



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103414102 A

(43) 申请公布日 2013. 11. 27

(21) 申请号 201310363438. 1

(22) 申请日 2013. 08. 20

(71) 申请人 中国人民解放军国防科学技术大学  
地址 410073 湖南省长沙市砚瓦池正街 47  
号国防科技大学

(72) 发明人 谌鸿伟 侯静 郭良 靳爱军  
陈胜平 陆启生

(74) 专利代理机构 湖南省国防科技工业局专利  
中心 43102

代理人 冯青

(51) Int. Cl.

H01S 3/17(2006. 01)

H01S 3/067(2006. 01)

H01S 3/23(2006. 01)

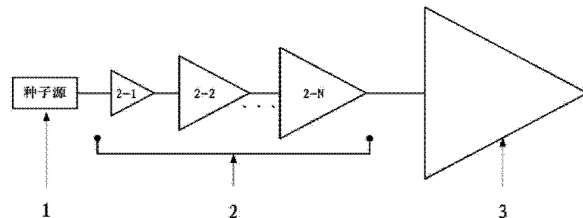
权利要求书2页 说明书4页 附图1页

(54) 发明名称

基于不同掺杂浓度增益光纤的高功率皮秒光纤激光系统

(57) 摘要

本发明涉及一种基于不同掺杂浓度增益光纤的高功率皮秒光纤激光系统,特指一种通过合理使用具有不同掺杂浓度的增益光纤来优化设计和搭建的高功率皮秒光纤激光系统。具体来说,就是在功率水平较低的预防大级中使用纤芯直径较小的高掺杂增益光纤,把皮秒种子源提供的种子光放大到一定的功率水平,作为功率放大级的信号光;最后,在功率放大级中使用纤芯直径较大的普通掺杂增益光纤,把预防大级提供的信号光放大到所要求的功率水平。相比现有的高功率皮秒光纤激光系统,该方案综合考虑了非线性效应抑制、输出光束质量、热管理等因素,是一种实现高平均功率皮秒光纤激光输出的优化方案。



1. 一种基于不同掺杂浓度增益光纤的高功率皮秒光纤激光系统,其特征在于,本发明提出的高功率皮秒光纤激光系统由皮秒种子源、预防大级和功率放大级组成,种子源、预防大级和功率放大级顺序排列,

首先,选取皮秒种子源,考虑种子脉冲的脉冲宽度、脉冲重复频率参数,使得皮秒种子脉冲经过光纤激光放大链路之后,在实现高平均功率输出的同时,脉冲宽度和脉冲峰值功率也在可接受的范围内,即满足应用所需的要求,同时不会在光纤激光放大器中激发受激拉曼散射;

然后,在预防大级中使用纤芯直径小的高掺杂增益光纤,把皮秒种子源提供的种子光放大,作为功率放大级的信号光;

最后,在功率放大级中使用纤芯直径较大的普通掺杂增益光纤,把预防大级提供的信号光放大到所要求的功率水平。

2. 根据权利要求 1 所述的一种基于不同掺杂浓度增益光纤的高功率皮秒光纤激光系统,其特征在于,所述的高功率皮秒光纤激光系统中的皮秒种子源可以是皮秒光纤激光器,也可以是其它类型的皮秒激光器。

3. 根据权利要求 1 所述的一种基于不同掺杂浓度增益光纤的高功率皮秒光纤激光系统,其特征在于,所述预防大级中由 N 个光纤激光放大器级联, N 是大于或者等于 1 的正整数,在 1- N 个光纤激光放大器中采用浓度相同或不同、纤芯直径相同或不同的掺杂增益光纤。

4. 根据权利要求 1 所述的一种基于不同掺杂浓度增益光纤的高功率皮秒光纤激光系统,其特征在于,所述功率放大级中采用的掺杂增益光纤浓度低于预防大级所用到的掺杂增益光纤浓度,后者的泵浦吸收系数为前者的 2 倍以上。

5. 根据权利要求 1 所述的一种基于不同掺杂浓度增益光纤的高功率皮秒光纤激光系统,其特征在于,所述功率放大级中的掺杂增益光纤,通过计算光纤的归一化频率  $v$ ,  $v = \frac{\pi \cdot D \cdot NA}{\lambda}$ , 其中 D 是纤芯直径, NA 是纤芯数值孔径,  $\lambda$  是激光工作波长,选取只能支持较少模式的纤芯直径值。

6. 根据权利要求 1 所述的一种基于不同掺杂浓度增益光纤的高功率皮秒光纤激光系统,其特征在于,所述的高功率皮秒光纤激光系统可以为空间结构,也可以是全光纤一体化的结构。

7. 根据权利要求 1 所述的一种基于不同掺杂浓度增益光纤的高功率皮秒光纤激光系统,其特征在于,所述的高功率皮秒光纤激光系统中采用的掺杂增益光纤可以为掺镱、铒、铒、铥、铥、铥不同类型的掺稀土元素光纤,根据所需的激光工作波长来进行选择。

8. 根据权利要求 1 所述的一种基于不同掺杂浓度增益光纤的高功率皮秒光纤激光系统,其特征在于,所述的高功率皮秒光纤激光系统中采用的掺杂增益光纤可以为普通的折射率导引型光纤,也可以是光子晶体光纤。

9. 根据权利要求 1 所述的一种基于不同掺杂浓度增益光纤的高功率皮秒光纤激光系统,其特征在于,所述的高功率皮秒光纤激光系统中采用的掺杂增益光纤可以单包层光纤,也可以是双包层光纤;

所述的高功率皮秒光纤激光系统中采用的掺杂增益光纤可以是偏振保持光纤,也可以

是非偏振保持光纤。

## 基于不同掺杂浓度增益光纤的高功率皮秒光纤激光系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及光纤激光技术领域,特指一种通过合理使用具有不同掺杂浓度的增益光纤来优化设计和搭建的主振荡功率放大(MOPA)结构高功率皮秒光纤激光系统。

### 背景技术

[0002] 高功率皮秒激光被广泛运用于激光处理、工业加工、非线性频率转换等领域。由于光纤激光器在输出光束质量、转换效率、热管理和稳定性方面具有优势,因而皮秒光纤激光系统成为近年来的研究热点。目前,高平均功率的皮秒光纤激光系统主要采用MOPA结构来实现,即首先使用一个功率较低、性能优良的皮秒激光器作为种子源,然后采用多级放大系统对种子光进行功率放大。

[0003] 对于一个皮秒激光系统,其光学特性参数主要有脉冲宽度、脉冲重复频率、脉冲峰值功率、平均输出功率、脉冲能量、光谱宽度、输出光束质量等。激光器的光学特性参数往往决定了其用途。另外,在搭建高平均功率的光纤激光系统时,还应该考虑光纤放大器的热管理问题,防止出现热损失。

[0004] 相比其它的固体激光器,由于具有相对较小的模场面积(与光纤的纤芯直径有关)和较长的激光和物质相互作用距离(与光纤的长度有关),诸如自相位调制和受激拉曼散射等非线性效应很容易在高功率的皮秒光纤激光器中发生。而非线性效应的出现会对皮秒光纤激光的频域和时域特性产生影响。在频域方面,放大后的脉冲光谱会由于自相位调制效应的作用而展宽,一部分能量也会转移到拉曼斯托克斯谱线上去。在时域方面,非线性效应会导致脉冲形状发生改变、甚至导致脉冲发生分离。由自相位调制效应导致的光谱展宽与光纤激光放大器中的最大非线性相移成正比,而非线性相移与光纤中的有效模场面积成反比、与光纤的有效作用长度以及脉冲峰值功率成正比。受激拉曼效应发生的阈值与光纤中的有效模场面积成正比、与光纤的有效作用长度成反比。

[0005] 光纤激光的输出光束质量基本上由光纤的波导结构决定,某一结构的光纤中能够支持的光场模式数由光纤的归一化频率决定,归一化频率越小,能够支持的模式数越少,当归一化频率小于2.404时,实现基横模运行。光纤的归一化频率与纤芯直径和纤芯数值孔径成正比。一般来说,固定尺寸的增益光纤,稀土离子的掺杂浓度越高,其纤芯数值孔径也越大。

[0006] 根据增益光纤中掺杂稀土离子浓度的不同,光纤激光器或者放大器中所用的增益光纤的长度也会不同。增益光纤中掺杂稀土离子浓度越高,则所用的增益光纤越短。在热管理方面,如果要想实现相同倍率的功率放大,光纤放大器中使用的增益光纤越短,则增益光纤在单位长度上的热负荷也越严重。

[0007] 根据现有文献记载,可以采用不同的方法来抑制高功率皮秒光纤激光器中的非线性效应。比如,使用具有较大模场面积的光纤来降低纤芯中的激光功率密度;采用具有高掺杂浓度的增益光纤来缩短光纤长度等。但是,在使用这些方法抑制非线性效应的同时,也会对激光系统带来一些不利影响。模场面积太大的光纤可以支持较多的模式,将会导致输出

激光的光束质量退化;纤芯数值孔径较大的高掺杂光纤也可以支持较多模式,同样会导致输出激光的光束质量退化。同时,因为增益光纤长度较短,在激光高功率放大时会产生严重的热负荷,引起光纤的热损失。另外,现有文献报道的高功率皮秒光纤激光系统对增益光纤的掺杂浓度并没有特别进行关注。报道的高功率皮秒光纤激光系统往往都采用普通掺杂浓度的增益光纤,这会导致整个激光系统所用的增益光纤比较长,不利于抑制非线性效应。尽管有文献提出通过采用高掺杂增益光纤来控制光纤激光系统中增益光纤的总长度,进而抑制皮秒光纤激光放大器中的非线性效应,但是其在功率放大级使用高掺杂增益光纤会导致输出激光的光束质量退化,并且还会产生严重的热负荷、引起热损失。而有文献提出在功率放大级使用掺杂浓度沿光纤纵向递增的增益光纤,这虽然可以解决热管理方面的问题,但是同样面临光束质量退化的问题。

### 发明内容

[0008] 为克服现有高功率皮秒光纤激光系统的不足,本文提出一种通过合理使用具有不同掺杂浓度的增益光纤来优化设计和搭建的 MOPA 结构高功率皮秒光纤激光系统。

[0009] 本发明涉及的高功率皮秒光纤激光系统仅考虑脉冲宽度从几皮秒到数百皮秒的情形,亚皮秒量级的脉冲光纤激光系统不在讨论范围之内;本发明仅考虑皮秒脉冲在光纤中的传输和放大过程,在光纤激光放大链路前后对脉冲的展宽或者压缩处理不在讨论范围之内。本发明提出的高功率皮秒光纤激光系统由皮秒种子源、预防大级和功率放大级组成,种子源、预防大级和功率放大级顺序排列。其工作原理为:首先,选取合适的皮秒种子源,主要考虑种子脉冲的脉冲宽度、脉冲重复频率等参数,使得皮秒种子脉冲经过光纤激光放大链路之后,在实现高平均功率输出的同时,脉冲宽度、脉冲峰值功率也在可接受的范围内(满足应用所需的要求,同时不会在光纤激光放大器中激发受激拉曼散射);然后,在功率水平较低的预防大级中使用纤芯直径较小的掺杂增益光纤,把皮秒种子源提供的种子光放大到一定的功率水平,作为功率放大级的信号光。这样,所用的增益光纤长度较短,可以有效地抑制非线性效应,减小自相位调制效应导致的非线性相移和提高受激拉曼散射效应阈值。同时,由于激光放大器的功率水平较低,增益光纤的热负荷也不会很严重。并且,由于增益光纤的纤芯直径较小,可以保证激光预防大级处于基横模或者少模运行;最后,在功率放大级中使用纤芯直径较大的掺杂增益光纤,把预防大级提供的信号光放大到所要求的功率水平。尽管使用的增益光纤较长,但是较大的模场面积有助于抑制非线性效应。同时,由于增益光纤相对较长,增益光纤在单位长度上的热负荷也较小,可有效地防止热损伤。另外,功率放大级中的掺杂增益光纤的数值孔径较小,通过计算光纤归一化频率,选取支持较少模式的纤芯直径,并通过采用光纤弯曲缠绕选模等方法,输出激光的光束质量可以得到保证。

[0010] 所述的高功率皮秒光纤激光系统中的皮秒种子源可以是皮秒光纤激光器,也可以是其它类型的皮秒激光器。

[0011] 所述预防大级中由 N 个光纤激光放大器级联(N 是大于或者等于 1 的正整数),在 1- N 个光纤激光放大器中采用浓度相同或不同、纤芯直径相同或不同的掺杂增益光纤。

[0012] 所述功率放大级中采用的掺杂增益光纤浓度低于预防大级所用到的掺杂增益光纤浓度,后者的泵浦吸收系数一般为前者的 2 倍以上。

[0013] 所述功率放大级中的掺杂增益光纤,通过计算光纤的归一化频率  $v$ ,  $v = \frac{\pi \cdot D \cdot NA}{\lambda}$ , 其中  $D$  是纤芯直径,  $NA$  是纤芯数值孔径,  $\lambda$  是激光工作波长, 选取只能支持较少模式的纤芯直径值。采用光纤弯曲缠绕选模方式, 使得最后的激光是基横模输出或者接近基横模输出。

[0014] 所述的高功率皮秒光纤激光系统可以为空间结构, 也可以是全光纤一体化的结构。

[0015] 所述的高功率皮秒光纤激光系统中采用的掺杂增益光纤可以为掺镱、铒、钕、钐、铥、铒、铒、铒、铒、铒等不同类型的掺稀土元素光纤, 根据所需的激光工作波长来进行选择。

[0016] 所述的高功率皮秒光纤激光系统中采用的掺杂增益光纤可以为普通的折射率导引型光纤, 也可以是光子晶体光纤。

[0017] 所述的高功率皮秒光纤激光系统中采用的掺杂增益光纤可以单包层光纤, 也可以是双包层光纤。

[0018] 所述的高功率皮秒光纤激光系统中采用的掺杂增益光纤可以是偏振保持光纤, 也可以是非偏振保持光纤。

[0019] 本发明的优点在于: 提出通过合理使用具有不同掺杂浓度的增益光纤来优化设计和搭建 MOPA 结构高功率皮秒光纤激光系统的新方案。相比现有高功率皮秒光纤激光系统(单纯使用普通掺杂浓度或者高掺杂浓度增益光纤的高功率皮秒光纤激光系统), 该方案综合考虑了非线性效应抑制、输出光束质量、热管理等因素, 是一种实现高平均功率皮秒光纤激光输出的优化方案。

## 附图说明

[0020] 图 1 为本发明提出的高功率皮秒光纤激光系统的结构示意图。

## 具体实施方式

[0021] 图中: 1 为皮秒种子源; 2 为预防大级; 3 功率放大级。

[0022] 以下结合附图与具体实施例对本发明作进一步的详细说明。应当理解, 此处所描述的具体实施例仅用于解释本发明, 但不应以此限制本发明的保护范围。

[0023] 图 1 为本发明提出的高功率皮秒光纤激光系统的结构示意图。如图所示, 本发明提出的高功率皮秒光纤激光系统包括皮秒种子源 1, 预防大级 2 和功率放大级 3。预防大级 2 由  $N$  个光纤激光放大器级联组成, 2-1、2-2、...、2- $N$  为组成预防大级 2 的  $N$  个级联的光纤激光放大器。皮秒种子源 1 提供皮秒脉冲种子光。预防大级 2 采用纤芯直径较小的高掺杂增益光纤, 把皮秒种子源 1 提供的皮秒脉冲种子光放大到可以为功率放大级 3 提供足够信号的功率水平, 作为功率放大级 3 的信号源。功率放大级 3 采用纤芯直径较大、掺杂浓度低于预防大级 2 所用掺杂浓度的掺杂增益光纤, 把预防大级 2 提供的信号光放大到所要求的功率水平。皮秒种子源 1, 预防大级 2 和功率放大级 3 之间的光路可以采用空间结构, 也可以采用全光纤一体化结构。

[0024] 本发明的具体实施例一, 采用掺镱光纤搭建了一个工作波长为 1064 nm 的百瓦量级全光纤一体化皮秒光纤激光系统。其中, 皮秒种子源 1 是基于单模光纤的被动锁模皮秒

脉冲掺镱光纤激光器,其工作波长为 1064 nm,脉冲宽度为 20 ps,脉冲重复频率为 480 MHz,平均输出功率为 20 mW,3 dB 光谱宽度为 0.9 nm。

[0025] 预防大级 2 由三个级联的光纤激光放大器 2-1、2-2 和 2-3 组成。光纤激光放大器 2-1 是单模光纤激光放大器,其主要目的是把种子光放大到 100 mW 左右。单模光纤放大器 2-1 采用高掺杂的单模掺镱光纤作为增益光纤,其在 976 nm 处的泵浦吸收系数为 1200 dB/m,所需增益光纤的长度为 30 cm (对应的普通掺杂的单模掺镱光纤在 976 nm 处的泵浦吸收系数为 80 dB/m,所需增益光纤的长度为 4 m);光纤激光放大器 2-2 和 2-3 是双包层光纤放大器,其主要目的是把种子光进一步放大到 10 W 左右,为功率放大级 3 提供足够的信号光。双包层光纤放大器 2-2 和 2-3 采用纤芯和内包层直径分别为 10/125  $\mu\text{m}$  的高掺杂双包层掺镱光纤作为增益光纤,其在 976 nm 处的包层泵浦吸收系数为 16 dB/m,单个双包层光纤放大器所需增益光纤的长度为 2 m (而对应的纤芯和内包层直径分别为 10/125  $\mu\text{m}$  的普通掺杂双包层掺镱光纤在 976 nm 处的包层泵浦吸收系数为 4 dB/m,单个双包层光纤放大器所需增益光纤的长度为 6 m);由于所用高掺杂双包层光纤的纤芯数值孔径为 0.19,可以支持 6 个光学模式,但是与之匹配的被动双包层光纤仅支持基横模传输,所以预防大级 2 中经过被动双包层光纤输出的也是基横模激光,并且达到了一定的功率水平,可以为功率放大级 3 提供足够的信号光。

[0026] 功率放大级 3 同样是双包层光纤放大器,其主要目的进行功率放大。采用纤芯和内包层直径分别为 30/250  $\mu\text{m}$  的普通掺杂双包层掺镱光纤作为增益光纤,其在 976 nm 处的包层泵浦吸收系数为 6.3 dB/m,所需增益光纤的长度为 5 m。所用双包层光纤的纤芯数值孔径为 0.062,可以支持 5 个光学模式,通过采用模场适配器、光纤弯曲缠绕选模等方法,其输出光束质量可以得到保证。(而对应的纤芯和内包层直径分别为 30/250  $\mu\text{m}$  的高掺杂双包层掺镱光纤在 976 nm 处的包层泵浦吸收系数为 33 dB/m,单个双包层光纤放大器所需增益光纤的长度为 1 m,但是这种高掺杂光纤支持 10 个以上光学模式,并且由于增益光纤的长度过短,热负荷较严重,光纤的涂覆层容易发生热损伤)。

[0027] 该具体实施例中的皮秒种子源 1,预防大级 2 和功率放大级 3 之间均通过光纤熔接进行连通,构成了全光纤一体化皮秒光纤激光系统。所述的光纤激光系统能够实现平均功率为 100 W 左右的皮秒脉冲激光输出,并且不会出现受激拉曼散射,在热管理方面也比较合理,其输出激光的光束质量也可以得到保证。尽管由自相位调制效应导致的脉冲宽度和光谱的展宽是不可避免的,但是由于合理使用具有不同掺杂浓度的增益光纤,有效地缩短了整个激光系统的增益光纤长度,使得放大输出的脉冲在时域上只会发生轻微的展宽,并且,最终的光谱展宽可以控制在几个 nm 范围之内。

[0028] 本发明的具体实施例二,同样采用掺镱光纤搭建了一个工作波长为 1064 nm 的百瓦量级全光纤一体化皮秒光纤激光系统。其系统结构以及皮秒种子源 1 和预防大级 2 与具体实施例一相同。功率放大级 3 采用纤芯和内包层直径分别为 25/250  $\mu\text{m}$  的普通掺杂双包层掺镱光纤作为增益光纤,其在 976 nm 处的包层泵浦吸收系数为 4.8 dB/m,所需增益光纤的长度为 6 m。所用双包层光纤的纤芯数值孔径为 0.06,可以支持 4 个光学模式,通过采用模场适配器、光纤弯曲缠绕选模等方法,其输出光束质量可以得到保证。所述的光纤激光系统能够实现平均功率为 100 W 左右的皮秒脉冲激光输出,并且非线性效应得到有效抑制,在热管理方面也比较合理,其输出激光的光束质量也可以得到保证。

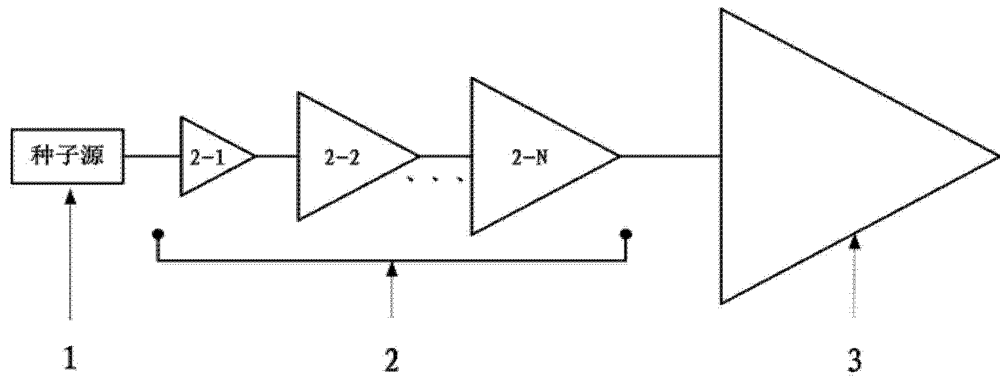


图 1