



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102157887 B

(45) 授权公告日 2014. 03. 26

(21) 申请号 201110059565. 3

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2007. 05. 10

H01S 3/067(2006. 01)

G02B 6/024(2006. 01)

(30) 优先权数据

60/799, 456 2006. 05. 11 US

60/812, 164 2006. 06. 09 US

60/819, 439 2006. 07. 07 US

60/834, 974 2006. 07. 31 US

(56) 对比文件

US 6151338 A, 2000. 11. 21,

US 6151338 A, 2000. 11. 21,

US 6636347 B1, 2003. 10. 21,

EP 0533342 A1, 1993. 03. 24,

Martin Achtenhagen. LI characteristics of fiber Bragg grating stabilized 980-nm pump lasers. 《IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS》. 2001,

(62) 分案原申请数据

200780017178. 5 2007. 05. 10

(73) 专利权人 SPI 激光器英国有限公司

地址 英国南安普敦

审查员 蒋碧珠

(72) 发明人 M·K·德金 F·吉林盖利

A·M·吉洛利 L·M·B·赫基

S·R·诺曼 D·N·佩恩 A·派柏

J·K·撒胡 M·N·泽尔维斯

(74) 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专

利商标事务所 11038

代理人 李镇江

权利要求书2页 说明书19页 附图17页

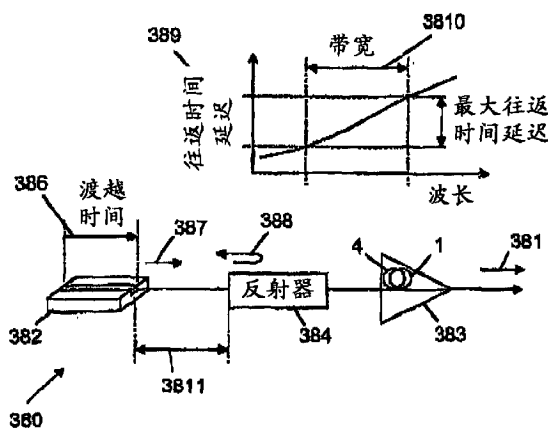
(54) 发明名称

用于提供光辐射的设备

(57) 摘要

一种用于提供光辐射 (381) 的设备 (380), 该设备包括: 种子激光器 (382), 其用于提供播种辐射 (387); 至少一个放大器 (383), 其用于对所述播种辐射 (387) 进行放大; 以及反射器 (384), 其中, 所述种子激光器 (382) 是法布里珀罗半导体激光器, 所述种子激光器 (382) 经由所述反射器 (384) 而连接到所述放大器 (383), 所述反射器 (384) 被布置成将由所述种子激光器 (382) 所发出的所述播种辐射 (387) 的某一比率的播种辐射 (388) 反射回到所述种子激光器 (382) 中, 并且所述放大器 (383) 包括光纤 (1), 该光纤 (1) 包括折射率为 n1 的芯 (3) 和折射率为 n2 的基座 (4), 并且其中, 所述光纤 (1) 包括包围所述基座 (4) 的由折射率为 n3 的玻璃制成的第一包层 (5), 其中, n1 大于 n2, 且 n2 大于 n3。

CN 102157887 B



1. 一种用于提供光辐射的设备,该设备包括:种子激光器,其用于发出播种辐射;至少一个光学放大器;反射器;以及控制器,其中,

所述种子激光器是法布里珀罗半导体激光器,

所述播种辐射包括多个种子激光器脉冲,

所述种子激光器经由所述反射器而连接到所述光学放大器,

所述种子激光器脉冲由所述光学放大器放大,以产生光辐射,

所述光辐射包括输出脉冲,

所述输出脉冲由峰值功率、脉冲能量和脉冲重复频率来表征,并且

所述设备的特征在于:

所述反射器被布置成将由所述种子激光器发出的所述播种辐射中的某一比率的播种辐射反射回到所述种子激光器中,

所述控制器控制所述种子激光器来改变种子激光器脉冲的形状,以将峰值功率保持在 3kW 以上、脉冲能量超过 0.04mJ 并且脉冲重复频率在 1Hz 至 500kHz,

所述种子激光器由第一带宽定义,当反射器不在适当的位置时可以测量所述第一带宽;

所述种子激光器由第二带宽定义,当反射器在适当的位置时可在所述设备中测量所述第二带宽;并且

将所述播种辐射反射回所述种子激光器使得所述第二带宽小于所述第一带宽。

2. 根据权利要求 1 所述的设备,其中,所述控制器使得它改变种子激光器脉冲的形状,以将峰值功率保持在 5kW 以上、脉冲能量超过 0.1mJ 并且脉冲重复频率在 1Hz 至 200kHz。

3. 根据权利要求 1 所述的设备,其中,所述控制器使得它改变种子激光器脉冲的形状,以将峰值功率保持在 18kW 至 26kW、脉冲能量保持在 0.8mJ 至 1mJ 并且脉冲重复频率在 1Hz 至 25kHz。

4. 根据权利要求 1 或 3 所述的设备,其中,所述设备包括两个光学放大器。

5. 根据权利要求 1 所述的设备,其中,所述反射器被布置为将少于 20% 的由所述种子激光器发出的所述播种辐射反射回到所述种子激光器。

6. 根据权利要求 5 所述的设备,其中,所述反射器被布置为将 1% 至 10% 之间的由所述种子激光器发出的所述播种辐射反射回到所述种子激光器。

7. 根据权利要求 1 所述的设备,其中,所述反射器的特征在于具有大于 1nm 的带宽。

8. 根据权利要求 1 或 7 所述的设备,其中,所述反射器位于距所述种子激光器小于 2m 的距离处。

9. 根据权利要求 8 所述的设备,其中,所述距离在 0.5m 与 1.5m 之间。

10. 根据权利要求 8 所述的设备,其中,所述距离在 5mm 与 50cm 之间。

11. 根据权利要求 1 所述的设备,其中,所述光学放大器包括包层泵浦光学放大器,该包层泵浦光学放大器还包括光纤。

12. 根据权利要求 11 所述的设备,其中,所述光纤是信号波长处的多模波导。

13. 根据权利要求 11 所述的设备,其中,所述光纤是单模波导。

14. 根据权利要求 11 所述的设备,其中,所述光纤包括数值孔径小于 0.15 的波导。

15. 根据权利要求 11 所述的设备,其中,所述光纤的特征在于,当利用约 400mW 的

976nm 波长处的光对 0.1m 至 1m 长的光纤进行芯泵浦时,在 1000nm 与 1100nm 之间的波长处,光纤的衰减的增加在 2000 小时中不大于 5%。

16. 根据权利要求 1 或 7 所述的设备,其中,所述反射器是光纤布拉格光栅。

17. 根据权利要求 16 所述的设备,其中,所述光纤布拉格光栅是啁啾的。

18. 根据权利要求 1 或 15 所述的设备,该设备包括激光输送光纤以及加工头,该设备是用于加工材料的激光器的形式。

19. 根据权利要求 18 所述的设备,其中,所述控制器对所述种子激光器和所述光学放大器进行控制,使得所述输出脉冲的平均功率和峰值功率足以在脉冲重复频率的范围上对所述材料进行加工。

20. 根据权利要求 1 或 15 所述的设备,其中,所述输出脉冲由脉冲宽度来表征,并且所述控制器随所述脉冲重复频率的改变而改变 所述脉冲宽度。

21. 根据权利要求 11 或 15 所述的设备,其中,所述光纤包括折射率为 n_1 的芯和折射率为 n_2 的基座,并且其中,所述光纤包括包围所述基座的由折射率为 n_3 的玻璃制成的第一包层,其中,

n_1 大于 n_2 ,

n_2 大于 n_3 ,

所述基座引导从所述芯逸出的光辐射,并且

所述放大器是通过将泵浦辐射从泵浦耦合到所述第一包层而包层泵浦的。

22. 根据权利要求 1 或 11 所述的设备,该设备包括用于泵浦所述光学放大器的泵浦,并且其中,所述控制器将由所述泵浦发出的峰值功率设定在期望值。

用于提供光辐射的设备

[0001] 本发明是申请日为 2007 年 5 月 10 日、申请号为 200780017178.5 且发明名称为“用于提供光辐射的设备”的发明专利申请的分案申请。

技术领域

[0002] 本发明涉及一种用于提供光辐射的设备。该设备可以形成用于材料加工的设备的的基础。

背景技术

[0003] 脉冲光纤激光器越来越多地被采用作为许多工业应用（例如，显微机械加工、钻孔和打标（marking））中所选择的激光器。在受峰值功率驱动的应用（例如，打标）中，为了实现较快的字符打标及产量的增加，以高重复频率保持高峰值功率（超过 2.5kW 至 5kW）是必要的。

[0004] 传统的单级调 Q 激光器在存储能量方面非常有效。然而，它们由可变平均功率来表征，并且实际的峰值功率随重复频率的增加而下降。在大多数情况下，峰值功率可以下降到加工（例如，打标）阈值以下，对速度和产量造成不利影响。另一方面，主振功率放大器（MOPA）结构可以对脉冲激光器的脉冲特性和功率性能提供更多的可控性，并将打标单元的操作空间延伸到较高的重复频率从而提供增加的打标速度。需要以超过 200kHz 的重复频率将峰值功率保持在 5kW 以上的水平的脉冲激光器。平均功率应当超过 10W，脉冲能量在 0.1mJ 至 0.5mJ 的范围中或更高，脉冲持续时间在 10ns 与 200ns 之间变化，而脉冲功率应当以 10kHz 至大于 200kHz 的范围中的重复频率在约 5kW 或 10kW 的水平保持大致恒定。附加要求是良好的光束质量（例如，可以由低模或单模光纤激光器来提供的光束质量）。

[0005] 在这些强度和峰值功率水平，需要特别关注脉冲系统，以避免发生光学非线性以及光学损伤。另外，在所得到的高增益、高反转操作条件下，有源光纤不应当遭受光暗化效应，因为这将导致脉冲系统效率降低且寿命缩短。

[0006] 已经提出了许多不同的脉冲光纤激光器结构，以单独的方式使用它们或者将其作为主振功率放大器（MOPA）结构的一部分来使用。特别是，调 Q 光纤激光器由于其可以以相对简单且稳定的结构来产生高峰值功率和几 mJ 的脉冲能量而特别引人注目。要以多种多样的方式在工业应用中使用以增加应用空间的独立的调 Q 激光器的主要缺点之一在于，所有感兴趣的参数（例如，脉冲重复频率（PRR）、能量、峰值功率和脉冲宽度）是相互关联的而不能单独地控制。具体地说，峰值功率随脉冲重复频率的增加而减小。

[0007] 通过使用多级放大 MOPA 结构，可以解决许多这些性能问题，并且可以在高 PRR 状况下延伸所需的高峰值功率性能。

[0008] 在这种情况下，脉冲种子可以是低功率调 Q 激光器或直接调制的半导体激光器。后者可以直接受到控制并在定义脉冲形状和 PRR 时提供多得多的自由度，并且，其提供了随意改变它们以更好地满足应用需要的可能性。另外，其基于针对电信产业而发展了多年的充分发展且极可靠的半导体技术。通过控制沿放大链的增益分布来精确地定义放大的脉

冲序列的不同的参数。

[0009] 在朝向放大器的输出端的脉冲到达之前,光纤放大器中的局部反转显著增加。在使用倾向于该性能劣化效应的光纤的情况下,在定义光暗化速率时反转分布的知识是非常重要的。在脉冲传播时,它耗尽反转并增大其强度。放大处理还导致严重的脉冲整形和前端锐化。这在定义脉冲宽度和峰值功率时极其重要,并且作为结果,限定了诸如受激拉曼散射(SRS)和受激布里渊散射(SBS)的各种非线性的发生。在特定能级以上,所有的脉冲显著地整形(锐化)并减小了它们的脉冲宽度。这是由于脉冲获取了足以使放大器开始饱和的能量的事实。已知在这种情况下主要通过脉冲的前沿来提取能量,导致了脉冲整形和畸变。峰值功率随脉冲能量而非线性地增加,并且不可避免地超过取决于光纤设计和脉冲形状的SRS阈值(通常为5kW至10kW左右)。

[0010] 限制脉冲光纤激光器的输出功率的另一重要效应是巨脉冲的形成。这可以灾难性地损坏系统中的光学元件。该效应被认为高度地取决于激光器的峰值功率和光谱性质,并被认为是由受激布里渊散射(SBS)引起。当达到非线性阈值时,向前行进的脉冲被反射。观察到巨脉冲,并且这些可以灾难性地损坏脉冲激光器系统中的放大器(及其他器件)。不幸的是,该效应本质上是随机的,并且本身完全不可预知。种子激光器(例如,激光二极管)的瞬时光谱性质的使线宽变窄的单个变化可以导致SBS事件,并触发巨脉冲形成以及随后的灾难性损坏。已在将激光器安装在工业加工装备中之后的数月中观察到这种损坏。

[0011] 光纤激光器通常由激光二极管来泵浦。从激光器向这些激光二极管传播的非期望的光辐射可以损坏这些二极管。该效应在脉冲激光器中尤其严重,这是因为激光二极管是被峰值功率(而不是脉冲的能量)损坏。脉冲激光器的峰值功率比连续波激光器高得多。因此,在脉冲激光器中将泵浦与激光器隔离开的要求比在连续波激光器中更迫切。

[0012] 与掺Yb³⁺光纤激光器和放大器的长期行为有关的一个非常重要的问题是光暗化效应。该效应表现为光纤背景损耗随时间而逐渐增加,这降低了光学系统的输出功率和总效率。认为这与预先存在的光纤色心的光学活化有关,其吸收带主要在UV光谱区。然而,吸收带的高端延伸到近IR中,对光学性能造成不利影响。光暗化导致逐渐劣化,并且未知其导致灾难性的突然的光纤故障。光暗化速率和最终水平取决于有源光纤反转程度,作为结果,不同的放大系统将表现出不同的劣化。

[0013] 光纤的许多应用需要生成和发送以下光学信号:在该光学信号的强度下,光纤的透明度随时间而降低。该效应已知为光暗化,是光诱发的玻璃的吸收的改变。认为吸收的增加是由于在光谱的UV和可见部分很强烈地吸收光的色心的形成或活化。

[0014] 在谱域中,光暗化表现为在约800nm的波长以下的急剧的损耗增加。该强吸收带的高端延伸到1微米至1.5微米区域中,并对泵浦波长和信号波长的损耗都造成不利影响。这对于在该波长区域中操作的光纤激光器和放大器的性能和总效率具有严重的限制作用。

[0015] 在时域中,光暗化表现为激光器或放大器输出功率逐渐伪指数地下降到渐近值。最终功率下降和有关的时间尺度似乎取决于光纤激光器或放大器操作条件,最显著的是泵浦能级和平均反转能级,以及操作温度。输出功率下降可以通过提供附加泵浦源和/或增加驱动泵浦电流来补偿。两种措施都是非常不理想,这是因为前者导致单元成本增加,而后者导致泵浦单元老化加速以及灾难性故障的可能性增加。

[0016] 光纤激光器和放大器通常包括可以经由多光子作用而导致光暗化的稀土掺杂剂。

至少在掺杂有 Tm^{3+} 、 Yb^{3+} 、 Ce^{3+} 、 Pr^{3+} 和 Eu^{3+} 的二氧化硅玻璃中看到该效应。

[0017] 当在工业材料加工中使用光纤时,光暗化是成问题的。光暗化可以使光纤中用于将激光辐射从激光器(例如,倍频棒状激光器、三倍频棒状激光器、盘形激光器、以及光纤激光器)传送到工件的传输劣化。它还会严重地限制光纤激光器中可以生成的或者光放大器可以放大的光功率的量。

[0018] 用于减小玻璃中的光暗化的传统方法是使用氢氧基(OH)含量高的二氧化硅(所谓的“湿二氧化硅”)。其可以装载氘并由紫外(UV)光来照射。然而,这些方法并非很好地适合于光纤激光器,这是因为OH将增加光纤的背景损耗。

[0019] 需要在宽的重复频率范围上保持其峰值功率并且其中非线性效应受到控制的脉冲激光器。

[0020] 需要抗泵浦损坏的光纤激光器。

[0021] 需要抗来自巨脉冲形成的灾难性损坏的光纤激光器。

[0022] 需要抗光暗化的光纤。相关地需要抗光暗化的光纤激光器和放大器。光暗化是指任何光诱发的玻璃中的传输的减小,无论是暂时性的还是永久性的。

发明内容

[0023] 根据本发明的非限制性的实施方式,提供了一种用于提供光辐射的设备,该设备包括:种子激光器,其用于提供播种辐射;至少一个放大器,其用于对所述播种辐射进行放大;以及反射器,其中,所述种子激光器是法布里珀罗半导体激光器,所述种子激光器经由所述反射器而连接到所述放大器,所述反射器被布置成将由所述种子激光器所发出的所述播种辐射中的某一比率的播种辐射反射回到所述种子激光器中,并且,所述放大器包括光纤,该光纤包括折射率为 n_1 的芯和折射率为 n_2 的基座(pedestal),并且其中,所述光纤包括包围所述基座的由折射率为 n_3 的玻璃制成的第一包层,其中, n_1 大于 n_2 , n_2 大于 n_3 。

[0024] 令人惊讶的是,发现使用这种反射器有效地去除了被认为是作为受激布里渊散射的结果而发生的巨脉冲的出现。

[0025] 加入基座是有利的,这是因为其减小了信号功率对第一包层的交叉耦合。已发现这显著地减小了包层泵浦光纤激光器和放大器中的泵浦二极管故障。

[0026] 本发明的优点在于光纤能够以高强度传输光辐射。如果芯的数值孔径低,则光纤可以被构造成所谓的大模面积光纤,其与高强度相结合,使得光纤激光器和放大器的输出功率和/或产品寿命增加。光纤激光器和放大器的设计中的进一步的优点在于需要较少的泵浦二极管,这是由于光纤在产品寿命上保持传输质量。

[0027] 所述反射器可以是色散反射器。

[0028] 所述种子激光器可以由有效光渡越时间来表征。所述反射器可以由带宽和该带宽上的往返反射时间延迟变化来表征。所述往返反射时间延迟变化可以大于所述有效光渡越时间。

[0029] 由所述种子激光器发出的所述播种辐射的被反射回到所述种子激光器中的所述比率可以小于 20%。该比率可以在 1% 与 10% 之间。

[0030] 所述反射器可以位于与所述种子激光器小于 5m 的距离。该距离可以小于 2m。该距离可以在 0.5m 与 1.5m 之间。

- [0031] 所述反射器可以位于与所述种子激光器相距 5mm 与 50cm 之间的距离处。
- [0032] 从所述设备发出的峰值功率可以超过 1kW。
- [0033] 所述芯可以包括二氧化硅、浓度在 0.1 摩尔百分比至 4 摩尔百分比的范围中的氧化铝、浓度在 2 摩尔百分比至 20 摩尔百分比的范围中的磷酸盐,并且所述基座可以包括二氧化硅、磷酸盐和氧化锆。
- [0034] 所述光纤可以掺杂有布置在所述芯和所述基座中的至少一个中的至少一种稀土掺杂剂。所述稀土掺杂剂可以是浓度在 2000ppm 至 60000ppm 的范围中的镱。镱的所述浓度可以在约 15000ppm 至 50000ppm 之间。镱的所述浓度可以在约 20000ppm 至 45000ppm 之间。
- [0035] 所述芯可以包含浓度在约 12 摩尔百分比至 17 摩尔百分比之间的磷酸盐。磷酸盐在所述芯中的所述浓度可以约为 15 摩尔百分比。
- [0036] 所述芯可以包含浓度在约 0.20 摩尔百分比至 1 摩尔百分比之间的氧化铝。氧化铝的所述浓度可以在约 0.3 摩尔百分比至 0.8 摩尔百分比之间。
- [0037] 所述光纤可以是信号波长处的多模波导。所述光纤可以被构造成在相当的长度上无显著畸变地传播单模光。
- [0038] 所述光纤可以是单模波导。所述光纤可以包括至少一个用于在所述芯中引起双折射的应力产生区。
- [0039] 所述光纤可以包括数值孔径小于 0.15 的波导。
- [0040] 所述光纤可以是包括数值孔径小于 0.15 的波导的抗光暗化光纤。所述芯可以包括二氧化硅、浓度在约 0.3 摩尔百分比与 0.8 摩尔百分比之间的氧化铝、浓度大致为 15 摩尔百分比的磷酸盐、以及浓度大致在 20000ppm 至 45000ppm 的范围中的镱。所述基座可以包括二氧化硅、磷酸盐及氧化锆。
- [0041] 所述波导可以是信号波长处的多模波导,并且其中,所述波导被构造成在相当的长度上无显著畸变地传播单模光。所述波导可以是单模波导。
- [0042] 所述反射器可以是光纤布拉格光栅。所述光纤布拉格光栅可以是啁啾的。
- [0043] 所述带宽可以大于 1nm。
- [0044] 往返反射时间延迟变化可以在约 50ps 与 1000ps 之间。所述往返反射时间延迟变化可以在 100ps 与 600ps 之间。
- [0045] 所述有效光渡越时间可以在 10ps 与 50ps 之间。所述有效光渡越时间可以在 25ps 与 40ps 之间。
- [0046] 所述设备可以包括激光输送光纤以及加工头,所述设备是用于加工材料的激光器的形式。
- [0047] 所述设备可以包括被构造成对所述种子激光器和所述放大器进行控制以使得所述光辐射的平均功率和峰值功率足以在脉冲重复频率的范围上对所述材料进行加工的控制装置。
- [0048] 所述设备可以包括控制器,其中,所述光辐射由具有脉冲宽度的脉冲来表征,并且所述控制器随所述脉冲重复频率的改变而改变所述脉冲宽度。
- [0049] 本发明可以包括一种用于提供光辐射的设备,该设备包括种子激光器、至少一个放大器、以及反射器,其中,所述种子激光器经由所述反射器而连接到所述放大器,所述放

大器包括具有基座的光纤；所述种子激光器包括由有效光渡越时间所表征的激光二极管；所述反射器被布置成将由所述种子激光器发出的播种辐射中的某一比率的播种辐射反射回到所述种子激光器中；所述反射器由带宽和该带宽上的往返反射时间延迟变化来表征；并且所述往返反射时间延迟变化比所述有效光渡越时间大。

[0050] 本发明可以包括打标方法，该方法包括在提供光辐射的打标激光器内提供反射器的步骤，该打标激光器包括种子激光器、至少一个放大器、以及反射器，其中，所述种子激光器经由所述反射器而连接到所述放大器，所述放大器包括包层泵浦的光纤，所述种子激光器包括由有效光渡越时间所表征的激光二极管，所述反射器被布置成将所述种子激光器所发出的播种辐射中的某一比率的播种辐射反射回到所述种子激光器中，所述反射器由带宽和该带宽上的往返时间延迟变化来表征，并且所述往返时间延迟变化比所述有效光渡越时间大。

[0051] 选择所述基座中磷酸盐和氧化锆的浓度以实现期望的数值孔径。加入氧化锆的优点在于增加基座的假想温度，因此在光纤制造过程中有助于保持环形以及芯与基座的同心从而有助于芯与第一包层的同心。芯的同心在低损耗熔接的生产中很重要。

[0052] 优选的是，所述芯中铥掺杂剂大致为零。优选的是，也应当避免其他微量稀土掺杂剂。去除铥掺杂剂在设计光纤激光器和放大器中很重要，这是由于已发现含有铥掺杂剂的光纤特别易受光暗化的影响。因此，使用铥的量极低的稀土掺杂剂是重要的。铥的浓度应当小于约 10ppm，并且优选地小于 1ppm。

[0053] 所述光纤可以包括至少一个用于在所述芯中产生双折射的应力产生区。

[0054] 所述抗光暗化光纤可以包括数值孔径小于 0.15 的波导，其中，该波导包括折射率为 n_1 的芯和折射率为 n_2 的基座，并且其中，所述光纤包括包围所述基座的折射率为 n_3 的第一包层，其中， n_1 大于 n_2 ， n_2 大于 n_3 。所述芯包括二氧化硅、浓度在约 0.3 摩尔百分比至 0.8 摩尔百分比之间的氧化铝、浓度大致为 15 摩尔百分比的磷酸盐、以及浓度大致在 20000ppm 至 45000ppm 的范围中的镱。所述基座可以包括二氧化硅、磷酸盐和氧化锆。优选的是，所述芯基本上不包括铥掺杂剂。

[0055] 所述光纤可以用在按照包括至少一个泵浦能量源的包层泵浦放大光学装置的形式设备中。这是特别有利的，因为从数值孔径低的芯中散射或泄露的信号光优选地被所述基座捕捉和引导，因此不被送回到泵浦中。因此，该设备去除了包层泵浦激光器的主要故障机制之一，即，由不期望的信号光所导致的泵浦二极管的灾难性故障。

[0056] 所述光纤可以用在按照包括至少一个泵浦能量源的放大器、激光器、主振功率放大器、调 Q 激光器或超快激光器的形式设备中。

[0057] 本发明可以是以下设备的形式：该设备是用于材料加工的激光器的形式，其包括至少一个泵浦能量源、光纤、激光输送光纤以及加工头。

[0058] 本发明可以是一种打标方法，该方法包括在打标激光器内提供反射器的步骤。

[0059] 本发明可以是一种使用根据前述权利要求中的任一项所述的设备来加工的材料。所述材料可以是半导体封装（塑料或陶瓷）、移动电话上的小键盘、IPOD、计算机、组件、包装、或者商业或工业产品。

[0060] 本发明的另一方面是用表面发射发光二极管 (SLED) 来替代所述种子激光器和所述反射器。SLED 可以被放大，使得其使用也显著地降低 SBS 的发生。所述设备优选地包括

如上所述的光纤。

附图说明

- [0061] 下面将参照附图仅通过示例的方式来描述本发明的实施方式,在附图中:
- [0062] 图 1 示出了根据本发明的设备;
- [0063] 图 2 示出了光纤的折射率分布;
- [0064] 图 3 示出了包括用于在芯中引起双折射的应力产生区的光纤;
- [0065] 图 4 示出了包层泵浦放大光学装置;
- [0066] 图 5 示出了用于材料加工的激光器的形式的设备;
- [0067] 图 6 示出了四个连续波激光器中的光暗化效应;
- [0068] 图 7 示出了掺氧化铝的二氧化硅中的光暗化效应;
- [0069] 图 8 至图 10 示出了三个不同的光纤中的加速老化测试的结果;
- [0070] 图 11 示出了发出 12W 平均功率且具有脉冲能量为 0.6mJ、脉冲宽度为 35ns 的 20kHz 的脉冲的主振功率放大器 MOPA 中的光暗化效应的去除;
- [0071] 图 12 示出了在 10kHz 处受到调制的光纤激光器中的光暗化效应的去除;
- [0072] 图 13 示出了优选实施方式的折射率分布;
- [0073] 图 14 示出了具有椭圆形基座的光纤;
- [0074] 图 15 和图 16 示出了 200W 连续波光纤激光器中的输出功率的测量;
- [0075] 图 17 示出了主振功率放大器 (MPOA);
- [0076] 图 18 示出了其中种子是表面发射发光二极管 (SLED) 的 MOPA;
- [0077] 图 19 示出了包括反射器的 MOPA;
- [0078] 图 20 示出了正常操作中的脉冲形状;
- [0079] 图 21 示出了包含附加尖峰的脉冲形状;
- [0080] 图 22 示出了巨脉冲的示例;
- [0081] 图 23 示出了来自激光二极管的典型的谱;
- [0082] 图 24 示出了在适当位置有反射器的激光二极管的谱;
- [0083] 图 25 示出了用作反射器的光纤布拉格光栅的设计;
- [0084] 图 26 示出了测得的光纤布拉格光栅的反射率;
- [0085] 图 27 示出了不同的重复频率的输出脉冲;
- [0086] 图 28 示出了种子激光器所发出的相对应的脉冲;
- [0087] 图 29 和图 30 示出了图 27 和图 28 中分别示出的脉冲的交叠;
- [0088] 图 31 示出了峰值功率和脉冲能量随重复频率的变化;
- [0089] 图 32 示出了当泵浦功率增加时来自 MOPA 的输出功率;
- [0090] 图 33 示出了图 32 中所示的脉冲的光谱;
- [0091] 图 34 至图 37 示出了改变脉冲重复频率和脉冲宽度对输出脉冲的形狀的影响;以及
- [0092] 图 38 示出了包括反射器和基座的设备。

具体实施方式

[0093] 参照图 38, 提供了用于提供光辐射 381 的设备 380, 该设备包括用于提供播种辐射 387 的种子激光器 382、至少一个用于对播种辐射 387 进行放大的放大器 383、以及反射器 384, 其中, 种子激光器 382 是法布里珀罗半导体激光器, 种子激光器 382 经由反射器 384 而连接到放大器 383, 放大器 383 包括光纤 1, 光纤 1 包括由玻璃制成的基座 4 (如参照图 1 所示的)。反射器 384 被布置成将由种子激光器 382 发出的播种辐射 387 的某一比率的播种辐射 388 反射回到种子激光器 382 中。

[0094] 基座 4 保护设备 380 免于被从光纤 1 泄露的光辐射 381 损坏。

[0095] 反射器 384 保护设备 380 免于损坏。反射器 384 被认为阻止种子激光器 382 发出单纵模 (或少量纵模) 的播种辐射 387, 由此抑制受激布里渊散射的发生。

[0096] 优选的是, 反射器 384 是色散反射器。

[0097] 优选的是, 种子激光器 382 由有效光渡越时间 386 来表征, 反射器 384 由带宽 3810 和带宽 3810 上的往返反射时间延迟变化 389 来表征, 并且往返反射时间延迟变化 389 比有效光渡越时间 386 大。

[0098] 比率 388 可以小于 20%。该比率优选地为 1% 至 10%。

[0099] 反射器 384 位于距种子激光器 382 距离 3811 处。1m 的距离与光纤中约 10ns 的往返延迟相对应。取决于材料成分, 受激布里渊散射在光纤中的建立时间约为 20ns 至 40ns。重要的是, 反射器 384 放置为使得反馈有时间影响来自种子激光器 382 的发射。距离 3811 应当小于 5m。距离 3811 理想地应当小于 2m。该距离优选地在 0.5m 与 1.5m 之间。另选的是, 反射器 384 可以与种子激光器 382 封装在一起, 距离 3811 可以在 5mm 与 50cm 之间。

[0100] 本发明对于被构造为峰值功率在打开的最初 200ns 内可能大于 1kW 的脉冲光纤激光器的设备 380 最为有用。可以对以上距离 3811 进行选择来确保在设备 380 发出高于 1kW 的功率的同时出现来自反射器 384 的反馈。

[0101] 有效光渡越时间 386 是指光沿正向传播通过种子激光器 382 所花费的时间。

[0102] 图 1 示出了包含波导 2 的光纤 1。波导 2 包括折射率为 n_1 的芯 3 和折射率为 n_2 的基座 4, 以及由玻璃制成且折射率为 n_3 的第一包层 5。优选的是, $n_1 > n_2 > n_3$ 。光纤 1 优选地包覆有折射率小于 n_3 的涂层。于是, 可以通过将泵浦辐射耦合到至少第一包层 5 中来对光纤 1 进行包层泵浦。涂层优选地是聚合物。已发现当在放大器内使用如图 1 所示的基座光纤时, 包层泵浦光纤激光器对于损坏泵浦二极管的光辐射有较小的抵抗力。优选的是, 光纤 1 是侧面泵浦的。

[0103] 光纤 1 优选地是抗光暗化光纤。“抗”是指在操作过程中光纤 1 的衰减的增加应当不大于 10%。优选的是, 衰减的增加在 2000 小时中应当不大于 5%。优选的是, 该增加在 2000 小时中应当小于 1%。下面详细描述光暗化的测量数据。

[0104] 光纤 1 的数值孔径优选地小于 0.15。

[0105] 下文中, 频繁提及诸如二氧化硅、磷酸盐、氧化铝和氧化锆的材料。二氧化硅是指纯二氧化硅、掺杂的二氧化硅、以及重掺杂的二氧化硅玻璃, 该玻璃有时候称为硅酸盐玻璃或硅玻璃。磷酸盐是指磷的氧化物 (例如, 五氧化二磷 (P_2O_5))。氧化铝是指铝 (aluminum) 的氧化物 (在欧洲称作 “aluminium”) (例如, Al_2O_3)。氧化锆是指锆的氧化物, 具体是指 GeO_2 。镱是指将镱作为氧化物加入到玻璃中, 并且以 ppm 为单位的浓度是镱的离子的浓度, 具体是指 Yb^{3+} 。相似的是, 提及的其他稀土金属 (例如, 铥、钕等) 是指作为氧化物加入到

玻璃中的稀土金属,并且以 ppm 为单位的浓度是指稀土金属的离子的浓度。

[0106] 图 2 示出了光纤 1 的折射率分布 20。芯 3、基座 4 及第一包层 5 的折射率分别为 n_1 、 n_2 和 n_3 。优选的是, n_1 大于 n_2 且 n_2 大于 n_3 。

[0107] 优选实施方式的芯 3 包括氧化铝的浓度在约 0.3 摩尔百分比与 0.8 摩尔百分比之间、且磷酸盐的浓度大致为 15 摩尔百分比的二氧化硅玻璃。优选的是,基本上不存在铈掺杂剂。优选的是,基座 4 包括二氧化硅、磷酸盐和氧化锆。第一包层 5 可以是纯二氧化硅、掺氟二氧化硅、或在光纤的制造中使用的其他包层材料(包括聚合物)。在第一包层 5 是玻璃的情况下,光纤 1 优选地包覆有折射率可以低于第一包层 5 的折射率的聚合物,以在放大器和激光器中引导泵浦光。对于作为光纤激光器和放大器中的增益介质的应用,芯 3 和基座 4 中的至少一个掺杂有稀土掺杂剂。该稀土掺杂剂可以是浓度优选地大致在 20000ppm 至 45000ppm 的范围中的铽。

[0108] 使用抗光暗化光纤的优点在于,光纤 1 能够在高泵浦和反转条件以及高强度下传输光辐射。低数值孔径意味着光纤 1 可以被构造成所谓的大模面积光纤,其与高泵浦和反转条件相结合时,使得光纤激光器和放大器的输出功率和 / 或产品寿命增加。美国专利第 6614975 号中描述了大模面积光纤的设计。光纤激光器和放大器的设计中的另一优点在于,由于光纤在产品寿命上保持其传输质量,因此需要较少的泵浦二极管。

[0109] 尽管以上附图呈现了优选的实施方式,但是芯 3 可以包括氧化铝的浓度在 0.1 摩尔百分比至 4 摩尔百分比的范围中、且磷酸盐的浓度在 2 摩尔百分比至 20 摩尔百分比的范围中的二氧化硅。掺氧化铝的芯与掺锆-磷的基座相结合使得可以以与现有技术相比有所增加的可重复性来制造低数值孔径光纤。可以容易地实现低至 0.06 至 0.1、或者优选地约 0.08 的数值孔径。

[0110] 基座 4 可以包括二氧化硅、磷酸盐和氧化锆。对磷酸盐和氧化锆的浓度进行选择以实现期望的数值孔径。加入氧化锆的优点是增加了基座 4 的假想温度,因此在光纤制造过程中有助于保持环形以及芯 3 与基座 4 的同心从而有助于芯 3 与第一包层 5 的同心。芯的同心在低损耗熔接的生产中很重要。

[0111] 优选的是,在芯 3 中基本上不存在铈掺杂剂。去除铈掺杂剂的重要性在光纤激光器和放大器的设计中很显著,这是由于已发现包含铈掺杂剂的光纤特别易受光暗化的影响。因此,使用铈的量极低的稀土掺杂剂是重要的。铈的浓度应当小于约 10ppm,优选地小于 1ppm。

[0112] 光纤 1 可以掺杂有布置在芯 3 和基座 4 中的至少一个中的至少一种稀土掺杂剂。该稀土掺杂剂可以是浓度在 2000ppm 至 60000ppm 的范围中的铽。铽的浓度可以在约 15000ppm 至 50000ppm 之间。铽的浓度优选地在约 20000ppm 至 45000ppm 之间。

[0113] 芯 3 中的磷酸盐的浓度可以在约 12 摩尔百分比至 17 摩尔百分比之间。芯 3 中的磷酸盐的浓度优选地约为 15 摩尔百分比。

[0114] 氧化铝的浓度可以在约 0.20 摩尔百分比至 1 摩尔百分比之间。氧化铝的浓度优选地在约 0.3 摩尔百分比至 0.8 摩尔百分比之间。

[0115] 光纤 1 可以使用化学汽相淀积和溶液掺杂来制造。美国专利第 4787927、4815079、4826288、5047076 和 5151117 号中描述了该技术。

[0116] 波导 2 可以是信号波长处的多模波导。波导 2 可以被构造成在充分长的长度上无

显著畸变和 / 或模式耦合地传播单模光。这种设计对于高功率光纤激光器和放大器的设计,特别是对于光谱学、工业材料加工、激光手术和宇航应用中的应用来说是重要的。美国专利第 5818630、6496301、6614975 和 6954575 号中描述了芯设计的示例、传播单模光的技术、以及使用弯曲损耗来(至少部分地)去除非期望的更高阶模。

[0117] 波导 2 可以是单模波导。

[0118] 图 3 示出了包括用于在芯 3 中引起双折射的应力产生区 31 的光纤 30。芯 3 可以是圆形或椭圆形的。另选的或附加的是,可以通过使基座 4 和芯 3 中的至少一个成为椭圆形来引起双折射。图 14 示出了具有用于引起双折射的椭圆形的基座 4 的光纤 140。光纤 140 还包括被设计成粘性比基座 4 的粘性高的内包层 141。例如,这可以通过使基座 4 中包括硼掺杂剂以降低其折射率来实现。美国专利第 4274854 和 4426129 号中描述了用于制造这种双折射光纤的技术。应当注意,在这种光纤中,降低或去除基座中氧化锆的掺杂剂浓度以使得基座可以重新成形为椭圆形护套可能是有利的。另选的或附加的是,光纤 1 中可以包括掺杂有硼的氧化物的附加包层(未示出)以形成椭圆形的护套,如以上专利号所教导的。光纤 30 和 140 也可以是单偏振光纤,其可以是美国专利第 6496301 号以及共同未决且共同拥有的美国专利申请第 10/528895 号中描述的单模或多模。

[0119] 图 4 示出了以包括泵浦 44 和光纤 41 的包层泵浦放大光学装置 40 的形式的设备。光纤 41 可以是光纤 1、30 或 140。包层泵浦光学装置 40 利用在公共涂层 46 内包括光纤 41 和泵浦光纤 43 的复合光纤 42。美国专利第 6826335 号中描述了复合光纤 42。其他包层泵浦光纤和布置也是可行的,例如,美国专利第 4815079、5854865、5864644 和 6731837 号中所描述的那些。本发明因为从低数值孔径的芯 3 散射或泄露的信号光优选地被基座 4 捕捉和引导因此不送回到泵浦 44 中而特别有利。因此,该设备去除了包层泵浦激光器的主要故障机制之一,即,由非期望的信号光所导致的泵浦二极管的灾难性的故障。包层泵浦光学装置 40 可以是包括至少一个泵浦能量源的放大器、激光器、主振功率放大器、调 Q 激光器或超快激光器。超快激光器是指例如包括以锁模激光器和 / 或主振功率放大器的形式的激光器的、发射的脉冲的脉冲宽度小于 1ns 并且更优选地小于 10ps 的激光器。美国专利第 6885683、6275512、5627848、5696782 号中公开了超快激光器的设计 and 应用。

[0120] 图 5 示出了以用于材料加工的激光器 50 的形式的设备。激光器 50 包括放大光学装置 40、激光输送光纤 51 及加工头 52。加工头 52 可以是扫描仪、检流计或聚焦透镜。激光器 50 对于金属、塑料和其他材料的打标、微焊接、印刷、微机械加工、以及切割特别有用。

[0121] 图 6 示出了分别包括掺杂有镱、氧化铝、氧化锆及硼的氧化物的芯 3 的四个连续波光纤激光器中的光暗化效应。该图示出了四个不同的光纤激光器的输出功率 61 相对于时间 66 的测量。这些光纤激光器中的每一个的芯 3 掺杂有标准市售的镱掺杂剂源。线 62 示出了来自掺杂有镱含量高的标准市售镱掺杂剂的光纤激光器的测量。观察到输出功率 61 的快速下降。线 63 示出了在 30°C 进行的来自输出 60W 的连续波输出功率的光纤激光器的测量。光纤芯 1 掺杂有标准市售的镱。再次,可以观察到输出功率 61 的快速下降。线 64 示出了在 70°C 进行的来自输出 110W 的连续波输出功率的光纤激光器的测量。最后,线 65 示出了在 30°C 进行的来自输出 60W 的连续波输出功率的光纤激光器的测量。镱掺杂剂是高纯度的,规定的杂质水平小于 10^8 分之一。镱掺杂剂是高纯度的,规定的杂质水平小于 10^6 分之一(1ppm)。将线 63 与 65 进行比较,当在相同的输出功率水平和温度水平下测量时,高纯

度的镱的使用减小了光暗化效应。将线 64 与 65 进行比较,将温度从 30℃增加到 70℃导致光暗化的增大。显然,通过利用铈和其他杂质水平很低的 Yb 掺杂剂实现了对光暗化的抵抗力的显著增加。认为剩余的光暗化效应归因于其他折射率控制芯共同掺杂剂,即,氧化铝、氧化锆、及硼的氧化物。

[0122] Kitabayashi 等人在他们的题为“Population inversion factor dependence of photodarkening of Yb-doped fibers and its suppression by highly aluminum doping”(发表在 Proceedings of Optical Fiber Communications 2006 Conference 上)的文章中公开了以下内容:通过加入氧化铝掺杂,掺 Yd 光纤中的光暗化可以减小,但不能完全去除。这里通过引用来并入该文章。

[0123] 令人惊奇的是,本发明人已发现:通过从光纤 1 的芯 3 中去除氧化锆并通过包括磷酸盐掺杂剂可以实现进一步的改善。图 7 示出了通过在已掺杂有氧化铝的芯 1 中包括磷酸盐掺杂剂而获得的改善。芯 1 不包含氧化锆和硼掺杂剂。芯 1 掺杂有高纯度的镱的氧化物(总杂质含量规定为好于 1ppm),以将归因于铈及其他稀土的污染物保持到最小。曲线 67 示出了氧化铝掺杂剂的结果,曲线 68 示出了氧化铝和磷酸盐掺杂剂的结果。显示出:根据 Kitabayashi 等人的结果,氧化铝依靠其自身不能完全抑制光暗化效应。然而,已发现,除氧化铝之外还包括磷酸盐共同掺杂剂会导致急剧的改善并显著减小掺镱光纤中的光暗化效应。重要的是,在芯中使用氧化铝掺杂剂还使得能够以比单独利用磷酸盐掺杂剂时高的重复性来制造数值孔径低的波导。

[0124] 光纤的光暗化也可以通过对经受加速老化测试的光纤的吸收(在感兴趣的 1 微米左右的区域左右)的增加进行监视来表征。通过对掺镱的芯进行泵浦以实现最大可能的反转来加速老化。通过利用约 400mW 的 976nm 处的泵浦光对约 0.1m 至 1m 长的光纤进行芯泵浦并将白光从钨丝耦合到芯中,获得了参照图 8 至图 10 所示的测量结果。然后,通过截断测量来测量光谱吸收。该测量方法遵循 L. L. Koponen 等人在文章“Photodarkening in ytterbium-doped silica fibers”(Proceedings of SPIE Volume 5990)中所发表的方法,这里通过引用并入该文章。在加速老化之前和之后进行损耗 81 相对于波长 83 的测量。图 8 示出了芯中掺杂有高纯度的 Yb、氧化锆和硼的光纤激光器中的加速老化之前对损耗 81 的测量结果 84 和之后对损耗 81 的测量结果 85。图 9 示出了使用市售的抗光暗化掺 Yb 光纤的同样的测量的结果。图 10 示出了针对包含图 1 中所示的光纤 1 的光纤激光器的同样的测量的结果。在图 8 至图 10 的各图中,从约 850nm 至 1050nm 的镱吸收峰是明显的。由于该原因,衰减曲线 84 和 85 由曲线 86 和 87 来外推(在图 8 和图 9 中),而在图 10 中由曲线 101 来外推(这是由于在曲线 84 与 85 之间不存在可辨认的差别)。在图 8 中,损耗 81 随波长 83 的减小而增大,光暗化很明显。在图 8 和图 9 中利用阴影区域示出了感兴趣的区域 88,该区示出了损耗 81 在 1000nm 与 1100nm 之间的增加。与图 9 相对应的光纤清楚地表现出损耗的增加比图 8 所对应的光纤小得多。然而,如从图 10 显而易见的,根据由突出的区域 102 所显示的,在该波段不存在明显的光暗化。因此,根据本发明的该方面的光纤设计去除了光暗化。

[0125] 图 11 和图 12 示出了来自利用图 1 的光纤的光纤激光器的相对于时间 111 的输出功率 110,该光纤具有与图 10 的加速老化测试中所使用的掺杂剂相似的掺杂剂。各图中上面的测量线是输出功率 110,而下面的线是进行测量的环境温度 112。用于获得图 11 中所

示的结果的光纤激光器是主振功率放大器 MOPA (未示出), 其发出脉冲能量为 0.6mJ 且脉冲宽度为 35ns 的 12W 的平均功率的 20kHz 的脉冲。用于获得图 12 中所示的结果的光纤激光器是通过以 70% 的占空因子、以 10kHz 重复地打开和关闭用作泵浦源的激光二极管而受到 10kHz 的调制的连续波激光器。在高峰值功率脉冲 MOPA 和连续波激光器的二至三个月的连续操作中, 在图 11 或图 12 中, 均未能观察到输出功率 110 随时间 111 的下降。

[0126] 图 13 示出了本发明优选实施方式的折射率分布 130。分布 130 与图 2 的理想分布的不同之处在于, 其在芯 3 中包含在塌陷中由于掺杂剂 (具体地说是磷酸盐) 的蒸发而导致的中心凹陷 130。芯 3 与基座 4 之间的折射率差 131 由 $n_1 - n_2$ 给出, 其约为 0.0032。这与约 0.096 的数值孔径相对应。相似的是, 基座 4 与第一包层 5 之间的折射率差 132 约为 0.0097, 其与约 0.17 的数值孔径相对应。芯 3 掺杂有掺杂剂浓度约为 0.70 摩尔百分比的氧化铝、掺杂剂浓度约为 15 摩尔百分比的磷酸盐、以及掺杂剂浓度约为 25000ppm 的镱。镱掺杂剂由杂质含量小于 1ppm 的镱的氧化物来提供, 因此芯 3 中基本上不包括铊掺杂剂。基座 4 掺杂有足以提供约为 0.0032 的期望的芯 3 到基座 4 的折射率 131 的水平磷酸盐和氧化锆。应当注意, 因为基座 4 中的磷酸盐在由于淀积芯 3 的预成型的塌陷的过程中不会蒸发, 所以可以高精度地制造出基座折射率差 132。相似的是, 因为与磷酸盐有所不同, 氧化铝掺杂剂在预成型的塌陷的过程中相对地免于蒸发, 因此也可以高精度地制造出芯折射率差 131。因此, 优选实施方式提供了对光暗化问题的解决方案, 使得可以以高精度进行制造, 并且在制造过程中掺杂剂未从芯 3 中显著地蒸发。可以将镱掺杂剂的 25000ppm 的浓度改变成在约 20000ppm 与 40000ppm 内。较高的值使得光纤激光器或放大器内的泵浦吸收可以增加。这具有减小所使用的有源光纤的所需的长度的附加优点。可以通过在制造过程中过解 (oversleaving) 执行、或者通过产业中所知的其他技术来改变芯 3 的直径 133, 以生产出直径在 $5\mu\text{m}$ 至 $50\mu\text{m}$ 的范围中或更高 (例如, 用于功率非常高的激光器和放大器时的 $100\mu\text{m}$) 的芯。芯 3 可以是单模或多模, 可以通过调节芯 3 和 / 或基座 4 的掺杂剂浓度来改变折射率差 131, 使得等同的数值孔径在约 0.06 至 0.15 的范围中, 优选地在 0.08 至 0.15 的范围中。基座 4 的直径 134 可以在芯 4 的直径 133 的约 1.5 至 5 倍的范围中, 优选地在芯 4 的直径 133 的 1.5 至 4 倍的范围中, 更优选地在芯 4 的直径 133 的约 2.0 与 4 倍之间。图 13 中所示的设计可以用作这里描述的光纤 1、30、41 或 140 的芯 3 和基座 4 的设计的基础。

[0127] 已发现, 在 MOPA 脉冲激光器的最末放大级中使用具有中心凹陷 (如图 13 所示) 的有源光纤在包括跟随有低功率前置放大器级的半导体种子激光器的 MOPA 结构中非常有利。

[0128] 因为相对于平顶折射率情况下的模式而言, 由中心凹陷的存在而导致的非高斯模式分布与光纤尾纤的匹配较差, 所以这是不期望的。认为信号接头损耗的增加会导致放大器效率 (定义为放大器中所使用的泵浦功率与输出信号功率之间的比率) 的降低。相反的是, 通过在有源光纤芯中引入凹陷来获得放大器效率的增加。由于需要较少的泵浦二极管来达到期望的激光器输出功率, 因此高效率提供了显著的优点。

[0129] 在不同的有源光纤的特性中使用 300mW 的输入信号功率。这对于所考虑的具有来自半导体种子激光器的 5mW 至 10mW 的平均输出功率以及前置放大器级中的约 25dB 的放大的 MOPA 结构而言是典型的。

[0130] 当在有源光纤中激励多个横模时,测得的具有平顶折射率分布的光纤的效率为 50%至 55% (多模效率),而当仅激励较低阶模时,效率低至 25%至 35% (简称为单模效率)。由于目的是较好的输出光束质量,因此后者在光纤激光器中更合适。

[0131] 作为替代,具有中心凹陷的光纤显示出 65%至 70%的多模效率及高至 50%至 55%的单模效率。这些结果是针对在芯的中心呈现出不同的凹陷(凹陷折射率改变的范围从 -0.003 至 -0.010)的多种光纤而获得的。

[0132] 这可以通过考虑不同的设计的不同的能量提取效率来解释,该效率定义为从激光器介质中提取的能量与介质中可得的最大能量的比率。可以通过增加激活介质的输入饱和度和,即,通过使用较大的信号输入功率或增加光纤模式与激活介质的交叠,来增加能量提取效率。可以从半导体种子 +1 前置放大级获得的相对低的功率意味着必需以好的交叠为目标。

[0133] 在平顶光纤中,较低阶模式集中在芯的中心的周围,阻止了存储在芯边缘附近的大量 Yb 离子中的能量的有效使用。实际上,由于 Yb 离子的高摩尔反射率,假定 Yb 掺杂剂分布大致上跟随芯的折射率分布是合理的。

[0134] 相反的是,在具有中心凹陷的光纤中,较低阶模的分布与 Yb 分布相匹配。输入信号有效地使用掺杂剂的所有部分,得到较好的平均饱和水平和较好的提取效率。当在折射率中引入小至 -0.003 的凹陷时,理论上发现以下显著的优点:当凹陷进一步增加时,变化可忽略。

[0135] 另外的好处是放松了光纤加工中的制造容差(这是由于凹陷与预成型塌陷处理中的难以控制的掺杂剂蒸发有关),并且中心凹陷降低了给定的输出能量处的基级的峰值功率,这会降低非线性效应。

[0136] 放大器中脉冲整形的增加可能导致缺点。较好的提取效率导致放大器中的脉冲变形更差,并且对于相同的总脉冲能量,脉冲前沿处的峰值功率增加。这对于非线性效应和脉冲形状控制都是有害的。利用小的凹陷(折射率改变约为 0.003)来获得效率与整形之间的最佳平衡,而以更严格的制造要求为代价。

[0137] 图 15 示出了针对 200W 的连续波激光器的相对于时间 111 的输出功率 110。200W 的激光器包括其输出由 200W 的光纤放大器来放大的 20W 的光纤激光器。该 200W 的光纤放大器使用折射率分布与图 13 中所示的折射率分布相似的光纤。芯 3 掺杂有氧化铝、磷酸盐和镱。在 70 小时中,输出功率 110 减小约 2W(0.7%)。这样小的减小可能是由除光暗化之外的其他原因导致的。相比而言,图 16 示出了具有凹陷的内包层的更传统的阶跃折射率光纤用于 200W 的光放大器中的等同的结果。芯掺杂有氧化铝、硼和镱。在 35 小时中,观察到输出功率 110 降低约 25W(10%)。清楚地表明了通过在芯中使用氧化铝和磷酸盐掺杂剂所获得的改善。

[0138] 已经呈现了对在 mW 功率水平至几百瓦特处发生的光暗化进行展示的实验结果。关键起作用的是掺杂剂成分,并且光纤中的反转的量应当尽可能地减小。可以通过减小贯穿光放大系统的各级处的小的信号增益来实现反转的减小。光暗化看起来对大于 10dB 的光增益是成问题的,对大于 20dB 的光增益尤其成问题。

[0139] 认为这里描述的解决方案适用于从瓦特的几分之一到几千瓦特的功率水平,适用于连续波激光器及脉冲宽度从几十飞秒至几百毫秒的脉冲激光器,适用于单模输出和多模

输出,并适用于随机偏振输出和偏振输出。尽管所描述的工作集中在镜掺杂上,但是本发明人认为这些结果也适用于基于受激拉曼散射的光纤激光器和放大器,以及包含铍、镱、铈、镨、钐、铕、钆、铽、镱、共同掺杂有铍的铈、或共同掺杂有铍的铈的光纤激光器和放大器。这些解决方案对于在小于约 1350nm 的波长操作的光纤激光器和放大器很重要,对于在小于 1100nm 的波长操作的光纤激光器和放大器尤其重要。这些结果也适用于光束输送光纤(例如,图 5 中的光纤 51)的设计,特别是当来自光纤激光器的输出的波长小于 800nm 时。这可以通过倍频或三倍频来实现,例如,使用非线性晶体、波导、或光纤、或诸如啁啾周期柱状铌酸锂的材料。这些解决方案可以与用于减小光暗化的传统方法(例如,使用氢氧基(OH)含量高的二氧化硅(所谓的“湿二氧化硅”))相结合地使用。其可以装载氘并由紫外(UV)光来照射。

[0140] 图 17 示出了用于提供光辐射 1713 的设备 171,其包括光源 172、至少一个放大器 173、以及控制器 174。光源 172 发出光脉冲 175,放大器 173 对光脉冲 175 进行放大以产生输出脉冲 1719。输出脉冲 1719 由脉冲重复频率 176、脉冲持续时间 177、峰值功率 179、平均功率 178、及脉冲能量 1710 来表征。在图 17 中,脉冲能量 1710 示出为脉冲 1719 下面的阴影面积。设备 171 在放大器 173 与可选的将光辐射 1713 导向材料 1714 的加工头 1712 之间具有可选的光纤光缆 1711。控制器 174 对光源 172 和放大器 173 中的至少一个进行控制,以使得设备 171 可以加工材料 1714。在图 17 中,将加工描述为打标 1715。光源 172 可以包括图 38 的种子激光器 382。光源 172 可以包括图 38 的反射器 384。放大器 173 可以包括图 38 的放大器 383。

[0141] 加工还可以包括打标、印刷、切割、钻孔、焊接、微焊接、钎焊、退火、以及其他材料加工应用。加工还可以包括诸如组织(例如,皮肤)治疗、牙科及外科手术的生物处理。

[0142] 加工头 1712 可以包括用于对光辐射 1713 进行扫描的扫描头或检流计。另选的或附加的是,加工头 1712 可以包括至少一个用于对光辐射 1713 进行准直和/或聚焦的透镜。优选的是,加工头 1712 可以包括利用源自材料 1714 的回反射来防止放大器 173 的扰动的高功率光隔离器。

[0143] 使用设备 171 来加工的材料 1714 可以是诸如半导体封装(塑料或陶瓷)、移动电话上的小键盘、IPOD、计算机、组件、包装、或者商业或工业产品的物品。

[0144] 美国专利第 6433306 号中描述了可以在图 17 的设备中使用的前置放大器、功率放大器、及光学装置,只是没有反射器 196,这里通过引用将其并入于此。根据该专利的描述,随着设备 171 的峰值功率 179 的增加,非线性效应开始出现。所提出的用于避免受激布里渊散射的解决方案是使用激光二极管作为光源 2,该激光二极管具有多个波长,以使得通过所存在的纵模的数量来增加 SBS 阈值,从而使得放大级相对地免于 SBS。本发明人已发现,该方法通常适合于小于约 1kW 至 5kW 的峰值功率 179。然而,如下面看到的,基于该解决方案的 MOPA 倾向于随机地产生可以损坏激光器的脉冲。认为该效应归因于 SBS。诸如增加光纤的模面积的解决方案增加 SBS 阈值,但是已被证实难以可靠地将其增加到约 5kW 以上。美国专利第 6433306 号未公开或提出使用反射器 196 来增加 SBS 阈值或避免随机地产生脉冲。

[0145] 作为由 SBS 所造成的问题的示例,在发出 12kW 的峰值功率的设备中使用具有多于 50 个模的激光二极管。当以 20kHz 调制延长的时间段(例如,1 小时至几个月)时,在输出

处观察到导致放大器 173 的波导的内部损坏的瞬时脉冲。认为该效应的发生归因于半导体激光器内的导致临时线宽变窄并且作为结果而触发 SBS 的随机效应。然而,尽管看起来非常有可能,却未能证实该效应是由 SBS 造成的。然而,已发现瞬时脉冲损坏非常难于量化以及将其从这些装置中去除,特别是当其极少发生时。

[0146] 令人惊奇的是,本发明人设法使用图 18 的设备 180 来解决该问题。半导体激光器由超辐射发光二极管 (SLED) 181、隔离器 186 和前置放大器 182 来替代。前置放大器 182 由泵浦 189 来泵浦。前置放大器 182 的输出经由光隔离器 186 而耦合到放大器 183,然后经由另一光隔离器 186 而耦合到功率放大器 1810。放大器 183 和功率放大器 1810 分别由泵浦 184 和 1811 来泵浦。泵浦 189、184 和 1811 优选地是半导体激光器。

[0147] 用 SLED 181 来替代半导体激光器是反直观的方法。这是因为 SLED 181 的功率比半导体激光器小得多。结果是,前置放大器 182 未饱和,并且在脉冲 1719 之间产生使放大器 183 和功率放大器 1810 的增益饱和的 ASE。如果泵浦 189 一直打开,则产生 ASE。这是因为其对前置放大器 182 进行泵浦,产生反转并接着产生 ASE。可以通过对泵浦 189 进行调制使得其在脉冲之间被关闭并在来自 SLED 181 的脉冲到达之前被打开来减小 ASE 的影响。精确的定时取决于前置放大器 182 的设计,并且具体地取决于可从泵浦 189 获得的功率,泵浦功率越高,使泵浦 189 打开所需的时间越少。另选的或附加的是,可以在前置放大器 182 与功率放大器 1810 之间插入光开关 1812。优选的是,在前置放大器 182 与放大器 183 之间插入光开关 1812。另选的或附加的是,可以使用滤波器(未示出)来对 ASE 进行滤波,但是不认为这与调制泵浦或使用光开关 1812 一样有效。光开关 1812 可以是声电调制器、波导开关、克尔盒或普克耳斯盒。

[0148] SLED 181 和泵浦 189、184 和 1811 受到控制器 25 的控制,如果安装了光开关 1812 则控制器 25 还控制光开关 1812。这些装置将同步地受到控制并减小非线性效应和损坏影响。

[0149] 前置放大器 182、放大器 183 和功率放大器 1810 可以是芯泵浦的或包层泵浦的。优选的是,前置放大器 182 是芯泵浦前置放大器。这是因为芯泵浦前置放大器是更短的更有效的装置。优选的是,放大器 183 和功率放大器 1810 是包层泵浦的。这种布置提供了可以以低成本生产的有效的装置。

[0150] 前置放大器 182、放大器 183 及功率放大器 1810 内所包含的光纤分别可以为实芯光纤或所谓的多孔光纤。它们优选地掺杂有诸如镱、铒、钕、钬、铥或镨的稀土掺杂剂。优选的是,光纤抗光暗化。参照图 1 至图 16 描述了这种光纤。

[0151] 优选的是,SLED 181 的带宽大于 10nm,优选地在 20nm 与 40nm 之间,或更大。带宽越大,SBS 阈值越高,本发明的设备越可靠。

[0152] 其他宽带源可以用作图 17 中的光源 172 以替代 SLED 181,例如,其他形式的 LED(例如,边发射 LED),超辐射发光光纤源(例如,经光栅滤波的 ASE 源)。

[0153] 本发明人已发现,可以通过使用图 19 中所示的设备来防止 SBS 事件。种子激光器 192 优选地是种子激光器 382。反射器 196 优选地是反射器 384。放大器 193 优选地是放大器 383。在实验中,设备 190 包括消偏振器 191、隔离器 186、由泵浦 199 来泵浦的前置放大器 192、以及由泵浦 194 来泵浦的功率放大器 193。控制器 174 控制光源 172、以及泵浦 199 和 194。

[0154] 种子激光器 192 是在约 1060nm 的中心波长处发出约 50 至 100 个纵模的单横模法布里珀罗半导体激光器。反射器 196 是带宽约为 2nm 且啁啾的光纤布拉格光栅。其反射率约为 4%。消偏振器 191 包括彼此成 45 度接合的两个长度的偏振保持光纤。消偏振器 191 的使用在许多材料加工应用（不是全部）中是优选的，以减小由偏振波动引起的加工条件的变化。因此，重要的是，种子激光器 192 的光带宽足以使得其发射能够被消偏振。隔离器 186 是被选择用于防止放大的自发发射被重定向而回到种子激光器 192 中的商用现货隔离器。前置放大器 192 和功率放大器 193 是掺镱包层泵浦光纤放大器。泵浦 194、199 包括许多结合在一起的单发射器半导体激光二极管。设置抽头耦合器 197 以监视来自功率放大器 193 的向后行进的光辐射。为了诊断的目的而包括抽头耦合器 197 和回反射检测器 198，它们不必形成成品设备的一部分。

[0155] 在正常操作中，种子激光器 192 发出脉冲，以 1kHz 与 500kHz 之间的频率提供 10ns 至 250ns 的脉冲 175。在 25kHz，来自种子激光器的峰值功率约为 300mW，来自前置放大器 192 的峰值功率约为 100W，来自功率放大器 193 的峰值功率约为 10kW 至 15kW。

[0156] 在不使用反射器 196 的情况下，发现设备 190 会遭受灾难性故障。故障机制由功率放大器 193 内的短长度（长至 100mm）的掺镱光纤的破坏来表征。该短长度的光纤变成白粉。另一故障机制是功率放大器的一端处的熔接失败。这些和其他故障不仅在制造和测试过程中可能发生，而且在经充分测试的产品中在几个月的操作之后也可能发生。

[0157] 图 20 示出了正常操作中向前行进的脉冲 1719 的光功率 201（在功率放大器 193 的输出处测量）和由回反射检测器 198 测量的输出功率 202。由于输出功率 201 比光功率 202 的功率高得多，因此按不同的尺度绘制光功率 201 和 202。输出功率 202 包括第一反射 203 和第二反射 204。第一反射 203 源自抽头 197 与功率放大器 193 之间的接头（未示出）。第二反射 204 源自来自光纤光缆 1711 的输出的反射。图 20 中所示的脉冲形状是从设备 190 出现的大量脉冲的代表。

[0158] 图 21 示出了后向行进的脉冲的两个示例 211、212。脉冲 211 和 212 如前地包括光功率 203 和 204，但是还包含附加的尖峰 213 和 214。这些附加的尖峰 213 和 214 不频繁地出现，其出现和量级都是随机的。可以通过改变种子激光器 192 的操作条件（例如，温度、驱动电流和脉冲形状）来改变出现的频率。在 25kHz 的脉冲重复频率，以一周末约一次测量直到五分钟时间段上 30000 次测量之间的频率观察到附加的尖峰。另外，可以通过使用不同的或同一制造商所提供的不同的种子激光器 192 来改变发生率。尽管在向后行进的方向上观察到附加的尖峰 213、214，但是在向前行进的脉冲形状 201 中没能明显地观察到。认为尖峰 213 和 214 是受激布里渊散射（SBS）的表象。

[0159] 图 22 示出了在正向中发生的叠加在外观正常的脉冲 201 上的巨脉冲 221 的示例。由回反射检测器 198 测量的有关的脉冲 222 的形状复杂，并且量级比图 20 中所示的脉冲 202 高若干级。实际上，在该尺度上看不到光功率 203 和 204。脉冲 222 具有尖峰 223、后沿 224 和凹陷 225。通过建立设备 190 来获得这些数据，使得在约 100Hz 处出现向后的尖峰 213 和 214。在该重复频率，观察到巨脉冲 221 和相关联的脉冲 222 约每五分钟出现 1 次。换言之，巨脉冲 221 出现的频率比向后行进的脉冲 213 和 214 小得多，并随机出现。

[0160] 认为凹陷 225 是 SBS 的又一表象。向后行进的脉冲 222 的能量足以经由 SBS 而泵浦向前行进的脉冲。这导致向前行进的方向上的巨脉冲 221，其因此从向后行进的脉冲 222

中提取能量,从而导致凹陷 225。所有以上脉冲又被功率放大器 193 中的有源增益介质放大。

[0161] 参照图 22,所示出的巨脉冲 221 的振幅 226 约是脉冲 201 的振幅 227 的两倍(在没有叠加巨脉冲 221 的情况下)。振幅 226 随机地改变,可以是脉冲 201 的振幅 227 的若干倍。认为巨脉冲 221 的振幅可以足以超过功率放大器 193 内的光纤的光损坏阈值,并且其可能与由 SBS 传播所关联的声波所引起的附加能量一起导致上述随机的和不可预测的灾难性故障。然而,该解释仅是理论性的,要描述可能的故障机制的企图并不旨在限制本发明的范围。

[0162] 图 23 示出了来自种子激光器 192 的典型的谱 230。中心波长 231 约为 1062nm,其总带宽 232 约为 6nm。谱 230 包括相隔约 0.045nm 的约 150 根激光线 233(未全部示出)。谱 230 包括被观察到随脉冲 1719 的演变而变化的三族激光线 233(即,234、235、236)。具体地说,第一族 234 在脉冲持续时间 177(在该过程中脉冲 1719 啁啾)的第一阶段是占优势的,其后,中心族 235 变得更占优势。

[0163] 图 25 示出了用作图 19 的设备中的反射器 196 的光纤布拉格光栅 250(未示出)的设计。图 25 示出了作为波长 253 的函数而绘制的反射率 251(左轴)和群时延 252(右轴)。群时延 252 从零偏移开。由于群时延 252 取决于测量的位置,因此该偏移是任意的。在反射率 251 曲线和群时延 252 曲线上都有噪声,这本质上是数学上的问题,是因为计算涉及非常小的数量的缘故。光栅 250 以约 4nm 的带宽 255 啁啾。中心波长 254 被设计成 1061nm,大致对准图 23 的中心族 235 内。图 26 示出了测得的光栅 250 的反射率 261。中心波长 262 约为 1060.7nm,带宽 263 约为 2nm。带宽 263 小于设计带宽 255,这是因为光栅 250 的制造中的失调现象。光纤光栅制造领域中的技术人员已知这些现象。美国专利第 6445852 及 6072926 号中描述了设计和制造这种光栅的技术,通过引用将这些专利并入于此。

[0164] 这里应当注意,加入光栅 250 的目的不是使来自激光二极管 2 的发射稳定化。经常将窄带光栅(带宽小于约 0.5nm,并且通常小于约 0.1nm)安装到激光二极管封装中,以锁定发射波长,防止模分配噪声,减小边模的振幅(所谓的边模抑制),并且/或者使线宽变窄。所有这些目的趋向于得到更稳定的发射,其(被认为)将促进 SBS 并增大巨脉冲的出现频率,因此将不能避免设备 190 的灾难性故障。

[0165] 图 24 示出了利用适当位置处的光栅 250 而测得的激光二极管 2 的谱 240。中心波长 241 约为 1061nm。谱 240 的带宽 242 小于谱 230 的带宽 232。带宽 242 约为 2nm,由来自光栅 250 的光反馈确定。根据美国专利第 6433306 号的教导,这样使带宽变窄有望降低 SBS 性能。令人惊奇的是,光栅 250 的使用不仅去除了向后行进的随机脉冲 213 和 214,而且去除了相关联的且更随机的向前行进的巨脉冲 221。已发现设备 190 无故障。利用其他激光二极管以及利用和不利用消偏振器的其他实验已确认了在设备 190 中包括反射器 196 的有益效果。光栅 250 显示出为在单横模中有至少 10% 的光辐射且峰值功率在 1kW 至 40kW 的范围中的脉冲激光器提供可靠的操作。认为可以实现高至 100kW 或以上的较高的峰值功率,而不存在 SBS 引起的问题。

[0166] 认为光栅 250 使种子激光器 192(在该情况下是激光二极管)不稳定。即,各激光线 233 被展宽、啁啾或调制,使得避免在功率放大器 193 中产生 SBS 的条件。其他用于避免 SBS 产生的方法是将反射器 196 实现为宽带反射器,例如,可以经由光纤耦合器而耦合进来

的部分反射镜或表面,或者带宽大于 0.5nm 的光栅,优选地大于 1nm,更优选地大于 2nm。光栅 250 优选地是啁啾的,但不必是啁啾的。啁啾光栅 250 将提供取决于波长的有效外部腔长,其被认为进一步促进种子激光器 192 的谱展宽。啁啾光栅 250 优选地内接在偏振保持光纤中,该偏振保持光纤的偏振轴对准种子激光器 192 的偏振保持尾纤的偏振轴或与其成一角度。光栅 250 可以同样地内接在非偏振保持光纤中。并且,种子激光器 192 的尾纤不必是偏振保持光纤。反射器 196 可以位于将激光辐射反射到种子激光器 192 的前面或背面(未示出)中的位置。反射器 196 还可以包括电介质涂层。反射器 196 的反射率可以在约 0.1% 与 10% 之间。获得了反射率高至 34% 的没有脉冲 213、214 的结果;然而,在这些水平观察到脉冲畸变。优选的是,反射率约为 2% 至 6%。准确的数量将取决于所使用的特定的激光二极管,并通过实验而得到。认为反射器 196 的反射率应当高于种子激光器 192 的前面中所使用的反射率。还认为种子激光器 192 的带宽优选地与反射器 196 的带宽可比或更小。在上述实验中不是这种情况,因此需要针对种子激光器 192 的不同批次而建立种子激光器 192 的操作条件(温度和驱动电流)。另选的或附加的是,可以增加光栅反射器 196 的带宽,以包括种子激光器 192 的整个带宽以及发射波长的制造容差。还应当注意,抽头 197 的设置使得能够实现这种装置,这是因为完全没有反向行进的脉冲是可靠的操作的可靠的指示。

[0167] 光栅 250 位于距种子激光器 192 在 40cm 与 1m 之间。未观察到性能的差别。因此,认为准确的位置并不关键,只要距离不太大而导致利用反射反馈来使种子激光器 192 稳定化的时间不足即可。

[0168] 种子激光器 192 以及泵浦 199 和 194 受到控制器 25 的控制。下面将描述关于使用控制器来控制光脉冲 1719 的脉冲形状的其他信息,以及设备在材料加工中的应用和使用。

[0169] 前置放大器 192 和功率放大器 193 可以是芯泵浦或包层泵浦的。前置放大器 192 可以是芯泵浦前置放大器。芯泵浦前置放大器是比包层泵浦前置放大器短的装置,并且更有效。另选的是,前置放大器 192 可以是包层泵浦前置放大器。为了降低成本,这是优选的。优选的是,功率放大器 193 是包层泵浦的。这种布置提供了可以以低成本来生产的有效的装置。美国专利第 6826335 号中描述了包层泵浦放大器的设计和结构,这里通过引用将其并入于此。

[0170] 前置放大器 192 和功率放大器 192 内包含的光纤分别可以是实芯光纤或所谓的多孔光纤。它们优选地掺杂有诸如镱、铒、钕、钬、镱或镨的稀土掺杂剂。优选的是,光纤是抗光暗化的。共同未决的专利申请代理人卷号 S001-P20 中描述了这种光纤,这里通过引用将其并入于此。

[0171] 图 19 可以用于替代图 19 的光源 172 和放大器 173。如下面详述的,控制器 174 控制种子激光器 192 以及对前置放大器 192 和放大器 193 进行泵浦的泵浦 194,使得平均功率 178 和峰值功率 179 在脉冲重复频率 176 的范围上保持在足以加工材料 1714 的水平。

[0172] 图 27 示出了分别针对 115kHz、46kHz、30kHz 和 24kHz 的脉冲重复频率的相对于时间 275 的输出脉冲 271、272、273 和 274。由种子激光器 192 发出的相对应的光脉冲 175 在图 28 中分别示出为脉冲 281、282、283 和 284。输出脉冲 271 至 274 以及光脉冲 281 至 284 分别在其中各个脉冲相交叠的图 29 和图 30 中再现。图 31 示出了峰值功率 179 和脉冲能量 1710 随脉冲重复频率 176 的变化。对于 24kHz 与 115kHz 之间的脉冲重复频率 176,峰值功

率 179 保持在 5kW 以上,脉冲能量 1710 保持在 0.1mJ 以上。而且,由于平均功率 178 是脉冲重复频率 176 与脉冲能量 1710 的乘积,因此对于 24kHz 与 115kHz 之间的脉冲重复频率 176,平均功率 178 可以看起来大于约 10W。图 27 至图 31 中所示的结果是非常显著的,这是因为已证实可以仅利用两级放大而以大于 100kHz 的脉冲重复频率实现脉冲能量为 0.1mJ 的 5kW 的峰值功率。与具有可比的平均输出功率 178 的其他光纤光学脉冲激光系统相比,MOPA 190 在增加加工速度中非常有用。

[0173] 图 32 示出了在来自泵浦 194 的功率增加的情况下来自 MOPA190 的输出功率 320。在约 10ns 的脉冲宽度(在峰值功率的一半处测量)的情况下,获得了 35kW 的峰值功率。图 33 示出了相对于波长 332 绘制的脉冲的光谱 331。来自种子激光器 192 的脉冲的信号波长 333 约为 1062nm。在比信号波长 333 长的波长处存在功率的相当大的比率,该功率由于诸如受激拉曼散射的非线性过程而波长偏移。参照回图 32,使用对大于 1070nm 的波长进行衰减的光滤波器来测量输出功率 321。从图 32 和图 33 看到,大于约 8kW 的输出功率波长偏移。因此,可以将 8kW 的输出功率定义为非线性阈值 322。使用 MOPA190 来加工材料可能需要在图 17 的加工头 1712 内使用宽带光学器件。“宽带光学器件”是指可以对带宽大于约 100nm 的信号波长进行传输和聚焦的光学器件。然而,在该模式操作的 MOPA 190 对于需要峰值功率 179 大于约 8kW 的材料加工很有用。

[0174] 控制器 174 可以用于通过减小泵浦 194 和 199 所发出的功率或者通过控制输出脉冲 1719 的形状来减小输出脉冲 1719 中波长转换的比率。可以将波长转换的比率减小到少于 50%,优选的是小于 10%。优选的是,如同参照图 27 至图 31 所表明的,在脉冲重复频率 176 的宽范围上基本上没有波长转换的输出脉冲 1719。控制器 174 的控制函数或者可以通过开环控制来实现(例如,通过实验和特性来实现),或者是闭环控制,在该闭环控制中,从 MOPA 190 内的一点(例如,在放大器 193 的输入或输出或其他地方)取得功率的测量结果(平均功率或峰值功率或波长偏移功率),将其与期望值相比较,并且测量结果与期望值之间的差异用于对控制器 174 所提供的控制函数进行修正。

[0175] 图 34 至图 37 示出了改变脉冲重复频率(prf)176 和脉冲宽度 177 对 MOPA 190 中的输出脉冲 1719 的形状的效果。全部四个图绘制在同一尺度上,输出功率以任意单位绘制。控制器 174 控制泵浦 194 和 199,使得平均功率 178 保持在 12W。控制器 174 还将脉冲重复频率 176 设定成其期望值。然后,控制器 174 改变脉冲宽度 177(即,各脉冲 1719 的总脉冲宽度)以将峰值功率 179 设定在期望值。

[0176] 图 34 示出了以 25kHz 的脉冲重复频率 176、0.6mJ 的脉冲能量 1710、以及 12W 的平均功率测量的相对于时间 275 的输出功率 340。脉冲宽度 343(即,控制器 174 控制的总脉宽)约为 200ns。输出功率 340 具有峰值功率 341 以及约 35ns 的半峰全宽脉冲宽度 342。

[0177] 图 35 示出了分别针对两个不同的脉冲宽度 355 和 356 而测量的相对于时间 275 的输出功率 350 和 351。脉冲重复频率 176 为 50kHz,脉冲能量 1710 为 0.24mJ,平均功率 178 为 12W。输出功率 350 的半峰全宽脉冲宽度 354 约为 35ns。峰值功率 352、353 随脉冲宽度 355、356 的增加而减小。

[0178] 图 36 示出了分别针对三个不同的脉冲宽度 367、368 和 369 而测量的相对于时间 275 的输出功率 360、361 和 362。脉冲重复频率 176 为 100kHz,脉冲能量 1710 为 0.12mJ,平均功率 178 为 12W。输出功率 360 的半峰全宽脉冲宽度 126 约为 35ns。峰值功率 363、

364 和 365 随脉冲宽度 367、368 和 369 的增加而减小。

[0179] 图 37 示出了分别针对两个不同的脉冲宽度 375 和 376 而测量的相对于时间 275 的输出功率 370 和 371。脉冲重复频率 176 为 200kHz, 脉冲能量 1710 为 0.06mJ, 平均功率 178 为 12W。输出功率 370 的半峰全宽脉冲宽度 374 约为 20ns。峰值功率 372 和 373 随脉冲宽度 375 和 376 的增加而减小。

[0180] 通过改变图 19 的设备中的种子激光脉冲 175 的形状, 将峰值功率 179 在从 1Hz 至 200kHz 的脉冲重复频率 176 的范围上保持在 5kW 水平以上, 同时提供超过 0.1mJ 的脉冲能量 1710。将峰值功率 179 在从 1Hz 至 500kHz 的脉冲重复频率 176 的范围上保持在 3kW 以上, 同时提供超过 0.04mJ 的脉冲能量 1710。值得注意的是, 这些结果是在没有任何 SBS 的迹象且仅利用两个放大级的情况下获得的。

[0181] 通过控制图 19 的设备中的种子激光脉冲 175 的形状、增加放大器 192、193 的增益、并控制它们的相对增益, 进一步表明了 20W 至 25W 之间的平均功率 178、在 0.8mJ 至 1mJ 的范围中的脉冲能量 1710、在 15ns 至 20ns 的范围中的半峰全宽脉冲宽度 374、在 18kW 至 26kW 的范围中的峰值功率 179、在 1Hz 至 25kHz 的脉冲重复频率 176。值得注意的是, 这些结果也是在没有任何 SBS 的迹象且仅利用两个放大级的情况下获得的。

[0182] 本发明还可以是包括一个或更多个上述激光器和控制器的材料加工机的形式 (例如, 用于切割、焊接、钻孔、打标或加工材料的材料加工机)。

[0183] 应当理解, 参照附图, 仅通过示例的方式给出了上述本发明的实施方式, 可以提供变型例和附加组件以增强性能。

[0184] 本发明扩展至具有上述特征中的一个或其任意组合。

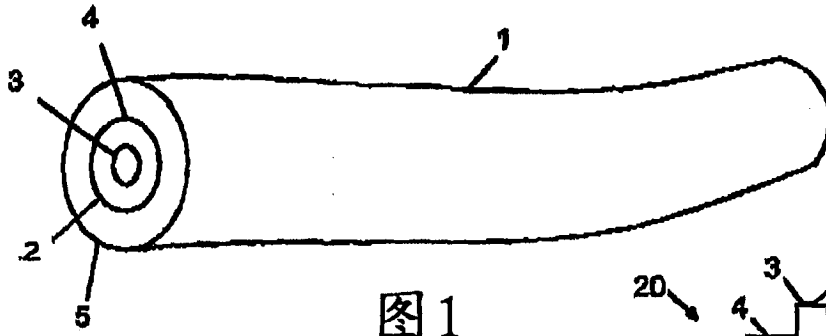


图 1

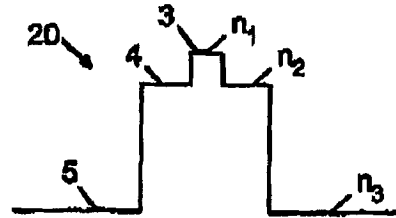


图 2

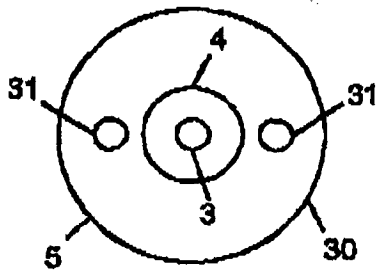


图 3

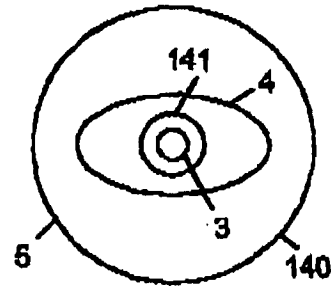


图 14

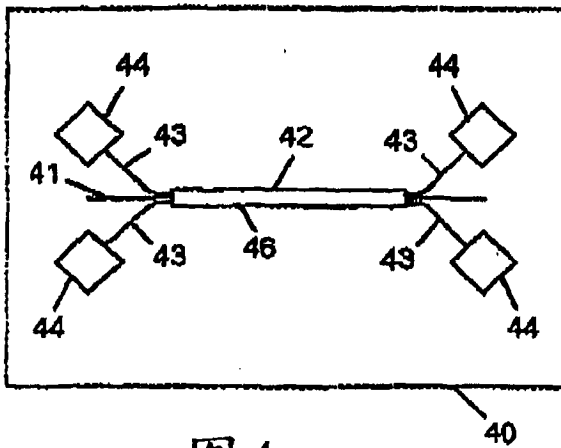


图 4

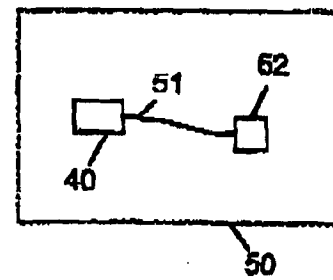


图 5

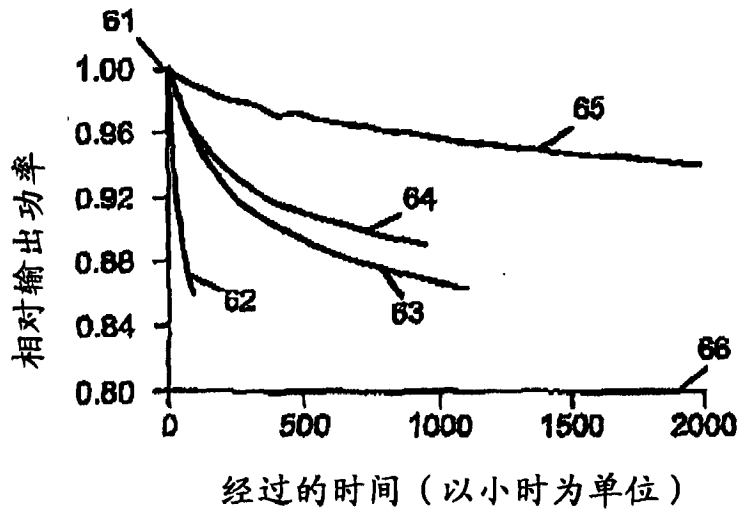


图 6

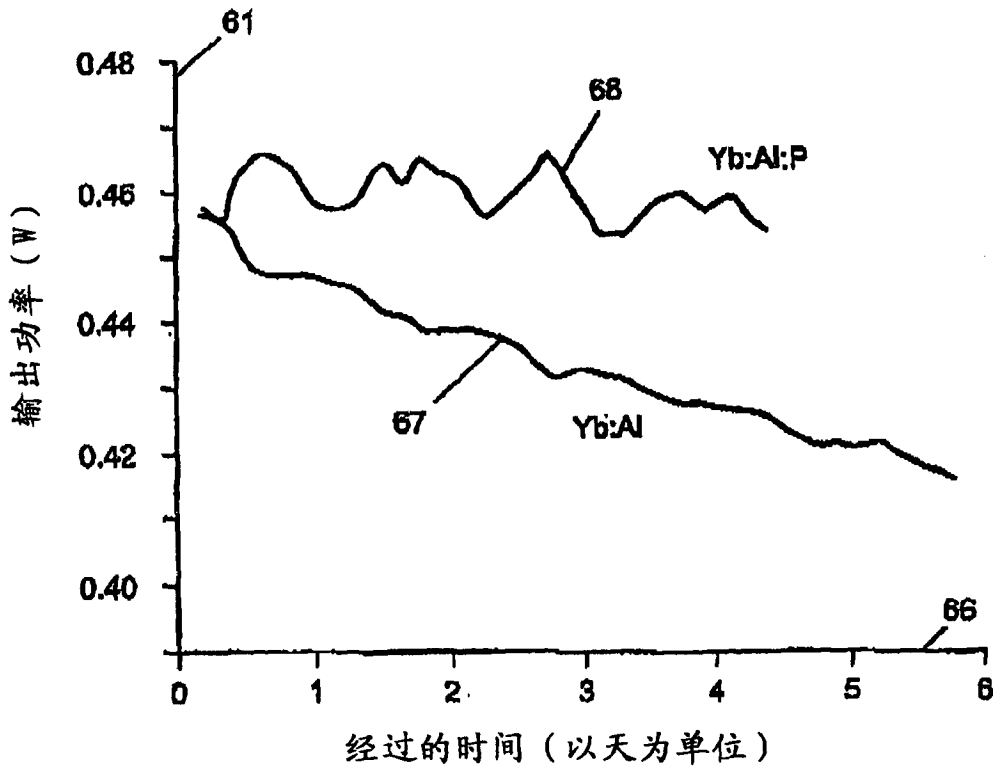


图 7

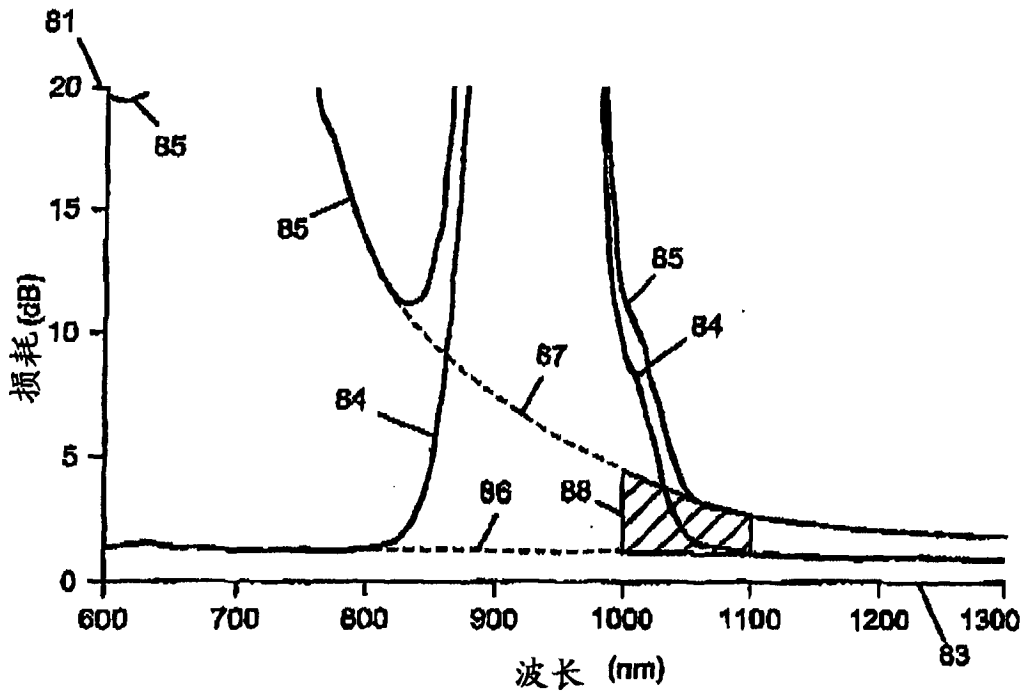


图 8

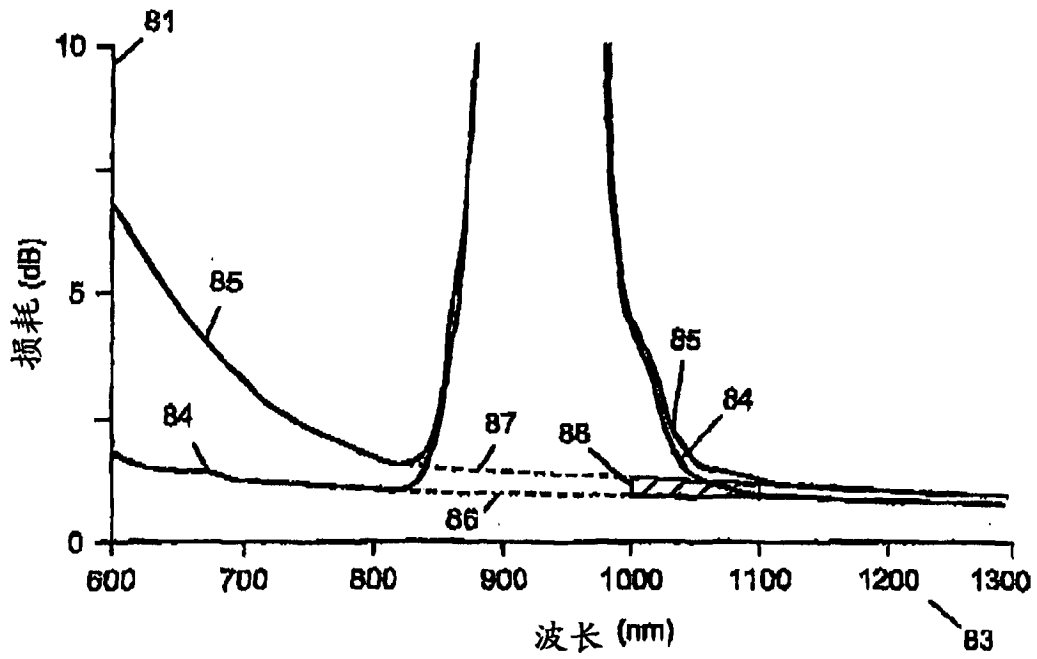


图 9

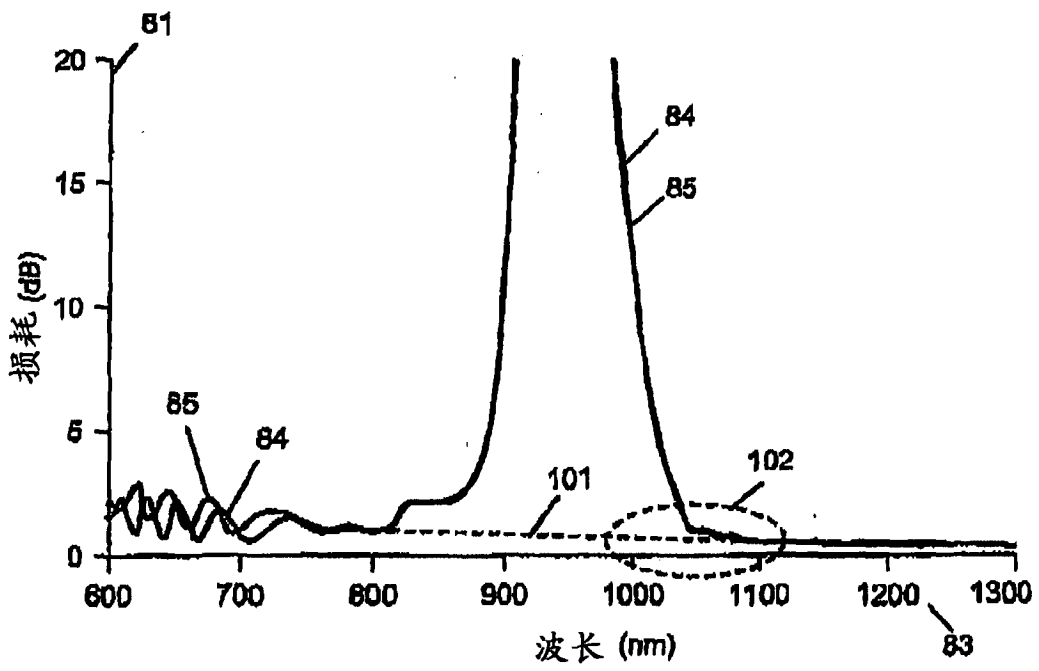


图 10

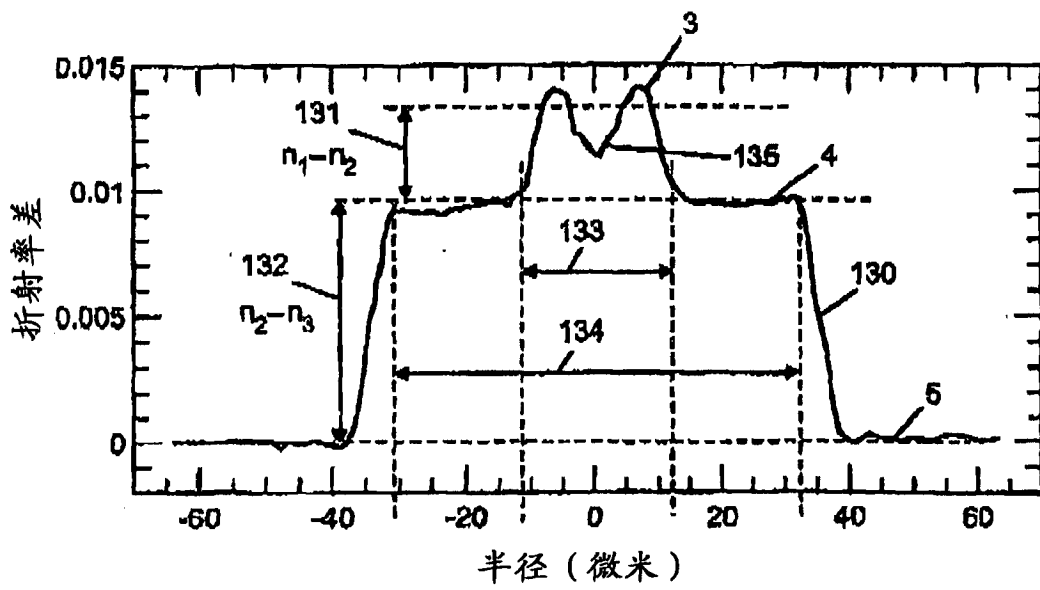


图 13

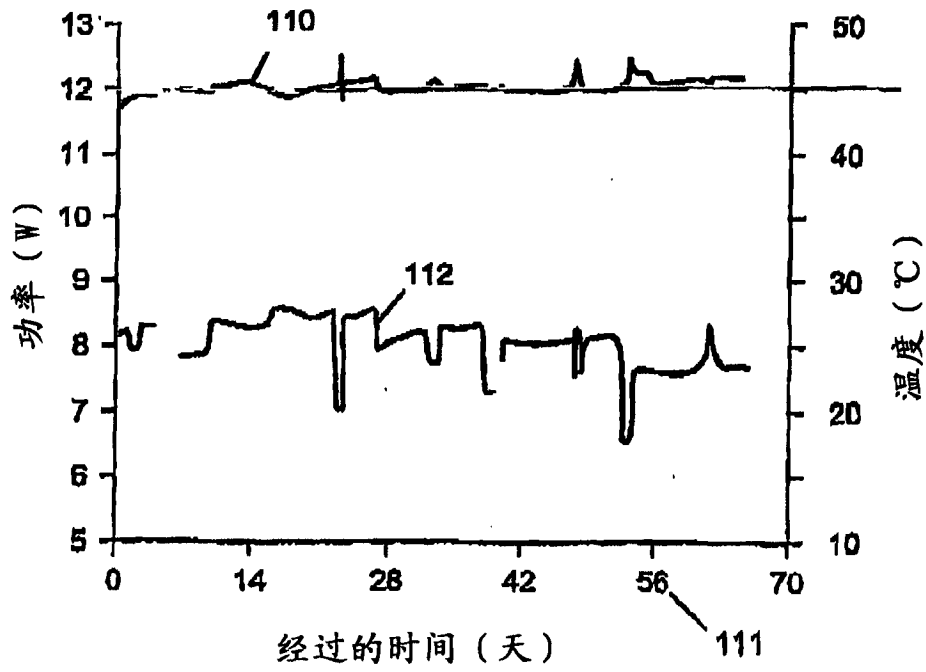


图 11

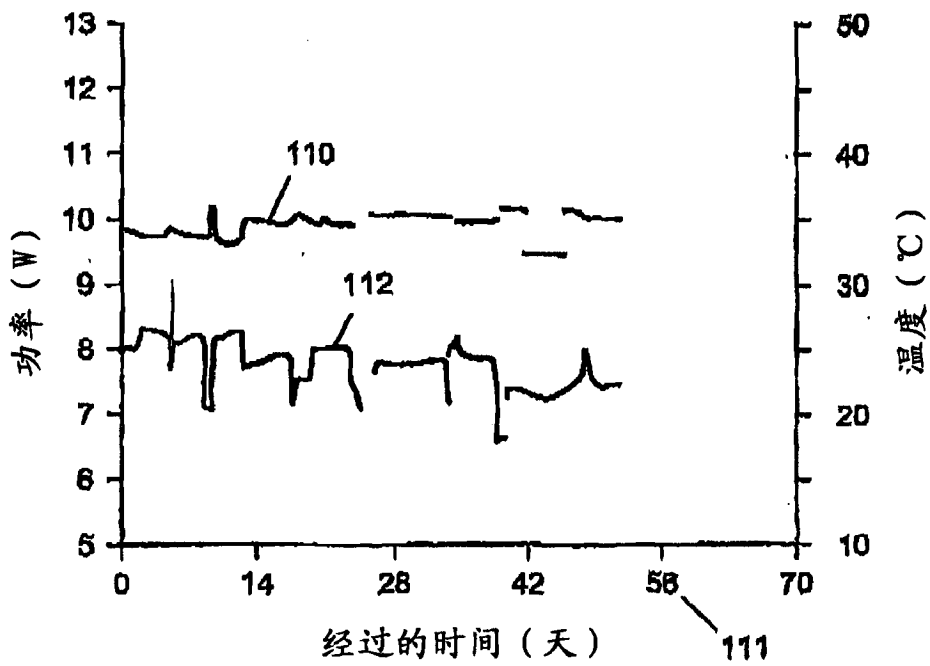


图 12

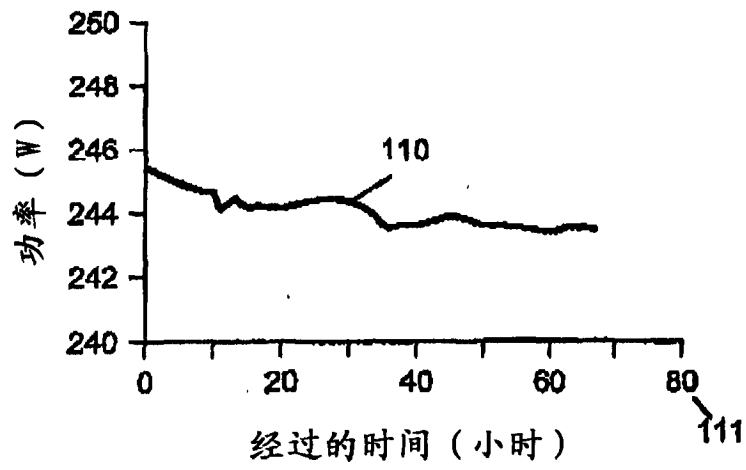


图 15

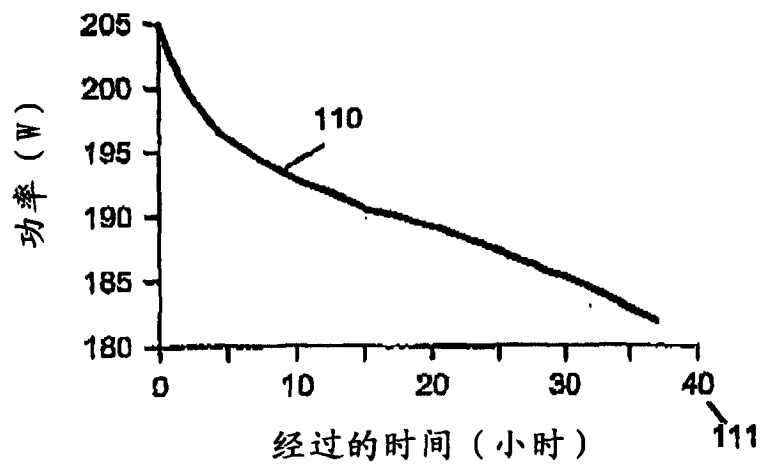


图 16

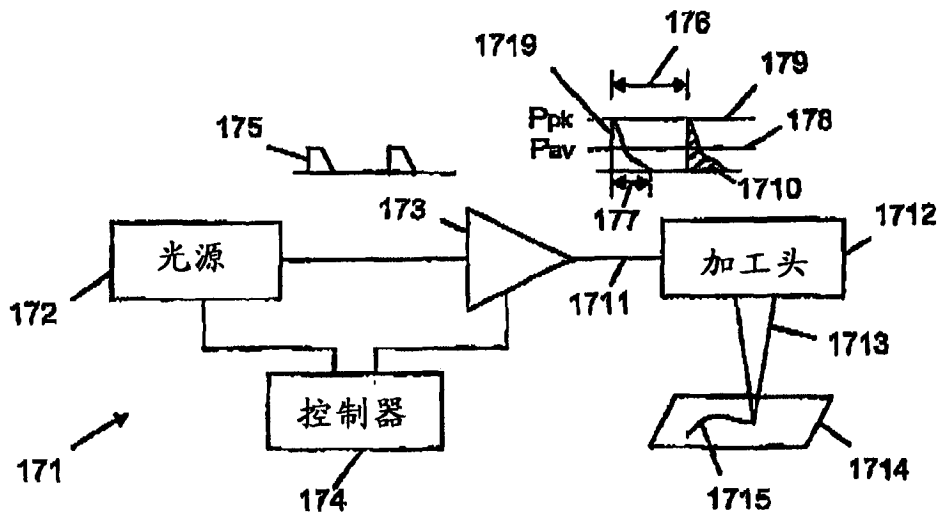


图 17

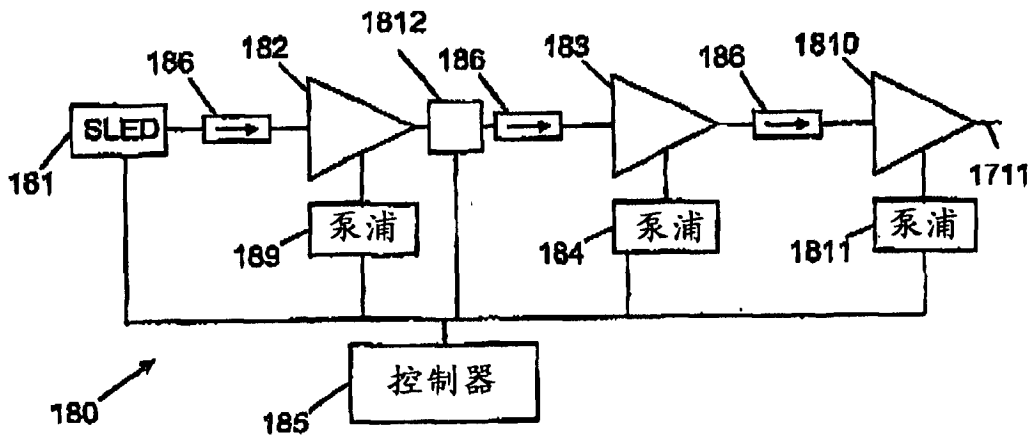


图 18

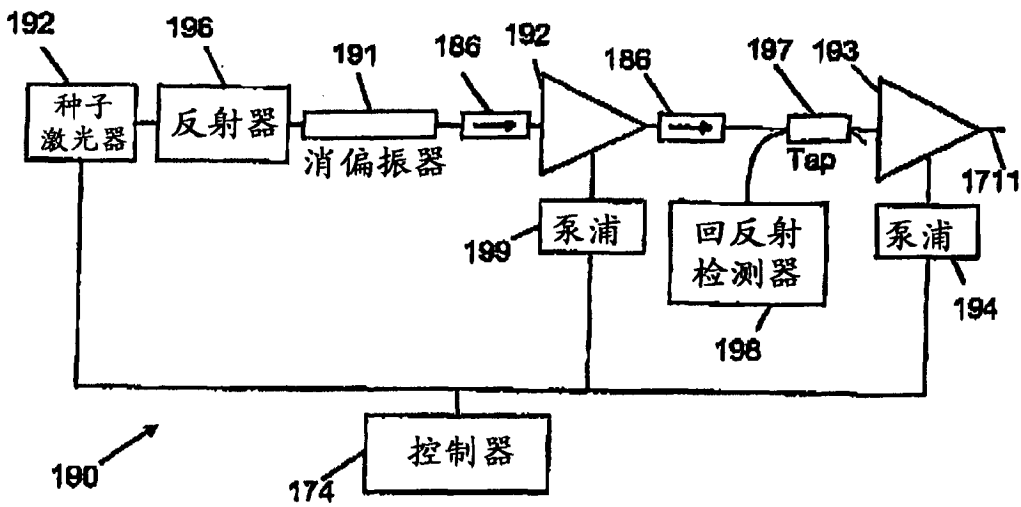


图 19

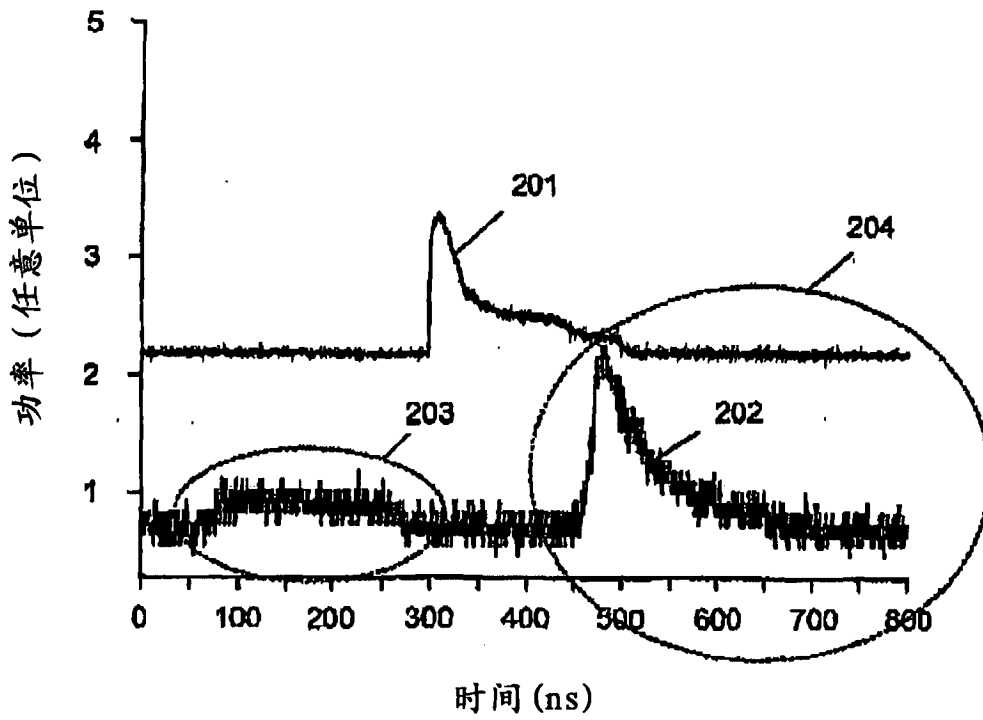


图 20

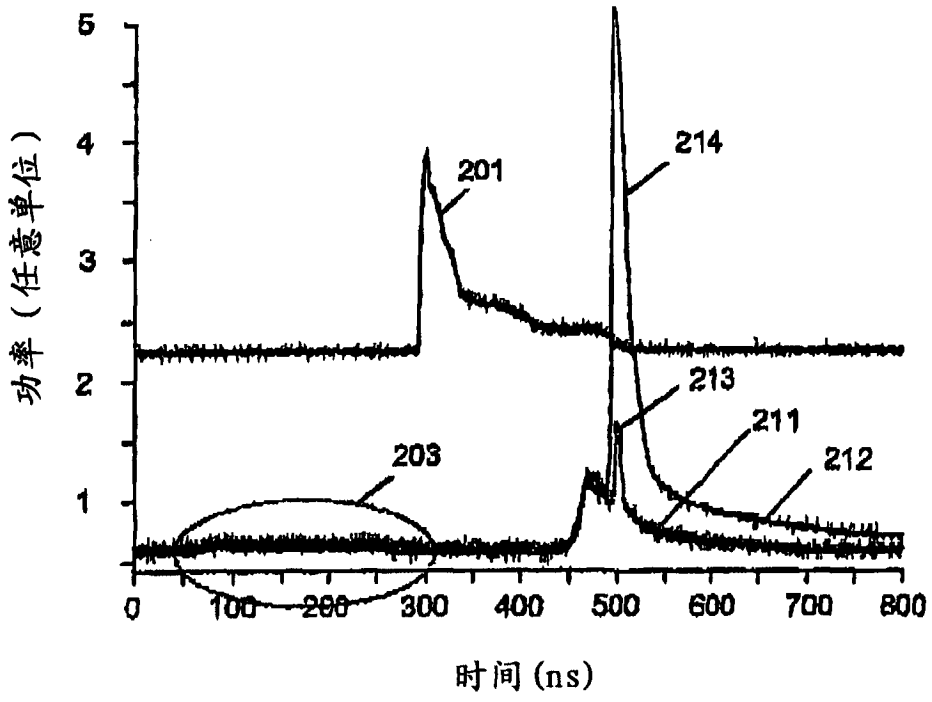


图 21

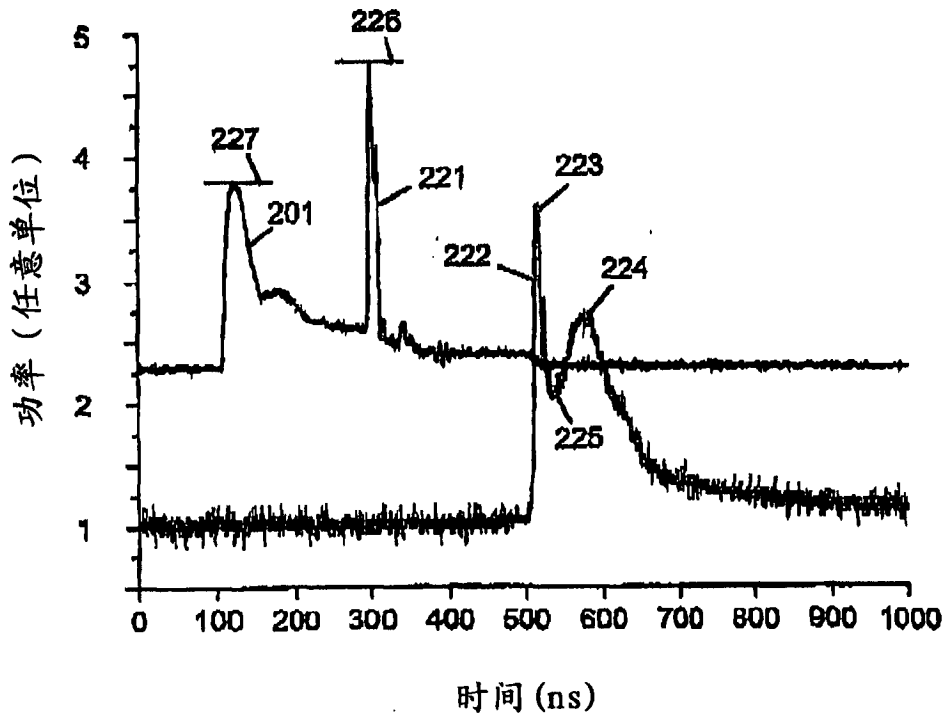


图 22

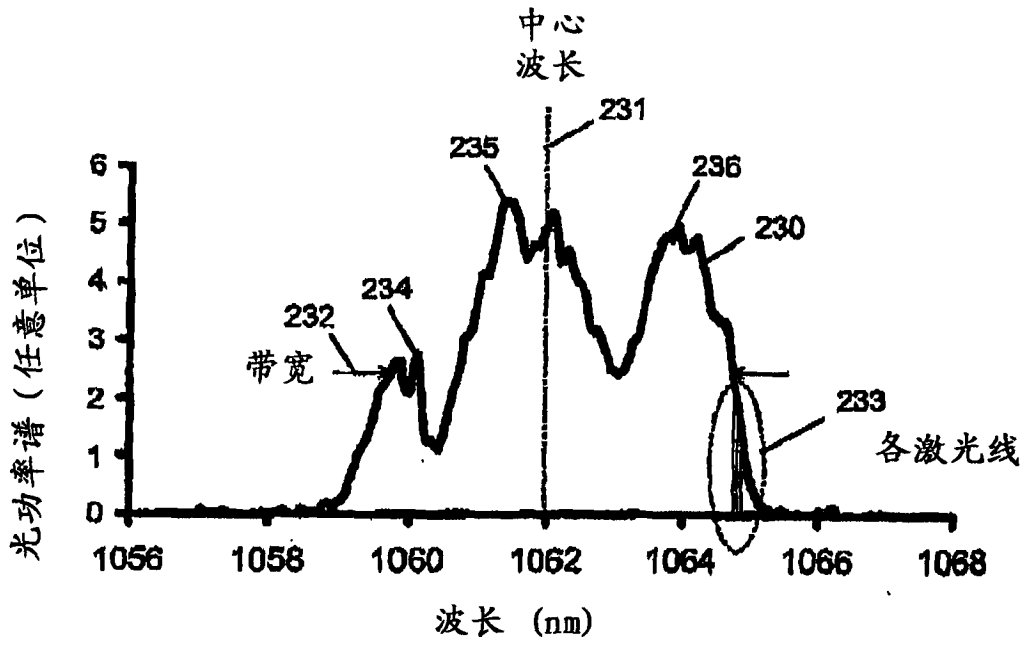


图 23

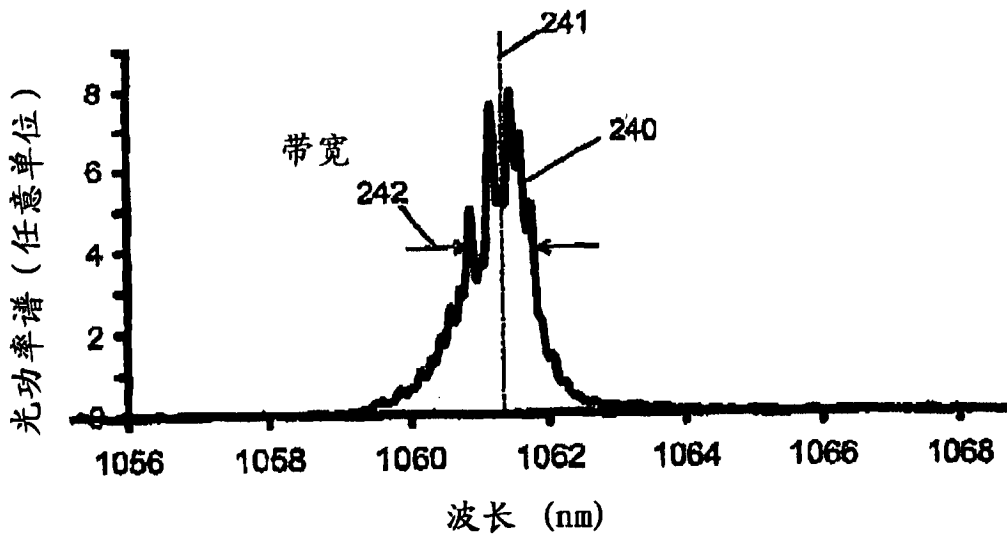


图 24

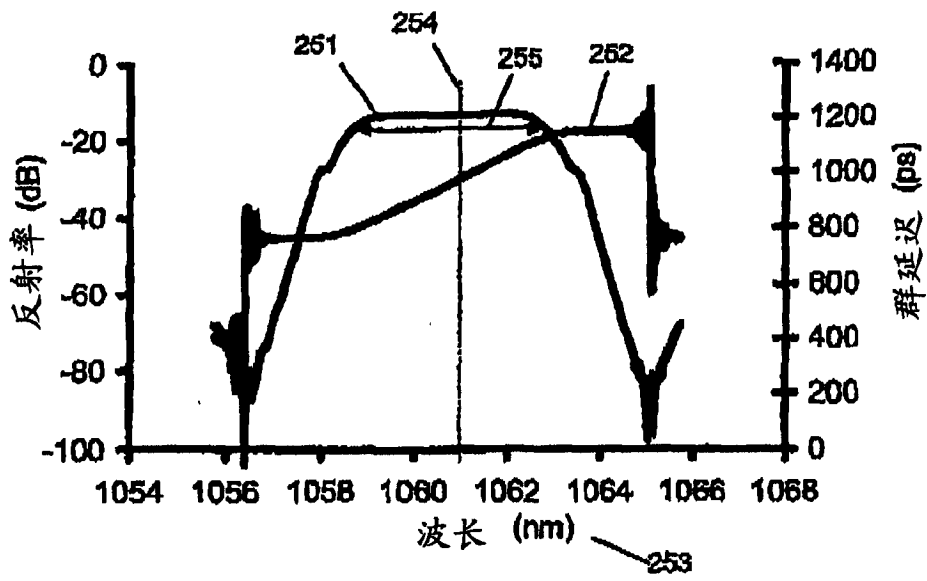


图 25

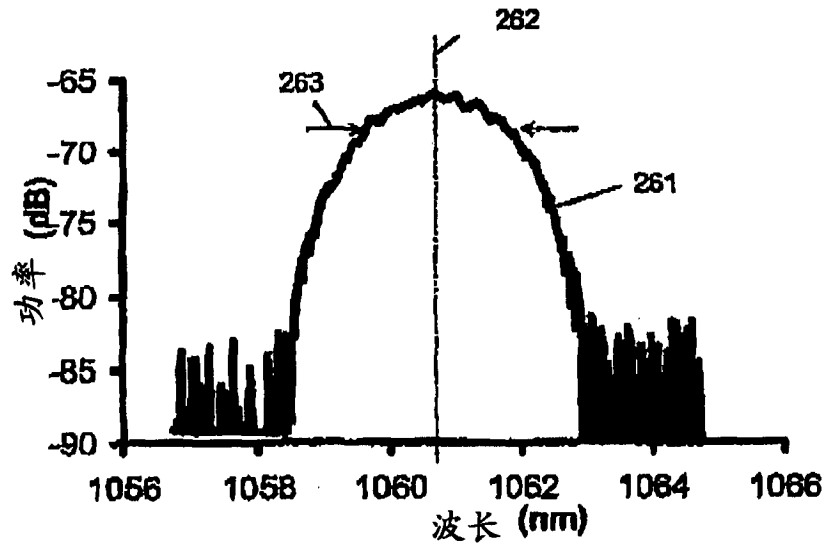


图 26

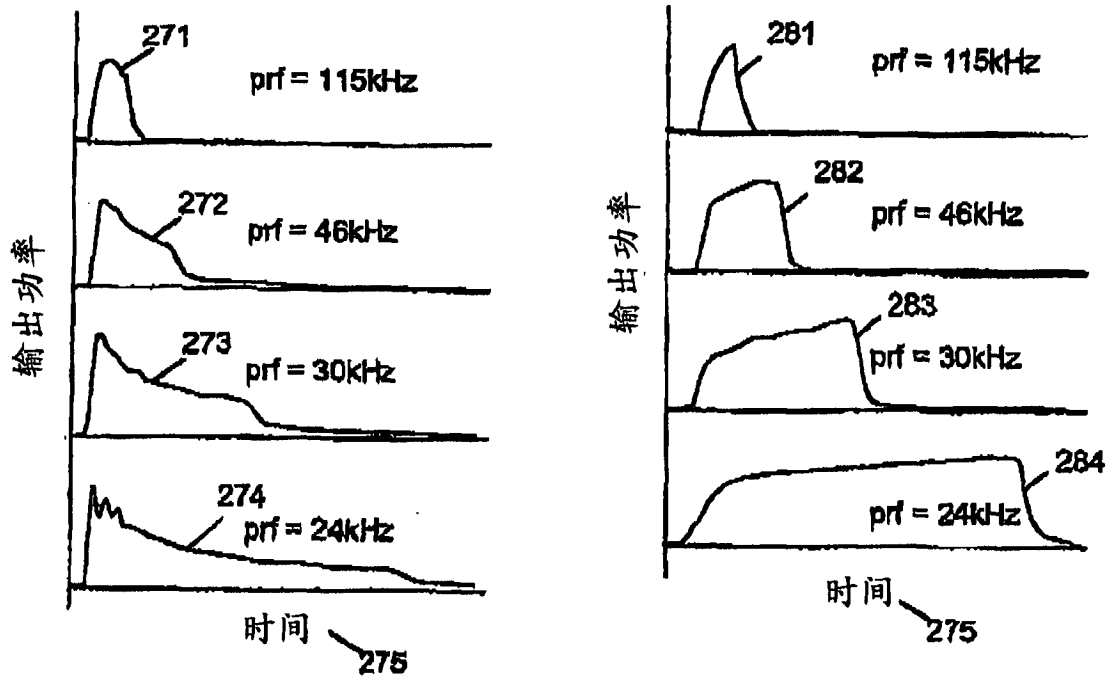


图 27

图 28

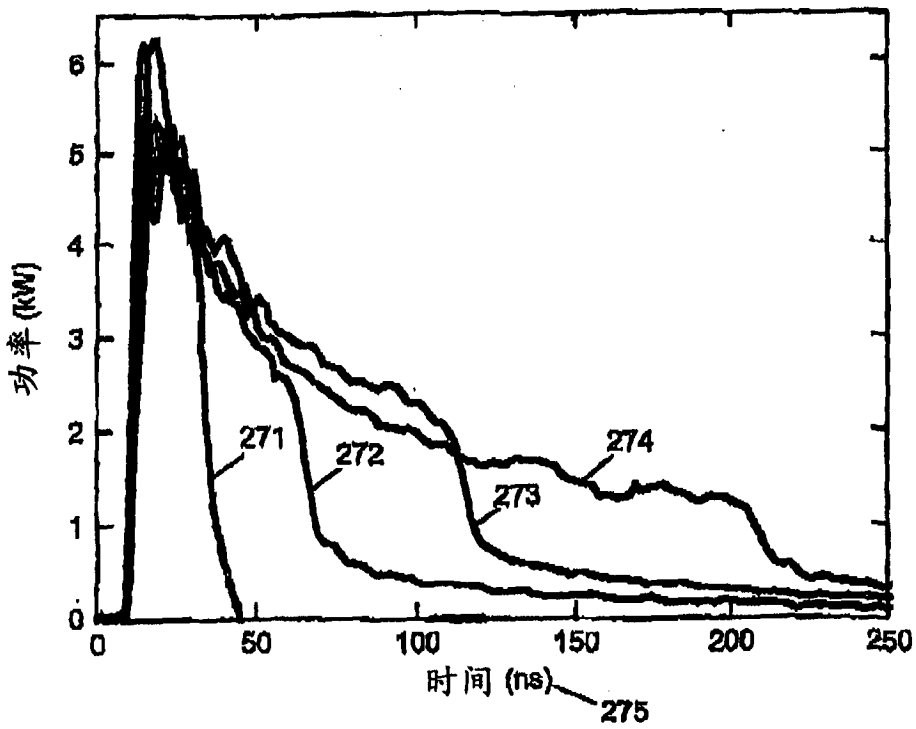


图 29

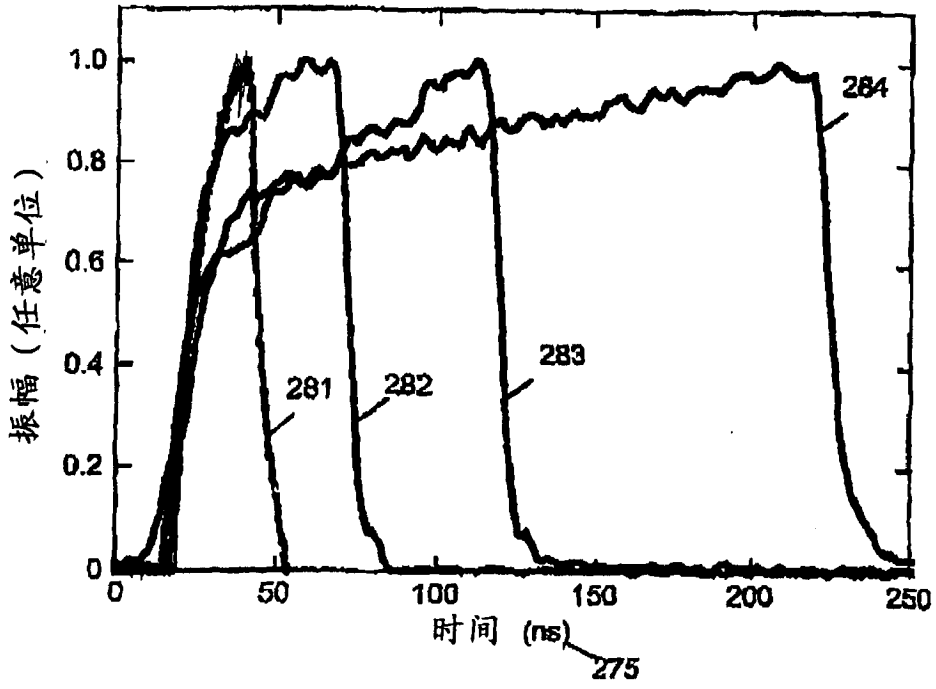


图 30

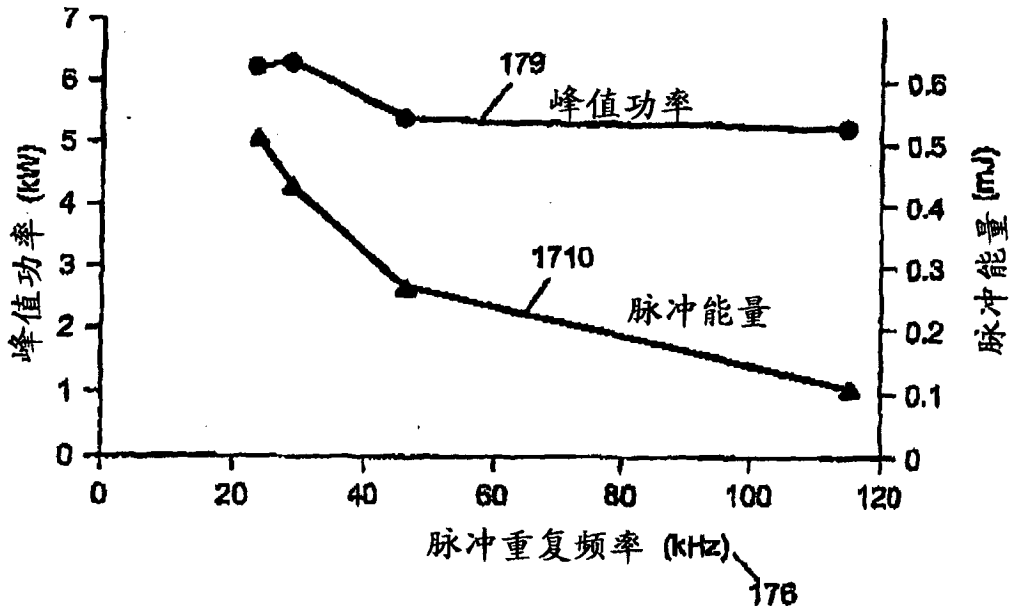


图 31

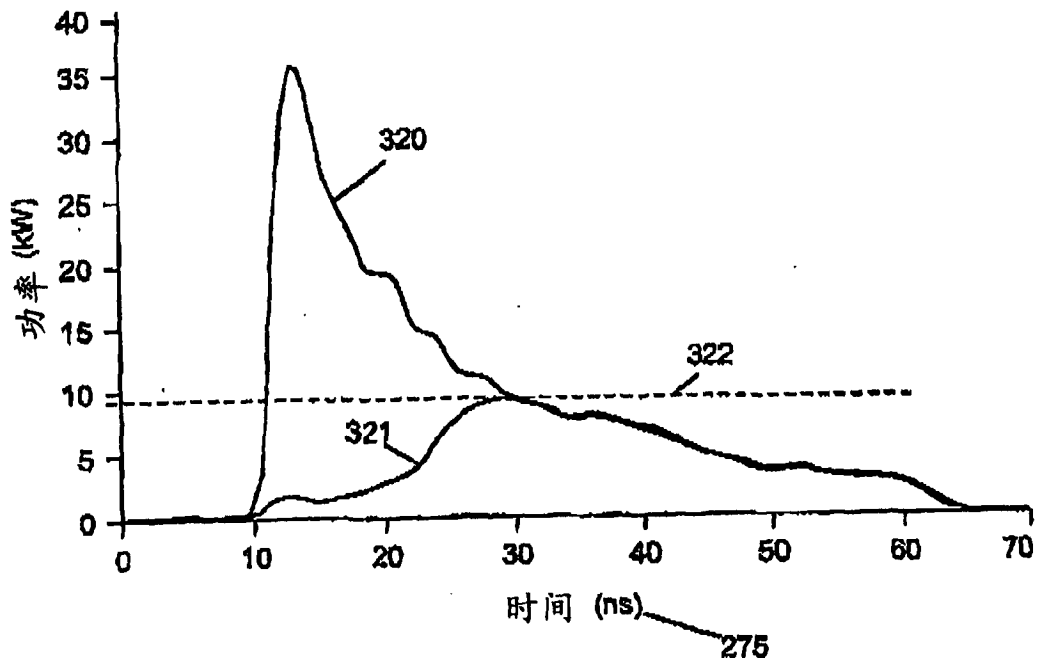


图 32

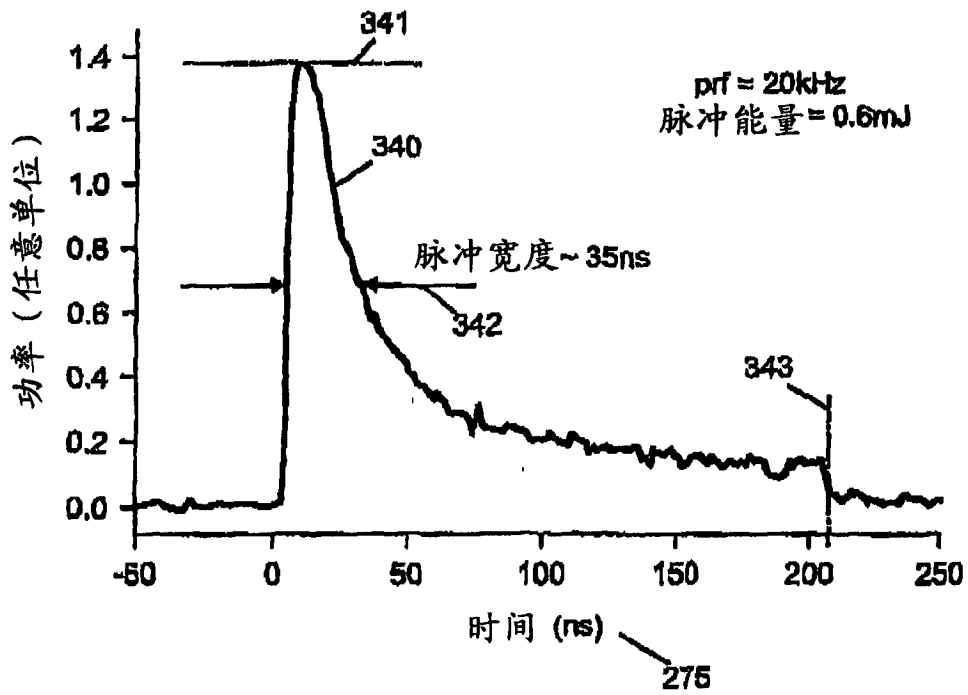


图 34

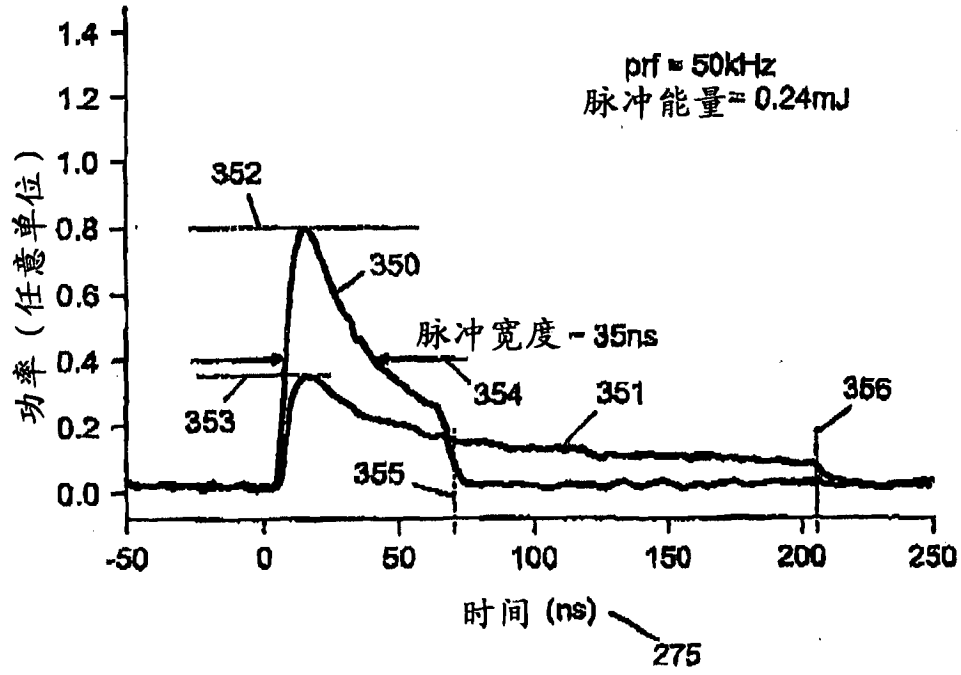


图 35

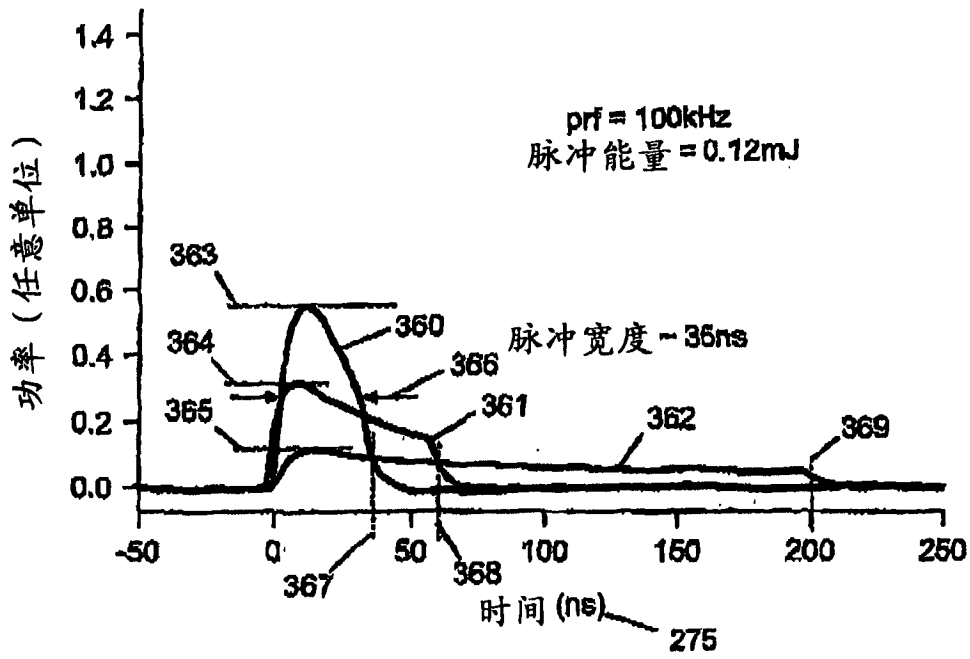


图 36

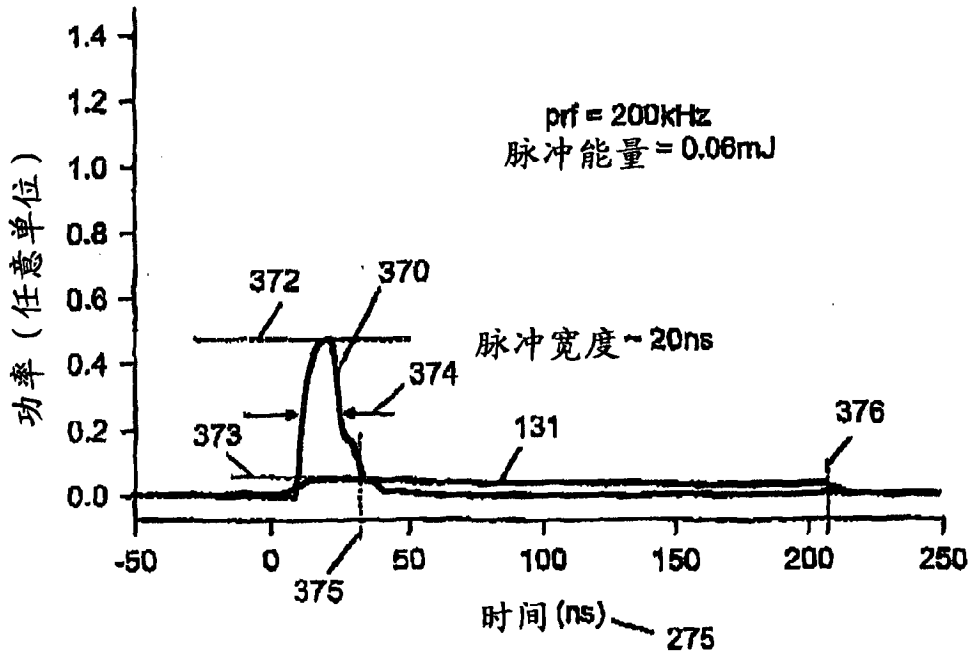


图 37

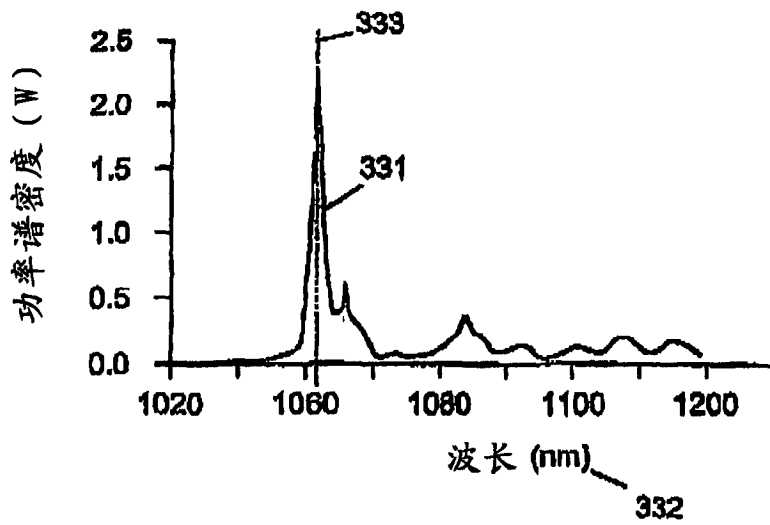


图 33

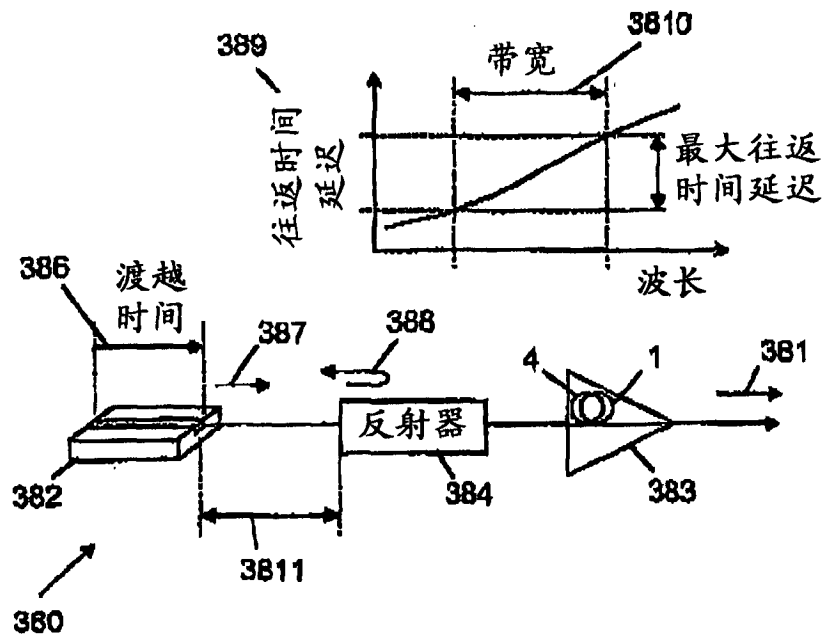


图 38