



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105637345 B

(45)授权公告日 2018.06.12

(21)申请号 201480036523.X

(22)申请日 2014.05.20

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 105637345 A

(43)申请公布日 2016.06.01

(30)优先权数据  
61/826,663 2013.05.23 US  
61/927,354 2014.01.14 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日  
2015.12.25

(86)PCT国际申请的申请数据  
PCT/US2014/038837 2014.05.20

(87)PCT国际申请的公布数据  
W02014/189967 EN 2014.11.27

(73)专利权人 海因兹仪器公司  
地址 美国俄勒冈州

(72)发明人 约翰·弗罗伊登塔尔  
安迪·利德贝特 王宝良

(74)专利代理机构 中原信达知识产权代理有限  
责任公司 11219  
代理人 鲁山 孙志湧

(51)Int.Cl.  
G01N 21/21(2006.01)  
G01N 21/23(2006.01)  
G01J 4/04(2006.01)

(56)对比文件  
US 6157448 A,2000.12.05,  
CN 1739007 A,2006.02.22,  
WO 2004/059266 A2,2004.07.15,  
WO 99/42796 A1,1999.08.26,  
JP 3063843 B2,2000.07.12,

审查员 李婷

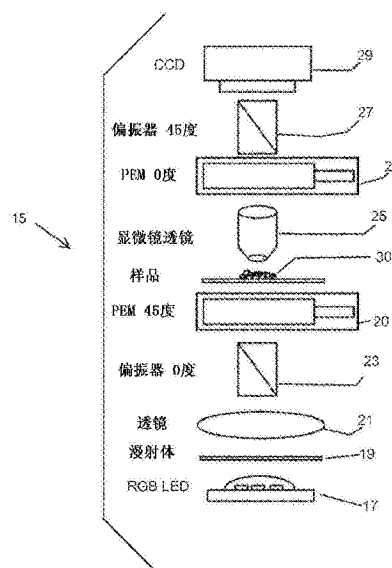
权利要求书2页 说明书18页 附图12页

(54)发明名称

偏振性质成像系统

(57)摘要

本公开通常针对于用于将光学材料样品的偏振性质成像的系统。作为一个方面,提供用于在宽范围的入射角上进行样品材料的面内与面外双折射性质两者的精确、同时成像的系统。除作为优选实施例而论述的面内和面外双折射测量之外,此处所述的空间分辨成像方法适用于宽范围的偏振性质的确定。



1. 一种在宽范围的入射角上将样品的面内与面外双折射性质同时成像的方法,包括以下步骤:

将多个经偏振调制的光线引导到样品位置,使得每一光线具有特定入射角,使得所述多个光线相对于所述样品定义多个入射角;

将穿过所述样品的所述光线中的每一个重新引导至成像装置的分离的像素,因此每一光线的强度特性能够被检测到;

将与被应用到所述光线的偏振调制对应的经频率合成的波形用作触发信号而对所述成像装置进行选通;以及

同时检测与所重新引导的光线中的每一个相关联的所述样品的双折射性质。

2. 根据权利要求1所述的方法,包括以下步骤:使用以光弹性调制器频率操作的光弹性调制器来调制所述光线的偏振;并且其中

所述选通步骤包括使用基于半占空比的方波与所述光弹性调制器频率的频率合成的触发信号。

3. 根据权利要求2所述的方法,其中,调制所述光线的偏振的所述步骤包括使用两个或更多个光弹性调制器,并且其中,所述选通步骤包括使用基于半占空比的方波与所述两个或更多个光弹性调制器的频率的频率合成的触发信号。

4. 一种对成像系统中的检测器进行选通的方法,所述成像系统包括在光源与检测器之间具有偏振调制器的光学设置,其中,所述检测器被定位为从所述光源接收光并且响应于所接收的光而产生检测信号,并且其中,所述偏振调制器调制被引导穿过所述偏振调制器的光的强度以提供代表该调制的调制器输出波形,所述方法包括以下步骤:

提供选通机构,所述选通机构能够被触发以控制所述检测器从所述光源接收光的曝光时间段;

选择第一波形;

合成所述调制器输出波形与所述第一波形以产生触发信号;以及

将所述触发信号应用到所述选通机构以触发所述选通机构,并且进而控制所述检测器从所述光源接收光的曝光时间段。

5. 根据权利要求4所述的方法,包括以下步骤:解调所述检测信号。

6. 一种触发光学列中的光源的方法,所述光学列被配置为使得从所述光源放射的光源光穿过样品,并且穿过能够以第一调制频率操作的第一光弹性调制器、穿过能够以第二调制频率操作的第二光弹性调制器,并且到具有操作频率的成像装置,所述方法包括以下步骤:

提供能够在开启与关断状态之间触发的光源;

产生对应于所述第一调制频率的第一脉冲列;

产生对应于所述第二调制频率的第二脉冲列;

在所述第一脉冲列和所述第二脉冲列同步的情形期间产生触发脉冲;以及

仅响应于所述触发脉冲将所述光源触发为处于所述开启状态中。

7. 根据权利要求6所述的方法,进一步包括以下步骤:改变所述光源光的波长。

8. 根据权利要求6所述的方法,进一步包括以下步骤:将所述成像装置作为强度积分器来操作。

9. 根据权利要求6所述的方法,其中,所述成像装置操作频率比所述第一调制频率或所述第二调制频率慢至少一个量级。

10. 根据权利要求6所述的方法,其中,所述第一调制频率和所述第二调制频率不相等。

11. 一种触发光学列中的光源的方法,所述光学列被配置为使得从所述光源放射的光源光穿过样品,并且穿过能够以第一调制频率操作的第一光弹性调制器、穿过能够以第二调制频率操作的第二光弹性调制器,并且到成像装置,所述成像装置提供与入射到其上的光对应的图像数据,所述方法包括以下步骤:

提供能够在开启与关断状态之间触发的光源;

依序操作所述第一光弹性调制器和所述第二光弹性调制器,以使得在任何时间仅一个光弹性调制器操作;

产生分别对应于所述第一调制频率和所述第二调制频率的第一触发脉冲和第二触发脉冲;以及

以所述第一触发脉冲和所述第二触发脉冲依序触发所述光源。

12. 根据权利要求11所述的方法,包括以下步骤:依序收集与所述光弹性调制器的依序操作相关的图像数据。

13. 根据权利要求11所述的方法,进一步包括以下步骤:改变所述光源光的波长。

14. 根据权利要求11所述的方法,其中,所述产生步骤包括在第一光弹性调制器操作循环的四个离散相位中的每一个处产生所述第一触发脉冲。

15. 一种触发光学列中的光源的方法,所述光学列被配置为使得从所述光源放射的光源光穿过样品,并且穿过能够以调制频率操作的光弹性调制器,到成像装置,所述成像装置提供与入射到其上的光对应的图像数据,所述方法包括以下步骤:

提供能够在开启与关断状态之间触发的光源;

产生对应于所述光弹性调制器调制频率的触发脉冲;以及

以所述触发脉冲触发所述光源。

16. 根据权利要求15所述的方法,包括以下步骤:改变所述光源光的波长。

## 偏振性质成像系统

[0001] 本申请要求2013年5月23日提交的第61/826,663号美国临时专利申请的优先权,该美国临时专利申请的全部公开内容以引用方式并入本文中。本申请还要求2014年1月14日提交的第61/927,354号美国临时专利申请的优先权,该美国临时专利申请的全部公开内容以引用方式并入本文中。

### 技术领域

[0002] 本申请涉及用于将光学材料样品的偏振性质成像的系统。此种系统的一个实例在宽范围的入射角上提供样品的面内与面外双折射性质两者的同时成像。

### 背景技术

[0003] 许多重要光学材料展现双折射。双折射导致光的不同线性偏振以不同速度行进穿过材料。这些不同偏振最常被视为偏振光的两个分量,其中一个分量正交于另一分量。

[0004] 双折射是许多光学材料的固有性质,且还可通过施加到材料的外力来诱发。所诱发的双折射可为暂时的,这在材料振荡时发生;或双折射可为残余的,这在材料在生产期间经受热应力时产生。

[0005] 延迟或迟滞表示沿着横穿光学材料的样品的光束的路径而作用的双折射的集成效应。如果入射光束是线性偏振的,那么偏振光的两个正交分量将在存在相位差的情况下离开样品,这被称为迟滞。迟滞的基本单位是长度,例如,纳米(nm)。迟滞的第二便利表达是以相位角为单位(波、弧度或度),其为迟滞(nm)除以光的波长(nm)。样品的“归一化”双折射有时通过将所测量的迟滞量值除以样品的厚度来计算。

[0006] 上文所述的两个正交的偏振光束分量平行于与光学材料相关联的两条正交轴线,所述轴线被称为“快轴”和“慢轴”。快轴是与穿过样品的偏振光的较快移动分量对齐的材料的轴线。沿着给定光学路径的样品的迟滞的完整描述需要指定迟滞的量值与样品的快轴(或慢轴)的相对角定向两者。

[0007] 双折射性质的精确测量的需要在许多技术应用,例如用于半导体和其它工业中的高精度仪器中的光学元件中的线性双折射的计量中变得日益重要。

[0008] 包括以引用方式并入本文中的第6,473,179号美国专利,双折射测量系统(Birefringence Measurement System)的现有技术公开用于使用相对于样品的表面以法向(零度)入射角引导穿过样品的光束来测量样品的双折射的方法和装置。因此,样品的双折射的确定是“面内”或“法向”的,这意味确定基本上表示样品的平面中的两条正交轴线的折射率之间的差,其中该平面垂直于入射光束。术语“面内迟滞”或“法向迟滞”意味面内双折射与所测量的光学样品的厚度的乘积。

[0009] 例如,上述第6,473,179号美国专利中所公开的系统的现有系统可被称为“基于点的测量系统”,这是因为针对样品中单个点或位置来收集双折射数据,一次一个点。这些系统尤其适用于具有极低到中间范围的等级的双折射的样品。

[0010] 许多显示器技术依赖于偏振光的控制,且例如液晶显示器(LCD)面板的系统中所

使用的材料的双折射影响所得到的图像的颜色和对比度。对于液晶和许多材料来说,双折射的程度或量值是所考虑的光的入射角的函数。举例来说,(从法向)增大LCD面板的视角将对从面板放射的光增大双折射效应,且在不存在补偿的情况下,该增大通过减小对比度和/或更改颜色而降低可见光的感知质量。当在法向入射中查看时,光的速度受两个正交折射率 $n_x$ 和 $n_y$ 影响。双折射是这两个性质的差的函数。当在非法向入射中时,光还受第三正交折射率 $n_z$ 影响。

[0011] 出于补偿归因于视角的上述双折射变化的目的,已开发透明聚合物膜来用于LCD面板。简单地说,这些膜具有双折射特性,所述双折射特性补偿LCD面板的双折射且因此提供广视角,而对比度或颜色无显著损失。

[0012] 将这些膜和其它光学材料在不垂直于入射角(相对于入射角不呈零度)的平面中的有效双折射特性化实现这些材料的优化、控制和分析。此双折射度量可被称为“面外”双折射。可在笛卡尔坐标系统方面考虑面内和面外双折射的概念。因此,如果法向入射光被视为在平行于此坐标系统的Z轴的方向上行进,那么在样品的XY平面中发生面内双折射。面外双折射处于不与面内(XY平面)双折射一致的平面中。在XZ或YZ平面中发生了特殊状况,其中所述平面垂直于XY平面。术语垂直双折射和“ $R_{th}$ ”明确用于这些特殊状况。 $R_{th}$ 意味垂直(XZ或YZ)双折射与所测量的光学样品的厚度的乘积。

[0013] 除刚论述的双折射补偿膜实例之外,其它应用可也需要面外双折射的精确确定。举例来说,单轴晶体具有唯一光轴(Z轴)。垂直于此轴线而传播的光轴经历最大固有双折射。沿着此轴线传播的光轴不经历固有双折射。XZ或YZ平面上的双折射是沿着Z轴传播的光束的“面外”双折射。

[0014] 在以引用方式并入本文中的第7,312,869号美国专利(“869专利”)中,公开用于透明光学材料的样品的面外双折射性质的精确测量的基于点的方法和装置。两个成角度分开的经偏振调制的光束穿过样品光学元件的选定位置。光束中的一者以法向或零度入射到样品表面,且另一光束相对于该表面是倾斜的。在穿过样品之后,检测光束的特性,且处理所检测的信息以确定面外双折射。

[0015] 如‘869专利所述,面外双折射计算涉及从法向入射光束与倾斜光束两者导出的信息。因此,在此处所述的双光束方法中,斜角光束穿透的单个样品位置实质上与法向入射光束穿透的位置对齐,且大小不会与其显著不同。

[0016] 如上所述,对于许多材料来说,双折射的程度或量值是所考虑的光的入射角的函数,且(从法向)增大LCD面板的视角将对从面板放射的光增大双折射效应。为了以若干不同角度测量此材料的双折射(进而(例如)设计适当的补偿膜),对一定范围的斜角入射进行若干测量。在例如‘869专利所述的基于点的系统的基于点的系统中,样品可依序倾斜到若干离散角位置中,且在每一位置处,斜角光束被引导穿过样品以检测该特定角度的相关联的双折射信息。为了产生经过改进的结果,可在多个入射角下进行测量。这多个测量通常是通过以机械方式旋转或倾斜样品来依序进行。这众多依序测量需要大量时间来完成。

[0017] 与所涉及的特定偏振性质,例如仅面内双折射、或面内与面外双折射两者无关,某些光学材料样品可具有对于成像技术可修改以便跨越样品的宽区域迅速收集用于计算受追求的性质的数据的配置和双折射特性。用于跨越样品的区域(或整个区域)收集此数据的成像系统将提供高空间分辨率,且尤其适用于低等级到高等级的双折射,也就是说,其中样

品不以极低等级的双折射为特性。

### 发明内容

[0018] 本发明总的来说针对于用于将光学材料样品的偏振性质成像的系统。作为本发明的一个方面,提供用于在宽范围的入射角上进行样品材料的面内与面外双折射性质两者的精确、同时成像的系统。除作为优选实施例而论述的面内和面外双折射测量之外,此处所述的空间分辨成像方法适用于宽范围的偏振性质的确定。

[0019] 本发明的成像系统的优选实施例包括光学列(optical train),其中该光学系列具有用于被引导穿过样品的光的偏振的高度稳定的调制的两个或更多个振荡光弹性调制器(PEM)。用于经空间分辨的(且经偏振调制的)光束的成像检测器包括CMOS或CCD型相机。作为积分检测器的这种装置的操作频率可相对慢,且通常比PEM的振荡慢一个量级。在不存在本发明的情况下,此长积分或曝光时间会对将PEM所产生的振荡信号进行平均化具有不良影响。

[0020] 换句话说,问题是,相对慢的相机/检测器无法以PEM的高调制频率驱动。本发明通过以下方式来提供解决此问题的方式:以使得检测器仅在PEM处于已知状态中的情形下接收光脉冲的方式来对光源或成像检测器进行选通,从而使得所收集的图像(强度)数据适用于准确地计算双折射性质,如下所述。

[0021] 然而,在一些情形下,光源的这种选通或脉动可导致低劣的曝光时间-强度比,这对于一些样品来说,可产生实质的且不良的暗电流和光污染噪声。本发明的另一方面提供通过以下方式来解决此问题的系统:使用通过触发信号来操作的选通机构,其中该触发信号是基于来自PEM的组合输出信号的频率合成。尤其是,根据本发明而产生的触发信号允许进行确保可用光强度的至少50%被成像装置接收的选通。

[0022] 根据对本说明书的以下部分和附图的研究,本发明的其它优点和特征将变得清楚。

### 附图说明

[0023] 图1是示出可用于跨越的样本的区域而将例如双折射的偏振性质成像的系统的的光学构件的一个优选布置的图示。

[0024] 图2和图3是说明关于光学设置的PEM构件的操作而在特定时刻触发光源的一种优选方法的图示。

[0025] 图4是示出可用于跨越的样本的区域而将例如斯托克斯(Stokes)参数的偏振性质成像的系统的的光学构件的另一优选布置的图示。

[0026] 图5是示出可用于将偏振性质成像的系统的的光学构件的另一优选布置的图示。

[0027] 图6是示出可用于将例如差分消光的偏振性质成像的系统的的光学构件的另一优选布置的图示。

[0028] 图7是用于同时将样品的面内与面外双折射性质两者成像的系统的的光学构件的优选布置的图示。

[0029] 图8是类似图7的图示,但说明系统的光源和检测光学构件的细节。

[0030] 图9是示出PEM所产生的贝塞尔(Bessel)波形与作为本系统的成像装置的选通触

发信号的一部分而产生的半占空比的方波之间的关系图示。

[0031] 图10是说明用于产生本系统的所选通的成像装置的经频率合成的触发信号的步骤的图示。

[0032] 图11是说明与单个PEM系统的所测量的方波解调信号相比的正弦/余弦解调信号的谐波关系的图示。

[0033] 图12和图13是说明两个或更多个PEM的贝塞尔波形如何组合以达到正确幅度,以此来驱动PEM而实现来自成像装置的输出信号的良好调节的解调的图示。

### 具体实施方式

[0034] 图1描绘可用于跨越样本的区域而将偏振性质(例如,双折射)成像的系统15的光学构件的一个优选布置或“设置”的图示。该系统包括光源17,其中光源17引导光(在图1的设置中,向上)穿过样品30直到成像装置29,例如,常规CMOS或CCD型相机。光源优选为具有发射红色(“R”,具有(例如)630纳米(nm)的波长)、绿色(“G”,具有(例如)530nm的波长)和蓝色(“B”,具有(例如)470nm的波长)的个别地控制的二极管的LED,所述二极管优选被依序开启和关断或“触发”。(对于需要较低精度的测量,系统可使用RGB拜耳(Bayer)滤光片相机且同时记录红色、绿色和蓝色迟滞值。)

[0035] 来自光源17的光穿过漫射体19和透镜21,相对宽的经准直的光束从透镜21传播,该光束穿过相对于该设置的基线轴以 $0^\circ$ 定向的偏振器23。

[0036] 从偏振器23放射的偏振光入射在第一光弹性调制器(“PEM”)20的光学元件上。在优选实施例中,PEM是由俄勒冈州希尔巴罗市的海因兹仪器公司(Hinds Instruments, Inc., of Hillsboro, Oregon)制造的PEM。将PEM用于调制光源光的偏振是优选的,这是因为PEM调制速度快、对传播角度不敏感、孔径大、精度高和光谱范围大。然而,预想到其它机构可用于调制光源光的偏振,例如,电光调制器、液晶延迟器和以机械方式调制的波片。

[0037] PEM 20具有以 $45^\circ$ 定向的双折射轴,且受相关联的控制器控制,其中该控制器优选以42kHz的标称频率将振荡双折射给予PEM的光学元件。就这来说,控制器驱动附接到PEM 20的光学元件的一个或更多个石英换能器。

[0038] PEM 20的振荡双折射在传播穿过PEM的偏振光的正交分量之间引入时变相位差。在任何时刻,相位差都表示由PEM引入的延迟。如较早所述,延迟可按例如纳米的长度单位来测量。PEM 20是可调整的,以允许由PEM引入的延迟的幅度变化。

[0039] 继续参照图1,从样品30放射的光被引导穿过透镜25——在此实施例中,显微镜透镜——直到第二PEM 22,其中第二PEM 22受相关联的控制器控制而以与第一PEM 20的调制频率不同的调制频率(例如,47kHz)操作。第二PEM 22以 $0^\circ$ 定向。以 $45^\circ$ 定向的第二偏振器27处于第二PEM 22与CCD 29之间。

[0040] 值得注意的是,图1所说明的系统配置包括显微镜透镜,且因而适用于以 $2\times$ 到 $10\times$ 的放大率和1到8兆像素(MP)的分辨率将例如面积为 $200\mu\text{m}^2$ 到 $1\text{cm}^2$ 的小视野或显微镜视野成像。应了解,本文所述的系统的成像透镜构件可视需要而变化以适应于用于将对应大样品成像的更大视野。可尤其使用科勒(Köhler)与远心(包括漫射体)样品照射方法两者。

[0041] 继续参照图1,CCD 29包括个别像素,其中的每一个都接收穿过样品30的特定点的光,以使得每一像素中所俘获的光强度对应于该特定点的双折射特性。明确地说,对于样品

中的每一点来说,所涉及的量是迟滞 $\delta$ 和快轴的角度 $\theta$ 。如下表达为 $4 \times 4$ 穆勒 (Mueller) 矩阵。

$$[0042] \quad M_{bir}(\delta_s, \theta_s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{11} & M_{12} & -\sin(2\theta_s) \sin(\delta_s) \\ 0 & -M_{12} & M_{22} & \cos(2\theta_s) \sin(\delta_s) \\ 0 & \sin(2\theta_s) \sin(\delta_s) & -\cos(2\theta_s) \sin(\delta_s) & \cos(\delta_s) \end{bmatrix}$$

[0043] 概况地说,图1的双PEM双折射成像显微镜系统的光学路径包括LED光源、线性偏振器、PEM、样品、第二PEM、第二线性偏振器和CCD相机。对于CCD的每一像素来说,测量样品的线性迟滞 $\delta_s$ 和快轴的角度 $\theta_s$ 。

[0044] 最好以穆勒矩阵来表达光学列的数学关系。下文示出线性偏振器的穆勒矩阵。

$$[0045] \quad M_{pol}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & C_\theta & S_\theta & 0 \\ C_\theta & C_\theta^2 & C_\theta S_\theta & 0 \\ S_\theta & C_\theta S_\theta & S_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

[0046] 在上文的方程式中, $C_\theta = \cos\theta$ ,且 $S_\theta = \sin\theta$ ,其中 $\theta$ 是线性偏振器的旋转的半角。

[0047] 下文给出PEM的穆勒矩阵。

$$[0048] \quad M_{PEM}(\theta, \delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_\delta S_\theta^2 + C_\theta^2 & C_\theta S_\theta(1 - C_\delta) & -S_\delta S_\theta \\ 0 & C_\theta S_\theta(1 - C_\delta) & C_\delta C_\theta^2 + S_\theta^2 & S_\delta C_\theta \\ 0 & S_\delta S_\theta & -S_\delta C_\theta & C_\delta \end{bmatrix}$$

[0049] 其中 $C_\delta = \cos\delta$ ,且 $S_\delta = \sin\delta$ ,其中 $\delta(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$ , $A$ 是调制幅度, $\omega$ 是光弹性调制器的角速度, $t$ 是时间,且 $\varphi$ 是光弹性调制器的相位延迟。

[0050] 将所涉及的样品呈现为具有采取例如上文的PEM的线性双折射材料形式的穆勒矩阵,但此处,如下所示,使用通用右下方穆勒矩阵来表达样品的穆勒矩阵。

$$[0051] \quad M_s = \begin{bmatrix} M_{00} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ 0 & M_{12} & M_{22} & M_{23} \\ 0 & -M_{13} & -M_{23} & M_{33} \end{bmatrix}$$

[0052] 样品穆勒矩阵的元素 $M_{mn}$ 等同于 $M_{PEM}(\theta, \delta)$ ,其中 $\theta = \theta_s$ ,且 $\delta = \delta_s$ ,其中 $\theta_s$ 为快轴的角度,且 $\delta_s$ 为样品的迟滞。稍后将隔离这两个量,但首先以穆勒矩阵来表达整个光学路径以隔离所涉及的项。

$$[0053] \quad M_{OT} = M_{pol}(0) M_{PEM}\left(\frac{\pi}{4}, \delta_2\right) M_s M_{PEM}(0, \delta_1) M_{pol}\left(\frac{\pi}{4}\right)$$

[0054] CCD处的时间相依强度由整个光学列的穆勒矩阵的00元素 $M_{OT}$ 给出,且在下文示出。

$$[0055] \quad I(\delta_1, \delta_2) = M_{00} + C_{\delta_1} C_{\delta_2} M_{12} + C_{\delta_1} S_{\delta_2} M_{23} + S_{\delta_1} C_{\delta_2} M_{13} + S_{\delta_1} S_{\delta_2} M_{33}$$

[0056] 接着将强度表达式向量化以隔离所涉及的项(其为 $M_s$ 的元素)。

$$[0057] \quad I(\delta_1, \delta_2) = [1 \ C_{\delta_1} C_{\delta_2} \ C_{\delta_1} S_{\delta_2} \ S_{\delta_1} C_{\delta_2} \ S_{\delta_1} S_{\delta_2}] [M_{00} \ M_{12} \ M_{23} \ M_{13} \ M_{33}]^T$$



[0058] 在上文表达式中,T是转置运算。如下文将解释,光源受控制以仅在 $\delta_1$ 与 $\delta_2$ 两者处于已知值时脉动。可拍摄许多图像,且可将每一者的向量汇编为如下所示的完整矩阵。

[0059]  $I = AM$

$$[0060] \quad I = \begin{bmatrix} I(\delta_{1A}, \delta_{2A}) \\ I(\delta_{1B}, \delta_{2B}) \\ \vdots \\ I(\delta_{1N}, \delta_{2N}) \end{bmatrix}$$

$$[0061] \quad A = \begin{bmatrix} 1 & C_{\delta_{1A}} C_{\delta_{2A}} & C_{\delta_{1A}} S_{\delta_{2A}} & S_{\delta_{1A}} C_{\delta_{2A}} & S_{\delta_{1A}} S_{\delta_{2A}} \\ 1 & C_{\delta_{1B}} C_{\delta_{2B}} & C_{\delta_{1B}} S_{\delta_{2B}} & S_{\delta_{1B}} C_{\delta_{2B}} & S_{\delta_{1B}} S_{\delta_{2B}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & C_{\delta_{1N}} C_{\delta_{2N}} & C_{\delta_{1N}} S_{\delta_{2N}} & S_{\delta_{1N}} C_{\delta_{2N}} & S_{\delta_{1N}} S_{\delta_{2N}} \end{bmatrix}$$

[0062]  $M = [M_{00} \ M_{12} \ M_{23} \ M_{13} \ M_{33}]^T$

[0063] 在上文的方程式中,I是不同PEM迟滞值 $\delta_1$ 和 $\delta_2$ 下的强度值的向量。分析器矩阵A包括在已知迟滞值下的余弦值和正弦值。鉴于最少的可行图像,分析器矩阵的条件数接着被优化。接着取该方程式的倒数以对M的量求解。

[0064]  $M = A^{-1}I$

[0065] 如果收集到超过5个图像,那么使用伪逆。自此,使用以下方程式来对线性迟滞 $\delta_s$ 和快轴的角度 $\theta_s$ 求解。

$$[0066] \quad \theta_s = \frac{1}{2} \tan 2^{-1}(M_{13}, M_{23})$$

$$[0067] \quad \delta_s = \tan^{-1} \left( \sqrt{\left( \frac{M_{13}}{M_{33}} \right)^2 + \left( \frac{M_{23}}{M_{33}} \right)^2} \right)$$

[0068] 在上文中, $\tan 2^{-1}$ 是四象限反正切。

[0069] 挑战是仅在PEM的给定值下检测强度。为达到此目的,LED光源可在PEM的每一循环期间被短期触发,如图2所示且如下文所论述。

[0070] 图2示出随着调制器的迟滞改变,迟滞的正弦和余弦在-1与1之间交替。因此,为了测量余弦分量的幅度 $\cos(\delta)$ ,可通过使光源光LED17在由虚线区 $I_{A-}$ 和虚线波状区 $I_{A+}$ 指示的时间闪光来收集两个图像。这两个图像的强度差 $I_A$ 和与 $\cos(\delta)$ 耦合的分量成比例。

$$[0071] \quad I_A = \frac{I_{A+} - I_{A-}}{2}$$

[0072] 在图1所示的光学列中,所涉及的所有分量具有两个调制器双折射项。为了收集这些量,可使用两种方法中的一者。第一方法等同于上文的图表和实例:每当两个调制器中的一者处于给定相位时,就收集强度。这将导致另一调制器的余弦项被时间平均化,如下文在雅克比安格展开式(Jacobi Anger expansion)中所示。

$$[0073] \quad J_0[|A|] = \int_0^T \frac{\cos[\cos[t]]}{T} dt \approx \sum_{t=0}^T \frac{\cos[\cos[t]]}{T}$$

$$[0074] \quad 0 = \int_0^T \frac{\sin[\cos[t]]}{T} dt \approx \sum_{t=0}^T \frac{\sin[\cos[t]]}{T}$$

[0075] 举例来说,如果触发被设定为与第一调制器同相地使LED闪烁或脉动且忽略第二个,那么项 $C_{\delta_1}C_{\delta_2}$ 将变成 $\cos(\delta_1) J_0[|A_2|]$ 。此方案的问题在于所有正弦项变成零,且无法测量。

[0076] 为了测量正弦项,触发必须考虑两个调制器的操作。这可通过一件专用的硬件来实现,该硬件在考量多个调制器的同时,查看PEM所产生的方波且如上所述产生同相触发脉冲,且经由逻辑“与”门而运行所得触发以发现共同结果。这说明在图3中。

[0077] 此方法(图3)的问题在于,当每一调制器触发在调制器循环的约1%内活动时,两个触发仅在该时间的约0.01%(1%的1%)内一致地激发。用于产生触发信号或脉冲的一致激发的这种罕见的出现意味检测器/相机的曝光时间必须极大。

[0078] 解决在两个或更多个PEM包括在光学设置中的情形下需要长曝光时间的这个上述问题的一种方式是一次仅使用(开启)一个PEM,这将在下文参照图4来论述。

[0079] 图4描绘尤其适用于将样品的斯托克斯参数成像的光学设置。该设置包括光源417,其中光源417引导光(在图4中,向上)穿过样品430直到成像装置429,例如,常规CMOS或CCD型相机。光源优选为LED。在穿过样品430和成像透镜425之前,来自光源417的光穿过相对于该设置的基线轴以 $45^\circ$ 定向的偏振器423和 $0^\circ$ 四分之一波片419。

[0080] 从成像透镜放射的偏振光入射在第一光弹性调制器(“PEM”)420的光学元件上。PEM 420具有以 $0^\circ$ 定向的双折射轴,且受相关联的控制器控制,其中该控制器优选以42kHz的标称频率将振荡双折射给予PEM的光学元件。

[0081] 继续参照图4,从第一PEM 420放射的光被引导穿过第二PEM 422,其中第二PEM 422受相关联的控制器控制而以调制频率(例如,当开启时,47kHz)操作。第二PEM 422以 $45^\circ$ 定向。以 $22.5^\circ$ 定向的第二偏振器427和透镜组421处于第二PEM 422与CCD 429之间。

[0082] 在此实施例中,触发脉冲是在PEM调制循环期间在期望相位处选择。这概述在下表1,操作模式1中,其中第二PEM 422关断,且其中脉冲是在PEM循环期间在四个相位处触发。

[0083]

PEM ( $1^{\text{st}}$ , 42kHz, $\pi$ ) 相位( $\omega_1 t$ )	$0, \pi$	$\pi/6$ ( $30^\circ$ ), $5\pi/6$ ( $150^\circ$ )	$\pi/2$	$7\pi/6$ ( $210^\circ$ ), $11\pi/6$ ( $330^\circ$ )
$\delta_{42} = \pi \sin(\omega_1 t)$	0	$\pi/2$	$\pi$	$-\pi/2$
$\sin(\delta_{42})$	0	1	0	-1
$\cos(\delta_{42})$	1	0	-1	0

[0084] 表1:操作模式1:第二PEM 422关断。

[0085] 在每一PEM相位处的相机强度(检测器)信号变成:

[0086] a.  $\omega_1 t = 0$  或  $\pi$ :

$$[0087] \quad I_{42cp} = I_0 \left[ 1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(2\theta_s) \sin(\delta_s) - \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(2\theta_s) \sin(\delta_s) \right]$$

[0088] b.  $\omega_1 t = \pi/6$  ( $30^\circ$ ) 或  $5\pi/6$  ( $150^\circ$ ):

$$[0089] \quad I_{42sp} = I_0 \left[ 1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(2\theta_s) \sin(\delta_s) - \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\delta_s) \right]$$

[0090] c.  $\omega_1 t = \pi/2$ :

$$[0091] \quad I_{42cn} = I_0 \left[ 1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(2\theta_s) \sin(\delta_s) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(2\theta_s) \sin(\delta_s) \right]$$

[0092] d.  $\omega_1 t = 7\pi/6$  ( $210^\circ$ ) 或  $11\pi/6$  ( $330^\circ$ ):

$$[0093] \quad I_{42sn} = I_0 \left[ 1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(2\theta_s) \sin(\delta_s) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\delta_s) \right]$$

[0094] 在设置中不存在样品的情况下进行的测量将提供 $I_0$ 。组合项(a)到(d)且归一化为 $I_0$ 会提供 $\sin(2\theta_s) \sin(\delta_s)$ 、 $\cos(2\theta_s) \sin(\delta_s)$ 和 $\cos(\delta_s)$ 的测量值,其中 $\sin(2\theta_s) \sin(\delta_s)$ 、 $\cos(2\theta_s) \sin(\delta_s)$ 和 $\cos(\delta_s)$ 是穆勒矩阵元素 $M_{13}$ 、 $M_{23}$ 和 $M_{33}$ 。使用以下方程式来对线性迟滞 $\delta_s$ 和快轴的角度 $\theta_s$ 求解。

$$[0095] \quad \theta_s = \frac{1}{2} \tan 2^{-1}(M_{13}, M_{23})$$

$$[0096] \quad \delta_s = \tan^{-1} \left( \sqrt{\left( \frac{M_{13}}{M_{33}} \right)^2 + \left( \frac{M_{23}}{M_{33}} \right)^2} \right)$$

[0097] 在上文中,  $\tan 2^{-1}$  是四象限反正切。

[0098] 如上所述,在此光学配置中,可使用单个PEM来测量线性双折射。然而,使用“DC”偏移来测量三个项中的一者 $M_{13}$ ,其中“DC”偏移较容易出现测量误差。此项可以第二PEM的调制频率来较准确地测量,如下表2,操作模式2所概述,其中第一PEM 420关断,且其中脉冲是在PEM循环期间在四个相位处触发的。

[0099]

PEM (2nd, 47kHz, $\pi$ ) 相位( $\omega_2 t$ )	0, $\pi$	$\pi/6$ ( $30^\circ$ ), $5\pi/6$ ( $150^\circ$ )	$\pi/2$	$7\pi/6$ ( $210^\circ$ ), $11\pi/6$ ( $330^\circ$ )
$\delta_{47} = \pi \sin(\omega_2 t)$	0	$\pi/2$	$\pi$	$-\pi/2$
$\sin(\delta_{47})$	0	1	0	-1
$\cos(\delta_{47})$	1	0	-1	0

[0100] 表2:操作模式2:第一PEM 420关断。

[0101] 在每一PEM相位处的相机强度(检测器)信号变成:

[0102] a.  $\omega_2 t = 0$  或  $\pi$ :

$$[0103] \quad I_{47cp} = I_0 \left[ 1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(2\theta_s) \sin(\delta_s) - \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(2\theta_s) \sin(\delta_s) \right]$$

[0104] b.  $\omega_2 t = \pi/6$  ( $30^\circ$ ) 或  $5\pi/6$  ( $150^\circ$ ):

$$[0105] \quad I_{47sp} = I_0 \left[ 1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(2\theta_s) \sin(\delta_s) - \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\delta_s) \right]$$

[0106] c.  $\omega_2 t = \pi/2$ :

$$[0107] \quad I_{47cn} = I_0 \left[ 1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(2\theta_s) \sin(\delta_s) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(2\theta_s) \sin(\delta_s) \right]$$

[0108] d.  $\omega_2 t = 7\pi/6$  ( $210^\circ$ ) 或  $11\pi/6$  ( $330^\circ$ ):

$$[0109] \quad I_{47sn} = I_0 \left[ 1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(2\theta_s) \sin(\delta_s) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\delta_s) \right]$$

[0110] 组合项(a)和(c)可以第二PEM的调制提供  $\sin(2\theta_s) \sin(\delta_s)$  的测量值,其中  $\sin(2\theta_s) \sin(\delta_s)$  是穆勒矩阵元素  $M_{13}$ 。来自两个操作模式1与2的四段数据被收集以通过平均化来改进信噪比。

[0111] 鉴于前述内容,图4所说明的光学设置对于三种操作配置可修改:(1)仅使用一个PEM(相对较低的成本/复杂性选项);(2)使用两个PEM,但两个PEM依序操作(上文的操作模式1和2);或(3)同时操作两个PEM。适当配置的选择取决于时间限制(曝光时间)、所使用的光源光的功率和波长以及特定应用中所使用的视野大小和放大率。

[0112] 图5示出也适用于将斯托克斯参数成像的光学设置的另一实施例,且其中电光调制器500提供抵达CCD的光源光的快速“选通”(依序允许和阻塞穿过调制器的光透射)。(另一选项是使用CCD增强器来代替电光调制器。)此方法是对如上所述对光源光进行脉动或选通的替代。

[0113] 根据图5的光学设置而形成的仪器具有两个主要变化。在一个配置中,第一偏振器523以  $0^\circ$  对齐;在另一配置中,偏振器以  $22.5^\circ$  对齐。下文给出  $0^\circ$  配置的强度方程式。

$$[0114] \quad I(\delta_1, \delta_2) = S_0 + C_{\delta_2} S_1 + S_{\delta_1} S_{\delta_2} S_3 - C_{\delta_1} S_{\delta_2} S_3$$

[0115] 其中通过以下方程式来给出斯托克斯向量:

$$[0116] \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}$$

[0117] 还可按向量形式编写先前的强度方程式。

$$[0118] \quad I(\delta_1, \delta_2) = \begin{bmatrix} 1 & C_{\delta_2} & S_{\delta_1} S_{\delta_2} & -C_{\delta_1} S_{\delta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}$$

[0119] 从调制器的状态形成的向量可被给予如上所述的分析器向量的名称。对于具有  $22.5^\circ$  的偏振器的配置来说，下文给出分析器向量。

$$[0120] \quad A(\delta_1, \delta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} C_{\delta_1} + \frac{\sqrt{2}}{2} S_{\delta_1} S_{\delta_2} & \frac{\sqrt{2}}{2} C_{\delta_2} & \frac{\sqrt{2}}{2} C_{\delta_1} S_{\delta_2} - \frac{\sqrt{2}}{2} S_{\delta_1} \end{bmatrix}$$

[0121] 此配置可在每一调制器在开与关之间交替的情况下操作，这是因为所涉及的所有量可被表达为仅一个PEM的谐波。下文给出第一调制器关断的情况下的分析器向量的方程式。

$$[0122] \quad A(0, \delta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} C_{\delta_2} & \frac{\sqrt{2}}{2} S_{\delta_2} \end{bmatrix}$$

[0123] 且同样，下文给出第二调制器关断的情况下的分析器向量。

$$[0124] \quad A(\delta_1, 0) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} C_{\delta_1} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} S_{\delta_1} \end{bmatrix}$$

[0125] 此系统的驱动电子装置相当简单，这是因为上文所述的脉冲方案仅取决于当前活动的调制器。

[0126] 通过选择使用如上文所论述的LED照射，此系统也可用于测量样品的线性双折射以及线性消光。下文参照图6来论述此仪器的细节。

[0127] 在图6的实施例中，延迟器625理想地说是完美的消色差四分之一波片，且结合  $0^\circ$  偏振器623而以完美圆偏振光来照射样品。此斯托克斯偏振计可测量样品630之后的斯托克斯向量，如上文所论述。为了测量双折射或线性消光，下文给出仪器的第一半的穆勒矩阵。

$$[0128] \quad M_{SOT} = M_S M_{ret} \left( \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2} \right) M_{pol}(0)$$

[0129] 通过隔离所得穆勒矩阵的第一列，斯托克斯向量含有所有相关信息来对如上所述的迟滞和快轴的角度求解。

$$[0130] \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 \\ -S_\delta S_\theta \\ S_\delta C_\theta \\ C_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{00} \\ M_{13} \\ M_{23} \\ M_{33} \end{bmatrix}$$

[0131] 此设置(图6)的问题在于产生圆偏振光的延迟器很少是纯消色差的。这导致样品之后的以下斯托克斯向量。

$$[0132] \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} M_{00} \\ C_{ret\delta} M_{11} + S_{ret\delta} M_{13} \\ C_{ret\delta} M_{12} + S_{ret\delta} M_{23} \\ -C_{ret\delta} M_{13} + S_{ret\delta} M_{33} \end{bmatrix}$$

[0133] 在上文的方程式中,  $C_{\text{ret}\delta}$  是波片的迟滞的余弦, 且  $S_{\text{ret}\delta}$  是波片625的迟滞的正弦。这可稍微通过单独测量延迟器的斯托克斯向量来矫正。假设是完美对齐, 下文给出单独延迟器的斯托克斯向量。

$$[0134] \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 \\ C_{\text{ret}\delta} \\ 0 \\ S_{\text{ret}\delta} \end{bmatrix}$$

[0135] 如果光源617未偏振, 且样品630展现差分消光, 那么斯托克斯偏振计设置还可测量这些性质。从光学列移除偏振器623和延迟器625, 且下文给出所测量的斯托克斯向量。

$$[0136] \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} T \\ -LE \\ -LE' \\ CE \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{00} \\ M_{10} \\ M_{20} \\ M_{30} \end{bmatrix}$$

[0137] 其中T是透射, LE是沿着 $0^\circ/90^\circ$ 的线性消光, LE'是沿着 $45^\circ/135^\circ$ 的线性消光, 且CE是圆消光。

[0138] 值得注意的是, 调制幅度以及来自光弹性调制器620、622的所检测的方波之间的相位滞后与实际迟滞都需要校准。下文给出任何时间的双折射的幅度的完整方程式。

$$[0139] \quad \delta(t, A, \varphi) = A \cos(2\pi ft + \varphi)$$

[0140] 在上文的方程式中,  $\varphi$  是相位滞后,  $f$  是调制频率,  $t$  是时间,  $A$  是调制幅度。CCD 629处所测量的强度与每一调制器的迟滞  $\delta(t, A, \varphi)$  的正弦和/或余弦成比例。

$$[0141] \quad C_\delta = \cos(\delta(t, A, \varphi)) = \cos(A \cos(2\pi ft + \varphi))$$

$$[0142] \quad S_\delta = \sin(\delta(t, A, \varphi)) = \sin(A \cos(2\pi ft + \varphi))$$

[0143] 光学列的光源614仅在某些时间期间开启, 且CCD 629处的强度进而取此时间期间的双折射的正弦或余弦的平均值。

$$[0144] \quad C_\delta \equiv \frac{\int_{t=t_1}^{t_2} \cos(A \cos(2\pi t + \varphi))}{t_2 - t_1}$$

[0145] 更为实际的是, 正弦或余弦的平均值可取开启时间期间的仅少许离散点的平均值。

[0146] 虽然上文所述的脉动、触发和选通技术在概念上来说是简单明了的, 但低劣的曝光时间与强度比可诱发显著的暗电流和光污染噪声。为了减轻此问题, 频率合成可用于以所涉及的较高次谐波产生简单波形。在用于在宽范围的入射角上进行样品的面内与面外双折射性质两者的同时成像的系统的下文论述中详细地描述了此方法。

[0147] 图7是示出用于在宽范围的入射角上同时将样品的面内与面外双折射性质两者成像的系统的优选布置的图示。在图7中, 示出光学样品30, 其中光学样品30可例如为希望用作如上文所论述的双折射补偿膜的聚合物膜。样品被支撑在具有相关联的可

变孔径34的固持器32上。

[0148] 系统包括光源光学构件40,其细节被进一步描述在下文中。那些构件40产生经偏振调制的经准直的光的光源光束“B”。该光束“B”被引导穿过聚焦透镜系统42,其中聚焦透镜系统42具有为了将光聚焦在样品30上以使得抵达样品30上的一个位置的个别光线“b1到b7”各自以不同入射角抵达的孔径-焦距比。出于说明的目的,在图7中仅示出示范性的一批七条这种光线“b1到b7”。

[0149] 中央光线“b4”的入射角相对于样品的表面为 $0^\circ$ 或“法向”。剩余光线“b1到b3”和“b5到b7”在远离法向中央光线“b4”的方向上具有逐渐增大的入射角,且因此涵盖宽范围的入射角。该范围可通过聚焦透镜系统的选择来确定,且取决于(例如)将使用补偿膜的装置的受追求的视角。

[0150] 可变孔径34(其可如图所示而定位或位于样品30与透镜系统42之间)被调整,以促进该范围的入射角产生的精确控制。

[0151] 从样品放射的光线“b1到b7”被引导穿过准直透镜系统44,其中准直透镜系统44引导经准直的光束“B1”穿过检测光学构件46(下文进一步描述)直到多像素成像装置48。在优选实施例中,该装置可为使用增强电荷耦合装置(ICCD)、标准CCD或CMOS型传感器的数字成像装置或相机。为了便利起见,成像装置将在下文称为CCD 48。

[0152] 参照图8,在一个优选实施例中,光源光学构件40包括光源50(例如,发光二极管(LED))以及相关联的透镜,以产生光源光束“B”。光束“B”穿过偏振器52,其中偏振器52被定向成其偏振方向相对于基线轴呈 $+45^\circ$ 。例如,格兰-汤普森方解石偏振器(Glan-Thompson calcite polarizer)的高消光偏振器是优选的。

[0153] 从偏振器52放射的偏振光入射在第一光弹性调制器(“PEM”)54的光学元件上。在优选实施例中,PEM是由俄勒冈州希尔巴罗市的海因兹仪器公司(Hinds Instruments, Inc., of Hillsboro, Oregon)制造的PEM。值得注意的是,虽然PEM是优选的,但其它机构可用于调制光源光的偏振。

[0154] 当将系统的光学构件中所存在的残余双折射减到最小时,实现了最准确的双折射测量。为此,PEM 54被配置成消除残余双折射,其中残余双折射可原本由在支撑PEM的光学元件时所存在的力产生。

[0155] PEM 54具有以 $0^\circ$ 定向的双折射轴,且受控制器56控制,其中控制器56优选以50kHz的标称频率将振荡双折射给予PEM的光学元件。就这来说,控制器56驱动附接到PEM的光学元件的一个或更多个石英换能器。

[0156] PEM 54的振荡双折射在传播穿过PEM的偏振光的正交分量之间引入时变相位差。在任何时刻,相位差都表示由PEM引入的延迟。如较早所述,延迟可按例如纳米的长度单位来测量。PEM是可调整的,以允许由PEM引入的延迟的幅度变化,如下文更详细地描述。

[0157] 继续参照图8,检测光学构件46包括第二PEM 58,其中第二PEM 58受控制器60控制而以与第一PEM 54的调制频率不同的调制频率(例如,55kHz)操作。第二PEM 58以 $45^\circ$ 定向。以 $0^\circ$ 定向的分析器62处于第二PEM 58与CCD 48之间。

[0158] CCD 48包括个别像素,其中的每一个都从光线“b1到b7”接收光。因此,在每一像素中俘获的光强度对应于具有给定入射角的光线的双折射特性,以使得例如CCD中的中央像素将接收与法向入射的光线“b4”相关的光强度信息,且与光线“b7”对齐的像素将接收与具

有最大入射角的光线相关的光强度信息。

[0159] 优选CCD 48包括增益掩码,其中该增益掩码受计算机或计算机所操作的专用控制器控制。CCD 48是经时间选通的装置,其具有通常比驱动PEM 54、58的频率慢一个量级的时间分辨率或帧率。如上所述,如果正常地操作,那么CCD将在每一帧中对每一像素中所接收的经PEM调制的光平均化,且因此使得不可能计算所涉及的双折射性质(此处,面内和面外双折射)。

[0160] 下文描述用于以下述方式触发CCD 48的选通的新颖技术,其中该方式允许仅在知晓两个PEM 54、58的调制状态的情形下迅速收集适用的量的光信息,进而实现对应于CCD的每一像素——因此在宽范围的入射角上的样品的面内和面外双折射性质的精确、同时的确定。

[0161] 在描述刚提及的CCD选通之前,本说明书描绘假设所收集的所触发的CCD像素信息被处理(解调)以仅产生每一像素的相关强度信息而应用到每一像素中所接收的强度信息的数据分析。(值得注意的是,每一成角度分开的光线“b1到b7”经历来自系统的透镜和其它光学构件的略不同的偏振效应。因此,作为初始步骤,每一像素必须偏移或校准以校正该效应。)

[0162] 薄膜材料,例如此处所涉及的样品30,通常具有聚合物结构以使得法向双折射或面内双折射显著小于垂直双折射或面外双折射。即, $n_x \approx n_y \neq n_z$ ,其中 $n_y$ 和 $n_x$ 分别是样品在正交轴线X和Y上的折射率,且 $n_z$ 是样品的垂直于所述X轴和Y轴所定义的平面的折射率。

[0163] 数据分析:法向延迟(面内延迟):量 $\delta_N$ 表示以法向入射测量的法向延迟的量值,以纳米为单位。法向或面内双折射被定义为:

$$[0164] \quad \Delta n_N = n_Y - n_X$$

[0165] 如果面内双折射的快轴以 $\rho_N$ 定向,那么 $n_Y > n_X$ ,其中X与快轴定向一致,法向延迟和法向双折射如下:

$$[0166] \quad \delta_N = \Delta n_N \cdot d \cdot 1000 = (n_Y - n_X) d \cdot 1000 \quad \Delta n_N = n_Y - n_X = \frac{\delta_N}{d \cdot 1000}$$

[0167] 方程式(1)

[0168] 其中d是薄膜的厚度,以微米为单位。

[0169] 倾斜延迟:量 $\delta_0$ 表示以倾斜入射角( $\varphi$ )测量的倾斜延迟的量值,以纳米为单位,其中倾斜入射角( $\varphi$ )为倾斜光束与法向光束之间的角度(参见图8)。如果样品具有平均折射率n,那么膜样品内的入射角为:

$$[0170] \quad \theta = \sin^{-1} \left[ \frac{\sin \varphi}{n} \right] \quad \text{方程式 (2)}$$

[0171] 对于倾斜入射来说,如在单轴晶体中,寻常光线和非常光线将在膜样品内具有不同折射率。寻常光线的入射角 $n_o$ 独立于入射角,而非常光线的入射角取决于入射角。非常光线在此状况下在XZ平面中偏振(E向量在XZ平面中振动),且光线相对于z轴(光轴)具有角度 $\theta$ 。非常光线的有效折射率 $n_{\text{eff}}$ 为:



$$[0172] \quad n_{\text{eff}}(\theta) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}} \quad \text{方程式 (3)}$$

[0173] 其中  $n_e = n_z$  且  $n_o = n_x, n_y$  (单轴晶体)。 $n_{\text{eff}}$  始终处于  $n_e$  与  $n_o$  之间。

[0174] 垂直(面外)双折射计算: 当  $n_z < n_x \approx n_y, n_{\text{eff}} < n_y$  时, 倾斜延迟的所测量的快轴将显得沿着 X 轴。可如下表达 XZ 平面中的倾斜延迟:

$$[0175] \quad \delta_o = \left[ n_y - \left( \frac{n_x n_z}{\sqrt{n_z^2 \cos^2 \theta + n_x^2 \sin^2 \theta}} \right) \right] \cdot \frac{d \cdot 1000}{\cos \theta} \quad \text{方程式 (4)}$$

[0176] 重新布置方程式 (4) 且使用方程式 (1) 产生:

$$[0177] \quad \frac{\delta_o \cos \theta}{d \cdot 1000} - \frac{\delta_N}{d \cdot 1000} = n_x - \left( \frac{n_x n_z}{\sqrt{n_z^2 \cos^2 \theta + n_x^2 \sin^2 \theta}} \right) \quad \text{方程式 (5)}$$

[0178] 这导致

$$[0179] \quad \frac{\delta_o \cos \theta}{d \cdot 1000} - \frac{\delta_N}{d \cdot 1000} \approx (n_x - n_z) \sin^2 \theta = \text{Sign}(VBR)(n_z - n_x) \sin^2 \theta \quad \text{方程式 (6)}$$

[0180] 或,

$$[0181] \quad \Delta n_V = \text{Sign}(VBR)(n_z - n_x) = \frac{1}{d \cdot 1000 \cdot \sin^2 \theta} (\cos \theta \cdot \delta_o - \delta_N) \quad \text{方程式 (7)}$$

[0182] 其中当  $n_z < n_x$  时,  $\text{Sign}(VBR) = -1$ 。

[0183] 应注意, 从方程式 (5) 到 (6) 使用的近似对于小  $\Delta n$  来说是极好的。在  $\Delta n = n_x - n_z = 0.01$  下, 近似具有不到 1% 的误差。

[0184] R<sub>th</sub> 计算: 当  $n_z < n_x \approx n_y$  时, 如下定义 R<sub>th</sub> (面外迟滞):

$$[0185] \quad R_{th} = \left| n_z - \frac{(n_x + n_y)}{2} \right| d \times 1000 = \left[ \frac{(n_x + n_y)}{2} - n_z \right] d \times 1000 \quad \text{方程式 (8)}$$

$$= \left( \Delta n_V + \frac{\Delta n_N}{2} \right) d \times 1000$$

[0186] 就实验测量来说, 得到:

$$[0187] \quad R_{th} = \frac{1}{\sin^2 \theta} (\cos \theta \cdot \delta_o - \delta_N) + \frac{\delta_N}{2} \quad \text{方程式 (9)}$$

[0188] 在方程式 (9) 中, 膜的厚度不用于从所测量的法向和倾斜延迟值计算 R<sub>th</sub>, 这是因为所测量的延迟值具有隐含的厚度。

[0189] 本说明书现转向用于以下述方式触发 CCD 48 的选通的上述技术, 其中该方式允许仅在知晓两个 PEM 54、58 的调制状态的情形下迅速收集适用的量的光信息, 进而实现对对应于 CCD 的每一像素的样品的双折射性质的精确确定。

[0190] 明确地说, 此技术使用频率合成而以 PEM 调制的高次谐波产生简单波形, 来对 CCD 进行选通。此方法最好通过以下方式来理解: 首先考虑光学列仅包括单个 PEM 的系统 (应理解, 仅使用单个 PEM 严格限制可测量的光学性质的范围) 且接着返回到在使用两个或更多个 PEM 的系统中考虑频率合成方法。

[0191] 用于控制使用单个PEM的成像系统的频率合成可使用标准半占空比的方波形。这些波形是容易产生的,且实现到成像装置的最大光通量。然而,使用此波形需要仔细注意细节,例如,两个图像之间的预期强度差(响应)以及PEM的相位。需要解决的第一问题是如何从经方波选通的CCD和由PEM产生的贝塞尔波形预测预期强度。

[0192] 可通过以下方式来计算半占空比的方波与贝塞尔波形的组合的预期响应:首先将方波的傅里叶展开式与PEM所产生的贝塞尔波形的傅里叶展开式相乘。下文示出贝塞尔波形的傅里叶展开式。

$$[0193] \quad \cos[A \cos \omega] = J_0(A) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(A) \cos[2n\omega] \quad \text{方程式 (10)}$$

$$[0194] \quad \sin[A \cos \omega] = -2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(A) \cos[(2n-1)\omega] \quad \text{方程式 (11)}$$

[0195] 下文为半占空比的方波的傅里叶展开式。

$$[0196] \quad \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin[(2k-1)\omega]}{2k-1} \quad \text{方程式 (12)}$$

[0197] 下文示出任意两个波形之间的预期相关响应。

$$[0198] \quad R = \frac{\int_{t=0}^T A(t)M(t) dt}{\int_{t=0}^T M(t)^2 dt} \quad \text{方程式 (13)}$$

[0199] 其中R是所获得的波形的预期标量响应,在此状况下A(t)是贝塞尔波形;且M(t)是调制波形,半占空比方波。如果假设贝塞尔波形与方波之间的相位为零,那么上文的方程式可解答为下文的展开式。

$$[0200] \quad R_{\cos(\delta)} = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{8}{(2n-1)\pi} J_{2(2n-1)}(A) \quad \text{方程式 (14)}$$

$$[0201] \quad R_{\sin(\delta)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)\pi} J_{2n-1}(A) \quad \text{方程式 (15)}$$

[0202] 在上文的方程式中,余弦响应的方波是基础贝塞尔波形频率的两倍,且正弦响应频率与贝塞尔波形频率相同。使用上文的两个方程式(14、15),贝塞尔波形的预期响应可被预测到,且用于对样品的光学性质求解。为达到此目的,针对每一贝塞尔波形项(在此状况下,余弦或正弦)而收集两个图像。这两个图像之间的差直接与描述样品的光学性质的穆勒矩阵元素相关。

[0203] 如图9的图表所示,贝塞尔波形64呈现为纯余弦贝塞尔波形。首先,产生了具有两倍的频率而不具有相位偏移的方波66。使用积分强度检测器来测量平均强度68。接着,将方波相移70半波,且进行第二平均强度测量72。这两个测量之间的强度差在上文的方程式

(13) 到 (15) 中作为响应而给出。

[0204] 在本说明书的以下部分中,主要参照图10的框图来描述使用多个PEM和频率合成的效应。初始步骤是以具有正确相位的PEM的任何给定谐波产生方波。

[0205] 当使用半占空比的方波与同时操作的多个PEM时,必须合成PEM的混合谐波。可最容易通过现代数字硬件来实现合成。合成的第一步骤是测量光学设置——此处,图8所示的设置——中所存在的每一PEM54、58的周期且将其记录在(例如)计算机存储器(图10,401)中。

[0206] 为了测量每一PEM的周期,使用高频计数器来测量PEM的反馈或输出方波。计数器被选择为以高于PEM的量级操作以便获得必要的频率准确性。举例来说,应用到40kHz PEM的400MHz计数器针对分辨率4Hz,将具有每循环一万次计数。为了提高此分辨率,测量多个PEM循环。

[0207] 为了确保所合成的频率不将噪声贡献给PRM仪器,频率分辨率需要低于0.1Hz。为了针对刚给出的实例而获得此分辨率,必须测量至少40个完整PEM循环,且以400MHz计数器时钟来平均化,或测量80个完整循环且以200MHz计数器时钟来平均化。为了易于实施,测量两个循环的功率实现简单的右移除法。针对200MHz计数器时钟和40kHz PEM,以含有总计至少20个比特的计数器来对128个( $2^7$ )PEM循环进行平均化。针对200MHz计数器时钟和60kHz PEM,以含有总计至少20个比特的计数器来对256个( $2^8$ )PEM循环进行平均化。

[0208] 一旦测量了每一PEM的周期,可通过简单地取周期的倒数来计算频率。

[0209] 
$$F = \frac{1}{P}$$
 方程式 (16)

[0210] 现可通过将相关频率相乘且接着求和(图10,402)来计算感兴趣的谐波。举例来说,当使用以频率 $1F_1$ 和 $1F_2$ 操作的两个PEM时,通过检查 $1F_1+1F_2$ 谐波来测量样品的双折射的余弦。

[0211] 接着通过取将与组合的PEM波形(图10,406)合成的所选择的方波(图10,404)的频率的倒数来计算其周期。将所得周期应用到控制CCD 48的选通控制410的输出的另一计数器(图10,408)。

[0212] 鉴于如上文刚论述的经频率合成的触发信号的前述产生和应用,在如下文所论述的CCD输出信号414的解调(图10,412)时,针对CCD的每一像素而接收的数据将对应于调制所涉及的光束的偏振的PEM的已知状态,且因此提供可用于准确地计算感兴趣的双折射度量的数据。

[0213] 必须鉴别CCD输出信号414的相位来进行该信号的准确解调(图10,412)以提取强度信息。通过使用单个PEM,PEM的贝塞尔波形与正弦/余弦解调信号之间的相位关系具有预期的谐波关系,这是因为正弦与余弦之间的角度直接实现PEM的相位的计算。然而,此处,针对使用方波解调的系统,情况并非如此。通过方波解调,方波的较高次谐波与贝塞尔波形的较高次谐波交互,且预期的清楚三角关系受到污染。针对一个PEM,在图11中,绘制了预期正弦/余弦三角关系和所测量的方波响应的图表。

[0214] 可如下近似带有相位的方波响应与正弦/余弦响应之间的差。

[0215] 
$$E_{\cos} \cong \frac{1}{4\pi} [-\cos \varphi + \cos(3\varphi)]$$
 方程式 (17)

[0216]  $E_{sin} \cong \frac{1}{4\pi} [\sin \varphi + \sin(3\varphi)]$  方程式 (18)

[0217]  $\varphi = \varphi_B - \varphi_S$  方程式 (19)

[0218] 在方程式 (19) 中,  $\varphi_B$  是贝塞尔波形的相位, 且  $\varphi_S$  是解调方波形的相位。重要的是注意到, 当相位差为零或  $\pi/2$  的倍数时, 方波和/正弦/余弦波形响应是相同的。因此, 如果不存在相位关系的差异的情况下产生方波, 那么可使用本文中的简单分析方程式。

[0219] 为了在不需要考量这些相位复杂情形的情况下实现解调, 所合成的方波必须相对于基础贝塞尔波形具有零相位关系。可通过以瞬时相位偏移起始方波形来实现此零相位关系:

[0220]  $\varphi_0 = N_1\varphi_1 + N_2\varphi_2 + \dots$  方程式 (20)

[0221] 在上文的方程式 (20) 中,  $N_n$  是每一 PEM 的谐波倍数 (通常为 1 或 2), 且  $\varphi_n$  是瞬时相位。在实践中, 每一 PEM 的瞬时相位是用于测量频率的计数器。因此, 通常, 总相位偏移  $\varphi_0$  将远大于所产生的频率的周期。因此, 相位偏移必须减小任意数量的周期, 直到其小于单个周期但大于零为止。接着, 频率合成计数器 (图 10, 408) 从此值开始。此例程允许参照从 PEM 产生的贝塞尔波形而确定方波的频率和相位两者。

[0222] 接着, 必须选择调制的幅度以允许将贝塞尔波形与总波形分离, 且测量贝塞尔波形。当使用不止一个 PEM 时, 总波形是基础贝塞尔波形与其组合的线性组合, 如图 12 所示。

[0223] 以数学方式, 此情形可被呈现为矩阵问题:

[0224] 
$$\begin{bmatrix} I_{2F_1} \\ I_{1F_2} \\ \vdots \\ I_{2F_1+2F_2} \\ \vdots \\ I_{2F_1+1F_2} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \cos(\delta_1) \\ \sin(\delta_1) \\ \vdots \\ \cos(\delta_1) \cos(\delta_2) \\ \vdots \\ \cos(\delta_1) \sin(\delta_2) \end{bmatrix}$$
 方程式 (21)

[0225] 在方程式 (21) 中,  $I_{NF_p}$  表示所合成的频率下的选通的一个测量的所测量的强度, 或给定谐波下以选通频率进行的强度测量的差。目标因而是鉴于多次强度测量, 取矩阵 R 的倒数, 以对贝塞尔波形谐波中的每一者的幅度求解。为获得最好的结果, 矩阵 R 必须是可取倒数的且良好调节的。矩阵 R 的最佳条件是在所测量的谐波下的贝塞尔函数的绝对值相等时发生。在优选实施例  $|J_1(A)| = |J_2(A)|$  中测量第一谐波和第二谐波的状况下, 此等价是在约 2.63 弧度的 PEM 的驱动幅度下发生。

[0226] 在图 13 中, 使用三个解调波形: 贝塞尔、正弦/余弦和方波, 针对使用 4 个 PEM (偏振计) 的系统而示出一定范围的驱动幅度的矩阵 R 的条件数的说明性曲线图。在  $J_0(A) = 0$  条件下使用贝塞尔波形调制而发现最好条件, 但贝塞尔波形的高速数字合成绝不简单。在实践中, 锁定放大器常用于正弦/余弦解调。针对本发明的正弦波与方波状况两者, 条件在约 2.4 到 2.7 弧度的 PEM 调制幅度下是最佳的。

[0227] 虽然已根据优选实施例来描述本发明, 但所属领域的技术人员应了解, 可进行修改而不偏离前述内容的教示和精神。此外, 应理解, 上文所述的用于将偏振性质成像的系

统,通常在考虑线性双折射或迟滞或斯托克斯参数的同时,可容易用于许多其它性质,例如,圆二色谱(也称为圆消光)和圆双折射(也称为圆迟滞)。

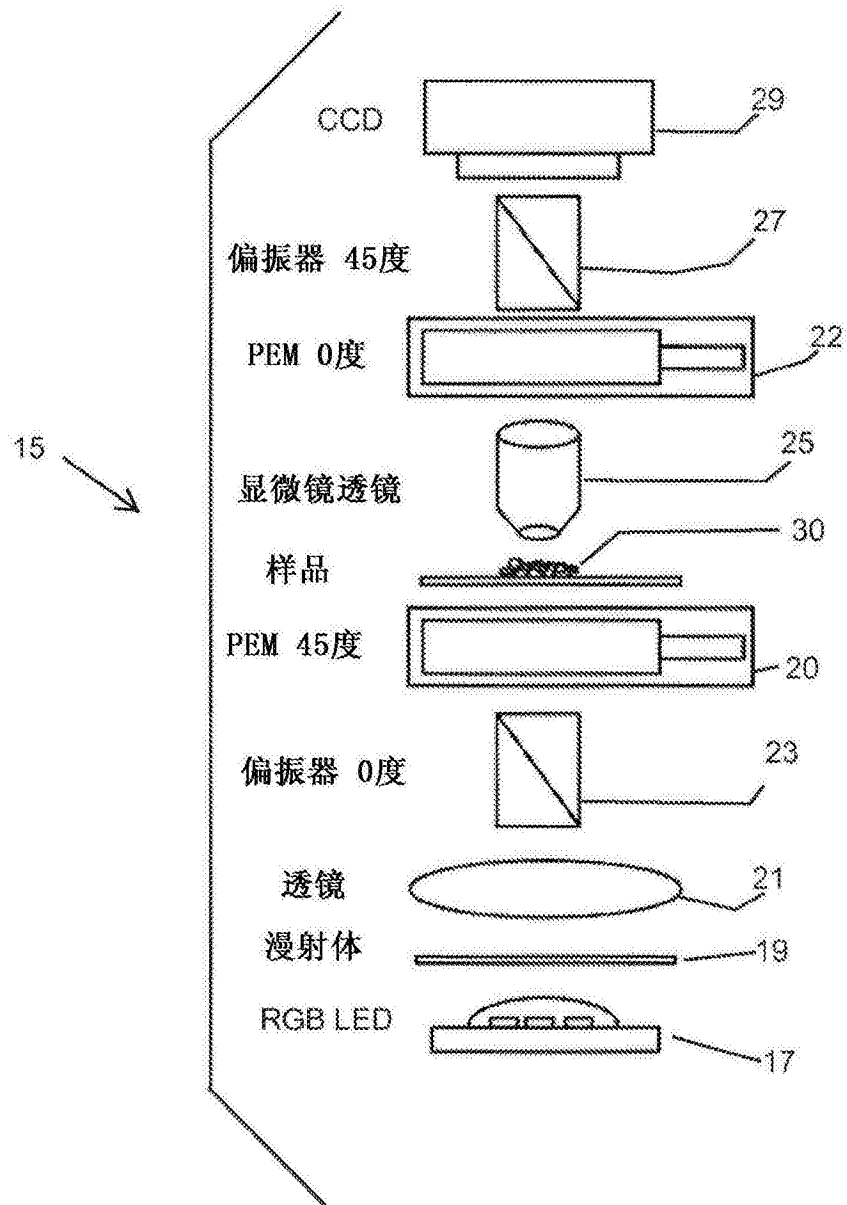


图1

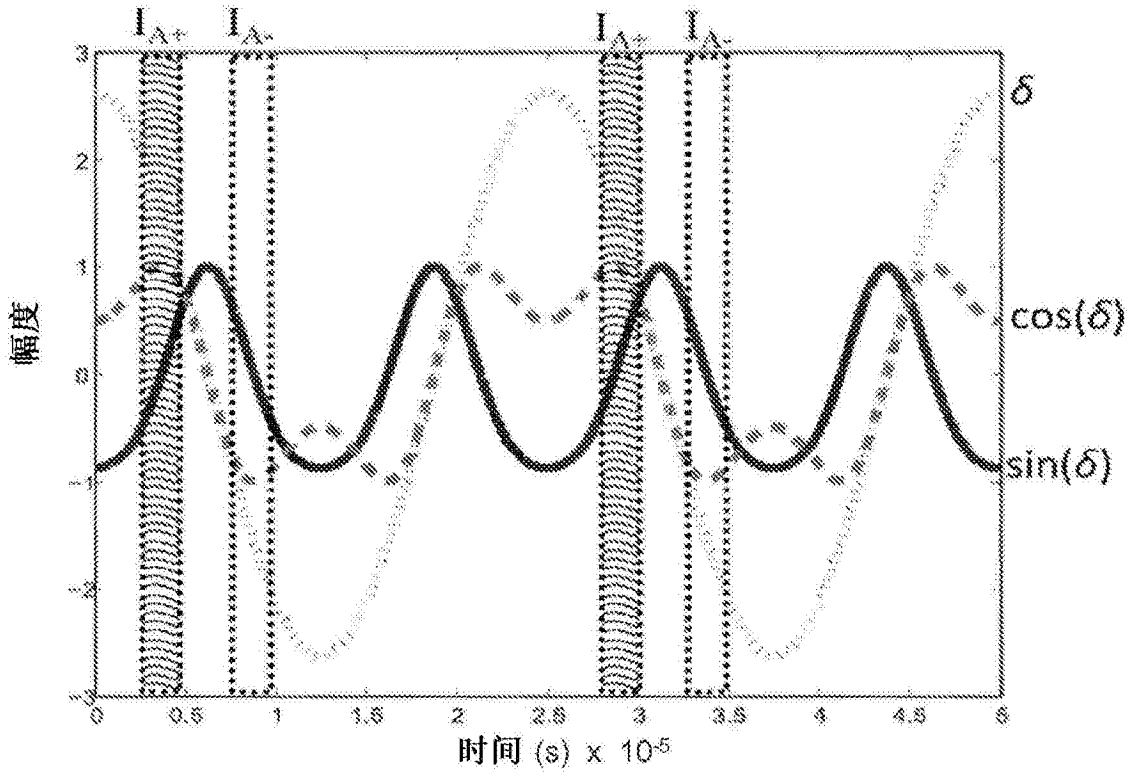


图2

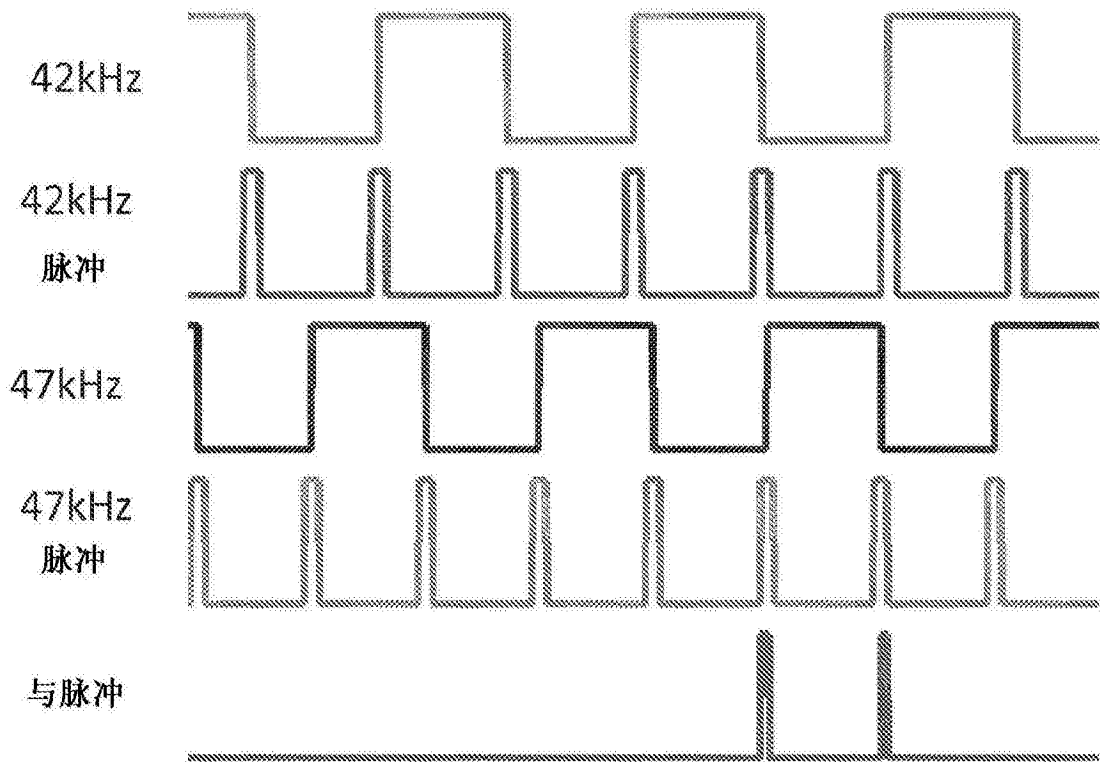


图3

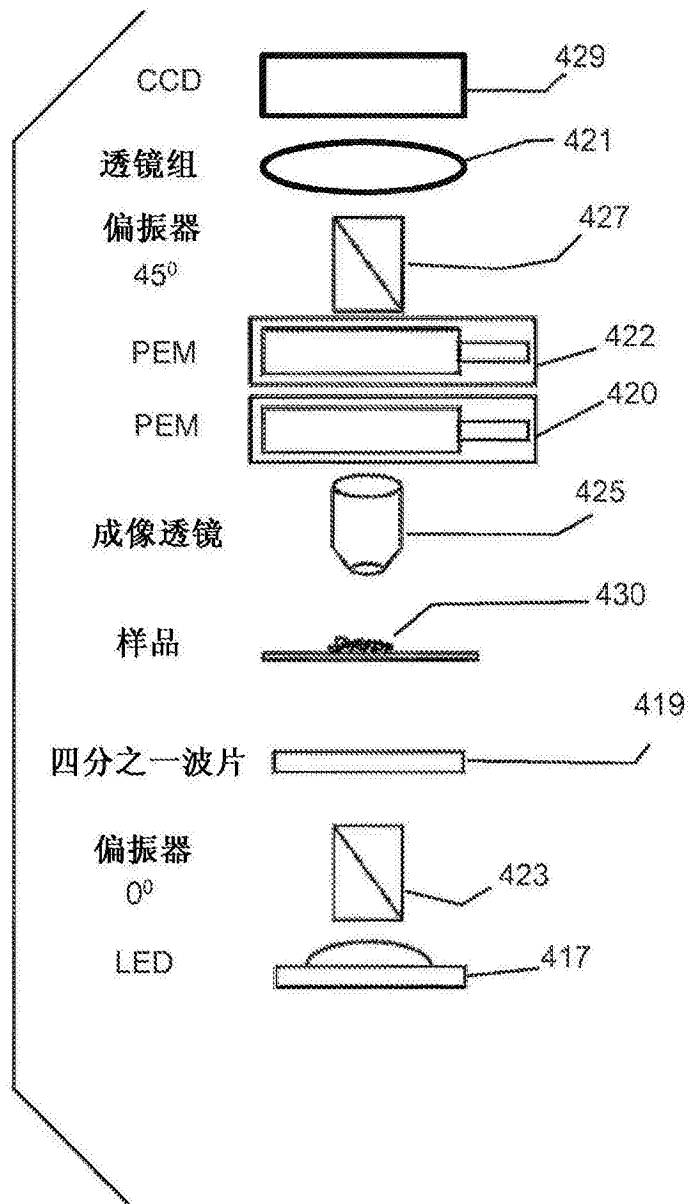


图4



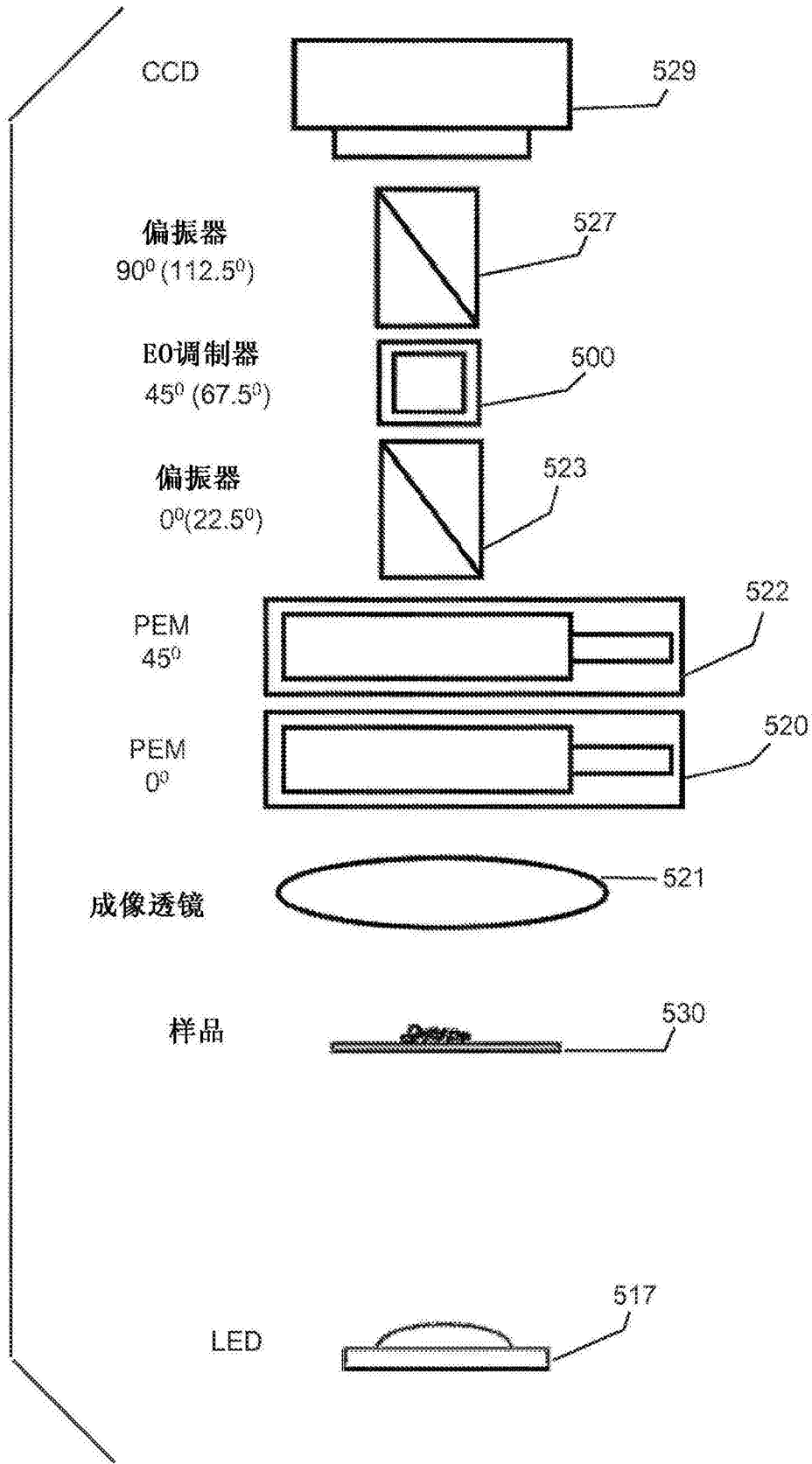


图5

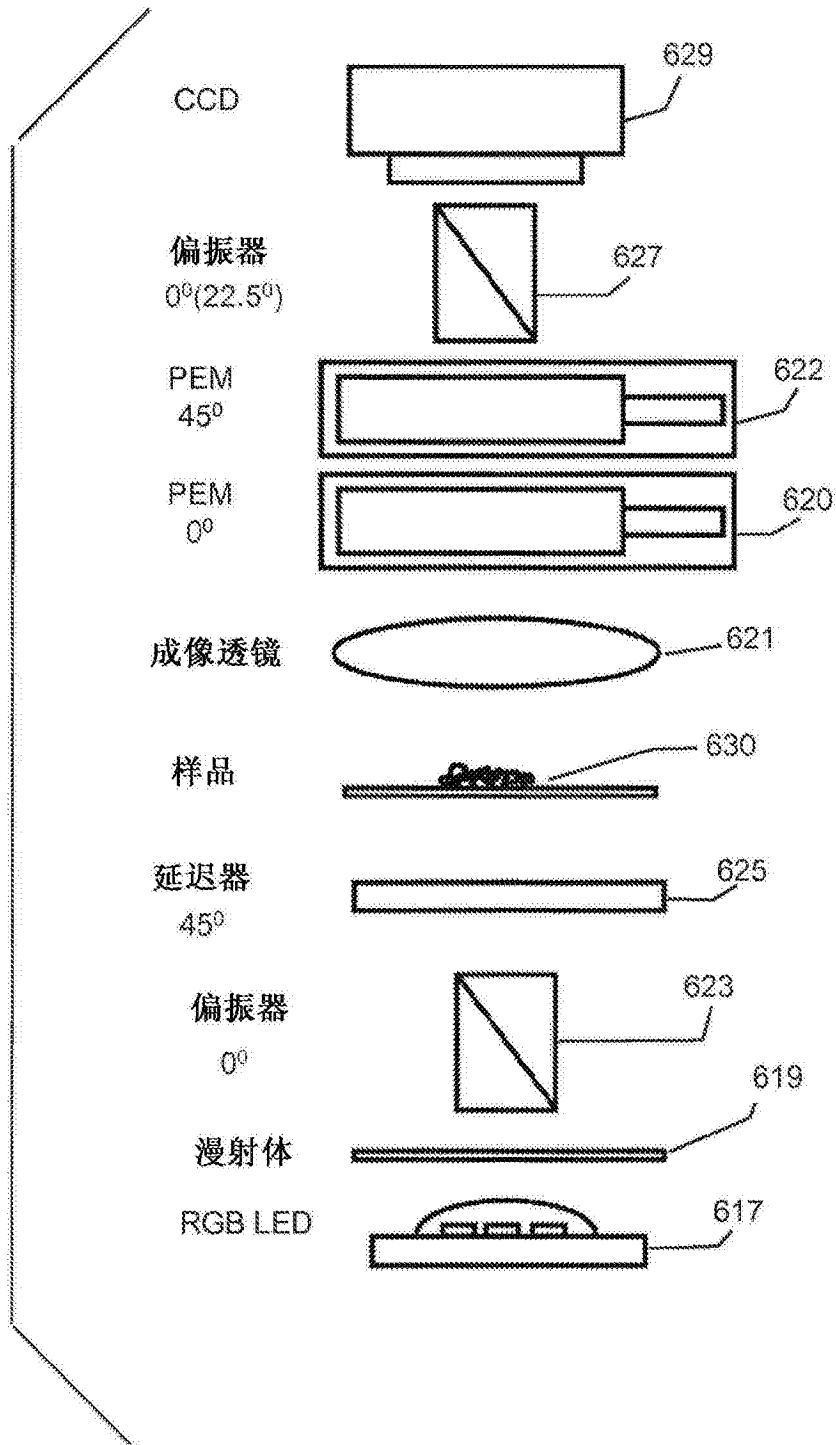


图6

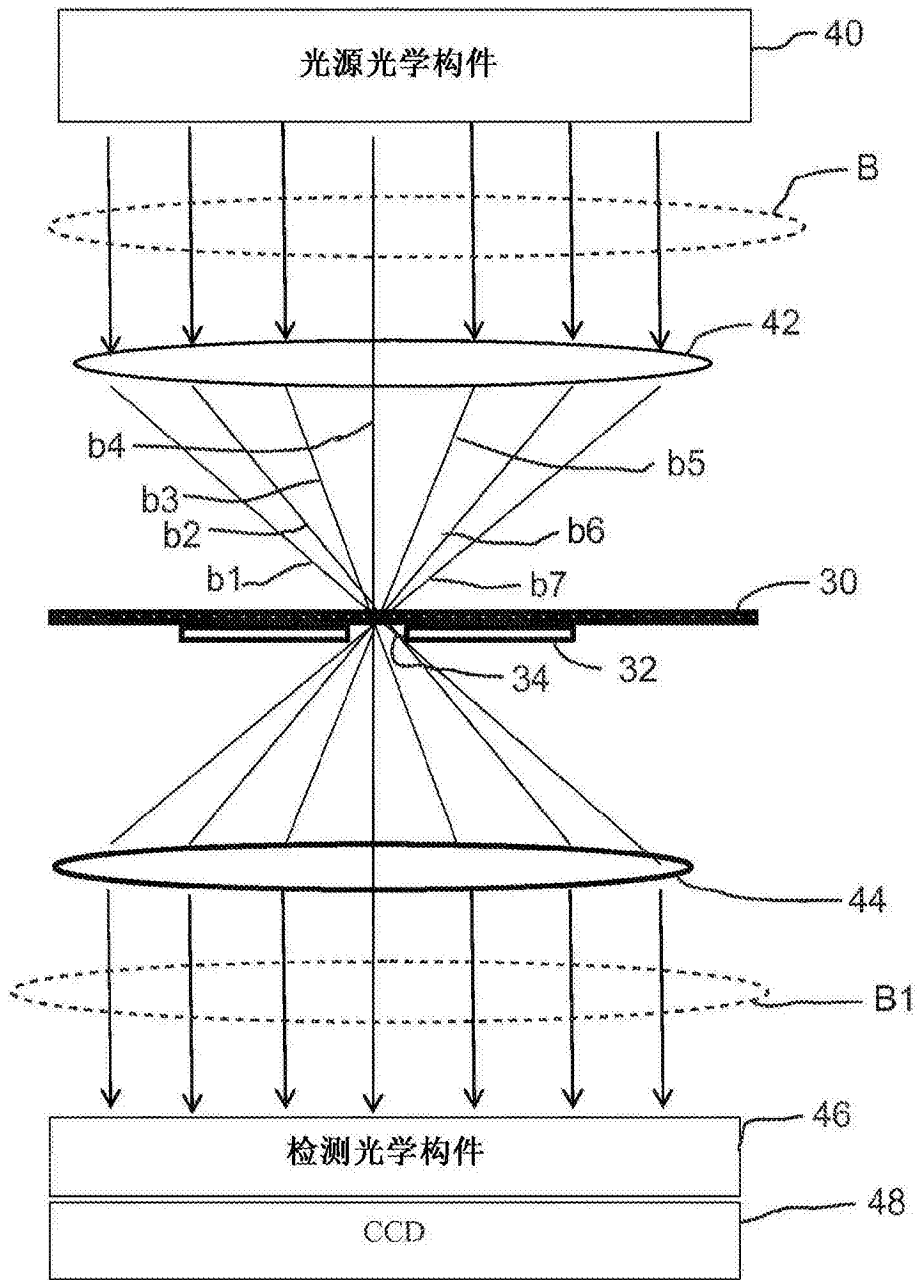


图7

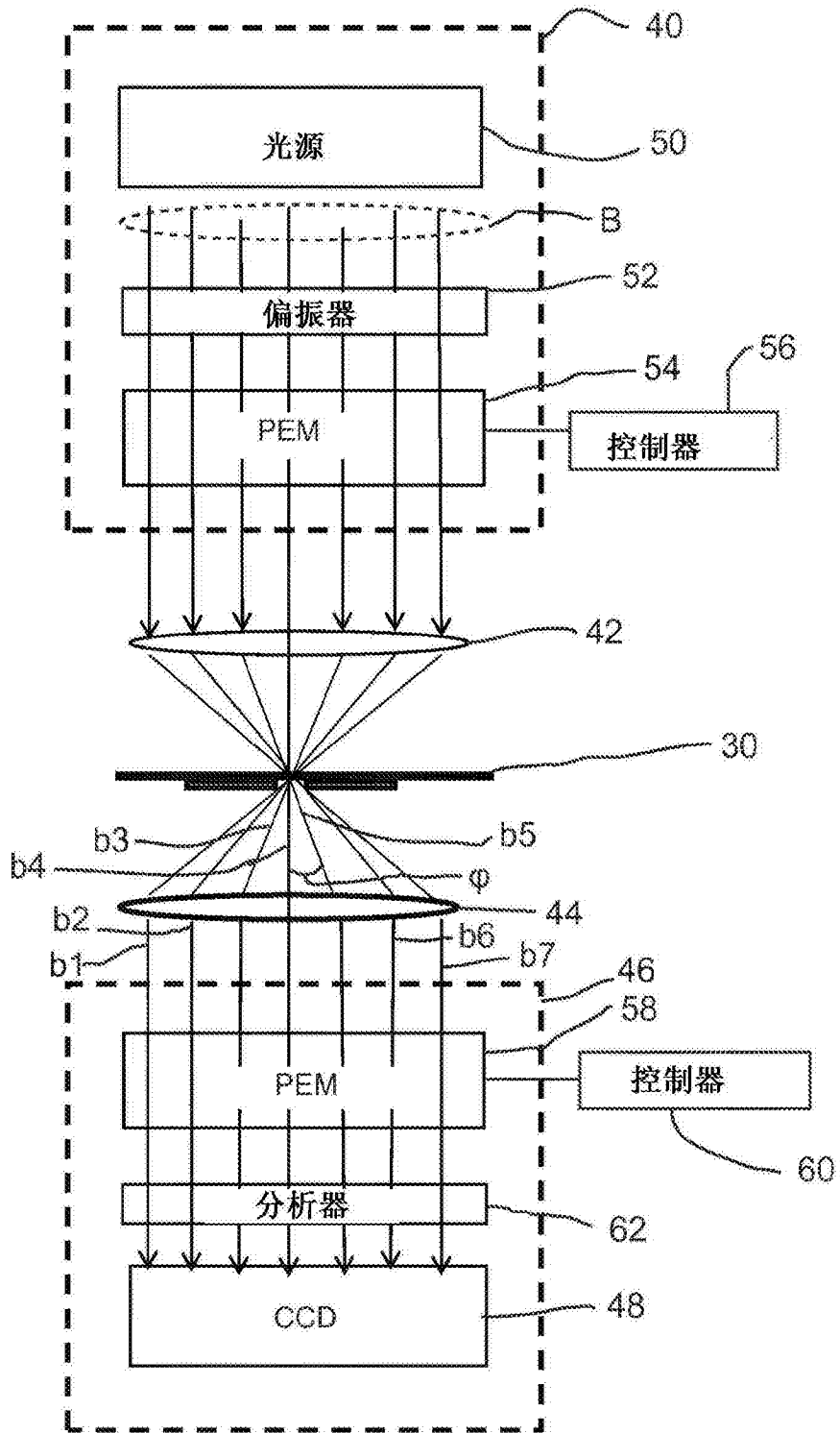


图8

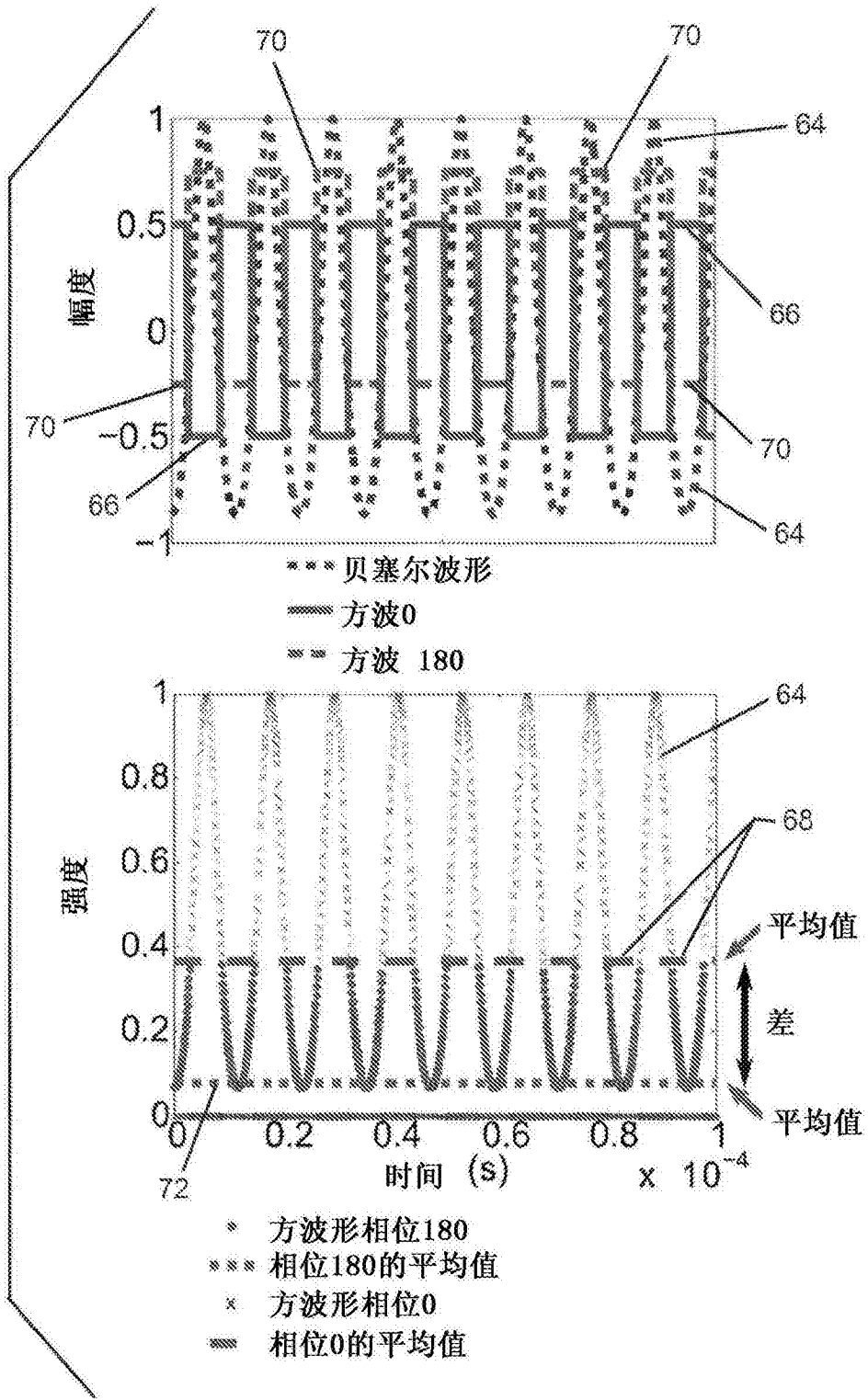


图9

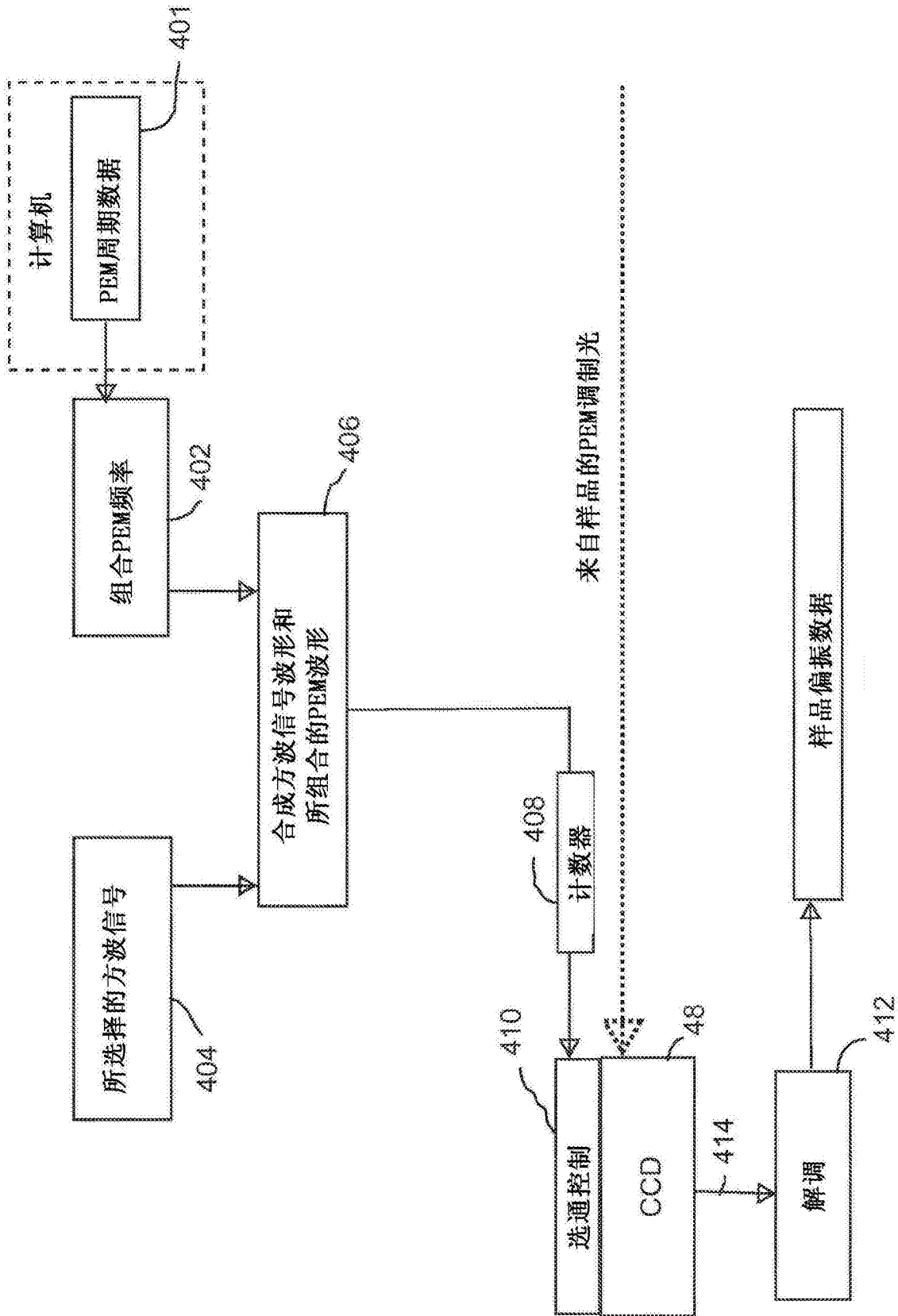


图10

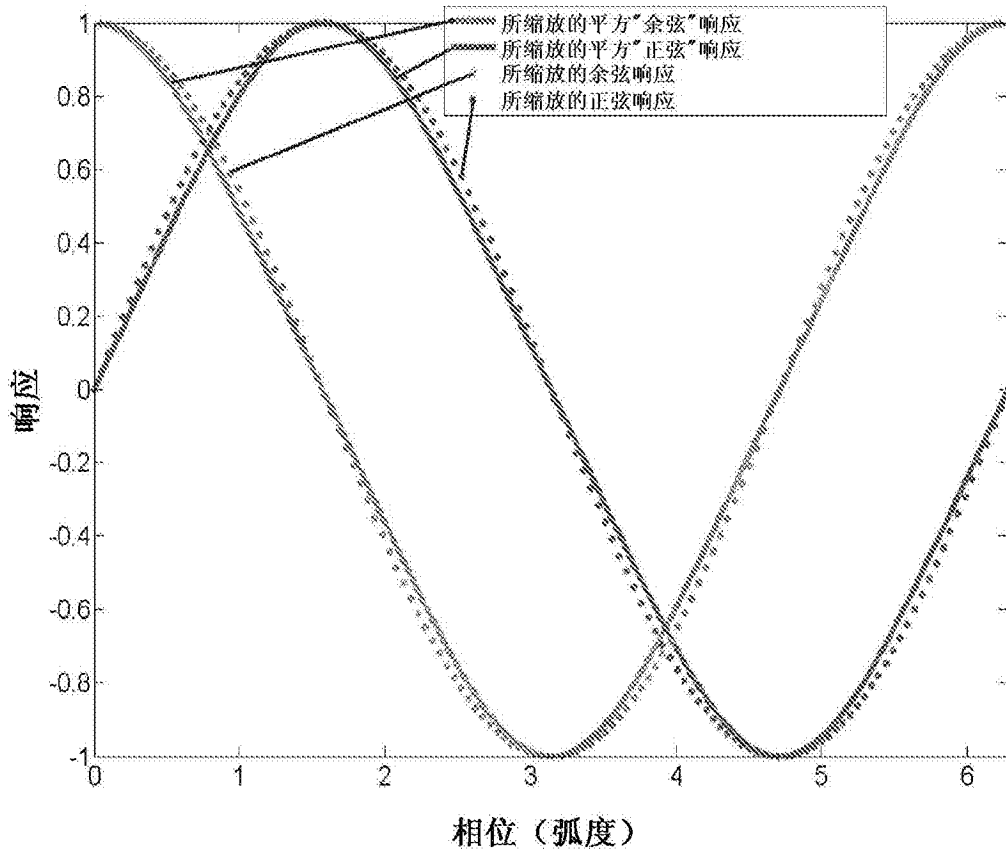


图11

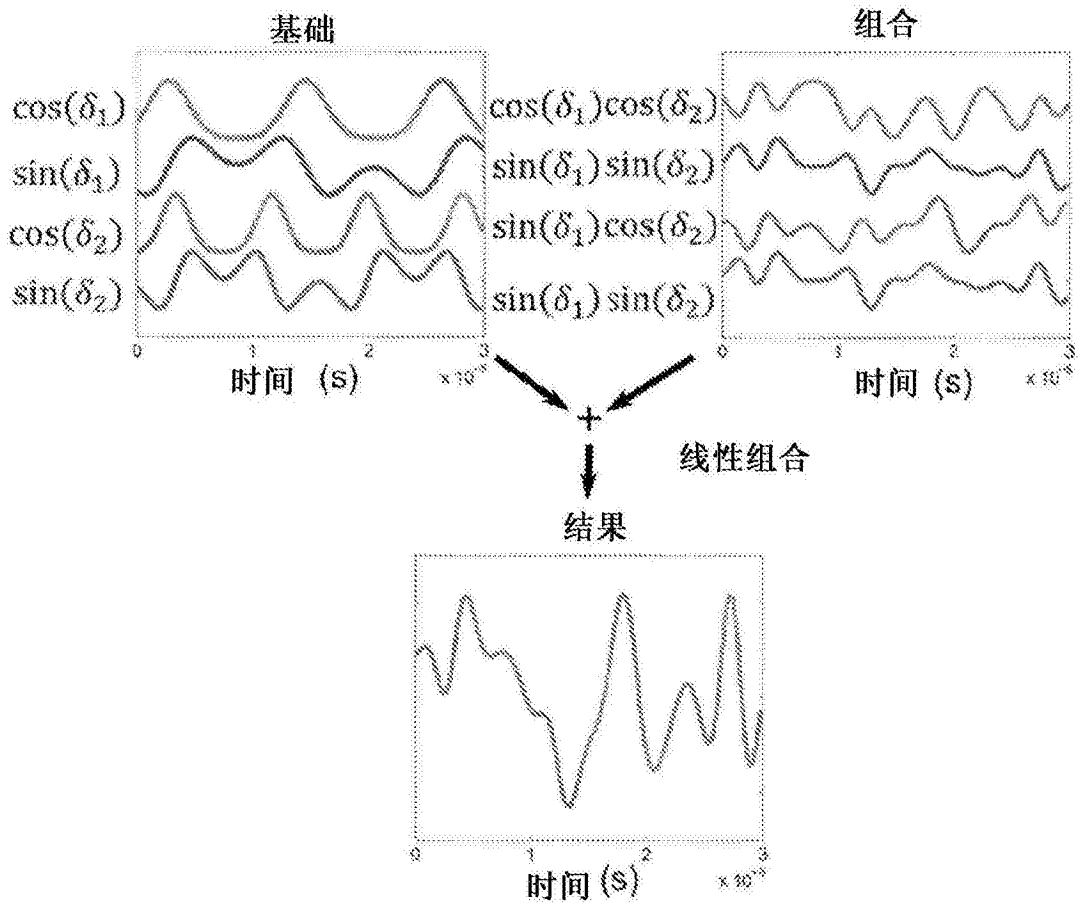


图12



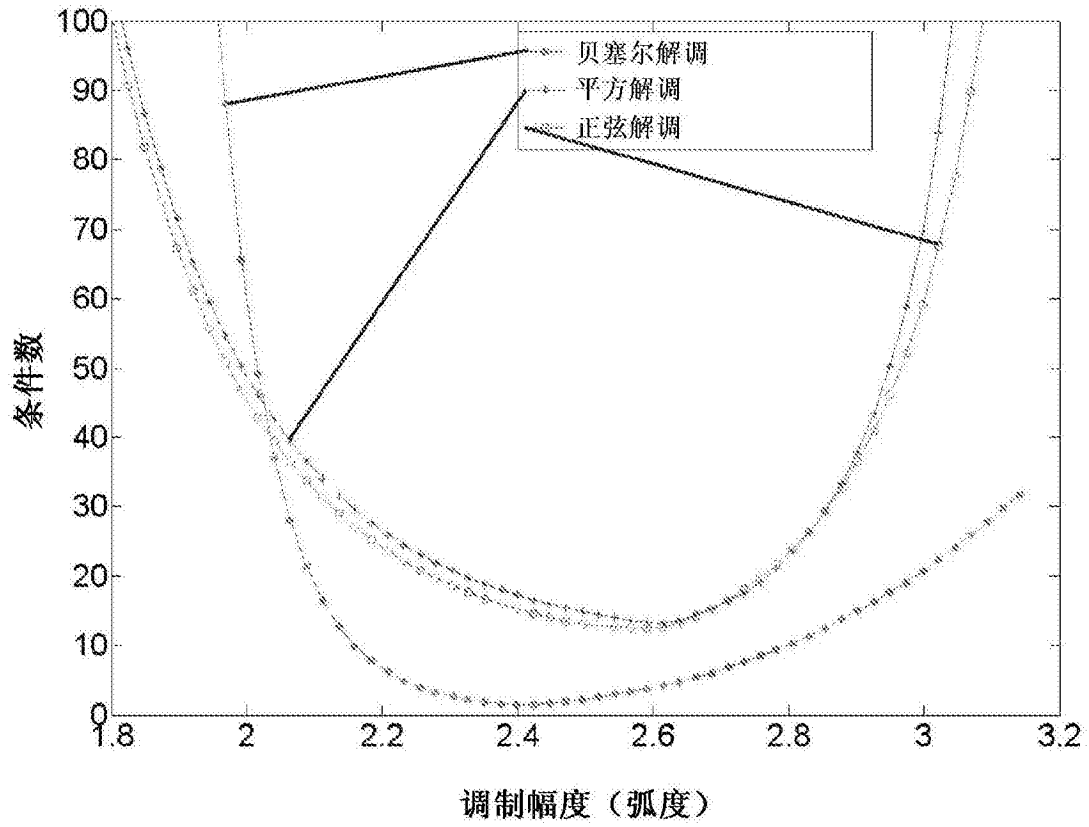


图13