



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118742786 A

(43) 申请公布日 2024. 10. 01

(21) 申请号 202380023016.1

(74) 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公  
司 31100

(22) 申请日 2023.02.16

专利代理师 施浩

(30) 优先权数据

FR2201527 2022.02.21 FR

(51) Int.Cl.

G01B 11/30 (2006.01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2024.08.21

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/EP2023/053887 2023.02.16

(87) PCT国际申请的公布数据

W02023/156519 FR 2023.08.24

(71) 申请人 想象光学公司

地址 法国奥尔赛

(72) 发明人 X·列维茨 N·勒法多

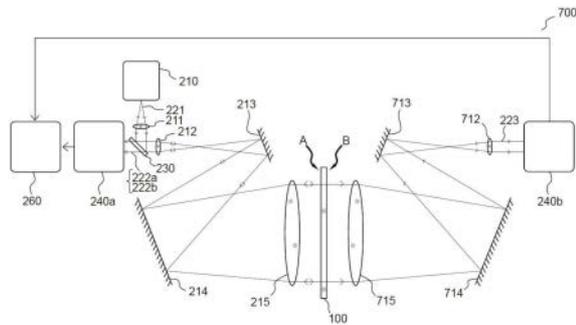
权利要求书3页 说明书18页 附图15页

(54) 发明名称

用于分析具有平行面的基底的表面质量的  
系统和方法

(57) 摘要

本发明涉及一种用于分析基底 (100) 的表面  
质量的方法,该方法包括:-发射第一光束 (221),  
该第一光束 (221) 入射到所述基底的第一面 (A)  
上;-由波前分析装置 (240) 接收由第一光束被第  
一面反射而产生的第一反射光束 (222a) 以及被  
基底的第二面 (B) 反射而产生的第二反射光束  
(222b),以便生成表征第一反射光束和第二反射  
光束的波前的组合的至少一个第一测量信号;-  
由波前分析装置接收由第二光束透射穿过基底  
而产生的透射光束,以便生成第二测量信号;-根  
据第一测量信号和第二测量信号计算分别表示  
第一面和第二面的变形的第一信号和第二信号。



1. 一种用于分析具有平行面的基底(100)的表面质量的方法,该方法包括:

-由发射装置的至少一个第一光源(210、210a)发射具有低时间相干性的至少一个第一光束(221),所述至少一个第一光束入射到所述基底的第一面(A)上,所述基底对于所述第一光束的至少一个波长至少部分透明;

-由波前分析装置的至少一个第一波前分析仪(240、240a)接收至少一个第一反射光束(222a)和第二反射光束(222b),以便生成表征所述第一反射光束和所述第二反射光束的波前的组合的至少一个第一测量信号,所述第一反射光束由所述至少一个第一光束被所述基底的所述第一面(A)反射而产生,并且所述第二反射光束由所述第一光束第一透射穿过所述基底、然后被所述基底的第二面(B)反射、随后第二透射穿过所述基底而产生;

-由所述波前分析装置接收由所述发射装置发射的第二光束至少一次第一透射穿过所述基底而产生的至少一个第一透射光束(223、223a),以便生成表征所述透射光束的波前的第二测量信号;

-根据所述至少一个第一测量信号和所述第二测量信号,计算表示所述基底的所述第一面相对于第一参考表面的变形的至少一个第一信号以及表示所述基底的所述第二面相对于第二参考表面的变形的至少一个第二信号。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述至少一个第一光束以基本上垂直于所述基底的方式入射到所述基底上。

3. 根据权利要求1或2所述的方法,其中:

-所述第二光束入射到所述基底的所述第一面(A)上,并且为了生成所述第二测量信号,所述方法还包括:

-定位以基本上垂直于所述第二光束的方式布置的参考镜;并且其中,

-所述第一透射光束(223)是由所述第二光束第一透射穿过所述基底、由所述参考镜反射、并且由所述参考镜反射的光束第二透射穿过所述基底而产生的;并且

-所述第一反射光束和所述第二反射光束以及所述第一透射光束由所述波前分析装置的所述第一波前分析仪(240)接收。

4. 根据权利要求3所述的方法,其中,所述第一光束和所述第二光束由所述第一光源发射。

5. 根据权利要求1或2所述的方法,其中:

-所述第二光束入射到所述基底的所述第一面(A)上;

-所述第一透射光束(223、223a)由所述第二光束第一透射穿过所述基底而产生;并且

-所述第一透射光束由波前分析装置的与所述第一波前分析仪分离的第二波前分析仪(240b)接收。

6. 根据权利要求1或2所述的方法,其中:

-所述第二光束(221b)由所述发射装置的与所述第一光源分离的第二光源发射,并且入射到所述基底的所述第二面(B)上;

-所述第一透射光束(223、223b)由所述第二光束第一透射穿过所述基底而产生;并且

-所述第一透射光束由测量分析装置的所述第一波前分析仪(240)接收。

7. 根据权利要求6所述的方法,其中:

-由所述第一光源发射的所述第一光束和由所述第二光源发射的所述第二光束具有不

同的波长和/或偏振,所述方法还包括:

-由波前分析装置的与所述第一波前分析仪分离的第二波前分析仪(240b)接收由所述第一光束第一透射穿过所述基底而产生的第二透射光束(223a),以便生成表征所述第二透射光束的波前的第三测量信号;并且

-比较表征所述第一透射光束的波前的所述第二测量信号和表征所述第二透射光束的波前的所述第三测量信号,以便生成表征所述基底内的折射率变化的信号。

8.一种用于分析具有平行面的基底的表面质量的系统,该系统包括:

-至少一个第一支撑件,该至少一个第一支撑件被配置为接收待分析的基底;

-发射装置,该发射装置包括至少一个第一光源,该至少一个第一光源用于发射具有低时间相干性的至少一个第一光束,并且具有所述基底对其至少部分透明的至少一个波长,所述发射装置被配置为使得在操作中,所述至少一个第一光束入射到所述基底上;

-波前分析装置,该波前分析装置包括至少一个第一波前分析仪(240、240a),并且在操作中被配置为:

-在所述第一波前分析仪的分析表面上接收至少一个第一反射光束(222a)和第二反射光束(222b),以便生成表征所述第一反射光束和所述第二反射光束的波前的组合的第一测量信号,所述第一反射光束由所述至少一个第一光束被所述基底的第一面(A)反射而产生,所述第二反射光束由所述第一光束第一透射穿过所述基底、然后被所述基底的第二面(B)反射、随后第二透射穿过所述基底而产生;

-由所述波前分析装置接收由所述发射装置发射的第二光束至少一次第一透射穿过所述基底而产生的至少一个第一透射光束(223、223a),以便生成表征所述透射光束的波前的第二测量信号;

-处理单元(260),该处理单元被配置为根据所述第一测量信号和所述第二测量信号,计算表示所述基底的所述第一面相对于第一参考表面的变形的至少一个第一信号以及表示所述基底的所述第二面相对于第二参考表面的变形的至少一个第二信号。

9.根据权利要求8所述的系统,其中,所述发射装置被配置为使得在操作中,所述至少一个第一光束以基本上垂直于所述基底的方式入射到所述基底上。

10.根据权利要求8或9所述的系统,其中,所述第一波前分析仪的所述分析表面与所述待分析的基底基本上光学共轭。

11.根据权利要求8至10中任一项所述的系统,还包括:

-第二支撑件,该第二支撑件被配置为接收参考镜,所述参考镜在操作中以基本上垂直于所述第二光束的方式布置;并且其中,在操作中:

-所述第一透射光束(223)由所述至少一个第一入射光束第一透射穿过所述基底、由所述参考镜反射、并且由所述参考镜反射的光束第二透射穿过所述基底而产生;并且

-所述第一反射光束和所述第二反射光束以及所述第一透射光束由所述波前分析装置的所述第一波前分析仪(240)接收。

12.根据权利要求8至10中任一项所述的系统,其中,所述波前分析装置包括与所述第一波前分析仪分离的第二波前分析仪,并且:

-所述发射装置被配置为使得在操作中,所述第二光束入射到所述基底的所述第一面上,所述第一透射光束由所述第二光束第一透射穿过所述基底而产生;

-所述波前分析装置被配置为使得在操作中,所述第一透射光束由所述波前分析装置的所述第二波前分析仪接收。

13.根据权利要求8至12中任一项所述的系统,其中,所述至少一个第一波前分析仪选自哈特曼和夏克-哈特曼波前分析仪、横向偏移干涉仪、莫尔偏折测量仪以及基于纹影法的设备。

## 用于分析具有平行面的基底的表面质量的系统和方法

### 技术领域

[0001] 本说明书涉及用于分析具有平行面的基底的表面质量的系统和方法,并且更具体地,涉及对这种基底的表面的变形的分析。

### 背景技术

[0002] 具有平行面的材料(在本说明书中简单地称为“基底”)的表面形貌在许多领域中是相关的,这些材料可能包括例如用于计算机硬盘的玻璃基底、用于半导体工业的硅光掩模和晶片、用于移动设备的平板屏幕和玻璃显示器、窗户、X射线望远镜光学器件、滤光器、分束器、保护性圆顶等。

[0003] 重要的是能够研究和量化这种基底的表面的任何变形,因为这些变形可能在使用这种基底的系统中引起畸变。

[0004] 用于分析基底的表面质量的非接触式光学方法是已知的。在分析基底的一个面的表面质量的大多数方法中遇到的一个困难是另一个面(背面)的反射贡献,特别是在用于测量的光源的光谱带中为透明基底的情况下。

[0005] 例如,在Craig R.Forest等人的综述文章《Metrology of thin transparent optics using Shack-Hartmann wavefront sensing》[参考文献1]中描述了用于分析薄透明材料的表面质量的各种计量学方法,这些方法能够克服背面上的反射效应。

[0006] 值得注意的是,已知将具有合适折射率的涂层施加到背面以抑制来自背面的反射,或者将高反射涂层施加到正面,但是这些方法需要涂层施加和清洁操作,并且这些方法本身可能引起表面变形。

[0007] [参考文献1]还描述了相移干涉测量的方法,其中使用白色或低相干光源来避免由于基底的两个面上的反射而引起的寄生干涉。例如使用迈克尔逊干涉仪的这些方法难以实施,并且局限于其中变形远小于厚度的基底。

[0008] 如[参考文献1]中所解释的,还可以考虑使用频率可调谐激光源的相移干涉测量法。例如,可以在三个表面(参考表面、基底的正面和背面)上依次以两个不同的波长进行干涉测量,之后再次以两个波长进行新的干涉测量,但是其中基底被翻转,使得背面朝向参考表面。然后通过数学方法来分离材料的平整且平行的表面的干涉贡献,特别是由于正面和参考表面之间的干涉产生的贡献。然而,该方法需要操作样品,必须将样品翻转以进行两组测量,并且这在易碎和易变形材料的情况下可能是不方便的。更一般地,存在使用频率变化源的已知方法,其中干涉信号的频谱的傅立叶分析可以提取不同面的轮廓。所有这些方法都需要大量的采集,这使得其对环境(尤其是对振动)非常敏感。

[0009] [参考文献1]还描述了用于空间分离来自正面和背面的反射的方法,使得能够用快门阻挡来自背面的反射。例如,这些包括使用倾斜或球面照射的干涉测量法(也被称为“掠入射干涉测量法”)。然而,这些方法对部件的对准高度敏感。

[0010] 除了基于干涉测量的方法之外,[参考文献1]介绍了一种使用夏克-哈特曼波前分析仪来分析薄透明材料的面的光学质量的方法。

[0011] 如取自[参考文献1]的图1所示,夏克-哈特曼波前分析仪包括微透镜阵列20和基元检测器阵列30。如果参考波前(例如,平坦的参考波前)入射到微透镜阵列20上,则每个微透镜(20<sub>i</sub>,20<sub>j</sub>,...)在无偏转的情况下截取并聚焦波前的一部分,从而导致焦斑的重心在基元检测器阵列30上的规则排列。相反地,如图1所示,如果波前10相对于平坦的参考波前以变形入射,则微透镜(20<sub>i</sub>,20<sub>j</sub>,...)截取波前的局部具有非零斜率的部分(10<sub>i</sub>,10<sub>j</sub>,...)。这导致焦斑的重心在基元检测器阵列30上的位移。基于以这种方式确定的测量信号,并且根据位移的二维矩阵,可以确定波前的局部斜率的矩阵,并且例如通过局部斜率的值的数值积分,从局部斜率的矩阵推导出在每个微透镜处测量的相对于参考波前的波前值的矩阵。由于被分析的面的局部变形与波前的局部变形成正比,因此可以基于夏克-哈特曼测量信号来确定变形。

[0012] 通过与上述干涉测量技术相比较,使用夏克-哈特曼波前分析仪的计量学方法(或者更一般地,实施直接分析波前的波前分析仪的设备),特别使得可以使用时间不相干或具有低时间相干性的光源(这些光源通常比激光器便宜),并且使得可以在较少受控的环境中操作;这些解决方案的成本也较低。

[0013] 然而,如[参考文献1]中所解释的,来自背面的反射可能干扰正面的表面质量的测量,特别是在使用包含材料对其至少部分透明的波长的光源的情况下。因此,建议应当安装光谱滤波器,用于过滤材料的透明范围内的所有波长,或者应当使用其波长不被待分析的基底的材料透射的光源。

[0014] 公开的专利申请W0 2004/068088[参考文献2]描述了使用两个波前分析仪(在这种情况下为横向偏移干涉仪(lateral shift interferometer)(或“剪切干涉仪”)。在表面缺陷待测量的基底上同时进行反射和透射测量。像夏克-哈特曼波前分析仪一样,这种横向偏移干涉仪可用于波前的直接测量:其不使用与参考光束的干涉,并且对波前的一阶导数敏感。反射测量提供了关于面的拓扑的信息,透射测量提供了关于基底的厚度变化的信息。这两种测量可以结合起来以获得关于基底两个面的拓扑的信息。该方法效果良好,但实施起来较复杂,因为基底的一个面的反射测量必须不受来自第二面的反射的干扰。为此,建议应当将基底材料对其不透明(即吸收)的波长用于该反射测量。这使得有必要选择例如UV或远红外中的波长,这需要特殊的传感器和光学器件,从而在材料的选择和成本方面造成约束。

[0015] 本说明书的一个目的是提出用于分析具有平行面的基底的两个面的表面质量的系统和方法,其中使用允许使用具有低时间相干性的一个或多个光源的波前分析仪,同时不受[参考文献2]中描述的设备和方法方面的约束。

## 发明内容

[0016] 在本说明书中,术语“包括”与“包含”或“含有”意思相同,是包含性的或开放性的,并且不排除未描述或未表示的其他元素。

[0017] 此外,在本说明书中,术语“约”或“基本(上)”与相应值的10%(例如5%)的上裕度或下裕度同义(意思相同)。

[0018] 根据第一方面,本发明涉及一种用于分析具有平行面的基底的表面质量的方法,该方法包括:

[0019] -由发射装置的至少一个第一光源发射具有低时间相干性的至少一个第一光束,所述至少一个第一光束入射到所述基底上,所述基底对于所述第一入射光束的至少一个波长至少部分透明;

[0020] -由波前分析装置的至少一个第一波前分析仪接收至少一个第一反射光束和第二反射光束,以便生成表征所述第一反射光束和所述第二反射光束的波前的组合的至少一个第一测量信号,所述第一反射光束由所述至少一个第一光束被所述基底的第一面反射而产生,所述第二反射光束由所述第一光束第一透射穿过所述基底、然后被所述基底的第二面反射、随后第二透射穿过所述基底而产生;

[0021] -由所述波前分析装置接收由所述发射装置发射的第二光束至少一次第一透射穿过所述基底而产生的至少一个第一透射光束,以便生成表征所述透射光束的波前的第二测量信号;

[0022] -根据所述至少一个第一测量信号和所述第二测量信号,计算表示所述基底的所述第一面相对于第一参考表面的变形的至少一个第一信号以及表示所述基底的所述第二面相对于第二参考表面的变形的至少一个第二信号。

[0023] 在本说明书中,“具有平行面的基底”是指具有第一面和第二面的光学元件,沿垂直于所述面的轴测量的两个面之间的距离在整个光学元件上基本恒定,也就是说,厚度变化小于 $\pm 10\%$ 。具有平行面的基底可以是平坦的,在这种情况下,所述面之间的角度小于约5弧分。在本说明书中可以考虑具有平行面的其他形状的基底,例如弯曲基底,如保护性圆顶。

[0024] 在本说明书中,具有低时间相干性的光束是具有足够低的时间相干性以避免在基底的面上的反射光束之间的任何干涉效应的光束,这种干涉效应可能导致测量问题。为此,在实践中有利的是,所述第一光束的时间相干长度小于待分析的具有平行面的基底的光学厚度的约两倍,所述基底的光学厚度是所述基底的厚度乘以制造所述基底的材料的平均折射率。所述第一光束的时间相干性小于或等于约 $100\mu\text{m}$ ,或者有利地小于或等于约 $10\mu\text{m}$ 。因此,例如,利用时间相干性小于或等于约 $10\mu\text{m}$ 的第一光束,可以分析非常薄的基底的表面,也就是说,具有几十微米厚度的那些基底的表面。应当注意,所述第一光束的时间相干长度设定了待分析的基底的最小厚度,但不施加任何进一步的限制。例如,使用时间相干性小于或等于约 $10\mu\text{m}$ 的相同光源,也可以分析厚度为几十厘米的基底。

[0025] 根据一个或多个实施例示例,所述至少一个第一光束和所述第二光束是空间相干的。

[0026] 例如,如果使用夏克-哈特曼波前分析仪,则第一光束和第二光束具有足够的空间相干性,使得所得到的反射光束或透射光束入射到微透镜阵列上将生成尺寸小于生成其的微透镜的尺寸的焦斑。

[0027] 作为一般规则,已知当生成光束的光源的空间相干性也降低时,也就是说当光源的角度尺寸增大时,波前分析仪的精度降低。因此,光束的空间相干性必须足以允许分析仪与应用要求兼容的精度进行测量。例如,如上所述,对于夏克-哈特曼传感器,已知如果延伸到分析仪的空间中的光束发射源的角度尺寸小于微透镜的衍射角,则测量精度不会受到很大影响。

[0028] 根据一个或多个实施例示例,用于发射具有低时间相干性的所述至少一个第一光

束的所述至少一个第一光源是选自以下的源：白炽灯、发光二极管(LED)、超辐射发光二极管(SLED)(其可在单模光纤中光纤化)、在其激光效应生成阈值以下使用的激光二极管(其可在单模光纤中光纤化)。

[0029] 在本说明书中,当穿过基底的光束在至少一个波长下的透射率至少等于10%,或有利地至少等于30%时,基底被认为对于所述波长是至少部分透明的。

[0030] 在本说明书中,与现有技术中描述的方法(例如[参考文献2]中描述的方法)相比,因此确保入射到待分析的基底上的第一光束至少部分地被基底透射,使得可以通过波前分析装置的所述至少一个第一波前分析仪来分析由基底的第一面和第二面反射的光束的组合波前。

[0031] 在本说明书中,术语光束的“波前”应用于具有与形成所述光束的电磁波相同相位的表面。因此,如果例如用平坦的参考波照射没有缺陷的基底的平坦表面,则反射光束的波前也是平坦的。如果所述表面相对于平坦参考表面具有局部变形,则反射光束的波前相对于平坦的参考波前变形。因此,在本说明书中,波前分析是所述波前相对于参考波前(例如但不一定是平坦波前)的变形的测量。例如,在分析弯曲基底时,所述参考波前可以是球面波前。

[0032] 因此,在本说明书中,所述第一测量信号、所述第二测量信号以及表征基底的第一表面和第二表面的变形的信号是矩阵信号(也就是说,由二维矩阵的值组成的信号)。

[0033] 在本说明书中,“波前分析仪”表示用于直接测量待分析光束的波前的设备,这与使用待分析光束与参考光束的干涉的干涉测量技术不同。总体而言,这样的设备使得可以确定波前的局部斜率(也就是说,波前的一阶导数),并且通常基于使用波前传感器对光线行进的角度变化的分析,该波前传感器包括一组一个或多个光学元件以及通常是二维的检测器。

[0034] 根据一个或多个实施例示例,波前分析装置的所述至少一个第一波前分析仪选自:哈特曼和夏克-哈特曼波前分析仪(例如,如[参考文献3]中描述的)、横向偏移干涉仪(例如,如[参考文献4]中描述的)、莫尔偏折测量仪(例如,如[参考文献5]中描述的)以及基于纹影法的设备(例如,如[参考文献6]中描述的)。

[0035] 根据一个或多个实施例示例,所述至少一个第一光束以基本上垂直于所述基底的方式入射到所述基底上。尽管可以设想第一光束相对于法线倾斜地入射到基底上的布置,但是基本上垂直入射是优选的,因其简化了光学组件并且使得可以避免在第一反射光束和第二反射光束之间引入任何横向偏移,特别是在厚基底的情况下。

[0036] 根据一个或多个实施例示例,所述第二光束入射到所述基底的所述第一面上,并且为了生成所述第二测量信号,所述方法还包括:

[0037] -定位以基本上垂直于所述第二光束的方式布置的参考镜;并且其中,

[0038] -所述第一透射光束由所述第二光束第一透射穿过所述基底、由所述参考镜反射、并且由所述参考镜反射的光束第二透射穿过所述基底而产生;并且

[0039] -所述第一透射光束由所述波前分析装置的所述第一波前分析仪接收。

[0040] 这样描述的方法可以用单个波前分析仪和单个光发射源来实施,所述第一光束和所述第二光束可由相同的光源发射。

[0041] 在目标是分析具有平行面的平坦基底的情况下,参考镜可以是平坦的,或者例如

在目标是分析具有非零曲率的基底的情况下,参考镜可以是弯曲的(例如球面的)。

[0042] 根据一些实施例示例,参考镜可以按照可移除的方式布置。在其他实施例示例中,其可以是可遮蔽的(例如使用快门),或者可以是可定向的(通过机动或非机动旋转系统),使得由反射镜反射的光束不被波前分析装置接收。在这两种情况下,这使得可以在反射镜不存在或者被遮蔽或旋转的情况下获得表征第一反射光束和第二反射光束的波前的组合的第一测量信号,并且当参考镜存在并且未被遮蔽或旋转时获得表征所述透射光束的波前的第二测量信号。

[0043] 根据一个或多个实施例示例:

[0044] -所述第二光束入射到所述基底的所述第一面上;

[0045] -所述第一透射光束由所述第二光束第一透射穿过所述基底而产生;并且

[0046] -所述第一透射光束由波前分析装置的与所述第一波前分析仪分离的第二波前分析仪接收。

[0047] 这样描述的方法用包括两个分离的波前分析仪的波前分析装置来实施,这两个分离的波前分析仪可以相同或不同。由于所述第一光束和所述第二光束可以由相同的光源同时发射,所以可以同时获得表征所述第一反射光束和所述第二反射光束的波前的组合的第一测量信号和表征所述透射光束的波前的第二测量信号,而不需要操纵参考镜。

[0048] 根据一个或多个实施例示例:

[0049] -所述第二光束由所述发射装置的与所述第一光源分离的第二光源发射,并且入射到所述基底的所述第二面上;

[0050] -所述第一透射光束由所述第二光束第一透射穿过所述基底而产生;并且

[0051] -所述第一透射光束由测量分析装置的所述第一波前分析仪接收。

[0052] 这样描述的方法用包括两个分离的发射源的发射装置来实施,所述发射源可以相同或不同。其使得能够获得表征所述第一反射光束和所述第二反射光束的波前的组合的第一测量信号以及表征所述透射光束的波前的第二测量信号,而无需操纵参考镜。

[0053] 因此,在不同种类的发射源的情况下,根据一个或多个实施例示例,由所述第一光源发射的所述第一光束和由所述第二光源发射的所述第二光束具有不同的波长和/或偏振。所述方法还可以包括:

[0054] -由波前分析装置的与第一波前分析仪分离的第二波前分析仪接收由所述第一光束第一透射穿过基底而产生的第二透射光束,以便生成表征所述第二透射光束的波前的第三测量信号;并且

[0055] -比较表征所述第一透射光束的波前的所述第二测量信号和表征所述第二透射光束的波前的所述第三测量信号,以便生成表征所述基底内的折射率变化的信号。

[0056] 根据第二方面,本说明书涉及用于分析具有平行面的基底的表面质量的系统,用于实施根据第一方面的分析方法。

[0057] 因此,根据第二方面的系统包括:

[0058] -至少一个第一支撑件,该至少一个第一支撑件被配置为接收待分析的基底;

[0059] -发射装置,该发射装置包括至少一个第一光源,该至少一个第一光源用于发射具有低时间相干性的至少一个第一光束,并且具有所述基底对其至少部分透明的至少一个波长,所述发射装置被配置为使得在操作中,所述至少一个第一光束入射到所述基底上;

[0060] -波前分析装置,该波前分析装置包括至少一个第一波前分析仪,并且在操作中被配置为:

[0061] -在所述第一波前分析仪的分析表面上接收至少一个第一反射光束和第二反射光束,以便生成表征所述第一反射光束和所述第二反射光束的波前的组合的第一测量信号,所述第一反射光束由所述至少一个第一光束被所述基底的第一面反射而产生,所述第二反射光束由所述第一光束第一透射穿过所述基底、然后被所述基底的第二面反射、随后第二透射穿过所述基底而产生;

[0062] -由所述波前分析装置接收由所述发射装置发射的第二光束至少一次第一透射穿过所述基底产生的至少一个第一透射光束,以便生成表征所述透射光束的波前的第二测量信号;

[0063] -处理单元,该处理单元被配置为根据所述第一测量信号和所述第二测量信号,计算表示所述基底的所述第一面相对于第一参考表面的变形的至少一个第一信号以及表示所述基底的所述第二面相对于第二参考表面的变形的至少一个第二信号。

[0064] 根据的一个或多个实施例示例,所述发射装置被配置为使得在操作中,所述至少一个第一光束以基本上垂直于所述基底的方式入射到所述基底上。

[0065] 根据一个或多个实施例示例,所述第一波前分析仪的所述分析表面与待分析的基底光学共轭。

[0066] 在一个或多个实施例中,所述系统还包括:

[0067] -第二支撑件,该第二支撑件被配置为接收参考镜,所述参考镜在操作中基本上垂直于所述第二光束的方式布置;并且其中,在操作中:

[0068] -所述第一透射光束由所述第二光束第一透射穿过所述基底、由所述参考镜反射、并且由所述参考镜反射的光束第二透射穿过所述基底而产生;并且

[0069] -所述第一反射光束和第二反射光束以及所述第一透射光束由所述波前分析装置的所述第一波前分析仪接收。

[0070] 根据一个或多个实施例示例,所述波前分析装置包括与第一波前分析仪分离的第二波前分析仪,并且:

[0071] -所述发射装置被配置为使得在操作中,所述第二光束入射到所述基底的所述第一面上,所述第一透射光束由所述第二光束第一透射穿过所述基底而产生;

[0072] -所述波前分析装置被配置为使得在操作中,所述第一透射光束由所述波前分析装置的所述第二波前分析仪接收。

[0073] 根据一个或多个实施例示例,波前分析装置的所述至少一个第一波前分析仪选自:哈特曼和夏克-哈特曼波前分析仪(例如,如[参考文献3]中描述的)、横向偏移干涉仪(例如,如[参考文献4]中描述的)、莫尔偏折测量仪(例如,如[参考文献5]中描述的)以及基于纹影法的设备(例如,如[参考文献6]中描述的)。

## 附图说明

[0074] 根据本说明书,本发明的其他优点和特征将变得清楚,如以下附图所示:

[0075] [图1] (已在上文描述) 是示出了根据现有技术的夏克-哈特曼分析仪的原理的图。

[0076] [图2A] 是示出了根据本说明书的用于分析基底的表面质量的方法的示例的第一

步骤的图,其中使用根据本说明书的用于分析基底的面质量的系统的第二示例。

[0077] [图2B]是示出了根据本说明书的用于分析基底的面质量的方法的示例的第二步骤的图,其中使用如图2A所示的用于分析基底的面质量的系统。

[0078] [图3A]是示出了在根据本说明书的用于分析基底的面质量的方法的步骤中、利用夏克-哈特曼分析仪测量表征第一反射光束和第二反射光束的波前的组合的信号图。

[0079] [图3B]是更详细地示出了图3A中所示的测量的图。

[0080] [图4A]是示出了当基底的第一面相对于平坦参考表面具有表面缺陷时由该第一面反射的平坦波前所经历的变形的示例的图。

[0081] [图4B]是示出了当图4A所示的基底的第二面具有表面缺陷时最初由基底透射、然后由第二面反射、然后由基底第二透射的平坦波前所经历的变形的示例的图。

[0082] [图4C]是示出了由图4B中所示的基底透射、然后由参考镜反射并由基底再次透射的平坦波前所经历的变形的示例的图。

[0083] [图5A]是示出了根据本说明书的用于分析基底的面质量的方法的示例的第一步骤的图,其中使用根据本说明书的用于分析基底的面质量的系统的第二示例(适于分析具有非零曲率的基底)。

[0084] [图5B]是示出了根据本说明书的用于分析基底的面质量的方法的示例的第二步骤的图,其中使用如图5A所示的用于分析基底的面质量的系统。

[0085] [图6]是示出了根据本说明书的用于分析基底的面质量的方法的示例的步骤的图,其中使用根据本说明书的用于分析基底的面质量的系统的第三示例。

[0086] [图7]是示出了根据本说明书的用于分析基底的面质量的方法的示例的步骤的图,其中使用根据本说明书的用于分析基底的面质量的系统的第四示例。

[0087] [图8]是示出了根据本说明书的用于分析基底的面质量的方法的示例的步骤的图,其中使用根据本说明书的用于分析基底的面质量的系统的第五示例。

[0088] [图9]是表示基底的面变形矩阵的实验图像,这些图像用图2A和图2B中所示的系统获得。

[0089] [图10A]是示出了根据本说明书的用于分析基底的面质量的方法的示例的第一步骤的图,其中使用根据本说明书的用于分析基底的面质量的系统的第六示例(适于第一光束以倾斜角度入射到基底上)。

[0090] [图10B]是示出了根据本说明书的用于分析基底的面质量的方法的示例的第二步骤的图,其中使用如图10A所示的用于分析基底的面质量的系统。

[0091] [图10C]是示出了用于分析基底的面质量的方法的实施限度的图,其中使用图10A所示的用于分析基底的面质量的系统。

## 具体实施方式

[0092] 为了更清楚,附图中的元素未按比例示出。

[0093] 图2A和图2B示出了用于分析具有基本上平行的面的基底100的面质量的方法的示例的实施的两个步骤,其中使用用于分析基底的面质量的系统的第二示例。在本示例中,目的是分析具有基本上平行的面的平坦基底的两个表面的质量。

[0094] 用于分析基底的面质量的系统(如图2A和图2B中所示,并且被标记为200)包括

被配置为接收待分析的基底100的至少一个第一支撑件(图中未示出)以及被配置为接收反射镜250(图2B)的第二支撑件(图中未示出)。例如,反射镜以可移除的方式布置,或者可以是可遮蔽的(例如使用快门),或者可以是可定向的(例如通过机动或非机动旋转系统),使得随后由反射镜反射的入射光束不被波前分析装置接收。

[0095] 系统200还包括光发射装置,该光发射装置包括具有低时间相干性的光的发射源210,该发射源210具有基底100对其至少部分透明的至少一个波长。

[0096] 总体而言,光发射源210可以包括白炽灯、发光二极管(LED)、超辐射发光二极管(SLED)或在其激光效应生成阈值以下使用的激光二极管。

[0097] 光源的选择可以与待分析的基底相匹配。例如,如果分析光谱滤波器,则光发射源210可以包括超辐射发光二极管(SLED),其波长选自干涉滤波器的透射光谱带。

[0098] 系统200还包括分析波前的装置,在图2A和图2B的示例中,该装置包括波前分析仪240,例如但不限于夏克-哈特曼分析仪。

[0099] 系统200还包括处理单元260,该处理单元260被配置为处理由波前分析仪240传输的测量信号,并且可以包括显示单元(未示出)。

[0100] 总体而言,本说明书中所指的处理单元可以包括一个或多个物理实体,并且可以是一个或多个计算机的元件的组合。在本说明书中提及用于实施特别是方法步骤的计算或处理步骤的情况下,应当理解,每个计算或处理步骤可以由软件、硬件、固件、微码或这些技术的任何适当组合来实施。在使用软件的情况下,每个计算或处理步骤可以通过计算机程序指令或程序代码指令来实施。这些指令可以被存储在或传输到可由处理单元读取的存储介质,并且/或者由处理单元执行以便实施这些计算或处理步骤。

[0101] 在本示例中,光源210发射第一光束221。在本示例中,发射装置被配置为使得在操作中,光束221以基本上垂直于基底的方式入射到基底上(法向入射)。尽管优选法向入射,但是分析系统可以被适配为使得第一光束以与法线成一定角度入射。图10A、图10B和图10C中示出了这种类型的示例。

[0102] 在图2A和图2B的示例中,目的是分析具有平行面的基本上平坦的基底,并且发射装置被配置为使得在操作中,光束以基本上平坦的波前入射到基底上。例如,除了源210之外,发射装置还包括一组光学透镜211、212、215和偏转元件213、214,使得离开光学元件215的光束基本上被准直,并且使得所述光束的尺寸适合于待分析的基底的尺寸。有利地,该组光学透镜还使得能够在待分析的基底和波前分析仪的分析平面(例如,在夏克-哈特曼分析仪的情况下的微透镜阵列的平面)之间基本上提供光学共轭。

[0103] 如图2A所示,在本示例中实施的方法的第一步中,一方面,第一光束221由基底100的第一面A反射以形成第一反射光束222a,另一方面,第一光束221透射穿过基底并由基底100的第二面B反射、然后再次透射穿过基底以形成第二反射光束222b。

[0104] 波前分析装置被配置为在波前分析仪240的分析表面上接收第一反射光束222a和第二反射光束222b,以便生成表征所述第一反射光束和第二反射光束的波前的组合的第一测量信号,如下面将详细描述。

[0105] 在图2A和图2B的示例中,波前分析装置包括与发射装置的那些共用的一组光学透镜211、212、215和偏转元件213、214,以将反射光束导向波前分析仪240。系统200还包括被配置为分离发射装置和分析装置的光学分束元件230。光学元件230例如包括分束板或分束

立方体。

[0106] 在本示例中,该组光学透镜211、212、215和偏转元件213、214使得反射光束222a和222b以及透射光束223的尺寸能够基本上适合于波前分析仪240的分析表面的尺寸。

[0107] 如图2B所示,在本示例中实施的方法的第二步骤中,安装参考镜250。

[0108] 反射镜250以这样的方式布置,使得入射到基底上的第二光束在透射穿过基底之后以基本上垂直于反射镜250的方式入射到反射镜250上。在本示例中,第二光束由与第一光束相同的光源210发射,并且也被标记为221,因其具有相同的属性(相干性和波长),但是第一光束和第二光束不是同时发射的。

[0109] 然后,第二入射光束最初透射穿过基底100,由参考镜250反射,并再次透射穿过基底100。这产生了透射光束223,该透射光束被发送到波前分析装置的波前分析仪240,以便生成表征所述透射光束的波前的第二测量信号。

[0110] 然后,可以借助于处理单元260并基于所述第一测量信号以及所述第二测量信号来计算表示基底的第一面A相对于第一参考表面的变形的至少一个第一信号和表示基底的第二面B相对于第二参考表面的变形的至少一个第二信号,如下文借助图3A、图3B、图4A、图4B和图4C所描述的。

[0111] 应当注意,系统200的光学元件可能具有制造缺陷,这可以在校准步骤中予以考虑,以避免干扰所进行的测量的质量。执行校准的一种实用方法是通过在图2B的配置中进行波前测量来测量这些缺陷,其中从图2B的配置中已经移除待分析的基底100。从存在待分析的基底100的情况下进行的测量(下面详细描述)中减去以这种方式测量的缺陷。

[0112] 实践中,可以基于待分析的基底100的面A和面B上的变形测量的期望精度来选择参考镜250的光学质量。这是因为这些测量的精度不能大于参考镜250的光学质量。

[0113] 计算的原理在下面描述,并在图3A、图3B、图4A、图4B和图4C中示出。

[0114] 通过考虑夏克-哈特曼波前分析仪的示例来描述该原理,但是该原理可应用于任何类型的波前分析仪,也就是说,能够直接测量波前而不需要使测量光束与参考光束干涉的任何类型的测量系统。这些分析仪的共同特征是其对波前导数的灵敏度。

[0115] 因此,图3A示出了与图1中所示的相同的夏克-哈特曼分析仪,特别地,其具有微透镜阵列20和基元检测器阵列30。

[0116] 通过考虑具有平坦且基本上平行的面的待分析的基底的示例来描述该原理。因此,目的是找到基底的面A和面B相对于平坦参考表面的变形。然而,如下面详细描述的,该计算的原理可以应用于具有平行面的其他形状的基底。

[0117] 在借助于图2A和图2B描述的方法的示例的第一步骤中,生成两个反射光束222a和222b,这些光束分别由基底的面A和面B的反射产生。如图3A所示,波前分析仪因此同时分别接收反射光束222a和222b的波前310a和310b。每个波前310a、310b可能相对于参考波前(例如,平坦波前)变形。

[0118] 如图3A所示,微透镜阵列的每个微透镜(20<sub>i</sub>, 20<sub>j</sub>, ...) 截取并聚焦波前310a的波前部分(310<sub>a</sub>, <sub>i</sub>, 310<sub>a</sub>, <sub>j</sub>, ...), 并且截取并聚焦波前310b的波前部分(310<sub>b</sub>, <sub>i</sub>, 310<sub>b</sub>, <sub>j</sub>, ...)

[0119] 如图3B所示,一方面,这导致由于波前310a的波前部分(310<sub>a</sub>, <sub>i</sub>, 310<sub>a</sub>, <sub>j</sub>, ...) 被微透镜(20<sub>i</sub>, 20<sub>j</sub>, ...) 聚焦而引起的焦斑(330<sub>a</sub>, <sub>i</sub>, 330<sub>a</sub>, <sub>j</sub>, ...) 的一部分的重心位移,另一方

面,导致由于波前310b的波前部分(310b,i,310b,j,...)被微透镜(20i,20j,...)聚焦而引起的焦斑(330b,i,330b,j,...)的重心位移。

[0120] 在实践中,基元检测器阵列30针对每个微透镜检测光能量的分布(330i,330j,...),该光能量分布是焦斑(330a,i,330b,i,...)和(330a,j,330b,j,...)的能量和。为了获得两个焦斑330a,i和330b,i的能量和,目的是确保焦斑不发生干涉并且源自彼此不相干的两个光束。通过相干长度小于基底的光学厚度的两倍的照明源,在两个光束源自具有基本上平行的面的基底的两个面的反射的情况下,这是可能的。

[0121] 在实践中,焦斑(330a,i,330b,i,...)和(330a,j,330b,j,...)可以是重叠的、部分重叠的或不连续的。在所有情况下,所得到的光能量分布(330i,330j,...)相对于标称理论位置(例如,源自平坦波前的焦斑的位置)的位移指示反射光束222a和222b的波前的加权平均值的局部斜率。

[0122] 如果忽略基底上的多次反射,可以确定,建立所述加权平均值的加权系数为:对于光束222a,为面A的反射系数 $R_1$ ,并且对于光束222b,为面B的反射系数 $R_2$ 乘以形成基底的材料的透射系数 $T$ 的平方并乘以 $(1-R_1)$ 的平方。 $(1-R_1)$ 一方面是在空气与面A之间的界面处透射到基底中的照明光束的部分,另一方面是由面B反射并在面A与空气之间的界面处透射到空气中的光束的部分。

[0123] 基于这样确定的并且对应于位移的二维阵列的测量信号,可以确定对应于反射波前222a和222b的加权平均值的波前的局部斜率的矩阵,并且由此推导出在每个微透镜处测量的对应波前的值的矩阵。

[0124] 借助于图4A、图4B和图4C,现在将在为说明性目的而提供的非限制性示例中,给出关于可以相对于平坦参考表面确定面A和面B的变形矩阵 $\alpha$ 和 $\beta$ 的方式的更详细的描述。

[0125] 图4A和图4B对应于参照图2A描述的方法的第一步骤。

[0126] 图4A示出了面A相对于参考表面401的局部变形 $\alpha$ ,在本示例中,参考表面401是平坦表面。

[0127] 由入射光束221被面A反射而产生的反射光束222a经历光程的局部变化 $\delta$ 。

[0128] [式1]

[0129]  $\delta = 2\alpha$

[0130] 图4B示出了基底100的面A和面B两者。

[0131] 除了面A的局部变形之外,图4B还示出了面B相对于参考表面402的局部变形,在本示例中,参考表面402是平坦表面。

[0132] 由第一光束221透射穿过基底、随后从面B反射、然后再次透射穿过基底产生的反射光束222b经历光程的局部变化 $\delta$ :

[0133] [式2]

[0134]  $\delta = 2[\alpha - n\alpha + n\beta]$

[0135] 其中 $n$ 是基底的材料的折射率,在本示例中,认为其基本上恒定。

[0136] 由波前分析仪同时接收反射光束222a和222b,反射光束222a和222b的波前如上所述由于面A和面B相对于其参考表面的局部变形而局部变形,如图3A和图3B所示。

[0137] 这导致矩阵形式的第一测量信号 $M_1$ ,其表征所述第一反射光束222a和第二反射光束222b的波前的加权平均值。加权系数分别为 $R_1$ 和 $R_2 * T^2 * (1-R_1)^2$ :

[0138] [式3]

$$[0139] \quad M_1 = \frac{[2\alpha(R_1 + R_2(1 - R_1)^2 T^2) - 2R_2(1 - R_1)^2 T^2 n(\alpha - \beta)]}{R_1 + R_2(1 - R_1)^2 T^2}$$

[0140] 其中,  $R_1$ 和 $R_2$ 分别为面A和面B的反射系数(假设为常数),  $T$ 为基底材料的透射系数(假设为常数),  $\alpha$ 和 $\beta$ 为面A和面B的变形矩阵。

[0141] 图4C对应于参照图2B描述的方法的第二步骤。

[0142] 在本示例中,由第二光束第一透射穿过基底、由基本上垂直于光束的方式布置的反射镜250反射、以及然后第二透射穿过基底而产生的透射光束223经历了光程的局部变化 $\delta$ :

[0143] [式4]

$$[0144] \quad \delta = 2(n-1)(\beta - \alpha)$$

[0145] 由波前分析仪240接收透射光束223,该透射光束223的波前如上所述由于面A和面B的局部变形而局部变形。

[0146] 这导致矩阵形式的第二测量信号 $M_2$ ,其表征透射光束的波前。

[0147] [式5]

$$[0148] \quad M_2 = 2(n-1)(\beta - \alpha)$$

[0149] 根据测量值 $M_1$ 和 $M_2$ ,可以推导出相对于其参考表面的变形矩阵 $\alpha$ 和 $\beta$ :

[0150] [式6]

$$[0151] \quad \alpha = \frac{M_1}{2} - \left( \frac{n(1 - R_1)^2 T^2 R_2 M_2}{2(n - 1)(R_1 + (1 - R_1)^2 T^2 R_2)} \right)$$

[0152] 以及

[0153] [式7]

$$[0154] \quad \beta = \alpha + \left( \frac{M_2}{2(n - 1)} \right)$$

[0155] 应该注意的是, $\alpha$ 和 $\beta$ 是面A和面B相对于参考表面的变形,面A和面B本身的轮廓可以简单地通过将变形 $\alpha$ 和 $\beta$ 加到其各自的参考表面来得到。

[0156] 在上面给出的计算中,假设在 $M_1$ 的计算中,基底内的多次反射的影响是可忽略的。这在基底的面的反射系数小于或等于约10%的情况下是合理的,因为在这种情况下,多次反射对测量的贡献小于波前分析仪接收的信号信号的1%。

[0157] 对于反射系数大于10%的情况,多次反射可以在方程[式3]中予以考虑而没有任何特别的困难,从而导致复杂得多的数值表达式,此处不再重复。

[0158] 此外, $M_2$ 是在假设该测量不受源自从基底的面的反射的任何信号干扰的情况下确定的。这种假设通常是可以接受的,因为反射信号比透射信号弱得多。然而,在 $M_2$ 的测量中,通过将基底倾斜几度,可以消去反射信号,以便抑制测量区域之外的反射。可替换地,可以从源自透射光束的测量信号中减去反射信号。在没有任何特别困难的情况下,还可以在由[式5]给出的测量值 $M_2$ 的数值表达式中考虑反射的存在,这同样导致 $M_2$ 的更复杂的数值表达式。

[0159] 图5A和图5B示出了实施用于分析具有平行面的基底100的表面质量的方法的示例的两个步骤,其中使用用于分析基底100的表面质量的系统的第二示例。在本示例中,目的是分析不平坦的基底100的表面质量,换句话说,该基底100表面至少局部地具有给定的非零曲率。

[0160] 因此,在图5A和图5B所示的示例中,目的是分析具有平行面的基底100的面A和面B的表面质量,其中基底100的面具有基本上恒定的有限曲率半径。这样的基底100例如是保护性圆顶。这种基底100的表面的曲率半径通常在几厘米和几米之间。

[0161] 用于分析表面质量的系统500基本上与图2A和图2B中所示的相同,只是发射装置和波前分析装置共用的光学元件被适配为使得由源210发射的第一光束221以基本上垂直于基底100的方式入射到基底100上,该基底100在本示例中是不平坦的。在本示例中,与波前测量值进行比较的参考波前是球面波前。类似地,分析基底100的面A和面B的变形所相对的参考表面是球面参考表面。

[0162] 因此,在本示例中,发射装置包括附加的光学透镜216,用于对光束221进行整形,使得光束221在所有点处基本上垂直于待分析的基底100,并且用于在待分析的基底100和波前分析仪的分析表面之间基本上建立光学共轭。另外,选择参考镜550的曲率半径和位置,使得该反射镜550在所有点处基本上垂直于光束221。

[0163] 在实践中,由于光学元件216、215、230以及反射镜213和214,由波前分析仪240接收的反射光束222a和222b的波前基本上是平坦的(如在先前描述的示例中那样),除了关于由于基底100的面A和面B的变形而引起的变形。这是因为光学元件216、215、230以及反射镜213和214将待分析的基底100位置处的球面参考波前转换成波前分析仪处的平面参考波前,如在先前描述的示例中那样。因此,可以执行类似的过程来确定面A和面B的变形矩阵。

[0164] 应当注意,直接在波前分析仪处接收球面波前也是可行的,在这种情况下,波前分析仪处的参考波前将是球面的。

[0165] 应当注意,系统500的光学元件可能具有制造缺陷,这可以在校准步骤中予以考虑,以便避免干扰所进行的测量的质量。这样做的一种实用方法是通过在图5B的配置中进行波前测量来测量这些缺陷,其中从图5B的配置中已经移除待分析的基底100。从存在待分析的基底100的情况下进行的测量中减去以这种方式测量的缺陷。

[0166] 在实践中,可以基于待分析的基底100的面A和面B上的变形测量的期望精度来选择参考镜550的光学质量。这是因为这些测量的精度不能大于参考镜550的光学质量。

[0167] 图6示出了根据本说明书的用于分析具有平行面的基底100的表面质量的方法的另一示例的实施方式,其中使用用于分析基底100的表面质量的系统的第二示例。在本示例中,目的是分析具有平行面的平坦基底100的表面质量。

[0168] 用于分析基底100的表面质量的系统(如图6所示并标记为600)包括被配置为接收待分析的基底100的支撑件(图中未示出),但是除了可能的校准过程之外,不需要如图2A、图2B、图5A、图5B所示的示例中的参考镜,如随后将描述的。

[0169] 系统600包括光发射装置,在本示例中,该光发射装置包括具有低时间相干性的光的第一发射源210a,该第一发射源210a具有基底100对其至少部分透明的至少一个波长。例如,如前所述,光发射源210a可以包括白炽灯、LED、SLED或在激光效应生成阈值以下操作的激光二极管。

[0170] 发射装置还包括第二发射源210b,第二发射源210b具有基底100对其至少部分透

明的至少一个波长。与源210a不同,源210b不需要具有低相干长度,这扩展了可能性。因此,如前所述,该光源210b可以包括白炽灯、LED、SLED或在激光效应生成阈值以下操作的激光二极管,或者实际上包括在其激光效应生成阈值以上操作的激光器或激光二极管。

[0171] 上述源具有空间相干的优点。

[0172] 总体而言,可以选择空间相干光源用于发射第一光束和第二光束。这是因为利用空间相干光束实现了波前分析的更高测量精度。

[0173] 例如,如果使用夏克-哈特曼波前分析仪,则第一光束和第二光束具有足够的空间相干性,使得所得到的反射光束或透射光束入射到微透镜阵列上将生成尺寸小于生成其的微透镜的尺寸的焦斑。

[0174] 系统600还包括波前分析装置,在图6的示例中,该波前分析装置包括波前分析仪240(例如但不限于夏克-哈特曼分析仪)以及被配置为处理由波前分析仪240发射的测量信号的处理单元260。

[0175] 在本示例中,第一光源210a发射第一光束221a。发射装置被配置为使得在操作中,第一光束221a有利地以基本上垂直于基底的方式入射到基底的一个面(在本示例中为面A)上。在图6的示例中,目的是分析具有平行面的基本上平坦的基底,并且发射装置被配置为使得在操作中,光束以基本上平坦的波前入射到基底上。例如,如在前面的示例中那样,除了源210a之外,发射装置还包括一组光学透镜211、212、215和偏转元件213、214。

[0176] 在本示例中,第二光源210b发射第二光束221b。例如,但并非必须地,发射装置被配置为使得在操作中,第二光束221b以基本上垂直于基底的方式入射到基底的另一面(在本示例中,是面B)上。在图6的示例中,目的是分析具有平行面的基本上平坦的基底,并且发射装置被配置为使得在操作中,第二光束以基本上平坦的波前入射到基底上。例如,除了源210b之外,发射装置还包括一组光学透镜615和偏转元件613、614,用于使光束基本上准直并使其尺寸适合于待分析的基底的尺寸。

[0177] 如图6所示,在本示例中实施的方法的第一步骤中,激活源210a,并且第一入射光束221a一方面由基底100的第一面A反射以形成第一反射光束222a,另一方面透射穿过基底、由基底100的第二面B反射、并且再次透射穿过基底100以形成第二反射光束222b。

[0178] 波前分析装置被配置为接收第一反射光束222a和第二反射光束222b,以便生成表征所述第一反射光束和第二反射光束的波前的组合的第一测量信号,如先前已经描述的。

[0179] 在图6的示例中,如在前面的示例中那样,波前分析装置包括与发射装置的那些共用的一组光学透镜211、212、215和偏转元件213、214,以将反射光束导向波前分析仪240。如前所述,系统200还包括被配置为分离发射装置和分析装置的光学分束元件230。

[0180] 在该示例中实施的方法的第二步骤中,在源210a关闭的同时,源210b被激活,并且第二光束221b透射穿过基底100。这产生了透射光束223,该透射光束被发送到波前分析装置的波前分析仪240,以便生成表征所述透射光束的波前的第二测量信号。

[0181] 然后,可以借助于处理单元260并基于所述第一测量信号以及所述第二测量信号来计算表示基底的第一面A相对于第一参考表面的变形的至少一个第一信号和表示基底的第二面B相对于第二参考表面的变形的至少一个第二信号,如上面借助图3A、图3B、图4A、图4B和图4C所描述的。

[0182] 应当注意,由于简单地穿过基底,[式5]变为:

[0183] [式8]

$$[0184] \quad M_2 = (n-1)(\beta-\alpha)$$

[0185] 如参考前面的示例所解释的,系统600的光学元件可能具有制造缺陷,这可以在校准步骤中予以考虑,以便避免干扰所进行的测量的质量。可以实施两个校准步骤。这些是用于透射光束的第一校准步骤和用于反射光束的第二校准步骤。执行校准透射光束的步骤的一种实用方法是通过在图6的配置中进行波前测量来测量光学器件的缺陷,其中源210b打开(源210a关闭),待分析的基底100已经从中移除。然后,从存在待分析的基底100的情况下进行的透射测量中减去以这种方式测量的这些缺陷。校准反射光束的步骤与图2A和图2B描述的校准相同,其中用参考镜代替基底(源210a打开,源210b关闭)。

[0186] 尽管在分析平坦基底的情况下进行了说明,但是借助于图6描述的方法可适合于分析弯曲基底。为此,特别地,光学元件615、614、613必须被适配,例如使得由光学元件形成的发射源210b的图像基本上位于待分析的基底的曲率中心。

[0187] 通过与图2A、图2B、图5A和图5B的实施例示例相比较,利用诸如图6中所示的系统来实施的用于分析基底的表面质量的方法可以更快,这是因为不需要为测量本身安装参考镜,因为参考镜仅对校准过程有用。

[0188] 在实施例示例中(图中未示出),图6中描述的系统可以使用例如分束板、分束立方体或二向色板以与第二光源210b并联的方式引入附加光源。该附加光源可以发射第三光束,该第三光束的波长和/或偏振不同于针对源210b发射的第二光束。该第三光束生成第二透射光束,并沿着与生成第一透射光束的第二光束的光路相同的光路行进。第二透射光束由分析仪240接收,以生成表征所述第二透射光束的波前的第三测量信号。可以使用表征第一透射光束的波前的第二测量信号和表征第二透射光束的波前的第三测量信号的比较,以生成表征基底内的折射率变化的信号。

[0189] 图7示出了根据本说明书的用于分析具有平行面的基底100的表面质量的方法的另一示例的实施方式,其中使用用于分析基底的表面质量的系统的第三示例。在本示例中,可以同时执行分别用于获得第一方法和第二方法的方法的两个步骤。在本示例中,目的是分析具有基本上平坦的平行面的基底100的表面的质量。

[0190] 用于分析基底的表面质量的系统(如图7所示并标记为700)包括被配置为接收待分析的基底100的支撑件(图中未示出),但是除了可能的校准之外,不需要如图2A、图2B、图5A、图5B所示的示例中的参考镜,如随后将描述的。

[0191] 系统700包括光发射装置,在本示例中,并且如图2A、图2B、图5A和图5B的示例中那样,该光发射装置包括具有低时间相干性的光的单个发射源210,该单个发射源210具有基底100对其至少部分透明的至少一个波长。例如,如前所述,光发射源210可以包括白炽灯、LED、SLED或在激光效应生成阈值以下操作的激光二极管。

[0192] 系统700还包括波前分析装置,在图7的示例中,该波前分析装置包括第一波前分析仪240a和与第一波前分析仪240a分离的第二波前分析仪240b,这些分析仪例如但不限于夏克-哈特曼分析仪,并且波前分析装置还包括处理单元260,该处理单元260被配置为由处理波前分析仪240a和240b发射的测量信号。有利的是,波前分析仪是相同类型的,但是可以使用不同类型的波前分析仪。

[0193] 在本示例中,光源210发射第一光束221。发射装置被配置为使得在操作中,第一光

束221以基本上垂直于基底的方式入射到基底的一个面(在本示例中为面A)上。在图7的示例中,目的是分析具有基本上平坦的平行面的基底,并且发射装置被配置为使得在操作中,光束以基本上平坦的波前入射到基底上。例如,如在前面的示例中那样,除了源210之外,发射装置还包括一组光学透镜211、212、215和偏转元件213、214。

[0194] 如图7所示,在本示例中实施的方法的第一步中,激活源210,并且第一入射光束221一方面由基底100的第一面A反射以形成第一反射光束222a,另一方面透射穿过基底、然后由基底100的第二面B反射、并且再次透射穿过基底100以形成第二反射光束222b。

[0195] 波前分析装置被配置为接收第一反射光束222a和第二反射光束222b,以便生成表征所述第一反射光束和第二反射光束的波前的组合的第一测量信号,如先前已经描述的。

[0196] 在图7的示例中,如在前面的示例中那样,波前分析装置包括与发射装置的那些共用的一组光学透镜211、212、215和偏转元件213、214,以将反射光束导向波前分析仪240a,并在待分析的基底100和波前分析仪240a的测量表面之间基本上建立光学共轭。如前所述,系统700还包括被配置为分离发射装置和波前分析仪240a的光学分束元件230。

[0197] 在本示例中实施的方法的第二步骤(其可以与第一步骤同时进行)中,由可与第一光束221重合的第二光束透射穿过基底而产生的透射光束223被发送到波前分析装置的第二波前分析仪240b,以便生成表征所述透射光束的波前的第二测量信号。

[0198] 在图7的示例中,波前分析装置包括一组光学透镜715、712和偏转元件714、713,以将透射光束223导向波前分析仪240b,并在待分析的基底100和波前分析仪240b的测量表面之间基本上建立光学共轭。

[0199] 然后,可以借助于处理单元260并基于所述第一测量信号以及所述第二测量信号来计算表示基底的第一面A相对于第一参考表面的变形的至少一个第一信号和表示基底的第二面B相对于第二参考表面的变形的至少一个第二信号,如上面借助图3A、图3B、图4A、图4B和图4C所描述的。

[0200] 如在图6的示例中那样,由于第二光束简单地透射穿过基底,所以方程[式8]是适用的。

[0201] 如前所述,系统700的光学元件可能具有制造缺陷,这可以在校准步骤中予以考虑,以便避免干扰所进行的测量的质量。可以提供两个校准步骤。这些是用于透射光束的校准步骤和用于反射光束的校准步骤。执行校准透射光束的步骤的一种实用方法是通过在图7的配置中进行波前测量来利用分析仪240b测量光学器件的缺陷,其中源210打开,待分析的基底100已经从中移除。然后,从存在待分析的基底100的情况下进行的透射测量中减去以这种方式测量的这些缺陷。校准反射光束的步骤与针对图2A和图2B描述的校准相同,其中用参考镜代替基底。

[0202] 尽管在分析平坦基底的情况下进行了说明,但是借助于图7描述的方法可适合于分析弯曲基底。为此,必须适配光学元件211至215,例如使光束221的尺寸适应于待分析的基底的尺寸,以确保光束221以基本垂直的方式到达待分析的基底的表面,并且确保在待分析的基底100和波前分析仪240a的测量表面之间基本上建立光学共轭。光学元件715、714和713还必须被适配,例如以便使待分析的基底100处的透射光束的尺寸适合于分析仪240b的测量表面的尺寸,并且在待分析的基底100和波前分析仪240b的测量表面之间基本上建立光学共轭。

[0203] 通过与图2A、图2B、图5A和图5B的实施例示例相比较,利用诸如图7中所示的系统来实施的用于分析基底的表面质量的方法可以更快,这是因为不需要为测量本身安装参考镜,因为参考镜仅对校准过程有用。此外,由于存在两个波前分析仪,所以可以同时进行 $M_1$ 和 $M_2$ 的测量,因为可以从光束221同时生成第一反射光束和第二反射光束221a、221b以及透射光束223。

[0204] 图8示出了系统800,如在图6的示例中那样,系统800包括具有第一发射源210a以及与第一发射源分离的第二发射源210b的发射装置。如在图7的示例中那样,系统800还包括波前分析装置,该波前分析装置包括第一波前分析仪240a以及与第一波前分析仪240a分离的第二波前分析仪240b。系统800还包括处理单元260,该处理单元260被配置为处理由波前分析仪240a和240b产生的测量信号。

[0205] 这样的系统具有与图7的系统类似的优点,即,由第一源210a发射的单个光束221a可以同时产生由第一波前分析仪240a检测的反射光束222a和222b,以生成表征所述第一反射光束和第二反射光束的波前的组合的第一测量信号,并且产生由第二波前分析仪240b检测的第一透射光束223a,以产生表征所述透射光束的波前的第二测量信号。

[0206] 为此,如在前面的示例中那样,波前分析装置可以包括与发射装置的那些共用的一组光学透镜211、212、215和偏转元件213、214,以将反射光束导向波前分析仪240a,并在待分析的基底100和波前分析仪240a的测量表面之间基本上建立光学共轭。如前所述,系统800还可以包括被配置为分离发射装置和波前分析仪240a的光学分束元件230。此外,在图8的示例中,波前分析装置包括一组光学透镜815、812和偏转元件814、813,以将透射光束223a导向第二波前分析仪240b,并在待分析的基底100和波前分析仪240b的测量表面之间基本上建立光学共轭。

[0207] 此外,在本示例中,第二光源210b被配置为发射具有与第一光束221a的波长和/或偏振不同的波长和/或偏振的第二光束221b。

[0208] 然后,在一个实施例示例中,该方法可以包括由第一波前分析仪240a接收第二透射光束223b,以便生成表征所述第二透射光束的波前的第三测量信号,该第二透射光束223b由所述第二光束221b第一透射穿过基底而产生。可以使用表征第一透射光束的波前的第二测量信号和表征第二透射光束的波前的第三测量信号的比较,以生成表征基底内的折射率变化的信号。

[0209] 如图8所示,发射装置可以包括光学元件811以及与分析装置共用的光学元件812至815,以及用于(例如但不是必须地)以法向入射向基底100发送第二光束221b的分离元件830。

[0210] 可以执行校准过程,例如关于前面的附图所描述的那些。

[0211] 图9示出了表示具有平行面的平坦基底的面的变形的实验图像,这些图像通过根据本说明书的方法获得。

[0212] 更准确地说,在本实施例中,基底是由双面抛光产生的、3mm厚的、具有平坦的平行面的基底,并且两个面中的一个面(面A)具有抛光缺陷。

[0213] 用于分析的系统是图2A和图2B中所示类型的系统。发射源是在激光效应生成阈值以下使用的注入到单模光纤中的激光二极管,并且波前分析仪是夏克-哈特曼分析仪。

[0214] 如参照图2A和图2B所解释的,基于表征第一反射光束和第二反射光束的波前的组

合的第一测量信号 $M_1$ 和表征透射光束的波前的第二测量信号 $M_2$ ,借助于公式[式6]和[式7]求出变形矩阵。

[0215] 分析基底,确定面A和面B相对于平坦参考表面的变形矩阵 $\alpha$ 和 $\beta$ ,并分别在图9的左侧和右侧图像中示出。

[0216] 特别地,在面A观察到抛光缺陷,其中P-V(峰谷)幅度为 $0.315\mu\text{m}$ 。该测试表明,该方法显然能够分别测量2个面,因为面B的测量没有显示出抛光缺陷,而这对于仅在其一个面上具有抛光缺陷的该基底是可以预期的。

[0217] 在借助于图2A、图2B、图6、图7和图8描述的实施例示例中,考虑以基本上垂直的方式入射到待分析的基底上的第一光束。

[0218] 尽管这是有利的配置,但是本领域技术人员将能够设想其他实施例,特别是那些适于使用倾斜基底的实施例。

[0219] 因此,图10A示出了说明根据本说明书的用于分析基底的表面质量的方法的示例的第一步骤的图,其中使用根据本说明书的用于分析基底的表面质量的系统的示例,该系统适合于第一光束以相对于法线的非零倾斜角入射到基底上,并且图10B是示出说明用于分析基底的表面质量的方法的示例的第二步骤的图。在本示例中,使用了参考镜250,如在图2A和图2B的示例中那样。

[0220] 在本示例中,发射装置包括两个光发射源,即用于发射具有低时间相干性的第一光束221a(图10A)的210a和用于发射第二光束221b(图10B)的210b。

[0221] 如图10A和图10B所示,发射装置还包含一组光学透镜1013、1018、1017、1014和偏转元件1011、1012、1016、1015,用于将由第一光源210a发射的第一光束与由第二光源210b发射的第二光束导向基底100。

[0222] 在本示例中,分析装置包括与发射装置的那些共用的一组光学透镜1014、1017、1018和偏转元件1015、1016,以将反射光束222a、222b导向第一波前分析仪240a,并在待分析的基底100和波前分析仪240a的测量表面之间基本上建立光学共轭。分离器元件230使得分析路径能够与发射路径分离。

[0223] 如图10C所示,参照图10A和图10B描述的系统可用于在一定限度内分析倾斜的基底。值得注意的是,如果第一光束221a相对于基底法线的倾斜角 $\theta$ 太大,则这可能导致(特别是在厚基底的情况下)在面B的缺陷在反射光束222b上的印记与其在透射光束上的印记之间的空间偏移(用 $d$ 表示),并且这可能会使面A和面B的变形的计算与反射和透射中的测量产生偏差。本领域的技术人员在了解本领域的知识的情况下,将能够适配光学组件,以便根据基底的厚度限制第一光束的倾斜,使得偏移 $d$ 相对于面B的预期缺陷的空间周期和波前分析仪的空间分辨率较小。

[0224] 尽管已经以一定数量的示例性实施例的形式进行了描述,但是根据本说明书的系统和方法结合了对于本领域技术人员来说显而易见的不同的变型、修改和改进,这些不同的变型、修改和改进被认为落入由所附权利要求限定的本发明的范围内。

[0225] 参考文献

[0226] 参考文献1:Craig R.Forest et al.,Metrology of thin transparent optics Shack-Hartmann wavefront sensing,Optical Engineering,43(3),2004,<https://doi.org/10.1117/1.1645256>

[0227] 参考文献2:WO 2004/068088

[0228] 参考文献3:Principles and History of Shack-Hartmann,Journal of Refractive Surgery Volume 17,September/October 2001

[0229] 参考文献4:US6577403

[0230] 参考文献5:US20100310130

[0231] 参考文献6:US20050036153

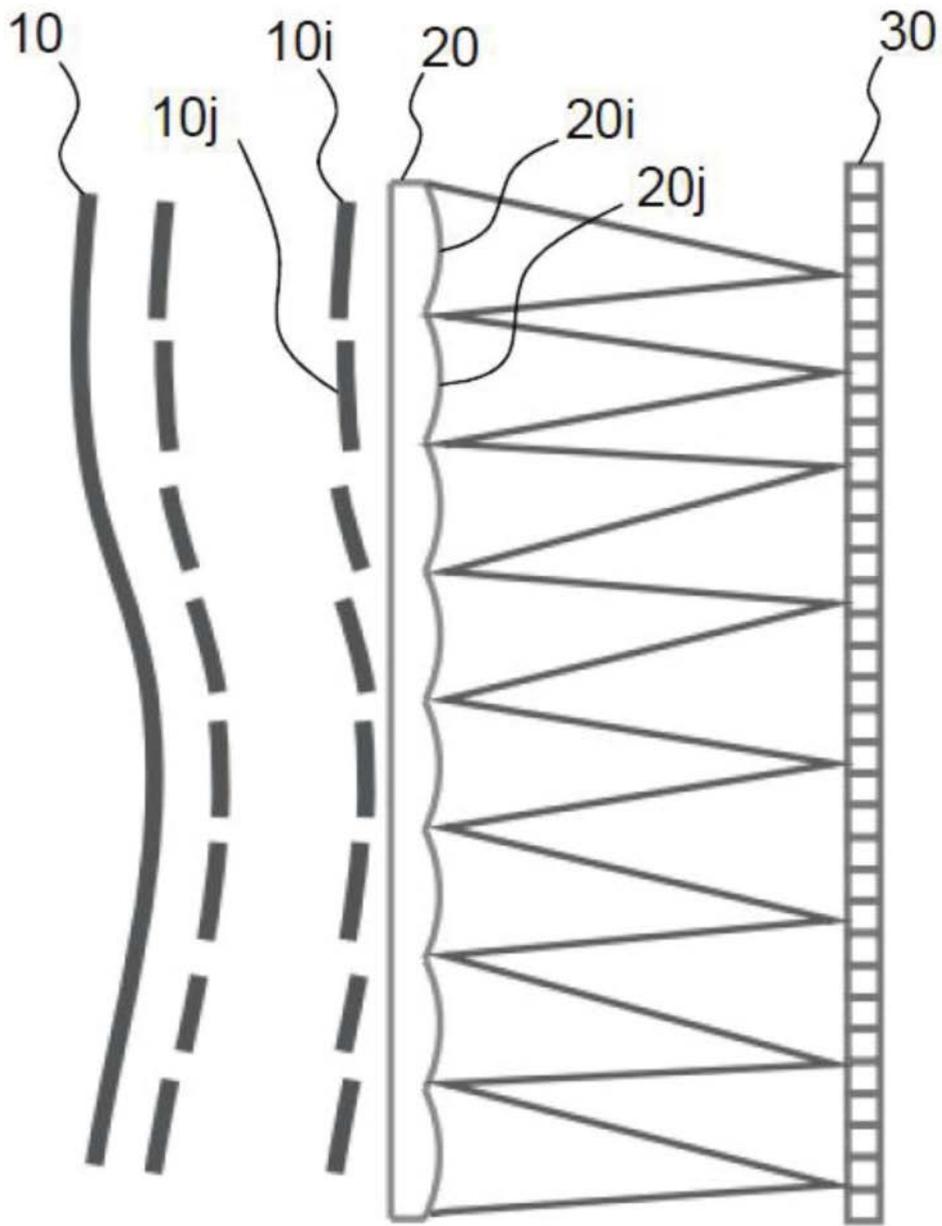


图1 (现有技术)

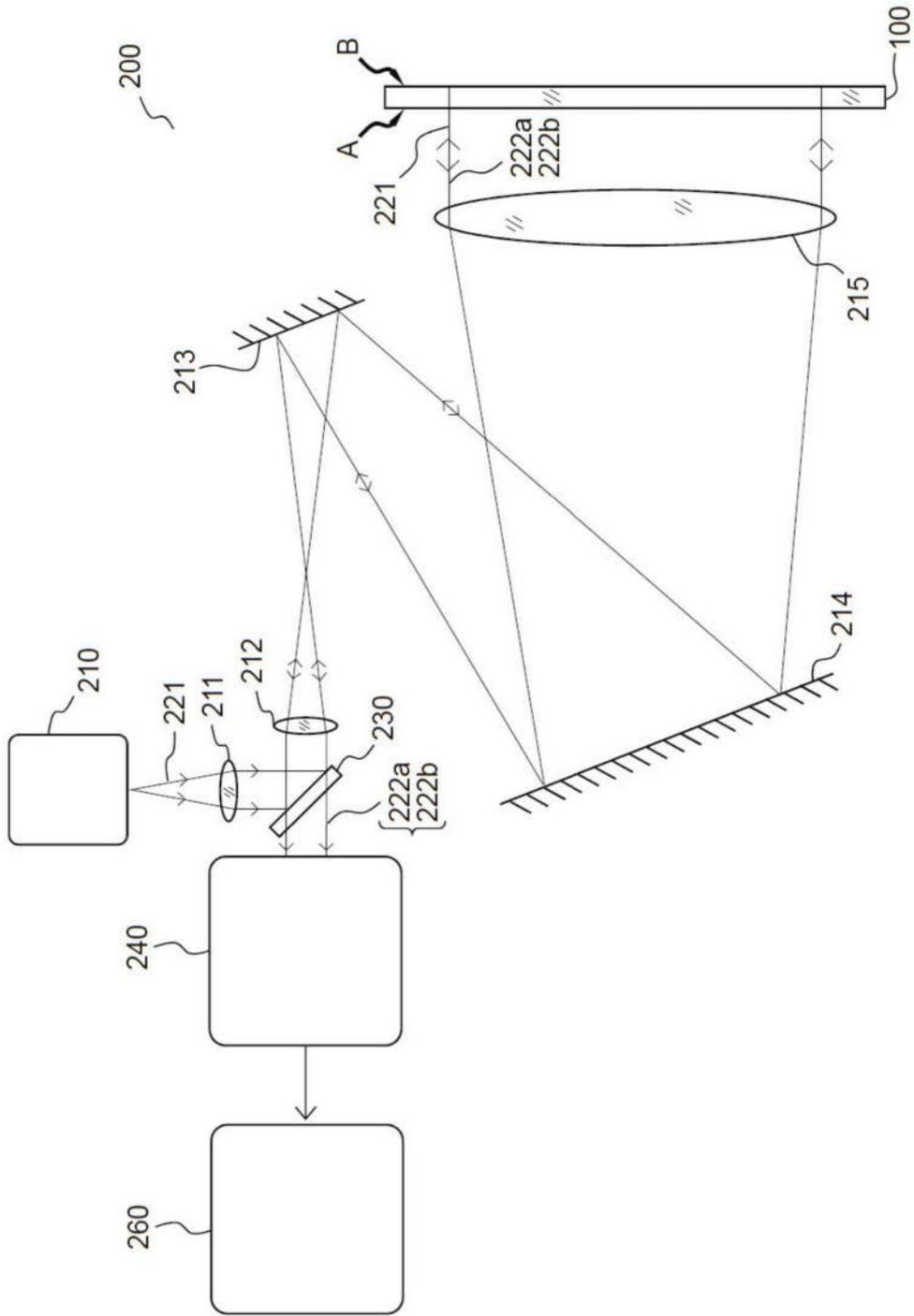


图2A

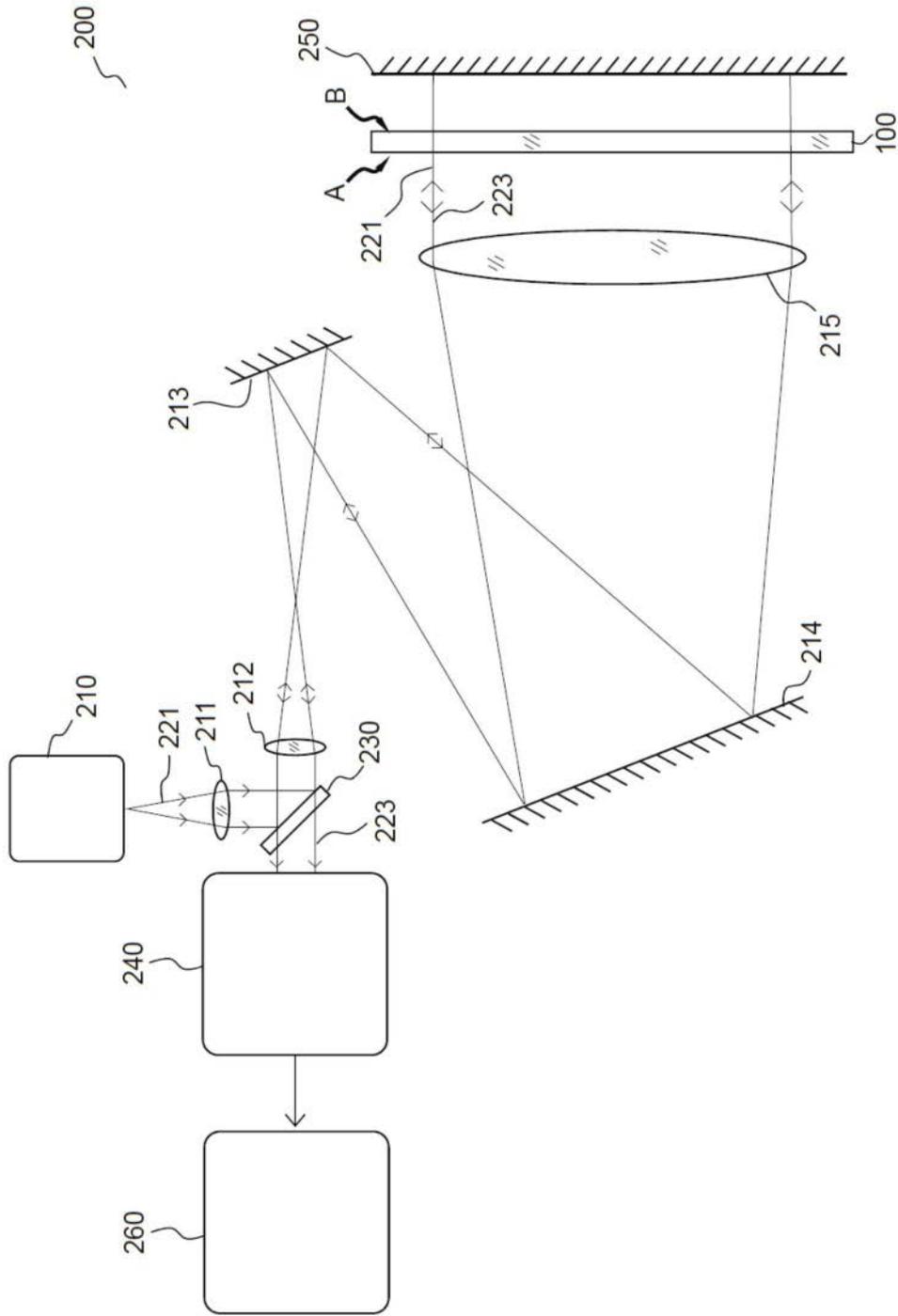


图2B

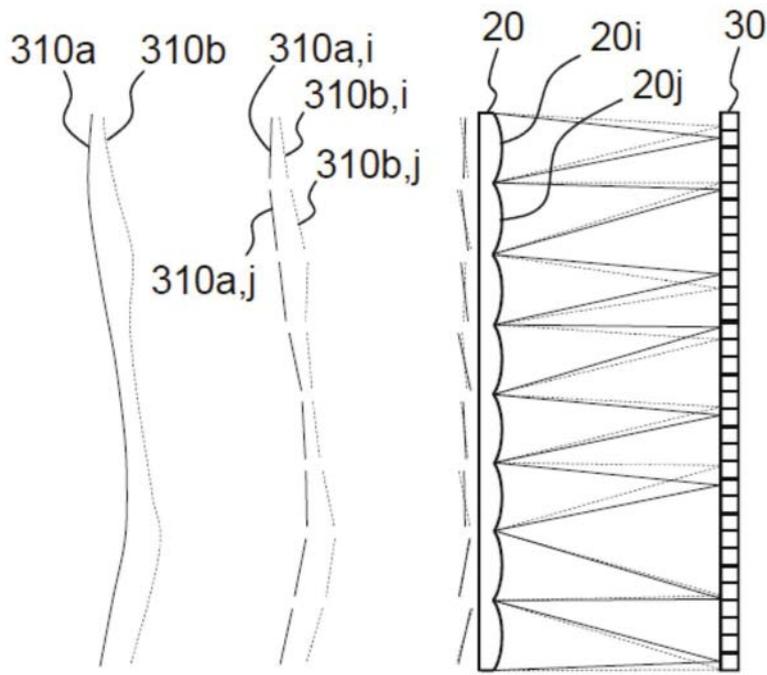


图3A

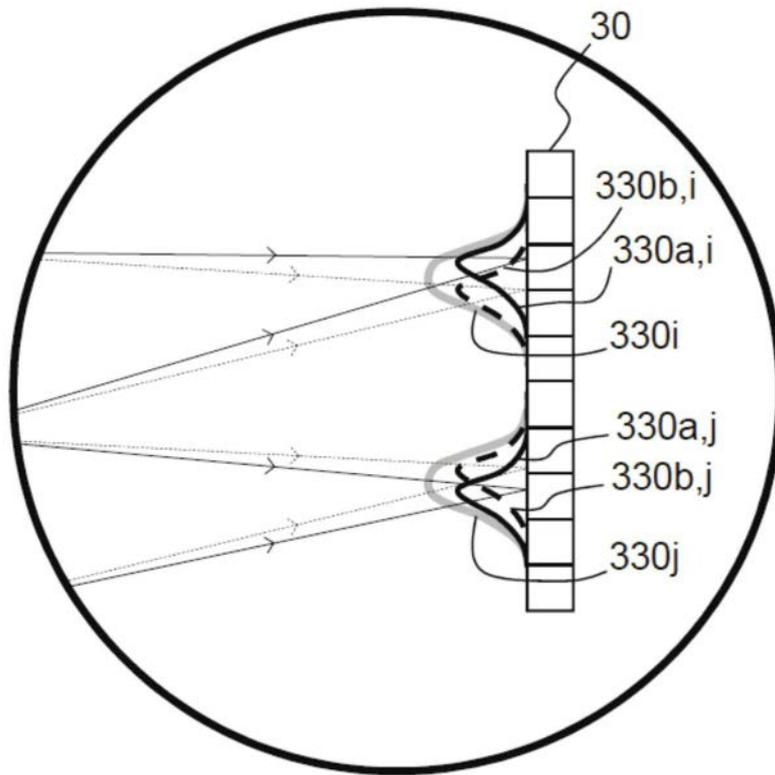


图3B

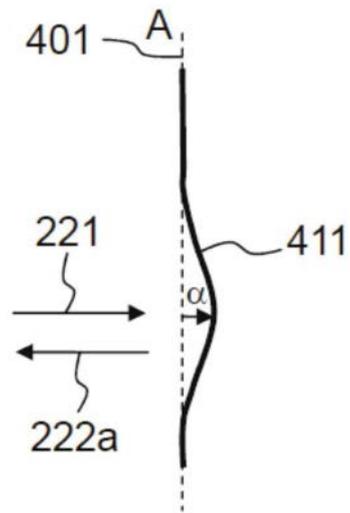


图4A

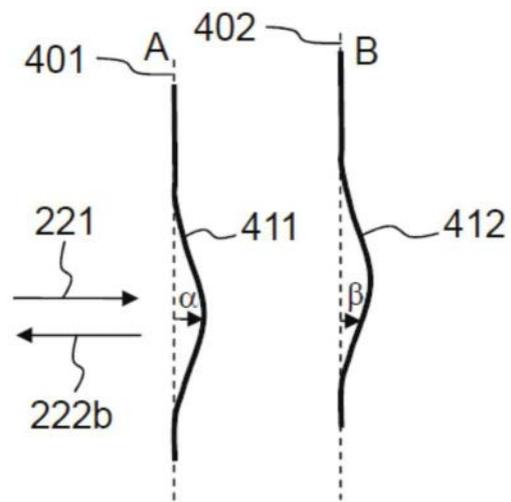


图4B

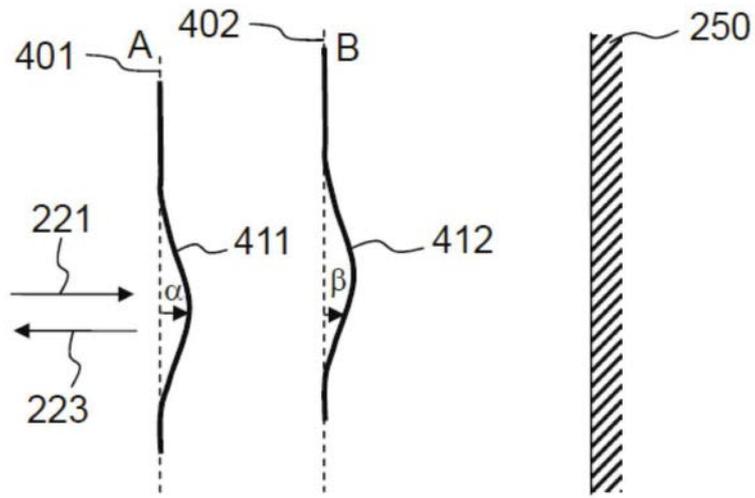


图4C

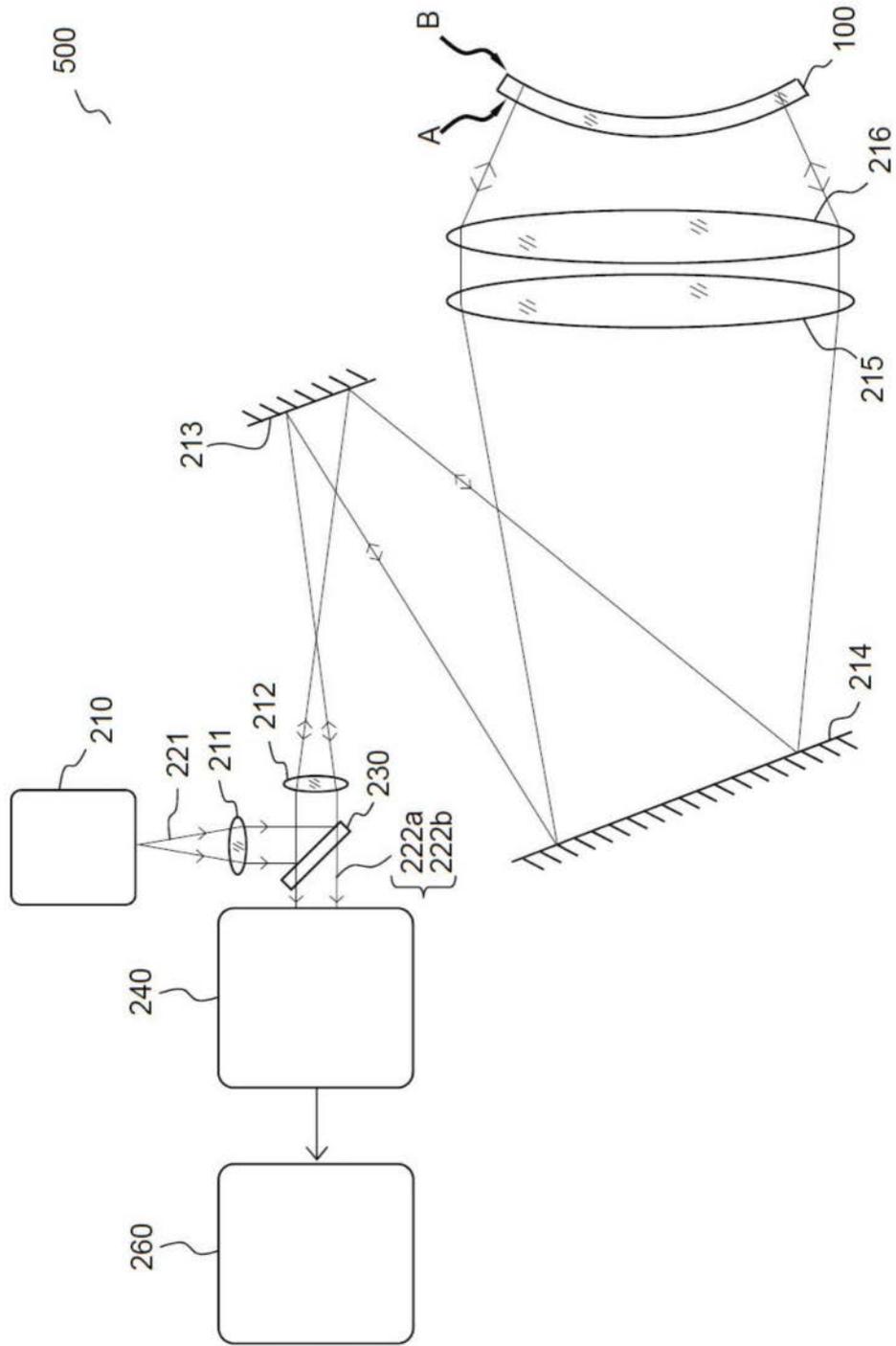


图5A

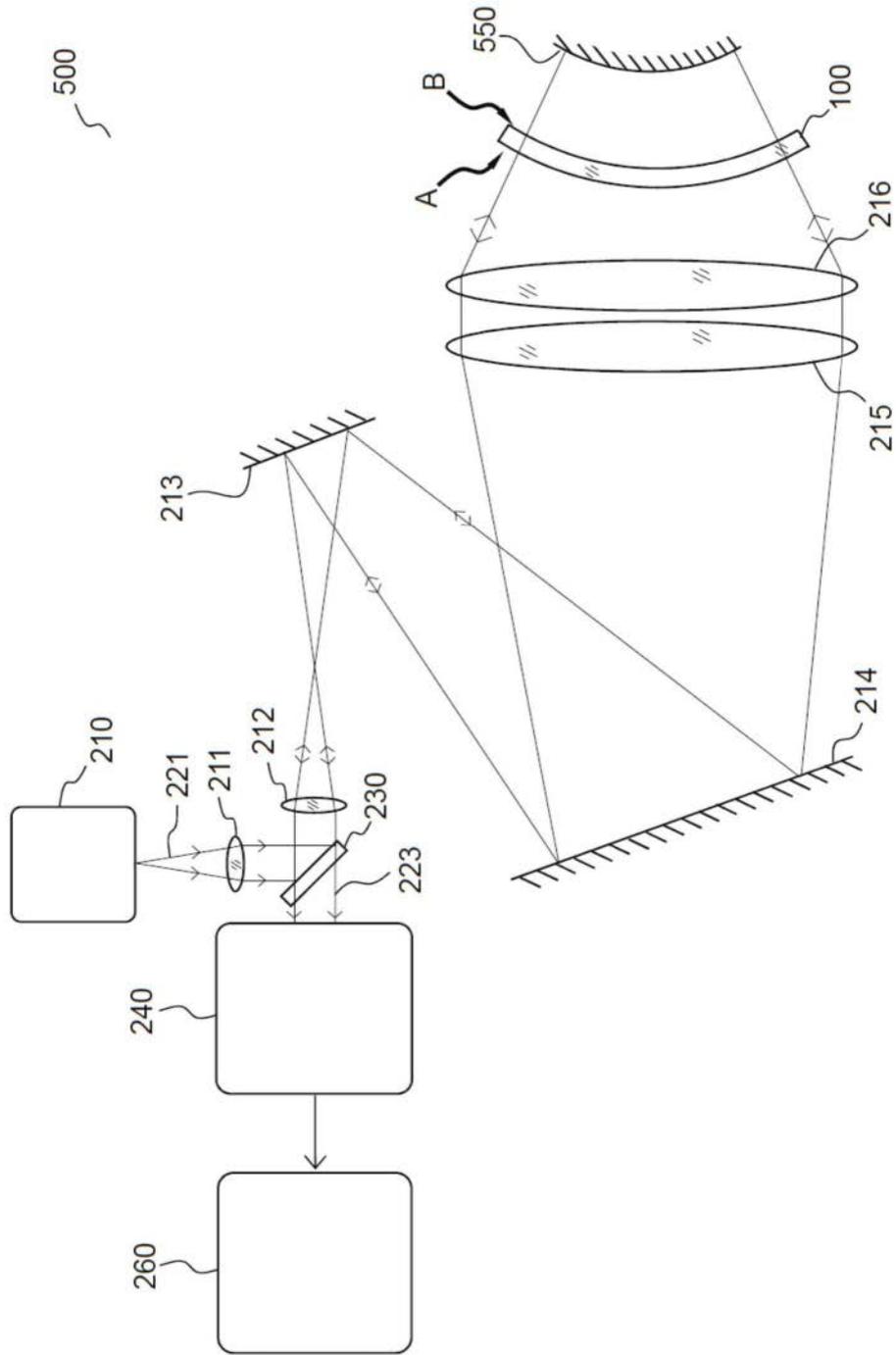


图5B

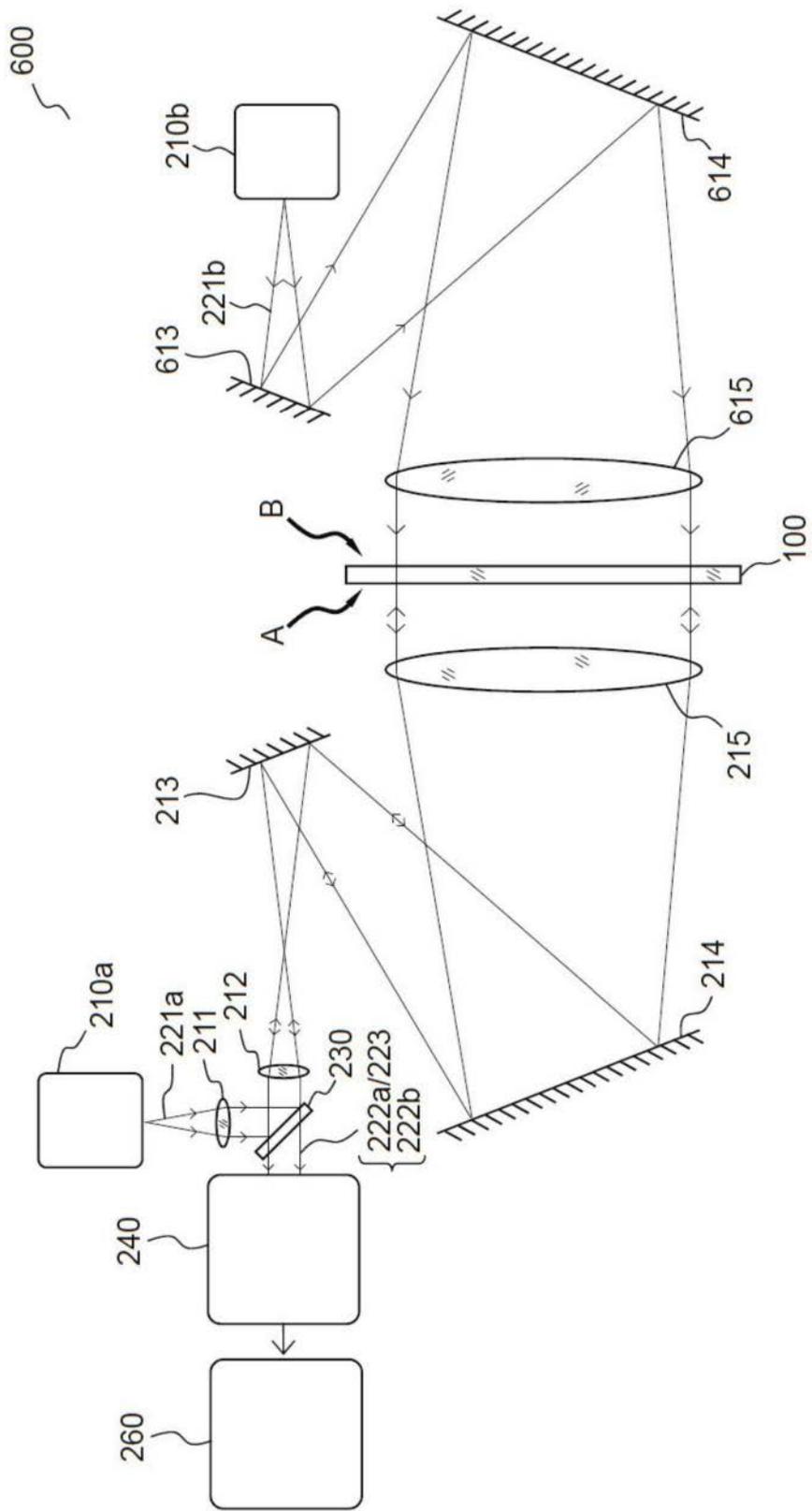


图6

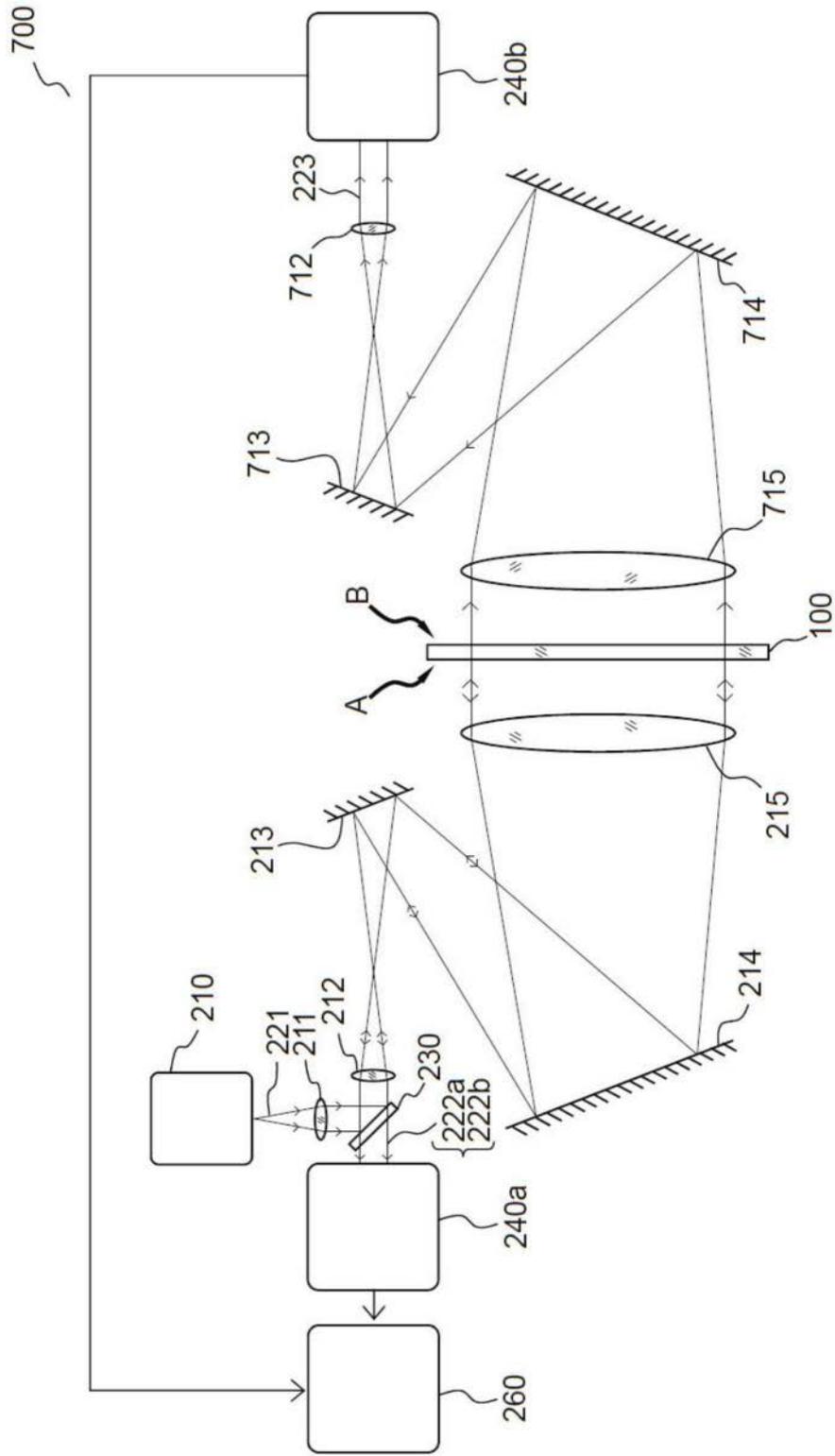


图7

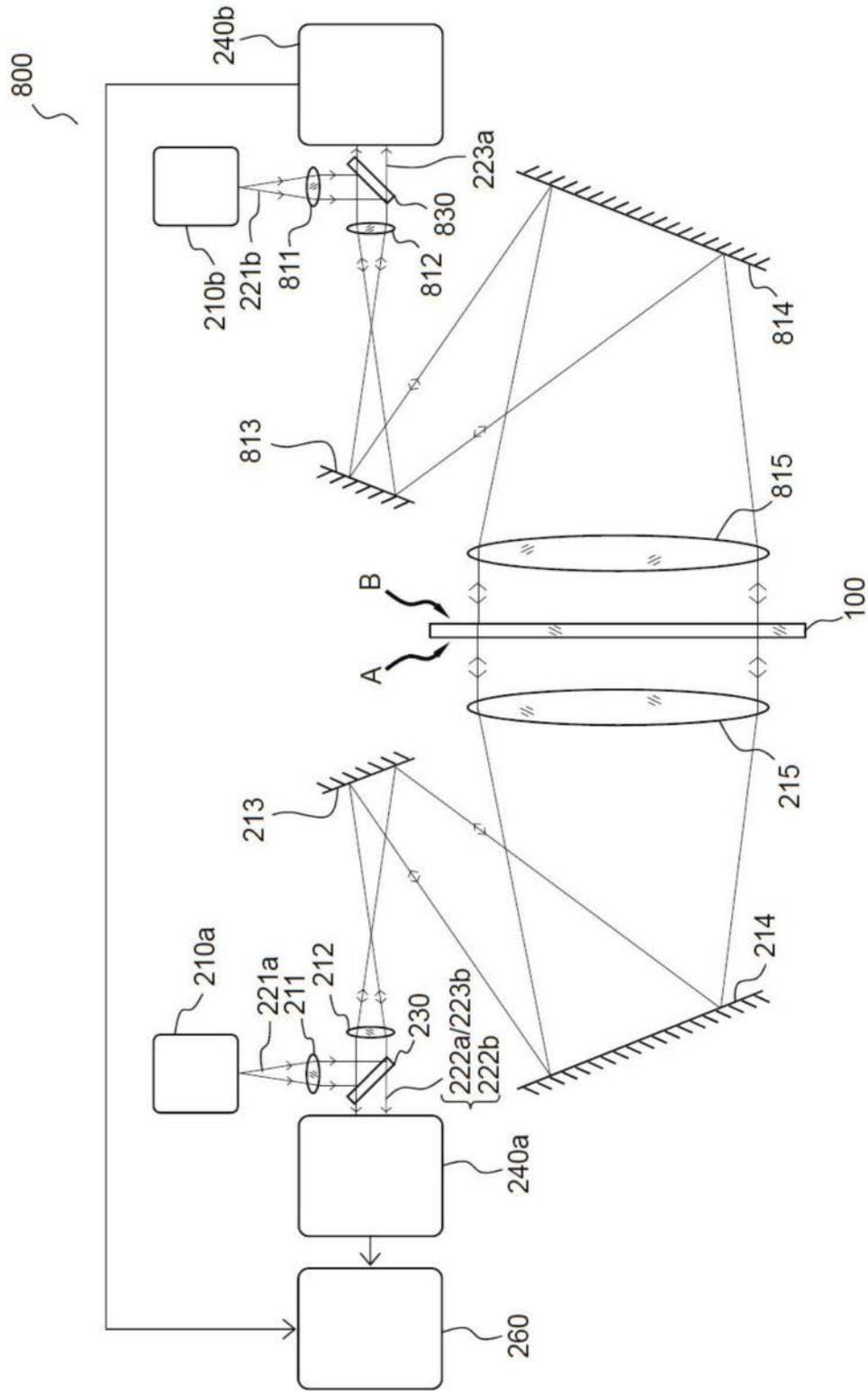
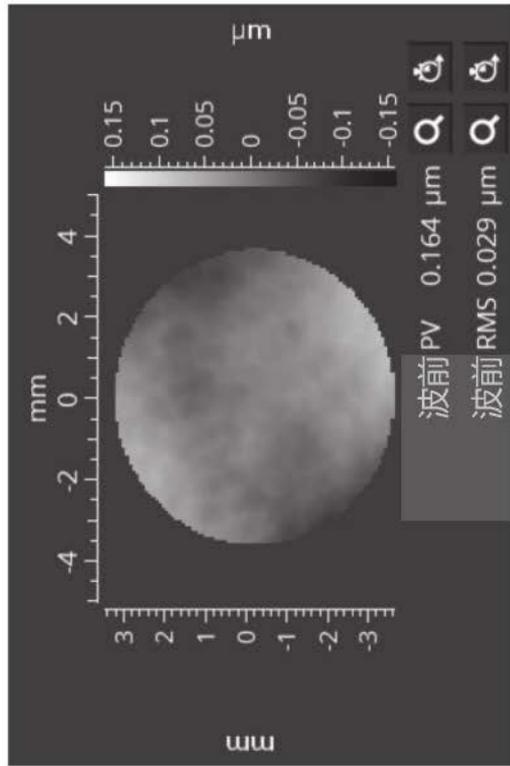
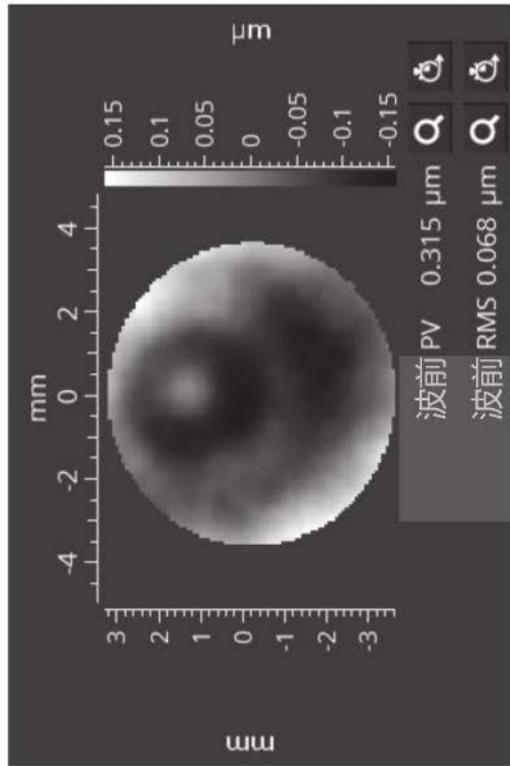


图8



面B



面A

图9

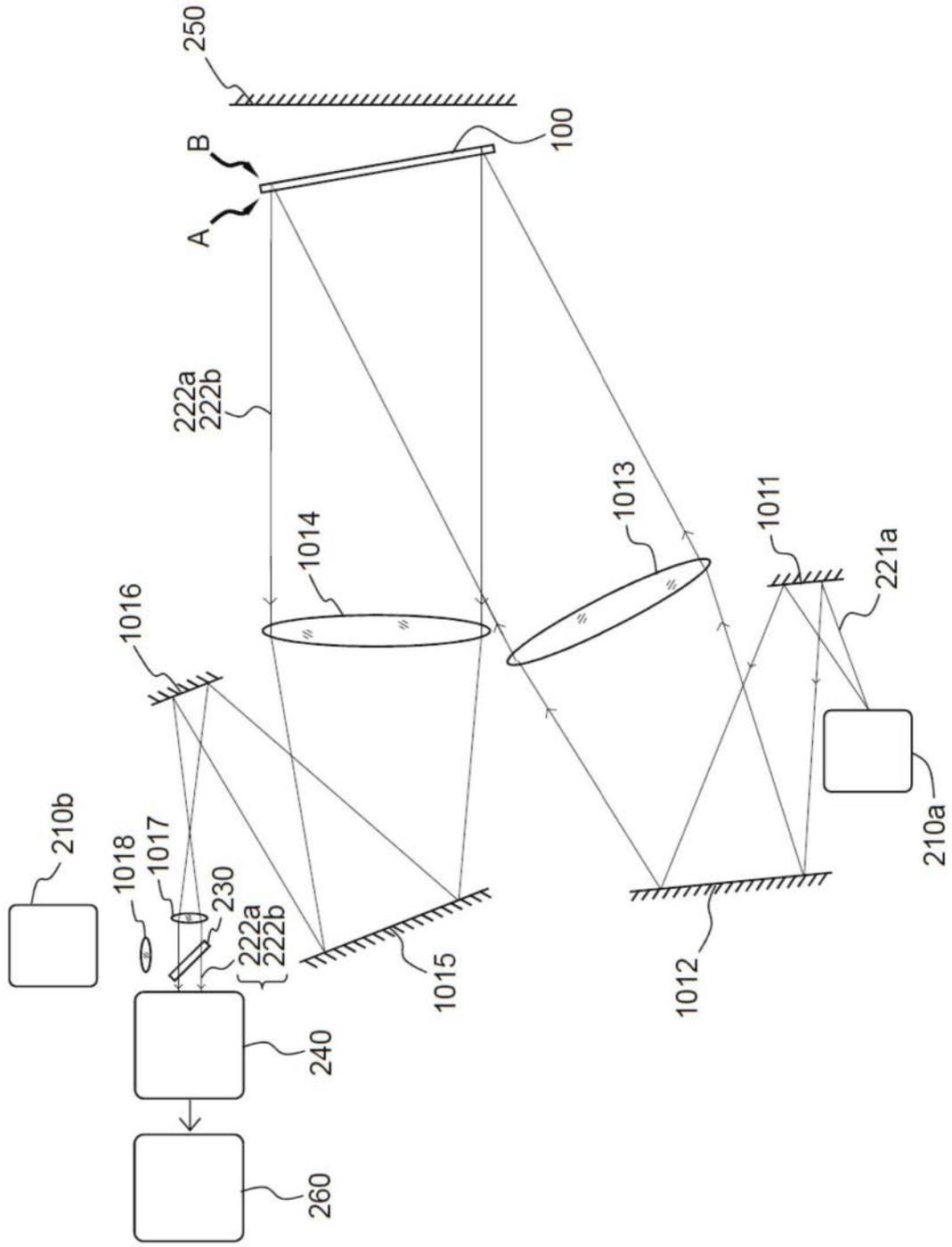


图10A

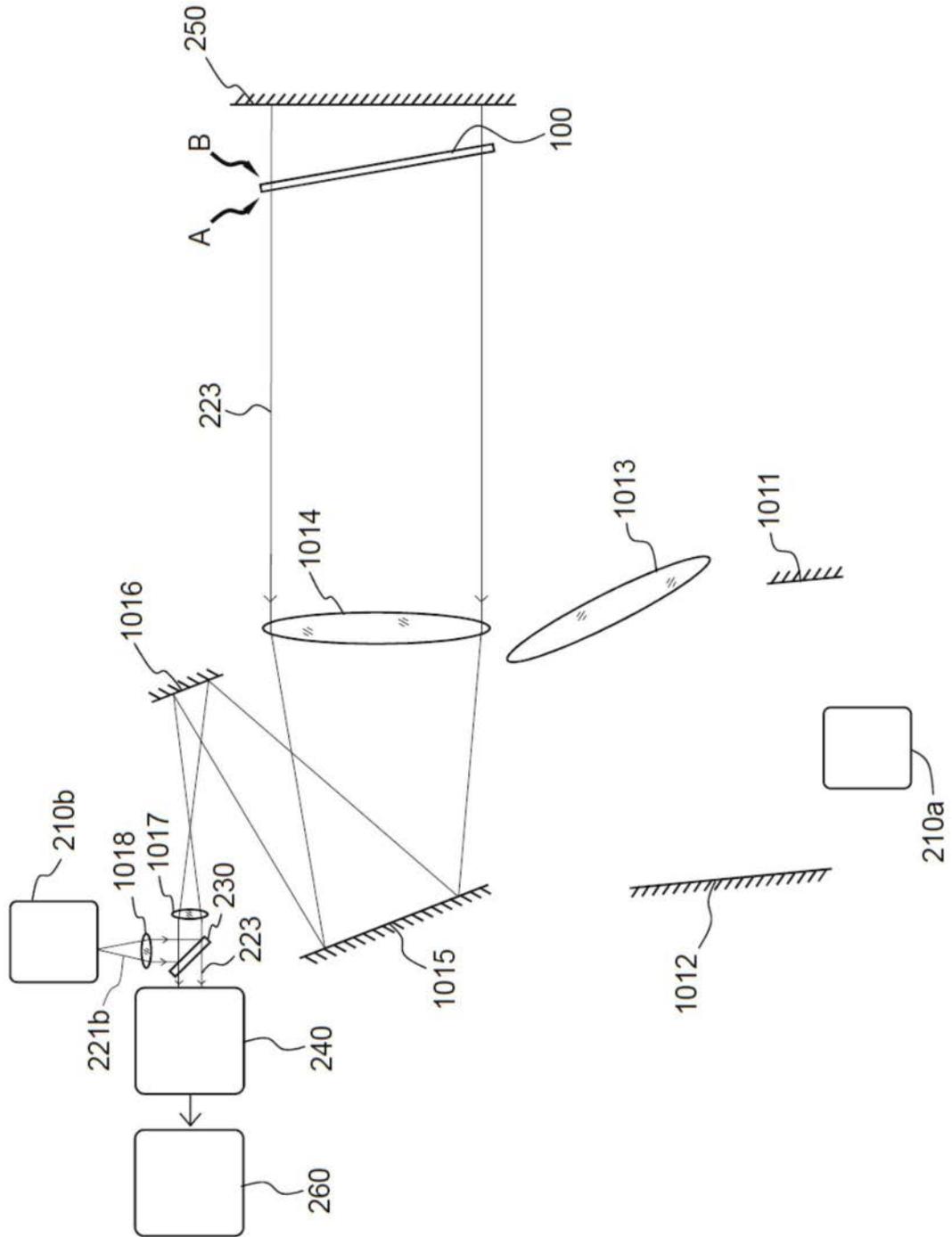


图10B

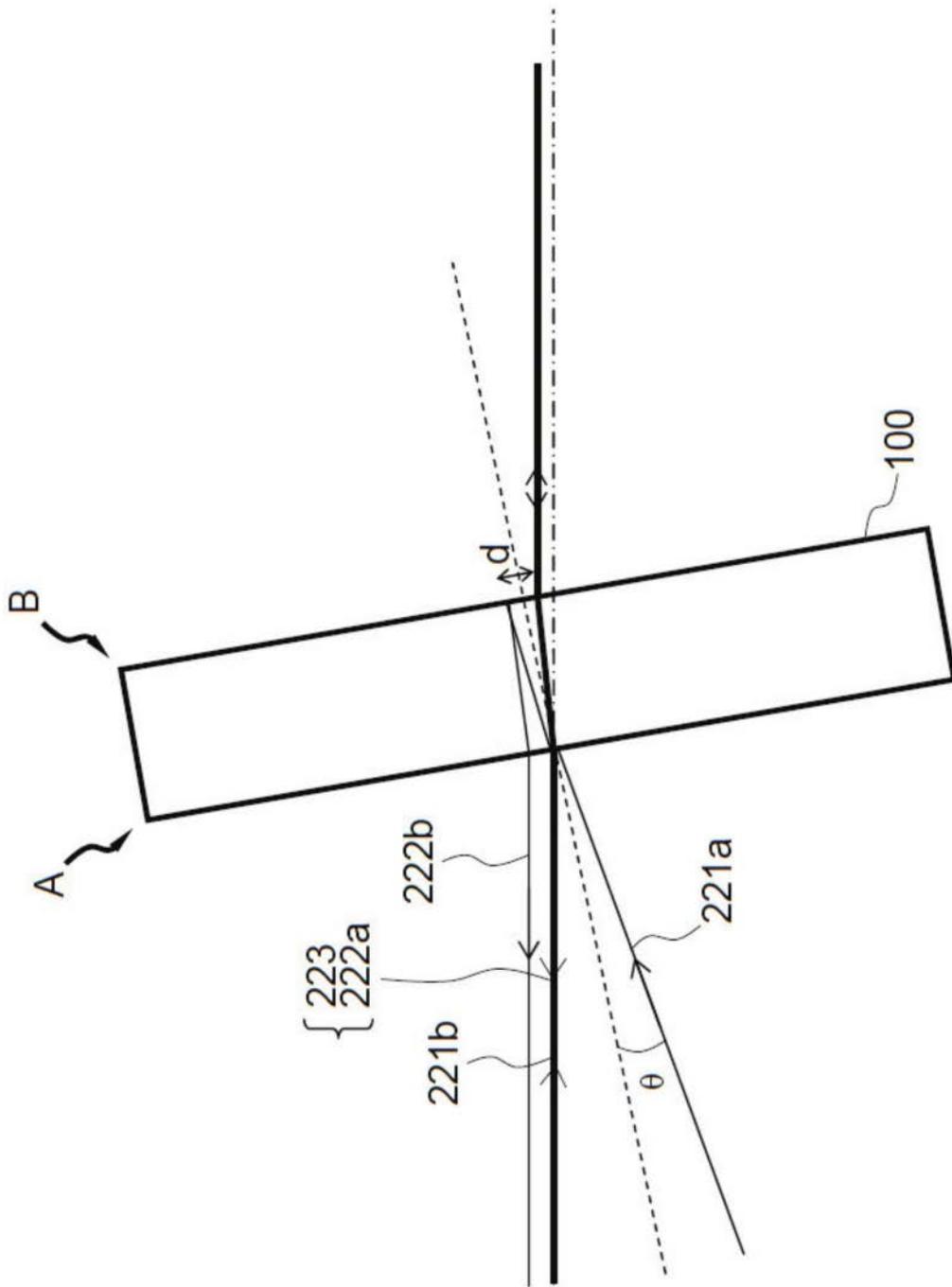


图10C