



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 105981237 A

(43)申请公布日 2016.09.28

(21)申请号 201580005593.3

(22)申请日 2015.01.20

(30)优先权数据

61/929,989 2014.01.22 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2016.07.22

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/IL2015/050068 2015.01.20

(87)PCT国际申请的公布数据

W02015/111046 EN 2015.07.30

(71)申请人 在本-古里安大学的B.G.内盖夫科

技与应用有限公司

地址 以色列贝尔谢巴

(72)发明人 阿米尔·A·伊沙亚

鲍里斯·罗森斯坦-莱文

(74)专利代理机构 北京海虹嘉诚知识产权代理

有限公司 11129

代理人 高丽萍

(51)Int.Cl.

H01S 3/067(2006.01)

H01S 3/094(2006.01)

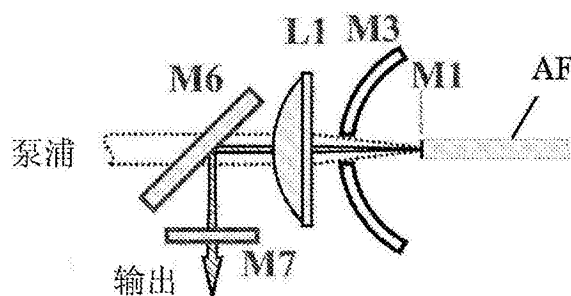
权利要求书2页 说明书7页 附图10页

(54)发明名称

泵浦光多次通过的基于光纤的激光器和放大器

(57)摘要

本发明涉及一种用于构建包括极短光纤(一般数十厘米长或以下,例如5cm到30cm)的激光振荡器或激光放大器的光学构造。为了克服由于光纤非常短的长度所造成的吸收限制,本发明在泵浦光约束上采用了泵浦光多次通过的设计。这种设计基于激光束和泵浦光束之间小的角度重叠。本发明泵浦光多次通过的方法产生了具有几个ns脉宽的高效率的激光振荡器和放大器,其具有与现有技术的固体激光器相当的高平均和峰值功率输出。



1. 一种激光振荡器或放大器,包括:作为激射/放大介质的短长度有源光纤;前侧光学构造;以及后侧光学构造;

其中前侧光学构造和后侧光学构造都包括使得泵浦光束来回多次穿过有源光纤的光学元件。

2. 根据权利要求1所述的激光振荡器或放大器,其特征在于,有源光纤具有高的包层数值孔径(NA)与芯层NA的比值。

3. 根据权利要求1所述的激光振荡器或放大器,其特征在于,有源光纤选择以下之一:光子晶体光纤(PCF),空气-包层光纤,或者特定双包层光纤。

4. 根据权利要求1所述的激光振荡器或放大器,其特征在于,有源光纤的长度在5cm到30cm的范围内。

5. 根据权利要求1所述的激光振荡器或放大器,其特征在于,前侧光学构造包括从下面组中选择一个光学元件组:

- a. 一前透镜,一前凹球面镜,以及一可选的位于有源光纤前端面上的部分反射膜层;
- b. 一个部分反射的输出耦合器,一前透镜,一前凹球面镜,以及一可选的位于有源光纤前端面上的增透膜层;
- c. 一分色镜,一前透镜,一前凹球面镜,以及一可选的位于有源光纤前端面上的部分反射膜层;
- d. 一个部分反射的输出耦合器,一分色镜,一前透镜,一前凹球面镜,以及一可选的位于有源光纤前端面上的增透膜层。

6. 根据权利要求1所述的激光振荡器,其特征在于,后侧光学构造包括从下面组中选择一个光学元件组:

- a. 一位于有源光纤后端面上的分色镜膜层,一后透镜和一高反射率后反射镜;
- b. 一可选的位于有源光纤后端面上的增透膜层,一后凹球面镜,一后透镜以及一高反射率的后反射镜;
- c. 一位于有源光纤后端面上的分色镜膜层和一高反射率的后反射镜;以及
- d. 一位于有源光纤后端面上的高反射率膜层。

7. 根据权利要求1所述的放大器,其特征在于,后侧光学构造包括从下面组中选择一个光学元件组:

- a. 一位于有源光纤后端面上的分色镜膜层和一后透镜;以及
- b. 一可选的位于有源光纤后端面上的增透膜层,一后凹球面镜和一后透镜。

8. 根据权利要求6所述的激光振荡器,其特征在于,组“a”和组“b”包括脉冲激光构造中的Q开关。

9. 根据权利要求5所述的激光振荡器/放大器,其特征在于,组“a”和组“b”中的前端被构造为离轴泵浦,其中泵浦光束通过传递光纤从泵浦源传输到有源光纤的前端面,泵浦光在有源光纤的泵浦包层的数值孔径内被耦合进入有源光纤。

10. 根据权利要求5所述的激光振荡器/放大器,其特征在于,组“c”和组“d”中的前端被构造为同轴泵浦,其中泵浦光束通过自由空间由泵浦源传输到有源光纤的前端面。

11. 根据权利要求9所述的激光振荡器/放大器,其特征在于,前凹球面镜具有用于激光束的中心开孔和用于泵浦光束的偏心开孔。

12. 根据权利要求10所述的激光振荡器/放大器, 其特征在于, 在包括后凹球面镜的构造中, 后凹球面镜具有用于激光束和泵浦光束的中心开孔。

13. 一种构建高效的多次通过的短光纤激光振荡器的方法, 该方法包括: 将短长度有源光纤定位在从权利要求5中的前端的一组中选择一个前端和从权利要求6中的后端的一组中选择一个后端之间的空间内。

14. 根据权利要求13所述的方法, 其特征在于, 有源光纤具有高的包层数值孔径(NA)与芯层NA的比值。

15. 根据权利要求13所述的方法, 其特征在于, 有源光纤选择以下之一: 光子晶体光纤(PCF), 空气-包层光纤, 或者特定双包层光纤。

16. 根据权利要求13所述的方法, 其特征在于, 有源光纤的长度在5cm到30cm的范围内。

17. 一种用于构建高效的多次通过的短光纤激光放大器的方法, 该方法包括: 将短长度的有源光纤定位在从权利要求5中的前端的一组中选择一个前端和从权利要求6中的后端的一组中选择一个后端之间的空间内。

18. 根据权利要求17所述的方法, 其特征在于, 有源光纤具有高的包层数值孔径(NA)与芯层NA的比值。

19. 根据权利要求17所述的方法, 其特征在于, 有源光纤选择以下之一: 光子晶体光纤(PCF), 空气-包层光纤, 或者特定双包层光纤。

20. 根据权利要求17所述的方法, 其特征在于, 有源光纤的长度在5cm到30cm的范围内。

泵浦光多次通过的基于光纤的激光器和放大器

技术领域

[0001] 本发明涉及激光器及激光放大器领域。特别的,本发明涉及一种光学构造领域,该光学构造用于光纤激光振荡器和放大器。

背景技术

[0002] 此处所参考的出版物以及其他参考资料在下文中以数字序列的方式被标引出来,并且在权利要求书之前的附加参考文献中分别归类列出。

[0003] 目前,为了获得具有良好光束质量的、具有高峰值与高平均功率的几个纳秒的脉冲,人们一般使用主振荡功率放大(MOPA)光纤系统或固体激光器。这样做的原因在于在纳秒级的脉冲范围内,最短脉冲宽度的限制来自于光子在谐振腔内的飞行时间。相应地,为了达到1纳秒的脉冲,谐振腔应短于20cm。但是,考虑到在这种特定的腔中应当包括活性介质以及光学组件(例如准直和聚焦光学元件,偏振光学元件和Q开关),这就迫使有源光纤的最大长度达到约10cm长度。并且,人们熟知的是,放大的自发辐射(ASE)增益和几乎所有的非线性效应都强烈的依赖于光-物质相互作用的长度。相应地,光纤长度越短,ASE增益和产生的非线性效应越小。但是,设计这样一个系统是一个严峻的挑战,原因在于泵浦光的吸收随着光纤长度的减少而呈指数降低,这会导致有源光纤中低的泵浦光吸收率。这样,使用短的光纤作为增益介质将会导致效率非常差的激光器运行。

[0004] 因此,本发明的目的就是提供一种基于非常短的有源光纤(通常数十厘米或以下)的激光源,该激光源发射的脉冲脉宽为几个纳秒并且具有高峰值和平均功率。

[0005] 本发明进一步的目的和优点随着描述的进行将变得明显。

发明内容

[0006] 本发明的第一方面是一种激光振荡器或放大器,包括:作为激射/放大介质的短长度有源光纤,前侧光学构造,以及后侧光学构造;前侧光学构造和后侧光学构造都包括使得泵浦光束来回多次穿过有源光纤的光学元件。

[0007] 本发明激光振荡器或放大器的实施例中,有源光纤具有高的包层数值孔径(NA)与芯层NA的比值。本发明激光振荡器或放大器的实施例中,有源光纤选择以下之一:光子晶体光纤(PCF),空气-包层光纤,或者特定双包层光纤。本发明激光振荡器或放大器的实施例中,有源光纤的长度在5cm到30cm的范围内。

[0008] 本发明激光振荡器或放大器的实施例中,前侧光学构造包括从下面组中选择一个光学元件组:

[0009] a. 一前透镜,一前凹球面镜,以及一可选的位于有源光纤前端面上的部分反射膜层;

[0010] b. 一个部分反射的输出耦合器,一前透镜,一前凹球面镜,以及一可选的位于有源光纤前端面上的增透膜层;

[0011] c. 一分色镜,一前透镜,一前凹球面镜,以及一可选的位于有源光纤前端面上的部

分反射膜层；

[0012] d. 一个部分反射的输出耦合器，一分色镜，一前透镜，一前凹球面镜，以及一可选的位于有源光纤前端面上的增透膜层。

[0013] 本发明激光振荡器或放大器的实施例中，组“a”和组“b”中的前端被构造为离轴泵浦，其中泵浦光束通过传递光纤从泵浦源传输到有源光纤的前端面，泵浦光在有源光纤的泵浦包层的数值孔径内被耦合进入有源光纤。在这些实施例中，前凹球面镜具有用于激光束的中心开孔和用于泵浦光束的偏心开孔。

[0014] 本发明激光振荡器或放大器的另一实施例中，其中组“c”和组“d”中的前端被构造为同轴泵浦，其中泵浦光束通过自由空间由泵浦源传输到有源光纤的前端面。在包括后凹球面镜实施例中，后凹球面镜具有用于激光束和泵浦光束的中心开孔。

[0015] 本发明激光振荡器的实施例中，后侧光学构造包括从下面组中选择一个光学元件组：

[0016] a. 位于有源光纤后端面上的一分色镜膜层，一后透镜和一高反射率的后反射镜；

[0017] b. 一可选的位于有源光纤后端面上的增透膜层，一后凹球面镜，一后透镜以及一高反射率的后反射镜；

[0018] c. 位于有源光纤后端面上的一分色镜膜层和一高反射率的后反射镜；以及

[0019] d. 位于有源光纤后端面上的一高反射率膜层。

[0020] 本发明放大器的实施例中，后侧光学构造包括从下面组中选择一个光学元件组：

[0021] a. 位于有源光纤后端面上的一分色镜膜层和一后透镜；以及

[0022] b. 一可选的位于有源光纤后端面上的增透膜层，一后凹球面镜和一后透镜。

[0023] 本发明激光振荡器的实施例中，在组“a”和组“b”包括脉冲激光器构造中的Q开关。

[0024] 本发明的第二方面是一种构建高效的多次通过的短光纤激光振荡器的方法，该方法包括：将短长度有源光纤定位在从本发明第一方面的前端的组中选择一个前端和从本发明第一方面的后端的组中选择一个后端之间的空间内。

[0025] 本发明第二方面的方法的实施例中，其中有源光纤具有高的包层数值孔径(NA)与芯层NA的比值。本发明第二方面的方法的实施例中，有源光纤选择以下之一：光子晶体光纤(PCF)，空气-包层光纤，或者特定双包层光纤。本发明第二方面的方法的实施例中，有源光纤的长度在5cm到30cm的范围内。

[0026] 本发明第三方面是一种用于构建高效的多次通过的短光纤激光放大器的方法，该方法包括：将短长度的有源光纤定位在从本发明第一方面的前端的组中选择一个前端和从本发明第一方面的后端的组中选择一个后端之间的空间内。本发明第三方面的方法的实施例中，其中有源光纤具有高的包层数值孔径(NA)与芯层NA的比值。本发明第三方面的方法的实施例中，有源光纤选择以下之一：光子晶体光纤(PCF)，空气-包层光纤，或者特定双包层光纤。本发明第三方面的方法的实施例中，有源光纤的长度在5cm到30cm的范围内。

[0027] 通过下面参考附图的基础上对于此处实施例非限制性解释的说明中，对于本发明所有上述的以及其他的特点和优点将会有进一步的理解。

附图说明

[0028] 一图1A简要示出了根据本发明的不具有外部输出耦合器的离轴泵浦的短光纤的脉冲或连续激光振荡器或放大器的前侧的实施例；

[0029] 一图1B简要示出了根据本发明的具有外部输出耦合器的离轴泵浦的短光纤的脉冲或连续激光振荡器的前侧的实施例；

[0030] 一图1C简要示出了根据本发明的不具有外部输出耦合器的离轴直接泵浦的短光纤的脉冲或连续激光振荡器或放大器的前侧的实施例；

[0031] 一图1D简要示出了根据本发明的具有外部输出耦合器的离轴直接泵浦的短光纤的脉冲或连续激光振荡器的前侧的实施例；

[0032] 一图1E简要示出了根据本发明的不具有外部输出耦合器(M7)的同轴泵浦的短光纤的脉冲或连续激光振荡器或放大器的前侧的实施例；

[0033] 一图1F简要示出了根据本发明的具有外部输出耦合器(M7)的同轴泵浦的短光纤的脉冲或连续激光振荡器的前侧的实施例；

[0034] 一图2A简要示出了根据本发明的具有位于光纤上的分色后膜层(M2)的短光纤脉冲(具有Q开关)或连续(不具有Q开关)激光振荡器的后侧的实施例；

[0035] 一图2B简要示出了根据本发明的具有可选的位于光纤上的增透后膜层(M2)的短光纤脉冲(具有Q开关)或连续(不具有Q开关)激光振荡器的后侧的实施例；

[0036] 一图2C简要示出了根据本发明的具有位于光纤上的分色后膜层(M2)的短光纤脉冲或连续放大器的后侧的实施例；

[0037] 一图2D简要示出了根据本发明的具有可选的位于光纤上的增透后膜层(M2)的短光纤脉冲或连续放大器的后侧的实施例；

[0038] 一图2E简要示出了根据本发明的具有位于光纤上的增透或分色后膜层(M2)并对接耦合有高反射率的后反射镜(M5)的短光纤连续激光振荡器的后侧的实施例；

[0039] 一图2F简要示出了根据本发明具有位于光纤上的高反射率后膜层(M2)的短光纤连续激光振荡器的后侧的实施例；

[0040] 一图3A简要示出了用于根据本发明图1A-D的离轴泵浦构造的前凹球面镜(M3)；

[0041] 一图3B简要示出了用于图1E-F的同轴泵浦构造的前凹球面镜(M3)和用于图2B和2D构造的后凹球面镜(M4)；

[0042] 一图4简要示出了离轴直接泵浦技术的实施例；

[0043] 一图5示出了计算出的泵浦吸收率作为泵浦光通过次数的函数,该计算是针对具有理想的和有瑕疵的凹球面镜的10cm长的有源光子晶体光纤(PCF)进行的；

[0044] 一图6示出了利用10cm长的有源PCF在不同反射率的输出耦合器下测量出的CW输出功率作为泵浦功率的函数(虚线是线性拟合):正方形是50%的反射率,小圆点是40%的反射率,顶点向上的三角形是30%的反射率,顶点向下的是20%的反射率。菱形表示的是输出耦合器50%的反射率下单次通过泵浦光的结果。对应于上部X轴的交叉圆,表示的是45W泵浦功率下的输出功率作为输出耦合器反射率的函数。在这种情况下,点线表示的是大体趋势；

[0045] 一图7示出了利用10cm长有源PCF在不同重复频率下测量出的脉冲Q开关的平均输出功率作为泵浦功率的函数；以及

[0046] 一图8示出了利用10cm长有源PCF在不同重复频率下测量出的脉宽作为提取脉冲能

量的函数;插入的方框图示出了脉冲在最高脉冲能量处的时间波形。

[0047] 发明实施例的详细说明

[0048] 本发明是一种用于构造包括非常短的光纤(一般数十厘米长或以下,例如5-30cm)的激光振荡器或激光放大器的光学构造。为了克服由于非常短的光纤长度所带来的泵浦光吸收限制(到目前为止,最大的商业上可获得的吸收率为PCF的976nm处的30dB/m),本发明对泵浦光的约束采用了泵浦光多次通过的方案。这种方案基于激光光束与泵浦光束之间的小角度重叠,这是空气包层和其他特定双包层光纤中的通常情况。本发明泵浦光多次通过的方法,相对于现有技术的光纤激光器来说,使得具有几个纳秒脉宽的光纤功率振荡激光器具有高平均和峰值功率输出,以及相当的高效率。

[0049] 大体上来说,任意的激光振荡器和放大器都可分为前侧(输出侧)和后侧。以光纤为基础的激光器或放大器,这两个侧可独立地根据具体要求来选择。图1A-F分别示出了本发明短光纤激光振荡器的前侧的六个基本实施例,并且图1A,1C和1E分别示出了本发明短光纤放大器的基本实施例。本发明后侧的六个基本实施例中,用于短光纤激光振荡器的分别在图2A-B和2E-F中示出,而用于短光纤放大器的分别在图2C-D示出。期望的激光器(脉冲的或连续的)或放大器构造可包括这些前侧和后侧实施例的任意合适组合。

[0050] 具有这些前侧和后侧实施例组合的激光振荡器或放大器包括短的(一般数十厘米长度或以下)有源光学PCF或其他空气包层或合适的双包层光纤;后透镜(L2),其将激光束聚焦进入有源光纤(AF)并当其从有源光纤(仅在激光器的构造中)的后端面出射的时候对其准直;位于有源光纤(AF)前端面上的膜层(M1),其可以是激光器构造中的部分反射输出耦合膜层(图1A,1C和1E),或者是激光器构造(图1B,1D,和1F)或放大器构造(图1A,1C,和1E)中的可选增透膜;位于有源光纤(AF)后端面上的膜层(M2),其可以是对于激光波长范围具有高透并对泵浦波长范围具有高反的分色镜(图2A,2C,和2E),或者可选的增透膜(图2B和2D),或者高反射膜(图2F);一前凹球面镜(M3),其将泵浦光反射回光纤,并且具有一个中心开孔的同轴构造(图1E-F)以使得激光光束和泵浦光束无损耗的通过它传输,或者是离轴的构造,一个使得激光光束无损耗传输的中心开孔和一个使得泵浦光束无损耗通过它传输的偏心开孔(图1A-D);一后凹球面镜(M4),其将泵浦光反射回光纤,并具有一个中心开孔以使得激光光束通过它无损耗的传输(图2B和2D),以及用于将激光光束和泵浦光束分开的同轴泵浦构造的分色镜(如图1E-F中示出的M6)。

[0051] 对于具有激光谐振器构造(图1A-F与图2A-B和2E的组合)来说,谐振器包括:

[0052] 一平面的高反射率的后反射镜(M5),其或者是宽带反射镜,或者是窄带体布拉格光栅(VBG)反射镜(后者的配置可获得窄带激光运行);

[0053] 一输出耦合器,其或者由可选的位于光纤端部的部分反射膜层(如图1A,1C和1E中示出的M1)来实现,或者由自由空间平面镜(如图1B,1D和1F中示出的M7)来实现;

[0054] 一仅对于外部输出耦合器M7和/或共轴泵浦构造来说前透镜是必须的,当激光束从有源光纤的前端面射出的时候对其进行准直并且当其从外部输出耦合器M7反射回到有源光纤时对其进行聚焦,对于同轴泵浦构造来说,其将泵浦光束聚焦进入有源光纤;以及

[0055] 一脉冲激光器构造(图2A和2B)情况下的Q开关(Q-SW)或者连续激光源(图2A-2B和2E-2F)情况下无Q-SW。

[0056] 具有离轴的非直接泵浦构造的泵浦光束的准直和聚焦透镜(分别为L3和L4),如图

1A和1B示出的,应当被设计为适配于有源光纤的泵浦包层(也即泵浦包层的数值孔径(NA))的接收锥形。图1A和1B示出的前端设置结构以前已经被[2,4]中发明的发明人进行了描述。最终,凹面镜M3和M4被用于将泵浦光束反射回光纤。这就是泵浦光多次通过的构造。因此,短的有源光纤中的泵浦吸收率极大地增加了,使得短光纤激光器的效率增加到了现有光纤激光器的典型值(>60%)[1]。

[0057] 图1A-B和图1C-D示出的离轴泵浦构造之间的主要区别(除了上述的区别之外)在于泵浦光束耦合设计。图1A-B中的泵浦光束的耦合设计基于透镜L4在泵浦包层的NA范围内对于泵浦光束的聚焦[2,3,4],而图1C-D则是基于在泵浦包层的NA范围内借助空气间隙而非光学器件将泵浦光的传递光纤PDF输出的泵浦光束耦合进入合适的有源光纤,如图4示出的。

[0058] 本发明的泵浦光多次通过的设计基本上基于成对的凹球面镜(图1A-F中的M3与图2B和2D中的M4的组合),或者基于前凹球面镜(图1A-D中的M3与图2A,2C,2E和2F中的后膜层或对接耦合的反射镜的组合)。在这种方式中,有源光纤的端部设置在反射镜的曲率中心。因此,泵浦光束以0度入射在这些凹面镜上并被反射回光纤。从图3A中可以看到,后凹球面镜(M4)具有中心开孔以使得激光束无损耗的通过它传输。中心开孔的半径由凹面反射镜与光纤端部之间的距离决定,而该距离依赖于凹面镜的曲率半径。另外一方面,前凹球面镜(M3)具有不同设置的开孔。对于同轴构造来说,只有一个中心开孔,如图3A示出的,该中心开孔适于无损耗的传输激光束和无损耗的从泵浦模块传输泵浦光束。但是,对于离轴构造来说,前反射镜M3具有两个开孔,如图3B示出的。中心的开孔用于激光束,而偏心的开孔用于泵浦光束。

[0059] 高效的泵浦吸收率可简单的导致短光纤激光器或放大器的高效工作。发明人通过假设两种情况计算了泵浦光通过次数对总泵浦吸收率的影响:一种情况是理想的凹面镜(100%反射率膜层,其中被反射的泵浦光与入射光具有精确相同的光路径),另一种情况是有瑕疵的凹面镜(入射泵浦光的95%返回到有源光纤的泵浦包层,而另外的5%则由于有瑕疵的反射镜膜层和表面而损失掉)。关于单位长度的泵浦吸收率,这两种情况中的每一种都具有两种子情况:30dB/m的吸收率,其是由制造商指定的在976nm处的总量,以及25dB/m吸收率,其是计算的泵浦模块的光谱与活性Yb离子的吸收截面之间的重叠积分。对于该计算,图5示出的图表对计算结果进行概括总结,其中计算是基于:采用图1A-1D示出的前侧实施例与任意后侧实施例的离轴的泵浦构造,10cm长的PCF,光纤端部的菲涅耳损耗,以及由前凹面镜内的侧旁泵浦光开孔所导致的最大损耗。

[0060] 根据这些计算,在所有的情况以及子情况下,泵浦吸收率极大的依赖于泵浦光通过的次数,并且在约5-6次通过之后达到最大值。最好和最差的情况分别是具有最高的单位长度泵浦吸收率(30dB/m)的理想凹面镜和具有最低的单位长度泵浦吸收率(25dB/m)的有瑕疵的凹面镜。

[0061] 为了检测输出耦合器反射率对于激光器性能的影响,发明人搭建了实验装置,其组合了图1D示出的前侧和图2B示出的后侧,它们被构造为CW实验装置(没有图2B中示出的Q开关)。为了检测泵浦光多次通过的方案对于激光器性能的影响,发明人通过移除后和前凹面镜(M3和M4)来构造泵浦光单次通过方案作为参考,并使用了50%反射率的输出耦合器(M7)。图6示出了对于各种输出耦合器(M7)的测量的输出功率作为输入泵浦功率的函数。交

叉圆表示的是在45W的泵浦功率下输出功率作为输出耦合器反射率(上面的X轴)的函数。泵浦光单次通过的构造产生了非常低的激射性能,其斜率效率仅有15%,而泵浦光多次通过的构造将斜率效率增加了多达400%。特别地,对于输出耦合器的反射率分别为50%,40%,30%和20%来说,最高的输出功率和斜率效率分别达到了18W和49%,20W和60%,20.2W和58%,以及16W和52%。这些结果与泵浦吸收率的计算达到了很好的吻合。从这些结果可明显看出,在这些具体的操作条件下,最优的输出耦合器的反射率为30%和40%之间。

[0062] 接下来,发明人采用相同的光学设置,构建了一系列重复频率的Q开关脉冲实验装置,重复频率从5kHz到100kHz,输出耦合器(M7)的反射率为40%。这些实验装置的结果在图7中示出。对于25kHz或更低的重复频率,分别使用热探测器(平均功率被重复频率均分)测量和热释电探测器直接测量输出脉冲能量。在这两种测量之间发现了一个很不错的相关性,表明了寄生CW激射在脉冲运行情况下不会同时发生。从图7中可明显看到,在50kHz和100kHz重复频率下的性能与CW模式运行下获得的性能接近。在100kHz(正方形)和50kHz(点)的重复频率下测量到的最高平均输出功率分别是具有60%斜率效率的19.1W和具有59%斜率效率的18.1W。对于25kHz的重复频率(顶点向上的三角形)来说,斜率效率轻微的降低到了51%,最大的平均输出功率是16.7W。在更低的重复频率上,性能显著的下降,在15kHz的重复频率下(顶点向下的三角形)具有13.7W最大的输出功率,斜率效率是39%,在10kHz的重复频率下(菱形)最大的输出功率是10.7W,斜率效率是36%,在5kHz的重复频率下(星形)最大的输出功率是5.7W,斜率效率是22%。性能的下降的原因可以解释为CW泵浦的激光器下在较低重复频率情况下的增大的放大自发辐射[1]。需要说明的是,在10kHz和5kHz重复频率的情况下,由于被观察到了增益饱和,最后三个点从斜率效率的计算上移除了。

[0063] 为了计算峰值功率,使用快速光电二极管(12.5GHz带宽,上升/下降时间<25ps)测量脉宽。对于不同的重复频率,图8示出了所测量的脉宽作为脉冲能量的函数。测量的最短的脉宽为12ns,其在图8的插入方框中示出了,对应于峰值功率>100kW。正如所预期的,脉宽降低,相应的具有提取出脉冲能量的峰值功率增加了。不同重复频率的结果都位于相同的曲线上,这表明,对于给定的脉冲能量,脉宽不依赖于重复频率[1]。并且,在低重复频率和高泵浦功率下,增益在最大的1.22mJ脉冲能量时达到饱和,其接近于假定 $27 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ Yb离子掺杂浓度10cm长PCF的理论极限(1.52mJ)。光纤中脉冲的放大理论上是由所提取出的能量限制的;这种给定条件的较好的近似值由下式给出: $E_{\text{ext}} = (N_0 h \nu) / Y$,其中 N_0 是初始总的反转粒子数, h 是普朗克常数, ν 是信号频率, Y 是饱和因数,其对于三能级系统来说是2,对于四能级系统来说是1[1]。

[0064] 以前的发明人以他们的实验设置所能达到的最短脉冲是相对长的(11.2ns)。这有两个原因。首先,激光腔是相对长的(50cm),通过恰当的工程努力,腔长可缩短到20cm,其将获得更短(5ns)的脉冲。其次,脉宽通常依赖于脉冲能量和输出耦合器的反射率;由于Yb的浓度和有源介质的体积限制了最大的可提取能量,短PCF中限制的有源体积限制了所能达到的最短脉宽。

[0065] 实验结果显示,泵浦光多次通过技术在标准的商业上可获得的有源光纤上极大地增强了泵浦吸收率。发明人在CW和Q开关的运行下都展示了非常短(10cm)棒状有源PCF谐振器构造下高效激射。理论计算结果与实验结果高度相关,这表明了泵浦光多次通过设计

对于泵浦吸收率具有非常大的影响,在斜率效率上产生多达400%的增加。

[0066] 虽然本发明的实施例已经通过说明的方式进行了描述,但是可以理解的是,本发明能够以多种变化,修改以及改变的形式来实现,没有超出要求保护的范围。

[0067] 文献目录

[0068] 1.D.J.Richardson,I.Nilsson,and W.A.Clarkson,“High power fiber lasers: current status and future perspectives[Invited],”JOSA B 27(11)B63-B92(2010).

[0069] 2.B.Shulga,and A.Ishaaya,“Off-axis pumping of a photonic crystal fiber laser,”Appl.Phys.B

[0070] 101,701-704Rapid Communication(2010).

[0071] 3.B.Rosenstein,A.Shirakov,D.Belker,and A.A.Ishaaya,“Experimental characterization of an off-axis scheme for pumping high power photonic crystal fiber lasers,”submitted for publication.

[0072] 4.A.Ishaaya and B.Shulga,WO 2012/014191.

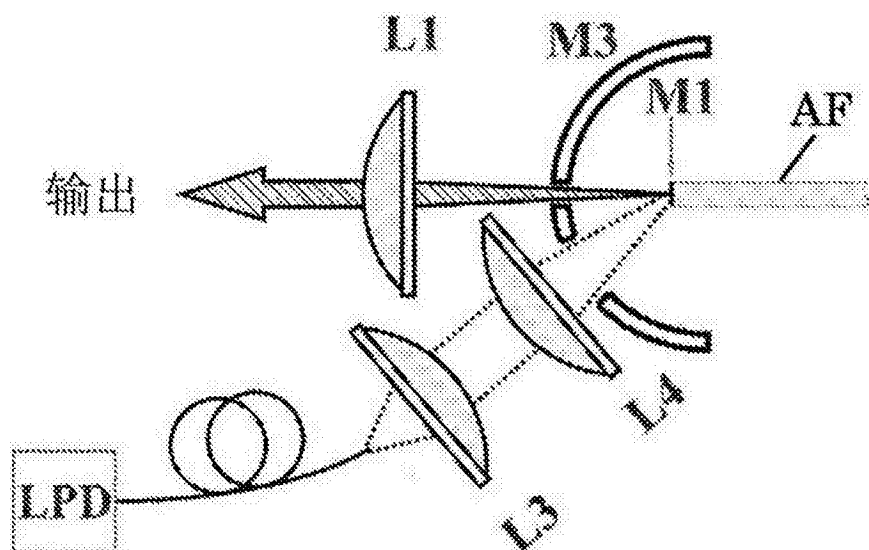


图1A现有技术

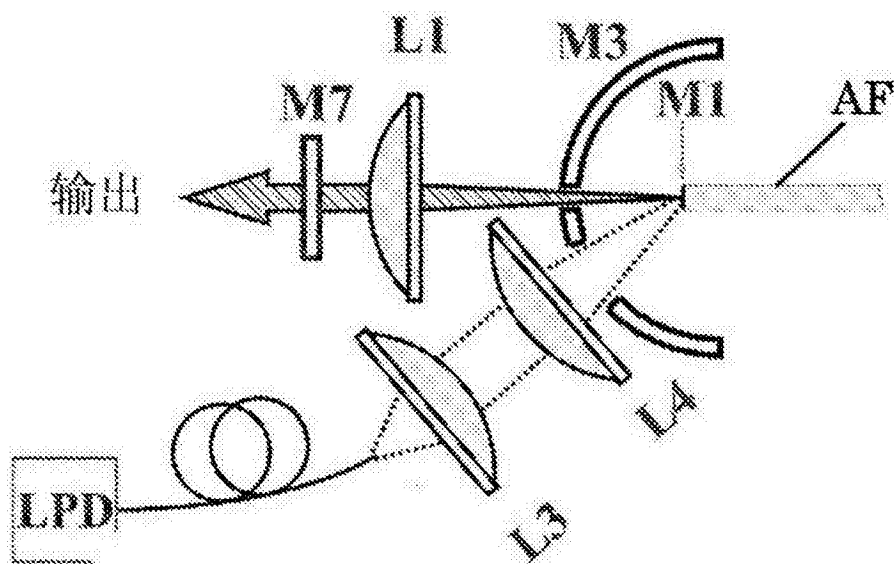


图1B现有技术

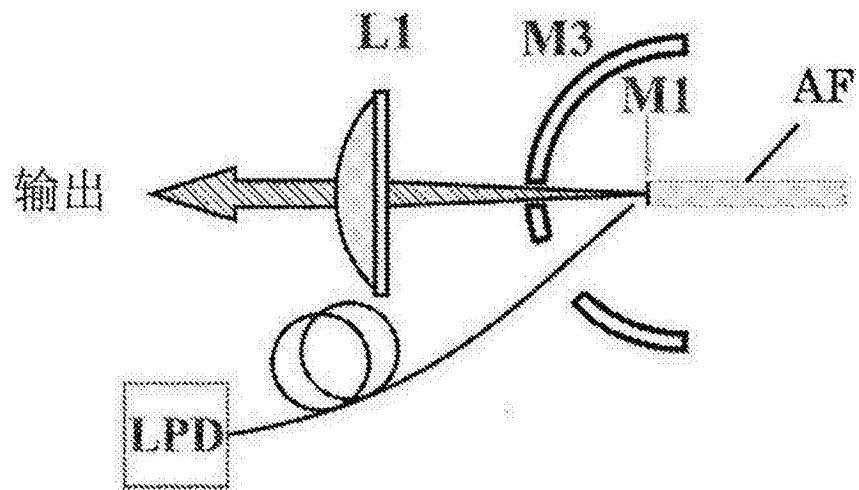


图1C

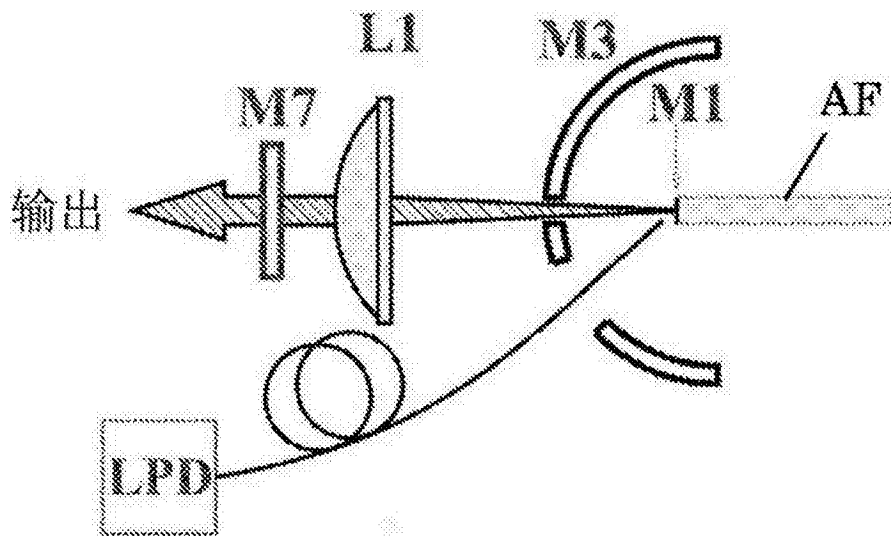


图1D

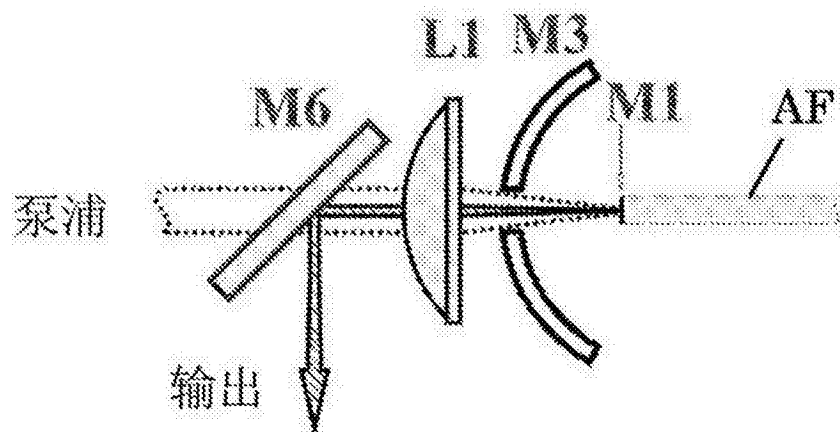


图1E

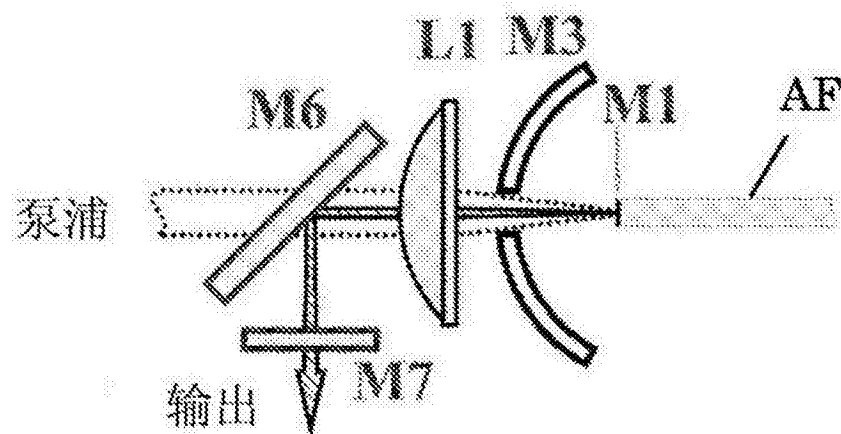


图1F

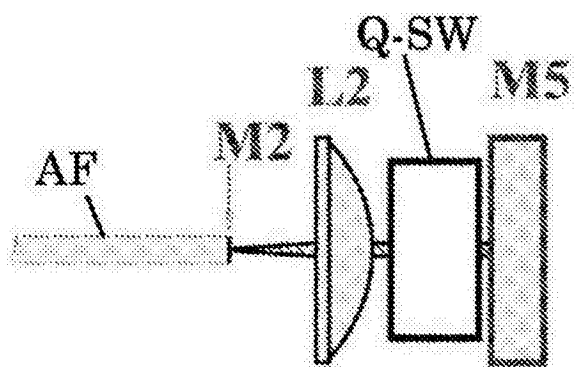


图2A

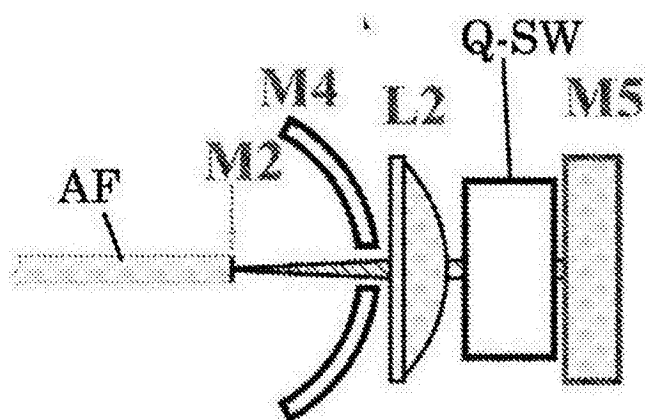


图2B

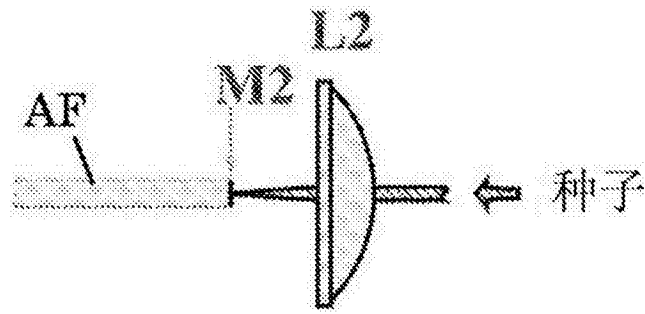


图2C

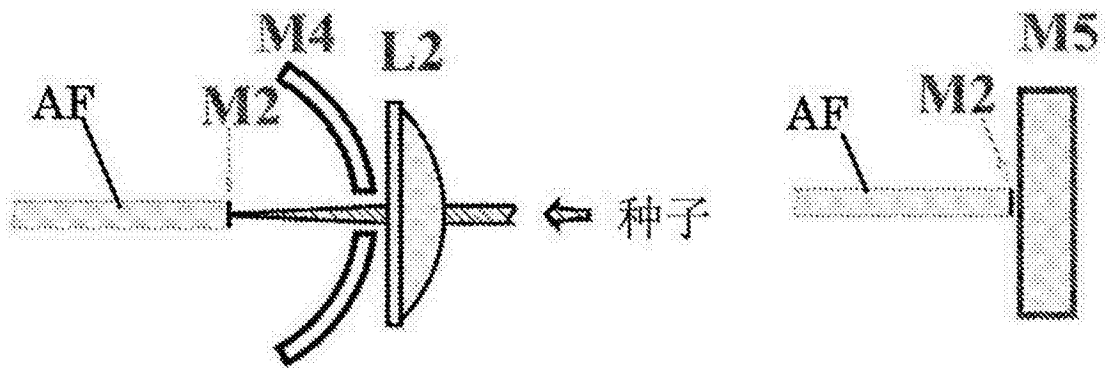


图2D

图2E

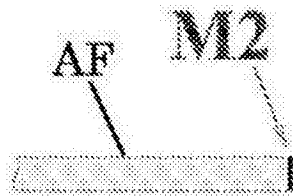


图2F

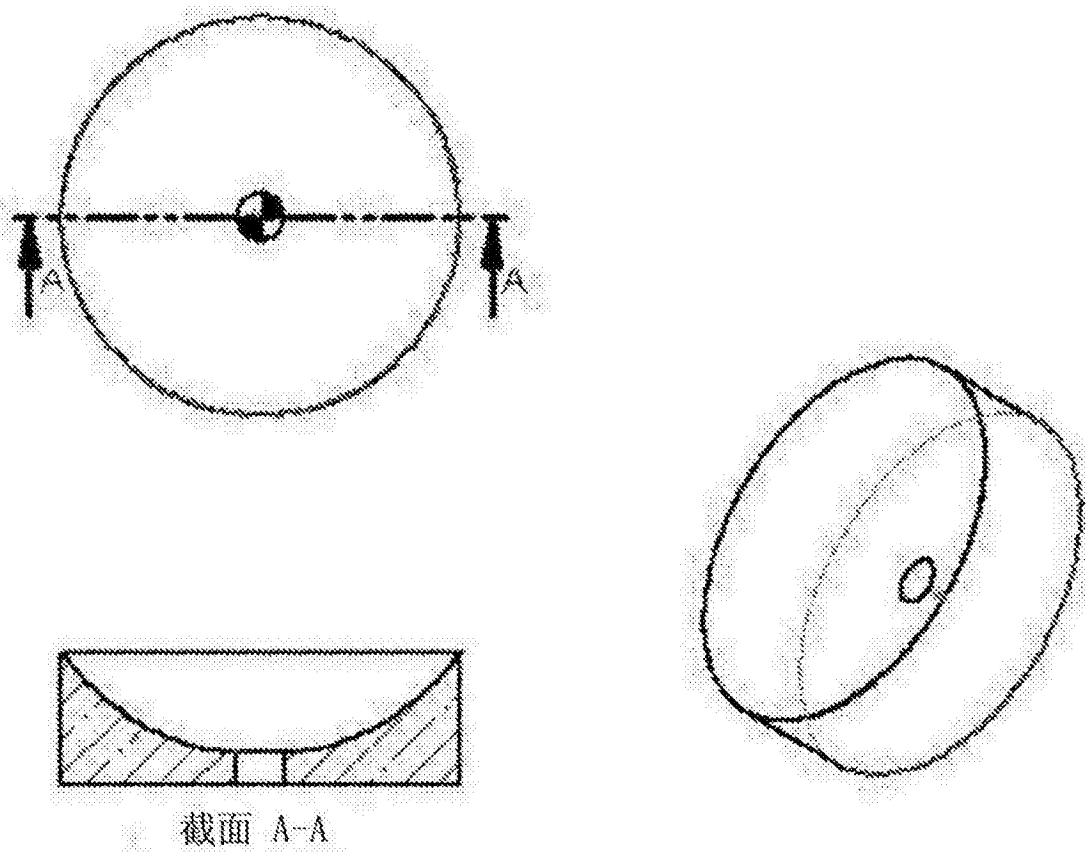


图3A

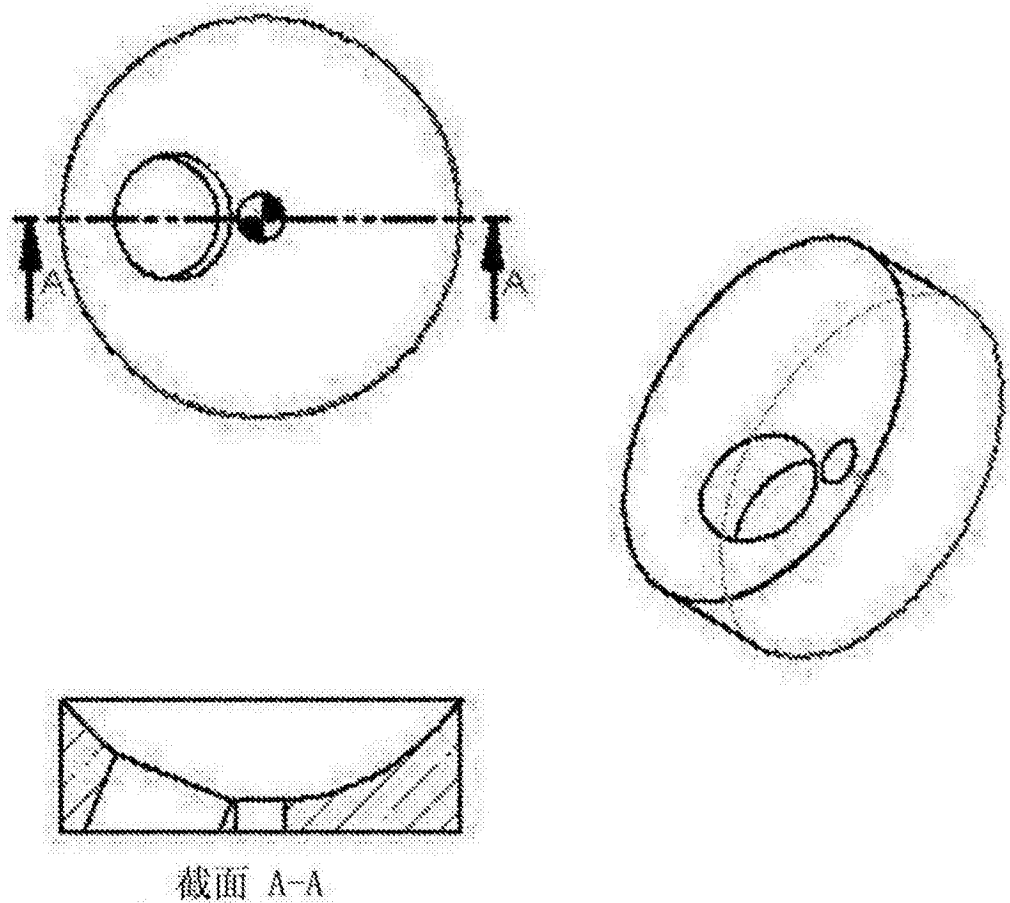


图3B

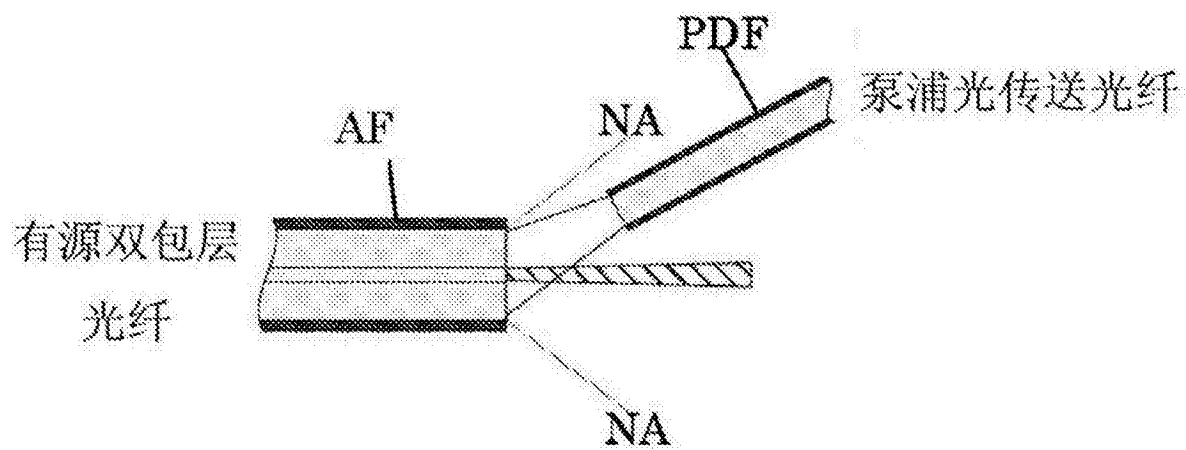


图4

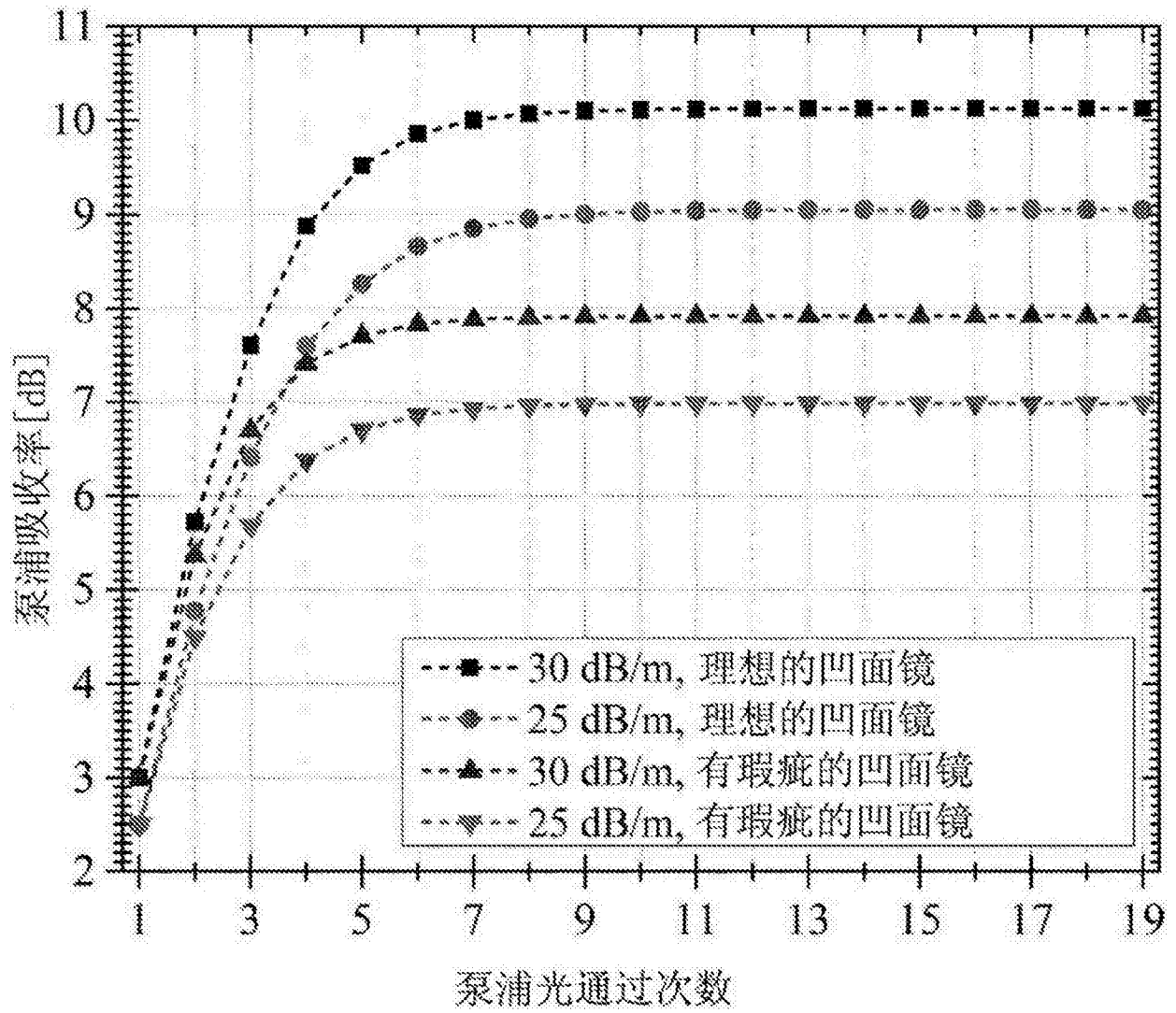


图5

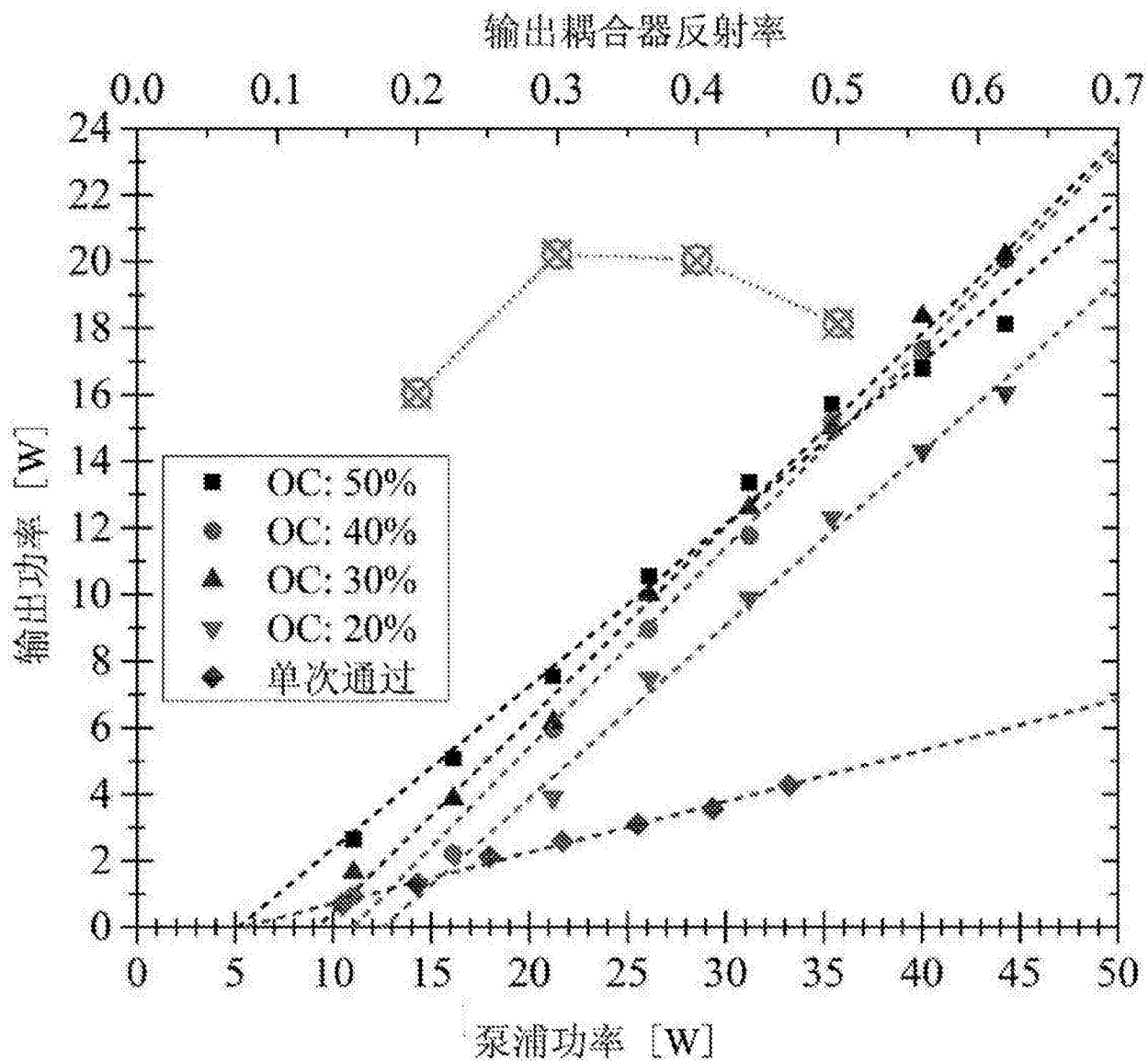


图6

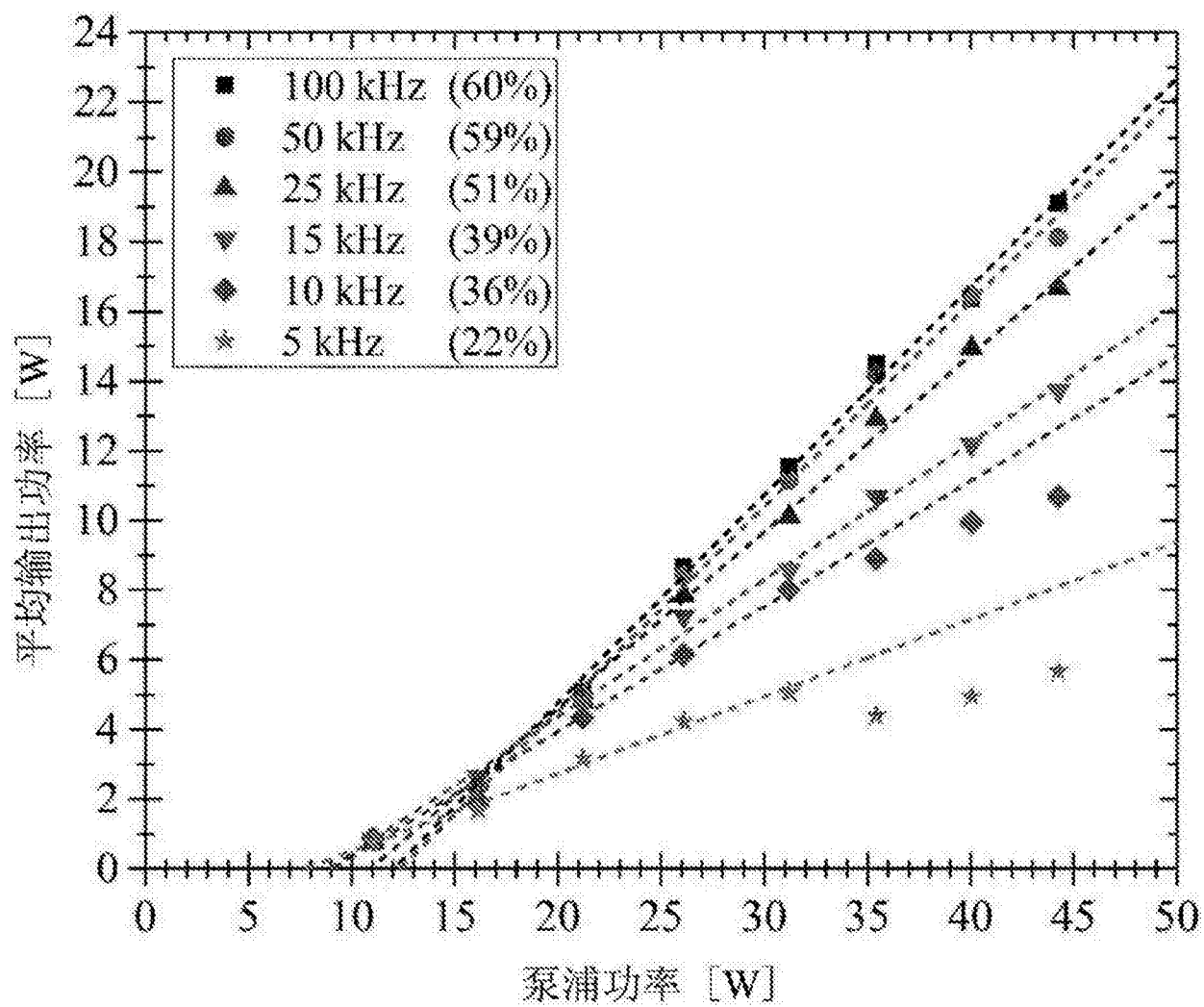


图7

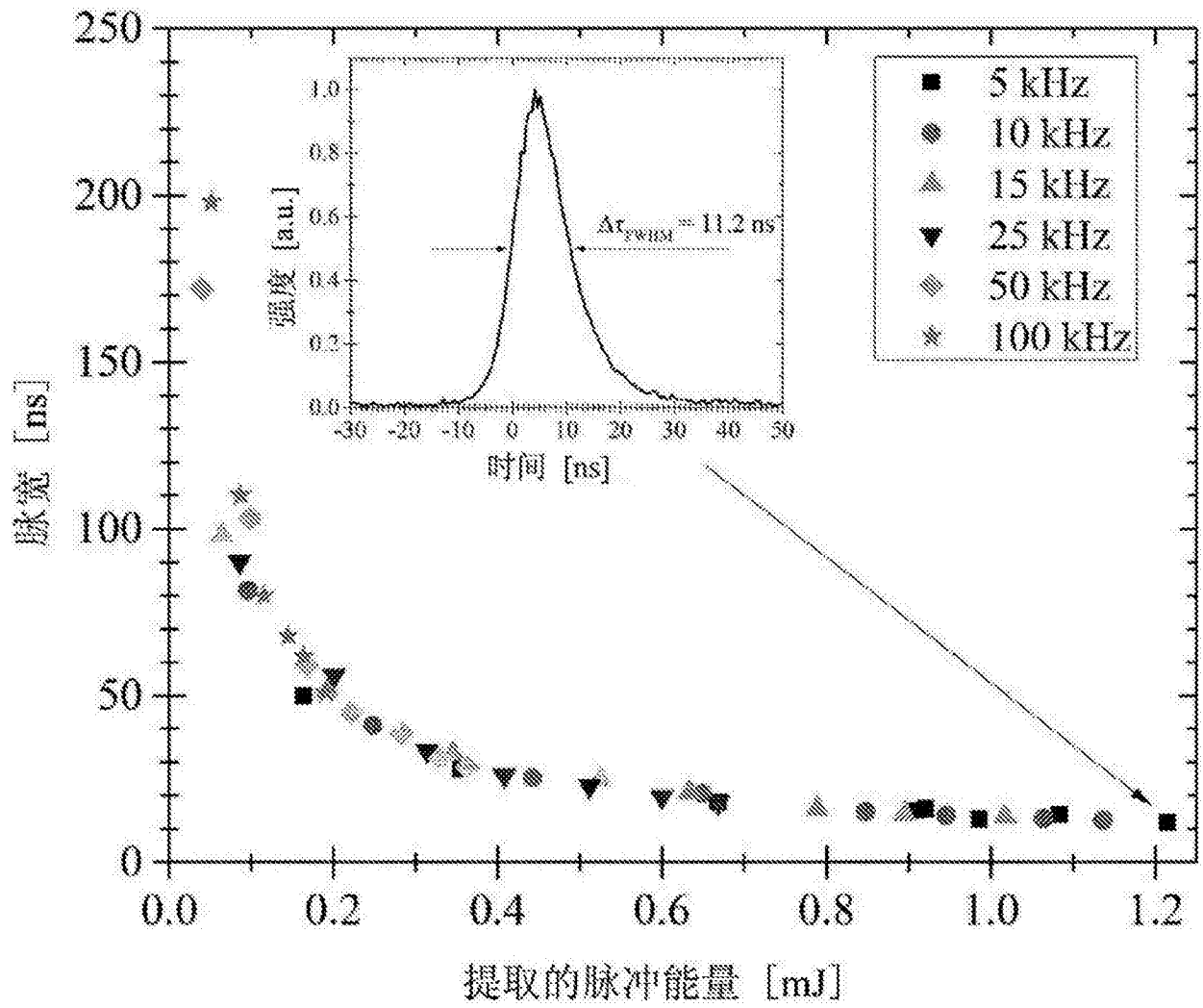


图8