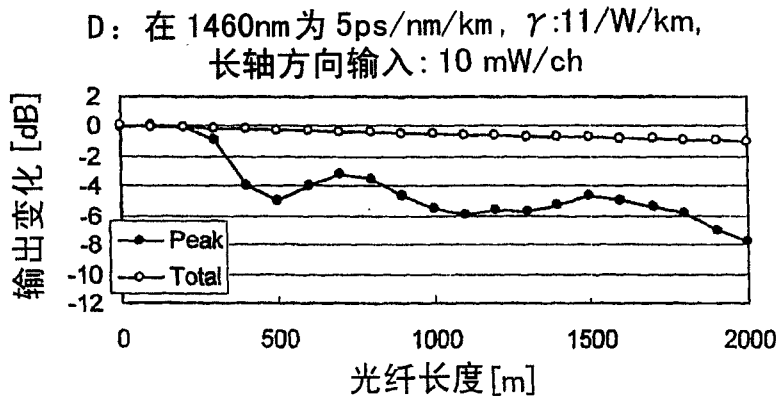
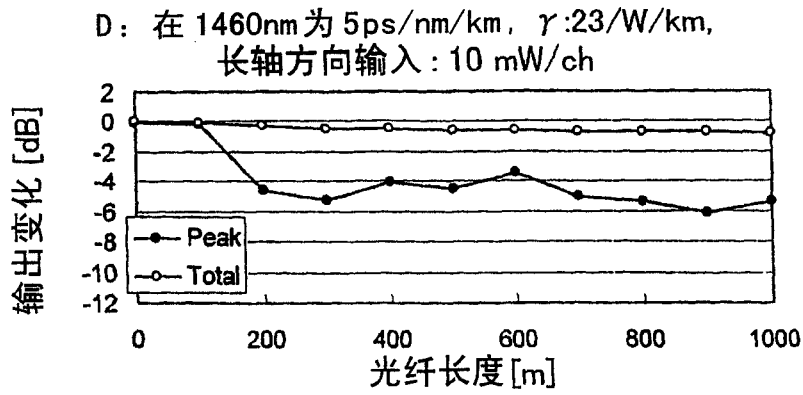


图 54C

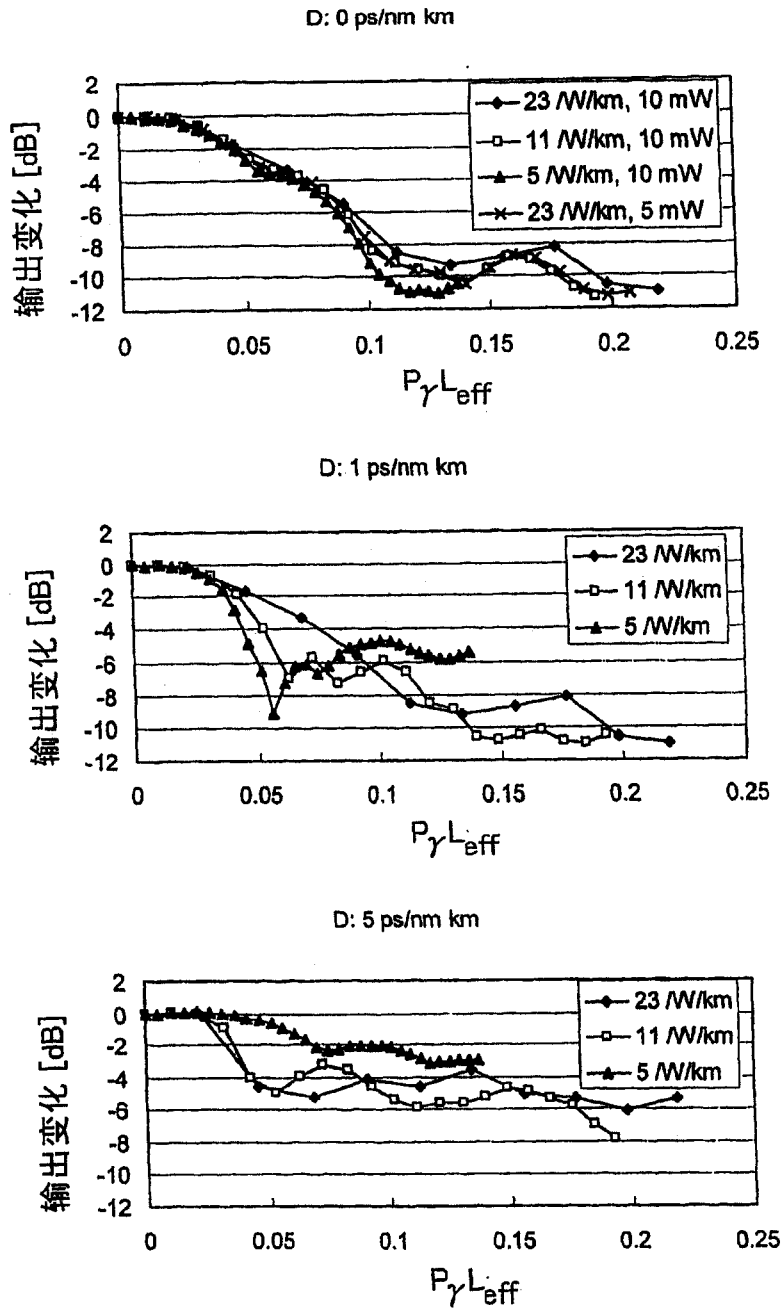


图 55

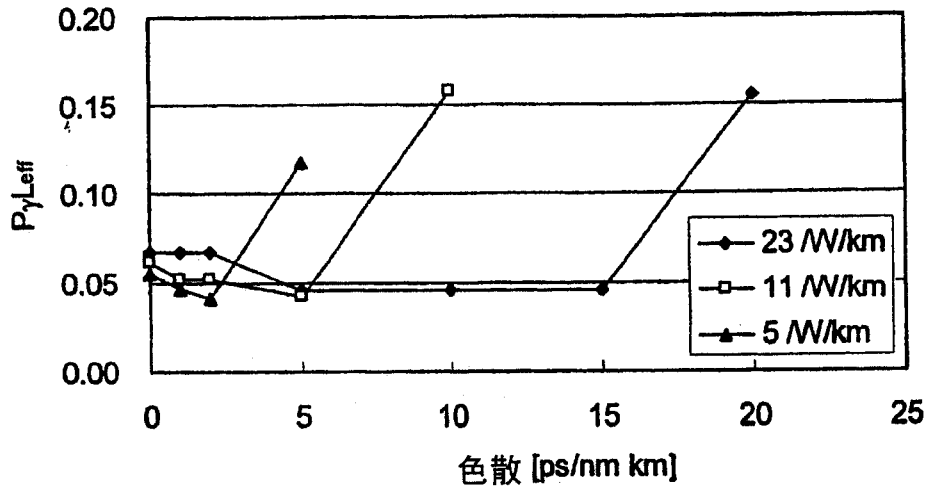


图 56

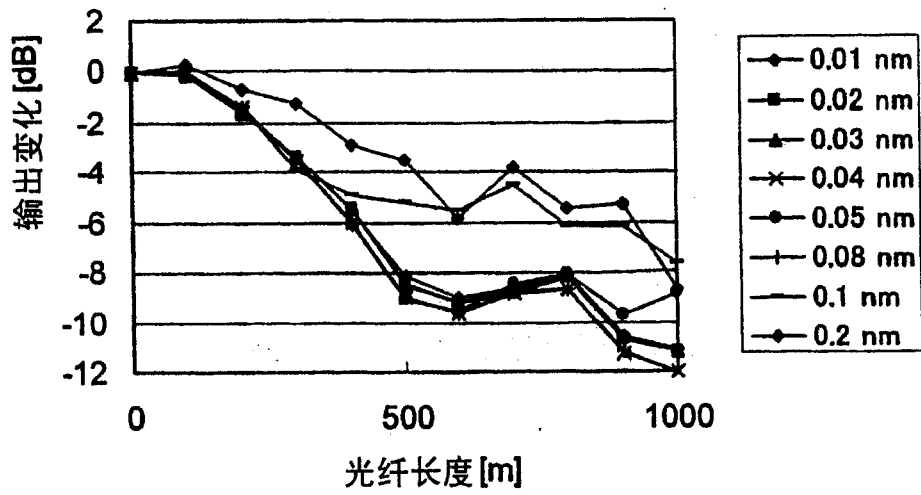


图 57

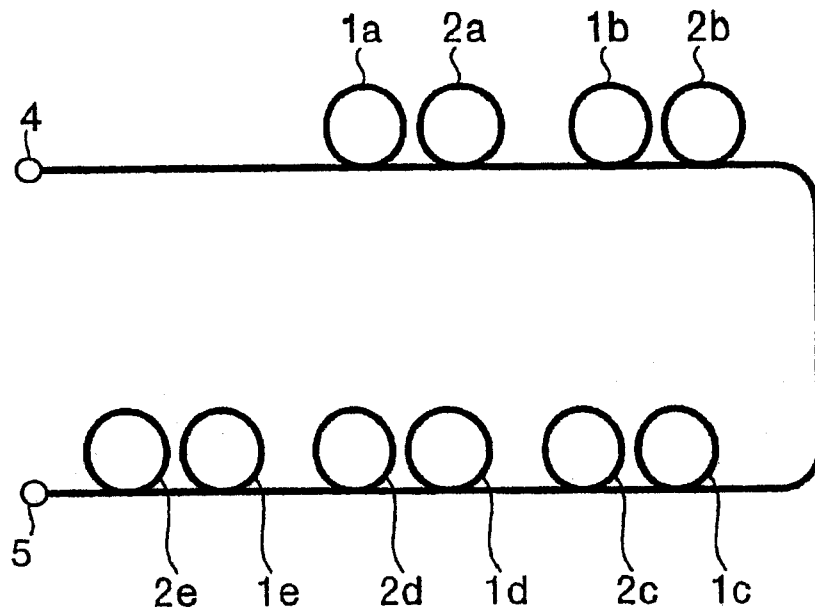


图 58A

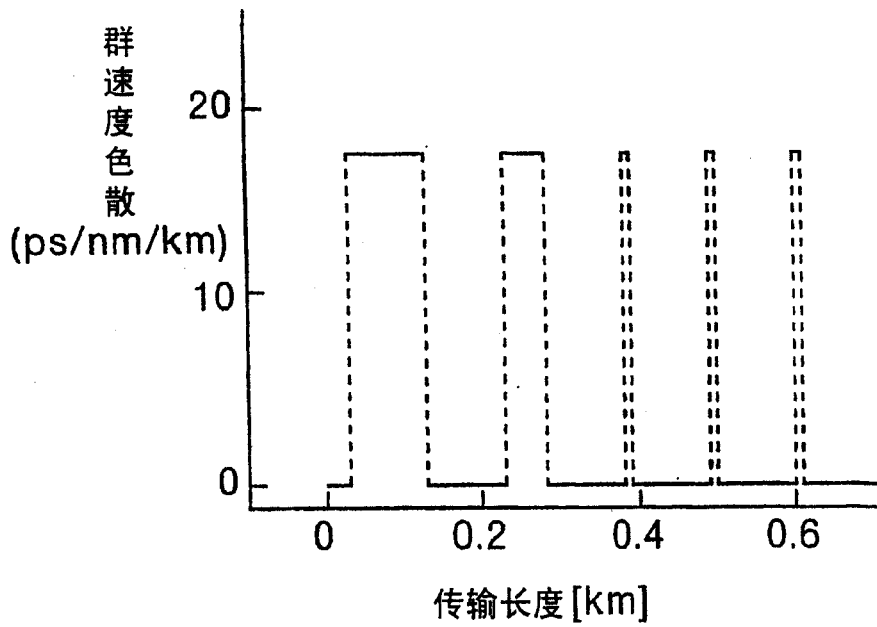


图 58B

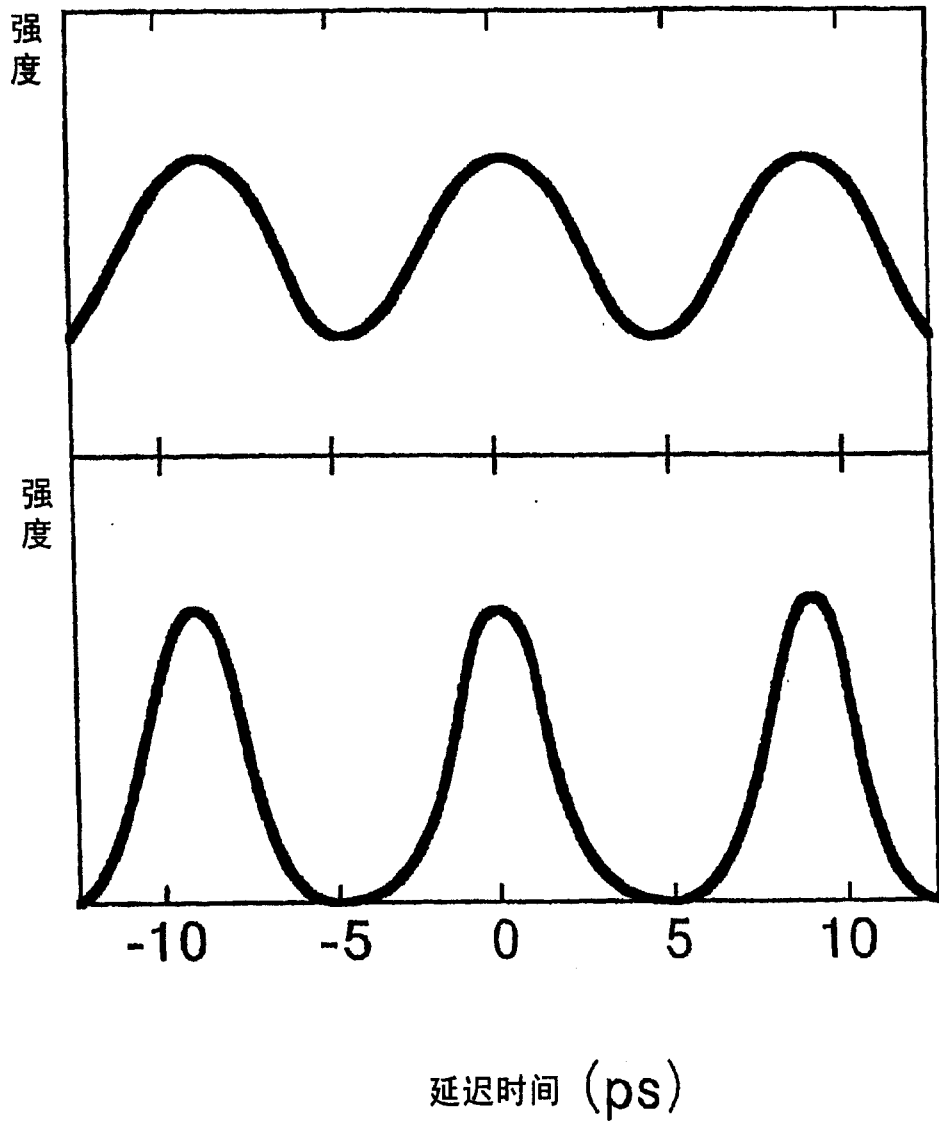


图 59

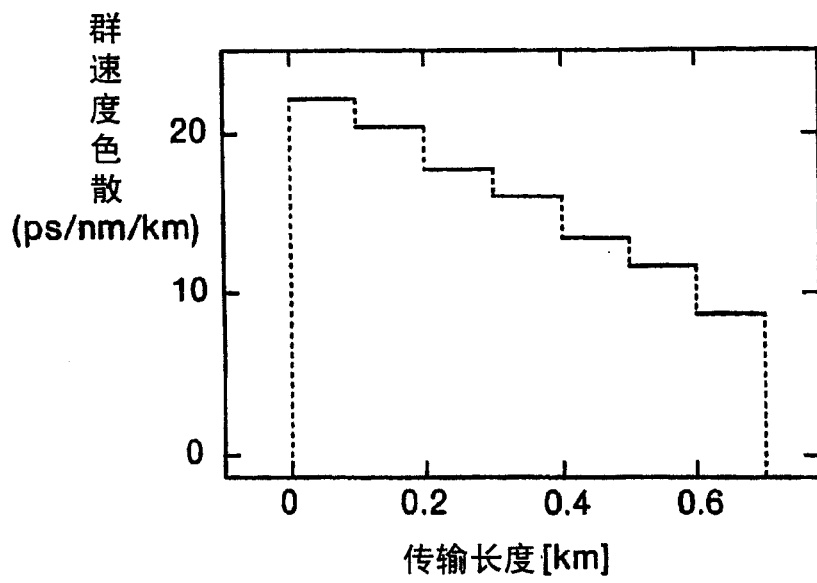


图 60

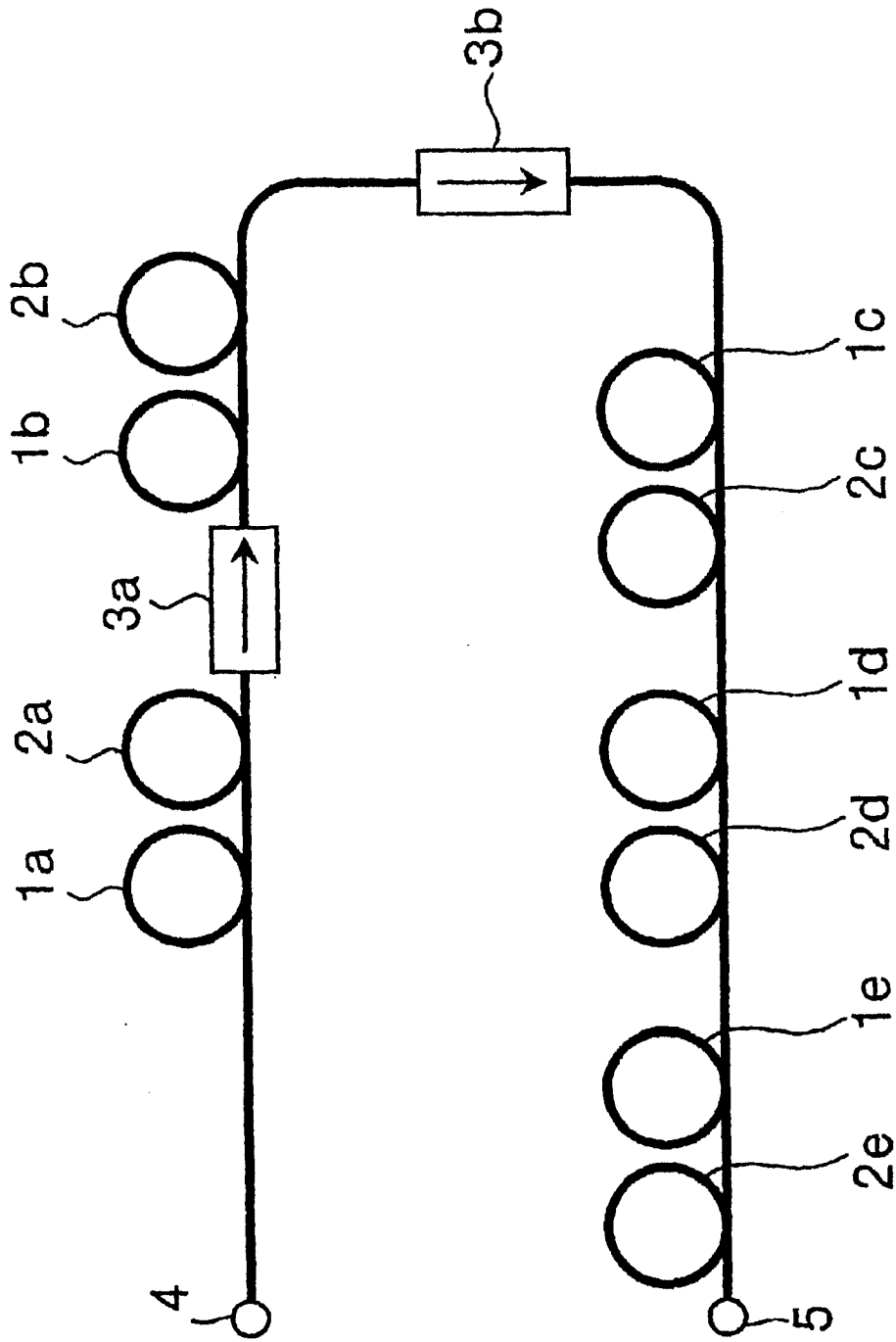


图 61

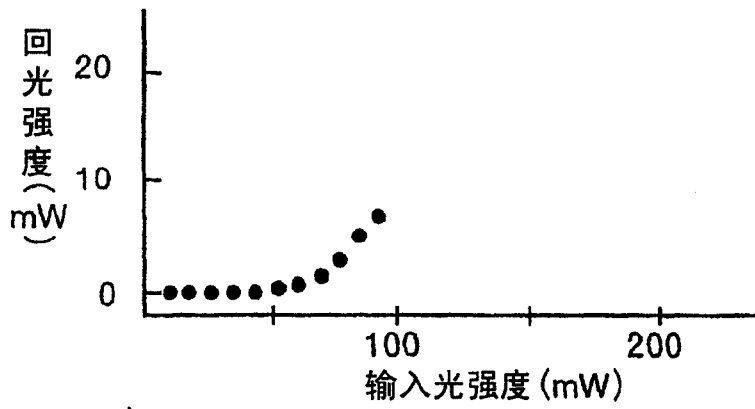


图 62A

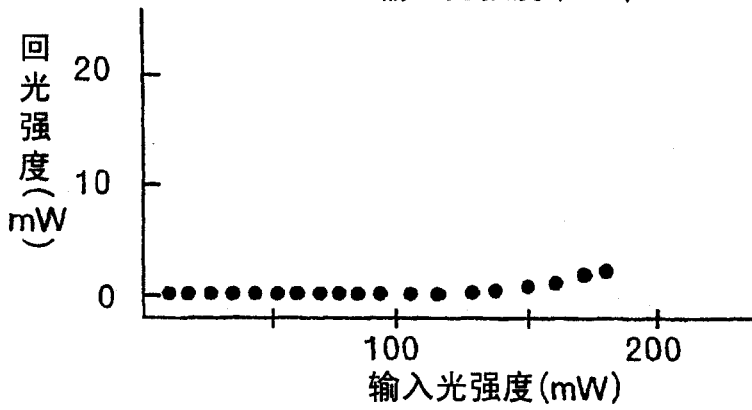


图 62B

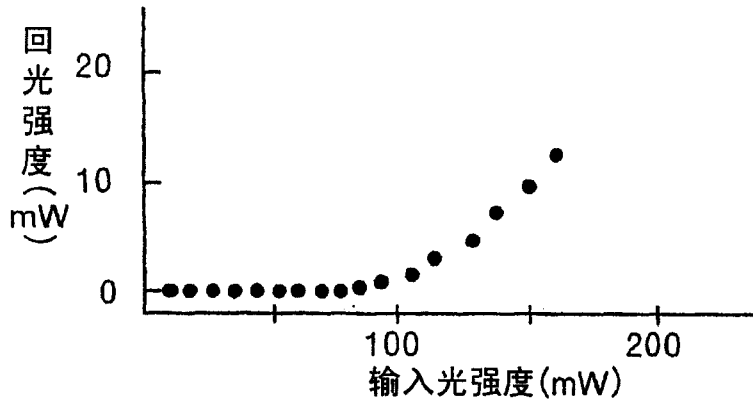


图 62C

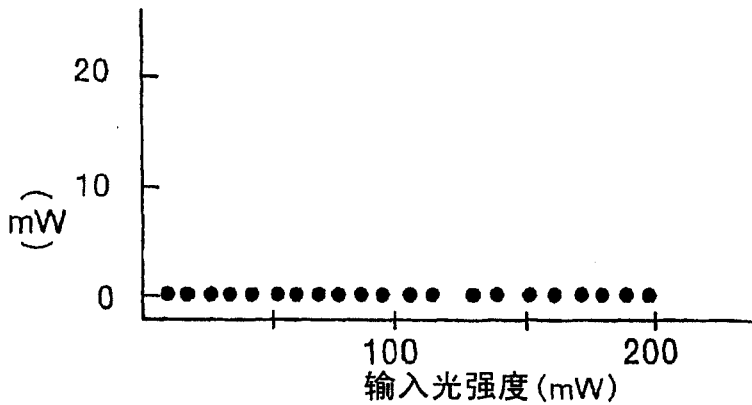


图 62D

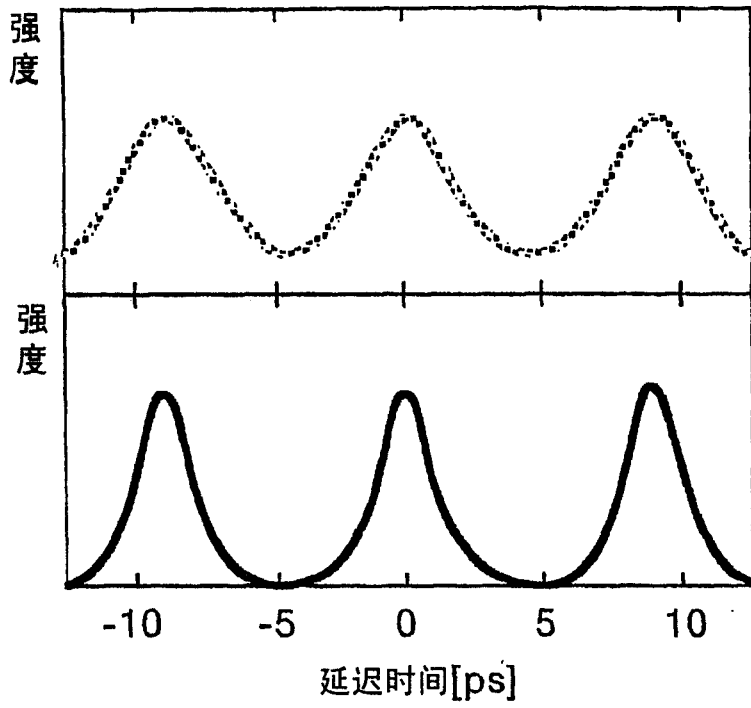


图 63A

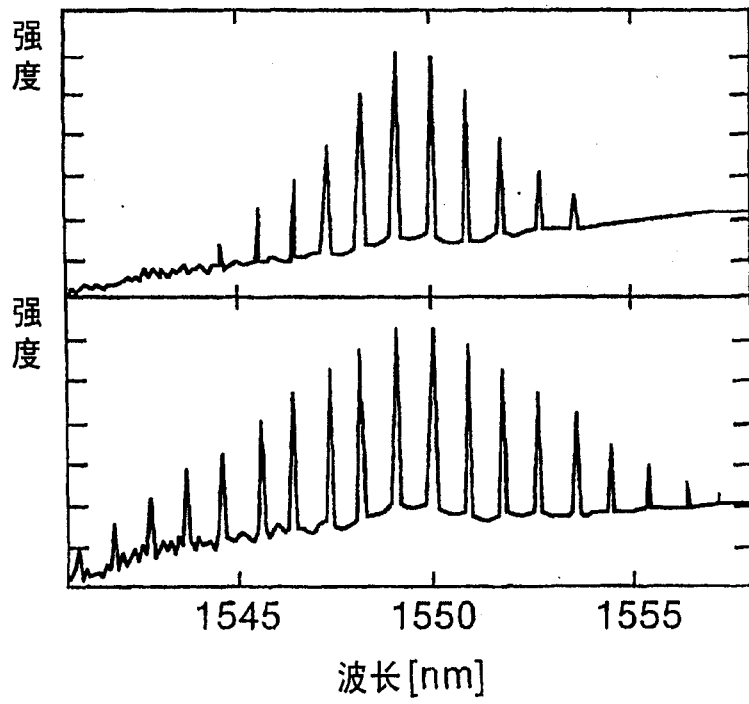


图 63B

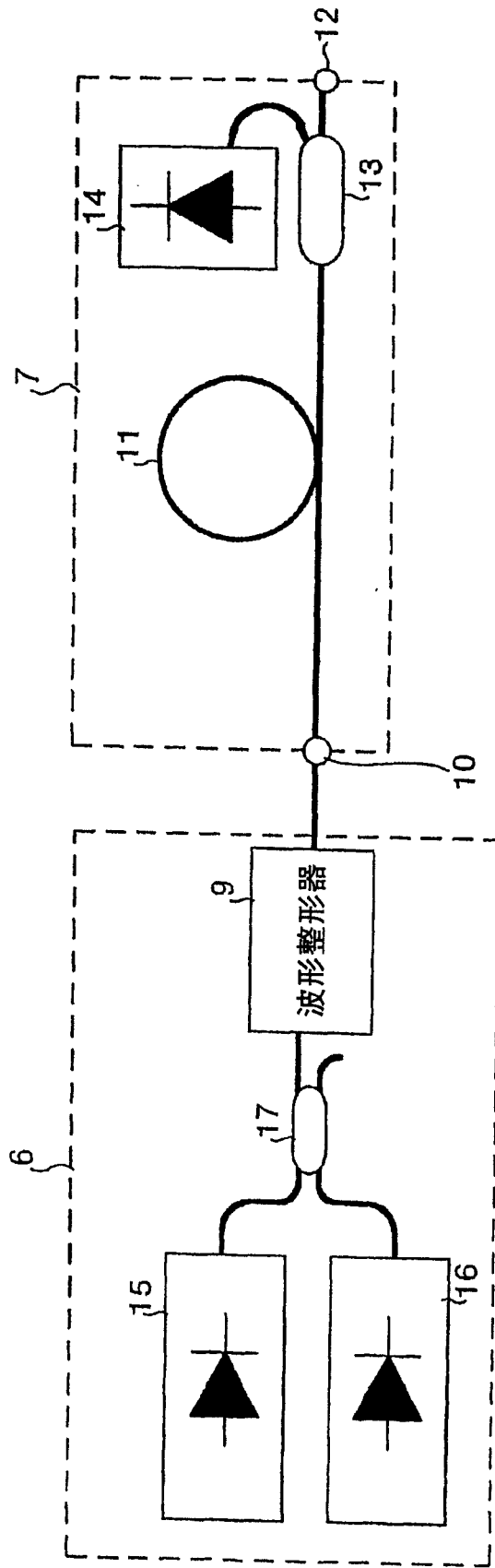


图 64

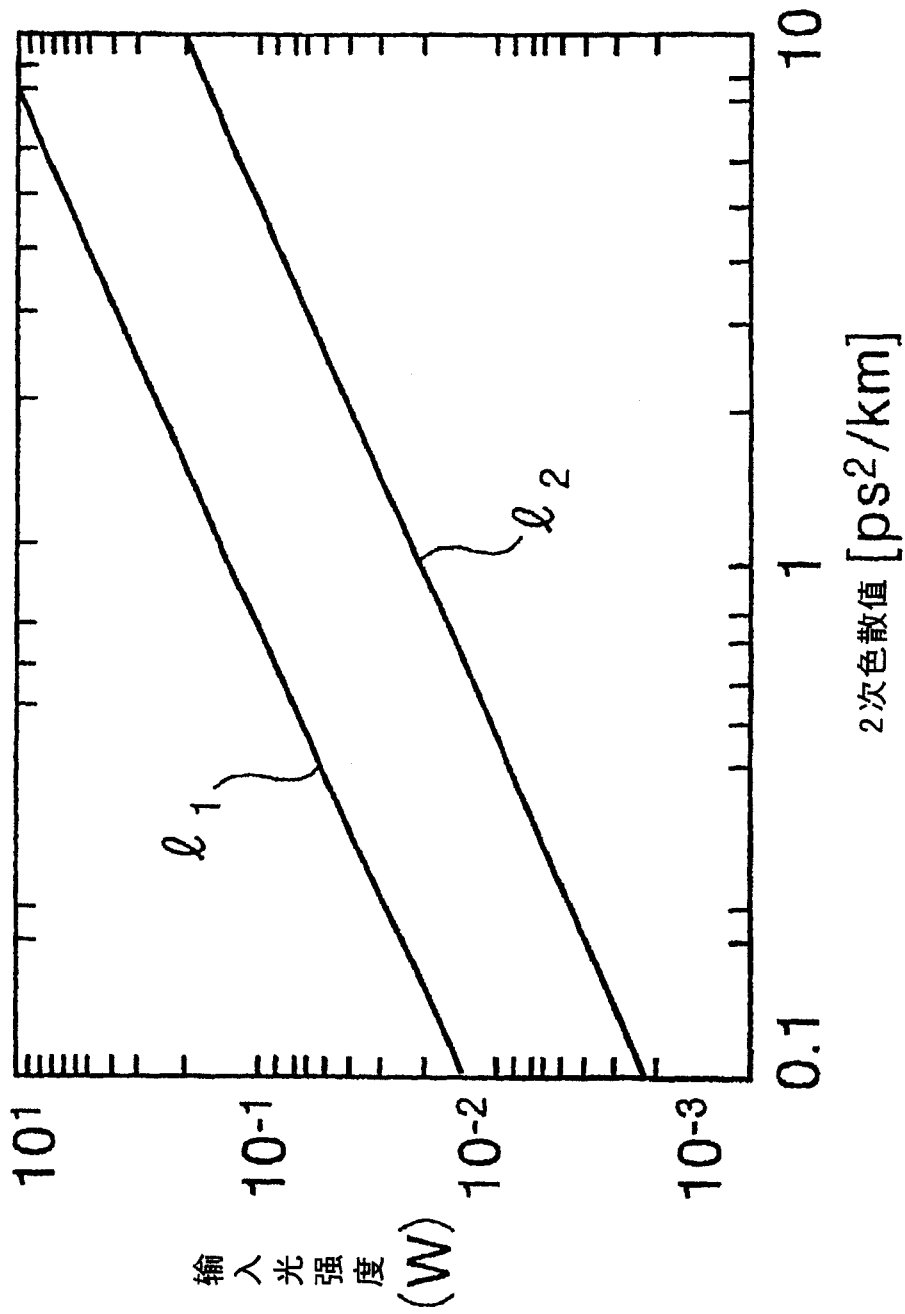


图 65

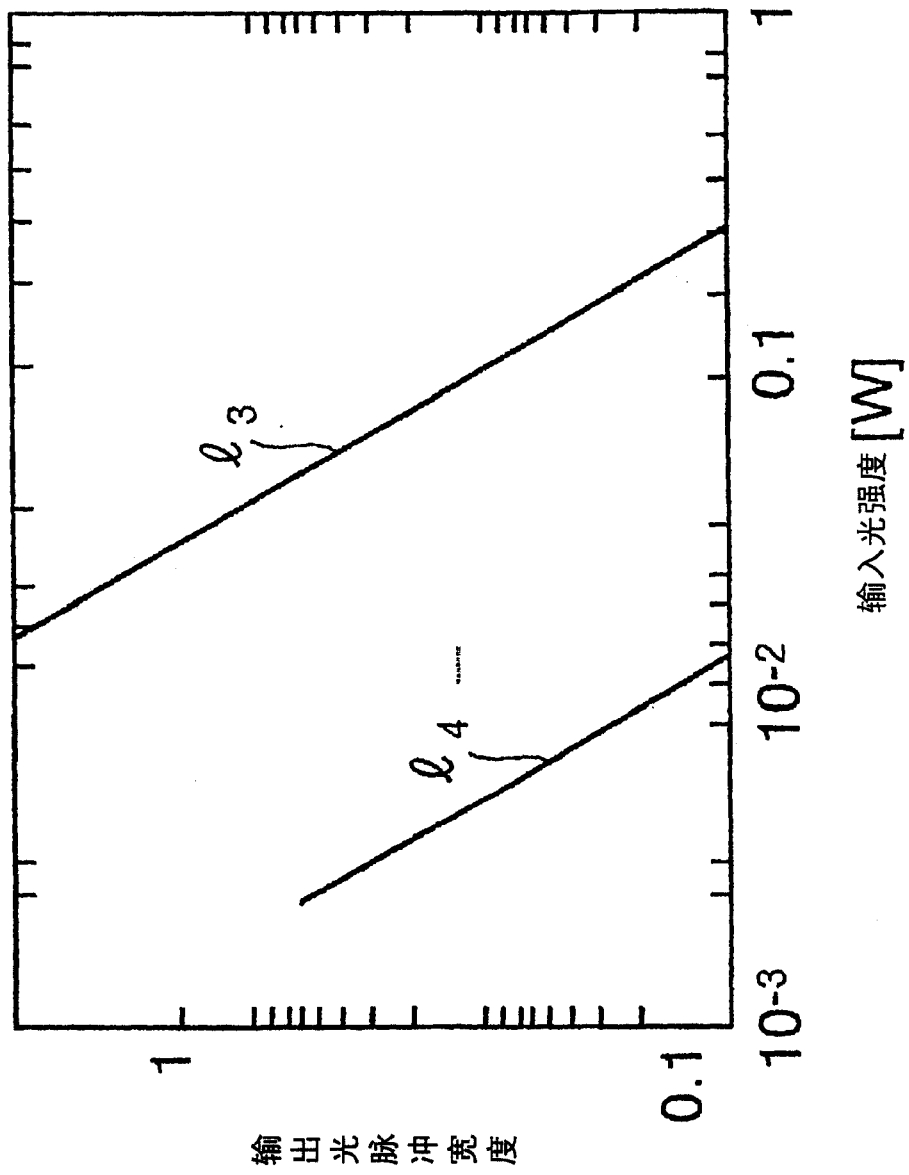


图 66

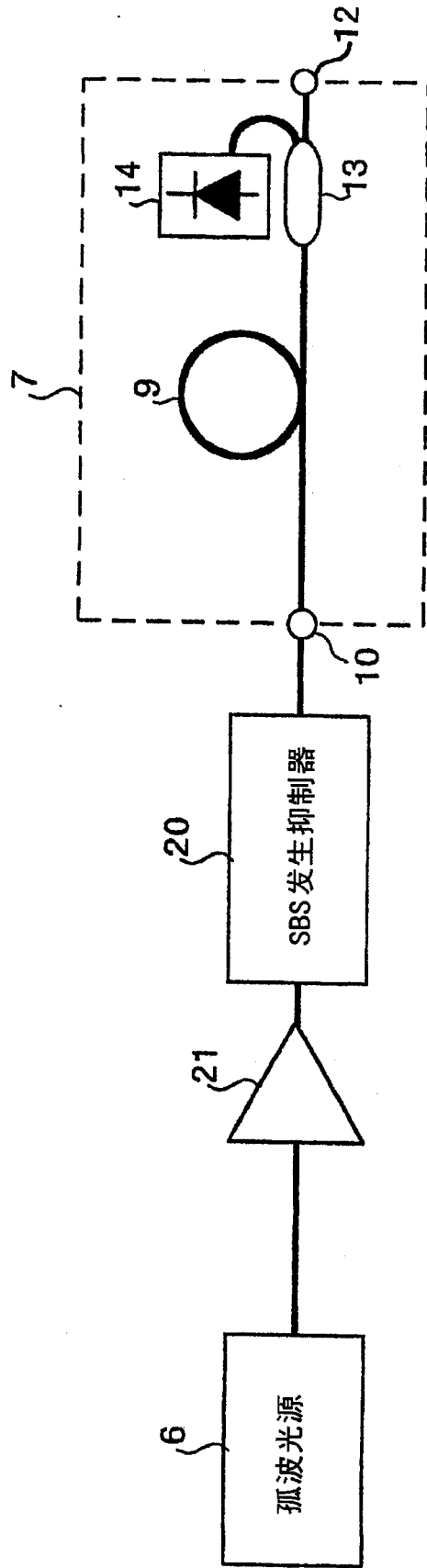


图 67

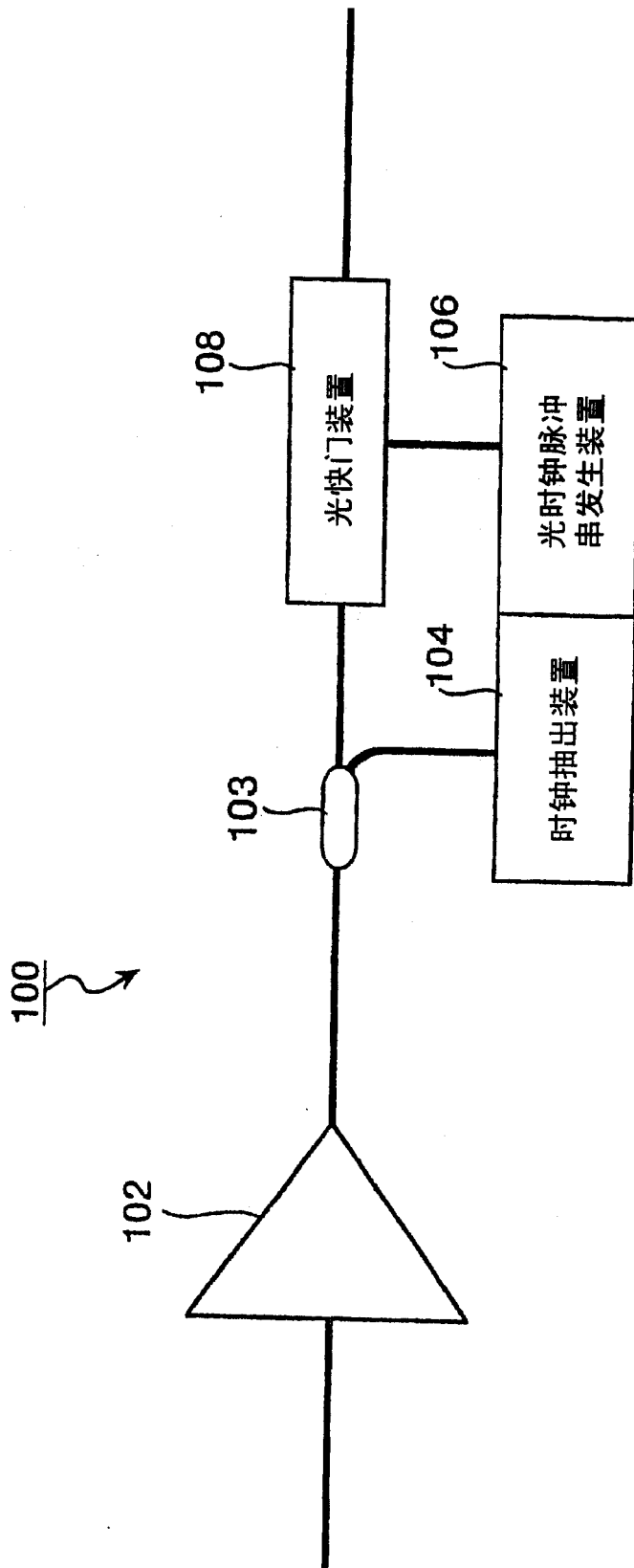


图 68

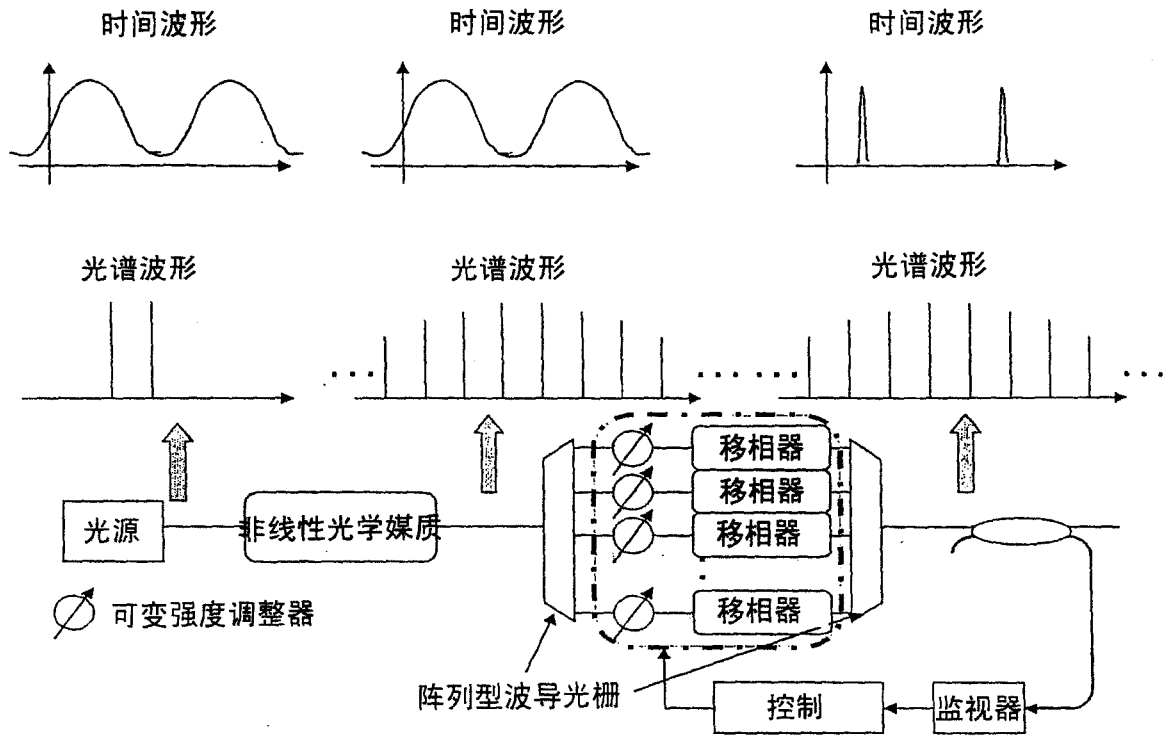


图 69