

1. 一种复谱频域光学相干层析成像方法,其包括以下步骤:

步骤 1:在参考光的三种不同相位 $\varphi_1(\omega)$, $\varphi_2(\omega)$ 和 $\varphi_3(\omega)$ 状态下,测得三组干涉光谱: $S_1(\omega)$, $S_2(\omega)$ 和 $S_3(\omega)$;

步骤 2:分别计算 $S_1(\omega)$ 与 $S_2(\omega)$ 、 $S_1(\omega)$ 与 $S_3(\omega)$ 的差值,得到两组干涉差分光谱 $S_{\text{dif1}}(\omega)$ 和 $S_{\text{dif2}}(\omega)$;

步骤 3:取该两组干涉差分光谱的和、差,分别作为复振幅实部、复振幅虚部,得到在频率 ω 的空间中的复振幅干涉光谱,或称为干涉光复谱;

步骤 4:再将频率 ω 的空间中的复振幅干涉光谱的变量空间由频率 ω 变换到波数 κ ,得到在波数 κ 的空间中的复振幅干涉光谱;

步骤 5:对波数 κ 的空间中的复振幅干涉光谱,作逆傅立叶变换,得到被测样品沿光轴方向的深度扫描信息即层析图 $I(z)$,该层析图 $I(z)$ 能反映被测样品的真实结构。

2. 根据权利要求 1 所述的复谱频域光学相干层析成像方法,其特征在于:其中所述的参考光的三种不同相位 $\varphi_1(\omega)$, $\varphi_2(\omega)$ 和 $\varphi_3(\omega)$,满足下列关系:

$$\begin{aligned}\varphi_1(\omega) &= \varphi(\omega), \\ \varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega) &= \pi/2, \\ \varphi_3(\omega) - \varphi_1(\omega) &= 3\pi/2,\end{aligned}$$

其中 $\varphi(\omega)$ 为任意数。

3. 一种复谱频域光学相干层析成像系统,其特征在于:其包括宽带光源、光源耦合器、组合式干涉仪、光纤成像探头、光谱仪、温度控制器及计算机,宽带光源发出的光,经光源耦合器进入组合式干涉仪,通过光纤成像探头照射被测样品;由被测样品返回的背向散射光,再通过光纤成像探头返回干涉仪,与参考光相干产生干涉光;干涉光通过光谱仪形成干涉光谱信号;干涉光谱信号经计算机处理后,通过以下步骤得到被测样品的层析图,

步骤 1:在参考光的三种不同相位 $\varphi_1(\omega)$, $\varphi_2(\omega)$ 和 $\varphi_3(\omega)$ 状态下,测得三组干涉光谱: $S_1(\omega)$, $S_2(\omega)$ 和 $S_3(\omega)$;

步骤 2:分别计算 $S_1(\omega)$ 与 $S_2(\omega)$ 、 $S_1(\omega)$ 与 $S_3(\omega)$ 的差值,得到两组干涉差分光谱 $S_{\text{dif1}}(\omega)$ 和 $S_{\text{dif2}}(\omega)$;

步骤 3:取该两组干涉差分光谱的和、差,分别作为复振幅实部、复振幅虚部,得到在频率 ω 的空间中的复振幅干涉光谱,或称为干涉光复谱;

步骤 4:再将频率 ω 的空间中的复振幅干涉光谱的变量空间由频率 ω 变换到波数 κ ,得到在波数 κ 的空间中的复振幅干涉光谱;

步骤 5:对波数 κ 的空间中的复振幅干涉光谱,作逆傅立叶变换,得到被测样品沿光轴方向的深度扫描信息即层析图 $I(z)$,该层析图 $I(z)$ 能反映被测样品的真实结构。

4. 根据权利要求 3 所述的复谱频域光学相干层析成像系统,其特征在于:所述的温度控制器用于保持组合式干涉仪的环境温度稳定。

5. 根据权利要求 3 所述的复谱频域光学相干层析成像系统,其特征在于:其中所述的组合式干涉仪包括三个光纤式迈克尔逊干涉仪,该三个光纤式迈克尔逊干涉仪均由 2×2 宽带光纤耦合器建立,再利用两个 1×3 宽带光纤耦合器分别把三个光纤式迈克尔逊干涉仪的光源输入臂和样品信号臂耦合在一起,该两个 1×3 宽带光纤耦合器的分光比均为: $1 : 1 : 1$ 。

6. 根据权利要求 5 所述的复谱频域光学相干层析成像系统,其特征在于:所述的三个光纤式迈克尔逊干涉仪是同步工作的,其同步产生的三路干涉光分别通过三个干涉光输出臂与光谱仪相连。

7. 根据权利要求 5 所述的复谱频域光学相干层析成像系统,其特征在于:所述的三个光纤式迈克尔逊干涉仪的参考臂的光纤长度是不相等的,该三个参考臂的光纤长度:L1、L2 和 L3,满足下列关系:

$$L1 = L$$

$$L2-L1 = \lambda /4$$

$$L3-L1 = 3 \lambda /4$$

其中, λ 为宽带光源的中心波长 ;L 为任意数。

8. 根据权利要求 5 所述的复谱频域光学相干层析成像系统,其特征在于:所述的三个光纤式迈克尔逊干涉仪参考臂的光纤端面作镜面抛光及镀金属膜,以形成参考反射镜。

9. 根据权利要求 5 所述的复谱频域光学相干层析成像系统,其特征在于:所述的三个光纤式迈克尔逊干涉仪的光纤材料、系统结构、分光比及折射率的特性参数是一致的。

10. 根据权利要求 6 所述的复谱频域光学相干层析成像系统,其特征在于:所述的光谱仪包括三组依次连接的准直聚焦透镜、闪耀光栅和凹面反射镜、一个面阵 CCD 探测器和 A/D 转换器;来自所述的组合式干涉仪的三路干涉光信号分别通过各自的准直聚焦透镜会聚在闪耀光栅上,经闪耀光栅的分光作用后,经凹面反射镜成像在面阵 CCD 探测器上,形成三条彼此有一定间距的、互相平行的带状图像;该三条带状图像分别对应了三路干涉光的光谱分布,光谱分布信号再由 A/D 转换器送入计算机;所述的光谱仪同步接收与处理三路干涉光信号。

一种复谱频域光学相干层析成像方法以及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及光学相干层析成像技术 (Optical Coherence Tomography, 简称 OCT), 特别涉及一种复谱频域光学相干层析成像 (Complex Spectral Domain OCT) 的方法及系统。

背景技术

[0002] 光学相干层析成像技术 (Optical Coherence Tomography, OCT) 是一种新型的生物学成像技术。具有无损伤、非侵入、高分辨率和高灵敏度的特点, 它能对活体组织的微小结构进行高分辨率的层析成像, 其深度分辨率可达微米级, 是现有医学成像技术的十倍, 有助于人体病变组织的早期发现和及时诊断。早期的 OCT 是时域光学相干层析成像技术, 为了得到样品轴向的深度信息, 参考臂必需进行轴向深度扫描, 它在相干长度的范围内是逐点进行数据采集的, 这样就大大限制了它的扫描速度, 因此, 时域 OCT 系统扫描装置结构复杂; 成像速度不高, 难以实现实时成像。

[0003] 随着技术的发展, 一种新型的频域 OCT (Spectral Domain OCT, SD-OCT) 技术正在成为业界新的焦点。频域 OCT 系统主要由弱相干宽带光源、干涉仪和光谱仪等组成。系统的轴向深度扫描信息 (层析图), 可通过对光谱仪输出的干涉光谱作逆傅里叶变换来获得, 不同深度的信息可同时或并行得到。因而, 频域 OCT 无需参考臂的轴向扫描, 排除了轴向扫描的装置, 提高了成像速度和探测灵敏度。

[0004] 由于光谱仪只能测量干涉光谱的幅度值, 无法提供干涉光谱的相位信息。因此, 直接对干涉光谱实际的测量数据作逆傅立叶变换而得到层析图, 它天然地包含了寄生像和复共轭镜像, 不能完整地反映被测样品的真实结构。寄生像是直流背景和自相干噪声, 寄生像的存在使成像动态范围和对比度大幅度降低; 复共轭镜像则会导致图像的不同部分出现了混叠, 最终使图像不清晰。

[0005] 为消除寄生像和复共轭镜像对频域 OCT 成像质量的影响, 近年来, 一种基于复振幅干涉光谱重构的复谱频域 OCT 技术得到大家的重视。如中国发明专利《全深度探测的频域光学相干层析成像的方法及其系统》(申请号 200610028629.2), 采用正弦相位调制方法来重构干涉光谱的复振幅, 通过正弦相位调制装置带动参考反射镜正弦振动, 生成一个随时间变化的正弦相位调制的光谱信号, 然后对其作傅立叶变换, 滤出其频谱的一倍频和二倍频频谱, 并分别作为复变量的实部和虚部, 合成出复振幅干涉光谱, 再对该复变量作逆傅立叶变换, 得到被测样品真实结构的层析图。该系统需要增加一个正弦相位调制装置, 该装置由正弦函数信号发生器和固定在参考镜上的压电陶瓷驱动器组成。因此, 实现该技术的系统结构复杂, 过程繁琐, 在实际中难以保证工作的稳定性。天津大学的郑羽等人将相移干涉技术用于复谱频域 OCT (参见郑羽, 李刚. 基于全量程的复谱频域 OCT 系统 [J]. 天津大学学报, 2006, 39(10): 1247-1251), 采用移相驱动器使参考镜产生 5 次的相移 (每次相移 $\pi/2$), 来得到 5 帧相移图, 然后用基于最小二乘原理的算法, 获得光谱信号的幅度和相位, 重构出复振幅干涉光谱, 再由逆傅立叶变换, 得到被测样品的层析图。该系统也要增加一个

移相驱动器,移相驱动器一般由压电陶瓷元件实现,由于压电陶瓷元件的非线性和迟滞特性,给每次相移的准确性和一致性带来较大的影响。要保证系统的测量精度,必须采用相移的闭环控制技术。因此,该系统存在技术环节多、结构复杂及的缺陷。

发明内容

[0006] 本发明为了克服上述现有技术的不足,本发明提供一种复谱频域光学相干层析成像方法及系统。

[0007] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是:提供一种复谱频域光学相干层析成像方法,其包括以下步骤:

[0008] 步骤1:在参考光的三种不同相位($\varphi_1(\omega)$, $\varphi_2(\omega)$ 和 $\varphi_3(\omega)$)状态下,测得三组干涉光谱: $S_1(\omega)$, $S_2(\omega)$ 和 $S_3(\omega)$;

[0009] 步骤2:分别计算 $S_1(\omega)$ 与 $S_2(\omega)$ 、 $S_1(\omega)$ 与 $S_3(\omega)$ 的差值,得到两组干涉差分光谱 $S_{\text{diff1}}(\omega)$ 和 $S_{\text{diff2}}(\omega)$;

[0010] 步骤3:取该两组干涉差分光谱的和、差,分别作为复振幅实部、复振幅虚部,得到在频率 ω 的空间中的复振幅干涉光谱,或称为干涉光复谱;

[0011] 步骤4:再将频率 ω 的空间中的复振幅干涉光谱的变量空间由频率 ω 变换到波数 κ ,得到在波数 κ 的空间中的复振幅干涉光谱;

[0012] 步骤5:对波数 κ 的空间中的复振幅干涉光谱,作逆傅立叶变换,得到被测样品沿光轴方向的深度扫描信息即层析图 $I(z)$,该层析图 $I(z)$ 能反映被测样品的真实结构。

[0013] 本发明解决进一步技术问题的方案是:其中所述的参考光的三种不同相位 $\varphi_1(\omega)$, $\varphi_2(\omega)$ 和 $\varphi_3(\omega)$,满足下列关系:

[0014]

$$\varphi_1(\omega) = \varphi(\omega)$$

[0015]

$$\varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega) = \pi / 2$$

[0016]

$$\varphi_3(\omega) - \varphi_1(\omega) = 3\pi / 2$$

[0017] 其中 $\varphi(\omega)$ 为任意数。

[0018] 本发明解决进一步技术问题的方案是:提供一种复谱频域光学相干层析成像系统,其包括宽带光源、光源耦合器、组合式干涉仪、光纤成像探头、光谱仪、温度控制器以及计算机,宽带光源发出的光,经光源耦合器进入组合式干涉仪,通过光纤成像探头照射被测样品;由被测样品返回的背向散射光,再通过光纤成像探头返回干涉仪,与参考光相干产生干涉光;干涉光通过光谱仪形成干涉光谱信号;干涉光谱信号经计算机处理后,得到被测样品的层析图。

[0019] 本发明解决进一步技术问题的方案是:所述的温度控制器用于保持组合式干涉仪的环境温度稳定。

[0020] 本发明解决进一步技术问题的方案是:其中所述的组合式干涉仪包括三个光纤式迈克尔逊干涉仪,该三个光纤式迈克尔逊干涉仪均由 2×2 宽带光纤耦合器建立,再利用两个 1×3 宽带光纤耦合器分别把三个光纤式迈克尔逊干涉仪的光源输入臂和样品信号臂耦

合在一起,该两个 1×3 宽带光纤耦合器的分光比均为 $1 : 1 : 1$ 。

[0021] 本发明解决进一步技术问题的方案是:所述的三个光纤式迈克尔逊干涉仪是同步工作的,其同步产生的三路干涉光分别通过三个干涉光输出臂与光谱仪相连。

[0022] 本发明解决进一步技术问题的方案是:所述的三个光纤式迈克尔逊干涉仪的参考臂的光纤长度是不相等的,该三个参考臂的光纤长度 L_1 、 L_2 和 L_3 ,满足下列关系:

$$[0023] \quad L_1 = L$$

$$[0024] \quad L_2 - L_1 = \lambda / 4$$

$$[0025] \quad L_3 - L_1 = 3 \lambda / 4$$

[0026] 其中, λ 为宽带光源的中心波长; L 为任意数。

[0027] 本发明解决进一步技术问题的方案是:所述的三个光纤式迈克尔逊干涉的参考臂光纤端面作镜面抛光及镀金属膜,以形成参考反射镜。

[0028] 本发明解决进一步技术问题的方案是:所述的每个光纤式迈克尔逊干涉仪的光纤材料、系统结构、分光比及折射率特性参数是一致的。

[0029] 本发明解决进一步技术问题的方案是:所述的光谱仪包括三组依次连接的准直聚焦透镜、闪耀光栅和凹面反射镜、一个面阵 CCD 探测器和 A/D 转换器;来自所述的组合式干涉仪的三路干涉光信号分别通过各自的准直聚焦透镜会聚在闪耀光栅上,经闪耀光栅的分光作用后,经凹面反射镜成像在面阵 CCD 探测器上,形成三条彼此有一定间距的、互相平行的带状图像;该三条带状图像分别对应了三路干涉光的光谱分布,光谱分布信号再由 A/D 转换器送入计算机;所述的光谱仪可同步接收与处理三路干涉光信号。

[0030] 相较于现有技术,本发明在不使用参考光相位调制装置的情况下,利用光纤元件组建三个不同相移的干涉仪,根据三个的干涉仪同步产生的干涉光谱,结合复振幅干涉光谱重构算法,有效地消除了寄生像和复共轭镜像对层析图质量的影响,可实现反映被测样品真实结构的层析成像。还具有系统结构简单、动态范围宽及全量程的深度探测等优点。

附图说明

[0031] 图 1 是本发明的复谱频域光学相干层析成像系统的结构示意图。

具体实施方式

[0032] 以下内容是结合具体的优选实施方式对本发明所作的进一步详细说明,不能认定本发明的具体实施只局限于这些说明。对于本发明所属技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干简单推演或替换,都应当视为属于本发明的保护范围。

[0033] 一、本发明的复谱频域 OCT 技术原理

[0034] 1、组合式干涉仪的设计原理

[0035] 本发明中的组合式干涉仪由三个光纤式迈克尔逊干涉仪组合而成。通常的迈克尔逊干涉仪有光源臂、探测臂、样品臂和参考臂。本发明利用两个 1×3 光纤耦合器(分光比: $1 : 1 : 1$) 分别把三个光纤式迈克尔逊干涉仪的光源臂和样品臂耦合在一起,相当于这三个干涉仪,共用一个光源臂和一个样品臂。每个干涉仪的参考臂光纤端面作镜面抛光及镀金属膜,以形成参考反射镜。三个光纤式迈克尔逊干涉仪的光纤材料、系统结构、分光比及

折射率等特性参数完全一致；并且，除参考臂的光纤长度不相等外，其他臂的光纤长度完全相等。来自样品的信号光在每个干涉仪中与各自的参考光同时发生干涉，干涉光被输送到光谱仪，光谱仪同时测得的三个干涉光谱： $S_1(\omega)$ ， $S_2(\omega)$ 和 $S_3(\omega)$ 。

[0036] 根据光学理论， $S_1(\omega)$ ， $S_2(\omega)$ 和 $S_3(\omega)$ 满足：

[0037]

$$S_1(\omega) = |E_{R1}(\omega)|^2 + |E_{S1}(\omega)|^2 + E_{R1}(\omega)E_{S1}(\omega)\cos[\varphi_1(\omega)]$$

[0038]

$$S_2(\omega) = |E_{R2}(\omega)|^2 + |E_{S2}(\omega)|^2 + E_{R2}(\omega)E_{S2}(\omega)\cos[\varphi_2(\omega)] \quad (1)$$

[0039]

$$S_3(\omega) = |E_{R3}(\omega)|^2 + |E_{S3}(\omega)|^2 + E_{R3}(\omega)E_{S3}(\omega)\cos[\varphi_3(\omega)]$$

[0040] 其中， ω 为光频率， E_{R1} 、 $E_{R2}(\omega)$ 和 $E_{R3}(\omega)$ 分别是 3 个干涉仪各自参考光的电场幅值； E_{S1} 、 $E_{S2}(\omega)$ 和 $E_{S3}(\omega)$ 为三个干涉仪的样品光的电场幅值。根据干涉仪的上述设计特点，下列关系成立：

$$[0041] \quad E_{R1}(\omega) = E_{R2}(\omega) = E_{R3}(\omega) = E_R(\omega)$$

[0042]

(2)

$$[0043] \quad E_{S1}(\omega) = E_{S2}(\omega) = E_{S3}(\omega) = E_S(\omega)$$

[0044] 设 $\varphi_1(\omega)$ ， $\varphi_2(\omega)$ 和 $\varphi_3(\omega)$ 分别为三个干涉仪的参考光和信号光之间的相位差，由于光纤式迈克尔逊干涉仪的上述设计特点，对一定带宽范围内的光频率 ω ，相位 $\varphi_1(\omega)$ ， $\varphi_2(\omega)$ 和 $\varphi_3(\omega)$ 之间的差值，仅取决于各参考臂光纤的长度差，因此，可以通过控制三个参考臂光纤长度 (L_1 、 L_2 和 L_3)，调整干涉仪的参考臂与样品臂的光程差来实现。

[0045] 干涉仪设计时，可控制三个参考臂的光纤长度，使 L_1 、 L_2 和 L_3 满足下列关系：

$$[0046] \quad L_1 = L$$

$$[0047] \quad L_2 - L_1 = \lambda / 4 \quad (3)$$

$$[0048] \quad L_3 - L_1 = 3\lambda / 4$$

[0049] 其中， λ 为宽带光源的中心波长； L 为任意数。

[0050] 通过简单的计算可知，当 L_1 、 L_2 和 L_3 满足 (3) 式时，使 $\varphi_1(\omega)$ 、 $\varphi_2(\omega)$ 和 $\varphi_3(\omega)$ ，满足下列关系：

[0051]

$$\varphi_1(\omega) = \varphi(\omega)$$

[0052]

$$\varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega) = \pi / 2 \quad (4)$$

[0053]

$$\varphi_3(\omega) - \varphi_1(\omega) = 3\pi / 2$$

[0054] 其中 $\varphi(\omega)$ 为任意数。

[0055] 2、复振幅干涉光谱重构的原理

[0056] 1) 差分干涉光谱

[0057] 利用光谱仪同时测得的三个干涉光谱，计算差分干涉光谱：

$$[0058] \quad S_{\text{dif1}}(\omega) = S_1(\omega) - S_2(\omega)$$

$$[0059] \quad S_{\text{dif2}}(\omega) = S_1(\omega) - S_3(\omega)$$

[0060] 该差分计算,能消除寄生像(含直流背景、自相干噪声)的影响,可扩展系统的动态范围。

[0061] 2) 复振幅光谱 $S_{\text{COMPLEX}}(\omega)$ 的重构

[0062] 由(1)、(2)式,差分干涉光谱(5)式化为:

[0063]

$$S_{\text{dif1}}(\omega) = E_R(\omega)E_S(\omega)\{ \text{COS}[\varphi_1(\omega)] - \text{COS}[\varphi_2(\omega)] \}$$

[0064]

(6)

[0065]

$$S_{\text{dif2}}(\omega) = E_R(\omega)E_S(\omega)\{ \text{COS}[\varphi_1(\omega)] - \text{COS}[\varphi_3(\omega)] \}$$

[0066] 由(4)式,(6)可化为:

[0067]

$$S_{\text{dif1}}(\omega) = E_R(\omega)E_S(\omega)\{ \text{COS}[\varphi(\omega)] - \text{COS}[\varphi(\omega) + \pi/2] \}$$

[0068]

(7)

[0069]

$$S_{\text{dif2}}(\omega) = E_R(\omega)E_S(\omega)\{ \text{COS}[\varphi(\omega)] - \text{COS}[\varphi(\omega) + 3\pi/2] \}$$

[0070] 利用三角函数公式,(7)可化为:

[0071]

$$S_{\text{dif1}}(\omega) = E_R(\omega)E_S(\omega)\{ \text{COS}[\varphi(\omega)] + \text{SIN}[\varphi(\omega)] \}$$

[0072]

(8)

[0073]

$$S_{\text{dif2}}(\omega) = E_R(\omega)E_S(\omega)\{ \text{COS}[\varphi(\omega)] - \text{SIN}[\varphi(\omega)] \}$$

[0074] 对(8)式的两组干涉差分光谱的求和、求差,分别作为复振幅干涉光谱 $S_{\text{COMPLEX}}(\omega)$ 的实部和虚部:

$$[0075] \text{Re}[S_{\text{COMPLEX}}(\omega)] = S_{\text{dif1}}(\omega) + S_{\text{dif2}}(\omega)$$

$$[0076] \text{Im}[S_{\text{COMPLEX}}(\omega)] = S_{\text{dif1}}(\omega) - S_{\text{dif2}}(\omega)$$

[0077]

(9)

[0078]

$$\text{Re}[S_{\text{COMPLEX}}(\omega)] = 2E_R(\omega)E_S(\omega)\text{COS}[\varphi(\omega)]$$

[0079]

$$\text{Im}[S_{\text{COMPLEX}}(\omega)] = 2E_R(\omega)E_S(\omega)\text{SIN}[\varphi(\omega)]$$

[0080] 利用(9)式和欧拉公式,将实部和虚部合并,重构复振幅干涉光谱 $S_{\text{COMPLEX}}(\omega)$:

$$[0081] |S_{\text{COMPLEX}}(\omega)| = \sqrt{[S_{\text{dif1}}(\omega) + S_{\text{dif2}}(\omega)]^2 + [S_{\text{dif1}}(\omega) - S_{\text{dif2}}(\omega)]^2}$$

[0082]

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{S_{\text{dif1}}(\omega) - S_{\text{dif2}}(\omega)}{S_{\text{dif1}}(\omega) + S_{\text{dif2}}(\omega)} \quad (10)$$

[0083]

$$S_{\text{COMPLEX}}(\omega) = |S_{\text{COMPLEX}}(\omega)| e^{i\varphi(\omega)}$$

[0084] 从 (10) 式可以看出,只要知道三个干涉光谱: $S_1(\omega)$, $S_2(\omega)$ 和 $S_3(\omega)$,即可完成复振幅干涉光谱的重构。

[0085] $|S_{\text{COMPLEX}}(\omega)|$ 为干涉光谱的幅度值,而 $\varphi(\omega)$ 正是信号光与参考光之间的相位差,因此,重构的复振幅干涉光谱 $S_{\text{COMPLEX}}(\omega)$,既能提供干涉光谱的幅值信息,还能提供干涉光谱的相位信息。

[0086] 3、复谱频域 OCT 层析图的计算方法

[0087] 1) 复振幅光谱的变量空间变换

[0088] 将复振幅干涉光谱的变量空间,由频率 ω 变换到波数 κ ,

[0089] $\kappa = 2\pi/\lambda$, $\kappa = \omega/C$, λ 为光波长, C 为光速。则变量空间变换后的复振幅干涉光谱:

[0090]

$$S_{\text{COMPLEX}}(\kappa) = |S_{\text{COMPLEX}}(\kappa)| e^{i\varphi(\kappa)} \quad (11)$$

[0091] 2) 复谱频域 OCT 层析图 $I(z)$ 的计算

[0092] 对波数 κ 的空间的复振幅干涉光谱 $S_{\text{COMPLEX}}(\kappa)$,作逆傅立叶变换,得到被测样品真实结构的层析图 $I(z)$:

$$I(z) = F^{-1}[S_{\text{COMPLEX}}(\kappa)] \quad (12)$$

[0094]

$$I(z) = F^{-1} \left[|S_{\text{COMPLEX}}(\kappa)| e^{i\varphi(\kappa)} \right] \quad (13)$$

[0095] F^{-1} 表示波数 κ 的空间逆傅立叶变换, z 为被测样品的沿光轴探测方向。

[0096] 由 (13) 式可知,复谱频域 OCT 层析图 $I(z)$,也是一个复变量分布,既能提供样品信号光的幅值信息,还能提供样品信号光的相位信息,不存在复共轭镜像的影响问题。

[0097] 本发明提供的复谱频域 OCT 方法,其包括以下步骤:

[0098] 步骤 1:在参考光的三种不同相位 ($\varphi_1(\omega)$, $\varphi_2(\omega)$ 和 $\varphi_3(\omega)$) 状态下,测得三组干涉光谱: $S_1(\omega)$, $S_2(\omega)$ 和 $S_3(\omega)$;

[0099] 步骤 2:分别计算 $S_1(\omega)$ 与 $S_2(\omega)$ 、 $S_1(\omega)$ 与 $S_3(\omega)$ 的差值,得到两组干涉差分光谱 $S_{\text{dif1}}(\omega)$ 和 $S_{\text{dif2}}(\omega)$;

[0100] 步骤 3:取该两组干涉差分光谱的和、差,分别作为复振幅实部、复振幅虚部,得到在频率 ω 的空间中的复振幅干涉光谱,或称为干涉光复谱;

[0101] 步骤 4:再将频率 ω 的空间中的复振幅干涉光谱的变量空间由频率 ω 变换到波数 κ ,得到在波数 κ 的空间中的复振幅干涉光谱;

[0102] 步骤 5:对波数 κ 的空间中的复振幅干涉光谱,作逆傅立叶变换,得到被测样品沿光轴方向的深度扫描信息即层析图 $I(z)$,该层析图 $I(z)$ 能反映被测样品的真实结构。

[0103] 其中所述的参考光的三种不同相位 $\varphi_1(\omega)$, $\varphi_2(\omega)$ 和 $\varphi_3(\omega)$,满足下列关系:

[0104]

$$\varphi_1(\omega) = \varphi(\omega)$$

[0105]

$$\varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega) = \pi/2$$

[0106]

$$\varphi_3(\omega) - \varphi_1(\omega) = 3\pi / 2$$

[0107] 其中 $\varphi(\omega)$ 为任意数,因此,第一相位 $\varphi_1(\omega)$ 可任意选择。

[0108] 由上述的复谱频域 OCT 技术原理,我们知道,由于采用差分光谱算法,能极大地消除寄生像(含直流背景、自相干噪声)的影响,大大扩展系统检测的动态范围。又由于重构得到的复振幅干涉光谱,同时包含了干涉光谱的幅值信息和相位信息,因而,对此作逆傅立叶变换得到的复谱频域 OCT 层析图,不存在复共轭镜像的影响问题。所以,本发明的复谱频域 OCT 层析图可反映被测样品的真实结构,且探测深度是全量程的。

[0109] 二、本发明的复谱频域光学相干层析成像系统的具体实施方式

[0110] 如图 1 所示,本发明提供一种复谱频域光学相干层析成像系统,其包括宽带光源、光源耦合器、组合式干涉仪、光纤成像探头、光谱仪、温度控制器以及计算机。其中宽带光源发出的光,经光源耦合器进入组合式干涉仪,通过光纤成像探头照射被测样品;由被测样品返回的背向散射光,再通过光纤成像探头返回干涉仪,与参考光相干产生干涉光;干涉光通过光谱仪形成干涉光谱信号;干涉光谱信号经计算机处理后,得到被测样品的层析图;所述的温度控制器为保证组合式干涉仪的环境温度稳定,旨在防止环境温度的变化,导致组合式干涉仪的特性产生漂移,而影响系统的性能。

[0111] 其中所述的组合式干涉仪包括三个光纤式迈克尔逊干涉仪,该三个光纤式迈克尔逊干涉仪均由 2×2 宽带光纤耦合器建立,利用两个 1×3 宽带光纤耦合器(分光比: $1 : 1 : 1$) 分别把三个光纤式迈克尔逊干涉仪的光源输入臂和样品信号臂耦合在一起,相当于这三个干涉仪,共用一个光源输入臂和一个样品信号臂;这样,该组合式干涉仪有一个光源输入臂、一个样品信号臂、三个干涉光输出臂和三个参考臂。

[0112] 所述的三个光纤式迈克尔逊干涉仪是同步工作的,其同步产生三路干涉光分别通过三个干涉光输出臂与光谱仪相连。

[0113] 所述的三个光纤式迈克尔逊干涉仪的参考臂的光纤长度是不相等的,该三个参考臂的光纤长度: L_1 、 L_2 和 L_3 满足下列关系:

$$[0114] \quad L_1 = L$$

$$[0115] \quad L_2 - L_1 = \lambda / 4$$

$$[0116] \quad L_3 - L_1 = 3\lambda / 4$$

[0117] 其中, λ 为宽带光源的中心波长; L 为任意数,第一个光纤式迈克尔逊干涉仪的参考臂光纤长度 L_1 可任意选择。

[0118] 所述的三个光纤式迈克尔逊干涉的参考臂光纤端面作镜面抛光及镀金属膜,以形成参考反射镜;除参考臂的光纤长度不相等外,其他臂的光纤长度完全相等,每个光纤式迈克尔逊干涉仪的光纤材料、系统结构、分光比及折射率等特性参数完全一致。

[0119] 所述的光谱仪包括三组依次连接的准直聚焦透镜、闪耀光栅和凹面反射镜、一个面阵 CCD 探测器和 A/D 转换器;来自所述的组合式干涉仪的三路干涉光信号分别通过各自的准直聚焦透镜会聚在闪耀光栅上,经闪耀光栅的分光作用后,经凹面反射镜成像在面阵 CCD 探测器上,形成三条彼此有一定间距的、互相平行的带状图像;该三条带状图像分别对应了三路干涉光的光谱分布,光谱分布信号再由 A/D 转换器送入计算机;所述的光谱仪可同步接收与处理三路干涉光信号。

[0120] 本发明在不使用参考光相位调制装置的情况下,利用光纤元件组建三个不同相移

的干涉仪,根据三个的干涉仪同步产生的干涉光谱,结合复振幅干涉光谱重构算法,有效地消除了寄生像和复共轭镜像对层析图质量的影响,可实现反映被测样品真实结构的层析成像。还具有系统结构简单、动态范围宽及全量程的深度探测等优点。

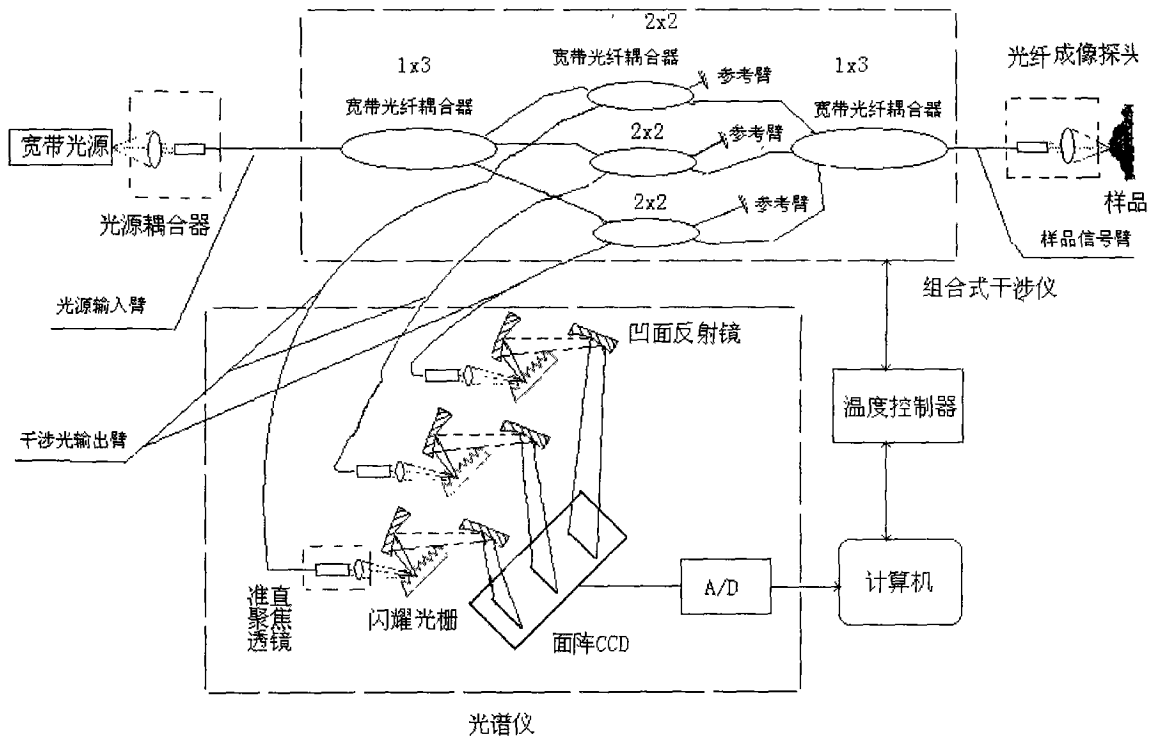


图 1

| | | | |
|----------------|------------------------------|----------------------|------------|
| 专利名称(译) | 一种复谱频域光学相干层析成像方法以及系统 | | |
| 公开(公告)号 | CN101297750B | 公开(公告)日 | 2011-08-17 |
| 申请号 | CN200810066974.4 | 申请日 | 2008-05-09 |
| [标]申请(专利权)人(译) | 深圳职业技术学院 | | |
| 申请(专利权)人(译) | 深圳职业技术学院 | | |
| 当前申请(专利权)人(译) | 深圳职业技术学院 | | |
| [标]发明人 | 邹波 | | |
| 发明人 | 邹波 | | |
| IPC分类号 | G06F19/00 A61B5/00 | | |
| 其他公开文献 | CN101297750A | | |
| 外部链接 | Espacenet | SIPO | |

摘要(译)

本发明提供一种复谱频域光学相干层析成像方法及系统，其包括宽带光源、光源耦合器、组合式干涉仪、光纤成像探头、光谱仪、温度控制器及计算机；首先在参考光的三种不同相位状态下，测得三组干涉光谱，然后计算出两组干涉差分光谱，再取该两组干涉差分光谱的之和、之差，分别作为复振幅的实部和虚部，重构出波数空间中的复振幅干涉光谱，最后对该复振幅干涉光谱作逆傅立叶变换，得到被测样品沿光轴方向的深度扫描信息即层析图。本发明在不使用参考光相位调制装置的情况下，有效地消除了寄生像和复共轭镜像对层析图质量的影响，可实现反映被测样品真实结构的层析成像，还具有结构简单、动态范围宽及全量程的深度探测等优点。

