



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101558281 B

(45) 授权公告日 2012. 02. 01

(21) 申请号 200780046400. 4

(22) 申请日 2007. 12. 07

(30) 优先权数据

335971/2006 2006. 12. 13 JP

014246/2007 2007. 01. 24 JP

(85) PCT申请进入国家阶段日

2009. 06. 15

(86) PCT申请的申请数据

PCT/JP2007/001372 2007. 12. 07

(87) PCT申请的公布数据

W02008/072369 JA 2008. 06. 19

(73) 专利权人 株式会社尼康

地址 日本东京

(72) 发明人 青木洋 小松宏一郎

(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 车文 张建涛

(51) Int. Cl.

G01B 11/24 (2006. 01)

(56) 对比文件

JP 2006038820 A, 2006. 02. 09,

JP 6-337215 A, 1994. 12. 06,

JP 3-115912 A, 1991. 05. 16,

JP 2000258141 A, 2000. 09. 22,

JP 55-154405 A, 1980. 12. 02,

JP 8-233545 A, 1996. 09. 13,

审查员 杨叁

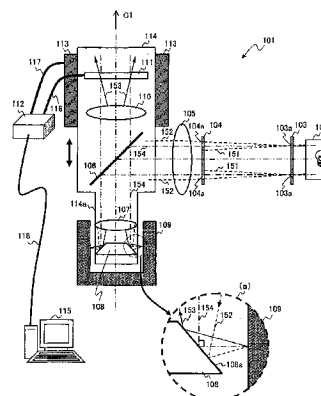
权利要求书 3 页 说明书 12 页 附图 16 页

(54) 发明名称

测量装置和测量方法

(57) 摘要

根据本发明的测量装置包括:沿着是中空形状的深度方向的第一方向发送光的光发送部;将光方向转换成大致正交于所述第一方向的圆周方向的转换部;检测在测量物体内侧被反射的光的检测部,所述光的方向被转换部转换;和形状测量部,通过根据检测部的检测结果获得从基准位置的移位而测量所述测量物体的内侧形状。由此,能够一次地获得物体的中空形状,而无需旋转该物体或者光源,并且使用简单的装置执行高度精确的测量。



1. 一种测量中空测量物体的内侧形状的测量装置,包括:
光发送部,沿着是该中空形状的深度方向的第一方向发送光;
转换部,将光方向转换成大致正交于所述第一方向的方向;
检测部,检测在所述测量物体内侧被反射的光,所述光的方向被所述转换部转换;
测量光学系统,所述测量光学系统形成所述测量物体的内侧图像;和
形状测量部,通过根据所述检测部的检测结果获得所述测量物体的内侧表面从预定基准位置的移位而测量所述测量物体的内侧形状,
其中所述预定基准位置与所述检测部成共轭关系。
2. 根据权利要求1所述的测量装置,进一步包括:
移动部,相对地沿着所述第一方向移动测量光学系统和所述测量物体,所述测量光学系统包括所述光发送部、所述转换部和所述检测部,其中
所述形状测量部根据当所述测量物体和所述转换部的相对位置被改变时所述检测部的检测结果而测量所述测量物体的内侧形状。
3. 根据权利要求1所述的测量装置,其中,
所述转换部沿着大致正交于所述第一方向的方向将由所述光发送部发送的光的方向朝向圆周而转换。
4. 根据权利要求1所述的测量装置,进一步包括:
所述光发送部,包括:光源,产生光;第一光学系统,引导来自所述光源的光并且在所述基准位置处具有焦点;第一光学限制材料,具有预定形状的孔隙,并且相对于所述第一光学系统的所述焦点在所述光源侧被布置在与所述焦点共轭的位置;和第二光学系统,使得从所述测量物体返回的光形成图像;以及
光接收部,包括被置于成像表面的所述检测部,所述光接收部接收来自所述光源的光,并且与所述基准位置具有共轭关系,在所述成像表面,由所述第二光学系统形成所述测量物体在所述基准位置的图像。
5. 根据权利要求1所述的测量装置,进一步包括:
第二光学限制材料,具有预定形状的孔隙,并且遮蔽从所述第一光学限制材料向所述测量物体照射的光通量的一部分。
6. 根据权利要求1所述的测量装置,其中,
所述第一光学限制材料通过圆形缝隙而构造。
7. 根据权利要求1所述的测量装置,进一步包括:
所述光发送部,包括:光源,产生光;第一光学系统,引导来自所述光源的光并且在所述基准位置处具有焦点;和光学材料,将来自所述光源的光转换成环形光并且将光汇聚到预定位置上;环形光通量产生光学系统,使得在环形光通量中在环宽度的中间位置处的光射线不会变得平行于利用所述光学材料构造的光学系统的光轴;和
第二光学系统,使得从所述测量物体返回的光形成图像;以及
光接收部,包括被置于成像表面的所述检测部,所述光接收部接收来自所述光源的光,并且与所述基准位置具有共轭关系,在所述成像表面,由所述第二光学系统形成所述测量物体在所述基准位置的图像。
8. 根据权利要求1所述的测量装置,进一步包括:

所述光发送部,包括:光源,产生光;第一光学系统,引导来自所述光源的光并且在所述基准位置处具有焦点;和光学材料,将来自所述光源的光转换成环形光并且将光汇聚到预定位置上;环形光通量产生光学系统,使得在环形光通量中在环宽度的中间位置处的光射线不会变得平行于利用所述光学材料构造的光学系统的光轴;和

第二光学系统,使得从所述测量物体返回的光形成图像;以及

光接收部,包括被置于成像表面的所述检测部,所述光接收部经由环形缝隙接收来自所述光源的光,并且与所述基准位置具有共轭关系,在所述成像表面,由所述第二光学系统形成所述测量物体在所述基准位置的图像,和

移动设备,能够改变在所述转换部和另一光学系统之间的间隔,并且还在固定所述转换部的状态中测量所述间隔。

9. 根据权利要求 7 所述的测量装置,其中,

所述环形光通量产生光学系统包括将来自所述光源的光形成成为平行光的聚光透镜和将所述平行光转换成环形光通量的展像透镜。

10. 根据权利要求 1 所述的测量装置,其中,

所述光发送部被置于用于沿着与所述第一方向不同的方向发送光的位置,并且半反射镜被设于所述测量物体和所述光发送部之间,以沿着所述第一方向反射从所述光发送部发送的光,并且还将从所述测量物体返回的光透射到所述光接收部侧。

11. 根据权利要求 1 所述的测量装置,其中,

通过锥形反射镜构造所述转换部。

12. 根据权利要求 1 所述的测量装置,其中,

所述转换部通过全反射执行反射。

13. 根据权利要求 1 所述的测量装置,其中,

所述转换部具有在透光材料中形成的反射部。

14. 一种测量中空测量物体的内侧形状的测量方法,包括以下步骤:

利用转换部将由光发送部沿着第一方向发送的光的方向转换成大致正交于所述第一方向的圆周方向,并且利用所述光照射所述测量物体的内侧;和

通过根据检测部对在所述测量物体内侧反射的光的检测结果获得从预定基准位置的移位而测量所述测量物体的内侧形状。

15. 根据权利要求 14 所述的测量方法,包括以下步骤:

通过在沿着所述第一方向相对地移动所述测量物体和所述转换部的同时执行检测而测量所述测量物体的内侧形状。

16. 一种测量中空测量物体的内侧形状的测量方法,包括以下步骤:

利用在所述测量物体中插入的转换部将由光发送部沿着第一方向发送的环形光通量的方向转换成大致正交于所述第一方向的圆周方向,并且利用所述光通量照射所述测量物体的内侧;

利用光接收光学系统将经由所述转换部从所述测量物体的侧面反射的光的图像形成到在与基准位置共轭的位置处放置的环形缝隙上,并且在固定所述转换部的状态中,在改变所述转换部和另一光学系统之间的间隔的同时利用光接收部接收穿过所述环形缝隙的光;以及

根据在所述光接收部的输出数值和所述间隔的数值之间的关系测量所述测量物体的内侧形状。

测量装置和测量方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种测量物体中空形状的测量装置和测量方法。

背景技术

[0002] 传统上,作为用于以无接触方式测量物体的中空形状的方法,遥感方法或者掠入射光学系统方法是公知的。例如,在旋转物体的同时,遥感方法向中空形状的内侧投射激光,测量反射光的移位,并且测量物体的中空形状(例如,参考专利文献1)。

[0003] 此外,使用感测针式三维形状测量装置通过以下方法执行设于金属等中的中空形状的测量,该方法在将感测针置于中空形状的内侧表面的同时旋转并且上下移动感测针台(例如,参考专利文献2)。

[0004] 替代地,作为用于无接触地测量中空形状的一种装置,一种利用狭缝光学投影方法检测相应于直径两端的边缘的方法是已知的(例如,参考专利文献3)。专利文献1:日本未审查专利申请公开 No. 2006-38820 专利文献2:日本未审查专利申请公开 No. H6-337215 专利文献3:日本未审查专利申请公开 No. H8-233545

发明内容

本发明所要解决的问题

[0005] 传统的遥感方法不能一次获得物体中空形状的圆周形状信息,并且要求旋转物体或者光源,这使得装置是复杂的并且还引起精度问题。

[0006] 此外,移动感测针台的方法具有要求长的测量时间的问题,这是因为,为了测量整个中空形状,需要旋转并且上下移动感测针,并且还具有有可能由于在感测针台旋转时的偏心或者偏转影响而引起误差的问题。

[0007] 进而,狭缝光学投影方法要求将狭缝布置成与测量方向正交,并且具有该方法不适用于通过沿着多个方向测量而获得形状的问题,这是因为一次仅测量一个方向。此外,还存在测量物体的中空形状应该是通孔的限制。

[0008] 本发明旨在提供利用简单构造而在无复杂计算的情况下以带有极小误差的高精度测量中空形状的测量装置和测量方法。用于解决所述问题的方案

[0009] 根据本发明的测量装置是这样一种测量装置,该测量装置测量中空测量物体的内侧形状,并且包括:沿着是该中空形状的深度方向的第一方向发送光的光发送部;将光方向转换成大致正交于该第一方向的方向的转换部;检测在测量物体内侧反射的光的检测部,所述光的方向被该转换部转换;和形状测量部,通过根据该检测部的检测结果获得从预定基准位置的移位而测量该测量物体的内侧形状。

[0010] 此外,该测量装置包括沿着第一方向相对地移动测量光学系统与测量物体的移动部,该测量光学系统包括光发送部、转换部和检测部,其中该形状测量部根据当该测量物体和该转换部的相对位置被改变时该检测部的检测结果而测量该测量物体的内侧形状。

[0011] 进而,该转换部沿着大致正交于该第一方向的方向将由该光发送部发送的光的方向朝向圆周而转换。

[0012] 而且,该光发送部包括:产生光的光源;引导来自该光源的光并且在基准位置处具有焦点的第一光学系统;第一光学限制材料,具有带有预定形状的孔隙,并且相对于该第一光学系统的焦点在光源侧被布置在与该焦点共轭的位置。以及,第二光学系统,使得从该测量物体返回的光形成图像。并且光接收部包括被置于成像表面处的检测部,该光接收部从该光源接收光,并且与该基准位置具有共轭关系,在该成像表面,由该第二光学系统形成该测量物体的在基准位置处的图像。

[0013] 此外,该测量装置包括第二光学限制材料,该第二光学限制材料具有预定形状的孔隙,并且遮蔽从该第一光学限制材料向该测量物体照射的光通量的一部分。

[0014] 进而,利用圆形缝隙构造该第一光学限制材料。

[0015] 替代地,该光发送部还包括:产生光的光源;引导来自该光源的光并且在基准位置处具有焦点的第一光学系统;和光学材料,将来自光源的光转换成环形光并且将光汇聚到预定位置上,环形光通量产生光学系统,使得在环形光通量中在环宽度的中间位置处的光射线不会变得平行于利用该光学材料构造的光学系统的光轴。以及第二光学系统,使得从该测量物体返回的光形成图像。并且光接收部包括在成像表面处布置的检测部,光接收部从该光源接收光,并且与该基准位置具有共轭关系,在该成像表面,利用该第二光学系统形成该测量物体在基准位置处的图像。

[0016] 替代地,该光发送部包括:产生光的光源;引导来自该光源的光并且在基准位置处具有焦点的第一光学系统;和将来自光源的光转换成环形光并且将光汇聚到预定位置上的光学材料,环形光通量产生光学系统,使得在环形光通量中在环宽度的中间位置处的光射线不会变得平行于利用该光学材料构造的光学系统的光轴。以及第二光学系统,使得从该测量物体返回的光形成图像。并且光接收部包括被置于成像表面的检测部,光接收部经由环形缝隙从该光源接收光,并且与该基准位置具有共轭关系,在该成像表面,由该第二光学系统形成该测量物体在基准位置处的图像。以及移动设备,能够改变在该转换部和另一光学系统之间的间隔,并且还在固定该转换部的状态中测量该间隔。

[0017] 此外,该环形光通量产生光学系统包括将来自该光源的光形成为平行光的聚光透镜和将该平行光转换成环形光通量的展像透镜(axiconlens)。

[0018] 进而,该光发送部被置于用于沿着不同于第一方向的方向发送光的位置处,并且半反射镜被设于该测量物体和该光发送部之间,以沿着第一方向反射从该光发送部发送的光,并且还将从该测量物体返回的光透射到该光接收部侧。

[0019] 另外,利用锥形反射镜构造该转换部。

[0020] 而且,该转换部通过全反射执行反射。

[0021] 替代地,该转换部具有在透光材料中形成的反射部。

[0022] 根据本发明的测量方法是这样一种测量方法,该测量方法测量中空测量物体的内侧形状,并且包括以下步骤:利用转换部将由光发送部沿着第一方向发送的光的方向转换成大致正交于该第一方向的圆周方向,并且利用该光照射该测量物体的内侧,并且通过根据检测部对在该测量物体内侧反射的光的检测结果获得从预定基准位置的移位而测量该测量物体的内侧形状。

[0023] 此外,该方法包括以下步骤:通过在沿着第一方向相对地移动该测量物体和该转换部的同时执行检测而测量该测量物体的内侧形状。

[0024] 替代地,测量中空测量物体的内侧形状的该测量方法包括以下步骤:利用在该测量物体中插入的转换部将由光发送部沿着第一方向发送的环形光通量的方向转换成大致正交于该第一方向的圆周方向,并且利用光通量照射该测量物体的内侧,利用光接收光学系统将经由该转换部从其侧面反射的光的图像形成到在与该基准位置共轭的位置处布置的环形缝隙上,并且在固定该转换部的状态中,在改变在该转换部和另一光学系统之间的间隔的同时利用光接收部接收穿过该环形缝隙的光,并且根据在该光接收部的输出数值和该间隔的数值之间的关系测量该测量物体的内侧形状。本发明的有利效果

[0025] 本发明能够利用一种简单的构造在无复杂计算的情况下测量中空测量物体的内侧形状。

附图说明

[0026] 图1是根据第一实施例的中空形状测量装置101的结构图。图2分别地是在中空形状测量装置101中圆形缝隙103和光学限制缝隙104的结构图。图3是在中空形状测量装置101中的锥形反射镜108的结构图。图4是示出在中空形状测量装置101中的光学系统的辅助图。图5是用于示意中空形状测量装置101的原理的辅助图。图6是用于示意中空形状测量装置101的原理的辅助图。图7是用于示意测量原理的辅助图。图8是用于示意测量物体的中空形状的孔直径的辅助图。图9是示出中空形状测量装置101的测量过程的流程图。图10是用于示意中空形状的形成的辅助图。图11是示出在根据本发明第二实施例的中空形状测量装置30中的光学系统的概要的图。图12是用于示意在本发明第二实施例中的中空形状测量的原理的图。图13是示出适用于作为本发明实施例的中空形状测量装置30的图像传感器的实例的图。图14是示出适用于作为本发明实施例的中空形状测量装置30的成像部的实例的图。图15是示出在本发明的实施例中使用的透光材料的实例的图。图16是示出在作为本发明第三实施例的中空形状测量装置31中的光学系统的概要的图。

具体实施方式

[0027] 在下文中,将参考附图详细描述本发明的每一个实施例。(第一实施例)图1是根据第一实施例的中空形状测量装置101的结构图。中空形状测量装置101是一种如下所述的装置,即,该装置在每一个预定高度测量中空物体的内侧形状以获得横截面形状,并且通过组合沿着高度方向所获得的横截面形状而以三维方式形成该物体的中空形状。

[0028] 中空形状测量装置101配置有光发送部102、圆形缝隙103、光学限制缝隙104、照明透镜105、半反射镜106、物镜107、锥形反射镜108、图像形成透镜110、成像部111、图像处理部112、z轴驱动部主体113、移动部114、和个人计算机115。

[0029] 移动部114是以整体的方式支撑半反射镜106、物镜107、锥形反射镜108、图像形成透镜110和成像部111的构件,并且它的来自光发送部102的光在此处进入半反射镜106的部分和移动部114的前端部分114a由透明材料例如玻璃制成,所述前端部分114a沿着锥形反射镜108的圆周方向定位并且被插入测量物体109的内侧。此外,移动部114被固

定到基座（在图中未示出）的 z 轴驱动部主体 113 沿着中心轴线 C1 的方向上下地驱动，并且通过将移动部 114 的前端部分 114a 放入测量物体 109 的中空部分中或者从那里取出而对测量物体 109 的内侧形状进行测量。注意的是，光发送部 102、圆形缝隙 103、光学限制缝隙 104、照明透镜 105、半反射镜 106、物镜 107、锥形反射镜 108、图像形成透镜 110 和成像部 111 与移动部 114 结合成一体以形成测量光学系统并且上下地移动。

[0030] 从光发送部 102 发射的光穿过圆形缝隙 103 的相应于场阑的缝隙 103a 并且进入光学限制缝隙 104。当光通量穿过光学限制缝隙 104 时，光通量的一半（例如，在示意光通量中心的点划线 154 处具有中心的光通量 151 的内侧）被遮蔽并且没有被输出到照明透镜 105 一侧。

[0031] 这里，使用图 2 详细地解释圆形缝隙 103 和光学限制缝隙 104 的形状。图 2(a) 所示的圆形缝隙 103 设有以环形透射从光发送部 102 发射的光的缝隙 103a。这里，环形缝隙 103a 被如此置放，使得在图 1 中示意光通量中心的点划线 154 位于圆形缝隙 103 的中央。

[0032] 同时，图 2(b) 所示的光学限制缝隙 104 设有环形缝隙 104a，该环形缝隙 104a 遮蔽已被透射通过圆形缝隙 103 的光通量的一半并且透射另一半。光学限制缝隙 104 的特征是，环形缝隙 104a 仅仅透射光通量的外部的一半，这是因为环形缝隙 104a 的内径对应于示意光通量中心的点划线 154 的位置，如由点划线 C2 和 C3 所示。注意的是，通过使用液晶面板实现圆形缝隙 103 和光学限制缝隙 104，例如，在该液晶面板中，液晶被控制从而以环形透射光。可替代地，圆形缝隙 103 和光学限制缝隙 104 可以利用将遮蔽部分沉积到玻璃板等上的或者蚀刻透射部分的方法或者其它方法实现。此外，成像部 111 的灵敏度根据遮蔽比率而改变。

[0033] 其光通量的一半被光学限制缝隙 104 遮蔽的光穿过照明透镜 105 进入半反射镜 106。半反射镜 106 转变入射光的方向并且将光反射到物镜 107 一侧。这里，被半反射镜 106 反射的光的方向是测量物体的深度方向（在柱形形状的情形中是轴向方向），并且当这个方向被定义成第一方向时，被半反射镜 106 沿着第一方向反射的光经由物镜 107 而被传送到锥形反射镜 108，并且沿着大致正交于第一方向的圆周方向被锥形反射镜 108 朝向测量物体 109 的内侧水平地照射。被水平地照射的光被测量物体 109 的内侧反射并且再次进入锥形反射镜 108，并且在被反射到物镜 107 一侧之后，光通过半反射镜 106 和图像形成透镜 110 在成像部 111 的光接收表面上形成图像。注意的是，成像部 111 的光接收表面、构成场阑的圆形缝隙 103 和放置测量物体的基准位置位于光学共轭位置，并且图像在这三个位置处聚焦。此外，被半反射镜 106 反射的环形光通量的环中心和锥形反射镜 108 的中心相互一致。

[0034] 这里，将使用图 3 描述锥形反射镜 108 的形状。图 3(a) 是锥形反射镜 108 的透视图，并且图 3(b) 和 3(c) 分别地示出平面视图和侧视图。示意沿着第一方向被半反射镜 106 反射的光通量的中心的点划线 154 被朝向锥形反射镜 108 的外侧倾斜的反射镜部分 108a 沿着大致正交于第一方向的方向反射，并且被朝向测量物体 109 的内侧照射，以用于照射。在图 1(a) 中详细地示意出这个状态。被光学限制缝隙 104 透射而不被其遮蔽的光通量例如在示意光通量的中心的点划线 154 和示意光通量的外侧的虚线 152 之间存在，并且被锥形反射镜 108 的反射镜部分 108a 反射。此外，示意光通量外侧的虚线 152 被测量物体 109 反射，并且如由实线 153 所示，沿着物镜 107 的方向再次被锥形反射镜 108 反射。即，被测

量物体 109 的内侧反射的返回光通量仍然具有被遮蔽的一半,并且在示意光通量中心的点划线 154 和示意光通量外侧的实线 153 之间存在。

[0035] 将使用图 4 描述这个状态。图 4 是示意图 1 的中空形状测量装置 101 的光学结构的图,并且与图 1 中的相同的符号示意相同的元件。光发送部 102 包括光源 120、确定照明数值孔径 (NA) 的孔径光阑 121、汇聚来自光源 120 的光并且使得光平行于光轴的透镜 122、和确定接收侧 NA 的成像光阑 123。注意,如上所述,成像部 111 的光接收表面、构成场阑的圆形缝隙 103 和在基准位置处的测量物体 109 的区域被示为在光学共轭位置处定位,并且图像被示为在这三个位置处聚焦。在图 4 中,因为光学限制缝隙 104 遮蔽光通量的一半,所以从测量物体 109 返回的光通量的一半被遮蔽,并且不会进入成像部 111。

[0036] 下面,将使用图 5 描述点图像,它构成在成像部 111 的光接收表面上形成的图像。图 5(a) 是示出在不具有光学限制缝隙 104 的情况下当在测量物体 109 内侧的特定位置被成像部 111 拍摄时的状态的图,并且示意当在测量位置处改变孔直径时的光通量扩展,即,在成像部 111 中焦点位移的变化(图像模糊)。这里,虽然焦点位移依赖于测量物体 109 的内径,但是,在图像被正确地聚焦的位置处的内径被定义为标准孔直径,并且假设中空形状测量装置 101 的光学系统被校正从而在这个标准孔直径处图像被正确地聚焦。

[0037] 图 5(a) 的符号 451 和 451a 到 451f 示出由成像部 111 捕捉到的图像,并且由直线 401 示意的部分示出标准孔直径的情形,同时孔直径从直线 401 朝向纸页顶部变得更大并且相反地朝向纸页底部变得更小。例如,当标准孔直径被拍摄时如在光通量 451 中并不发生图像模糊,但是当孔直径变得大于标准孔直径时光通量扩展,如光通量 451a、451b 和 451c 那样。类似地,当孔直径变得小于标准孔直径时,光通量扩展,如光通量 451d、451e 和 451f 那样。即,光通量的扩展量使得能够测量从标准孔直径的移位幅度。然而,因为此时的光通量扩展显示出光通量在经过标准孔直径的焦点位置的轴线 C4 的两侧上的相似的扩展,所以,当孔直径变得或者更小或者更大时,在这个情形中确定孔直径是变得更大还是更小是不可能的。

[0038] 在另一方面,本实施例采用遮蔽照射测量物体 109 的光通量的一半的光学限制缝隙 104,并且由此当孔直径改变时,光通量扩展的改变变得如在图 5(b) 中所示。在图中,虽然当标准孔直径被拍摄时并不如在光通量 452 中那样发生图像模糊,但是当孔直径变得大于标准孔直径时,光通量扩展,如光通量 452a、452b 和 452c。类似地,当孔直径变得小于标准孔直径时,光通量扩展,如光通量 452d、452e 和 452f。然而,不同于图 5(a) 的情形,光通量 452a、452b 和 452c 从轴线 C4 仅仅沿着纸页的右方向扩展,并且类似地,光通量 452d、452e 和 452f 从轴线 C4 仅仅沿着纸页的左方向扩展。即,根据光通量从轴线 C4 沿着纸页的右方向或者左方向移位,能够确定测量物体 109 的孔直径是变得大于或者小于标准孔直径。图像处理部 112 根据这个确定结果和光通量的扩展量测量从标准孔直径移位的幅度,并且能够获得测量物体 109 的内侧形状比标准孔直径更大或者更小的程度。

[0039] 图 5 示意已经在成像部 111 的光接收表面上形成图像的光通量的状态,而图 6 示意所被捕捉到的图像如何根据测量物体 109 的中空形状而改变。图 6 示出在成像部 111 的光接收表面 501 上形成的图像的所有的状态,并且图 6(a) 示出当标准孔直径被测量的图像,并且该图像被形成在标准孔直径位置 C6 的一个部分处。注意,虽然为了易于理解,在图中图像被示意成在标准孔直径位置 C6 的两侧上具有更宽的宽度,实际上该图像与标准孔

直径位置 C6 交迭。图 6(b) 示出当大于标准孔直径的中空形状被测量时的图像,并且该图像在标准孔直径位置 C6 的外侧上具有模糊。在另一方面,图 6(c) 示出当小于标准孔直径的中空形状被测量时的图像,并且该图像在标准孔直径位置 C6 的内侧上具有模糊。例如,当测量具有正方形内侧形状的测量物体 109 时,该正方形内侧形状具有比标准孔直径位置 C6 更大的尺寸并且还具有比标准孔直径位置 C6 更小的尺寸,获得了图 6(d) 所示的图像。

[0040] 以此方式,当已经接收到在成像部 111 的光接收表面上形成的图像的图像数据时,图像处理部 112 根据光通量扩展的方向确定测量物体 109 的内侧形状是大于还是小于标准孔直径,并且进一步能够根据在被扩展的光通量的中心或者峰值位置和标准孔直径位置 C6 之间的距离获得测量物体 109 的内径(形状)。例如,图像处理部 112 通过在图 6(b) 的情形中测量在被扩展的光通量的峰值位置和标准孔直径位置 C6 之间的距离 Δx_1 ,或者通过在图 6(c) 的情形中测量距离 Δx_2 而获得测量物体 109 的孔直径。此外,通过组合将圆周范围划分成小范围(例如,每一到二度)而获得的各个直径(形状),变得能够测量复杂形状。注意的是,在实际测量中,优选的是,通过使用校准工具初步地测量在被扩展的光通量的峰值位置和标准孔直径位置 C6 之间的距离 Δx 和实际孔直径差异而制备距离 Δx 和实际孔直径差异的转换表格,不同于标准孔的孔直径,该校准工具的孔直径是已知的。

[0041] 下面,将描述一种横截面测量方法。图 7(a) 示出在光接收表面上形成图像的光学环。首先,在光接收表面的中心处设定临时中心。然后,对于每一个设定角度从该临时中心沿着径向方向测量光强度。光强度在光学环形成图像的部分处增加。根据这个环图像的光量分布而计算将被定义成环的圆周的部分。

[0042] 存在一些用于进行定义的方法,并且能够使用下面的方法,例如,1) 光量峰值方法:将在环轮廓中的峰值位置的邻域中的光量分布的离散数据拟合成近似公式以计算峰值位置的方法;2) 光量质心方法:计算在环轮廓中的峰值位置的邻域中的光量分布的质心位置的方法;3) 阈值方法:例如比环轮廓的峰值数值暗 30% 的水平处设置阈值并且计算在阈值线和轮廓的交点之间的中间位置的方法。

[0043] 例如,将利用光学质心方法获得沿着每一个方向的圆周位置。图 7(a) 示出以每 45 度计算的情形,并且对于图 7(b) 所示光学环的圆周点获得了八个点。然后,通过使用数学途径例如最小二乘法而根据这些点获得光学环的尺寸和中心。此外,能够直接地根据光学环的尺寸计算测量物体的内径。如上所述,还能够计算与标准环尺寸的差异。

[0044] 而且,当实际光学环中心从预定的临时中心显著地移位时,如果从在这个过程中计算的光学环中心沿着径向方向再次计算圆周位置,则能够更加精确地测量光学环的尺寸。

[0045] 此外,图像处理部 112 向经由电缆 117 而被连接到图像处理部 112 的 z 轴驱动部主体 113 传输指令,并且以预定间距朝向成像部 111 而上下地移动支撑锥形反射镜 108 的移动部 114。即,测量光学系统和锥形反射镜 108 的相对位置被改变。然后,图像处理部 112 在移动部 114 的每一个预定位置处输入来自成像部 111 的图像数据,并且通过如上所述地处理输入图像数据而获得测量物体在该预定位置处的内侧形状。

[0046] 这里,将描述一种用于根据测量物体的孔直径而优化本装置的方法。

[0047] 利用圆形缝隙 103 到测量物体 109 的投影放大率、从测量物体 109 到成像部 111 的投影放大率、和成像部 111 的尺寸来确定本装置的测量范围。例如,在成像部 111 处形成

的标准环图像具有固定尺寸,并且环图像根据测量物体 109 的内径在被模糊的同时改变其尺寸。当内径太小时,变得不能够将该图像辨别成圆,并且当内径太大时,该图像变得超过成像部 111 的尺寸。例如,当锥形反射镜 108 位于图 8 所示的上部位置时,不能够对测量物体 109 进行测量。

[0048] 这里,如在图 8 中所示,通过将锥形反射镜 108 的位置移动到图 8 所示的下部位置,能够改变在物镜 107 和锥形反射镜 108 之间的间隔并且改变测量范围。以此方式,能够仅仅通过调节锥形反射镜 108 的位置而改变测量范围并且最大地利用本装置的测量范围。

[0049] 在图 8 中,被物镜 107 投影到物体上的光学环具有直径 $\Phi 10$,并且能够通过增加上述间隔而测量孔直径 $\Phi 30$ 。此外,通过降低上述间隔,能够测量孔直径 $\Phi 100$ 。即,本装置能够处理大的孔直径例如在图中的测量物体 109'。

[0050] 注意,因为当锥形反射镜 108 的位置改变时,在于成像部 111 处获得的环图像的尺寸和测量物体 109 的内径之间的关系改变,所以当锥形反射镜 108 的位置改变时,需要根据测量物体的标准进行校准。此外,能够根据光学系统的放大率、NA 等获得锥形反射镜 108 的可调节范围。

[0051] 下面,将使用图 9 的流程图描述中空形状测量装置 101 的测量流程。(步骤 S201) 首先,测量物体 109 被设于移动部 114 下面。(步骤 S202) 接着,从个人计算机 115 输入测量规格例如移动部 114 的测量范围(移动范围)和测量间距(移动间距)。从个人计算机 115 输入的测量规格经由电缆 118 而被输出到图像处理部 112,并且图像处理部 112 经由电缆 117 指令 z 轴驱动部主体 113 将移动部 114 与光发送部 120 等一起地移动到测量开始位置。(步骤 S203) 光发送部 102 在移动部 114 的当前位置处发射光,并且成像部 111 拍摄图像。(步骤 S204) 成像部 111 经由电缆 116 将接收到的图像输出到图像处理部 112。(步骤 S205) 图像处理部 112 获得测量物体 109 的内径(形状),如在图 5 和图 6 中描述。(步骤 S206) 根据测量规格确定测量是否完成。例如,如果移动部 114 未到达移动范围的终端位置,则该过程前进到步骤 S207,并且如果移动部 114 到达终端位置,则该过程前进到步骤 S208。(步骤 S207) 移动部 114 根据所设定的测量间距而被移动到下一测量位置,并且过程返回到步骤 S203 以在这个位置处进行测量。(步骤 S208) 当移动部 114 到达该移动范围的终端位置并且测量完成时,获得了测量物体 109 的在每一内侧高度(关于测量光学系统的相对位置)处的形状并且通过组合这些形状而产生中空形状数据。

[0052] 这里,将使用图 10 描述中空形状数据的产生方法。在图中,符号 701 到 706 示意当以预定间距分别地从高度(n)到(n+5)沿着 z 轴方向(高度方向)改变高度时的内侧形状。注意,虽然为了易于理解在图中内侧形状被示为圆,但是根据测量物体 109,内侧形状变成具有不规则半径的凹-凸形状。通过组合在各个高度处的内侧形状 701 到 706,能够获得测量物体 109 的中空形状数据并且根据中空形状数据形成立体中空形状 109a。此外,在测量中,测量光的中心优选地与测量物体 109 的中心相一致,但是,即便存在移位,当获得中空形状数据时也能够校正该移位。

[0053] 现在,将返回流程图并且将继续描述。(步骤 S209) 由图像处理部 112 产生的中空形状数据经由电缆 118 而被输出到个人计算机 115 并且被显示在个人计算机 115 的屏幕上。(步骤 S210) 根据需要,通过键盘或者鼠标操作,个人计算机 115 指定在屏幕上显示的测量物体 109 的可选位置,并且根据从图像处理部 112 接收到的测量物体 109 的中空形状

数据显示所指定的每一个部的尺寸或者长度。(步骤 S211) 全部测量完成。

[0054] 以此方式,通过在以预定间距上下地移动移动部 114 的同时提取测量物体的受照射部分的内侧形状,并且通过这些形状作为在各个预定位置处的内侧形状进行组合,能够测量测量物体 109 的中空形状。测量物体 109 的测得的中空形状数据经由电缆 118 而被传输到个人计算机 115,并且能够在个人计算机 115 上显示测量物体 109 的中空形状。

[0055] 注意,虽然本实施例独立地提供执行图像处理的图像处理部 112 和执行整个中空形状测量装置 101 的操作和测量结果显示的个人计算机 115,但是个人计算机 115 可以包括图像处理部 112 的硬件和软件。相反,图像处理部 112 可以设有操作部和显示部以用作中空形状测量装置 101 的专用控制部。

[0056] 以此方式,根据本实施例的中空形状测量装置 101 根据在中空物体的每一预定高度处从标准孔直径的移位而获得内侧形状,并且能够通过改变高度的同时组合在各个预定位置处测得的内侧形状而以三维方式形成该物体的中空形状。具体地,因为根据从标准孔直径的移位获得内侧形状,所以构造是简单的并且不必执行复杂计算。此外,虽然一次地获得所有等高线的莫尔 (moire) 方法具有误差根据物体中的高度差异而变得更大的问题,但是,根据本实施例的中空形状测量装置和测量方法获得在每一高度处的内侧形状并且能够执行高度精确的测量而不依赖于物体中的高度差异。此外,本测量装置和测量方法能够通过一次拍摄获得整个圆周的内侧形状,并且由此与利用感测针方法的传统三维测量相比,能够以极高的速度执行三维测量。

[0057] 注意,虽然本实施例采用使用光学限制缝隙 104 遮蔽照射测量物体 109 的光通量的一半的方法,但是可选地,在不使用光学限制缝隙 104 的情况下提供一种驱动级,该驱动级沿着正交于 z 轴的方向相对地移动测量物体 109 和锥形反射镜 108, z 轴驱动部主体 113 沿着所述 z 轴移动移动部 114,并且当在预定位置处执行测量时沿着正交于 z 轴的方向仅仅移动驱动级一段小的距离,并且由此根据驱动级移动方向、光扩展量(图像模糊的幅度)和从标准孔直径的移位获得测量物体 109 的内侧形状。例如,当驱动级被朝向测量物体 109 的内侧移动,即,使得锥形反射镜 108 更加靠近测量物体 109 的一部分时,如果光扩展量增加,则确定在该部分处测量物体 109 的孔直径小于标准孔直径,并且,在另一方面,如果光扩展量降低,则确定测量物体 109 的孔直径大于标准孔直径。可替代地,当驱动级沿着离开测量物体 109 的内侧的方向移动时,如果光扩展量增加,则确定测量物体 109 的孔直径大于标准孔直径,并且,在另一方面,如果光扩展量降低,则确定测量物体 109 的孔直径小于标准孔直径。

[0058] 此外,虽然本实施例采用利用无色透明移动部 114 支撑锥形反射镜 108 的方法,但是如果移动部 114 在它的周边设有开口部分,则移动部 114 不必是无色的和透明的。此外,因为锥形反射镜 108、物镜 107 和半反射镜 106 的中心部分不被用于光路径,所以能够在这个部分处建立支撑杆以支撑锥形反射镜 108 等。

[0059] (第二实施例) 在下文中,将使用附图描述根据本发明的第二实施例的实例。图 11 是示出在根据本发明第二实施例的中空形状测量装置 30 中的光学系统的概要的图。来自光源 1 的照明光被聚光透镜 2 汇聚,并且大致平行的光通量从其底部方向进入展像透镜 3,展像透镜 3 具有用于形成环形光的锥形输出表面。以上照明光的中心大致与展像透镜 3 的中心轴线相一致,并且利用在锥形表面处的折射而形成以环形分布的平行光通量。这个

光通量被发送和接收光分支镜 4(半反射镜,或者能够替代半反射镜使用的半棱镜)反射并且被物镜 5 汇聚以成为精细的环形光。

[0060] 展像透镜 3 被如此置放,即,使得锥体的顶部可以与物镜 5 的焦点一致。通过以此方式布置,已被透射通过锥体中心的光射线经过物镜 5 的光瞳中心并且在已被透射通过物镜 5 之后平行于物镜 5 的光轴行进。此外,展像透镜 3 的锥形表面折射照明光并且由此形成环形光,该环形光的半径等于这个折射角度和物镜 5 的焦距乘积。此外,已经进入展像透镜 3 的锥形表面的光即使在折射之后也保持平行光通量,并且由此被汇聚在物镜 5 的物体侧焦点位置处。

[0061] 环形光进入在端表面处具有成锥形镂空的反射部 6a 的柱形光学材料 6(透光材料),从而主要光射线并不变得平行于上述锥体的中心轴线(与柱体的中心轴线相一致)。即,在环宽度中的中间位置处的环形光通量的光射线并不变得平行于光轴。然后,环形光在锥形反射部 6a 处被沿着正交地反射,从而被从柱体表面输出并且在被以预定距离隔开的圆周上形成图像。注意,如果输出从反射部 6a 反射的光的表面是柱形的,则光学材料 6 的整个形状并不需要是柱形的。此外,光进入表面是垂直于上述锥体的中心轴线的平面。

[0062] 这里,反射部 6a 可以具有与第一实施例的在图 3 中解释的锥形反射镜 108 相同的形状。相反,第一实施例的锥形反射镜 108 可以具有与本实施例的反射部 6a 相同的形状,并且可以包括柱形光学材料 6。

[0063] 形成上述环形光的光通量被中空形状内侧壁 7 反射,被反射部 6a 再次反射,经由柱形光学材料 6 和物镜 5 而被透射通过发送和接收光分支镜 4,并且进一步被透射通过孔径光阑 8,并且然后经由图像形成透镜 9 在成像表面 10 上形成从测量物体 7 反射的光的图像。孔径光阑 8 在与照明光通量的光瞳共轭的位置处设有具有与照明光通量的光瞳共轭的尺寸的圆形开口。

[0064] 将使用图 12 描述测量中空空间的原理。在下面的附图中,原则上与以前绘图所示相同的构件由相同符号表示并且其说明将被省略。

[0065] 为了易于理解,在图 12 中仅仅示出环形光的一侧。图 12 示出其中孔直径大于环形光的图像形成位置的一种情形。照明光通量在环形光图像形成位置 C 处被最小化并且扩展以照射测量物体的中空空间内侧壁 7。被中空空间内侧壁 7 反射的光通量经由反射部 6a 和光学材料 6 而被引导到配置有物镜 5、发送和接收光分支镜 4、孔径光阑 8 和图像形成透镜 9 的光接收光学系统,并且在成像表面 10 之前的平面 B 处形成这个光通量的图像,好像光接收光学系统接收到从平面 A 发射的光通量。由此,在成像表面 10 处观察到光通量被扩展。

[0066] 当光接收光学系统的放大率是 β 并且从环形光图像形成位置 C 到中空形状内侧壁 7 的距离是 δ 时,从图像传感器 10 到图像形成平面 B 的距离 Δ 被表达如下。 $\Delta = 2\beta^2\delta \dots$ (1) 沿着径向方向环形光图像扩展量 ε 等于从图像传感器 10 到图像形成平面 B 的距离 Δ 乘以成像侧的数值孔径,因为环形光图像仅仅在一侧上扩展。当照明光的数值孔径是 NA 时,环形光图像扩展量 ε 被给定如下。

$$[0067] \quad \varepsilon = \Delta \frac{NA}{\beta} = 2 \cdot \beta \cdot NA \cdot \delta$$

(2)

[0068] 由此,能够根据径向方向的环形光图像扩展量 ε 获得从环形光图像形成位置 C 到中空形状内侧壁 7 的距离 δ 。此外,能够根据扩展的方向而确定孔直径是小于还是大于环形光图像形成位置。即,当环形光图像向在成像表面 10 上与环形光图像形成位置共轭的预定位置外侧扩展时,孔直径大于环形光图像形成位置,并且当环形光图像向该预定位置的内侧扩展时,孔直径小于环形光图像形成位置。这里,能够以与第一实施例的在图 5(b) 和图 6 中相同的方式考虑环形光图像的径向扩展,并且当孔直径变得大于环形光图像形成位置(标准孔直径)时,环形光图像向外侧扩展,并且当孔直径变得小于标准孔直径时,环形光图像向内侧扩展。此外,上述公式(2)的思想还能够被应用于第一实施例。注意,虽然已经使用连续环形光通量作为环形光通量解释了本实施例,但是环形光通量可以是非连续的(周期的)。

[0069] 因为环形光在中空形状内侧被沿着圆周方向投影,所以,通过在成像表面内测量环形光图像的扩展,对于整个圆周方向能够沿着每一方向获得从环形光图像形成位置 C 到中空形状内侧壁 7 的距离。因为 如果光学系统 1 到 6 的布置不被改变,则从环形光图像形成位置 C 到上述锥体的中心轴线(与柱体的中心轴线相一致)的距离是已知的和固定的,所以还能够沿着整个圆周方向获得从上述锥体的中心轴线(与柱体的中心轴线相一致)到中空形状内侧壁 7 的距离,并且获得中空形状的形状(垂直于上述锥体的中心轴线的横截面形状)。

[0070] 注意,如果环形光被如此形成,即,使得在环宽度的中间位置处环形光通量的光射线不平行于光轴,则并不总是有必要将展像透镜 3 的锥体的顶部布置成与物镜 5 的焦点一致。当孔直径大于环形光图像形成位置时,环形光图像向在成像表面 10 上与环形光图像形成位置共轭的预定位置内侧以及向外侧扩展,但是在外侧中的扩展量更大。在另一方面,当孔直径小于环形光图像形成位置时,环形光图像向在成像表面 10 上与环形光图像形成位置共轭的预定位置外侧以及向内侧扩展,但是在内侧中的扩展量更大。因此,能够根据扩展量和扩展方向这两者确定孔直径是大于还是小于环形光图像形成位置。

[0071] 通过使用用于图像传感器 10 的具有以栅格样式布置的像素的传统的 CCD 或者 CMOS 元件进行信号处理,可以获得沿着任何方向从环形光图像形成位置到中空形状内侧壁 7 的距离,但是通过使用如在图 13 中所示具有径向地布置的像素的图像传感器或者如在图 14 中所示其中光纤在入射侧处径向地布置并且在输出侧处根据二维图像传感器的像素布置而被重新布置的图像传感器,能够以高速执行高度精确的测量,这是因为从二维坐标向柱坐标系统的转换是不必要的。

[0072] 注意图 13 和图 14 所示图像传感器的构造实例能够被应用于根据第一实施例的中空形状测量装置 101 的成像部 111。

[0073] 此外,当散焦量增加时,光通量的扩展量变得更大,并且来自光束的边缘部分的信号趋向于嵌入噪音并且光束边缘的检测容易具有误差。因此,通过使用 LED 等对光源 1 进行强度调制,来自图像传感器的每一个像素的输出可以被同步地检测到。

[0074] 为了获得中空形状内侧壁 7 的形状,通过沿着在上述锥体中的中心轴线的方向移动整个光学系统并且通过在移位被环形光照射的位置的同时重复沿着整个圆周方向的距离测量,能够获得沿着每一个方向的到中空形状内侧壁 7 的距离并且以柱坐标获得形状数据。

[0075] 这里,能够通过与使用图像处理部 112 和个人计算机 115 的、第一实施例的、在图 9 中的流程图的处理类似的处理实现根据本实施例的中空形状测量装置 30 的测量处理。

[0076] 图 15 示出柱形光学材料 6,并且将在下面讨论它的关于可用测量的条件。当柱形材料的柱形部分的半径是 R 并且环形光的主要光射线的半径是 r 时,在图 15 所示的柱形材料 6 的上侧的入射侧处,柱体直径必须大于光通量直径,从而使得从图 12 所示的临时发射中心 A 扩展的光以角度 θ 进入物镜 5 而不将光分出。当存在从柱体的中心轴线具有半径 u 的环形光图像形成位置时,测量物体的中空形状内径 ϕ 必须满足用于直至深度 D 的测量的下面的条件。这里, n 示意柱形材料的折射率。

[0077] $\phi < u + \left(\frac{1}{\sin \theta} - \frac{1}{n} + 1 \right) R - \left(\frac{1}{\sin \theta} - \frac{1}{n} \right) r - \frac{D}{n}$... (3) 在通过使用具有 100mm 的

测量长度 D 、20mm 的柱形部分半径 R 和 1.8 的折射率的光学材料 6 的具有半径 $r = 8\text{mm}$ 和 $\sin \theta = 0.1$ 的环形光的情形中,当环形光图像形成位置位于距柱体的中心轴线 22mm 处时,能够测量高达 99.7mm 的内径。

[0078] (第三实施例) 下面,将描述根据第三实施例的中空形状测量装置 31。中空形状测量装置 31 不能总是实现更高速度的测量,但是能够使用本发明的光学材料通过共焦观察测量沿着整个圆周方向的距离。图 16 示出根据第三实施例的中空形状测量装置 31 的构造实例。图 16 所示的构件具有与图 11 和图 12 所示的中空形状测量装置 30 的构件相同的构造,除非给予特定的解释。

[0079] 从光源 11 发射的照明光经由聚光透镜 12 照明针孔 13。已被透射通过针孔 13 的光被汇聚透镜 14 形成为大致平行的光通量,并且进入用于形成环形光的展像透镜 15。照明光如上所述地被展像透镜 15 转换成平行的环形光通量并且被发送和接收光分支镜 16 反射从而被引导到物镜 17。照明光被物镜 17 转换成以环形状远心地汇聚的光通量,进入光学材料 18,并且被转换成在垂直于物镜 17 的光轴的平面中分布的光通量,并且然后被照射到测量物体的中空形状内侧壁 19 上。

[0080] 被中空形状内侧壁 19 反射的光再次进入光学材料 18 中,并且经由物镜 17 和发送和接收光分支镜 16 而被引导到光接收光学系统。光接收光学系统利用孔径光阑 20 透射仅仅正常反射的光,利用图像形成透镜 21 汇聚来自中空形状内侧壁 19 的光,并且在环形缝隙 22 上形成图像。因为环形缝隙 22 被置于共轭图像位置(即,与环形光通量在移动径向方向上的扩展被最小化的位置共轭的位置)处,所以当中空形状内侧壁 19 与照明环形光图像的图像形成位置相一致时,被透射通过环形缝隙 22 的光量最大。

[0081] 已被透射通过环形缝隙 22 的光被图像中继透镜 23 投影到成像表面 24。因为在成像表面 24 上,环形图像在如下所述的直径的位置处形成,即,所述直径等于被投影到物体上的环形光的主要光射线直径乘以光接收光学系统的总放大率,所以利用如在图 16(b) 中所示的图像传感器 24 监视沿其圆周方向的光量。在图 16(a) 中被虚线包围的光学系统能够独立于光学材料 18 地沿着物镜 17 的光轴被移动,并且能够通过改变在光学材料 18 和物镜 17 之间的间隔而改变照明环形光的图像形成位置。即,根据最大化被成像表面 24 的每一个像素接收的光量的、在光学材料 18 和光学系统之间的间隔,能够通过固定光学材料 18 的同时沿着物镜 17 的光轴移动光学系统而对相应于每一个像素的每一个圆周方向检测中空形状内侧壁 19 的位置。由此,能够获得中空形状沿着圆周方向的形状。为了获得中空

形状的形状,有必要通过在已经进一步移动光学材料 18 之后以类似的方式移动光学系统以扫描测量范围而获得直径数据。

[0082] 如上所述,在每一个实施例中,根据本发明的测量装置和测量方法能够利用简单的构造而且在不执行复杂计算的情况下测量中空测量物体的内侧形状。

[0083] 具体地,测量装置和测量方法能够同时地沿着整个圆周方向执行中空形状的距离测量,并且,因为距离测量是沿着在光通量中的主要光射线的方向执行的,并且由此与例如沿着倾斜方向观察物体的方法相比能够以一致的精度被执行,所以能够高速高精度地执行中空形状测量。

[0084] 此外,能够通过对于在中空形状内侧沿着径向方向使光通量曲折的反射部在光学材料中采用内部反射而利用光透射部支撑反射部,并且移除遮蔽光的金属部分的杆。

[0085] 进而,与通过利用金属部分的细杆支撑光透射部相比,通过将光透射部嵌入透光材料例如玻璃或者塑料,能够使得光透射部更加坚固。由此,光透射部不受例如在测量中撞击测量物体的事故的影响,从而改进了工作性能。

[0086] 而且,因为透光材料具有比空气更高的折射率,所以,即使对于具有相同数值孔径的光,光通量扩展也在以相同距离隔开的位置处由于一定量的折射率差异而变得更小,并且由此能够测量更深的中空形状。

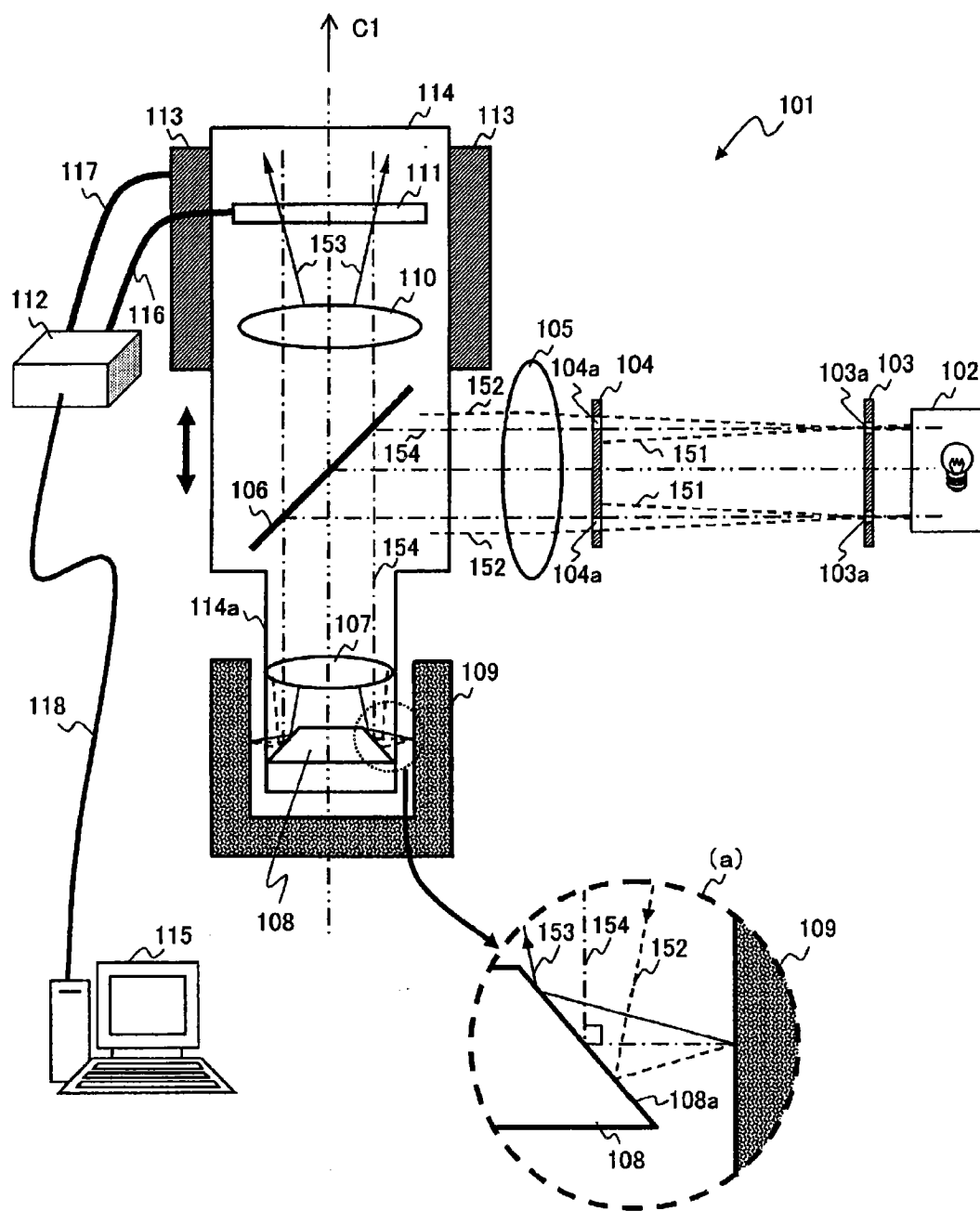


图 1

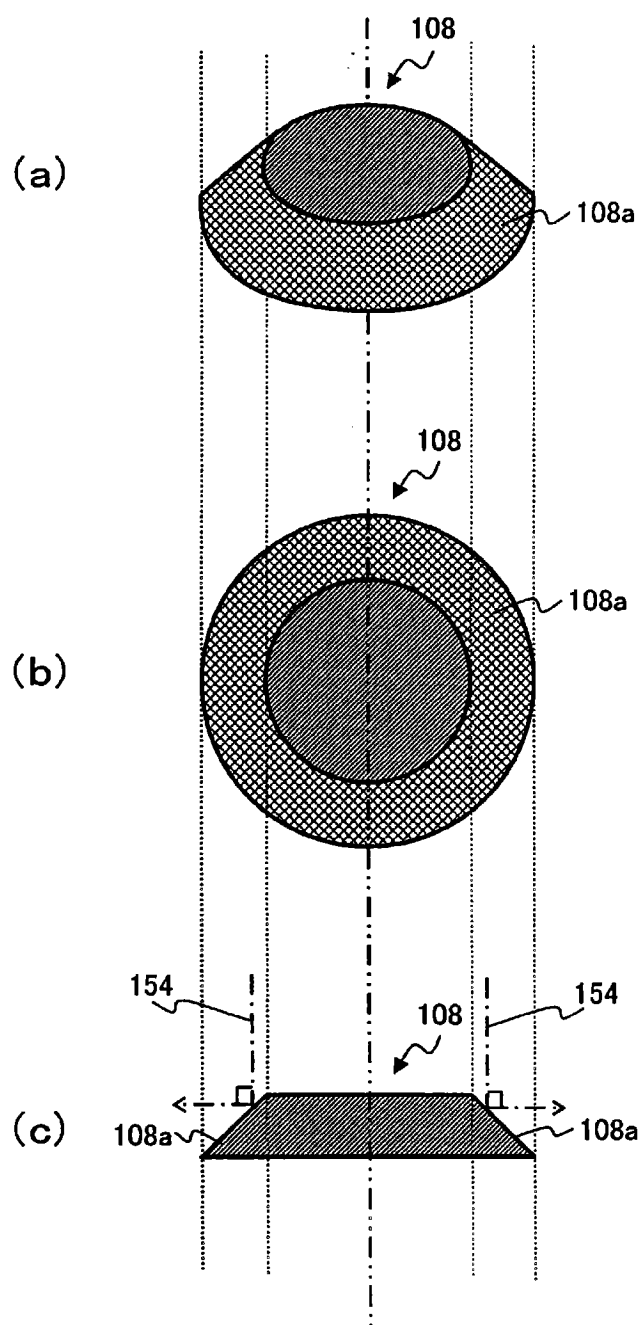


图 3

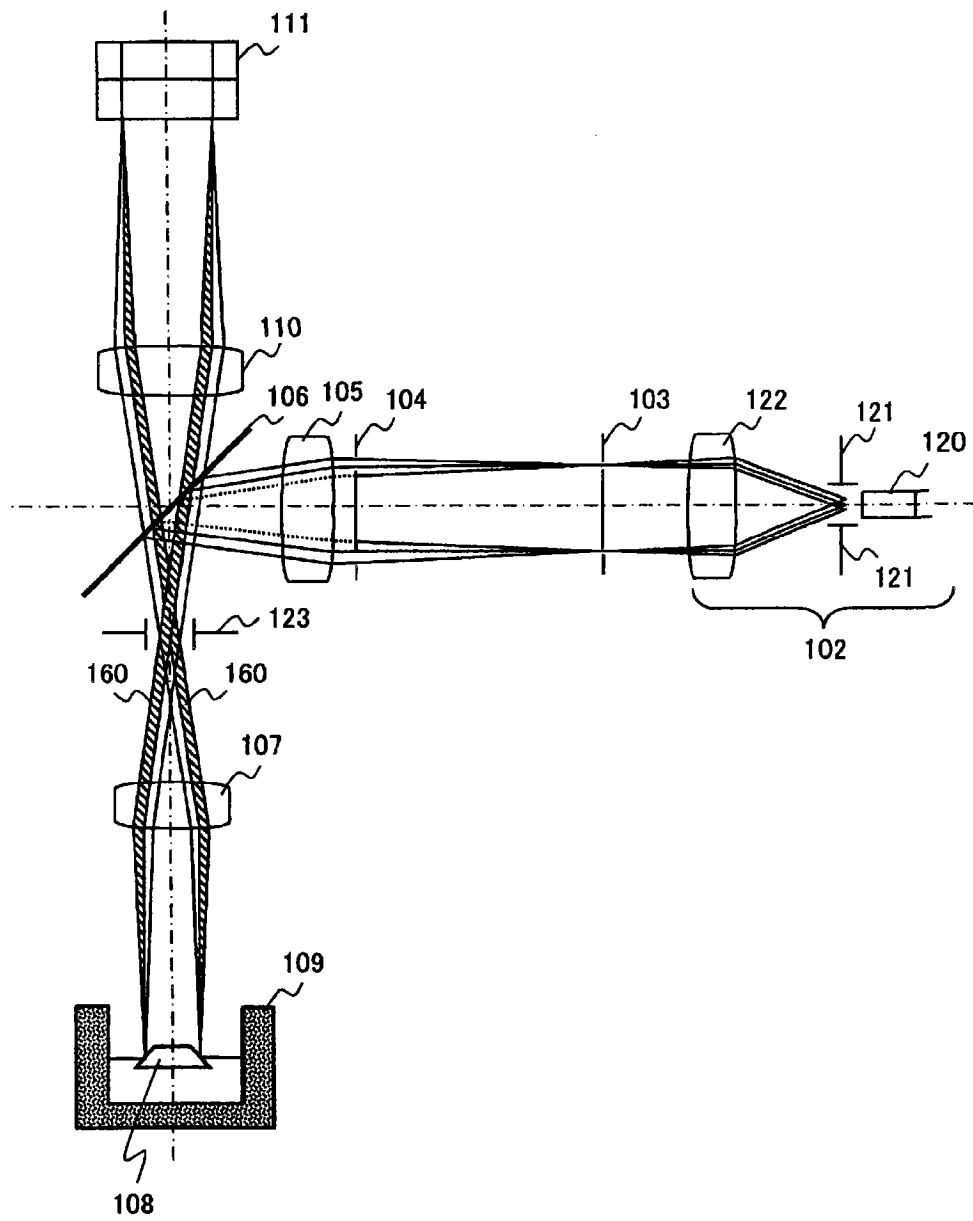


图 4

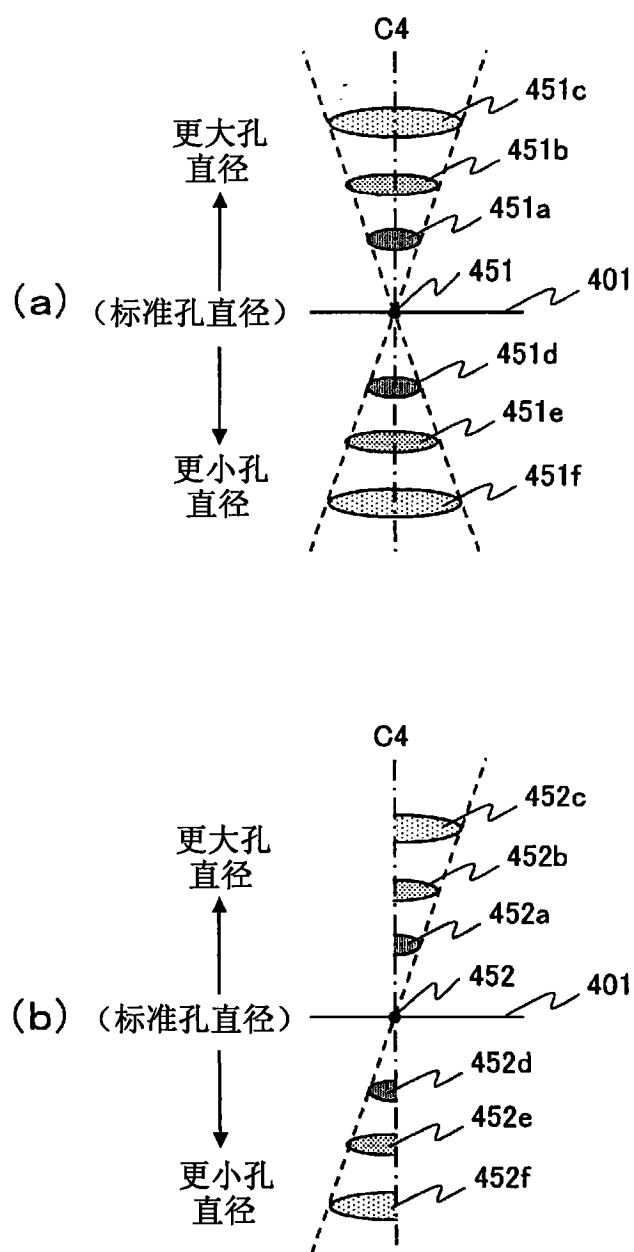


图 5

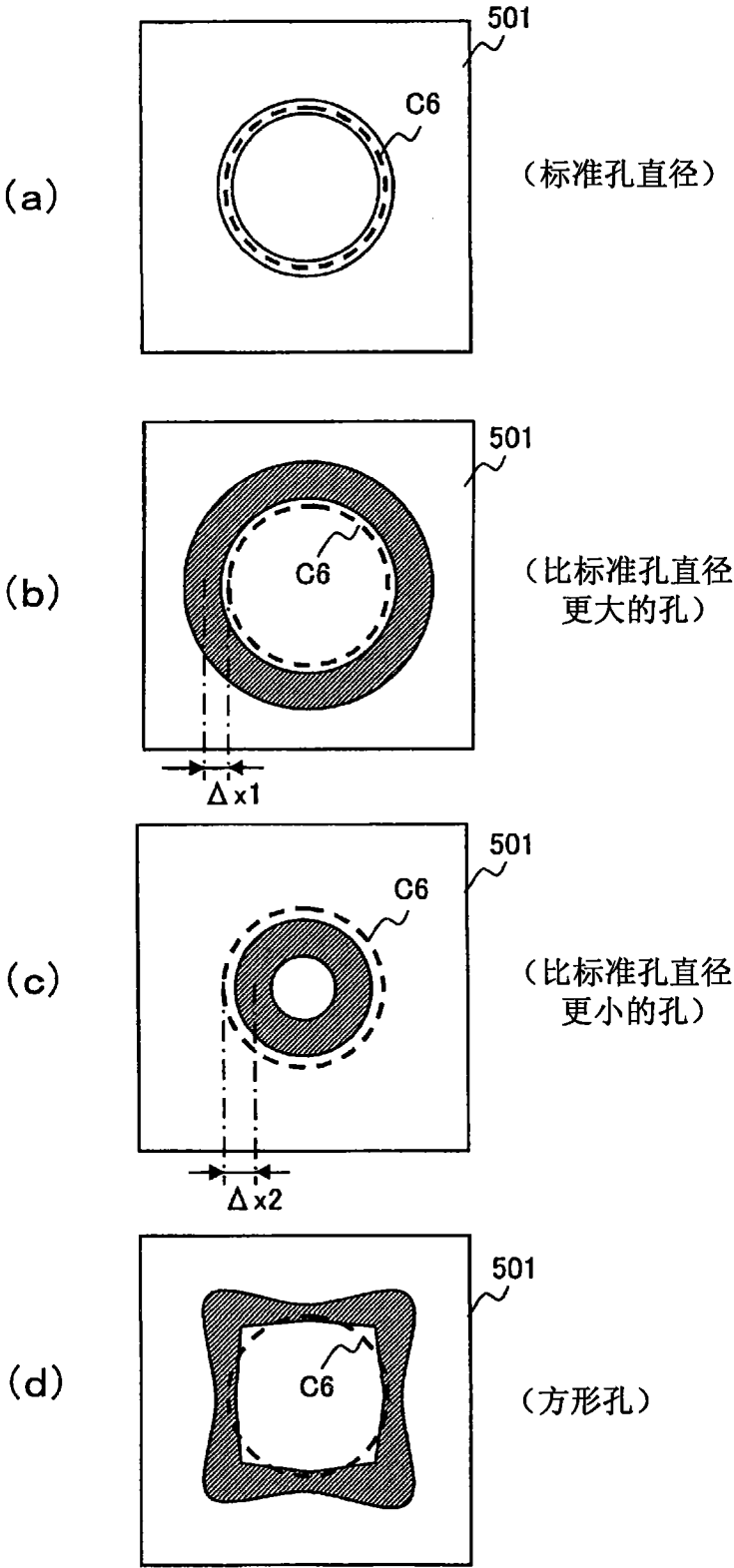


图 6

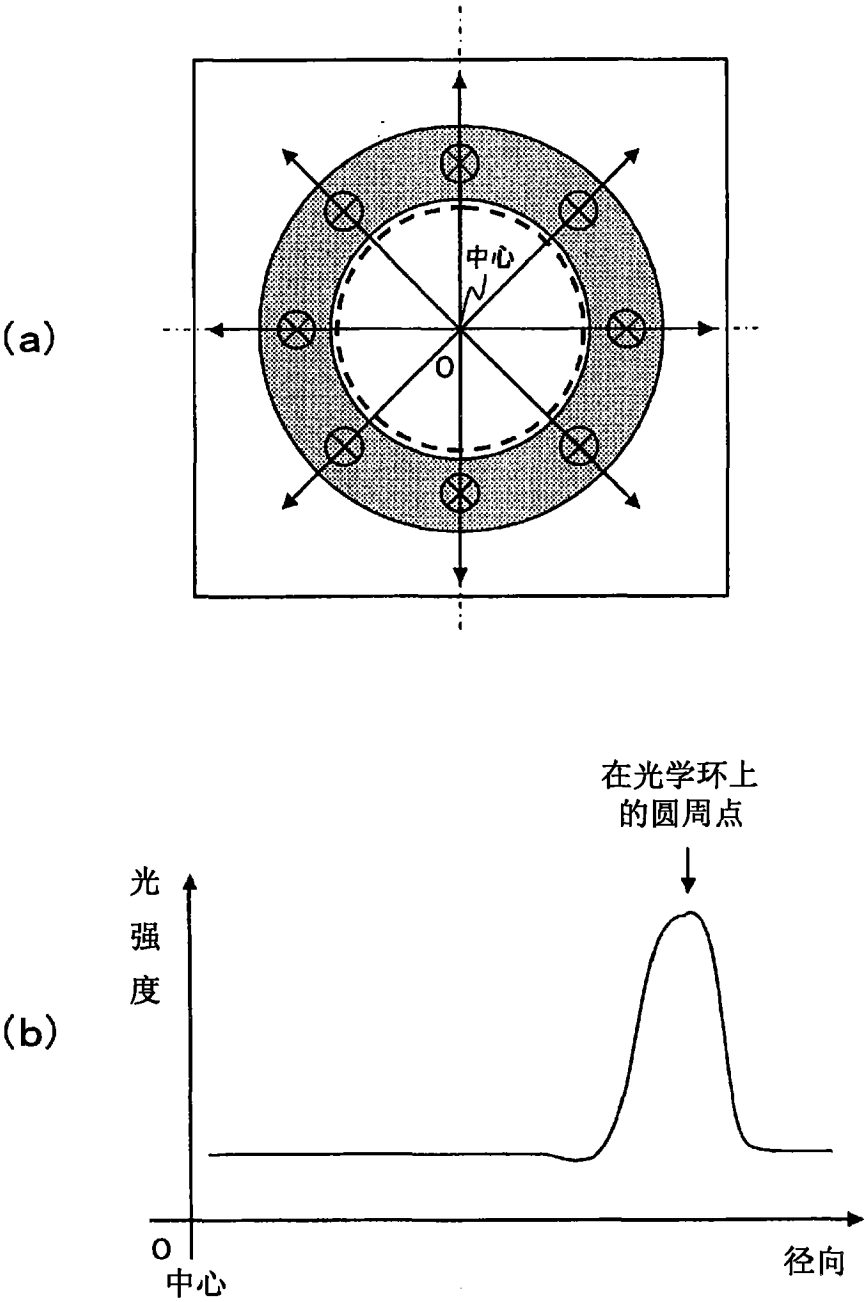


图 7

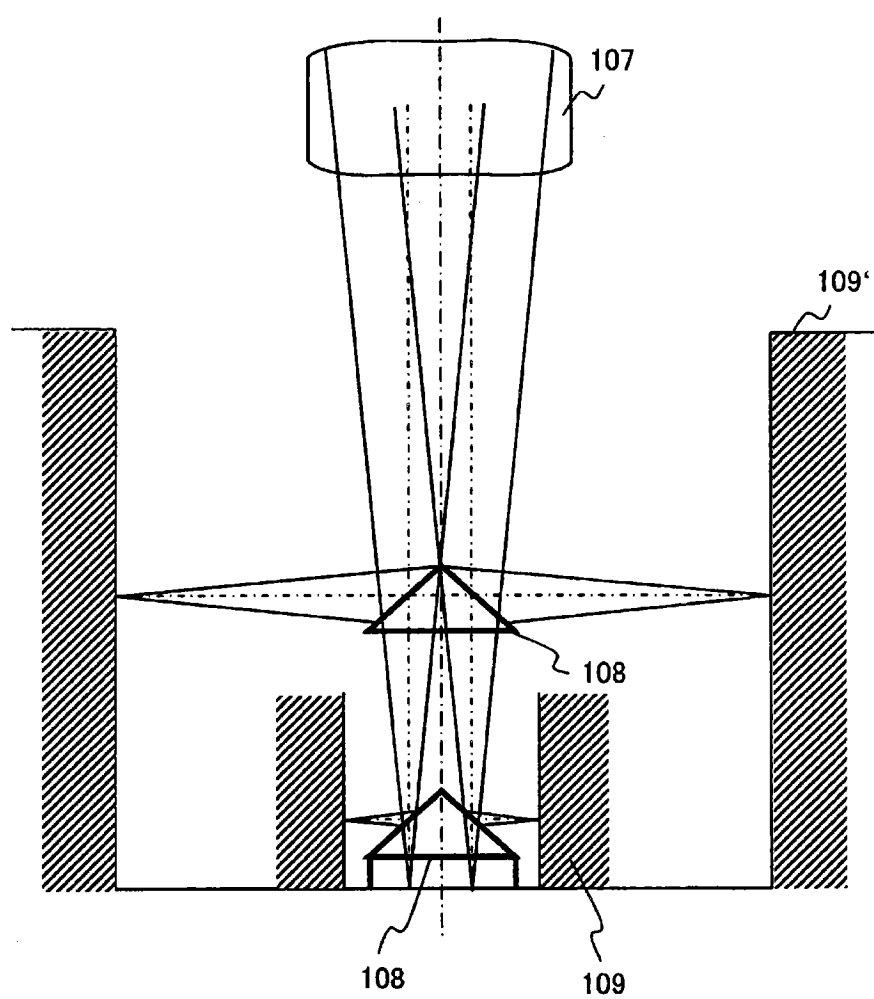


图 8

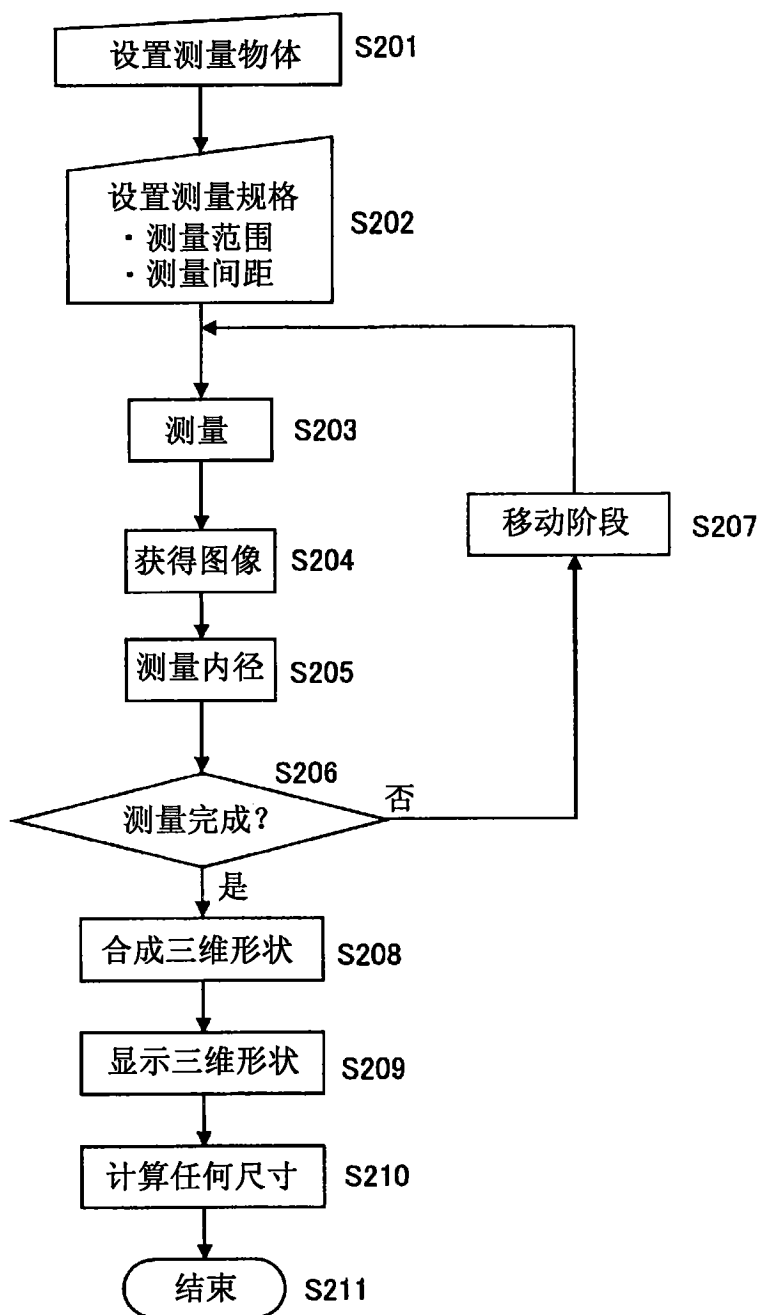


图 9

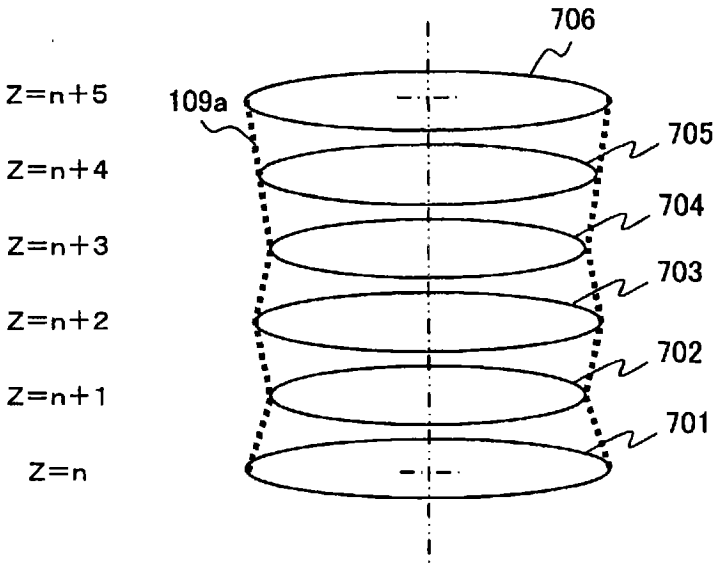


图 10

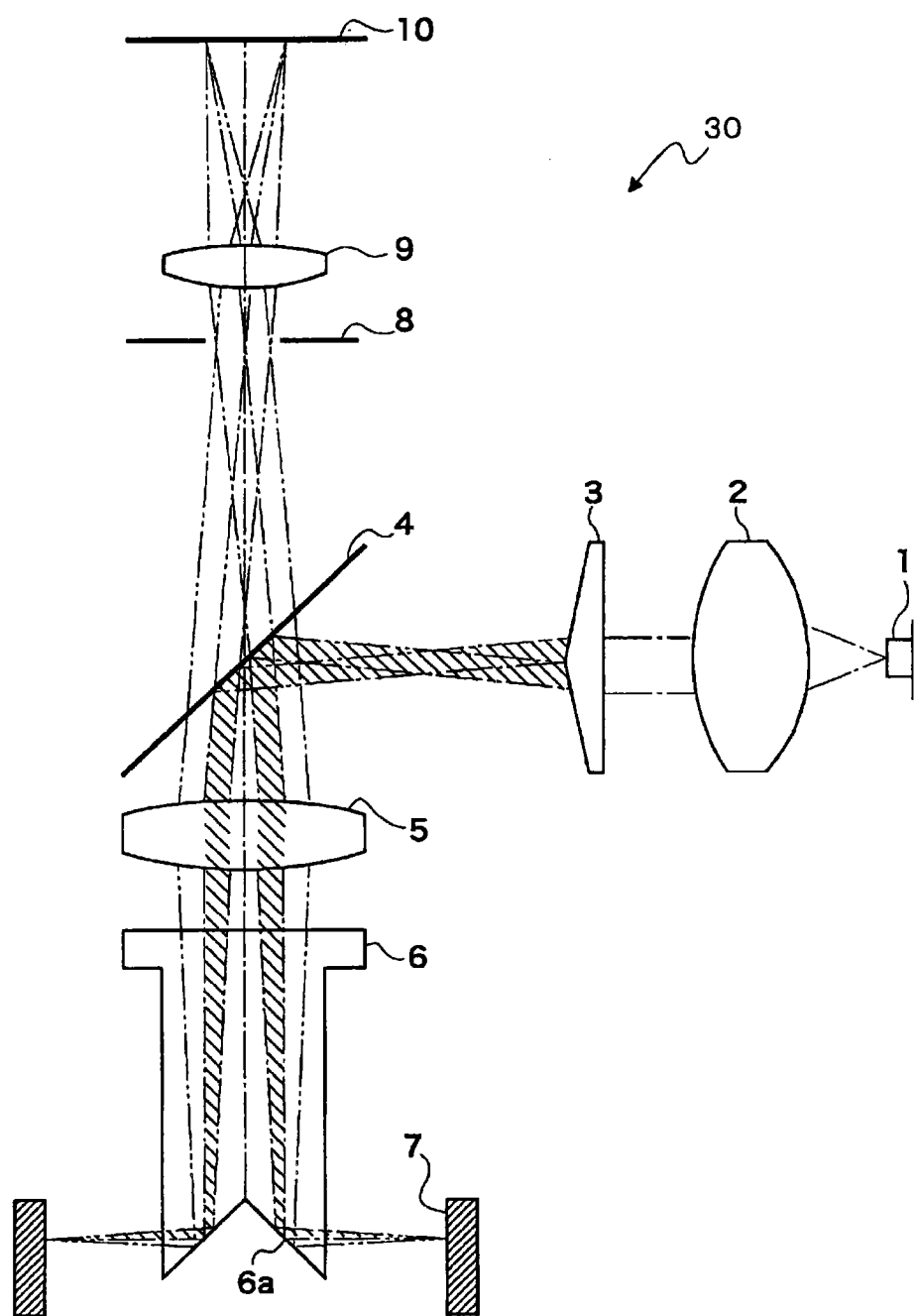


图 11

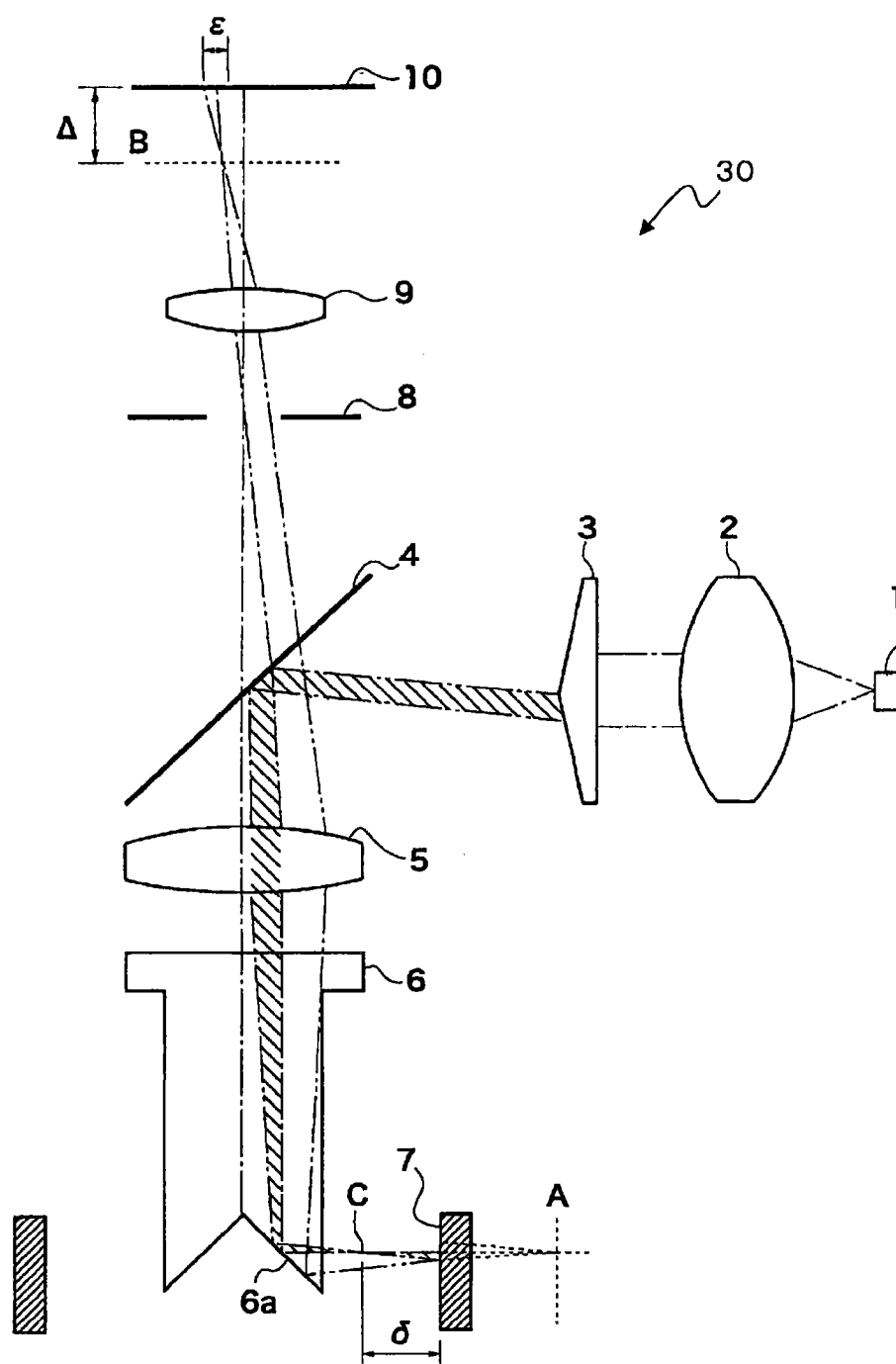


图 12

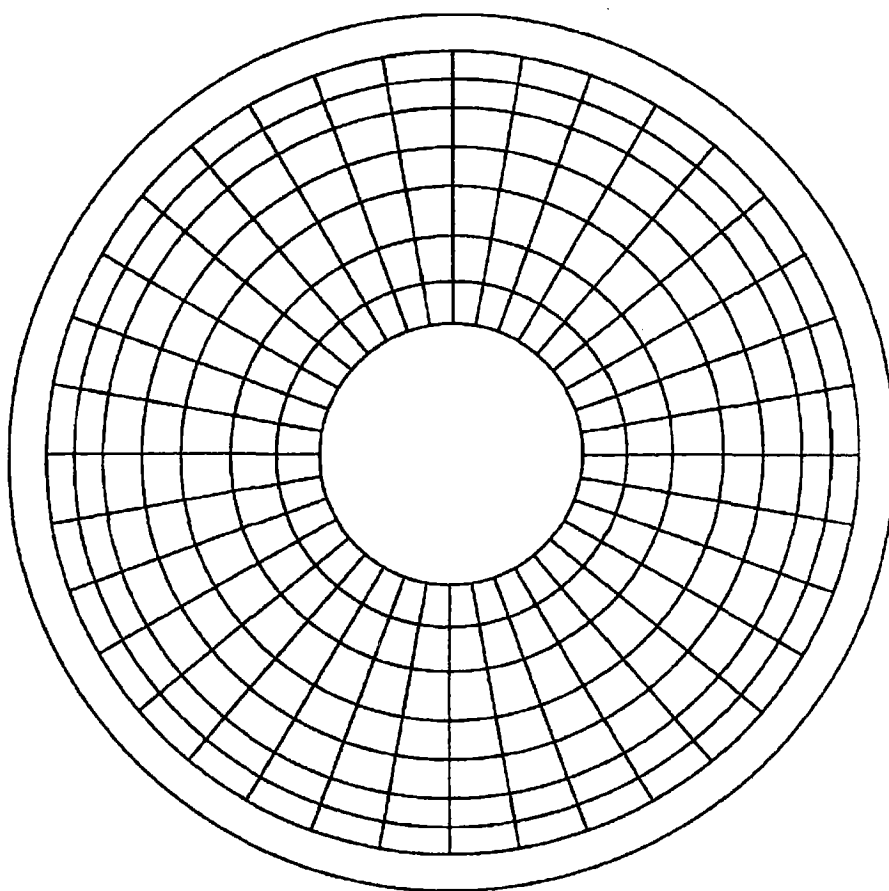


图 13

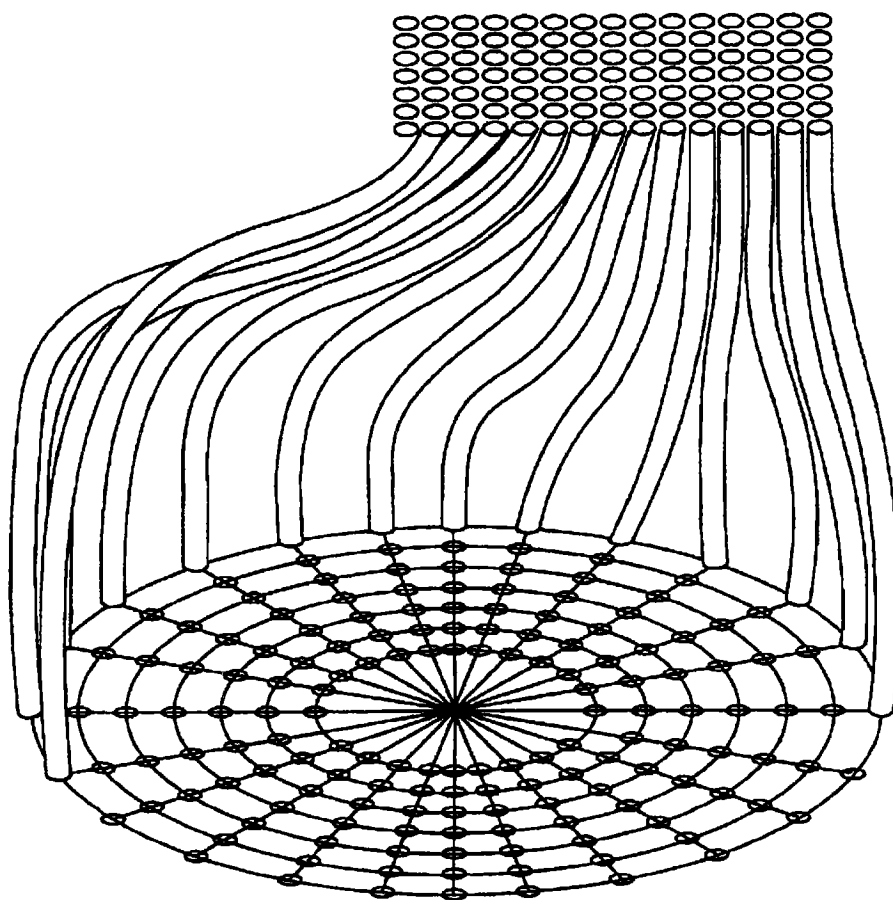


图 14

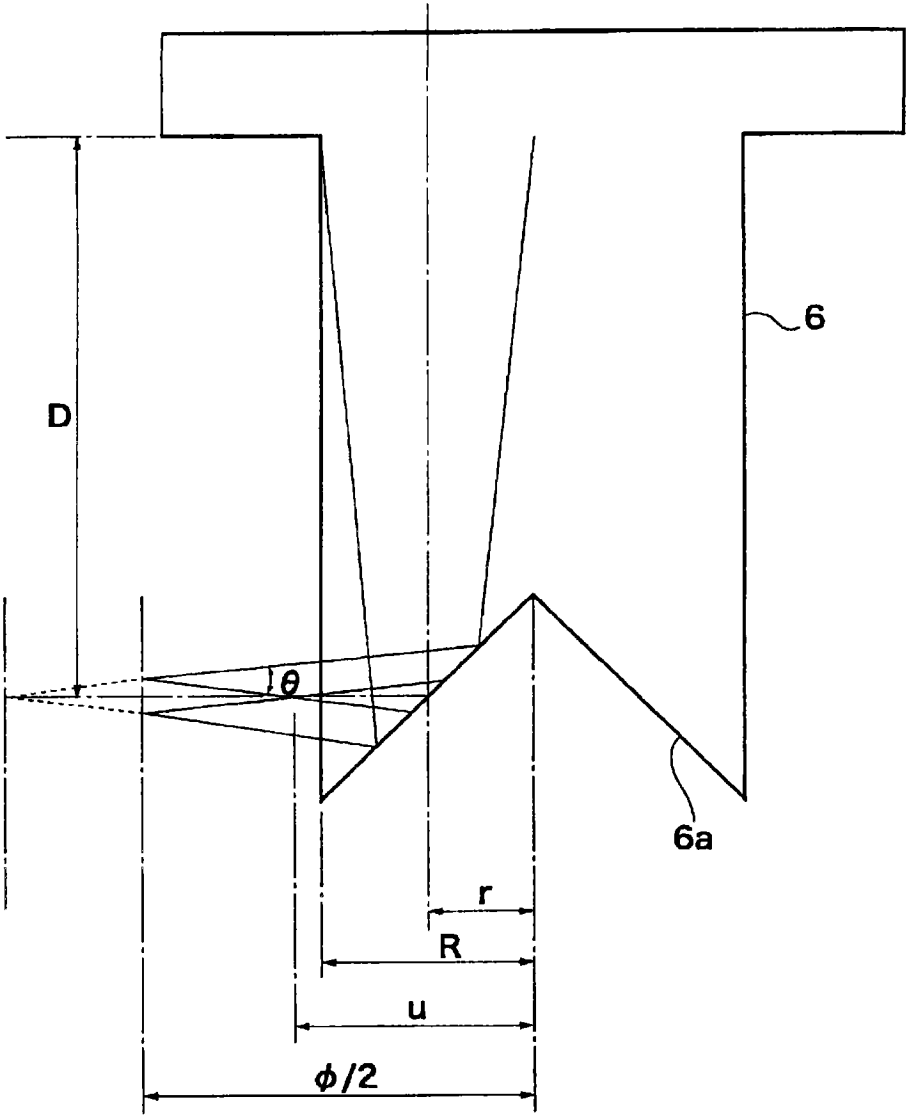


图 15

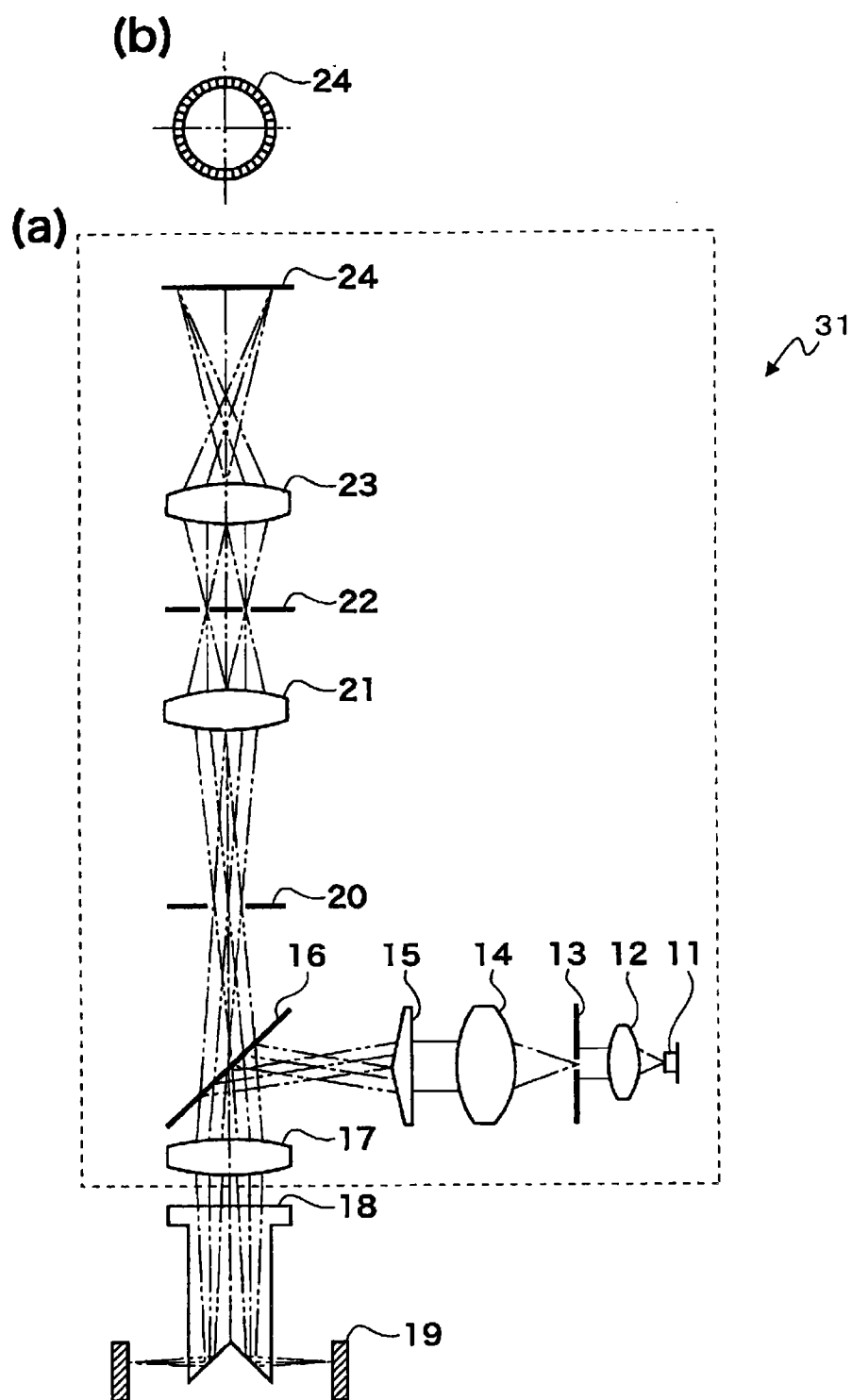


图 16