

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

H01S 3/06 (2006.01)

H01S 3/098 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200580014452.4

[45] 授权公告日 2008 年 11 月 26 日

[11] 授权公告号 CN 100438235C

[22] 申请日 2005. 3. 4

[21] 申请号 200580014452.4

[30] 优先权

[32] 2004. 3. 5 [33] JP [31] 062728/2004

[86] 国际申请 PCT/JP2005/003785 2005. 3. 4

[87] 国际公布 WO2005/086299 日 2005. 9. 15

[85] 进入国家阶段日期 2006. 11. 6

[73] 专利权人 古河电气工业株式会社

地址 日本东京都

共同专利权人 多久岛裕一

[72] 发明人 相曾景一 忠隈昌辉 多久岛裕一

[56] 参考文献

JP4 - 357892A 1992. 12. 10

JP9 - 211508A 1997. 8. 15

Broadband quasi - stationary pulses in mode - locked fiber ringlaser. Jin U. Kang. Optics Communications, Vol. 182 . 2000

Noiselike pulses with a broadband spectrum generated from an erbium - doped fiber laser. M. Horowitz, Y. Barad, Y. Silberberg. Optics Letters, Vol. 22 No. 11. 1997

高非线性光纤及其应用. 贾光明, 贾东方, 李世忱. 光通信研究, 第 115 期. 2003

审查员 丁长林

[74] 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司

代理人 王波波

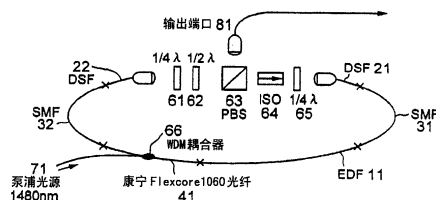
权利要求书 2 页 说明书 17 页 附图 11 页

[54] 发明名称

使用掺稀土元素光纤的光纤激光器及宽带光源

[57] 摘要

一种光纤激光器，在谐振腔中包括以下部分：正常色散光纤；反常色散光纤；作为增益介质的掺稀土元素光纤；以及锁模机制，其中至少将所述掺稀土元素光纤算为所述正常色散光纤，非线性系数 $(\gamma_2 L_2)/(\gamma_1 L_1)$ 大于 1，其中在所述掺稀土元素光纤中，非线性系数是 γ_1 [1/W/m]，长度是 L_1 [m]，包括反常色散光纤在内的谐振腔的其他部件的有效非线性系数是 γ_2 [1/W/m]，长度是 L_2 [m]。



1. 一种光纤激光器，在其谐振腔中包括以下部分：
正常色散光纤、反常色散光纤、作为增益介质的掺稀土元素光纤；
以及
锁模机制，
其中至少将所述掺稀土元素光纤算为所述正常色散光纤，非线性系数 $(\gamma_2 L_2)/(\gamma_1 L_1)$ 大于1，其中在所述掺稀土元素光纤中，非线性系数是 γ_1 [1/W/m]，长度是 L_1 [m]，包括反常色散光纤在内的谐振腔的其他部件的有效非线性系数是 γ_2 [1/W/m]，长度是 L_2 [m]。
2. 如权利要求1所述的光纤激光器，其中，在所述谐振腔中输出光谱的中心波长的总色散是在 -1 ps^2 至 $+0.2 \text{ ps}^2$ 范围内的值。
3. 如权利要求2所述的光纤激光器，其中，所述掺稀土元素光纤是纤芯部分至少添加了铒(Er)离子的掺铒光纤。
4. 如权利要求3所述的光纤激光器，其中，将所述掺铒光纤在 $1.53 \mu\text{m}$ 波段中的吸收峰值设置在 10 dB/m 至 35 dB/m 的范围之内。
5. 如权利要求4所述的光纤激光器，其中，所述掺铒光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 波段中的色散值不小于 $21 \text{ ps}^2/\text{Km}$ 。
6. 如权利要求5所述的光纤激光器，其中，所述吸收峰值与所述色散值的比 α/D [dB/ps²]不小于500，其中所述掺铒光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 波段中的所述色散值是 D [ps²/m]，以及所述掺铒光纤在 $1.53 \mu\text{m}$ 波段中的所述吸收峰值是 α [dB/m]。
7. 如权利要求6所述的光纤激光器，其中，
所述谐振腔还包括：用于将泵浦光注入到所述谐振腔中的泵浦光源以及用于复用来自所述泵浦光源的泵浦光的光复用器，并且
所述谐振腔还包括：偏振分束器、光隔离器、以及偏振片。
8. 一种使用如权利要求7所述的光纤激光器的宽带光源，其中，至少将高非线性光纤与所述光纤激光器的输出侧相连，以产生超连续谱SC光。

9. 一种类噪声脉冲发生装置，产生类噪声脉冲，在所述类噪声脉冲中，强度波形的包络曲线处于持续时间受限突发噪声光的时间脉冲态，其中所述类噪声脉冲发生装置包括：

如权利要求 1~7 之一所述的光纤激光器，用作产生噪声光的噪声光源，在所述噪声光中，强度包络曲线是时间常数；以及
调制所述噪声光的调制器，
所述调制器调制所述噪声光以产生所述类噪声脉冲。

10. 一种宽带光脉冲发生装置，包括：

如权利要求 9 所述的类噪声脉冲发生装置，用作脉冲光源；以及
对所述类噪声脉冲激励非线性效应的非线性介质，
其中所述类噪声脉冲在所述非线性介质中产生超连续谱光以产生宽带脉冲光。

11. 如权利要求 10 所述的宽带光脉冲发生装置，其中，所述非线性介质由色散位移光纤 DSF、色散平坦光纤、以及光子晶体光纤或高非线性光纤 HNL 构成。

使用掺稀土元素光纤的光纤激光器及宽带光源

技术领域

本发明涉及一种使用掺稀土元素光纤的光纤激光器及宽带光源。

背景技术

期望将具有宽带光谱以及较低相干性的脉冲光源应用于各种领域，包括光学形貌学以及光纤传感。使用发光二极管（LED）产生脉冲是一种脉冲产生方法。可以通过使用从以掺铒光纤（EDF）等作为光源的光纤放大器产生的自发辐射放大（ASE）获得低相干光。然而，对于 LED 来说难以获得高强度的光，且带宽谱也被限制于光纤放大器 ASE 光相关放大介质的光产生带宽。

这里有通过使用掺铒光纤的锁模光纤激光器产生宽谱光脉冲的示例（参见非专利参考文献 1）。通过使用非线性极化旋转作为被动锁模机制的展宽脉冲光纤激光器，实现了短相干长度的宽带振荡（44nm）。

通常，在脉冲光纤激光器的振荡现象中存在两种振荡模式：脉冲模式和类噪声（noiselike）模式。脉冲模式振荡为普通的傅立叶变换限制（TL）脉冲，而且已经报道了高能（达几个 nJ）及超短脉冲（亚百 fs）的振荡（参见非专利参考文献 2）。另一方面，类噪声模式由在几十 ps 的范围内的短脉冲束组成。上述宽带脉冲振荡是类噪声模式振荡的示例。类噪声模式振荡中的谱是宽谱，且其变化是适中的。

尽管在产生孤子脉冲的光纤激光器中的一些光谱中出现纹波，此类现象并不在类噪声模式振荡中出现。这种类噪声模式振荡具有平均为 10mW 且峰值为 15W 的高脉冲光强，其优势是与 LED 光源以及 ASE 光源相比可以输出较高的强度。

然而，在非专利参考文献 1 中振荡带宽受限于 Er 的增益带宽并

且需要更宽光谱的脉冲光源。

已经提出了一种用于通过将用于产生超连续谱的超短脉冲激光注入到低色散光纤中来形成超宽带光源的方法。在参考文献中（非专利参考文献3），获得了横跨1100nm到2200nm的宽带光，但是约15dB的纹波保留在纳米量级的精细频率处，从而不适于上述应用，因此，目的是减小在超宽带光的产生中的纹波。

非专利参考文献1：H. Horowitz et al., “Noiselike pulse with a broadband spectrum generated from an erbium-doped fiber laser”, Opt. Lett., Vol 22, pp.799-801, 1977

非专利参考文献2：L.B.Nelson et. al., “Efficient frequency doubling of a femtosecond fiber laser”, Opt. Lett. Vol21, pp.1759-1761, 1996

非专利参考文献3：BR.Washburn et al., “A phase locked frequency comb from an all-fibre supercontinuum source,” Proc. of European Conference on Optical Communication 2003 (ECOC2003), Post-deadline paper Th 4.1.2., Rimini, Italy, Sept. 21-25, 2003.

发明内容

本发明要解决的问题

因此，做出本发明以满足展宽光源光谱的要求，并且本发明的目的是提出一种具有更宽光谱输出特性的光源。

解决问题的手段

在本发明中，设计了适于产生类噪声宽带脉冲的谐振腔的色散图，并且做出了在1.5 μm 波段中具有最大带宽的类噪声激光器以实现上述目的。在下文中具体地描述了此类光纤激光器和宽谱光源的结构。

本发明的第一实施例是光纤激光器，在谐振腔中包括以下部分：正常色散光纤、反常色散光纤、作为增益介质的掺稀土元素光纤；以及锁模机制，其中至少将所述掺稀土元素光纤算为所述正常色散光纤，并且将所述掺稀土元素光纤的长度设置得比所述反常色散光纤的长度短。

本发明的第二实施例是光纤激光器，在谐振腔中包括以下部分：正常色散光纤、反常色散光纤、作为增益介质的掺稀土元素光纤；以及锁模机制，其中至少将所述掺稀土元素光纤算为所述正常色散光纤，在所述掺稀土元素光纤的输出光谱的中心波长处每单位长度正常色散的绝对值比所述反常色散光纤的每单位长度反常色散的绝对值大。

本发明的第三实施例是光纤激光器，在谐振腔中包括以下部分：正常色散光纤、反常色散光纤、作为增益介质的掺稀土元素光纤；以及锁模机制，其中至少将所述掺稀土元素光纤算为所述正常色散光纤，非线性系数 $(\gamma_2 L_2)/(\gamma_1 L_1)$ 大于 1，其中在所述掺稀土元素光纤中，非线性系数是 $\gamma_1[1/W/m]$ ，长度是 $L_1[m]$ ，包括反常色散光纤在内的谐振腔的其他部件的有效非线性系数是 $\gamma_2[1/W/m]$ ，长度是 $L_2[m]$ 。

本发明的第四实施例是光纤激光器，其中，在所述谐振腔中输出光谱的中心波长的总色散是在 -1 ps^2 至 $+0.2 \text{ ps}^2$ 范围内的值。

本发明的第五实施例是光纤激光器，其中，在所述掺稀土元素光纤是纤芯部分至少添加了铒（Er）离子的掺铒光纤。

本发明的第六实施例是光纤激光器，其中，将所述掺铒光纤在 $1.53\mu\text{m}$ 波段中的吸收峰值设置在 10dB/m 至 35dB/m 的范围之内。

本发明的第七实施例是光纤激光器，其中，所述掺铒光纤在 $1.55\mu\text{m}$ 波段中的色散值不小于 $21\text{ps}^2/\text{Km}$ 。

本发明的第八实施例是光纤激光器，其中，所述吸收峰值与所述色散值的比 $\alpha/D[\text{dB}/\text{ps}^2]$ 不小于 500，其中所述掺铒光纤在 $1.55\mu\text{m}$ 波段中的所述色散值是 $D[\text{ps}^2/\text{m}]$ ，以及所述掺铒光纤在 $1.53\mu\text{m}$ 波段中的所述吸收峰值是 $\alpha[\text{dB}/\text{m}]$ 。

本发明的第九实施例是光纤激光器，其中，所述谐振腔还包括：用于将泵浦光注入到所述谐振腔中的泵浦光源以及用于复用来自所述泵浦光源的泵浦光的光复用器，并且所述谐振腔还包括：偏振分束器、光隔离器、以及偏振片。

根据涉及本发明的宽带光源的第一实施例，至少将高非线性光纤与所述光纤激光器的输出侧相连，以产生超连续谱（SC）光。

根据涉及本发明的类噪声脉冲发生装置的第一实施例，类噪声发

生装置产生类噪声脉冲，在所述类噪声脉冲中，强度波形的包络曲线处于持续时间受限突发噪声光的时间脉冲态，其中所述类噪声脉冲发生装置包括：上述光纤激光器，用作产生噪声光的噪声光源，在所述噪声光中，强度包络曲线是时间常数；以及调制所述噪声光的调制器，所述调制器调制所述噪声光以产生所述类噪声脉冲。

根据涉及本发明的宽带光脉冲发生装置的第一实施例，所述宽带光脉冲发生装置包括：上述类噪声脉冲发生装置，用作脉冲光源；以及对所述类噪声脉冲激励非线性效应的非线性介质，其中所述类噪声脉冲在所述非线性介质中产生超连续谱光以产生宽带脉冲光。

根据涉及本发明的宽带光脉冲发生装置的第二实施例，所述非线性介质由 DSF（色散位移光纤）、色散平坦光纤、以及光子晶体光纤或 HNL（高非线性光纤）构成。

发明效果

可以提供一种具有比掺铒光纤增益谱更加平坦且更宽的光谱的光纤激光器。此外，可以提供一种使用该光纤激光器的宽带光源。

附图说明

图 1 是示出了涉及第一实施例的光纤激光器的方框图。

图 2 是示出了涉及第一实施例的光纤激光器的输出光谱的曲线图。

图 3 是示出了涉及第一实施例的光纤激光器的输出光的偏心自相关器的自相关波形曲线图。

图 4 是示出了涉及第二实施例的光纤激光器的方框图。

图 5(1)示出了涉及第二实施例的光纤激光器的输出谱的曲线图。

图 5(2)是示出了第四实施例的光纤激光器的输出谱的曲线图。

图 6 是示出了涉及第三实施例的光纤激光器的方框图。

图 7 是示出了涉及第三实施例的光纤激光器的输出光的偏心自相关器的自相关波形曲线图。

图 8 是示出了涉及第四实施例的光纤激光器的方框图。

图 9 是示出了涉及第五实施例的光纤激光器的方框图。

图 10 是示出了激光器光纤的工作条件的曲线图。

图 11 是示出了光纤激光器的脉冲宽度以及光谱宽度改变的曲线图。

图 12 是示出了涉及第一实施例的光纤激光器的输出光的时间波形的曲线图。

图 13 是示出了涉及本发明的激光器的关键部分的典型图解。

图 14 是示出了用作光偏振器的偏振分束器的示例的图解。

图 15 是示出了在色散零点附近与 SMF 的准直透镜相连的色散位移光纤的示例的图解。

图 16 是示出了在类噪声模式振荡期间的光谱的图解，图 16(a)示出了 500mW 泵浦功率处的光谱以及图 16(b)示出了 1000mW 泵浦功率处的光谱。

图 17 是示出了直线形谐振腔的结构示例的图解。

图 18 是示出了使用掺镱光纤作为掺稀土元素光纤的示例的图解(结构 1)。

图 19 是示出了使用掺镱光纤作为掺稀土元素光纤的示例的图解(结构 2)。

图 20 是示出了使用类噪声脉冲产生超连续谱的仿真的图解。

图 21 是示出了使用超短脉冲产生超连续谱的仿真的图解。

图 22 是示出了不使用光纤激光器的、类噪声脉冲产生的原理图。

图 23 是示出了不使用光纤激光器的、类噪声脉冲产生的实验示例的图解。

图 24 是示出了当把输入功率变成高非线性光纤时的输出光谱的图解。

图 25 是示出了其他类噪声脉冲的示例的图解。

参考数字解释

11	掺铒光纤 (EDF)
21、22、23	色散位移光纤 (DSF)
31、32、33	单模光纤 (SMF)
41	康宁 Flexcore 1060
51	高非线性光纤 (HNL)
61、65	四分之一偏振片
62	二分之一偏振片
63	偏振分束器 (PBS)
64	隔离器 (ISO)
66	光复用器 (WDM 耦合器)
71	泵浦光源
81	输出端口

具体实施方式

在下文中将参考附图解释涉及本发明的光纤激光器以及使用光纤激光器的宽带光源的优选实施例。

将相同的参考数字用于在附图描述中的相同部分或相似部分。

在本发明中，将在谐振腔中的输出光谱的中心波长的总色散值调整为在 -1ps^2 至 $+0.2\text{ps}^2$ 范围内的值。原因将在下面描述。

首先，在反常色散一侧累积的色散量的上限是通过展宽脉冲激光器理论（色散管理孤子）的辅助下获得的。当由下面的公式所表达的色散图的强度超过 10 时，难以获得脉冲解（pulse solution）。

$$S = (\beta_{21}L_1 - \beta_{22}L_2) / T_{\text{FWHM}}^2$$

其中， β_{21} 是正常色散光纤的色散， L_1 是正常色散光纤的长度，

以及 β_{22} 是反常色散光纤的色散， L_2 是反常色散光纤的长度， T_{FWHM} 是脉冲的半高全宽。

如果估计脉冲宽度为较短的 200fs 且 $S=10$ 时，在反常色散一侧的总色散量将大约是 -0.2ps^2 。因为脉冲模式情况处于色散管理孤子理论的应用范围，安全脉冲解是其存在的先决条件。然而，在类噪声脉冲情况下，不必要具有严格的脉冲解，在反常色散一侧的总色散量的容限约是 5 至 10 倍，约 -2ps^2 。因此，基于 50% 而得到上限为 -1ps^2 。

当总色散量变为正常色散时，由于非线性光学效应通过频移加强了脉冲持续时间的展宽。因而，在正常色散一侧具有很少的容限，在执行色散管理时，如果正常色散超过反常色散一侧的色散量的 20%，将难于获得类噪声模式解。因此关于在可行的类噪声模式中的光纤激光器，将在谐振腔中的输出光谱的中心波长处的总色散调整到 -1ps^2 至 $+0.2\text{ps}^2$ 的范围之内。

此外在本发明中，非线性率 $(\gamma_2 L_2)/(\gamma_1 L_1)$ 大于 1，其中在掺稀土元素光纤的 $1.55\mu\text{m}$ 波长处，非线性系数是 $\gamma_1[1/\text{W}/\text{m}]$ ，长度是 $L_1[\text{m}]$ ，在包括反常色散光纤在内的其他谐振腔部件的 $1.55\mu\text{m}$ 波长处，有效非线性系数是 $\gamma_2[1/\text{W}/\text{m}]$ ，长度是 $L_2[\text{m}]$ 。

在图 10 中，将光纤激光器的工作条件示出为脉冲能量 $E[\text{pJ}]$ 和非线性率 γ' 之间的关系。不稳定的模式在虚线上方的区域，且脉冲振荡是不可获得的。为在其中脉冲振荡是可获得的虚线下方的区域中获得宽带光脉冲（单脉冲模式），非线性率 $(\gamma_2 L_2)/(\gamma_1 L_1)$ 应该大于 1。这是因为在光纤激光器中将非线性率（在图 10 的水平轴上的 γ' ）设置在不超过 1 的范围，且当比率超过 1 时光谱展宽效果变得显著起来。在图 10 中，白色的圈示出了传统光纤激光器的工作条件。

为产生极大地超出 EDF 增益带宽的光脉冲，有效非线性率 $r'=(\gamma_2 L_2)/(\gamma_1 L_1)$ 应该大于 1。 $\gamma_1[1/\text{W}/\text{m}]$ 和 $L_1[\text{m}]$ 表示在正常色散光纤（EDF）的 $1.55\mu\text{m}$ 波长处的非线性系数和长度， $\gamma_2[1/\text{W}/\text{m}]$ 和 $L_2[\text{m}]$ 表示在谐振腔的正常色散光纤和其他部件的 $1.55\mu\text{m}$ 处的有效非线性系数和长度。

在图 11 中示出了数值仿真的示例。水平轴代表谐振腔在纵向的

归一化距离, 0 至 0.25 之间的区域和 0.75 至 1 之间的部分表示反常色散光纤的区域, 以及 0.25 至 0.75 之间的部分表示正常色散光纤(EDF)的区域。由于环形谐振腔结构的原因, 周期性地重复这种改变且 0 和 1.0 表示相同的点。图 11 (a) 示出了脉冲宽度的改变, 而图 11 (b) 示出了光谱宽度的改变。当非线性率 γ' 远超过 1 时, 在反常色散光纤的中点附近出现了光谱展宽, 而在正常色散光纤中仍然保持较窄的光谱。

因此, 在放大期间光谱变窄并且获得了超出增益介质带宽限制的光脉冲。在下面提到的实施例 1 中非线性率约是 4。在实施例 1 中, 因为在正常色散光纤 EDF 和其他反常色散光纤之间的非线性系数不是那么的不同, 所以反常色散光纤的长度应该是比正常色散光纤的长度充分地长, 以获得宽带光谱。

图 13 示出了示出涉及本发明的激光器的关键部分的典型图解。将参考图 13 解释涉及本发明的激光器的关键部分。用于提取光输出的光耦合器的位置在图 13 中是任意的。尽管在下面描述的实施例中的偏振控制器中使用了波片, 可以使用光纤环或其他优选的代替物来代替波片。光偏振器可以是任意结构, 并且如果将偏振分束器用于光偏振器, 可以将光偏振器与用于获得如图 14 所示的光输出的光耦合器相集成。

(第一实施例)

首先, 将解释涉及本发明的第一实施例。图 1 是示出了第一实施例的光纤激光器的方框图。在如图 1 所示结构的光纤激光器中, 顺序排列在脉冲传播方向上的是色散位移光纤(DSF) 21、单模光纤(SMF) 31、掺铒光纤(EDF) 11、康宁 Flexcore 1060 (商标) 光纤 41、光复用(WDM) 耦合器 66、单模光纤(SMF) 32、色散位移光纤(DSF) 22、 $1/4\gamma$ 偏振光片 61、 $1/2\gamma$ 偏振光片 62、偏振分束器(PBS) 63、隔离器(ISO) 64、以及 $1/4\gamma$ 偏振光片 65, 并且以通过这些元件且再返回到色散位移光纤(DSF) 21 的环形形成谐振腔。

来自泵浦光源 71 的泵浦光通过 WDM 耦合器 66 与康宁 Flexcore 1060 光纤 41 相结合, 并且通过反向泵浦结构来泵浦掺铒光纤(EDF)

11。在第一实施例中将 1480nm 波段的泵浦光源用作泵浦光源 71。通过输出端口 81 提取输出光,且将输出光输入到光谱分析仪或自相关器中来观察波形。本发明的发明人根据第一实施例的谐振腔中的每个光纤的色散和掺铒光纤 (EDF) 吸收值,设计了适于实现类噪声振荡的色散图以及宽带光脉冲。

具体地,使用具有较高的正常色散的掺铒光纤 (EDF) (其中具有 1.55 μm 波长的掺铒光纤 (EDF) 11 的色散值是 38.4ps²/km),在第一实施例的谐振腔中,1.55 μm 波长处的总色散设计为-0.029ps²。这里,在第一实施例的谐振腔中的光纤的各自的长度是:DSF 21: 1.8m; SMF 31: 2.4m; EDF 11: 2.5m; 康宁 Flexcore 1060 光纤 41: 3.0m; SMF 32: 2.5m; DSF 22: 1.8 米; 以及光纤总长度是 14.0m。

如上所述,在第一实施例的谐振腔中,使用了具有较高正常色散的 EDF,从而使具有正常色散的 EDF 11 的长度比反常色散光纤的长度短得多。因而在反常色散光纤中增加了非线性效果的影响以促进光谱展宽。因此,具有本实施例中上述结构的光纤激光器更易于产生类噪声模式并且可以产生更宽的频带。

为了验证,观察了在第一实施例的光纤激光器中的输出光谱。如图 2 中所示,在以 1.55 μm 为中心的波长周围获得了 3dB 带宽为 87nm 的平坦宽谱。上述输出光谱极大地超过了掺铒光纤的增益带宽。根据本发明,可以发现其成功地实现了比使用传统掺铒光纤的光纤激光器 (带宽 44nm, 参考非专利参考文献 1) 更宽的带宽。这里,输出光强是 72mW, 泵浦光源 71 的泵浦功率 (1.48 μm 波长) 是 0.5W。

当泵浦光功率不低于 420mW 时,旋转偏振片 61、62、65 以容易地实现锁模操作。基本重复频率是 14.3MHz。图 3 是偏心自相关器得到的输出光的自相关波形。在中心附近,看到了具有约 100 飞秒宽度的分量,所述分量表明具有至少几百飞秒的脉冲宽度的脉冲分量的存在。而且,位于下方的宽度约 10 皮秒的基底 (pedestal) 表示出类噪声脉冲的包络曲线,所述类噪声脉冲的包络曲线通常被发现为总体上构成脉冲光。如由图 3 清楚地所示,存在具有至少几百飞秒脉冲宽度的脉冲分量。

图 12 是示出了在第一实施例的光纤激光器中的输出光的时间波形的曲线图。这意味着图 12 示出了用具有 100MHz 频带的光检测器所观察到的光强随时间的变化。图 12 示出了以 70 纳秒的间隔产生脉冲且脉冲处于锁模工作条件下。

在用反常色散光纤对谐振腔中的累积正常色散进行补偿的情况下，如第一实施例所示，要求正常色散光纤的长度小于反常色散光纤的长度。为此目的，正常色散光纤 EDF 的色散绝对值应该大于反常色散光纤的反常色散。

在上述第一实施例中，将标准 SMF（波长 1.55 μm 处的色散值是 $-21\text{ps}^2/\text{km}$ ）用作反常色散光纤。在这种情况下，要求正常色散光纤 EDF 的色散值大于反常色散光纤 SMF 的色散绝对值 $21\text{ps}^2/\text{km}$ ，以便使正常色散光纤的长度短于反常色散光纤的长度。因此，在本发明的第一实施例中，根据宽带类噪声模式振荡的观点，具有 1.55 μm 的 EDF 的色散值优选地要不小于 $21\text{ps}^2/\text{km}$ 。

在谐振腔的每个色散区中优选的色散绝对值可以遵守公式 $0.5 \times (\text{光谱展宽系数}) / (\text{光谱宽度})^2$ 。这里，光谱展宽系数是在反常色散区中的光谱最大值与在正常色散区中的光谱最小值的比。对于具有如在本实施例中的约 60nm 的有效光谱宽度的类噪声脉冲，优选的色散值在从 0.05ps^2 至 0.10ps^2 的范围内。在本实施例中，在 EDF 11 的 1.55 μm 波长处的色散值是 $38.4\text{ps}^2/\text{km}$ ，使用的长度是 2.5m，以及在正常色散区的总色散是 0.096ps^2 。

在谐振腔的实际设计中，确定长度以满足基于每个色散区光纤的色散值的优先色散值。对于如在本实施例中的类噪声模式振荡，使正常色散光纤 EDF 的色散值尽可能大以使正常色散光纤的长度相比于反常色散光纤更短是有效的。然而，缩短 EDF 减小了在 EDF 中获得的输出，从而要求根据缩短来增加吸收系数（每单位的吸收值）以保持吸收长度乘积（吸收系数和长度的乘积）不变。

在第一实施例中，所使用的 EDF 的长度和在 1.53 μm 波长处的吸收峰值分别是 2.5m 和 23.7dB/m，因此吸收长度乘积是 59.25dB。在本实施例中的吸收长度乘积应该是大于 50dB 的值，根据充分的激光输

出的观点优选地大于 55dB。从上述描述中来看清楚的是，在 EDF 中的色散值和吸收系数之间存在着优选的平衡。应该以这样的方式设置所述值，从而使在 EDF 中 1.55 μm 波长处的色散值是 $D[\text{ps}^2/\text{m}]$ ，以及在 1.53 μm 波段处的吸收峰值是 $\alpha[\text{dB}/\text{m}]$ 。当在正常色散区的总色散是 0.10ps^2 且吸收长度乘积不小于 50dB 时，所要求的 EDF 长度被确定为 $L=0.10/D$ ，并且作为优选条件，吸收值和色散值之比 α/D 大于 $500[\text{dB}/\text{ps}^2]$ 。

因此，对于宽带和类噪声模式振荡来说，在将吸收值和色散值比 α/D 保持在优选比率的同时增加 α 和 D 是有效的。然而，过度掺杂以增加 α 的铒离子由于离子间相互作用而引起转换效率（浓缩猝灭）的降低，从而不能获得有效的输出。因此，为保持有效的转换效率，存在避免铒浓度（吸收系数）超过特定值的最高值。本发明的发明人准备了具有不同吸收系数的 EDF，并且确定和比较了在 1.48 μm 双向泵浦结构中从泵浦光到信号光的功率转换效率。当吸收值超过 35dB/m 时，观察到了功率转换效率的显著下降。

为此，期望吸收峰值不大于 35dB/m 以保持较好的转换效率。另外为避免由于浓缩猝灭（concentration quenching）的转换效率下降，可以以高浓度共同掺杂铝（Al）。在本实施例的 EDF 11 中，将铒以不低于 4.8wt% 的浓度与铝一起进行共同掺杂。根据避免浓缩猝灭的观点，要求铝以不小于 3wt% 的浓度进行共同掺杂，优选地不低于 4wt%。

此外，为如上所述使正常色散光纤的长度短于反常色散光纤的长度，要求正常色散光纤 EDF 的色散值大于反常色散光纤 SMF 的色散绝对值 $21\text{ps}^2/\text{Km}$ 。因此，由于在正常色散区中 0.10ps^2 的总色散以及不低于 50dB 的吸收长度乘积，所要求的吸收峰值变得不小于 10.5dB/m。因此，在本实施例中，发现吸收峰值至少不低于 10dB/m 是必要的。

（第二实施例）

将解释涉及本发明的第二实施例。图 4 是示出了第二实施例的光纤激光器的方框图。该光纤激光器的谐振腔的结构和每个光纤的长度与上述第一实施例的谐振腔的结构和每个光纤的长度相同，并且通过

使通过输出端口 81 提取的类噪声脉冲进入高非线性光纤 (HNL) 51, 来实现超连续谱产生实验。HNL 光纤 51 在 $1.55\mu\text{m}$ 波长处的色散值是 $-0.60\text{ps}^2/\text{Km}$, 零色散波长是 $1.532\mu\text{m}$ 、在 $1.55\mu\text{m}$ 波长处的非线性系数是 $20/\text{W}/\text{km}$, 以及光纤长度是 1km 。

数值仿真表明: 类噪声光谱涉及平坦光谱的超连续谱。不但类噪声脉冲而且噪声光的强度波形具有与光谱宽度的倒数一样小的微小结构, 并且可以将其看作是短脉冲的伪集合。因而如果可以获得足够的强度, 超连续谱和超短脉冲的产生变成可能。这里, 处于持续时间受限的突发状态的噪声光被看作是类噪声脉冲模型, 并且对在光纤中传播的波形和光谱的变化进行检查。

图 20 示出了计算示例。在图 20 中, 入射光是 20nm 光谱宽度的类噪声脉冲, 并且强度包络曲线的持续时间是 33ps 。该类噪声脉冲光被看作是约 100 到 300fs 的短脉冲集合。每个脉冲的能量是 1.5nJ , 其中峰值功率变为约 200W 。将在波长 1550nm 处具有 $-0.74\text{ps}^2/\text{km}$ 色散值的高非线性光纤配置为用于产生超连续谱的光纤。为了计算, 考虑了高达 5 阶的高阶色散和包括非线性延迟响应·自陡峭效应等的高阶项。图 21 示出了由具有相同水平的峰值功率以及光谱宽度的超短脉冲所产生的超连续谱的情况用于比较。这与以普通脉冲模式振荡的光纤激光器所产生的超连续谱相对应。脉冲宽度是 300fs 并且峰值功率是 200W 。

首先, 将描述使用类噪声脉冲 (图 20) 的情况。由于在高非线性光纤中约 1m 的传播, 光谱被自相位调制·自拉曼放大所展宽, 从而形成类噪声脉冲的微小波峰受到脉冲压缩的影响。虽然随着进一步传播, 非线性光学效应和色散显著地改变了波形, 与被破坏的波形无关, 仍然保持了噪声光特性, 并作为超短脉冲的组合。为此, 虽然相对较长距离的传播 (几十米至几百米), 光谱保持展宽。并且尽管光谱变为噪声状态, 光谱被充分均匀地分布并且通过对多个噪声态脉冲取平均获得了平坦的光谱。

将描述使用普通超短脉冲的情况 (图 12)。由于在高非线性光纤中约 1m 的传播, 光谱被与上述情况一样地自相位调制·自拉曼放大

所展宽，并且受到脉冲压缩的影响。然而，由于约 4m 的普通超短脉冲光的传播，脉冲时间波形被破坏，峰值功率减小，以及光谱展宽停止。并且光谱纹波不超过 15dB。这不是在该计算示例中特别发现的现象，而是在使用超短脉冲的超连续谱产生中的一般现象。因而，在光谱色散效率（较长的非线性相互作用长度）和光谱平坦度方面，使用类噪声脉冲的超连续谱产生优于使用超短脉冲的超连续谱产生，并且其具有作为超宽带光源的绝对优势。

在图 1 和图 4 中示出的示例中，准直器之前的光纤类型是指定的，但是光纤类型并不这样敏感。例如，图 15 中示出的准直透镜是 SMF，并且当将其与近零色散值的色散位移光纤相连时，以类噪声模式发生振荡。正常色散光纤的总色散量是 0.118ps^2 ，反常色散光纤的总色散量是 -0.140ps^2 ，以及总色散量是 -0.022ps^2 。

图 16 示出了振荡光谱。当泵浦光功率是 500W 时半高全宽是 81nm，而泵浦光功率是 1W 时半高全宽是 74nm。当向该谐振腔增加 20m 的 SMF 时，谐振腔也可以按照类噪声模式振荡。在该增加的情况下，总色散量约是 -0.32ps^2 ，光谱形式类似，以及半高全宽变得稍微窄些（约 70nm）。在总色散的绝对值较大的情况下，以脉冲模式振荡非常难，并且即使其振荡，光谱宽度将变得非常窄（参考 IEEE Journal of Quantum Electronics, 30(6), 1469, 1994）。然而，因为色散容限较高，类噪声模式振荡是可能的。这是本发明的主要优势。

图 5 (1) 示出了第二实施例中的光纤激光器的输出光谱。在第二实施例的光纤激光器中，获得了具有 950nm 波段的 SC 光。假想因为没有留下残余光谱分量且光谱均匀地展宽，使短脉冲分量发生集束。并且在光谱中不存在微小纹波，这是源自类噪声脉冲的 SC 光产生的特征。

（第三实施例）

将解释涉及本发明的第三实施例。图 6 是示出了第三实施例的光纤激光器的方框图。光纤激光器的谐振腔的结构和每个光纤的长度与第一实施例中的谐振腔相同。将通过第一实施例的输出端口 81 提取的类噪声脉冲输入到 SMF 33，并检查其色散容限。

这里, SMF 33 的长度是 1.6km 以及色散量是 -34ps^2 。图 7 示出了经 1.6km SMF 33 传播之后的自相关波形。在亚皮秒傅立叶变换限制 (TL) 脉冲经 1.6km SMF 传播之后, 不认为短脉冲分量继续存在。然而, 图 7 示出了短脉冲仍然存在。清楚的是, 即使改变了对 SMF 的输入功率, 孤子分量也不会基于获得相同自相关波形的事实而传播。

(第四实施例)

将解释涉及本发明的第四实施例。图 8 是示出了第四实施例的光纤激光器的方框图。光纤激光器的谐振腔的结构和每个光纤的长度与第一实施例中的谐振腔相同。首先将通过第一实施例的输出端口 81 提取的类噪声脉冲输入到 SMF 33, 并且然后将其输入到高非线性光纤 51, 并且因而对超连续谱 (SC) 产生进行了实验。

图 5 (2) 示出了第四实施例的光纤激光器中的输出光谱。在第四实施例的光纤激光器中, 观察到具有 700nm 带宽的 SC 光。第三实施例和第四实施例的结果确认了类噪声脉冲具有未在 TL 脉冲中发现的色散容限。

(第五实施例)

将解释涉及本发明的第五实施例。图 9 是示出了第五实施例的光纤激光器的方框图。在如图 9 中结构的光纤激光器中, 顺序排列在脉冲传播方向上的是: 色散位移光纤 (DSF) 21、单模光纤 (SMF) 31、掺铒光纤 (EDF) 11、DSF 23、光复用 (WDM) 耦合器 66、SMF 32、DSF 22、 $1/4\gamma$ 偏振光片 61、 $1/2\gamma$ 偏振光片 62、偏振分束器 (PBS) 63、隔离器 (ISO) 64、以及 $1/4\gamma$ 偏振光片 65, 并且以通过这些元件且再返回到 DSF 21 的环形形成谐振腔。来自泵浦光源 71 的泵浦光通过 WDM 耦合器 66 与 DSF 23 相结合, 并且通过反向泵浦结构来泵浦 EDF 11。

在第五实施例中, 将 1480nm 波段的泵浦光源用作泵浦光源 71。通过输出端口 81 提取输出光, 以及将输出光输入到光谱分析仪或自相关器中, 并且观察波形。EDF 11 具有较大正常色散 $38.4\text{ps}^2/\text{km}$, EDF 具有 $1.55\mu\text{m}$ 波长, 且将总色散设计为在第五实施例的谐振腔中在 $1.55\mu\text{m}$ 处为 -0.0027ps^2 。

这里，第五实施例的谐振腔中的光纤的各自长度是：DSF 21：2.0m；SMF 31：2.4m；EDF 11：2.5m；DSF 23：3.0m；SMF 32：2.5m；DSF 22：2.0m；以及光纤总长度是 14.0m。当获得该第五实施例的光纤激光器的输出光谱时，与第一实施例一样，获得了具有中心波长在 1.55 μm 周围的 87nm 的 3dB 带宽的平坦宽谱。

通过使通过输出端口 81 提取的类噪声脉冲进入高非线性光纤（HNL）51 来进行超连续谱产生实验。HNL 光纤 51 在 1.55 μm 波长处的色散值是 -0.60ps²/Km，零色散波长是 1.532 μm ，在 1.55 μm 波长处的非线性系数是 20/W/km，以及光纤长度是 1km。在第五实施例的光纤激光器的输出光谱中，与第二实施例的输出光谱相同，获得了具有 950nm 带宽的 SC 光。

将第五实施例的上述谐振腔中的总色散设置为在 1.55 μm 波长处为 -0.0027ps²。并且将上述第一至第四实施例的谐振腔中的总色散设置为在 1.55 μm 波长处为 -0.029ps²。该总色散量优选地在 0 附近，并且在在本实施例中，将总色散设置为轻微反常色散。

尽管在上述实施例中谐振腔具有环形结构，其也可以具有直线形结构。图 17 示出了直线形结构的示例。直线形谐振腔包括两面反射镜，在反射镜之间设置作为增益介质的掺稀土元素光纤和色散补偿光纤以产生激光振荡。并且可以通过在上述过程中设置色散值来产生激光振荡。在本实施例中使用波片作为偏振控制器。然而，可以使用非波片的其他偏振控制器，例如光纤环以及法拉第旋转器。

本发明不限于上述实施例。例如，尽管将掺铒光纤用作掺稀土元素光纤，可以使用掺杂有其他稀土元素的光纤，例如镱 Yb、钕 Nd、镨 Pr、铽 Tb、钐 Sm、铥 Ho 等。可以适当地选择合适的一种。图 18 和图 19 示出了使用掺镱光纤的示例，其中在 1 μm 波长附近产生类噪声模式振荡。因为使用熔融二氧化硅的光纤在不大于 1.2 μm 的短波区域具有较大的正常色散，需要特定的光纤以补偿谐振腔中的色散值。

在该示例中，使用光子晶体光纤（参考文献：OSA Optics Letters, Vol.23, 1662, 1998）以通过利用光子晶体结构的波导色散、在不大于 1.2 μm 的短波区域中实现反常色散。这里谐振腔色散值成功地符合上

述设计指标。此外作为掺稀土元素光纤，可以使用具有双包层结构以增加输出的双包层光纤（参考文献：IEEE Journal of Quantum Electronics, 33(7), 1049, 1997）和掺杂有稀土元素的普通单模光纤。此外也可以与高输出泵浦光源组合使用以获得超过 1W 的输出。

此外在上述实施例中，使用了形成谐振腔的、除了掺稀土元素光纤的其他光纤，SMF、DSF、康宁 Flexcore 1060。然而，光纤的类型和长度不限于实施例。根据掺稀土元素光纤的色散值和吸收值以及非掺稀土元素光纤的其他光纤的色散值，适当地确定谐振腔的优选色散图。

尽管在实施例中将 SMF 用作反常色散光纤，光纤不限于 SMF。使用具有比 SMF 的色散绝对值低的色散绝对值的反常色散光纤，以使反常色散光纤更长，以增强光谱展宽。就激励方法而言，具有 1.48 μm 波长的泵浦光为反向泵浦结构。然而，激励波长和激励结构不限于此。例如，可以组合使用具有 0.98 μm 波长的泵浦光和前向泵浦结构。

此外，尽管在上述实施例中将偏振分束器用作锁模装置，其并不限于本实施例。作为其他优选手段，可以列举包括半导体、碳纳米管等的选择性饱和滤光器（saturable absorber）。并且因为谐振腔结构不限于环形谐振腔，并且优选结构是从具有激光振荡示例的谐振腔中适当地选择的。

此外，尽管将高非线性光纤用作使用来自光纤激光器的输出光的 SC 产生装置，光纤并不限于该示例。比如说，可以使用色散位移光纤、色散平坦光纤、光子晶体光纤。

此外，也可以从类噪声光中产生类噪声脉冲，并且可以通过超连续谱，将所述光用于产生超宽光。首先使用 ASE 光源代替光纤激光器，并且调制噪声光以产生类噪声脉冲。并且由产生的类噪声脉冲可以进行超连续谱的产生。下文中在图 22 中将示出用作代替的诸如 ASE（放大的自发辐射）光源的普通噪声光（非相干光）的原理结构。

这里，由非相干光源的带宽确定光谱宽度。并且当输出被放大且输入到高非线性光纤中时可能产生超连续谱。在图 23 中示出了实验的示例。使用电吸收调制器（EA 调制器）调制来自具有掺铒光纤放大

器的 ASE 光源的噪声光，以产生具有 33ps 持续时间的突发噪声。用高输出光放大器将其放大且输入到 60m 长的高非线性光纤中以产生 SC。用光谱分析仪测量小于 1700nm 的短波侧的输出光谱，并且用分光仪测量长波侧的输出光谱。

尽管在本实施例中将 ASE 光源用作噪声光，不但 ASE 光源而且产生连续噪声光的 LED 和 SLD 也可以被用作光源。如上所述，类噪声脉冲是持续时间受限且强度波形的时间包络曲线处于脉冲态的突发噪声光，从而通过调制恒定的噪声光也可以获得时间强度包络曲线。

尽管到目前为止将具有约 10ps 的持续时间的类噪声脉冲描述为类噪声脉冲的示例，涉及本发明的类噪声脉冲不限于此。图 25 示出了类噪声脉冲的其他示例。

在锁模光纤激光器中获得该脉冲波形，在所述锁模光纤激光器中，调制谐振腔的总色散量以便得到具有 900m 谐振腔的类噪声脉冲解决方案，并将掺铒光纤用于类噪声脉冲放大。在这种情况下，如图 25 中所示，获得了在约 10ns 的长持续时间处、具有相对时间恒定强度波形的包络曲线的方形类噪声脉冲。因而，通过使用具有长持续时间的类噪声脉冲可以由超连续谱展宽带宽。

图 24 示出了当输入到高非线性光纤的输入功率改变时的输出光谱。当输入功率是 1.6W 时，光谱密度在从 1178nm 到 2134nm 的范围内超过 -10dBm/nm，并且获得比传统 SC 光高约 10 至 20dB 的强度。没有发现在传统 SC 产生中发现的光谱的纹波。此外，光谱形状相对稳定且在整个光谱波段的稳定性不大于 0.1dB/小时。

根据本发明，可以实现极大地超过了掺铒光纤的增益带宽的平坦宽谱光纤激光器。可以使用该光纤激光器来提供宽带光源。

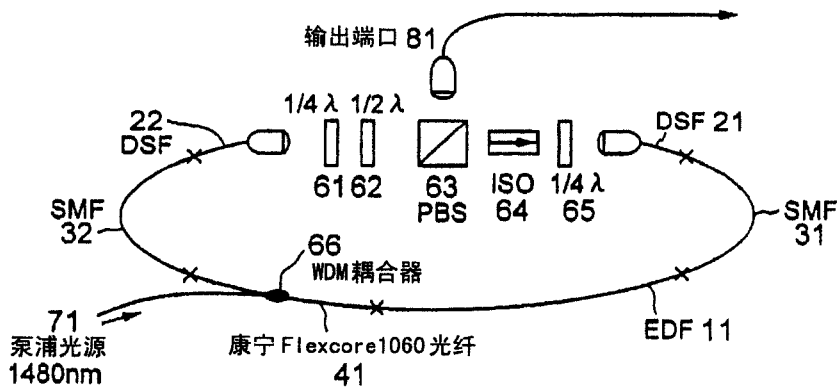


图 1

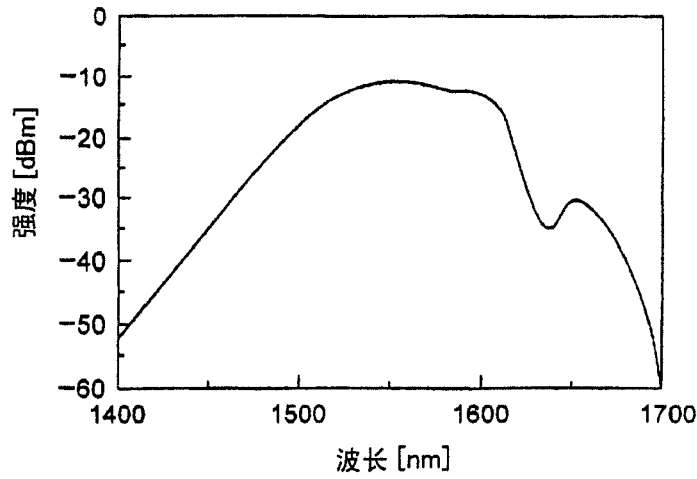


图 2

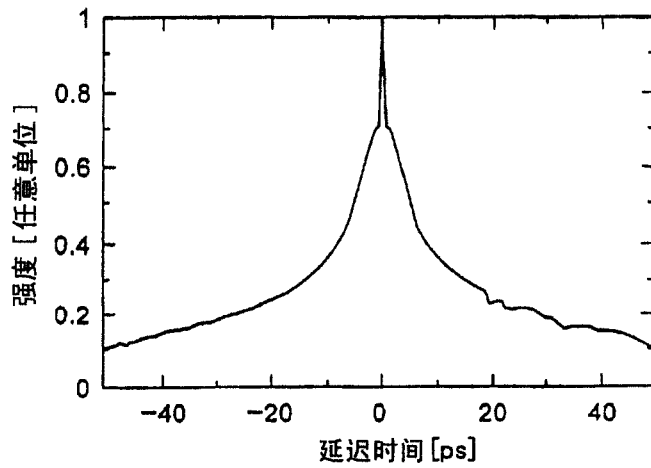


图 3

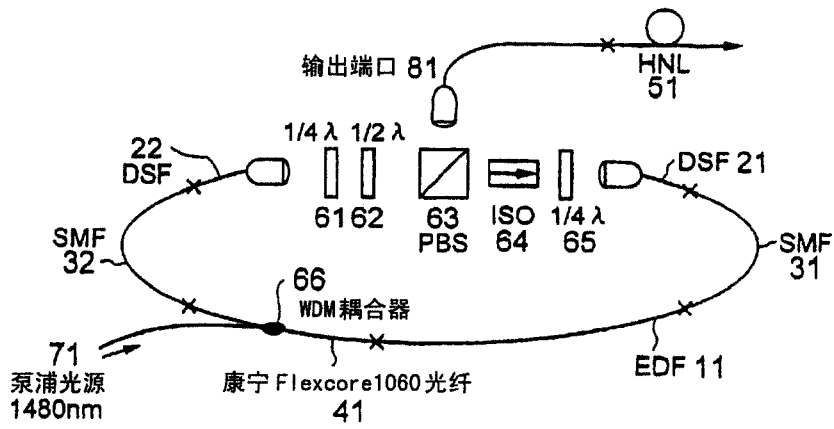


图 4

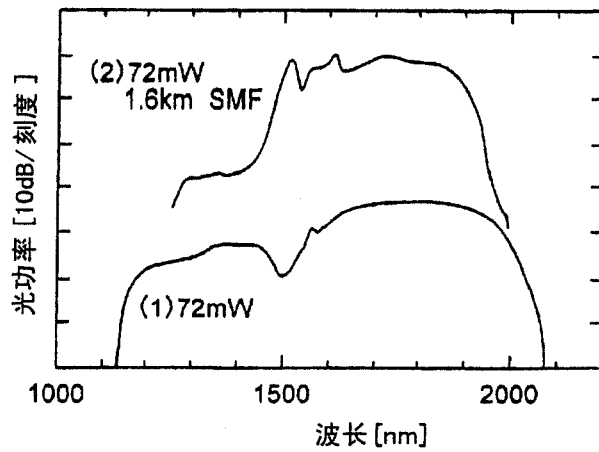


图 5

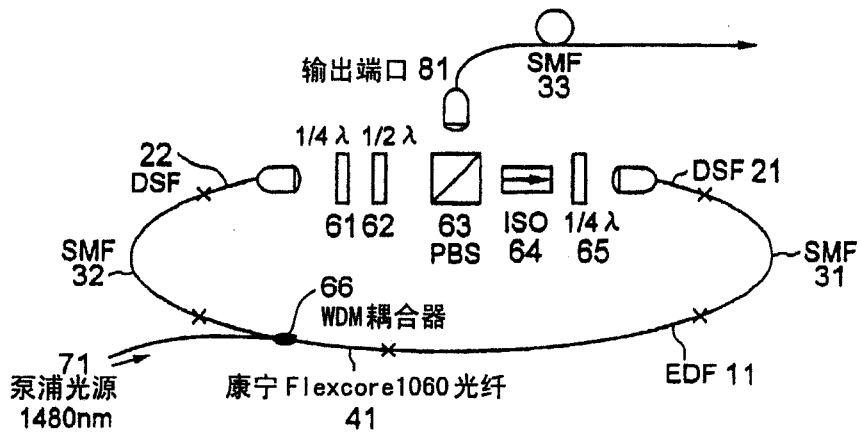


图 6

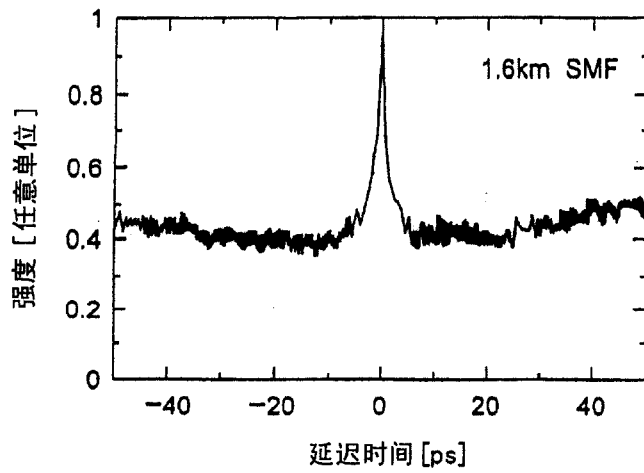


图 7

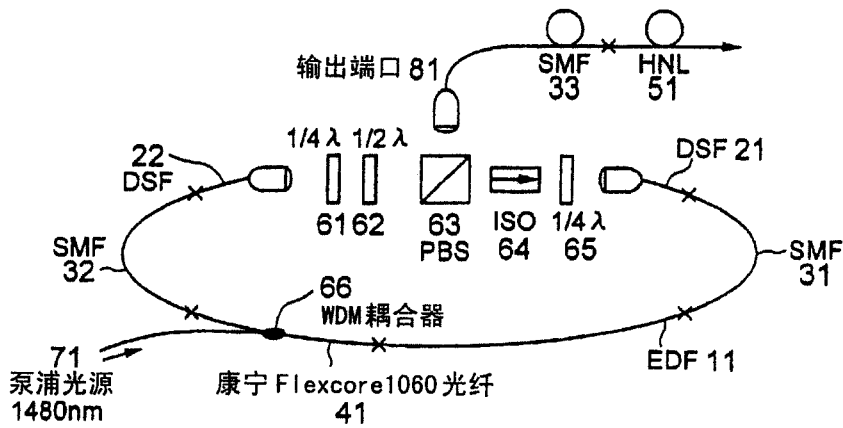


图 8

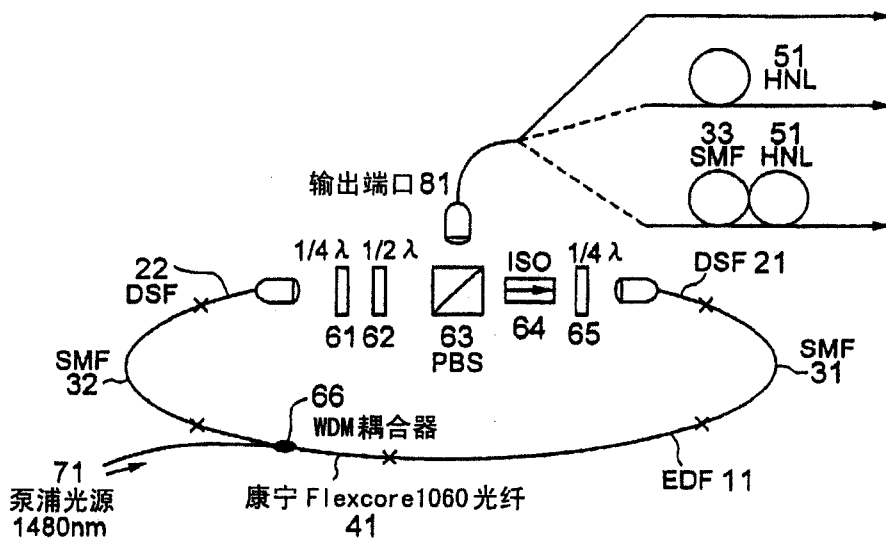


图 9

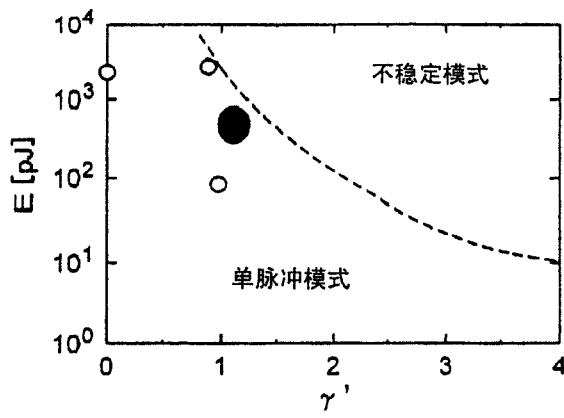
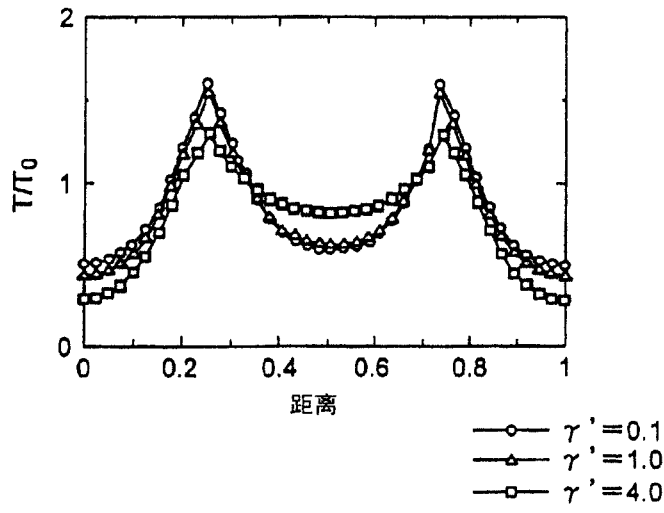


图 10

(a)



(b)

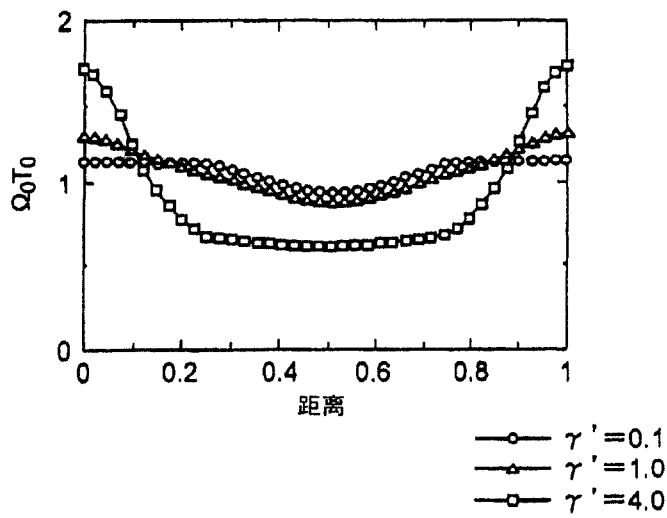


图 11

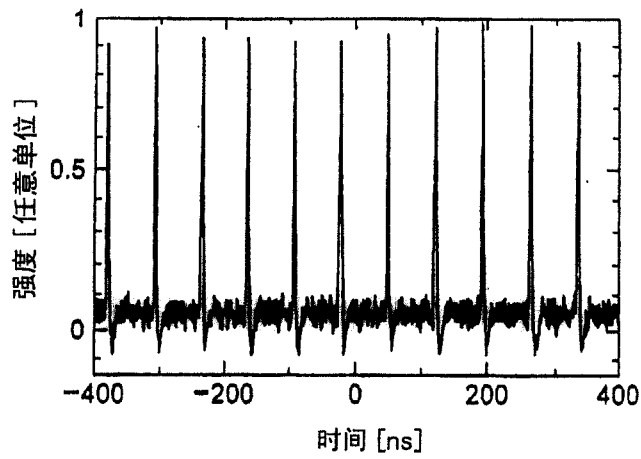


图 12

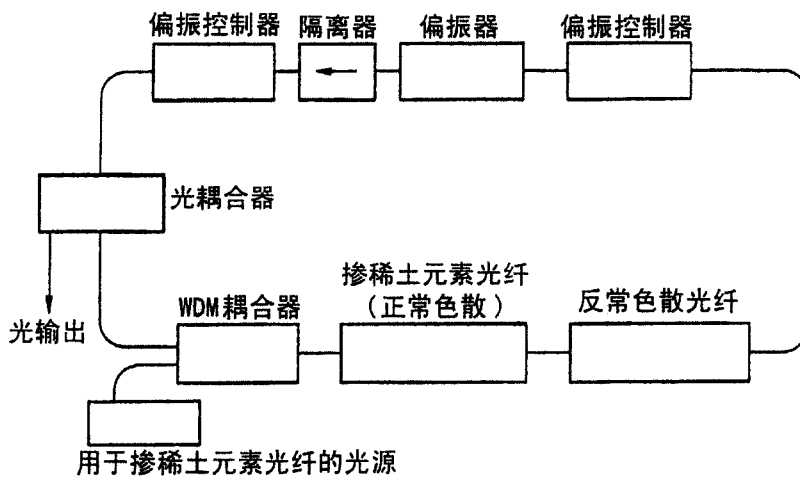


图 13

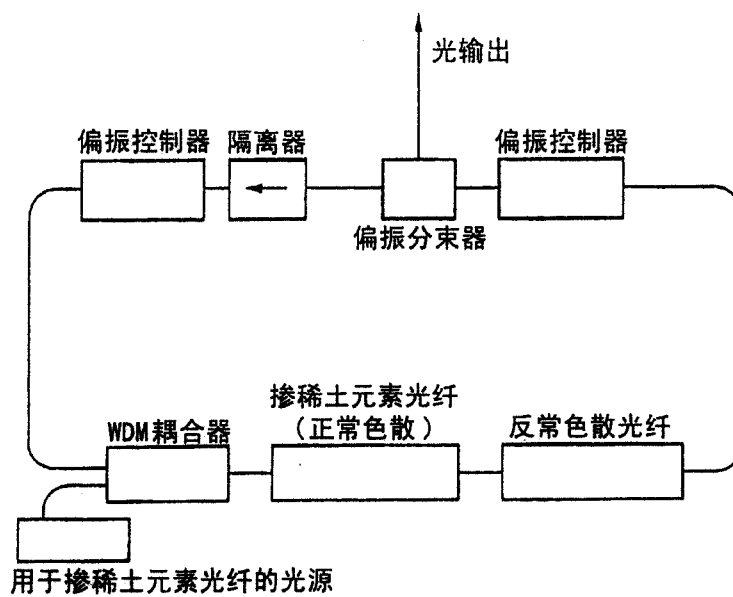


图 14

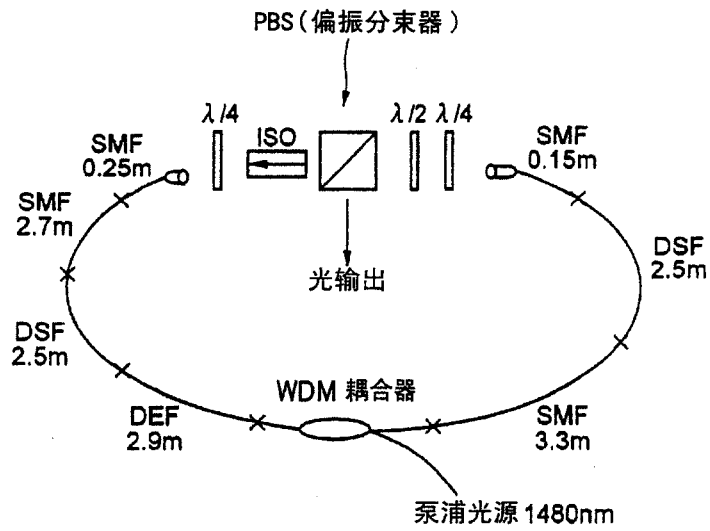


图 15

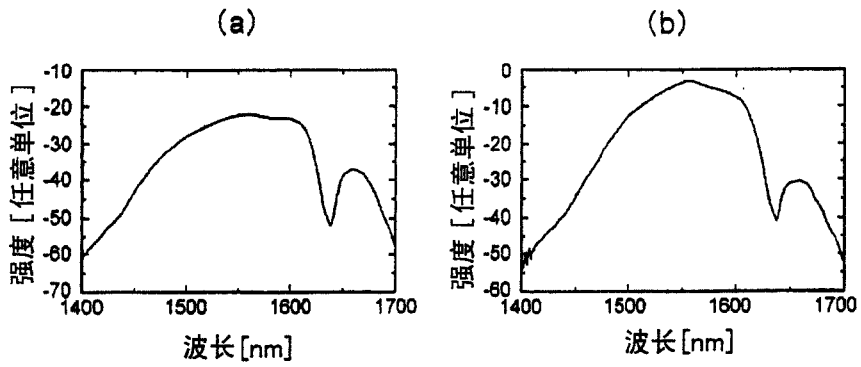


图 16

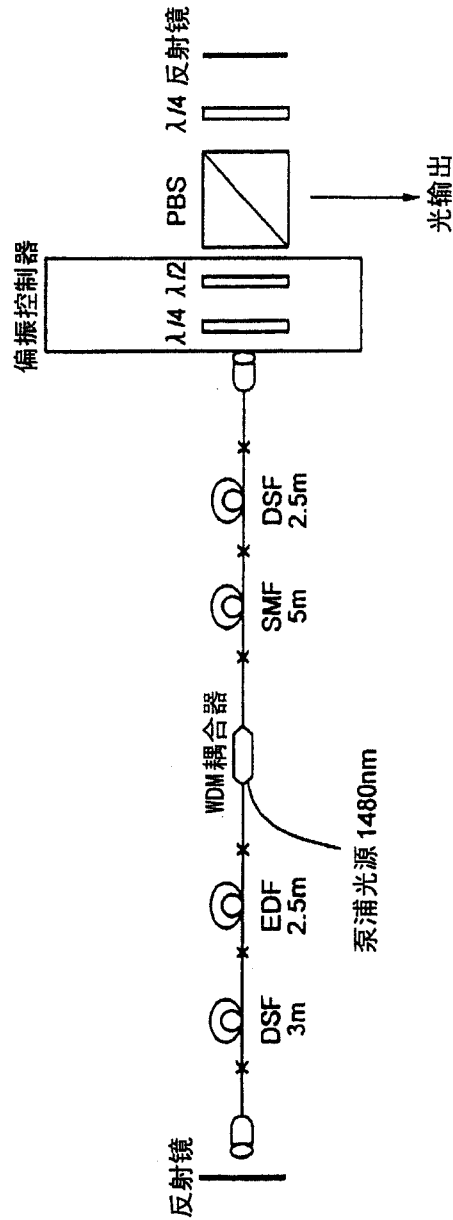


图 17

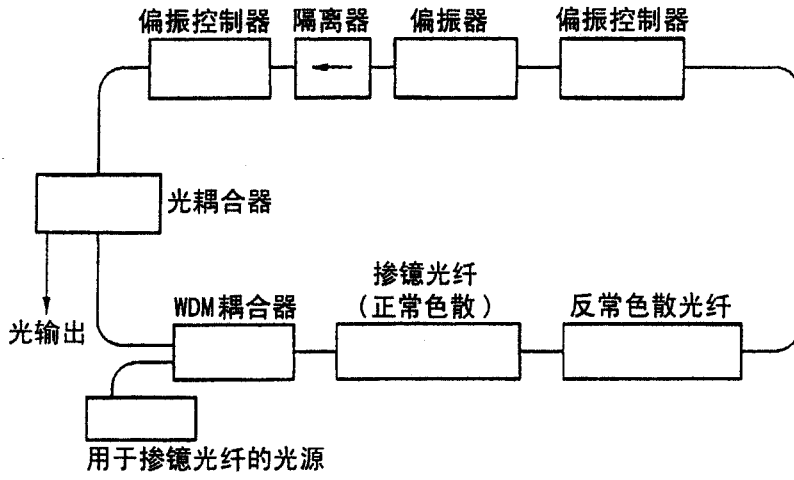


图 18

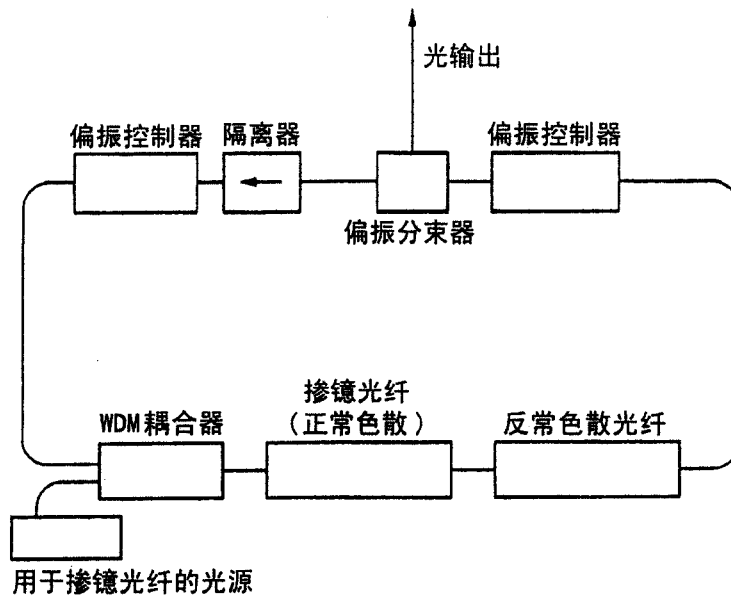


图 19

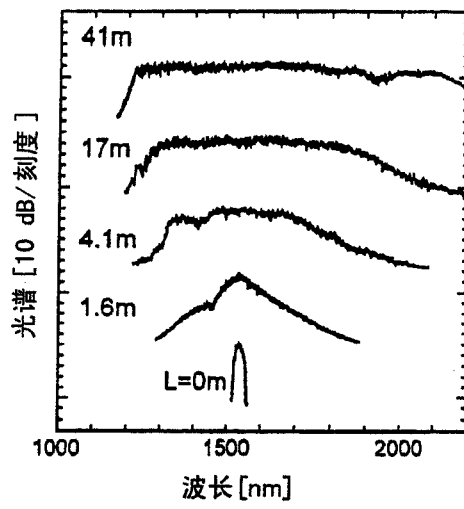
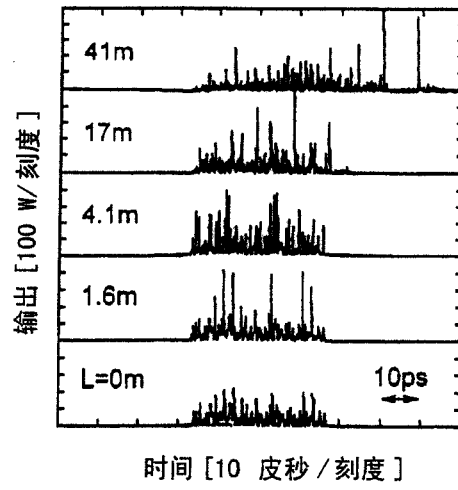


图 20

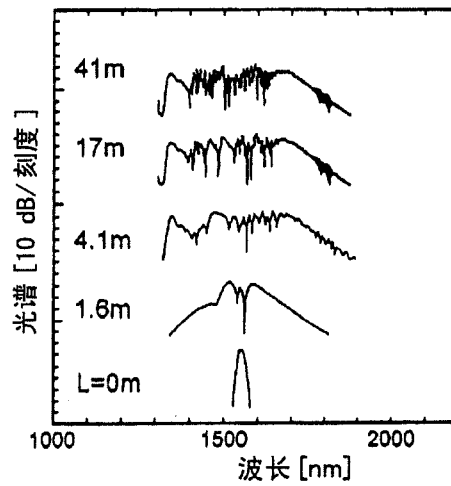
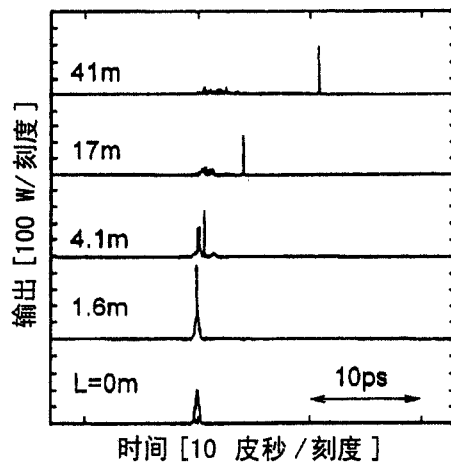


图 21

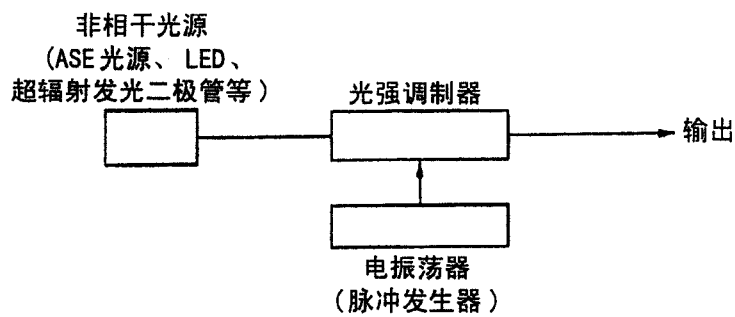


图 22

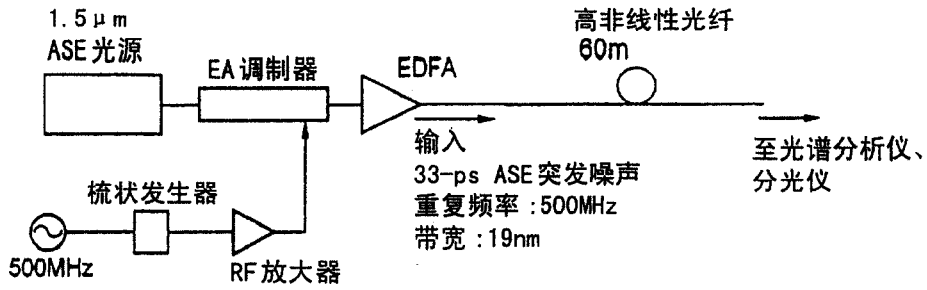


图 23

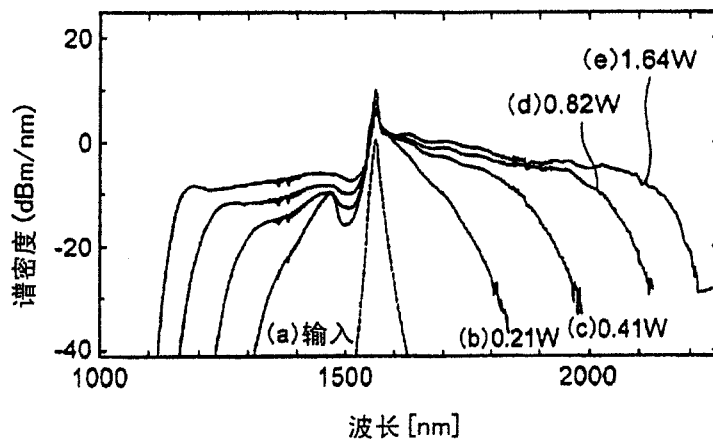


图 24

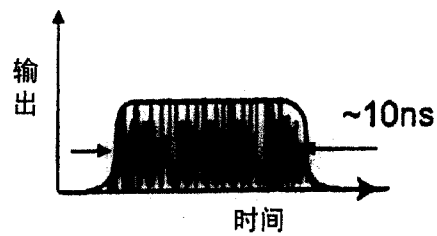


图 25