



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106537104 A

(43)申请公布日 2017.03.22

(21)申请号 201580041981.7

(22)申请日 2015.06.15

(30)优先权数据

1455472 2014.06.16 FR

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2017.02.04

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/EP2015/063368 2015.06.15

(87)PCT国际申请的公布数据

W02015/193254 FR 2015.12.23

(71)申请人 法国原子能及替代能源委员会

地址 法国巴黎

(72)发明人 法比安·奎尔 瓦伦丁·加列特

古斯塔夫·帕连特

(74)专利代理机构 中国商标专利事务所有限公司 11234

代理人 宋义兴 桑丽茹

(51)Int.Cl.

G01J 9/02(2006.01)

G01J 11/00(2006.01)

权利要求书3页 说明书23页 附图14页

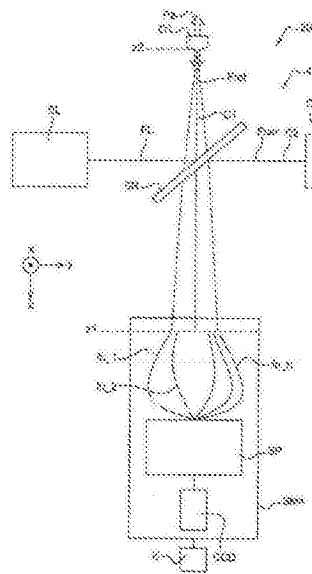
(54)发明名称

用于光束表征的设备和方法

(57)摘要

本发明的一方面涉及用于光束表征的方法，包括下列步骤：-通过分离器光学件分离光束为第一子光束和第二子光束；-第一子光束传播通过第一光学件，并且第二子光束传播通过第二光学件，分别地设置所述第一和第二光学件，这样称为“参考光束”的离开第一光学件时的第一子光束，以及称为“表征光束”的离开第二光学件时的第二子光束被时间延迟 τ 分离；-通过复合器光学件的参考光束和表征光束的重组，这样光束空间地干涉和形成二维干涉模式，该二维干涉模式沿着第一平面延伸；-通过测量系统，至少一部分二维干涉模式的频谱的测量；-在频谱的至少一个空间点的时域中傅里叶变换的计算，在时域中所述的傅里叶变换具有时间中心峰以及第一和第二时间侧峰；-对于所述第一和第二时间侧峰之一，频域中傅里叶变换的计算；-对于所述频域中傅里叶变换，光谱振幅 $A_R(\omega)$ 和空间-光谱相位 $R(x, y, \omega)$ 的计算。

CN 106537104 A



1. 一种用于光束 (FL) 表征的方法 (20), 该方法包括下列步骤:

-通过分离器光学件 (Os, SR) 分离光束 (FL) 为第一子光束 (F1) 和第二子光束 (F2), 第一子光束采用第一光学路径 (C1), 并且第二子光束采用第二光学路径 (C2);

-第一子光束 (F1) 传播通过第一光学件 (O1), 并且第二子光束 (F2) 传播通过第二光学件 (O2), 第一子光束 (F1) 在第一光学件 (O1) 的整个表面上具有非均匀的电磁场, 所述第一和第二光学件 (O1, O2) 由于控制装置 (Pz) 而被分别地设置在第一和第二光学路径 (C1, C2) 中, 这样称为“参考光束 (Fref)”的离开第一光学件时的第一子光束, 以及称为“表征光束 (Fcar)”的离开第二光学件时的第二子光束被时间延迟 τ 分离;

-通过复合器光学件 (Or, SR) 的参考光束 (Fref) 和表征光束 (Fcar) 的重组, 这样光束空间地干涉和形成二维干涉模式 (M1), 该二维干涉模式 (M1) 沿着第一平面 (z1) 延伸;

-通过测量系统 (SM3, SM4), 至少一部分二维干涉模式 (M1) 的频谱 (Spe) 的测量, 该测量系统 (SM3, SM4) 包括分光仪 (SP), 该分光仪具有沿着第一平面 (z1) 的第一空间方向 (x) 延伸的入口狭缝 (Fe);

-在频谱 (Spe) 的至少一个空间点的时域 (TFT) 中傅里叶变换的计算, 在时域 (TFT) 中所述的傅里叶变换具有时间中心峰 (tc) 以及第一和第二时间侧峰 (t11, t12);

-通过计算器 (K), 对于所述第一和第二时间侧峰 (t11, t12) 之一, 频域 (TFT') 中傅里叶变换的计算;

-对于所述频域 (TFT') 中傅里叶变换, 通过计算器 (K), 称为“相对光谱振幅”的光谱振幅 $A_R(\omega)$ 和称为“相对空间-光谱相位”的空间-光谱相位 $\Phi_R(x, y, \omega)$ 的计算。

2. 根据前面权利要求所述的方法 (20), 其特征在于它包括:

-步骤 i), 根据该步骤计算第一测量平面 (z1) 中参考光束 (Fref) 的电磁场, 同时假设第一子光束 (F1) 的电磁场在第一光学件 (O1) 的第二平面 (z2) 中是均匀的;

-步骤 ii), 根据该步骤, 从之前计算的第一测量平面 (z1) 中参考光束 (Fref) 的电磁场和频率干涉图计算第一光学件 (O1) 的第二平面 (z2) 中第一子光束 (F1) 的电磁场的重建;

-步骤 iii), 根据该步骤, 使用之前计算的第一光学件 (O1) 的第二平面 (z2) 中第一子光束 (F1) 的电磁场的重建, 计算第一测量平面 (z1) 中参考光束 (Fref) 的电磁场。

3. 根据前面权利要求所述的方法 (20), 其特征在于重复步骤 ii) 和步骤 iii), 直到它们会聚朝向自给方案, 使得:

-重建表征光束 (Fcar) 的电磁场, 并且

-在第一测量平面 (z1) 中参考光束 (Fref) 的电磁场是第一光学件 (O1) 的参考光束 (Fref) 的所述电磁场扩展的结果。

4. 根据前面权利要求中任一权利要求所述的方法 (20), 其特征在于测量至少一部分二维干涉模式 (M1) 的频谱 (Spe) 的步骤包括下列子步骤:

-布置测量系统 (SM3) 的分光仪 (SP), 使得分光仪 (SP) 的入口狭缝 (Fe) 适于接收所述至少一部分二维干涉模式 (M1), 所述至少一部分沿着第一平面 (z1) 的第一空间维度 (x) 延伸;

-由于分光仪 (SP), 测量沿着第一平面 (z1) 的第一空间维度 (x) 延伸的所述至少一部分二维干涉模式 (M1) 的频谱 (Spe)。

5. 根据权利要求 1 所述的方法 (20), 其特征在于测量至少一部分二维干涉模式 (M1) 的频谱 (Spe) 的步骤包括下列子步骤:

-测量系统 (SM4) 包括多个光学纤维 ($f_{o_1}, f_{o_2}, f_{o_n}$), 根据二维矩阵, 在第一平面 (z_1) 中布置所述多个光学纤维 ($f_{o_1}, f_{o_2}, f_{o_n}$) 的输入端, 以能够沿着第一平面 (z_1) 的第一空间方向 (x) 和沿着第一平面 (z_1) 的第二空间方向 (y) 取样二维干涉模式 (M1);

-在测量系统 (SM4) 的分光仪 (SP) 的入口狭缝 (Fe) 上布置所述多个光学纤维 ($f_{o_1}, f_{o_2}, f_{o_n}$) 的输出端;

-由于测量系统 (SM3) 的分光仪 (SP), 测量沿着第一平面 (z_1) 的第一和第二空间方向 (x, y) 的二维干涉模式 (M1) 的取样的频谱 (Spe)。

6. 根据前面权利要求中任一权利要求所述的方法 (20), 其特征在于它包括:

-在参考光束的频率 ω_0 测量空间相位 $\Phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ 的步骤, 所述空间相位 $\Phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ 是由第一光学件 (O1) 引入的参考光束 (Fref) 的波前面曲率的特征,

-然后, 从相对空间-光谱相位 $\Phi_R(x, y, \omega)$ 减去空间光谱相位 $\frac{\omega}{\omega_0} \Phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ 的步骤, 以获得表征光束的校正相对空间-光谱相位。

7. 根据权利要求1至5中任一权利要求所述的方法 (20), 其特征在于它包括:

-测量称为“参考空间-光谱相位”的第一子光束的空间-光谱相位 $\Phi_{ref}(x, y, \omega)$ 的步骤,

-然后, 从相对空间-光谱相位 $\Phi_R(x, y, \omega)$ 减去所述参考空间-光谱相位 $\Phi_{ref}(x, y, \omega)$ 以获得表征光束的绝对空间-光谱相位 $\Phi_{abs}(x, y, \omega)$ 的步骤。

8. 根据权利要求1至5中任一权利要求所述的方法 (20), 其特征在于它包括:

-测量在参考光束的频率 ω_0 的空间相位 $\Phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ 的步骤, 所述空间相位 $\Phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ 是由第一光学件 (O1) 引入的参考光束 (Fref) 的波前面曲率的特征;

-测量称为“参考空间-光谱相位”的第一子光束的空间-光谱相位 $\Phi_{ref}(x, y, \omega)$ 的步骤,

-然后, 从相对空间-光谱相位 $\Phi_R(x, y, \omega)$ 减去所述参考空间-光谱相位 $\Phi_{ref}(x, y, \omega)$ 和空间-光谱相位 $\frac{\omega}{\omega_0} \Phi_{ref}(x, y, \omega_0)$, 以获得表征光束的校正绝对空间-光谱相位的步骤。

9. 用于实施根据前述权利要求中任一权利要求所述的方法 (20), 用于光束 (FL) 表征的设备 (3, 4), 其特征在于它包括:

-用于分离光束 (FL) 为第一子光束 (F1) 和第二子光束 (F2) 的分离器光学件 (Os, SR), 该分离器光学件 (Os, SR) 限定用于第一子光束 (F1) 的第一光学路径 (C1) 以及用于第二子光束 (F2) 的第二光学路径 (C2);

-设置在第一光学路径 (C1) 中的第一光学件 (O1), 该第一光学件 (O1) 具有第一曲率半径, 这样称为“参考光束 (Fref)”的离开第一光学件时的第一子光束具有第一类型的波前面;

-设置在第二光学路径 (C2) 中的第二光学件 (O2), 该第二光学件 (O2) 具有不同于第一曲率半径的第二曲率半径, 这样称为“表征光束 (Fcar)”的离开第二光学件时的第二子光束具有不同于第一类型的第二类型的波前面;

-控制参考光束 (Fref) 和表征光束 (Fcar) 之间时间延迟 τ 的装置 (Pz);

-用于参考光束 (Fref) 和表征光束 (Fcar) 重组的复合器光学件 (Or, SR), 以这样的方式以致于光束空间地干涉和形成二维干涉模式 (M1);

- 测量系统 (SM3、SM4),使得可以从至少二维干涉模式 (M1) 获得时间信息或频率信息;
- 计算器 (K),能够实现从频域 (TFF) 中傅里叶变换的时间信息的计算,或者从时域 (TFT) 中傅里叶变换的频率信息的计算。

10. 根据前述权利要求所述的设备 (3,4),其特征在于分离器光学件 (Os) 和复合器光学件 (Or) 形成单个同一的光学件 (SR),确保一方面光束 (FL) 的分离,以及另一方面参考光束 (Fref) 和表征光束 (Fcar) 的重组。

用于光束表征的设备和方法

技术领域

[0001] 本发明的技术领域是光学计量学的技术领域。

[0002] 因此,本发明的一方面涉及用于光束,特别地多色光束,并且尤其是多色激光束的表征的设备和方法。根据本发明的一方面的设备和方法特别地可以确定光束,并且尤其是脉冲激光束的空间-时间特性,包括通常飞秒持续时间的一个或多个激光脉冲。更通常地,根据本发明一个方面的设备和方法可以用于测量在光束的一点的电磁场和在光束的所有其它点的电磁场之间互相关功能,该光束的一点取得参考点的资格。

背景技术

[0003] 更特别地将描述本发明有关其应用于具有空间-时间耦联的超短波激光脉冲的表征,尽管这些用途不是排他性的。采用“超短波激光脉冲”意指皮秒脉冲,即持续时间包括约0.1和100ps之间,或者飞秒脉冲,即持续时间小于或等于100fs=0.1ps。持续时间延伸到强度分布图的中间高度。这些脉冲具有相对宽的光谱带,即通常地几十纳米的数量级,或者甚至几百纳米的数量级。

[0004] 超短波激光脉冲具有大量科学和技术的应用;它们可以被放大直到几焦耳的能量,并且形成束,称为“脉冲束”,根据尤其是它们的功率,其直径从几毫米到几厘米。

[0005] 通常来说,脉冲束的电磁场的时间特性可以空间地改变,或者在等同方式中,脉冲束的电磁场的空间特性可以是随时间而定的。例如,脉冲持续时间可以依赖于光束中位置(x,y)。在本说明书中,除非另外说明,将考虑光束在方向“z”的传播,“x”、“y”和“z”轴线形成标准正交的坐标系统。

[0006] 当这种相依性存在时,场E(x,y,t)不能表示为下面形式:

$$[0007] \quad E(x,y,t) = E_1(t) \times E_2(x,y)$$

[0008] 其中E₁(t)是时间函数,并且E₂(x,y)是空间函数。那么也就是说光束具有空间-时间耦联(STC)。

[0009] 空间-时间耦联可以尤其地导致脉冲束的强度前面的失真,如通过图1a和1b示例的。图1a示例了理想情况,根据该情况,在方向z上传播的超短波脉冲束的电磁能以直径D和厚度cT的非常薄的圆盘被传播开,其中c是光束,并且T是脉冲的持续时间。在图1a的实施例中,D=8cm,并且cT=10μm,其对应于约33fs的脉冲持续时间。为了最大化在焦点获得的光强度,这是通常所期望的,所述圆盘必须尽可能“平”。为了表征能量的该空间分布,使用表述激光的“强度前面”。强度前面的概念一定不要与“波前面”的概念混淆。

[0010] 实际上,并且尤其地在具有大光束直径的高功率激光器的情况下,强度前面可以不是平的,但是失真,如图1b中示例的。由此,脉冲峰可以在不同时刻到达平面(x,y)中光束段的不同点,并且脉冲持续时间也可以从一个点到另一个点变化。其它类型的空间-时间耦联也是可能的,诸如,例如随着时间过去的波前面的转动。

[0011] 已经提出用于测量这些耦联的技术,但是它们在它们的性能方面保持了有限性,并且实施复杂和不适于通常地来自于高功率源的大尺寸光束。因此,这些技术并不普及。实

实际上,光束越大,它越有可能有空间-时间耦联。因此,特别地对于这种光束,能够实施空间-时间耦联的测量是重要的。

[0012] 此后列出了这些技术:

[0013] -“SPIDER-2D”技术,昂贵和复杂的,强加了表征光束的尺寸限制。SPIDER-2D能够实现根据时间 t 和横向方向 x 或 y 的表征光束的重建。

[0014] -“STRIPED FISH”技术比SPIDER-2D实施更简单和更便宜。而且,STRIPED FISH能够实现根据时间 t 和两个横向方向 x 和 y 的表征光束的重建。然而,STRIPED FISH也强加了表征光束的尺寸限制,要求使用参考光束,这可以证明非常难于获得的,并且只能够实现小的光谱取样。

[0015] -“HAMSTER”技术,Cousin等的论文中描述了该技术“Three-dimensional spatiotemporal pulse characterization with an acousto-optic pulse shaper and a Hartmann-Shack wavefront sensor (用声音光学脉冲整形器和Hartmann-Shack波前传感器的三维空间时间脉冲表征)”,*Optics Letters* 37,3291 (2012)。HAMSTER使用声音-光学调制器和Shack-Hartmann类型的2D波前面传感器,以实施在表征光束的点的的时间测量,然后测量表征光束的不同光谱段的空间波前面。在两个系列的测量结束时,HAMSTER到达表征光束的完整空间-时间重建,即根据 t 和两个横向方向 x 和 y 。然而,HAMSTER技术涉及一定的复杂性和高成本,尤其地考虑声音-光学调制器的应用。另一方面,HAMSTER技术不适于大直径的光束。

[0016] -“SEA TADPOLE”技术包括用第一光学纤维收集在表征光束的不同点的光,同时移动所述第一光学纤维到光束的不同点。辅助光束被射入到第二光学纤维中。第一和第二光学纤维的输出端彼此靠近放置,以发散的这种方式,离开所述第一和第二光学纤维的光束空间地重叠,并且产生空间干涉。使用分光计光谱地解析这些空间干涉,以获得干涉图。该干涉图可以决定射入到第一纤维中的光束和射入到第二纤维中的光束之间的光谱相位。因此,在表征光束的点处收集的光的光谱特性与辅助光束的光的光谱特性比较。通过移动第一纤维到表征光束的多个点,这些点的每个点与辅助光束比较,这可以重建表征光束的光谱相位。不像SPIDER-2D和STRIPED FISH技术,SEA TADPOLE技术具有不限制表征光束的尺寸的优点。以对于STRIPED FISH相同的方式,装备相对简单和廉价,并且根据三个方向(x , y , t)实施表征光束的重建。然而,通过SEA TADPOLE的光束的表征需要大量的激光发射,一点一点确定的光谱相位。实施几个激光发射的必要性强制要表征的激光束稳定和可发射对发射的再现,对于飞秒激光器,并且特别地对于高功率飞秒激光器,这不是总是的情况。SEA TADPOLE技术的另一个限制是由光学纤维的应用构成,这引入了随机相位波动。

[0017] -“最接近的现有技术由称为“MUFFIN”的技术构成”,在专利FR 2976663 (A1)中描述了它。在专利FR 2976663 (A1)的导言中,也以详细的方式描述了之前提到的SPIDER-2D、STRIPED FISH和SEA TADPOLE技术。MUFFIN技术代表对SEA TADPOLE技术的改进。代替使用两个光学纤维-连续地移动到表征光束的 N 点的第一光学纤维和用作参考的第二光学纤维,MUFFIN提出直接地使用一组 N 个光学纤维。这些 N 个纤维的输入端收集在表征光束的 N 个不同点处的光。这些 N 个纤维的输出端一个紧接着另一个之后放置成一条线,这样离开所述纤维的光束重叠和空间地彼此干涉。因此,MUFFIN技术在单次发射以及没有必要有可用的辅助光束中达到SEA TADPOLE的结果。MUFFIN并没有立刻排除SEA TADPOLE已经鉴别的光学纤

维中相位波动的问题。这种相位波动可以防止表征光束的完整重建。在上述专利中已经提出针对该问题的方案,但是它使MUFFIN技术的使用更复杂。而且,用MUFFIN技术难以使用大量光学纤维。实际上,大量的光学纤维是几十数量级。因此,MUFFIN技术只能够实现表征光束的有限空间取样。

发明内容

[0018] 因此,本发明目的是通过提出用于适于大尺寸光束的光束表征的设备和方法,针对上述问题,提供方案,该设备和方法能够实现具有好的空间取样和好的光谱取样的所述光束的完整重建,同时保持实施相对简单和廉价。

[0019] 因此,本发明的一方面涉及用于光束表征的设备,该设备包括:

[0020] -用于将光束分离成第一子光束和第二子光束的分离器光学件,该分离器光学件限定用于第一子光束的第一光学路径和用于第二子光束的第二光学路径;

[0021] -设置在第一光学路径中的第一光学件,该第一光学件具有第一曲率半径,这样称为“参考光束”的离开第一光学件时的第一子光束具有第一类型的波前面;

[0022] -设置在第二光学路径中的第二光学件,该第二光学件具有不同于第一曲率半径的第二曲率半径,这样称为“表征光束”的离开第一光学件时的第二子光束具有不同于第一类型的第二类型的波前面;

[0023] -控制参考光束和表征光束之间时间延迟 τ 的装置;

[0024] -用于参考光束和表征光束重组的复合器光学件,以这样的方式以致于光束空间地干涉和形成二维干涉模式;

[0025] -测量系统,使得可以从至少二维干涉模式获得时间信息或频率信息;

[0026] -计算器,能够实现从频域中傅里叶变换的时间信息的计算,或者从时域中傅里叶变换的频率信息的计算。

[0027] 由于本发明,有利地,考虑作为点源的第一子光束的一部分被使用,以产生大尺寸的参考光束,使得可以对表征光束的整体表征。采用“大尺寸的参考光束”意指这样事实:在期望的测量平面中,参考光束的尺寸大于或等于表征光束的尺寸。由于第一和第二光学件之间的曲率半径的差异,参考光束的波前面具有第一类型,并且表征光束的波前面具有第二类型,第二类型不同于第一类型。根据所述波前面的曲率半径,尤其确定波前面的类型。因此,在期望的测量平面中,考虑为来自于点源的参考光束空间地干涉表征光束的每个点。因此,获得相对于参考光束的表征光束的表征,以简单、有效和廉价方式获得所述参考光束。

[0028] 除了在前面段落中已经提到的特征,根据本发明一个方面,用于光束表征的设备可以具有单独考虑的或根据其任何技术上可能组合考虑的下面其中的一个或多个补充特征:

[0029] -分离器光学件和复合器光学件形成单一光学件,一方面确保光束的分离,另一方面确保参考光束和表征光束的重组。

[0030] -计算器是在时间和频率类型信息之间的傅里叶变换的计算器,该计算器从这些类型之一的信息计算其它类型的傅里叶变换。

[0031] 本发明的另一个方面涉及使用根据本发明一方面的光束表征的设备,用于光束表

征的第一方法,该第一方法包括下列步骤:

[0032] -通过分离器光学件分离光束为第一子光束和第二子光束,第一子光束采用第一光学路径,并且第二子光束采用第二光学路径;

[0033] -第一子光束传播通过第一光学件,并且第二子光束传播通过第二光学件,所述第一和第二光学件由于控制装置而被分别地设置在第一和第二光学路径中,这样称为“参考光束”的离开第一光学件时的第一子光束,以及称为“表征光束”的离开第二光学件时的第二子光束被时间延迟 τ 分离,该时间延迟扫描具有步调P1的时间间隔T1;

[0034] -通过复合器光学件的参考光束和表征光束的重组,这样光束空间地干涉和形成二维干涉模式;

[0035] -根据参考光束和表征光束之间扫描具有步调P1的时间间隔T1的时间延迟 τ ,通过测量系统的所述二维干涉模式的测量,以获得时间干涉图;

[0036] -通过计算器,在时间干涉图的至少一个空间点的频域中傅里叶变换的计算,在频域中所述傅里叶变换具有中心频率峰以及第一和第二频率侧峰。

[0037] -对于频域中所述傅里叶变换的所述第一和第二频率侧峰之一,通过计算器的称为“相对光谱振幅”的光谱振幅 $A_R(\omega)$ 和称为“相对空间-光谱相位”的空间-光谱相位 $\Phi_R(x, y, \omega)$ 的计算。

[0038] 在本说明书中,采用“时间干涉图”意指对于扫描具有步调P1的时间间隔T1的每个时间延迟 τ ,所有的二维干涉模式。因此,时间干涉图包括沿着两个空间维度和一个时间维度的三维信息。根据本发明的一个方面,用于光束表征的第一方法能够实现表征光束的优良空间取样。由于具有步调P1的时间间隔T1的时间延迟 τ 的扫描,根据本发明的一个方面,用于光束表征的第一方法能够实现表征光束的优良光谱取样。光谱取样的质量实际上与扫描时间延迟 τ 的时间间隔T1的长度关联。

[0039] 除了在前面段落中已经提到的表征,根据本发明一个方面,用于光束表征的第一方法可以具有单独考虑的或根据其任何技术上可能组合考虑的下面其中的一个或多个另外特征:

[0040] -对于扫描具有步调P1的时间间隔T1的至少一个时间延迟 τ ,该第一方法包括通过计算器,表征光束的强度以及强度的空间分布的计算步骤。所述步骤有利地可以考虑随着时间过去的光源特性的潜在波动,即,在脉冲光源的情况下,通常地从一个脉冲到另一个脉冲。在扫描时间间隔T1期间,光源强度和强度的空间分布的潜在波动实际上能够降低测量的二维干涉模式,由此从其推导出复合光谱。

[0041] -优选地,对于扫描具有步调P1的时间间隔T1的每个时间延迟 τ ,第一方法包括通过计算器,表征光束的强度和强度的空间分布的所述计算步骤。

[0042] -第一方法有利地包括:

[0043] ○在参考光束的频率 ω_0 ,测量空间相位 $\Phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ 的步骤,所述空间相位 $\Phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ 具有由第一光学件引入的参考光束的波前面的曲率的特征;

[0044] ○接着,从相对空间-光谱相位 $\Phi_R(x, y, \omega)$ 减去空间-光谱相位 $\frac{\omega}{\omega_0} \Phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ 的步骤,以获得表征光束的校正相对空间-光谱相位。

[0045] 因此,考虑由第一光学件引入的参考光束的波前面的曲率。

[0046] -根据第一可替代的实施方式,第一方法有利地包括:

[0047] ○测量称为“参考空间-光谱相位”的第一子光束的空间-光谱相位 $\phi_{\text{ref}}(x, y, \omega)$ 的步骤,

[0048] ○接着,从相对空间-光谱相位 $\phi_{\text{R}}(x, y, \omega)$ 减去所述参考空间-光谱相位 $\phi_{\text{ref}}(x, y, \omega)$,以获得表征光束的绝对空间-光谱相位 $\phi_{\text{abs}}(x, y, \omega)$ 的步骤。

[0049] 因此,独立于参考光束,获得表征光束的绝对特征。

[0050] -根据第二可替代的实施方式,第一方法有利地包括:

[0051] ○在参考光束的频率 ω_0 ,测量空间相位 $\phi_{\text{ref}}(x, y, \omega_0)$ 的步骤,所述空间相位 $\phi_{\text{ref}}(x, y, \omega_0)$ 具有由第一光学件引入的参考光束的波前面的曲率的特征;

[0052] ○测量称为“参考空间-光谱相位”的第一子光束的空间-光谱相位 $\phi_{\text{ref}}(x, y, \omega)$ 的步骤,

[0053] ○接着,从相对空间-光谱相位 $\phi_{\text{R}}(x, y, \omega)$ 减去所述参考空间-光谱相位 $\phi_{\text{ref}}(x, y, \omega)$ 和空间-光谱相位 $\frac{\omega}{\omega_0} \phi_{\text{ref}}(x, y, \omega_0)$,以获得表征光束的校正绝对空间-光谱相位的步骤。

[0054] 因此,获得表征光束的绝对特征,同时校正由第一光学件引入的参考光束的波前面的曲率。

[0055] -第一方法有利地包括滤波第一子光束的步骤,使得可以增加所述第一子光束的质量,这由此有助于增加参考光束的质量,该参考光束来源于第一子光束的同化点光源的一部分。滤波步骤可以是线性滤波步骤。因此,有利地改进了第一子光束的空间特性。可替代地,滤波步骤可以是非线性滤波步骤。因此,第一子光束的光谱有利地传开,并且由此参考光束是离开第一光学件的第一子光束。通过加宽参考光束的光谱,这有利地至少部分地排除在所述滤波步骤之前表征光束的一些区域包括不在参考光束的光谱中的频率的情况。滤波步骤也可以包括线性滤波的第一子步骤和非线性滤波的第二子步骤。

[0056] 本发明的另一个方面涉及使用根据本发明的第一方面的用于光束表征的设备,用于光束表征的第二方法,该第二方法包括下列步骤:

[0057] -通过分离器光学件分离光束为第一子光束和第二子光束,第一子光束采用第一光学路径,并且第二子光束采用第二光学路径;

[0058] -第一子光束传播通过第一光学件,并且第二子光束传播通过第二光学件,所述第一和第二光学件由于控制装置而被分别地设置在第一和第二光学路径中,这样称为“参考光束”的离开第一光学件时的第一子光束,以及称为“表征光束”的离开第二光学件时的第二子光束被时间延迟 τ 分开;

[0059] -通过复合器光学件的参考光束和表征光束的重组,这样光束空间地干涉和形成二维干涉模式,该二维干涉模式沿着第一平面延伸;

[0060] -通过测量系统测量至少一部分二维干涉模式的频谱,该测量系统包括分光计,该分光计具有沿着第一平面的第一空间方向延伸的入口狭缝;

[0061] -在频谱的至少一个空间点的时域中傅里叶变换的计算,在时域中所述傅里叶变换具有时间中间峰以及第一和第二时间侧峰;

[0062] -对于所述第一和第二时间侧峰之一,通过计算器,在频域中傅里叶变换的计算;

[0063] -对于频域中所述傅里叶变换,通过计算器的称为“相对光谱振幅”的光谱振幅 $A_R(\omega)$ 和称为“相对空间-光谱相位”的空间-光谱相位 $\phi_R(x, y, \omega)$ 的计算。

[0064] 根据本发明一个方面,用于光束表征的第二方法有利地使得它可以排除随着时间过去光源特性中潜在的波动。实际上,所述第二方法能够实现称为“单发射”的测量,即,在脉冲光源的情况下,它只使用单光脉冲,或者实际上,在连续光源的情况下,它只使用光源非常短的持续时间,在该持续时间,可以考虑其特性不波动。

[0065] 除了前面段落中已经提到的特征,根据本发明的一个方面,用于光束表征的第二方法可以具有单独考虑的或根据其任何技术上可能组合考虑的下面其中的一个或多个另外特征:

[0066] -测量至少一部分二维干涉模式的频谱的步骤包括下列子步骤:

[0067] ○设置测量系统的分光计,这样分光计的入口狭缝适于接收所述至少一部分二维干涉模式,所述至少一部分沿着第一平面的第一空间维度延伸;

[0068] ○由于分光计,测量所述至少一部分二维干涉模式的频谱,所述至少一部分沿着第一平面的第一空间维度延伸。

[0069] -可替代地,测量至少一部分二维干涉模式的频谱的步骤包括下列子步骤:

[0070] ○测量系统包括多个光学纤维,根据二维矩阵,设置所述多个光学纤维的输入端在第一平面中,以能够沿着第一平面的第一空间方向和沿着第一平面的第二空间方向,取样二维干涉模式;

[0071] ○在测量系统的分光计的入口狭缝上设置所述多个光学纤维的输出端;

[0072] ○由于测量系统的分光计,测量沿着第一平面的第一和第二空间方向的二维干涉模式的取样的频谱。

[0073] -第二方法有利地包括:

[0074] ○在参考光束的频率 ω_0 ,测量空间相位 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ 的步骤,所述空间相位 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ 具有由第一光学件引入的参考光束的波前面的曲率的特征;

[0075] ○接着,从相对空间-光谱相位 $\phi_R(x, y, \omega)$ 减去空间-光谱相位 $\frac{\omega}{\omega_0} \phi_{ref}(x, y, \omega_0)$,以获得表征光束的校正相对空间-光谱相位的步骤。

[0076] 因此,考虑由第一光学件引入的参考光束的波前面的曲率。

[0077] -根据第一可替代的实施方式,第二方法有利地包括:

[0078] ○测量称为“参考空间-光谱相位”的第一子光束的空间-光谱相位 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ 的步骤,

[0079] ○接着,从相对空间-光谱相位 $\phi_R(x, y, \omega)$ 减去所述参考空间-光谱相位 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$,以获得表征光束的绝对空间-光谱相位 $\phi_{abs}(x, y, \omega)$ 的步骤。

[0080] 因此,独立于参考光束,获得表征光束的绝对特征。

[0081] 根据第二可替代的实施方式,第二方法有利地包括:

[0082] ○在参考光束的频率 ω_0 ,测量空间相位 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ 的步骤,所述空间相位 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ 具有由第一光学件引入的参考光束的波前面的曲率的特征;

[0083] ○测量称为“参考空间-光谱相位”的第一子光束的空间-光谱相位 $\phi_{\text{ref}}(x, y, \omega)$ 的步骤,

[0084] ○接着,从相对空间-光谱相位 $\phi_{\text{R}}(x, y, \omega)$ 减去所述参考空间-光谱相位 $\phi_{\text{ref}}(x, y, \omega)$ 和空间-光谱相位 $\frac{\omega}{\omega_0} \phi_{\text{ref}}(x, y, \omega_0)$,以获得表征光束的校正绝对空间-光谱相位的步骤。

[0085] 因此,获得表征光束的绝对特征,同时校正由第一光学件引入的参考光束的波前面的曲率。

[0086] -第二方法有利地包括滤波第一子光束的步骤,使得可以增加所述第一子光束的质量。这由此有助于增加参考光束的质量,该参考光束来源于第一子光束的同化点光源的一部分。滤波步骤可以是线性滤波步骤。因此,有利地改进了第一子光束的空间特性。可替代地,滤波步骤可以是非线性滤波步骤。因此,第一子光束的光谱有利地传开,并且由此参考光束是离开第一光学件的第一子光束。通过加宽参考光束的光谱,这有利地至少部分地排除在所述滤波步骤之前表征光束的一些区域包括不在参考光束的光谱中的频率的情况。滤波步骤也可以包括线性滤波的第一子步骤和非线性滤波的第二子步骤。

[0087] 通过阅读下面的说明书以及通过检查伴随着说明书的附图,将更好地理解本发明和其不同的应用。

附图说明

[0088] 为示意性目的,呈上附图,并且绝不是限制本发明。

[0089] 图1a示例了在没有空间-时间耦合的理想情况下,超短波脉冲激光束中电磁能的分布的例子。

[0090] 图1b示例了在有空间-时间耦合的非理想情况下,超短波脉冲激光束中电磁能的分布的例子。

[0091] 图2a示例了根据本发明的第一实施方式,使用用于光束表征的第一设备,用于光束表征的方法的第一步骤。

[0092] 图2b示例了根据本发明的第一实施方式,使用用于光束表征的第一设备,用于光束表征的方法的第二步骤。

[0093] 图2c示例了根据本发明的第一实施方式,使用用于光束表征的第一设备,用于光束表征的方法的第三步骤。

[0094] 图3示例了根据本发明的第一实施方式,使用用于光束表征的第二设备,用于光束表征的方法的可替代的构造。

[0095] 图4示例了在根据本发明的第一实施方式,用于光束表征的方法的步骤期间,对于试验地测量的给定时间延迟的二维干涉模式的实施例。

[0096] 图5a、5b和5c分别地表示对于在所述参考光束和表征光束之间的第一、第二和第三时间延迟,表征光束和参考光束的空间-时间轮廓的第一、第二和第三模拟。

[0097] 图6a、6b和6c分别地表示分别地对应于图5a、5b和5c的构造的第一、第二和第三二维干涉模式。

[0098] 图7a表示在给定点(x,y)测量的部分时间干涉图的外观。

- [0099] 图7b表示图7a的部分时间干涉图的傅里叶变换的外观。
- [0100] 图8示例了根据本发明的实施方式,用于光束表征的方法的第一变化形式。
- [0101] 图9示例了根据本发明的实施方式,用于光束表征的方法的第二变化形式。
- [0102] 图10示例了根据本发明的实施方式,用于光束表征的方法的第五变化形式。
- [0103] 图11a示例了使用用于光束表征的第三设备,根据本发明的第二实施方式,用于光束表征的方法。
- [0104] 图11b表示用于光束表征的第三设备的部分立体图。
- [0105] 图11c表示在根据本发明的第二实施方式,用于光束表征的方法的步骤期间,对于试验地测量的给定时间延迟的二维干涉模式的频谱的实施例。
- [0106] 图12a示例了使用用于光束表征的第四设备,根据本发明的第二实施方式,用于光束表征的方法的可替代的构造。
- [0107] 图12b表示用于光束表征的第四设备的部分立体图。

具体实施方式

- [0108] 除非另外陈述,不同图中出现的相同元件具有单一的附图标记。
- [0109] 之前已经描述了图1a和1b。
- [0110] 图2a、2b和2c分别地表示根据本发明的第一实施方式,用于光束表征的方法的10的第一步骤a)、第二步骤b)和第三步骤c)。第一实施方式也称为“多发射模式”。随后描述第二实施方式,称为“单发射模式”。
- [0111] 根据本发明的第一实施方式,方法10使用用于光束表征的第一设备1,其表示在图2a至图2c中。该设备1包括:
- [0112] -光学件SR;
 - [0113] -第一光学件O1;
 - [0114] -第二光学件O2;
 - [0115] -控制时间延迟 τ 的装置Pz;
 - [0116] -测量系统SM1;
 - [0117] -以及计算器K。
- [0118] 在图2a至图2c中所特别地示例的实施方式的实施例中,第一光学件O1和第二光学件O2是反射光学件,诸如镜子。根据可替代的实施方式,未示例出,第一光学件O1和/或第二光学件O2也可以是光学透镜。在一个或另一个情况下,第一和第二光学件O1和O2具有不同的曲率半径。在图2a至图2c中所特别地示例的实施方式的实施例中,第一光学件O1是发散光学件,并且更精确地是发散镜,而第二光学件O2可以是平面光学件,并且更精确地是平面镜。根据可替代的实施方式,未示例出,第一光学件O1可以是会聚光学件和/或第二光学件O2可以是发散或会聚光学件。因此,可以设想第一和第二光学件O1和O2的多种组合,只要第一光学件O1的曲率半径不同于第二光学件O2的曲率半径。
- [0119] 在本说明书的其余部分参考中心点O和轴线x、y和z的标准正交系统,定义了平面Oxz、Oxy和Oyz。
- [0120] 在图2a中示例的所述第一步骤a)期间,由光源SL产生的光束FL被发送到光学件SR。在这里所述实施方式的特定实施例中,光源SL是脉冲飞秒激光器,能够在10Hz的频率产

生25飞秒数量级的脉冲,每个脉冲具有2.5J数量级的能量。该脉冲激光器的峰功率具有100TW的数量级,而它的平均功率达到约25W。因此,在所考虑的实施例中,通过连续的光脉冲,形成在光源SL的输出处的光束FL。在所考虑的实施例中,光束FL具有80mm数量级的直径。通常来讲,在与所述光束的传播方向正交的平面中测量光束的直径。因此,在平行于平面Oxz的平面中测量光束FL的直径。例如,光学件SR是自反射镜,当它接收光束时,其反射一部分,并且传输其另一部分。

[0121] 然后,光学件SR将光束FL分离成第一子光束F1和第二子光束F2。光学件SR定义第一子光束F1的第一光学路径C1和第二子光束F2的第二光学路径C2。第一和第二子光束具有与初始光束FL基本上相同直径。在平行于平面Oxy的平面中测量第一子光束的直径,而在平行于平面Oxz的平面中测量第二子光束的直径。在这里所述实施方式的实施例中,光束FL以45°数量级以下的入射角 α 到达光学件SR。光束FL也可以通过同样方式以135°数量级以下的入射角到达光学件SR。在这里所述的实施方式的实施例中,第一子光束F1由光学件SR传输,而第二子光束F2由光学件SR反射。根据优选的可替代实施方式,第一子光束F1由光学件SR反射,而第二子光束F2由光学件SR传输。

[0122] 在图2b中示例的所述第二步骤b)期间,第一子光束F1传播和至少部分地到达第一光学路径C1中所布置的第一光学件O1,而第二子光束F2传播和至少部分地到达第二光学路径C2中所布置的第二光学件O2。选择第一光学路径C1中第一光学件O1和第二光学路径C2中第二光学件O2的定位,这样称为“参考光束Fref”的离开第一光学件的第一子光束以及称为“表征光束Fcar”的离开第二光学件的第二子光束被时间延迟 τ 分开。

[0123] 优选地布置第一光学件O1,以致于第一子光束F1以正入射到达第一光学件O1。优选地布置第二光学件O2,以致于第二子光束F2以正入射到达第二光学件O2。换言之,在所考虑的实施例中,第一光学件O1平行于平面Oxy布置,而第二光学件O2平行于平面Oxz布置。

[0124] 在图2a至图2c中所特别地示例的实施方式的实施例中,第一子光束F1和第二子光束F2具有平的或特别平的波前面。在第一光学件O1的下游,其是发散镜,参考光束Fref具有球形波前面。因此,考虑第一光学件O1的第一曲率,相对于第一子光束F1的波前面,修改参考光束Fref的波前面。在第二光学件O2的下游,其是平面镜,表征光束Fcar具有平的或特别平的波前面,基本上与第二子光束F2的波前面相同。根据可替代的实施方式,未示例出,第一光学件O1不可以相对于第一子光束F1修改参考光束Fref的曲率半径和/或第二光学件O2可以相对于第二子光束F2修改表征光束的曲率半径,只要第一光学件O1的曲率半径不同于第二光学件O2的曲率半径。

[0125] 第二光学件O2的直径优选地大于或等于光束FL的直径,这里是在平行于平面Oxz的平面中测量的直径,以致于表征光束Fcar的直径在第二光学件O2的下游和上游保持基本相同。通常地讲,有利地选择第二光学件O2的直径d02,以致于:

$$[0126] \quad d_{02} > D_{FL} * \sqrt{2}$$

[0127] 光束FL具有直径DFL。在这里所述的实施方式的实施例中,光束FL的直径DFL具有8cm的数量级,有利地选择直径d02,以致于: $D_{Op1} > 8 * \sqrt{2}$ 。可以选择具有15cm数量级的直径d02的第二光学件O2。

[0128] 希望在根据本发明的第一实施方式,用于表征的方法10中,控制参考光束Fref和表征光束Fcar之间的时间延迟 τ ,这样所述时间延迟 τ 可以扫描具有步调P1的时间间隔T1。

随后详述时间间隔 T_1 的选择和步调 P_1 。使用控制装置 P_z ，以控制参考光束 F_{ref} 和表征光束 F_{car} 之间的时间延迟 τ 。控制装置 P_z 通常是具有 $250\mu\text{m}$ 行进的压电级，可以实施具有几埃 \AA 数量级精确度的移动。控制装置 P_z 优选地可以调整沿着第一光学件 O_1 的 z 轴线的定位。通过沿着 z 轴线平移所述第一光学件 O_1 ，也就是说通过变化第一和第二光学路径 C_1 和 C_2 之间光学路径中的差异，控制参考光束 F_{ref} 和表征光束 F_{car} 之间的时间延迟 τ 。根据可替代的实施方式，控制装置 P_z 可以调整沿着第二光学件 O_2 的 y 轴线的定位。根据另一个可替代的实施方式，控制装置 P_z 可以调整沿着第一光学件 O_1 的 z 轴线的定位和调整沿着第二光学件 O_2 的 y 轴线的定位两者。根据该后面的可替代实施方式，那么控制装置 P_z 通常包括第二压电级。在本说明书的其余部分中，无差别地使用术语“控制装置”和“压电级”。

[0129] 然后，参考光束 F_{ref} 和表征光束 F_{car} 分别地沿着光学件 SR 的第一和第二光学路径 C_1 和 C_2 传播到光学件 SR ，用于参考光束 F_{ref} 和表征光束 F_{car} 的重组。在这里所考虑的构造的实施例中，光学件 SR 确保首先光束 FL 的分离功能，并且其次参考光束 F_{ref} 和表征光束 F_{car} 的重组功能。然而，代替单个光学件 SR ，可以替换地使用确保光束 FL 分离功能的第一光学件以及与第一光学件分开的确保参考光束 F_{ref} 和表征光束 F_{car} 的重组功能的第二光学件。在后面描述的图3中特别地示例了这种替换的构造。

[0130] 在图2c中示例的第三步骤c)期间，由光学件 SR 重组参考光束 F_{ref} 和表征光束 F_{car} 。参考光束 F_{ref} 和表征光束 F_{car} 然后传播到测量系统 SM_1 。布置测量系统 SM_1 ，使得表征光束 F_{car} 以基本上正入射到达测量系统 SM_1 。此后将考虑平行于平面 Oxy 的两个平面：

[0131] -第一平面 z_1 ，在该平面中实施对于每个时间延迟 τ 的二维干涉模式 M_1 的测量，以及

[0132] -第二平面 z_2 ，其是第一光学件 O_1 的平面。

[0133] 在图2b和图2c中表示第一和第二平面 z_1 和 z_2 。选择这里沿着 z 轴线测量的测量系统 SM_1 相对于第一光学件 O_1 的距离，以致于当参考光束 F_{ref} 和表征光束 F_{car} 到达第一测量平面 z_1 时，参考光束 F_{ref} 的直径大于或等于，并且优选地大于表征光束 F_{car} 的直径。因此，这使得参考光束 F_{ref} 可以空间地干涉表征光束 F_{car} 的整体。当参考光束 F_{ref} 的直径等于表征光束 F_{car} 的直径时，参考光束 F_{ref} 的整体干涉表征光束 F_{car} 的整体。在参考光束 F_{ref} 的直径大于表征光束 F_{car} 的直径的优选情况下，只有一部分参考光束 F_{ref} 干涉表征光束 F_{car} 。进一步，测量系统 SM_1 沿着光学件 SR 的 z 轴线，参考光束 F_{ref} 的直径越大，参考光束 F_{ref} 干涉表征光束 F_{car} 的部分越小。以这种方式，干涉表征光束 F_{car} 的参考光束 F_{ref} 的部分越小，所述参考光束 F_{ref} 的部分越可能具有更少的缺陷，因此通过根据本发明第一实施方式用于表征的方法10可以获得的的结果的质量越好。参考光束 F_{ref} 也影响二维干涉模式 M_1 的对比，因此影响测量的质量。二维干涉模式 M_1 的对比实际上受表征光束 F_{car} 的强度和参考光束 F_{ref} 的强度之间的比率影响，也就是说受在第一测量平面 z_1 中表征光束 F_{car} 的尺寸和参考光束 F_{ref} 的尺寸之间的比率影响。当在第一测量平面 z_1 中表征光束 F_{car} 和参考光束 F_{ref} 的强度相等时，二维干涉模式 M_1 的对比是最佳，这暗示参考光束 F_{ref} 不可以太小。因此，涉及发现参考光束 F_{ref} 的尺寸的折中。

[0134] 它们重组以后，参考光束 F_{ref} 和表征光束 F_{car} 空间地干涉。当被给定时间延迟 τ 分开的参考光束 F_{ref} 和表征光束 F_{car} 到达测量系统 SM_1 时，它们形成二维干涉模式 M_1 。该二维干涉模式 M_1 取决于两个横向方向 x 和 y ，并且对于给定时间延迟 τ 测量该二维干涉模式 M_1 。因

此,可以注意到二维干涉模式 $M1:M1_{\tau}(x,y)$ 。在图4中表示对于给定时间延迟 τ ,试验地测量二维干涉模式 $M1$ 的例子。二维干涉模式 $M1$ 通常地是一套同心环,环的厚度随着环远离模式中心移动而减小。

[0135] 然后,通过测量系统 $SM1$ 测量二维干涉模式 $M1$ 。根据尺寸,即表征光束 F_{car} 的直径,建议至少两种类型的测量系统。

[0136] -第一种类型的测量系统,包括照相机的仅仅一个传感器 CCD (电荷耦合器件),可以在表征光束 F_{car} 的直径小于或等于所述传感器 CCD 的直径情况下使用。实际上,该第一种类型的测量系统通常可以在表征光束 F_{car} 的直径小于 $1cm$ 的情况下使用。

[0137] -在表征光束 F_{car} 的直径大于所述传感器 CCD 的直径的情况下,可以使用第二种类型的测量系统:该第二种类型的测量系统除了传感器 CCD 以外还包括:漫射屏 E 和物镜 Obj 。在图2a到2c中更特别地表示该第二种类型的测量系统。漫射屏 E ,例如,布置为基本上平行于平面 Oxy ,漫射二维干涉模式 $M1$ 的信号 $s1$ 。物镜 Obj 捕获信号 $s1$,并且在传感器 CCD 上形成二维干涉模式 $M1$ 的减小图像。

[0138] 如同第二种类型的测量系统 $SM1$,用第一种类型的测量系统,那么传感器 CCD 记录二维干涉模式 $M1$ 的图像。所述图像然后可以传输给计算器 K 。后面将讨论二维干涉模式 $M1$ 的所述图像所要求的空间分辨率。

[0139] 对于扫描具有步调 $P1$ 的时间间隔 $T1$ 的每个时间延迟 τ 重复参考图2a、2b和2c刚刚已经描述的三个步骤。步骤a)、b)和c)的重复总数对应于它希望测量二维干涉模式 $M1$ 的时间延迟 τ 的次数 N ,等于: $N=E(T1/P1)+1$,其中 E 指整函数部分。

[0140] 现在将重新考虑用于扫描或检测时间延迟 τ 的时间间隔 T 和步调 $P1$ 的选择。要满足两个主要条件:

[0141] -第一个条件涉及步调 $P1$ 。根据Shannon标准,步调 $P1$ 是足够小的以适当地取样表征光束 F_{car} 的光学周期,尤其以避免混叠效应。Shannon标准由此表示至少进行每个光学周期的两个测量点。对于光谱居中在 $800nm$ 的表征光束 F_{car} ,具有 $2.6fs$ 数量级的光学周期,步调 $P1$ 由此小于约 $1.3fs$,即,第一光学件 $O1$ 或第二光学件 $O2$ 的移动小于 $c \times P1/2 = 200nm$, c 指光速。由此希望能够以足够的精确性,即,通常 nm 的数量级控制第一光学件 $O1$ 或第二光学件 $O2$ 的移动。因此,优选地使用如之前提到的压电级 Pz ,以确保第一光学件 $O1$ 或第二光学件 $O2$ 的移动。这种压电级 Pz 实际上确保小于 $1nm$ 的精确性。实际上,表征光束 F_{car} 的光谱具有一定宽度,并且为了避免在所述光谱的最高频率上的混叠,优选地选择步调 $P1$ 通常两次,小于由Shannon标准得出的最小值,即,在该特定例子中: $P1 \approx 0.7fs$ 。

[0142] -第二个条件涉及时间间隔 $T1$ 。它涉及扫描足够大的时间间隔 $T1$,以观察参考光束 F_{ref} 与表征光束 F_{car} 的所有点的干涉。实际上,由于光束 FL 的脉冲性质,对于给定的时间延迟 τ ,仅仅在冠上观察到参考光束 F_{ref} 和表征光束 F_{car} 之间的干涉,这覆盖表征光束 F_{car} 的仅仅一部分。为了重建表征光束 F_{car} 的整体,因此扫描足够大的时间间隔 $T1$ 是必需的,以致于该冠连续地通过表征光束 F_{car} 的所有点。在图5a到5c以及图6a到6c中示例了这种概念。

[0143] 图5a表示对于所述光束 F_{car} 和 F_{ref} 之间的零时间延迟 τ ,表征光束 F_{car} 和参考光束 F_{ref} 的空间-时间轮廓的第一模拟。在该第一模拟中,在第一区域 $Int1$ 上参考光束 F_{ref} 干涉表征光束 F_{car} ,位于表征光束 F_{car} 的中心。在该第一区域 $Int1$ 的两侧上,表征光束 F_{car} 的侧区域不干涉参考光束 F_{ref} 。图6a表示第一个二维干涉模式,对应于图5a的构造,即,在参

考光束Fref和表征光束Fcar之间零时间延迟 τ 。

[0144] 图5b表示对于所述光束Fcar和Fref之间的13fs的时间延迟 τ ,表征光束Fcar和参考光束Fref的空间-时间轮廓的第二模拟。在该第二模拟中,在第二和第三区域Int2和Int3上参考光束Fref干涉表征光束Fcar。在所述第二和第三区域Int2和Int3之间,表征光束的中心区域不干涉参考光束Fref。图6b表示第二个二维干涉模式,对应于图5b的构造,即在参考光束Fref和表征光束Fcar之间13fs的时间延迟 τ 。

[0145] 图5c表示对于分开所述光束Fcar和Fref的27fs的时间延迟 τ ,表征光束Fcar和参考光束Fref的空间-时间轮廓的第三模拟。在该第三模拟中,参考光束Fref实际上不再干涉表征光束Fcar。图6c表示第三个二维干涉模式,对应于图5c的构造,即在参考光束Fref和表征光束Fcar之间27fs的时间延迟 τ 。

[0146] 接着,通过本领域技术人员公知的方式,可以容易地计算时间间隔T1所覆盖的或者距离间隔 Δz 所覆盖的。因此,该距离间隔 Δz 可以表示为:

$$[0147] \quad \Delta z = \frac{\Delta x^2}{2L}$$

[0148] 其中 $\Delta x = \Delta y$,表征光束Fcar的半径,并且L是第一光学件O1和测量平面之间的距离。已知在该距离中步调最多是 $\lambda/2$, λ 是表征光束的波长,实现完整扫描的步调的最小总数N是:

$$[0149] \quad N = \Delta x^2 / L \times \lambda$$

[0150] 在激光源SL的前述特定实施例中,该激光源SL产生25fs的脉冲和达到100TW的峰功率,表征光束具有 $\Delta x = 40\text{mm}$ 的半径,并且波长 $\lambda = 800\text{nm}$ 。

[0151] 在这种特定情况下,结果因此是: $N = 2 \cdot 10^6 / L$,用mm表示第一光学件O1和测量平面之间的距离L。为此,进行完整扫描的步调的最小数N不太重要,有利地大数值将由此用于第一光学件O1和测量平面之间的距离L。例如,对于 $L = 1000\text{mm}$,进行其的步调的最小数N等于: $N = 2 \cdot 10^3$ 。已知所考虑的激光源SL的重复速率是10Hz,然后,完整扫描需要约3分钟,通过仅进行每个测量点的单次激光发射。

[0152] 应该注意到在测量点数量变得至关重要的假设中,即,它导致给定激光源SL步距的太长的测量时间,一种可能性是进行几次“精细”扫描,即,步调遵守如上所解释的Shannon标准,在其之间用更大步调进行扫描,这不遵守Shannon标准。由此获得对一系列不连接的同心环的表征光束Fcar的表征,这在许多情况下可以足够估计表征光束中存在的空间-时间失真。

[0153] 现在,将继续根据本发明第一实施方式用于光束表征的方法10的步骤的描述。可以记得对于用步调P1扫描的时间间隔T1的每个时间延迟 τ ,重复参考图2a、2b和2c的之前描述的三个步骤。在这个N次重复结束时,传感器CCD由此已经记录了对于用步调P1扫描时间间隔T1的每个时间延迟 τ 的相应的二维干涉模式M1的图像,即,N图像。

[0154] 在第四步d)期间,然后计算器K可以从所述的N个二维干涉模式M1的N个图像构建时间干涉图S1。时间干涉图S1取决于两个横向方向x和y以及时间延迟 τ ,时间延迟 τ 用步调P1扫描时间间隔T1。时间干涉图S1由此可以被记做: $S1(x, y, \tau)$ 。图7a表示在给定点(x,y)测量的部分时间干涉图p1的通常外观。部分时间干涉图p1由此可以被记做: $p1_{x,y}(\tau)$ 。时间干涉图S1可以被看做对于所有点(x,y)的部分时间干涉图p1的集合。

[0155] 计算器K然后进行下面第五和第六步骤e)和f)：

[0156] e) 对于每个点 (x, y) ，计算相对于变量 τ 的时间干涉图 S_1 的傅里叶变换 S_1' ，以成为频率 ω 的空间。傅里叶变换 S_1' 由此可以被记做： $S_1'(x, y, \omega)$ 。傅里叶变换 S_1' 有频率中间峰 f_c 、第一频率侧峰 f_{11} 和第二频率侧峰 f_{12} 。图7b表示图7a的部分时间干涉图 p_1 的部分傅里叶变换 p_1' 的通常外观。部分傅里叶变换 P_1' 由此可以被记做： $p_1'(x, y, \omega)$ 。部分傅里叶变换 p_1' 由此表示在给定点 (x, y) 傅里叶变换 S_1' 的部分频率中心峰 f_c 以及第一和第二频率侧峰 f_{11} 和 f_{12} 。傅里叶变换 S_1' 可以被看做对于所有点 (x, y) 的部分傅里叶变换 p_1' 的集合。

[0157] f) 傅里叶变换 S_1' 的第一频率侧峰 f_{11} 或第二频率侧峰 f_{12} 的选择，并且对于所选择的频率侧峰，计算称为“相对光谱振幅”的其光谱振幅 $A_R(\omega)$ 和称为“相对空间-光谱相位”的其空间-光谱相位 $\Phi_R(x, y, \omega)$ 。所选择的频率侧峰的选择决定了应用于此后所获得结果的符号惯例。

[0158] 所选择的频率侧峰的空间-光谱相位 $\Phi_R(x, y, \omega)$ 是表征光束 F_{car} 的空间-光谱相位和参考光束 F_{ref} 的空间-光谱相位之差。所选择的频率侧峰的光谱振幅 $A_R(\omega)$ 是表征光束 F_{car} 的光谱振幅和参考光束 F_{ref} 的光谱振幅的乘积。已经描述的步骤由此使得可以获得：

[0159] -相对于参考光束的空间-光谱相位的表征光束 F_{car} 的空间-光谱相位，因此名称为“相对空间-光谱相位”；

[0160] -相对于参考光束的光谱振幅的表征光束 F_{car} 的光谱振幅，因此名称为“相对光谱振幅”。

[0161] 因此，表征光束 F_{car} 的所有点 (x, y) 可以与相同的参考光束比较，这可以潜在地保持未确定，相对于参考的这种类型的光束表征使得可以根据横向方向 x 和 y 以及时间 t ，获取电磁场 $E(x, y, t)$ 的形状变化。

[0162] 对于每个时间延迟 τ ，通过测量系统 SM_1 的传感器 CCD ，将进行二维干涉模式 M_1 的图像返回到获得期间所需要的空间分辨率。如图4表示，例如根据本发明第一实施方式用于光束表征的方法10表示测量非常紧密压缩的干涉带。这来源于使表征光束 F_{car} 的实际上平的波前面与参考光束 F_{ref} 的球形波前面干涉的事实。当移动远离重组光束的中心时，这两个前面之间的角度由此变得越来越大，如同例如在图5a到5c中所示例的，以致于干涉条带变得越来越被紧密地压缩。在大直径的光源 SL 的情况下，像，例如上述光源 SL 的特定情况，其发射80mm直径的光束 FL ，这表明对于二维干涉模式 M_1 ，以及由此时间干涉图 S_1 的测量，具有可用的良好空间分辨率。实际上，这强制使用照相机，其像素数足以使得可以解析干涉条带。在这里所述的构造的实施例中，由此使用29Mpx的照相机。另一方面，不必寻求在这些像素集合上重建表征光束的电磁场，因为对于大多数现存光源，所述电磁场的结构空间地随着这种高频率而变化，这是非常重要的。沿着 x 和 y 轴线的 100×100 网格实际上完全足以重建表征 F_{car} 的激光束。为了限制处理的数据体积以及处理时间，因此有利地一旦已经获得二维干涉模式的图像，可以二次采样它们，并且可以仅仅保持数据在初始图像的子网格上。

[0163] 对本发明第一实施方式已经给出的说明书补充，下面呈现所述方法10的数学分析。让 $E_{car}(x, y, z, t)$ 为表征光束 F_{car} 的电磁场。让 $E_{ref}(x, y, z, t)$ 为参考光束 F_{ref} 的电磁场，根据后面描述的变化形式，其精确地表示可以潜在地保持未确定，或者实际上被精确地确定。如之前所述，参考光束 F_{ref} 的电磁场 $E_{ref}(x, y, z, t)$ 相对于表征光束 F_{car} 的电磁场 $E_{car}(x, y, z, t)$ 可以被时间延迟 τ 或延滞、变量所移位。

[0164] 可以通过复杂方式定义表征光束F_{car}和参考光束F_{ref}的电磁场E_{car}(x,y,z,t)和E_{ref}(x,y,z,t),即,通过通式 $E(t) = \hat{E} \exp(i\omega_L t)$, \hat{E} 是复包络,并且 ω_L 是载波频率。

[0165] 在第一平面z₁的一个点(x,y,z₁),总的场E_{tot}(x,y,z₁,t)来自于表征光束F_{car}的场E_{car}(x,y,z,t)和参考光束F_{ref}的场E_{ref}(x,y,z,t)的叠加,等于:

$$[0166] \quad E_{tot}(x,y,z_1,t) = E_{car}(x,y,z_1,t) + E_{ref}(x,y,z_1,t-\tau)$$

[0167] 测量时间干涉图S₁,即,在第一平面z₁的每点,完整时间的入射光的量,其由此成比例于:

$$[0168] \quad S_1(x,y,\tau) = \int |E_{car}(x,y,z_1,t) \times E_{ref}(x,y,z_1,t-\tau)|^2 dt$$

[0169] 这因此导致:

$$[0170] \quad S_1(x,y,\tau) = \epsilon_1 + \epsilon_2$$

$$[0171] \quad + \int E_{car}(x,y,z_1,t) \times E_{ref}^*(x,y,z_1,t-\tau) dt$$

$$[0172] \quad + \int E_{car}^*(x,y,z_1,t) \times E_{ref}(x,y,z_1,t-\tau) dt$$

[0173] 其中 ϵ_1 和 ϵ_2 是仅仅用表征光束F_{car}和仅仅用参考光束F_{ref}在测量平面z₁的点(x,y)分别地获得的信号。

[0174] 当根据 τ 测量时间干涉图S₁(x,y, τ)时,由此获得三个术语。

[0175] 第一术语 $\epsilon_1 + \epsilon_2$,独立于 τ ,是表征光束F_{car}和参考光束F_{ref}的不连贯的总和。

[0176] 第二术语记做 $J(x,y,\tau) = \int E_{car}(x,y,z_1,t) \times E_{ref}^*(x,y,z_1,t-\tau) dt$,是表征光束的电磁场E_{car}(x,y,z₁,t)和参考光束F_{ref}的电磁场E_{ref}(x,y,z₁,t)之间的交叉相关函数。

[0177] 第三术语记做 $J^*(x,y,\tau) = \int E_{car}^*(x,y,z_1,t) E_{ref}(x,y,z_1,t-\tau) dt$,是第二术语的共轭物,即,是参考光束F_{ref}的电磁场E_{ref}(x,y,z₁,t)和表征光束的电磁场E_{car}(x,y,z₁,t)之间的交叉相关函数。

[0178] 通过使用分解成复包络和载波包络,第二术语J(x,y, τ)的结果是:

$$[0179] \quad J(x,y,\tau) = e^{i\omega_L \tau} \int \hat{E}_{car}(x,y,z_1,t) \times \hat{E}_{ref}^*(x,y,z_1,t-\tau) dt$$

[0180] 函数J(x,y, τ)由此在频率 ω_L 根据 τ 振动,而它的共轭物在频率 $-\omega_L$ 根据 τ 振动。通过关于 τ 进行S₁(x,y, τ)的傅里叶变换,由此获得三个峰,对应于上述总和的三个术语,分别地在频率0、 ω_L 和 $-\omega_L$ 居中。如之前所述,特别地在图7b中示例了这点。

[0181] 可以选择对应于J(x,y, τ)的傅里叶变换的峰。

[0182] 根据前面用于J(x,y, τ)和交叉相关定理的方程式,通过关系式给出关于函数J(x,y, τ)的变量 τ 的傅里叶变换J'(x,y, ω):

$$[0183] \quad J'(x,y,\omega) = \hat{E}_{car}'(x,y,z_1,\omega) \times \hat{E}_{ref}'^*(x,y,z_1,\omega) \otimes \delta(\omega - \omega_L)$$

[0184] 其中函数记做' ',对应于关于 τ 的傅里叶变换。换言之,通过进行关于 τ 的S₁(x,y, τ)的傅里叶变换,并且通过选择居中在该傅里叶变换的 ω_L 上的频率侧峰,获得表征光束的电磁场的光谱 $\hat{E}_{car}'(x,y,z_1,\omega)$ 和参考光束的电磁场的共轭光谱 $\hat{E}_{ref}'^*(x,y,z_1,\omega)$ 的乘积。可以观察到也可以选择 $-\omega_L$ 居中的频率侧峰。由此,获得表征光束的电磁场的共轭光谱和参考光束的电磁场的光谱的乘积。所选择的频率侧峰的选择简单地决定了应用于此后所获得结果的符号惯例。

[0185] 因此,如上所述,该测量使用光谱振幅和空间-光谱相位的定义,由此给出了

[0186] -获取表征光束的电磁场和参考光束的电磁场的光谱振幅的乘积,

[0187] -以及获取表征光束的电磁场和参考光束的电磁场的空间-光谱相位之差。

[0188] 现在将描述本发明第一实施方式的第一变化形式。所述第一变化形式有利地可以考虑随着时间过去特性,诸如光源SL的强度和/或强度空间分布的潜在波动,即,在脉冲光源SL的情况下,通常地从一个脉冲到下一个脉冲。在扫描时间间隔T1期间,光源SL的强度和/或强度空间分布的潜在波动实际上能够降低所测量的二维干涉模式,以及由此从其推导出的复合光谱。

[0189] 在该第一变化形式中,根据本发明第一实施方式用于光束表征的方法10包括在图8中示例的步骤g),计算随着时间过去的至少一种特性,诸如光源SL的强度和/或强度空间分布。在计算强度空间分布的情况下,所述计算接着可以用于至少部分地校正正在所进行的干涉仪测量上光源SL的强度空间分布的潜在波动的效果。为了计算光源SL的至少一种特性,可以在光束FL上进行简单的取样,并且可以成像所述取样。例如,这可以通过在光学件SR上游的光束FL的路径中放置分离器光学件来进行。然而,该方案不理想,因为对于大直径的超短波光束,所述分离器光学件能够显著地影响光束FL的空间-时间特性。优选的方案包括使用仅仅部分地反射的第二光学件O2,即,例如裸载玻片。可以在传输通过第二光学件O2的部分上测量表征光束Fcar的空间强度轮廓,所述传输部分此后不用于干涉目的。而且,部分地反射的光学件的使用可以有助于表征光束Fcar和参考光束Fref的能量的更好平衡,并且由此获得对二维干涉模式M1的更好对比。

[0190] 在图8中表示的特定实施例中,在光束FL分离的第一步骤a)之后,并且在参考光束Fref和表征光束Fcar的重组的第三步骤c)之前,进行步骤g)。与之前关于图2a到图2c描述的光学装备比较,图8的光学装备包括:

[0191] -也可以传输一部分表征光束Fcar的第二光学件O2,例如裸载玻片;

[0192] -第二测量系统SM2,并且可选地第二计算器K2。

[0193] 根据第一变化形式,在所述第一步骤a)结束时,第二子光束F2传播到第二光学件O2。第二光学件O2反射第二子光束F2的第一部分,并且传输第二子光束F2的第二部分。被反射的第二子光束F2的第一部分是表征光束Fcar的第一部分,并且传播到光学件SR,以与参考光束Fref重组,如之前所述。被传输的表征光束Fcar的第二部分是表征光束Fcar的第二部分,并且传播到第二测量系统SM2。

[0194] 布置第二测量系统SM2,以致于表征光束Fcar的第二部分以基本上正入射到达所述第二测量系统SM2。而且,第二测量系统SM2与之前描述的关于图2a到2c的第一测量系统SM1相似。根据表征光束Fcar的第二部分的尺寸,第二测量系统由此包括:

[0195] -称为“CCD2”的唯一地一个第二传感器CCD;

[0196] -或者,除了第二传感器CCD2,第二漫射屏E2和第二物镜Obj2。这是在图8中更特别地表示的情况。

[0197] 第二漫射屏E2,这里布置为平行于平面Oxz,漫射表征光束Fcar的第二部分的信号s2。第二物镜Obj2捕获所述信号s2,并且在第二传感器CCD2上形成表征光束Fcar的第二部分的减小的图像。第二传感器CCD2然后记录表征光束Fcar的第二部分的图像。然后,所述图像可以传输给之前描述的计算器K,或者可替代地第二计算器K2,用于分析表征光束Fcar的第二部分的特性。所述表征光束Fcar的第二部分的特性是光通量FL特性的表征。

[0198] 对于用步调P1扫描时间间隔T1的每个时间延迟 τ ,可以进行刚刚已经描述过的步骤g)至少一次,即,至少N次。特别地,在脉冲光源SL的情况下,对每个脉冲可以进行已经描述的步骤g)。为了最小化扫描持续时间,优选地使用每个时间延迟 τ 的单个脉冲。然而,对于时间间隔T1的给定时间延迟 τ ,可以可替代地使用几次脉冲。

[0199] 现在将描述关于图9的本发明第一实施方式的第二变化形式。所述第二变化形式有利地可以获得独立于参考光束Fref的表征光束Fcar的绝对特征。应该注意到可以组合第一和第二变化形式,或者彼此独立地使用它们。

[0200] 为了获得表征光束Fcar的绝对特征,这涉及测量:

[0201] -参考光束Fref的空间-光谱相位 $\phi_{ref}(x,y,\omega)$,和

[0202] -参考光束Fref的光谱振幅 $A_{ref}(\omega)$ 。

[0203] 已知参考光束Fref的所述的空间-光谱相位 $\phi_{ref}(x,y,\omega)$ 和光谱振幅 $A_{ref}(\omega)$,实际上可以确定表征光束Fref的绝对空间-光谱相位和绝对光谱振幅,并且这样做以致于在任何点(x,y),已经进行时间干涉图S1的测量。

[0204] 在该第二变化形式中,根据本发明第一实施方式,用于光束表征的方法10由此包括:

[0205] -图9中示例的步骤i),测量第一子光束F1的空间-光谱相位 $\phi_{ref}(x,y,\omega)$,和

[0206] -测量第一子光束F1的光谱振幅 $A_{ref}(x,y,\omega)$ 的步骤。

[0207] 刚刚已经描述的两个步骤通常地可以通过相同设备以同时的方式进行。

[0208] 在图9中表示的特定实施例中,在第一步骤a)之后和第二步骤b)之前进行步骤i),在第一步骤a)期间光束FL分离为第一子光束F1和第二子光束F2,在第二步骤b)期间,第一子光束F1被第一光学件O1反射。与之前关于图2a到图2c描述的光学装备比较,图9的光学装备包括:

[0209] -时间测量系统MT;

[0210] -可移除的镜子Ma,使得可以当它在适当位置导引至少一部分参考光束到时间测量系统MT。

[0211] 根据第二变化形式,可移除的镜子Ma布置在第一子光束F1的第一光学路径C1中,以致于在第一步骤a)结束时,至少一部分所述第一子光束F1传播到时间测量系统MT。可替代地,对于可移除的镜子Ma,可以设想使用不可移除的半反射光学件,使得可以传输第一子光束F1的第一部分,并且反射第一子光束F1的第二部分。然而,因为通过光学件的光束的任何传播通常地对所述光束的特性具有影响,所以优选地使用可移除的镜子Ma。例如,时间测量系统MT可以使用:

[0212] -FROG(频率分辨光闸)设备,

[0213] -SPIDER(用于直接电场重建的光谱相位干涉量度法)设备,或者

[0214] -SRSI(自参考的光谱干涉量度法)设备。

[0215] 因此,这在刚刚已经描述过的步骤i)结束时,产生第一子光束F1的空间光谱相位 $\phi_{ref}(x,y,\omega)$ 的测量。然后,例如,可以通过计算器K,从相对空间-光谱相位 $\phi_R(x,y,\omega)$ 减去所述空间-光谱相位 $\phi_{ref}(x,y,\omega)$,以获取表征光束Fcar的空间光谱相位,称为“绝对空间-光谱相位”。

[0216] 由于用于测量空间-光谱相位 $\phi_{\text{ref}}(x, y, \omega)$ 的时间测量系统 MT, 通常地可以测量光谱振幅 $A_{\text{ref}}(\omega)$, 或者可替代地使用分光仪测量光谱振幅 $A_{\text{ref}}(\omega)$ 。

[0217] 由此获得参考光束 Fref 的光谱振幅 $A_{\text{ref}}(\omega)$ 的测量。然后, 通过参考光束 Fref 的相对光谱振幅 $A_{\text{R}}(\omega)$ 除以光谱振幅 $A_{\text{ref}}(\omega)$ 可以获取表征光束 Fcar 的光谱振幅, 称为“绝对光谱振幅”。

[0218] 除了本发明第一实施方式的第一种变化形式已经进行的描述, 下面呈现所述第一变化形式的数学分析。根据本发明第一实施方式, 用于光束表征的方法 10 实际上可以获得具有简单表达的参考光束的电磁场, 并且这由此可以根据所述第二变化形式试验地确定。

[0219] 让 (x_0, y_0) 为第一光学件 O1 的第二平面 z_2 中参考点的坐标, 即, 产生参考光束 Fref 的点, 对于每个时间延迟 τ , 在二维干涉模式 M1 的第一测量平面 z_1 中, 该参考光束 Fref 有效地干涉表征光束 Fcar。就在第一平面 z_1 中干涉表征光束 Fcar 的参考光束 Fref 来自于第二平面 z_2 中一部分所述参考光束 Fref, 其比第一平面 z_1 中表征光束 Fcar 要小来说, 实际上, 可以考虑所述参考点 (x_0, y_0) 是点光源, 其电磁场是均匀的。实际上, 在第二平面 z_2 中所述部分参考光束 Fref 的表面积通常地是第一平面 z_1 中表征光束 Fcar 的表面积的 10% 数量级。在第二平面 z_2 中所述小部分参考光束 Fref 的表面积不必等于第一光学件 O1 的表面。

[0220] 以下列方式记做第二平面 z_2 中参考点的场:

$$[0221] \quad P_{\text{ref}}(t) = P_{\text{ref}}(x_0, y_0, z_2, t)$$

[0222] 然后, 第一测量平面 z_1 中参考光束 Fref 的电磁场可以近似为:

$$[0223] \quad E_{\text{ref}}(x, y, z_1, t) = P_{\text{ref}}(t - r/c)$$

[0224] 其中 r 是坐标 (x_0, y_0, z_2) 的参考点和坐标 (x, y, z_1) 的第一测量平面 z_1 的每个点 (x, y) 之间的距离。因此, 可以几何学地计算距离 $r(x, y)$, 并且由关系式给出:

$$[0225] \quad r(x, y) = \sqrt{(D + f)^2 + x^2 + y^2}$$

[0226] 其中 $D = z_1 - z_2$, 是第一光学件 O1 和第一平面 z_1 之间的距离, 并且 f 是第一光学件 O1 的焦距。实际上, 通常地: $D \gg f$ 。在这里所描述的实施方式的特定实施例中, $D = 3\text{m}$, 并且 $f = 250\text{mm}$ 。因此, 通过下列关系式给出第一平面 z_1 中参考光束的电磁场的光谱:

$$[0227] \quad \hat{E}_{\text{ref}}'(x, y, z_1, \omega) = \hat{P}_{\text{ref}}'(\omega) \times \exp\left[i \times \frac{\omega}{c} \times r(x, y)\right]$$

[0228] 以振幅和相位的 $\hat{E}_{\text{car}}'(x, y, z_1, \omega)$ 的表征要求已知 $\hat{E}_{\text{ref}}'(x, y, z_1, \omega)$, 其由此通过 $\hat{P}_{\text{ref}}'(\omega)$ 的测量再次以振幅和相位传递。使用商业可用设备中目前实施的现有技术, 使用之前提到的 FROG、SPIDER 或者 SRSI 方法, 可以完全地进行在一点的复合电磁场的测量。

[0229] 现在将描述本发明第一实施方式的第三变化形式。所述第三变化形式有利地可以考虑由第一光学件 O1 潜在地引入的参考光束 Fref 的波前面的曲率和/或由第二光学件 O2 潜在地引入的表征光束 Fcar 的波前面的曲率。在目前为止已经描述的实施方式的实施例中, 进入第一光学件 O1 时的第一子光束 F1 是平面, 离开第一光学件 O1 的参考光束 Fref 是球形波。因此, 更特别地描述了第三变化形式考虑由第一光学件 O1 引入的参考光束 Fref 的波前面的曲率的情况。应该注意所述第三变化形式可以与之前描述的第一变化形式和/或与第二变化形式组合, 或者独立于所述第一和第二变化形式实施。

[0230] 根据所述第三变化形式, 在第一子光束 F1 在第一光学件 O1 上反射之后, 并且在参

考光束Fref与表征光束Fcar重组之前,在参考光束 $\phi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ 的给定频率 ω_0 进行空间相位的测量。通常地可以使用Shack-Hartmann设备,以进行参考光束的空间相位的测量。所述空间相位 $\phi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ 是由第一光学件O1引入的参考光束Fref的波前面的曲率的特征。

[0231] 因此,例如,通过计算器K,可以从之前获得的表征光束Fcar的相对空间-光谱相位或从绝对空间光谱相位减去空间光谱相位 $\frac{\omega}{\omega_0} \phi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$,以分别地获得表征光束Fcar的校正相对空间-光谱相位或校正绝对空间-光谱相位。

[0232] 可以设想该第三变化形式的可替代方式,现在将参考图3描述它。图3表示用于光束表征的第二设备2,可以可替代地在根据本发明第一实施方式的方法10中实施它。该设备包括:

[0233] -用于将光束FL分离为第一子光束F1和第二子光束F2的分离器Os;

[0234] -第一光学件O1;

[0235] -波前面校正器Cor和第三光学件O3;

[0236] -第二光学件O2,其有利地包括第一、第二、第三和第四镜子mi1、mi2、mi3和mi4;

[0237] -控制Pz时间延迟 τ 的装置;

[0238] -用于参考光束Fref和表征光束Fcar重组的复合器光学件Or;

[0239] -测量系统SM1;

[0240] -以及计算器K。

[0241] 第一光学件O1布置在分离器光学件Os下游的第一子光束F1的光学路径中。波前面校正器光学件布置在第一光学件O1下游的参考光束Fref的光学路径中。第三光学件O3,其通常是平面镜,布置在波前面校正器光学件下游和复合器光学件Or上游的参考光束Fref的光学路径中。

[0242] 形成第二光学件O2的第一、第二、第三和第四镜子mi1到mi4布置在分离器光学件Os下游的第二子光束F2的光学路径中。复合器光学件Or布置在第三光学件O3下游参考光束Fref的光学路径中和第二光学件O2的第四镜子mi4下游的表征光束Fcar的光学路径中。

[0243] 波前面校正器光学件Cor有利地可以校正参考光束Fref波前面的曲率,这是由于所述参考光束Fref在第一光学件O1上反射引起,并且以获得所述参考光束Fref的平波前面。这由此有利地有助于获得参考光束Fref和表征光束Fcar之间用于二维干涉模式M1的压缩不太紧密的干涉带。增加所述干涉带的间隔可以减少用于测量系统SM1的空间分辨率约束。实际上,干涉带压缩的越紧密,测量系统SM1的空间分辨率必须越高。增加所述干涉带之间间隔也可以减少扫描的时间间隔。

[0244] 这涉及在第一光学件O1下游和复合器光学件Or上游的参考光束Fref的光学路径中引入波前面校正器光学件Cor。由于图3中示例的可替代的构造,在光学装备中这种校正器光学件的引入对表征光束Fcar没有影响。波前面校正器光学件Cor可以通常地是:

[0245] -会聚镜,以这样一种方式布置它使得第一光学件O1位于会聚镜的主物方焦点,或者

[0246] -望远镜,其包括发散镜和会聚镜,可以传播开参考光束Fref,同时保持参考光束Fref的平波前面。

[0247] 然后,离开校正器光学件Cor的参考光束Fref是平行的,并且具有基本上平的波前

面。

[0248] 设备2有利地包括第一、第二、第三和第四镜子mi1、mi2、mi3和mi4,形成第二光学件O2。第一镜子mi1布置在第二子光束F2的光学路径中分离器光学件Os下游。第一镜子mi1可以导引第二子光束F2到控制装置Pz。在这里描述的特定构造中,控制装置Pz可以沿着z轴线,同时地调整第二和第三镜子mi2和mi3的定位。控制装置Pz有利地包括用于第二和第三镜子mi2和mi3精确、同时和相同移动的压电级。可替代地,控制装置Pz可以包括用于第二和第三镜子mi2和mi3每个的压电级。离开第三镜子mi3时,第二子光束F2被导引至第四镜子mi4。第四镜子mi4可以导引第二子光束F2到复合器光学件Or。由于已经描述的第一、第二、第三和第四镜子mi1到mi4以及控制装置Pz的组件,可以有利地精确地控制参考光束Fref和表征光束Fcar之间的时间延迟 τ ,同时保持光学装备的对齐。实际上,由控制装置Pz控制的沿着第二和第三镜子mi2和mi3的z轴线的平移不要求第一和第四镜子mi1和mi4的任何再对齐,也不要求任何其它光学元件的再对齐。

[0249] 现在将描述本发明第一实施方式的第四变化形式。所述第四变化形式有利地可以确定第一测量平面z1中表征光束Fcar的潜在的点(x,y),对于该点,表征光束Fcar和参考光束Fref的光谱不重叠,或者仅部分地重叠。实际上,对于这个点(x,y),在表征光束Fcar和参考光束Fref之间没有干涉出现,并且根据本发明第一实施方式,用于光束表征的方法10遇到了限制。这些情况是稀少的,然而对于一些类型的空间-时间耦合可以出现这些情况,例如,如果在第一测量平面z1中表征光束Fcar具有空间“啁啾信号”或者空间频率漂移,即如果表征光束Fcar的光谱振幅空间地变化。应该注意到所述第四变化形式可以与之前描述的第一变化形式和/或第二变化形式和/或第三变化形式组合,或者独立于所述第一、第二和第三变化形式实施。

[0250] 因此,在本发明第一实施方式的第四变化形式中,建议使用第一平面光学件O1和第二平面光学件O2。然后,参考光束Fref与表征光束Fcar相同,由此所获得的光学装备可以使得表征光束的每个点与其本身干涉。然后,可以进行空间解析的傅里叶光谱学。在表征光束Fcar的每个点测量的时间干涉图的傅里叶变换使得可以获取在其点的每个点的表征光束的光谱强度。然后,可以检测在束的一些点的空间啁啾的潜在问题,由此使得可以确定通过根据本发明第一实施方式的方法10进行的表征光束Fcar的重建的潜在限制。

[0251] 现在将描述本发明的第一实施方式的第五变化形式,其有利地使得可以至少部分地排除第一测量平面z1中表征光束Fcar的潜在点(x,y),对于该点,表征光束Fcar和参考光束Fref的光谱不重叠,或者仅部分地重叠。应该注意所述第五变化形式可以与之前描述的第一、第二、第三和第四变化形式的一个或多个组合,或者独立于所述第一、第二、第三和第四变化形式实施。

[0252] 因此,在本发明的第一实施方式的第五变化形式中,建议增加第一子光束F1的滤波步骤,以增加所述第一子光束F1的质量。所述滤波步骤可以通常地包括在第一子光束F1的光学路径中非线性光学元件的引入。图10示意性地示例了关于图2a、2b和2c之前描述的光学装备,并且其中非线性光学元件FRNL布置在第一子光束F1的光学路径中。选择所述非线性光学元件,以能够在离开非线性光学元件时产生第一滤波子光束,其包含初始第一子光束的所有光谱成分,以能够以最佳方式干涉表征光束Fcar。通常地讲,它意味着第一滤波子光束的光谱包括第一非滤波子光束的光谱。这种滤波步骤通常地基于三阶非线性方法,

称为“XPW”。考虑其三阶非线性,XPW方法相当大地加宽入射参考光束Fref的光谱。这由此有助于明显地限制参考光束Fref和表征光束Fcar之间光谱重叠的潜在问题。而且,已经证明XPW方法作为时间滤波器,因此当入射参考光束不太远离其傅里叶限制时,离开非线性光学元件的被滤波的参考光束可以考虑为受傅里叶变换限制。换言之,如果入射参考光束的空间-光谱相位是相对平的,并且所述参考光束由XPW方法传播,开,那么可以考虑滤波的参考光束也具有平的空间-光谱相位。这将由此潜在地可以排除测量参考的空间-光谱相位的步骤。

[0253] 现在将描述本发明第一实施方式的第六变化形式,这将有利地可以考虑随着参考光束Fref的潜在剩余的空间-时间耦合。应该注意所述第六变化形式可以与之前描述的第一、第二、第三、第四和第五变化形式的一个或多个组合,或者独立于所述第一、第二、第三、第四和第五变化形式实施。

[0254] 在本发明的第一实施方式中,进行假设第一光学件O1表面上游的第一子光束F1的电磁场是均匀的。然而,第一光学件O1具有有限表面,并且不可以选择其直径太小,没有它,第一光学件O1下游的参考光束和表征光束之间的信号比率将非常不同于1,为了以良好对比观察二维干涉模式。在这些条件下,第一光学件O1上游的第一子光束F1的空间-时间耦合是不对称的,足够弱以致于可以考虑所述第一子光束F1的电磁场在第一光学件O1的整个表面上是均匀的。因此,该近似值可以在最后重建的表征光束Fcar的电磁场中引起错误。

[0255] 因此,在本发明的第一实施方式的第六变化形式中,建议使用下面迭代算法:

[0256] i. 假设第一子光束F1的电磁场在第一光学件O1上是有效地均匀的,并且由此推导出测量平面z1中参考光束Fref的电磁场,如之前所述;

[0257] ii. 已知在测量平面z1中的所述参考束Fref的场,并且使用根据本发明第一实施方式的方法10测量的时间干涉图S1,在空间和时间中,或者在空间和频率中推论第一子光束F1的场的重建;

[0258] iii. 该第一子光束F1的场的重建包括在第一光学件O1上反射以在测量平面z1中产生参考光束Fref的场的第一子光束F1的场的一部分,其在该比例不必是空间地均匀的。该重建用于确定测量平面z1中参考光束的新场,该新场这次不再基于第一子光束F1的场在第一光学件O1的整个平面上是均匀的假设。

[0259] 该参考光束Fref的新场然后在步骤ii被再次注入,并且以迭代方式重复步骤ii和iii,直到会聚朝向自给方案,使得:

[0260] -重建表征光束Fcar的电磁场,并且

[0261] -在第一测量平面z1中参考光束的电磁场是该场扩展的结果,第一光学件O1的限制表面上是潜在地非均匀一致的。

[0262] 在T.Oksenhendler et al.,“自参考光谱干涉量度学(Self-referenced spectral interferometry)”,Applied Physics B(99),7-12.中更特别地描述了已经描述的迭代算法的类型。

[0263] 现在将描述本发明的第二实施方式,称为“单发射模式”。

[0264] 图11a示例了使用用于光束表征的第三设备3,根据本发明第二实施方式,用于光束表征的方法20。

[0265] 该第三设备3包括第二类型的测量系统SM3,其包括:

[0266] -具有入口狭缝 F_e 的分光仪；

[0267] -如之前描述的用于第一和第二测量系统SM1和SM2的照相机的传感器CCD。

[0268] 图11b表示用于光束表征的第三设备3的部分立体图。图11b由此表示分光仪SP，具有沿着方向x定向的其入口狭缝 F_e 。

[0269] 图11c表示在根据本发明的第二实施方式，用于光束表征的方法20的步骤期间，通过分光仪SP实验地测量的对于给定时间延迟 τ 的二维干涉模式M1的频谱 S_{pe} 的实施例。因此，图11c的频谱 S_{pe} 包括用于方向x的频率信息，在该方向上，分光仪SP的狭缝 F_e 已经捕获了二维干涉模式M1。

[0270] 图12a示例了使用用于光束表征的第四设备4，根据本发明的第二实施方式，用于光束表征方法20的可替代的构造。

[0271] 第四设备4包括第二类型的测量系统SM4，包括：

[0272] -具有入口狭缝 F_e 的分光仪SP；

[0273] -如之前描述的用于第一和第二测量系统SM1和SM2的照相机的传感器CCD。

[0274] -多个光学纤维 f_{o_1} 、 f_{o_2} 、 \dots 、 f_{o_n} 。所述多个光学纤维包括至少两个光学纤维。多个光学纤维的数量少于或等于传感器CCD的垂直像素的数量。该垂直像素的数量可以大于500。优选地，所述多个光学纤维包括4和100之间所包括的大量光学纤维。

[0275] 在第一平面 z_1 中布置多个光学纤维 f_{o_1} 、 f_{o_2} 、 \dots 、 f_{o_n} 的输入端，优选地以二维矩阵布置，即，包括至少两行和两列，或者可替代地以矩阵-行布置，包括一行和几列，或者可替代地以矩阵-列，包括一列和几行。当矩阵是二维时，可以沿着第一平面 z_1 中两个空间维度有利地取样二维干涉模式M1的信号。

[0276] 在图12b的实施例中，二维矩阵具有数量 $L>1$ 的行和数量 $C>1$ 的列，每行平行于y轴线延伸，并且每列平行于x轴线延伸，x和y轴线正交。更通常地，每行可以平行于第一轴线延伸，并且每列可以平行于与第一轴线分开的第二轴线延伸，第一和第二轴线在它们之间形成非零和非平角。二维矩阵优选地是正方形，即，具有一样多的行和列，或者可替代地是矩形，即，具有行的数量L不同于列的数量C。

[0277] 然后，在分光仪SP的入口狭缝 F_e 上布置多个光学纤维 f_{o_1} 、 f_{o_2} 、 \dots 、 f_{o_n} 的输出端，有利地注意空间地分开来自于光学纤维中每个的信号。

[0278] 图12b表示用于光束表征的第四设备4的部分立体图。因此，图12b表示第一平面 z_1 ，其中以二维矩阵布置多个光学纤维 f_{o_1} 、 f_{o_2} 、 \dots 、 f_{o_n} 的输出端，并且所述多个光学纤维的输出端在其上对齐的分光仪SP的入口狭缝 F_e 。

[0279] 根据之前描述的关于图9和有利地可以获得独立于参考光束 F_{ref} 的表征光束 F_{car} 的绝对表征的根据第一实施方式的方法10的第二变化形式也可以根据本发明的第二实施方式的方法20相容。在该第二变化形式中，用于根据本发明第二实施方式的光束表征的方法20由此包括：

[0280] -图9中示例的步骤i)，测量第一子光束F1的空间-光谱相位 $\phi_{ref}(x,y,\omega)$ ，以及

[0281] -测量第一子光束F1的光谱振幅 $A_{ref}(\omega)$ 的步骤。

[0282] 之前已经描述过和有利地可以考虑由第一光学件O1引入的参考光束 F_{ref} 的波前面的曲率的根据第一实施方式的方法10的第三变化形式也可以与根据本发明的第二实施方式的方法20相容。然后，第三变化形式可以自然地与第二变化形式组合，或者独立于所述

第二变化形式实施。

[0283] 因此,在根据本发明的第二方式,用于光束表征的方法20的第三变化形式中,第一子光束F1在第一光学件01上反射之后以及参考光束Fref与表征光束Fcar重组之前,进行在参考光束 $\Phi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ 的频率 ω_0 的空间相位的测量。所述空间相位 $\Phi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ 是由第一光学件01引入的参考束Fref的波前面的曲率的特征。

[0284] 第三变化形式的可替代方式,之前已经描述过,也与本发明的第二实施方式相容。

[0285] 根据第一实施方式的方法10的第四变化形式也与本发明的第二实施方式相容,之前已经描述过该第四变化形式,并且它有利地可以确定第一测量平面z1中表征光束Fcar的潜在的点(x,y),对于该点,表征光束Fcar和参考光束Fref的光谱不重叠,或者仅部分地重叠。然后,第四变化形式可以自然地与第二变化形式和/或第三变化形式组合,或者独立于所述第二和第三变化形式实施。

[0286] 根据本发明的第一实施方式的方法10的第五变化形式也与根据本发明的第二实施方式的方法20相容,之前已经关于图10描述过该第五变化形式,并且它有利地使得可以至少部分地排除第一测量平面z1中表征光束Fcar的潜在点(x,y),对于该点,表征光束Fcar和参考光束Fref的光谱不重叠,或者仅部分地重叠。然后,应该注意所述第五变化形式可以自然地与之前描述的第二、第三和第四变化形式的一个或多个组合,或者独立于所述第二、第三和第四变化形式实施。

[0287] 根据本发明的第一实施方式的方法10的第六变化形式也可以与根据第二实施方式的方法20相容。应用于根据第二实施方式的方法20,根据第六变化形式的迭代算法如下:

[0288] i. 假设第一子光束F1的电磁场在第一光学件01上是有效地均匀的,并且由此推导出测量平面z1中参考光束Fref的电磁场,如之前所述;

[0289] ii. 已知在测量平面z1中的所述参考束Fref的场,并且使用根据本发明第二实施方式的方法20测量的至少一个频率干涉图,在空间和时间中,或者在空间和频率中推论第一子光束F1的场的重建;

[0290] iii. 该第一子光束F1的场的重建包括在第一光学件01上反射以在测量平面z1中产生参考光束Fref的场的第一子光束F1的场的一部分,其在该比例不必是空间地均匀的。该重建用于确定测量平面z1中参考光束的新场,该新场这次不再基于第一子光束F1的场在第一光学件01的整个平面上是均匀的假设。

[0291] 在本说明书中,采用“频率干涉图”意指对于参考光束Fref和表征光束Fcar之间固定的时间延迟 τ_0 ,根据频率 ω 测量的空间干涉模式。所测量的空间干涉模式可以是一维或二维。

[0292] -如果所测量的空间干涉模式是一维的,频率干涉图包括沿着一个空间维度和沿着一个频率维度的信息,因此二维信息。

[0293] -如果所测量的空间干涉模式是二维的,频率干涉图包括沿着两个空间维度和沿着一个频率维度的信息,由此三维信息。

[0294] 可以用单次激光发射,利用沿着成像分光仪的入口狭缝的空间分辨率,获得二维频率干涉图。另一方面,获得三维频率干涉图需要沿着其两个空间维度之一扫描分光仪的入口狭缝上的激光束。

[0295] 该参考光束Fref的新场然后在步骤ii被再次注入,并且以迭代方式重复步骤ii和

iii,直到会聚朝向自给方案,使得:

[0296] -重建表征光束 F_{car} 的电磁场,并且

[0297] -在第一测量平面 z_1 中参考光束的电磁场是该场扩展的结果,第一光学件 O_1 的限制表面上是潜在地非均匀一致的。

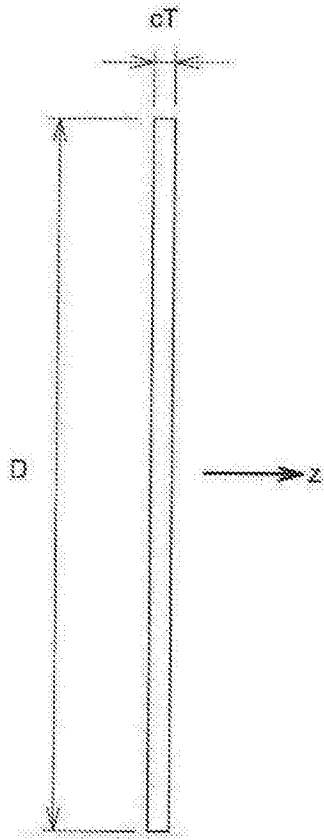


图1a

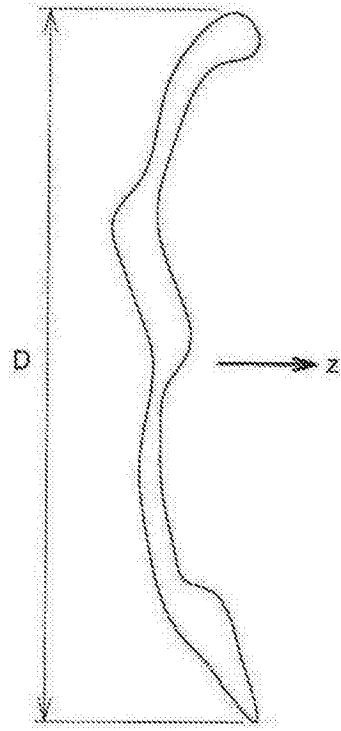


图1b

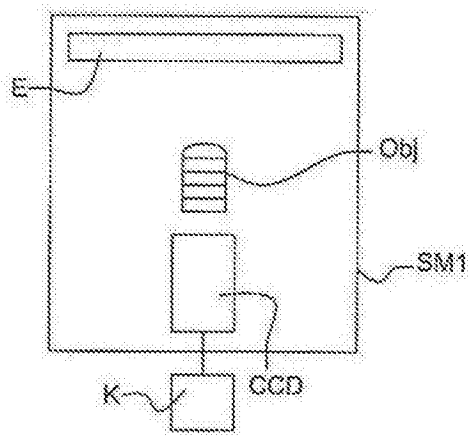
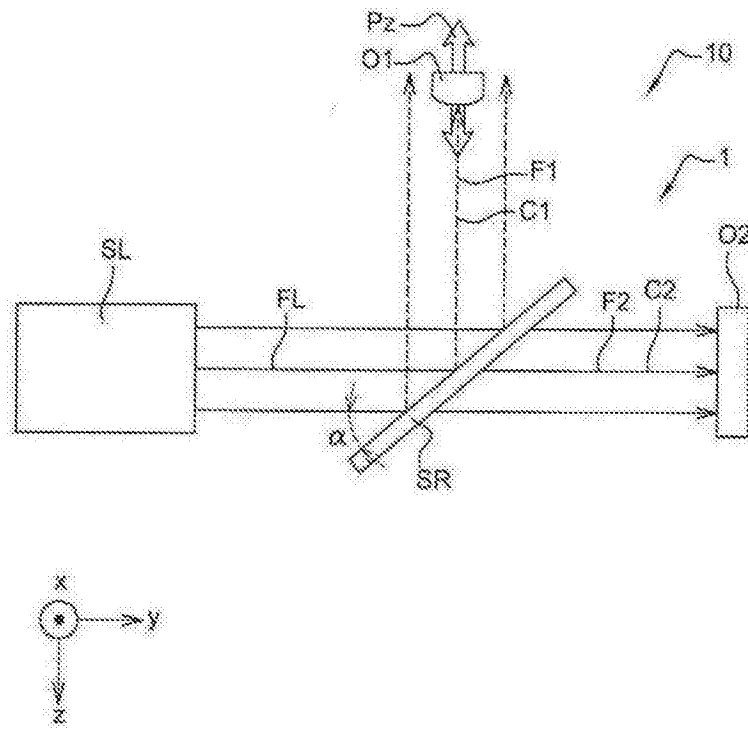


图2a

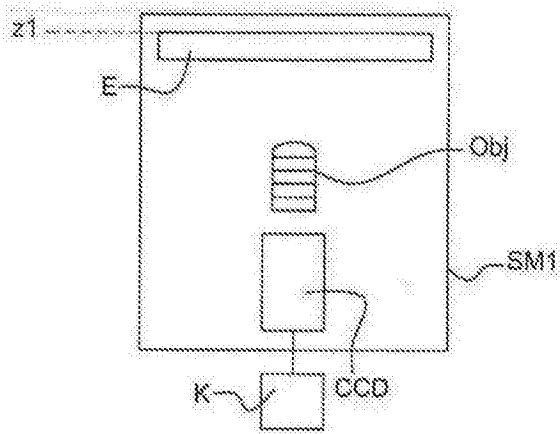
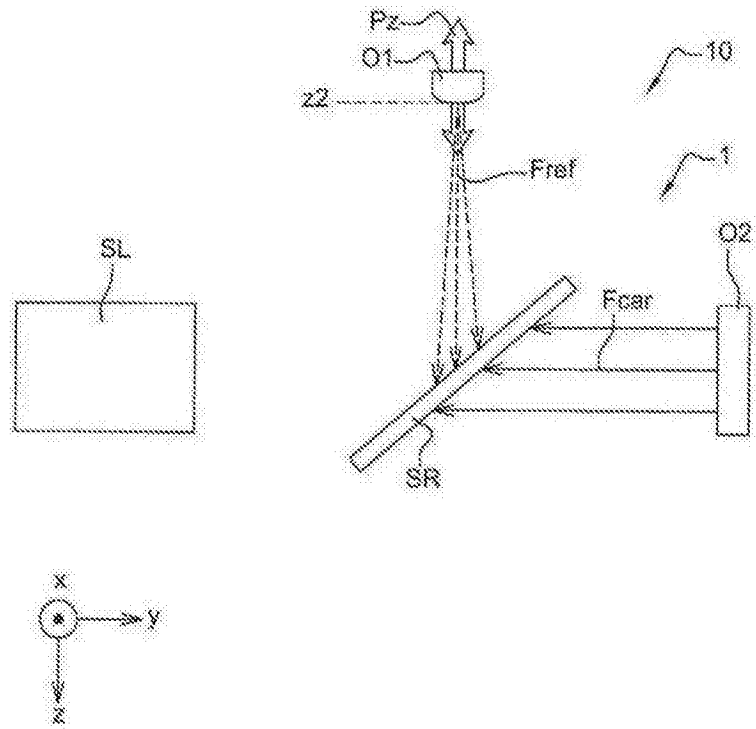


图2b

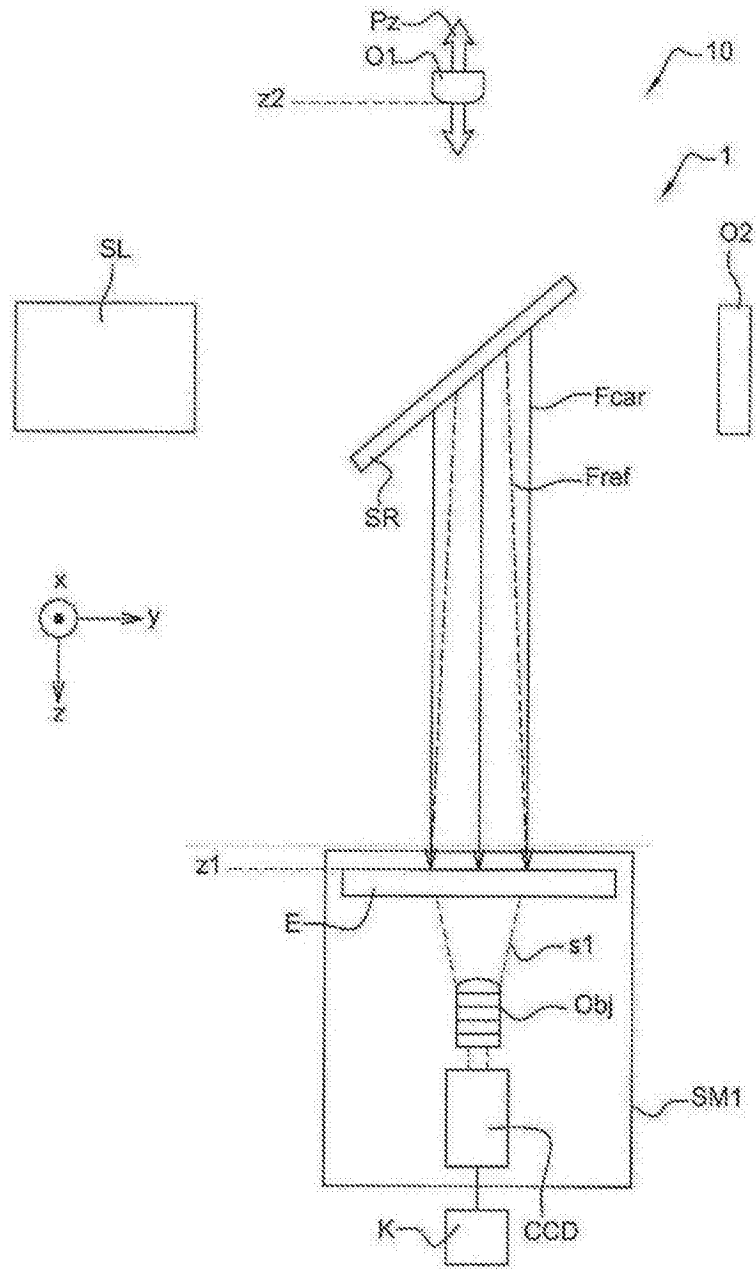


图2c

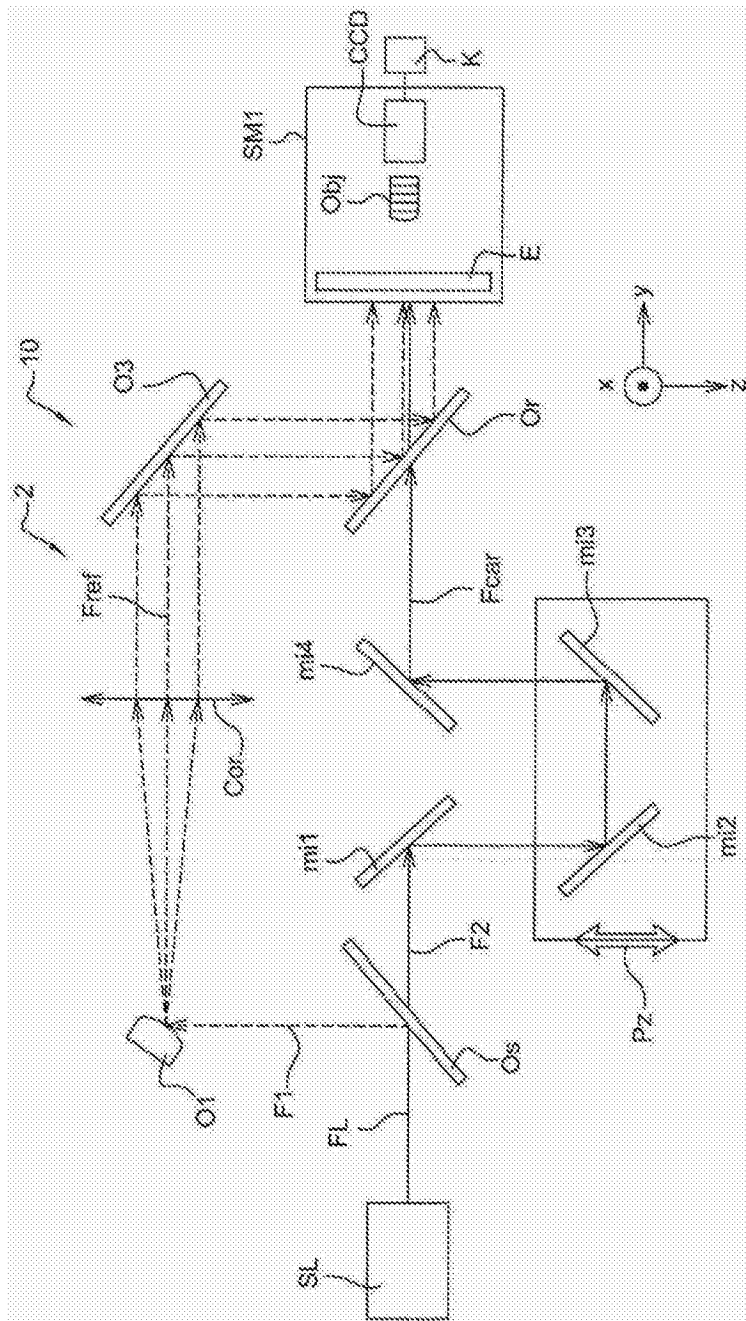


图3

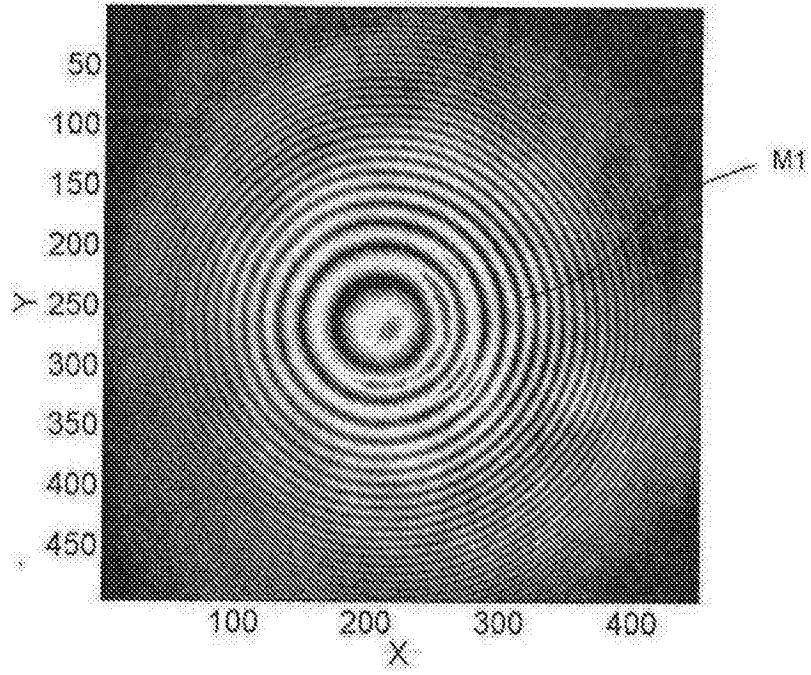


图4

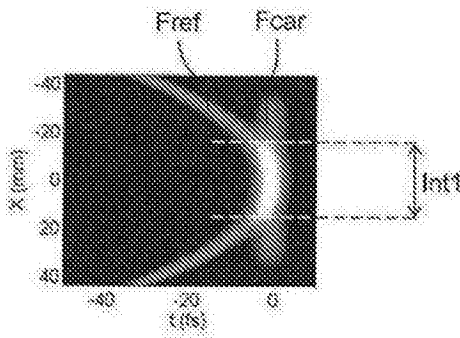


图5a

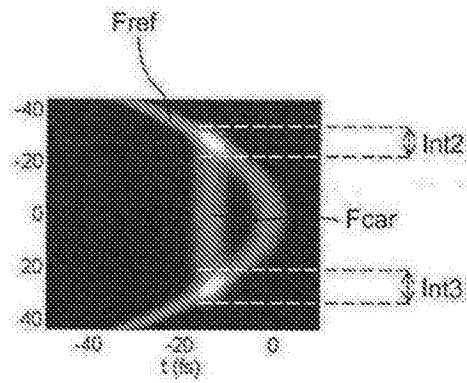


图5b

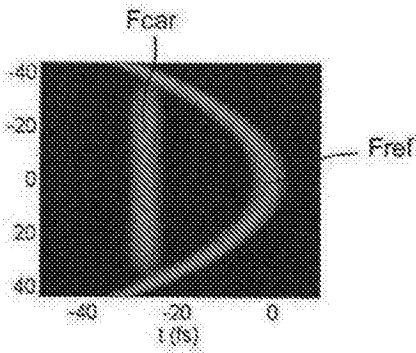


图5c

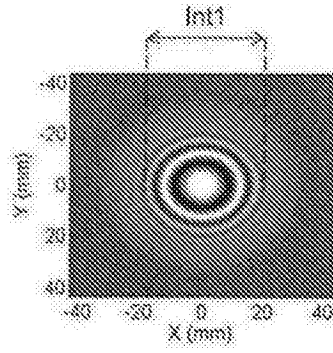


图6a

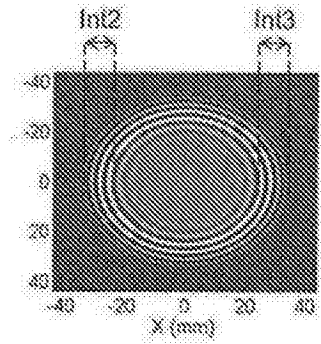


图6b

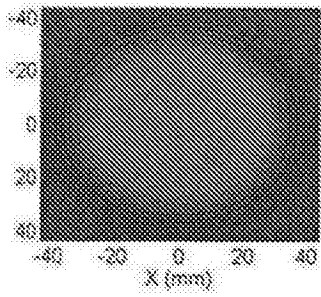


图6c

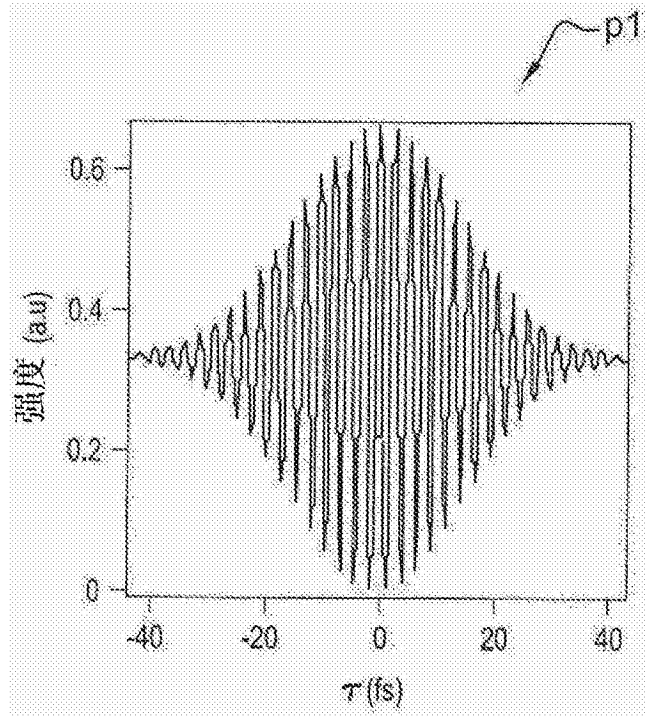


图7a

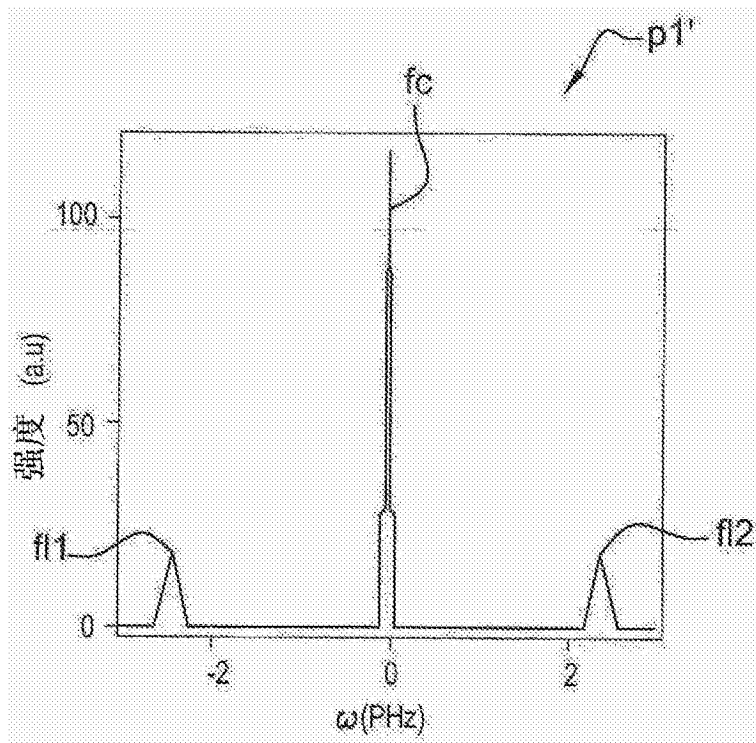


图7b

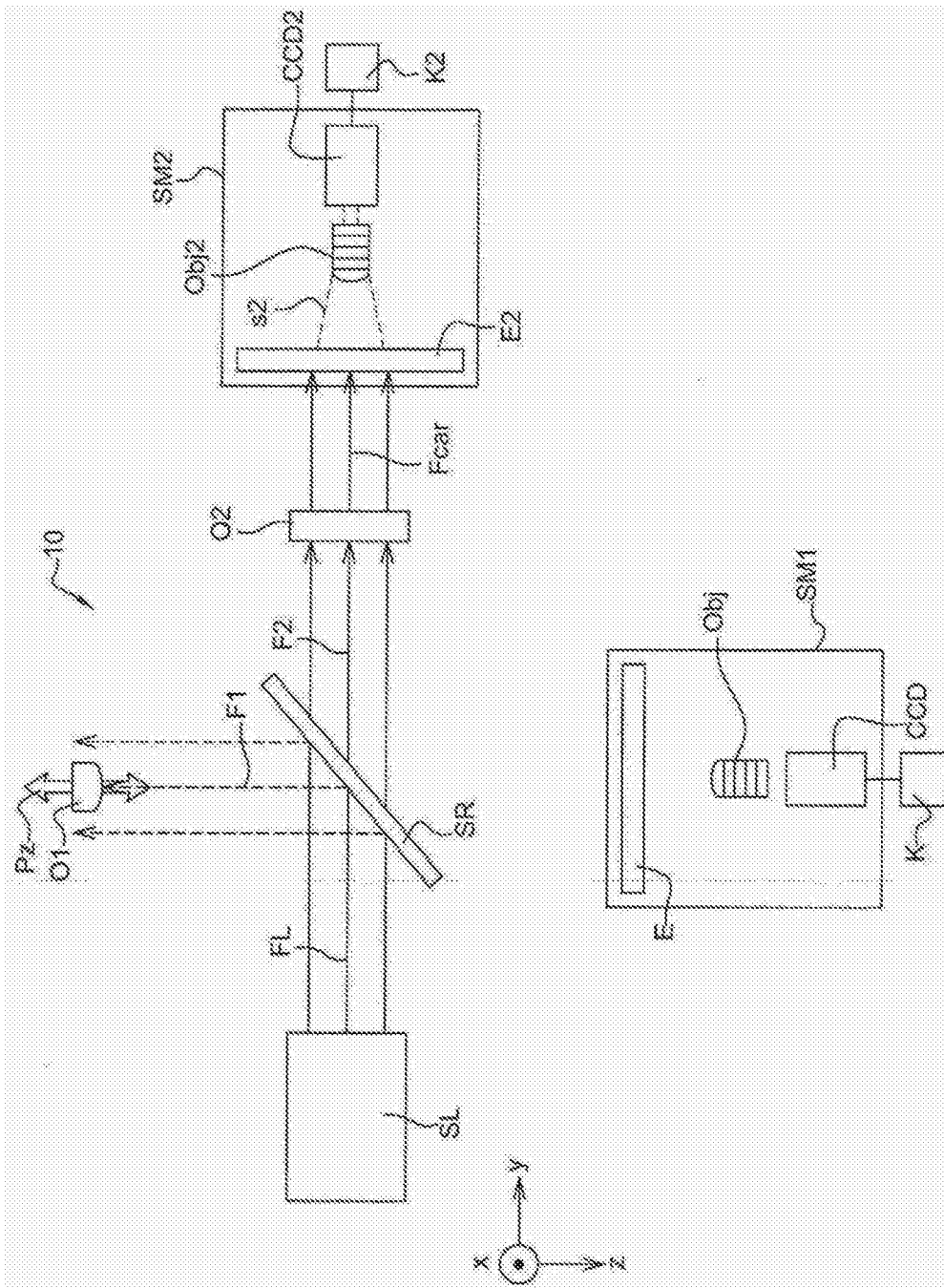


图8

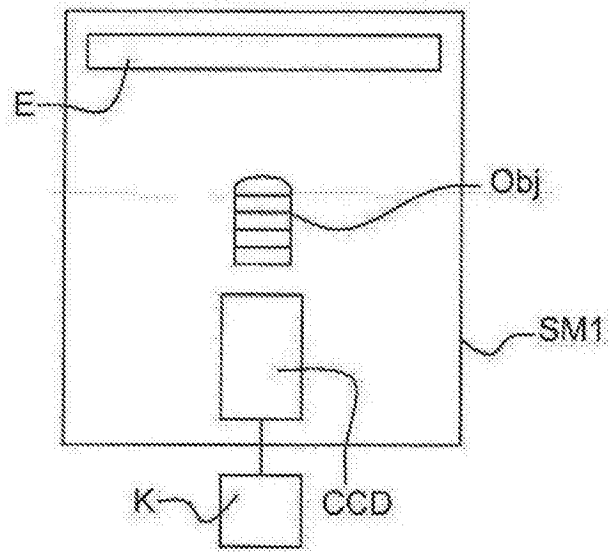
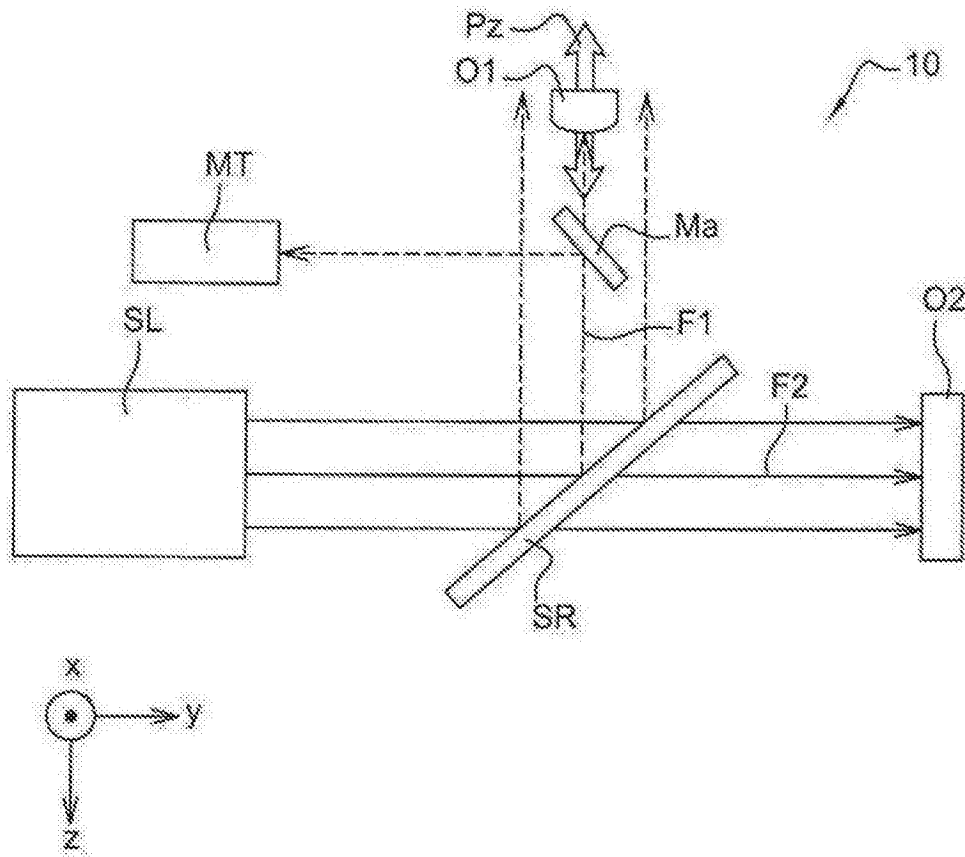


图9

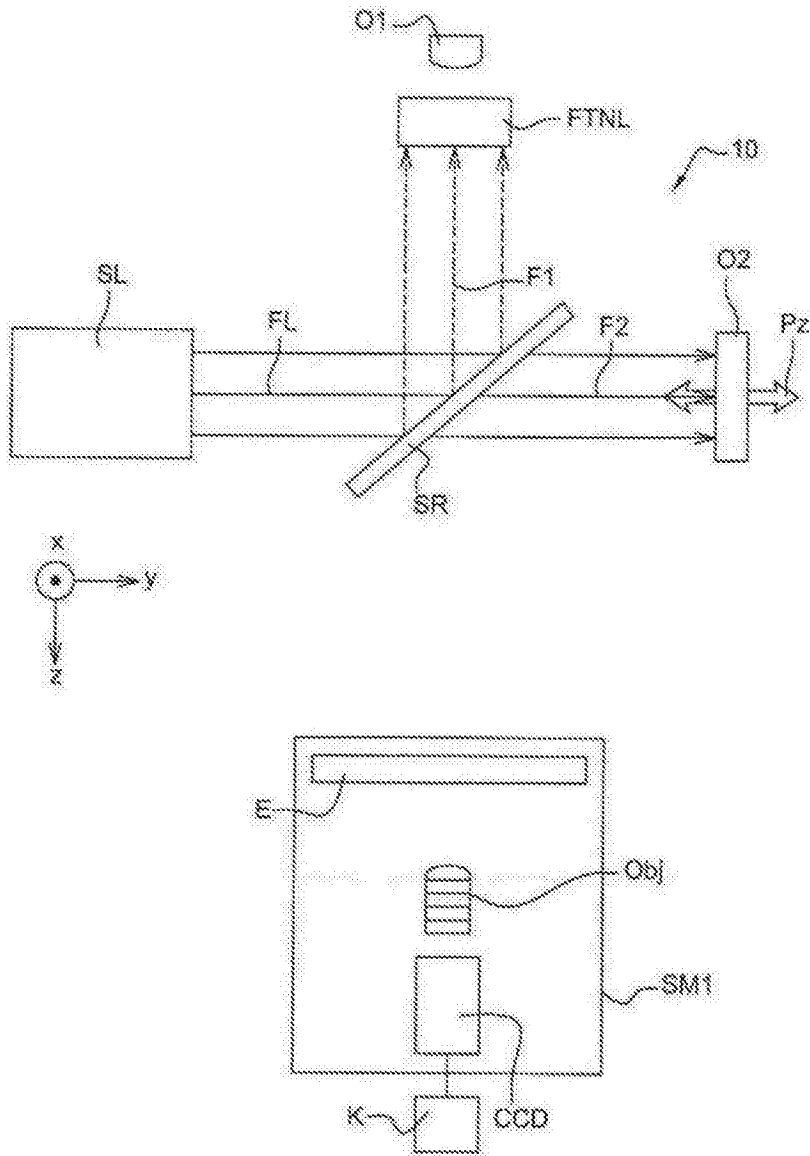


图10

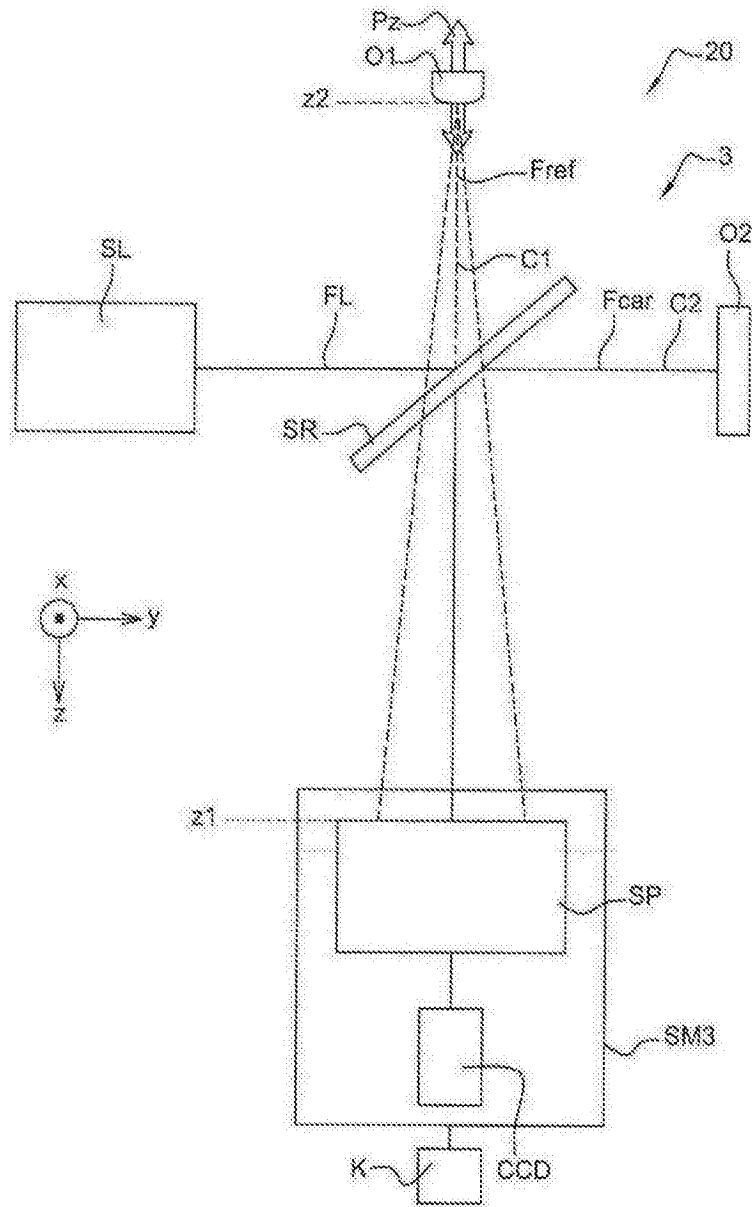


图11a

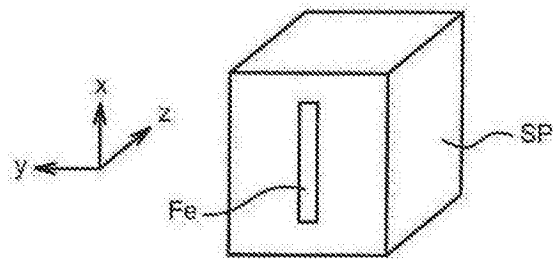


图11b

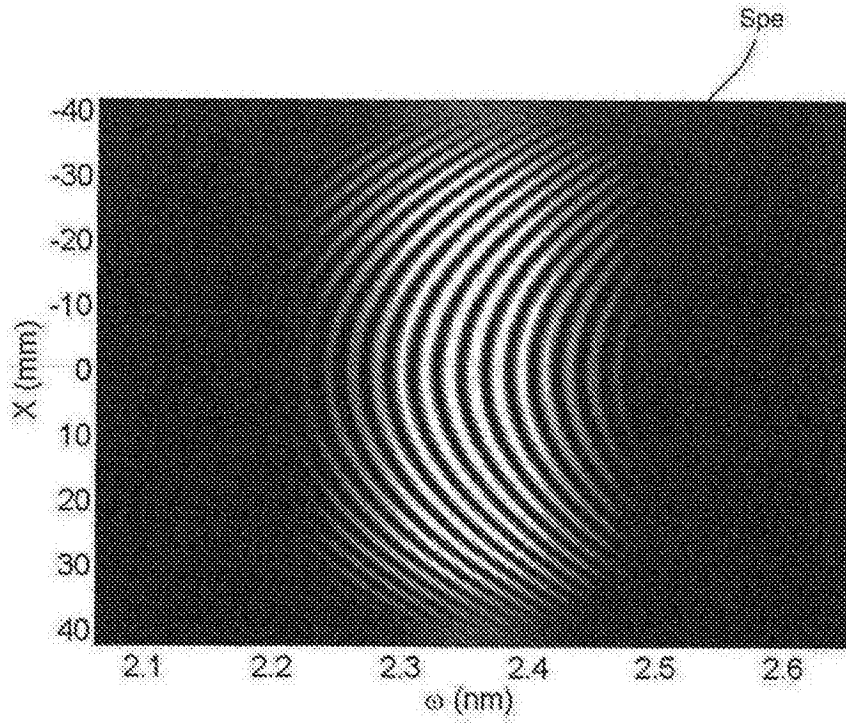


图11c

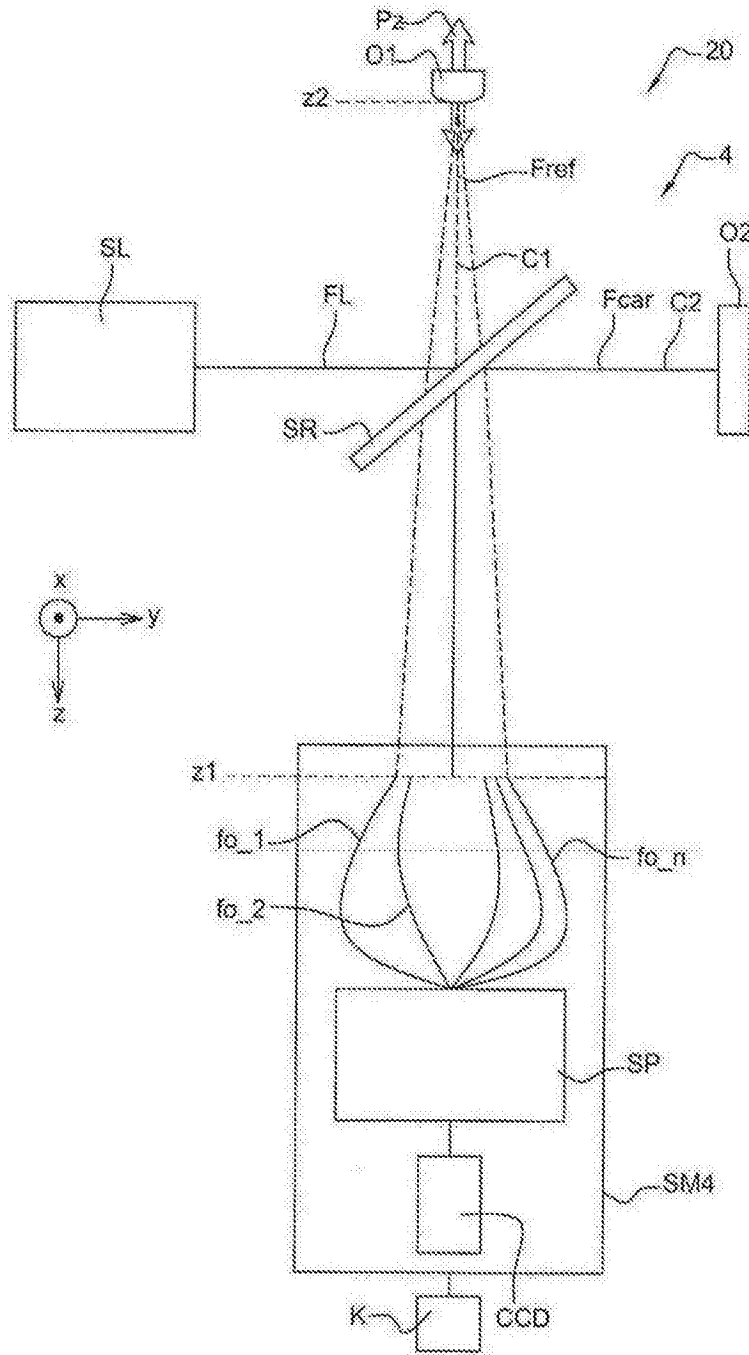


图12a

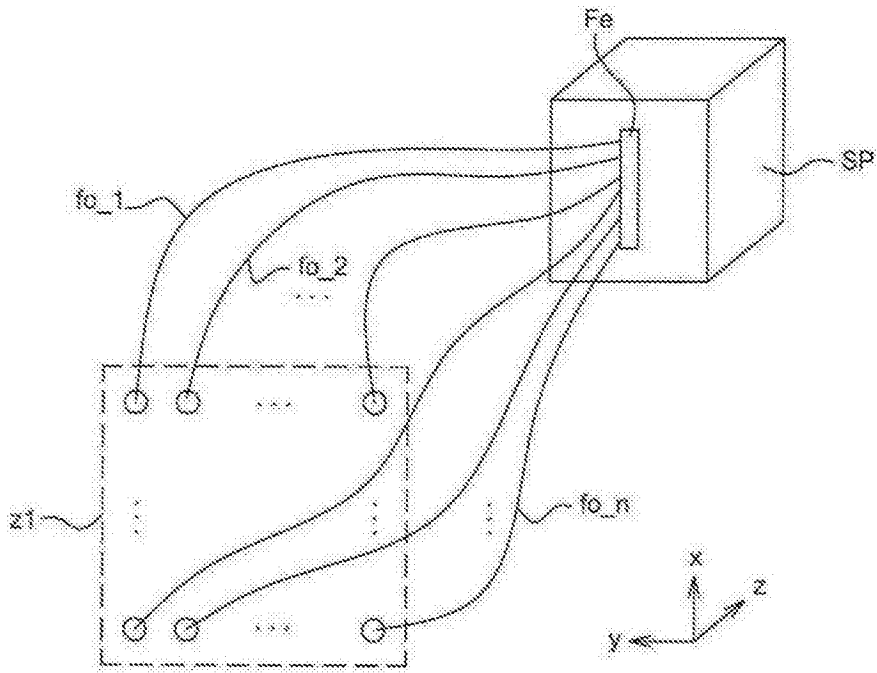


图12b