



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112469987 B

(45) 授权公告日 2024. 09. 13

(21) 申请号 201980046133.3

(22) 申请日 2019.07.03

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112469987 A

(43) 申请公布日 2021.03.09

(30) 优先权数据
10-2018-0081169 2018.07.12 KR

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2021.01.08

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/KR2019/008147 2019.07.03

(87) PCT国际申请的公布数据
W02020/013517 KO 2020.01.16

(73) 专利权人 韩国标准科学研究院

地址 韩国大田广域市

(72) 发明人 赵龙在 诸葛园 赵贤模

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司 11227

专利代理师 王萍 杨林森

(51) Int.Cl.
G01N 21/21 (2006.01)
G01J 4/00 (2006.01)

(56) 对比文件
US 2005248763 A1, 2005.11.10
CN 107429990 A, 2017.12.01
US 7889340 B1, 2011.02.15

审查员 李重阳

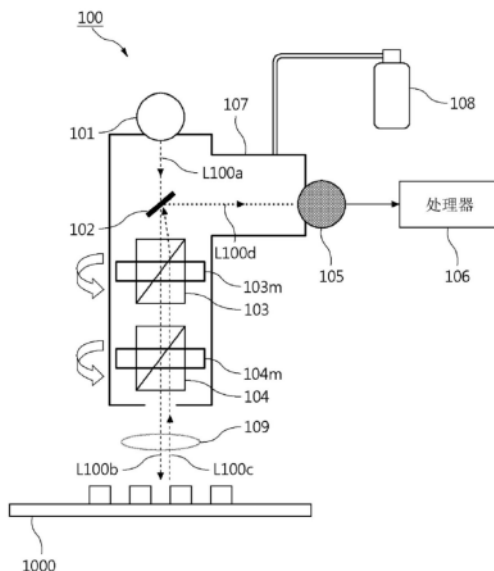
权利要求书3页 说明书17页 附图6页

(54) 发明名称

正交入射椭圆仪以及使用其测量样本的光学性质的方法

(57) 摘要

本发明涉及正交入射椭圆仪以及通过使用该正交入射椭圆仪来测量样本的光学性质的方法。本发明的目的是提供：正交入射椭圆仪，其中，使用波长不相关线性偏振器代替波长相关补偿器，使得简化了设备校准过程，同时可以容易地实现测量波长范围的扩展；以及通过使用该正交入射椭圆仪来测量样本的光学性质的方法。



1. 一种正交入射椭圆仪,包括:

光源,其包括准直光学系统,并且朝向样本发射入射准直光束;

分束器,其设置在所述光源与所述样本之间,并且沿垂直于所述样本的表面的方向引导所述入射准直光束的一部分;

固定偏振器,其设置在所述分束器与所述样本之间,并且以预设的方位角固定,以允许仅所述入射准直光束沿预设方向的线性偏振分量穿过所述固定偏振器;

恒定旋转偏振器,其设置在所述固定偏振器与所述样本之间,并且以恒定速度旋转,以根据恒定旋转频率规则地调制所述入射准直光束的偏振状态;

光电检测器元件,其一旦接收到从所述样本反射的反射准直光束就测量光谱辐射通量的暴露值;

恒定旋转分析仪,其设置在所述样本与所述光电检测器元件之间,并且以恒定速度旋转,以根据恒定旋转频率规则地调制所述反射准直光束的偏振状态;

固定分析仪,其设置在所述恒定旋转分析仪与所述光电检测器元件之间,并且以预设的方位角固定,以允许仅所述反射准直光束沿预设方向的线性偏振分量穿过所述固定分析仪;以及

处理器,其控制所述固定偏振器和所述固定分析仪的所述方位角、所述恒定旋转偏振器和所述恒定旋转分析仪的恒定角速度,并且通过分析由所述光电检测器元件测量的所述光谱辐射通量的所述暴露值来计算所述样本的光学性质,

其中,所述固定偏振器和所述固定分析仪一体地形成一个不具有波长相关性的线性偏振器,并且所述线性偏振器去除关于所述入射准直光束和所述反射准直光束的偏振状态误差,并且

其中,所述恒定旋转偏振器和所述恒定旋转分析仪一体地形成一个不具有波长相关性的恒定旋转线性偏振器,并且所述恒定旋转线性偏振器调制所述入射准直光束的偏振状态和所述反射准直光束的偏振状态。

2. 根据权利要求1所述的正交入射椭圆仪,其中,所述分束器、所述固定偏振器和所述固定分析仪一体地形成一个分束线性偏振器。

3. 根据权利要求2所述的正交入射椭圆仪,其中,所述分束线性偏振器是沃拉斯顿棱镜。

4. 根据权利要求1所述的正交入射椭圆仪,其中,所述光电检测器元件是选自以下中的至少之一:光谱仪中的合并像素或用于指定的波长带的像素,所述光谱仪包括电荷耦合器件CCD、互补金属氧化物半导体CMOS或者光电二极管阵列器件,其中,像素以线性或二维2D平面结构布置。

5. 根据权利要求4所述的正交入射椭圆仪,其中,所述光电检测器元件是选自以下中的至少之一:包括s偏振光谱仪和p偏振光谱仪的光谱仪集合中或一个光谱仪中的合并像素或用于指定的波长带的像素。

6. 根据权利要求1所述的正交入射椭圆仪,其中,当所述光源是选自气体激光器和激光二极管中的至少一个具有单一波长的光源装置时,所述光电检测器元件被配置成包括光电倍增管PMT和光电二极管的单点光电检测器。

7. 根据权利要求1所述的正交入射椭圆仪,其中,所述光电检测器元件是选自成像光电

检测器的一个像素,所述成像光电检测器包括CCD或CMOS,其中,像素以2D平面结构布置。

8. 根据权利要求1所述的正交入射椭圆仪,其中,在所述固定偏振器和所述固定分析仪中设置用于方位角调节的空心轴步进马达,并且在所述恒定旋转偏振器和所述恒定旋转分析仪中设置用于恒定角速度调节的恒定旋转空心轴马达。

9. 根据权利要求1所述的正交入射椭圆仪,其中,所述处理器包括:

计算单元,其根据由所述光电检测器元件测量的光的所述光谱辐射通量的暴露值来计算光谱辐射通量波形的傅立叶系数值,根据所述傅立叶系数值来计算所述样本的穆勒矩阵元素值,以及根据所述穆勒矩阵元素值分析和计算所述样本的光学性质值;

控制器,其使用空心轴步进马达来远程控制所述固定偏振器和所述固定分析仪的所述方位角,以及使用恒定旋转空心轴马达来远程控制所述恒定旋转偏振器和所述恒定旋转分析仪的所述恒定角速度;

存储单元,其存储测量值、计算值和分析值,所述测量值是所述光谱辐射通量的所述暴露值,所述计算值是所述傅立叶系数值和所述穆勒矩阵元素值,并且所述分析值是所述样本的所述光学性质值;以及

输出单元,其输出所述测量值、所述计算值和所述分析值。

10. 根据权利要求9所述的正交入射椭圆仪,其中,所述光源是选自氙灯、钨卤素灯、氩灯、激光驱动光源、气体激光器和激光二极管中的至少之一,或者从所述光源发射的光透射通过光纤。

11. 根据权利要求1所述的正交入射椭圆仪,还包括:

屏蔽室,其屏蔽光学路径以与外部大气隔开;以及
供气装置,其连接至所述屏蔽室以提供惰性气体。

12. 根据权利要求11所述的正交入射椭圆仪,其中,所述惰性气体是氮气或氩气。

13. 根据权利要求1所述的正交入射椭圆仪,还包括:

聚焦光学系统,其设置在所述恒定旋转偏振器与所述样本之间,并且使所述入射准直光束被会聚以聚焦在所述样本的局部区域上。

14. 根据权利要求13所述的正交入射椭圆仪,其中,所述聚焦光学系统是选自至少一个面镜、至少一个透镜或者至少一个面镜和至少一个透镜的集合中的一者,以便校正宽带波长的色差。

15. 根据权利要求14所述的正交入射椭圆仪,其中,在所述聚焦光学系统中,所述面镜或所述透镜涂覆有单个薄膜或多层薄膜,以提高透射或反射效率。

16. 根据权利要求1所述的正交入射椭圆仪,还包括:

样本传输系统,其包括:样本存储容器,其容纳并且存储多个样本;以及样本传输装置,其顺序地根据预设规则从所述样本存储容器中逐一抽取所述多个样本,将所抽取的样本布置在所述正交入射椭圆仪的样本支持器上,以及将测量完成的样本返回至其在所述样本存储容器的原始位置。

17. 根据权利要求1所述的正交入射椭圆仪,还包括:

样本对准系统,其包括:对准激光器,其发射用于样本对准的光;对准光学系统,其使从所述激光器发射的光沿预设方向入射在所述样本上;以及对准光电检测器,其接收入射到所述样本上之后反射的光并且确定所述样本的位置。

18. 根据权利要求1所述的正交入射椭圆仪,还包括:
振动抑制系统,其设置在所述正交入射椭圆仪的下部处,以防止测量环境的振动的影响。

19. 根据权利要求1所述的正交入射椭圆仪,还包括:
恒温器或冷却装置,其保持测量环境温度或执行冷却以防止由于温度变化而出现测量误差。

20. 一种使用权利要求1所述的正交入射椭圆仪来测量样本的光学性质的方法,所述方法包括:

样本安装操作,在所述样本安装操作中,将其光学性质旨在被测量的样本安装并对准在所述正交入射椭圆仪的所述样本支持器上;

方位角选择操作,在所述方位角选择操作中,由所述处理器选择所述固定偏振器和所述固定分析仪的方位角值;

方位角移动操作,在所述方位角移动操作中,通过所述处理器使所述固定偏振器和所述固定分析仪移动以设置方位角;

暴露测量操作,在所述暴露测量操作中,由所述光电检测器元件来测量根据所述恒定旋转偏振器和所述恒定旋转分析仪的方位角的变化了的所述反射准直光束的光谱辐射通量的暴露值;

傅立叶系数计算操作,在所述傅立叶系数计算操作中,由所述处理器根据所述光谱辐射通量的所述暴露值来计算光谱辐射通量波形的傅立叶系数值;

穆勒矩阵元素值计算操作,在所述穆勒矩阵元素值计算操作中,由所述处理器根据所述傅立叶系数值来计算所述样本的穆勒矩阵元素值;以及

样本光学性质分析操作,在所述样本光学性质分析操作中,由所述处理器根据所述穆勒矩阵元素值来分析和计算所述样本的光学性质值。

21. 根据权利要求20所述的方法,其中,所述光学性质是选自界面性质、薄膜厚度、复折射率、纳米形状、各向异性性质、表面粗糙度、构成比和结晶度中的至少之一。

正交入射椭圆仪以及使用其测量样本的光学性质的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及正交入射椭圆仪以及通过使用该正交入射椭圆仪来测量样本的光学性质的方法。更具体地,本发明涉及用于通过测量和分析由样本反射的光的偏振状态的变化来测量样本的光学性质的正交入射椭圆仪以及通过使用该正交入射椭圆仪来测量样本的光学性质的方法。

背景技术

[0002] 随着与半导体器件、平板显示器、薄膜太阳能电池、纳米压印、纳米生物、薄膜光学器件等有关的各个工业领域的快速发展,薄膜的厚度已经逐渐减小达到几个原子层的水平,并且纳米图案的形状已经从现有的二维(2D)结构复杂化成三维(3D)结构。因此,增加了对测量技术的需要,该测量技术用于以下过程:在产品的制造过程期间,在不损伤纳米样本地采用非接触方式的同时,准确地分析纳米级样本的形状和物理性质,例如薄膜的厚度和纳米图案的形状。在这些非接触纳米级测量技术之中,随着光源、光电检测器和计算机的发展,椭圆仪和使用该椭圆仪的方法已经被广泛地使用。

[0003] 椭圆仪的类型可以分为正交入射型和倾斜入射型。正交入射型是当测量光束垂直于样本的表面入射(即,入射角为 0°)时,测量由样本垂直反射的光的偏振状态的变化类型,以及倾斜入射型是通过允许测量光束的入射角具有从 0° 到 90° 范围内任意选择的值来执行测量的类型。其中,正交入射型具有使测量装置减小为更小尺寸和使测量光束减小到更小的优点,使得可以在样本中测量面积较小的内部区域。各种专利文件,例如美国专利注册第7355708号和美国专利注册第7889340号以及其他论文公开了这样的正交入射椭圆仪的基本结构和原理。

[0004] [正交入射椭圆仪的基本配置]

[0005] 光学元件旋转型椭圆仪可以基本上包括光源(LS)、偏振状态发生器(Polarization State Generator;PSG)、样本(SP)、偏振状态分析仪(Polarization State Analyzer)、检测光学系统(Detection Optic System;DOS)和光电检测器元件(Photodetector Element;PDE),并且每个部分的简要描述如下。光源用于使用光学系统将由灯发射的光转换为准直光束。偏振状态发生器是偏振光学系统,其用于使从光源发射的准直光束变为特定的偏振状态。样本被放置在调制后的入射准直光束的行进路径上。偏振状态分析仪是偏振光学系统,其用于分析由样本反射的反射准直光束的行进路径上的反射准直光束的偏振状态。光电检测器元件用于测量已经穿过偏振状态分析仪的指定波长带的反射准直光束的光量,作为例如电压或电流的值,并且样本的光学性质值可以使用处理器根据以这种方式测量的电压或电流值来计算,并且被存储或显示在屏幕上。检测光学系统被布置在偏振状态分析仪(PSA)与光电检测器元件(PDE)之间的反射准直光束的轴线上,其可以是效果与如下光学元件的效果相同的虚拟偏振光学系统,所述光学元件可以改变反射准直光束的偏振状态,并且包括安装在分束器和光谱仪(Spectrometer)中的面镜、光栅(Grating)等。

[0006] 如上所述,偏振状态发生器或偏振状态分析仪由偏振光学系统形成,其中,适当地布置了多个可旋转偏振光学元件,以便执行它们各自的作用。在此,从可旋转偏振光学元件之中选择的至少一个可旋转偏振光学元件以恒定速度旋转,并且除恒定速度偏振光学元件之外的其他可旋转偏振光学元件是固定偏振光学元件,其已经移动到先前指定的用于测量的方位角,以便在测量期间停止。

[0007] 这些可旋转偏振光学元件的类型或布置可以根据椭圆仪的类型而适当地改变,并且具体地,可旋转偏振光学元件可以包括线性偏振器和补偿器。另外,设置在偏振状态发生器中的线性偏振器被称为偏振器,并且设置在偏振状态分析仪中的线性偏振器被分类并称为分析仪。设置在偏振状态发生器中的补偿器被称为入射轴补偿器,并且设置在偏振状态分析仪中的补偿器被分类并被称为反射轴补偿器。

[0008] 相关技术的光学元件旋转型椭圆仪可以基于入射的角(或入射角)来分为倾斜入射型和正交入射型。关于入射角,在垂直于样本平面的几个平面之中,包括入射准直光束和反射准直光束的路径的平面被定义为入射平面,并且当来自入射平面的垂直于样本平面的轴线为参考轴时,入射准直光束或反射准直光束与参考轴之间的内角被定义为入射角,并且由 Φ 表示。正交入射型是采用其中入射角为 0° 的光学结构的类型,并且倾斜入射型是采用其中入射角不为 0° 的光学结构的类型。与倾斜入射型相比,正交入射型的优点在于,可以使测量装置更小并且可以将入射在样本上的光束的面积减小为更小,使得能够进行微小区域的内部的测量。

[0009] 倾斜入射或正交入射光学元件旋转型椭圆仪的原理描述如下。在倾斜入射或正交入射光学元件旋转型椭圆仪中,从光源发射的入射准直光束入射在偏振状态发生器上,该入射准直光束被改变成可以由偏振状态发生器控制的特定偏振状态,样本用调制成偏振状态的入射准直光束来照射,该入射准直光束的偏振状态通过样本被改变成为具有样本的物理性质信息的反射准直光束,该反射准直光束入射到偏振状态分析仪上并被改变成可以再次控制的特定偏振状态,使用光电检测器元件将已经经历一系列变化的反射准直光束测量为电信号,例如电压或电流,并且由处理器根据所测量的电信号来最终获得样本的光学性质信息。

[0010] 在相关技术的正交入射椭圆仪中实现偏振状态发生器和偏振状态分析仪时,公开了通过布置一个线性偏振器和一个恒定旋转补偿器来配置的单补偿器旋转型正交入射椭圆仪以及通过布置一个线性偏振器和两个恒定旋转补偿器来配置的双补偿器旋转型正交入射椭圆仪。

[0011] [相关技术的正交入射椭圆仪的配置]

[0012] 参照图1,作为相关技术的正交入射椭圆仪的示例性实施方式的单补偿器旋转型正交入射椭圆仪(10)包括光源(11)、分束器(12)、线性偏振器(13)、恒定旋转补偿器(14)、光谱仪(15)和处理器(16)。

[0013] 以下将根据测量原理的基本结构来描述图1的单补偿器旋转型正交入射椭圆仪(10)。从光源(11)发射的入射准直光束(L10a)通过分束器(12)沿垂直于样本(1000)的表面的方向行进,并且入射到固定偏振器(实现为线性偏振器(13))上。入射到固定偏振器上的入射准直光束(L10a)被调制为偏振状态,同时顺序地穿过固定偏振器和恒定旋转入射轴补偿器(实现为恒定旋转补偿器(14)),并且入射到样本(1000)上(L10b)。由样本(1000)反射

的反射准直光束 (L10c) 入射在恒定旋转反射轴补偿器 (也实现为恒定旋转补偿器 (14)) 上, 并且入射在恒定旋转反射轴补偿器上的反射准直光束 (L10c) 被再次调制为偏振状态, 同时顺序地穿过恒定旋转反射轴补偿器和固定分析仪 (也实现为线性偏振器 (13)), 并且通过分束器 (12) 入射到光谱仪 (15) 上 (L10d)。入射到光谱仪 (15) 上的反射准直光束 (L10d) 通过每个波长分开, 并且通过嵌入在光谱仪 (15) 中的光电检测器元件被转换成电数字信号值, 并且所测量的数字信号值被用于通过处理器 (16) 的样本 (1000) 的光学性质分析。

[0014] 在图1的示例性实施方式中, 检测光学系统包括分束器 (12)、嵌入在光谱仪 (15) 中的面镜和光栅。另外, 在图1的示例性实施方式中, 线性偏振器 (13) 既用作固定分析仪, 又用作固定偏振器, 并且恒定旋转补偿器 (14) 用作恒定旋转反射轴补偿器以及恒定旋转入射轴补偿器。因此, 存在可以将测量装置的尺寸减小为小于倾斜入射型的优点。

[0015] 线性偏振器主要通过以棱镜形状处理和组装具有双折射特性的晶体例如 MgF_2 、 CaCO_3 和 SiO_2 来配置。在入射到线性偏振器上的光的电场分量之中, 线性偏振器的沿透射轴方向的分量可以被透射, 而垂直于透射轴的分量无法透射, 使得透射光处于线性偏振状态。在没有光学活性 (Optical Activity) 的棱柱形线性偏振器的情况下, 透射光的线性偏振状态并不根据波长类型受影响, 并且由 MgF_2 形成的 Rochon 型线性偏振器可以用于 150nm 至 6, 500nm 的宽带波长范围。

[0016] 同时, 当具有任意偏振特性的光通过补偿器时, 在入射在补偿器上的光的电场分量之中, 最理想的是提供 $\lambda/4$ 波片以形成 90° 作为沿快轴方向通过的电场分量与沿与快轴方向垂直的慢轴方向通过的电场分量之间的差。然而, 在使用多个波长的情况下, 如上所述制造补偿器存在困难。具体地, 为了制造具有能够在多个波长上执行实时测量的补偿器的光谱学椭圆仪, 适合于测量波长区域 (measurement wavelength region) 的补偿器应当被制造, 但是难以制造。另外, 由于补偿器的相位延迟 (Phase Retardation) 值对于每个波长是不同的, 因此应当在用于测量之前通过校准过程来找到相位延迟值, 但是校准方法非常复杂, 在校准过程期间具有出现误差的问题。

[0017] 参照图2, 作为相关技术的正交入射椭圆仪的另一示例性实施方式的双补偿器旋转型正交入射椭圆仪 (20) 包括光源 (21)、分束器 (22)、线性偏振器 (23)、第一恒定旋转补偿器 (24a)、第一波片 (24aw)、第一恒定旋转空心轴马达 (24am)、第二恒定旋转补偿器 (24b)、第二波片 (24bw)、第二恒定旋转空心轴马达 (24bm)、光谱仪 (25)、处理器 (26)、屏蔽室 (shielding booth) (27) 和供气装置 (28)。与单补偿器旋转型正交入射椭圆仪 (10) 不同, 双补偿器旋转型正交入射椭圆仪 (20) 还包括第二恒定旋转补偿器 (24b)、第一波片 (24aw) 和第二波片 (24bw), 以便进一步加宽测量波长区域。另外, 由于波长小于深UV的波长范围的光在测量光束的路径中容易被氧气、水分等吸收, 并且因此为了防止这种情况, 测量光学系统被屏蔽室 (27) 屏蔽, 并且还提供吹扫系统 (Purging System), 吹扫系统用于使用供气装置 (28) 以例如高纯度氮气或高纯度氩气的气体填充测量光束路径。

[0018] 以下将描述根据测量原理的基本结构的图2的双补偿器旋转型正交入射椭圆仪 (20)。从光源 (21) 发射的入射准直光束 (L20a) 通过分束器 (22) 沿垂直于样本 (1000) 的表面的方向入射在固定偏振器 (实现为线性偏振器 (23)) 上。入射在固定偏振器上的入射准直光束 (L20a) 被调制为入射准直光束的偏振状态, 同时在入射光轴上顺序地穿过固定偏振器、第一恒定旋转入射轴补偿器 (实现为第一恒定旋转补偿器 (24a)) 和第二恒定旋转入射轴补

偿器(实现为第二恒定旋转补偿器(24b)),并且入射在样本(1000)上(L20b)。由样本(1000)反射的反射准直光束(L20c)被调制为反射准直光束的偏振状态,同时在反射光轴上顺序地穿过第一恒定旋转反射轴补偿器(也实现为第二恒定旋转补偿器(24b))、第二恒定旋转反射轴补偿器(也实现为第一恒定旋转补偿器(24a))和固定分析仪(也实现为线性偏振器(23)),并且通过分束器(22)入射到光谱仪(25)上(L20d)。入射到光谱仪(25)上的反射准直光束(L20d)通过每个波长分开(L20d),并且通过嵌入在光谱仪(25)中的光电检测器元件被转换成电数字信号值,并且所测量的数字信号值被用于通过处理器(26)的样本(1000)的光学性质分析。

[0019] 在图2的示例性实施方式中,线性偏振器(23)既用作固定分析仪,又用作固定偏振器。另外,在图2的示例性实施方式中,第一恒定旋转补偿器(24a)和第一波片(24aw)不仅用作第一恒定旋转入射轴补偿器,而且用作第二恒定旋转反射轴补偿器,以及图2的第二恒定旋转补偿器(24b)和第二波片(24bw)不仅用作第二恒定旋转入射轴补偿器,而且用作第一恒定旋转反射轴补偿器。这种配置的优点是减小测量装置的尺寸以小于倾斜入射型。

[0020] 然而,像单补偿器旋转型正交入射椭圆仪(10)一样,双补偿器旋转型正交入射椭圆仪(20)还涉及由于补偿器和波片的波长相关性而出现的制造和校准的复杂性。

[0021] 综上所述,椭圆仪基本上包括偏振状态发生器(PSG)和偏振状态分析仪(PSA)。在相关技术的正交入射椭圆仪的情况下,一个固定线性偏振器和一个或两个恒定旋转补偿器被用作具体实现PSG和PSA的部件。然而,由于这样的补偿器具有波长相关性,其中,相对相位延迟具有取决于波长的不同值,因此设备校准是必不可少的,并且在此,存在在执行复杂的校准过程的过程中可能出现误差的问题。另外,如果旨在使测量波长区域增加为更宽以增强测量的可靠性,则需要新开发适合于此的补偿器。

[0022] [相关技术文件]

[0023] [专利文件]

[0024] (专利文件1)1.美国专利注册第7355708号(“Normal incidence rotating compensator ellipsometer(正交入射旋转补偿器椭圆仪)”,2008.04.08)

[0025] (专利文件2)2.美国专利注册第7889340号(“Normal incidence ellipsometer with complementary waveplate rotating compensators(具有互补波片旋转补偿器的正交入射椭圆仪)”,2011.02.15)

[0026] [非专利文件]

[0027] (非专利文件1)1.R.M.A.Azzam,“PIE:Perpendicular-Incidence Ellipsometry-Application to the Determination of the Optical Properties of Uniaxial and Biaxial Absorbing Crystals(垂直入射椭圆偏振法-在确定单轴和双轴吸收晶体的光学性质中的应用)”,Opt.Commun.19,122(1976)。

[0028] (非专利文件2)2.R.M.A.Azzam,“NIRSE:Normal incidence Rotating-Sample Ellipsometer(正交入射旋转样本椭圆仪)”,Opt.Commun.20,405(1977)。

[0029] (非专利文件3)3.Y.J.Cho等人,“Universal Evaluations and Expressions of Measuring Uncertainty for Optical element rotation type Spectroscopic Ellipsometers(为光学元件旋转型光谱学椭圆仪测量不确定度的通用评估和表达)”,Opt.Express 23,15481(2015)。

发明内容

[0030] 技术问题

[0031] 本发明的目的是提供正交入射椭圆仪以及使用该正交入射椭圆仪测量样本的光学性质的方法,能够简化设备校准过程,并且通过以没有波长相关性的线性偏振器代替波长相关补偿器来容易地实现测量波长区域的扩展。

[0032] 技术解决方案

[0033] 在一个总体方面中,正交入射椭圆仪可以包括:光源,其包括准直光学系统,并且朝向样本发射入射准直光束;分束器,其设置在光源与样本之间,并且沿垂直于样本的表面的方向引导入射准直光束的一部分;固定偏振器,其设置在分束器与样本之间,并且以预设的方位角固定,以允许仅入射准直光束沿预设方向的线性偏振分量穿过该固定偏振器;恒定旋转偏振器,其设置在固定偏振器与样本之间,并且以恒定速度旋转,以根据恒定旋转频率规则地调制入射准直光束的偏振状态;光电检测器元件,其一旦接收到从样本反射的反射准直光束就测量光谱辐射通量的暴露(exposure);恒定旋转分析仪,其设置在样本与光电检测器元件之间,并且以恒定速度旋转,以根据恒定旋转频率规则地调制反射准直光束的偏振状态;固定分析仪,其设置在恒定旋转分析仪与光电检测器元件之间,并且以预设的方位角固定,以允许仅反射准直光束沿预设方向的线性偏振分量穿过固定分析仪;以及处理器,其控制固定偏振器和固定分析仪的方位角、恒定旋转偏振器和恒定旋转分析仪的恒定角速度,并且通过分析由光电检测器元件测量的光谱辐射通量的暴露值来计算样本的光学性质,其中,固定偏振器和固定分析仪一体地形成一个线性偏振器,并且恒定旋转偏振器和恒定旋转分析仪一体地形成一个恒定旋转线性偏振器。

[0034] 在此,分束器、固定偏振器和固定分析仪一体地形成一个分束线性偏振器。另外,在此,分束线性偏振器可以是沃拉斯顿棱镜(Wollaston Prism)。

[0035] 另外,光电检测器元件可以是选自以下像素中的至少一个:光谱仪中的合并像素或用于指定的波长带的像素,该光谱仪包括电荷耦合器件(CCD)、互补金属氧化物半导体(CMOS)或者光电二极管阵列器件,在其中,像素以线性或二维(2D)平面结构布置。另外,在此,光电检测器元件可以是选自以下像素中的至少一个:包括s偏振光谱仪和p偏振光谱仪的光谱仪集合中或一个光谱仪中的合并像素或用于指定的波长带的像素。

[0036] 替代地,当光源是具有单一波长的光源装置时,光电检测器元件可以是包括光电倍增管(PMT)和光电二极管的单点光电检测器。具有单一波长的光源装置可以是选自气体激光器和激光二极管中的至少一个。

[0037] 替代地,光电检测器元件可以是选自成像光电检测器的一个像素,该成像光电检测器包括CCD或CMOS,其中,允许具有指定波长带的光透射通过的滤色器和像素以2D平面结构布置。

[0038] 另外,可以在固定偏振器和固定分析仪中设置用于方位角调节的空心轴步进马达,并且可以在恒定旋转偏振器和恒定旋转分析仪中设置用于恒定角速度调节的恒定旋转空心轴马达。

[0039] 另外,处理器可以包括:计算单元,其根据由光电检测器元件测量的光的光谱辐射通量的暴露值来计算光谱辐射通量波形的傅立叶系数值,根据傅立叶系数值来计算样本的穆勒矩阵元素值,以及根据穆勒矩阵元素值来分析和计算样本的光学性质值;控制器,其使

用空心轴步进马达来远程控制固定偏振器和固定分析仪的方位角,并且使用恒定旋转空心轴马达来远程控制恒定旋转偏振器和恒定旋转分析仪的恒定角速度;存储单元,其存储作为光谱辐射通量的暴露值的测量值、作为傅立叶系数值和穆勒矩阵元素值的计算值、以及作为样本的光学性质值的分析值;以及输出单元,其输出测量值、计算值和分析值。

[0040] 另外,光源可以是选自氙灯、钨卤素灯、氙灯、激光驱动光源、气体激光器和激光二极管中的至少一种,或者从其发射的光可以透射通过光纤。

[0041] 另外,正交入射椭圆仪还可以包括:屏蔽室,其屏蔽光学路径以与外部大气隔开;以及供气装置,其连接至屏蔽室以提供惰性气体。在此,惰性气体可以是氮气或氩气。

[0042] 另外,正交入射椭圆仪还可以包括:聚焦光学系统,其设置在恒定旋转偏振器与样本之间,并且使入射准直光束被会聚以聚焦在样本的局部区域上。在此,聚焦光学系统可以是选自至少一个面镜、至少一个透镜或者至少一个面镜和至少一个透镜的集合中的一者,以便校正宽带波长的色差。另外,在此,在聚焦光学系统中,面镜或透镜可以涂覆有单个薄膜或多层薄膜,以提高透射或反射效率。

[0043] 另外,正交入射椭圆仪还可以包括样本传输系统,其包括:样本存储容器,其容纳并且存储多个样本;以及样本传输装置,其顺序地根据预设规则从样本存储容器中逐一抽取多个样本,将所抽取的样本布置在正交入射椭圆仪的样本支持器上,以及将测量完成的样本返回至其在样本存储容器的原始位置。

[0044] 另外,正交入射椭圆仪还可以包括样本对准系统,其包括:对准激光器,其发射用于样本对准的光;对准光学系统,其使从激光器发射的光沿预设方向入射在样本上;以及对准光电检测器,其接收入射到样本上之后反射的光并且确定样本的位置。

[0045] 另外,正交入射椭圆仪还可以包括:振动抑制系统,其设置在正交入射椭圆仪的下部处,以防止测量环境的振动的影晌。

[0046] 另外,正交入射椭圆仪还可以包括:恒温器或冷却装置,其保持测量环境温度或执行冷却以防止由于温度变化而出现测量误差。

[0047] 在另一总体方面中,使用正交入射椭圆仪来测量样本的光学性质的方法可以包括:样本安装操作,其中,将其光学性质旨在被测量的样本安装并对准在正交入射椭圆仪的样本支持器上;方位角选择操作,其中,由处理器选择固定偏振器和固定分析仪的方位角值;方位角移动操作,其中,通过处理器使固定偏振器和固定分析仪移动以设置方位角;暴露测量操作,其中,由光电检测器元件来测量根据恒定旋转偏振器和恒定旋转分析仪的方位角的变化反射的准直光束的光谱辐射通量的暴露值;傅立叶系数计算操作,其中,由处理器根据光谱辐射通量的暴露值来计算光谱辐射通量波形的傅立叶系数值;穆勒矩阵元素值计算操作,其中,由处理器根据傅立叶系数值来计算样本的穆勒矩阵元素值;以及样本光学性质分析操作,其中,由处理器根据穆勒矩阵元素值来分析和计算样本的光学性质值。

[0048] 在此,光学性质可以是选自界面性质、薄膜厚度、复折射率、纳米形状、各向异性性质、表面粗糙度、构成比和结晶度中的至少一种。

[0049] 有益效果

[0050] 根据本发明的示例性实施方式,在配置正交入射椭圆仪中使用不具有波长相关性的线性偏振器作为用于分析偏振状态的装置可以具有解决一度在具有波长相关性的补偿器中发生的各种问题的显著效果。更具体地,根据本发明,存在通过排除波长相关性来简化

设备校准过程的效果,并且因此,具有显著减少在复杂设备校准过程中出现误差的效果。另外,在相关技术中,为了扩展测量波长区域,应当新开发适合于此的补偿器,但是在本发明中,不存在这样做的需要,并且因此,更自由地扩展测量波长区域。另外,根据本发明,随着测量波长区域扩展,最终可以提高正交入射椭圆仪的测量可靠性。

附图说明

- [0051] 图1是相关技术的单补偿器旋转型正交入射椭圆仪的示意图。
- [0052] 图2是相关技术的双补偿器旋转型正交入射椭圆仪的示意图。
- [0053] 图3是根据本发明的第一示例性实施方式的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪的示意图。
- [0054] 图4是根据本发明的第二示例性实施方式的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪的示意图。
- [0055] 图5是根据本发明的第三示例性实施方式的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪的示意图。
- [0056] 图6是示出了使用本发明的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪测量样本的光学性质的方法的流程图。
- [0057] ****主要元件的详细描述****
- [0058] 10: (相关技术的) 单补偿器旋转型正交入射椭圆仪
- [0059] 11:光源 12:分束器
- [0060] 13:线性偏振器 14:恒定旋转补偿器
- [0061] 15:光谱仪 16:处理器
- [0062] L10a:从光源发射的入射准直光束
- [0063] L10b:入射在样本上的入射准直光束
- [0064] L10c:由样本反射的反射准直光束
- [0065] L10d:入射在光谱仪上的反射准直光束
- [0066] 20: (相关技术的) 双补偿器旋转型正交入射椭圆仪
- [0067] 21:光源 22:分束器
- [0068] 23:线性偏振器
- [0069] 24a:第一恒定旋转补偿器 24aw:第一波片
- [0070] 24am:第一恒定速度空心轴马达
- [0071] 24b:第二恒定旋转补偿器 24bw:第二波片
- [0072] 24bm:第二恒定速度空心轴马达
- [0073] 25:光谱仪 26:处理器
- [0074] 27:屏蔽室 28:供气装置
- [0075] L20a:从光源发射的入射准直光束
- [0076] L20b:入射在样本上的入射准直光束
- [0077] L20c:由样本反射的反射准直光束
- [0078] L20d:入射在光谱仪上的反射准直光束
- [0079] 100:本发明的第一示例性实施方式的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪

- [0080] 101:光源 102:分束器
- [0081] 103:线性偏振器 103m:空心轴步进马达
- [0082] 104:恒定旋转线性偏振器 104m:恒定旋转空心轴马达
- [0083] 105:光电检测器元件 106:处理器
- [0084] 107:屏蔽室 108:供气装置
- [0085] 109:聚焦光学系统
- [0086] L100a:从光源发射的入射准直光束
- [0087] L100b:入射在样本上的入射准直光束
- [0088] L100c:由样本反射的反射准直光束
- [0089] L100d:入射在光电检测器元件上的反射准直光束
- [0090] 200:本发明的第二示例性实施方式的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪
- [0091] 201:光源 203:分束线性偏振器
- [0092] 204:恒定旋转线性偏振器 204m:恒定旋转空心轴马达
- [0093] 205:光电检测器元件 206:处理器
- [0094] L200a:从光源发射的入射准直光束
- [0095] L200d:入射在光电检测器元件上的反射准直光束
- [0096] 300:本发明的第三示例性实施方式的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪
- [0097] 301:光源 302:分束器
- [0098] 303:分束线性偏振器
- [0099] 304:恒定旋转线性偏振器 304m:恒定旋转空心轴马达
- [0100] 305s:s偏振光光电检测器元件 305p:p偏振光光电检测器元件
- [0101] 306:处理器
- [0102] L300a:从光源发射的入射准直光束
- [0103] L300s:入射在s偏振光光电检测器元件上的反射准直光束
- [0104] L300p:入射在p偏振光光电检测器元件上的反射准直光束
- [0105] 1000:样本

具体实施方式

[0106] 在下文中,将参照附图详细描述根据本发明的具有如上所述的配置的正交入射椭圆仪和使用其测量样本的光学性质的方法。

[0107] [本发明的正交入射椭圆仪的基本配置]

[0108] 在本发明中,如上所述的相关技术的问题通过使用没有波长相关性的线性偏振器代替具有波长相关性的补偿器来解决。本发明的正交入射椭圆仪的几个示例性实施方式在图3至图5中示出,并且每个示例性实施方式将稍后更详细地描述。本发明的正交入射椭圆仪基本上包括光源、分束器、固定偏振器、恒定旋转偏振器、光电检测器元件、恒定旋转分析仪、固定分析仪和处理器。每个部分将描述如下。

[0109] 包括准直仪的光源用于朝向样本辐射入射准直光束。在此,光源可以是选自氙灯、钨卤素灯、氖灯、激光驱动光源、气体激光器和激光二极管中的至少一种,或者从其发射的光可以透射通过光纤。

[0110] 分束器设置在光源与样本之间,并且用于沿垂直于样本表面的方向引导入射准直光束的一部分。

[0111] 固定偏振器设置在分束器与样本之间,并且以预设的方位角固定,以允许入射准直光束沿预设方向的线性偏振分量穿过固定偏振器。在此,固定偏振器的方位角不总是固定的,并且固定偏振器本身是可移动的,以便当测量该样本时被调节为期望的方位角;然而,由于固定偏振器在测量的时间处是固定的,因此使用术语“固定”。在此,为了调节固定偏振器的方位角,可以在固定偏振器中设置空心轴步进马达。

[0112] 恒定旋转偏振器设置在固定偏振器与样本之间,并且以恒定速度旋转,以用于根据恒定旋转频率来规则地调制入射准直光束的偏振状态。在此,为了调节恒定旋转偏振器的恒定角速度,可以在恒定旋转偏振器中设置恒定旋转空心轴马达。

[0113] 光电检测器元件用于一旦接收到从样本反射的反射准直光束就测量光谱辐射通量的暴露。在此,光电检测器元件可以是选自以下中的至少一个:光谱仪中的合并像素或用于指定的波长带的像素,该光谱仪包括电荷耦合器件(CCD)、互补金属氧化物半导体(CMOS)或者光电二极管阵列器件,在其中,像素以线性或二维(2D)平面结构布置。另外,在此,光电检测器元件可以是选自以下中的至少一个:包括s偏振光谱仪和p偏振光谱仪的光谱仪集中或一个光谱仪中的合并像素或用于指定的波长带的像素。

[0114] 详细地,当光源使用白光时,可以使用光谱仪作为用于检测光的装置,并且在此,基本上检测到光的是在光谱仪中设置的光电检测器阵列中的每个像素或每个合并像素组。也就是说,可以理解,每个像素或每个合并像素组而不是光谱仪本身用作光电检测器元件。

[0115] 备选地,当光源是具有单一波长的光源装置时,光电检测器元件可以是包括光电信倍增管(PMT)和光电二极管的单点光电检测器。具有单一波长的光源装置可以是选自气体激光器和激光二极管中的至少一个。备选地,光电检测器元件可以是选自成像光电检测器的一个像素,该成像光电检测器包括CCD或CMOS,其中,像素以2D平面结构布置。在此,如果光源是具有单一波长的光源装置,则不需要其他部件,但是如果光源是具有多个波长的多波长光源装置,则允许具有指定波长带的光透射通过的滤色器还可以设置在光源与光电检测器元件(包括成像光电检测器的像素,该成像光电检测器包括CCD或CMOS)之间。

[0116] 在发送外部触发之前,光电检测器元件保持在待机状态,并且当发送外部触发时,光电检测器元件执行测量。如果光电检测器元件是选自例如光谱仪的CCD、CMOS或光电二极管阵列之类的积分光电检测器中的一个像素或合并像素,则每个光电检测器元件以输出或临时存储在指定的积分时间期间的暴露值的方式操作,并且如果光电检测器元件是非积分光电检测器,例如包括PMT或光电二极管的光电检测器,则光电检测器可以以输出或临时存储在很短的积分时间期间的暴露值,即大约是光的光谱辐射通量值的方式操作。

[0117] 恒定旋转分析仪设置在样本与光电检测器元件之间,并且以恒定速度旋转,以根据恒定旋转频率规则地调制反射准直光束的偏振状态。在此,由于恒定旋转分析仪具有与上述恒定旋转偏振器不同的作用,因此使用单独的名称。如上所述,在倾斜入射型的情况下,恒定旋转分析仪和恒定旋转偏振器实际上被实现为单独的部件,但是在正交入射型的情况下,恒定旋转分析仪和恒定旋转偏振器可以被实现为一个部件(相应地,与上述的倾斜入射椭圆仪相比,正交入射椭圆仪可以使装置紧凑)。也就是说,在本发明中,恒定旋转偏振器和恒定旋转分析仪一体地形成一个恒定旋转线性偏振器。

[0118] 固定分析仪设置在恒定旋转分析仪与光电检测器元件之间,并且以预设的方位角固定,以允许仅反射准直光束沿预设方向的线性偏振分量穿过固定分析仪。像固定偏振器一样,固定分析仪本身是可移动的,但是在测量期间是固定的,因此使用术语“固定”。另外,像恒定旋转偏振器和恒定旋转分析仪一样,固定偏振器和固定分析仪一体地形成一个线性偏振器。此外,为了进一步使装置小型化和一体化,可以将分束器、固定偏振器和固定分析仪一体地形成一个分束线性偏振器。在此,分束线性偏振器可以由沃拉斯顿棱镜形成。

[0119] 处理器用于控制固定偏振器和固定分析仪的方位角以及恒定旋转偏振器和恒定旋转分析仪的恒定角速度,并且分析由光电检测器元件测量的光谱辐射通量的暴露值,以计算样本的光学性质。具体地,处理器包括:执行各种计算的计算单元;控制上述各种部件的驱动力的控制器;存储计算所需的值的存储单元;以及输出分析结果的输出单元。计算单元可以根据由光电检测器元件测量的光的光谱辐射通量的暴露值来计算光谱辐射通量波形的傅立叶系数(值,根据傅立叶系数值来计算样本的穆勒矩阵元素值,以及根据穆勒矩阵(Mueller Matrix)元素值分析和计算样本的光学性质值。控制器可以使用空心轴步进马达(Hollow Shaft Stepping Motor)来远程控制固定偏振器和固定分析仪的方位角,并且使用恒定速度旋转空心轴马达来远程控制恒定旋转偏振器和恒定旋转分析仪的恒定角速度。存储单元存储由计算单元执行的计算所需的值,也就是说,根据光电检测器元件测量的暴露值(测量值)、用于光谱辐射通量波形的傅立叶系数值、穆勒矩阵元素值(计算值)、以及样本的光学性质值(分析值)。输出单元通过监视器或打印装置以用户期望的形式例如屏幕或打印输出出来输出测量值、计算值和分析值。

[0120] 另外,本发明的正交入射椭圆仪还可以包括:屏蔽室,其屏蔽光学路径以与外部大气隔开;以及供气装置,其连接至屏蔽室以提供例如氮气或氩气等惰性气体。因此,可以有效地防止其中特定波长的光被水分、氧气等吸收的问题,并且最终,如上所述可以平滑地扩展测量波长区域。

[0121] 在如上所述配置的本发明的正交入射椭圆仪中,与图1或图2中所示的相关技术的椭圆仪不同,恒定旋转补偿器由恒定旋转线性偏振器代替。相关技术的椭圆仪中使用的补偿器具有波长相关性,其中,如上所述补偿器的相位延迟值针对每个波长而变化,并且因此需要复杂的校准过程,并且存在在在这样的校准过程期间出现误差的问题。然而,根据本发明,通过去除补偿器本身以及用无波长相关性的线性偏振器来代替补偿器,这样的校准过程本身可以被显著简化,并且也可以根本上排除由此导致的误差的出现。

[0122] 具体地,在本发明的正交入射椭圆仪中,线性偏振器(固定偏振器和固定分析仪的作用)用于去除在入射准直光束轴线上光源和分束器可能发生的偏振状态误差以及在反射准直光束轴线上分束器和检测光学系统可能发生的偏振状态误差。另外,恒定旋转线性偏振器(恒定旋转偏振器和恒定旋转分析仪的作用)用于根据恒定旋转频率规则地调制入射准直光束和反射准直光束的偏振状态。以这种方式,由于本发明的正交入射椭圆仪不使用具有波长相关性的偏振光学元件,因此设备校准过程非常简单,使得易于在设备之间进行匹配,并且测量波长区域可以容易地扩展至宽带,以提高测量可靠性。

[0123] [本发明的正交入射椭圆仪的另外的配置]

[0124] 本发明的正交入射椭圆仪还可以包括另外的部件,例如聚焦光学系统、样本传输系统、样本对准系统、振动抑制系统、恒温器或冷却装置,以提高测量精度和用户方便性。

[0125] 当正交入射椭圆仪在例如半导体工业的领域中使用,样本中要测量的区域的尺寸非常小,例如数十微米,并且因此可以在样本的前部路径中选择性地提供聚焦光学系统,使得入射光可以平滑地聚焦在样本的局部区域上。也就是说,聚焦光学系统设置在恒定旋转偏振器与样本之间,并且用于会聚入射准直光束,以便聚焦在样本的局部区域上。具体地,聚焦光学系统可以是由选自至少一个面镜、至少一个透镜或者至少一个面镜和至少一个透镜的集合(set)中的一个而形成的,以便校正宽带波长的色差。在此,为了提高透射或反射效率,面镜或透镜可以涂覆有单个薄膜或多层薄膜。

[0126] 同时,当正交入射椭圆仪在半导体工业领域中使用,重要的是在短时间内测量多个晶片样本,并且为此,可以提供样本传输系统。具体地,样本传输系统可以包括容纳并且存储多个样本的样本存储容器;以及样本传输装置,其顺序地根据预设规则从样本存储容器中逐一抽取多个样本、将所述抽取的样本布置在正交入射椭圆仪的样本支持器上、以及将测量完成的样本返回至其样本存储容器的原始位置。在此,样本支持器可以由六个自由度系统形成,六个自由度系统包括上下移动和左右移动的三个自由度的平行移动以及具有两个自由度的倾斜调节和旋转功能,使得样本可以在测量位置中自由地对准和平滑地改变。

[0127] 另外,可以提供样本对准系统,以使得样本能够在这样短的时间内在测量过程中被更准确和快速地对准。具体地,样本对准系统可以包括发射用于样本对准的光的对准激光器;允许从激光器发射的光沿预设方向入射在样本上的用于对准的光学系统;以及用于对准的光电检测器,该光电检测器一旦接收到入射到样本上后反射的光就确定样本的位置。

[0128] 另外,可以将振动抑制系统设置在正交入射椭圆仪的下部处,以防止测量环境的振动的影响。另外,为了防止由于温度变化而出现的测量误差,可以在光源、偏振光学元件、样本和光电检测器元件中设置恒温器,以保持测量环境的温度,或者可以在光电检测器元件中设置冷却装置以执行冷却。

[0129] [本发明的正交入射椭圆仪的多个示例性实施方式]

[0130] 图3示出了根据本发明的第一示例性实施方式的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪的示意图。本发明的第一示例性实施方式的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪(100)包括光源(101)、分束器(102)、线性偏振器(103)、空心轴步进马达(103m)、恒定旋转线性偏振器(104)、恒定旋转空心轴马达(104m)、光电检测器元件(105)和处理器(106)。在第一示例性实施方式中,基本配置的描述中的线性偏振器(103)既用作固定偏振器又用作固定分析仪,并且恒定旋转线性偏振器(104)既用作恒定旋转偏振器又用作恒定旋转分析仪。

[0131] 另外,如上所述,第一示例性实施方式的正交入射椭圆仪(100)可以包括用于扩展测量波长范围的屏蔽室(107)和供气装置(108),并且可以包括用于平滑地聚焦在样本(1000)的局部区域的聚焦光学系统(109)。

[0132] 图4示出了根据本发明的第二示例性实施方式的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪的示意图。本发明的第二示例性实施方式的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪(200)包括光源(201)、分束线性偏振器(203)、恒定旋转线性偏振器(204)、恒定旋转空心轴马达(204m)、光电检测器元件(205)和处理器(206)。在第二示例性实施方式中,分束线性偏振器(203)在基本配置的描述中起着分束器、固定偏振器和固定分析仪的所有作用,使得设备可

以进一步小型化和一体化。

[0133] 在图4中,未示出屏蔽室、供气装置、聚焦光学系统等,但是在图4的第二示例性实施方式中另外地提供了这些部件(并且稍后在图5的第三示例性实施方式中描述)。

[0134] 图5示出了根据本发明的第三示例性实施方式的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪的示意图。本发明的第三示例性实施方式的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪(300)包括光源(301)、分束器(302)、分束线性偏振器(303)、恒定旋转线性偏振器(304)、恒定旋转空心轴马达(304m)、s偏振光电检测器元件(305s)、p偏振光电检测器元件(305p)和处理器(306)。在第三示例性实施方式中,s偏振光电检测器元件(305s)和p偏振光电检测器元件(305p)在基本配置的描述中用作光电检测器元件。同时,在第三示例性实施方式中,分束线性偏振器(303)在基本配置的描述中起着分束器、固定偏振器和固定分析仪的所有作用。在此,进一步设置分束器(302),以形成如从图5中可以看到将从光源(301)发射的光朝向样本(1000)引导的光学路径。

[0135] 另外,在本发明的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪中,通过偏振元件的恒定旋转空心轴马达进行的恒定旋转线性偏振器的旋转可以是选自恒定速度旋转或步进旋转中的一种。

[0136] [使用本发明的正交入射椭圆仪来测量样本的光学性质的原理]

[0137] 下面将详细描述使用如上所述配置的本发明的正交入射椭圆仪来测量样本的光学性质的原理。关于本发明的正交入射椭圆仪中使用的固定偏振器、恒定旋转偏振器、恒定旋转分析仪和固定分析仪的方位角,在固定偏振器处的线性偏振器的透射轴的位置、在恒定旋转偏振器处的线性偏振器的透射轴的位置、在恒定旋转分析仪处的线性偏振器的透射轴的位置、以及在固定分析仪处的线性偏振器的透射轴的位置基于任意选择的参考轴的位置而被描述为 P 、 P_r 、 A_r 和 A 。

[0138] 通过以下等式将周期为 $T(=2\pi/\omega)$ 的任意光谱辐射通量波形函数 $I_{ex}(t)$ 表示为时间 (t) 的函数。

$$[0139] \quad I_{ex}(t) = I'_0 + \sum_{n=1}^{N_{ho}} [A'_n \cos(n\omega t) + B'_n \sin(n\omega t)] \quad (1)$$

[0140] 在此,光谱辐射通量波形的傅立叶系数分量之中的直流(dc)分量 I'_0 、光谱辐射通量波形的傅立叶系数分量之中的交流(ac)分量 (A'_n, B'_n) 、以及恒定旋转偏振的角速度 ω 、 N_{ho} 是不为0的傅立叶系数分量之中最大的索引值。

[0141] 因此,在没有误差的理想线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪中,由光电检测器元件在时间 t 处测量的多色波长(Polychromatic Wavelength)处的光谱辐射通量值可以表示为以下一般波形的等式。

$$[0142] \quad I(t) = I'_0 + \sum_{n=1}^{N_{ho}} [A'_n \cos(n\omega t) + B'_n \sin(n\omega t)] \quad (2)$$

[0143] 在此, I'_0 是傅立叶系数的直流分量, A'_n 和 B'_n 是傅立叶系数的AC分量, $\omega(=2\pi/T)$ 是恒定旋转线性偏振器以恒定速度旋转时的角速度,以及 N_{ho} 是非零傅立叶系数的AC分量之中的最高的索引值。

[0144] 对于线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪,使用光电检测器元件准确地测量光谱辐射通量波形的傅立叶系数是非常重要的。现有技术的实时光谱学椭圆仪作为光电检测器使用能够尽快收集傅立叶系数的频谱用于具有高精度的实时测量的电荷耦合器件 (CCD) 或光电二极管阵列 (PD阵列)。CCD或PD阵列的每个像素或每个合并 (binning) 像素组都用作一个光电检测器元件。CCD或PD阵列的输出信号与积分时间以及光谱辐射通量成比例,并且因此 CCD或PD阵列被称为积分光电检测器。

[0145] CCD或PD阵列的数据测量过程可以被分类为帧获取过程和帧读取过程。可以每测量周期生成一个参考脉冲,也就是说,可以以 T/J 的相等间隔生成在以恒定速度旋转的恒定速度旋转光学元件系统中以恒定角速度的一个旋转,即相对于恒定角速度的旋转周期 $T (= 2\pi/\omega)$ 和 J 个恒定时钟脉冲。参考脉冲是指示由椭圆仪开始测量的参考时间,并且恒定时钟脉冲可以作为用于由CCD或PD阵列进行数据测量的外部触发而被传送。在将恒定时钟脉冲作为外部触发传送到CCD或PD阵列之后,可以按以下一系列顺序来处理在周期 T 的时间内由CCD或PD阵列进行数据测量的详细过程。如果CCD或PD阵列的每个像素或每个合并 (binning) 像素组中的一个光电检测器元件在接收作为外部触发的恒定时钟脉冲之后开始暴露之前执行将入射光的光子存储为光电子的测量暴露的过程达时间延迟 T_d 之后的积分时间 T_i ,并且然后执行将测量的暴露转换为电信号的帧获取过程,则存在等待接收下一个恒定时钟脉冲的待机时间。因此,可以由下一个波形的积分来表示所测量的暴露数据。

$$[0146] \quad S_j = \int_{(j-1)T/J+T_d}^{(j-1)T/J+T_d+T_i} I(t)dt, \quad (j=1, \dots, J) \quad (3)$$

[0147] 基于等式 (2) 和 (3) 测量的暴露的等式被导出为以下形式。

$$[0148] \quad S_j = T_i I'_0 + \sum_{n=1}^{N_{ho}} \frac{T_i}{\xi_n} \sin \xi_n \cos \left[\frac{2n\pi(j-1)}{J} \right] \left\{ A'_n \cos \left[\xi_n \left(1 + \frac{2T_d}{T_i} \right) \right] + B'_n \sin \left[\xi_n \left(1 + \frac{2T_d}{T_i} \right) \right] \right\} \\ - \sum_{n=1}^{N_{ho}} \frac{T_i}{\xi_n} \sin \xi_n \sin \left[\frac{2n\pi(j-1)}{J} \right] \left\{ A'_n \sin \left[\xi_n \left(1 + \frac{2T_d}{T_i} \right) \right] - B'_n \cos \left[\xi_n \left(1 + \frac{2T_d}{T_i} \right) \right] \right\}. \quad (4)$$

[0149] 在此, $\xi_n = n\pi T_i/T$ 。在以上等式 (4) 中, 针对时间 T 测量的 J 个暴露集形成了由上述等式 (2) 的 $2N_{ho}+1$ 个未知傅立叶系数组成的线性方程的组, 其可以简单地表示为 $S = \Xi X'$ 。在此, 表示暴露的 $S = (S_1, \dots, S_J)^T$ 以及表示傅立叶系数的 $X' = (I'_0, A'_1, B'_1, \dots, A'_{N_{ho}}, B'_{N_{ho}})^T$ 是列向量, 并且 Ξ 是 $J \times (2N_{ho}+1)$ 的系数矩阵。如果在 J 是 $\{J \geq 2N_{ho}+1, \text{对于奇数} J\}$ 和 $\{J \geq 4N_{ho}+2, \text{对于偶数} J\}$ 的整数集的并集中的元件之一的情况下使用最小二乘法, 则可以从暴露 (S) 中获得用于计算傅立叶系数 (X') 的解, 如 $X' = (\Xi^T \Xi)^{-1} \Xi^T S$ 。

[0150] 当将离散傅立叶变换应用于如等式 (4) 中所测量的暴露时, 该结果与通过最小二乘法获得的结果相同, 但是其表达方法可以如下更简单。

$$[0151] \quad \langle H_n^c \rangle + i \langle H_n^s \rangle = \frac{2}{NJ} \sum_{j=1}^J S_j \exp \left[i \frac{2n\pi(j-1)}{J} \right] \quad (5)$$

[0152] 在此, $\langle H_n^c \rangle$ 和 $\langle H_n^s \rangle$ 是实数值函数, 并且尖括号表示当在参考角速度的每个旋转周

期执行一次测量时通过总共执行N次测量而获得的测量值的平均值。通过将等式(4)代入至等式(5)中并且使用三角函数系统的正交性来整理以上等式,可以如下获得所测量的傅立叶系数的平均值。

$$[0153] \quad \langle I'_0 \rangle = \frac{\langle H_0^c \rangle}{2T_i} \quad (6)$$

$$[0154] \quad \langle A'_n \rangle = C_n^c \langle H_n^c \rangle - C_n^s \langle H_n^s \rangle, \quad (n \geq 1) \quad (7)$$

$$[0155] \quad \langle B'_n \rangle = C_n^c \langle H_n^s \rangle + C_n^s \langle H_n^c \rangle, \quad (n \geq 1) \quad (8)$$

$$[0156] \quad C_n^c = \frac{\xi_n}{T_i \sin \xi_n} \cos \left[\xi_n \left(1 + \frac{2T_d}{T_i} \right) \right], \quad (n \geq 1) \quad (9)$$

$$[0157] \quad C_n^s = \frac{\xi_n}{T_i \sin \xi_n} \sin \left[\xi_n \left(1 + \frac{2T_d}{T_i} \right) \right], \quad (n \geq 1) \quad (10)$$

[0158] 在典型的椭圆仪配置中,如果从光源(LS)发射的准直光穿过偏振状态发生器(PSG),并且被样本反射,并且然后穿过偏振状态分析仪(PSA)来入射到光电检测器元件(PDE)上,则光谱辐射通量被转换为电信号。特别地,根据光学元件旋转型光谱学椭圆仪的类型,在光学元件旋转型光谱学椭圆仪中使用的可旋转偏振元件被分类为线性偏振器和补偿器,并且在偏振状态发生器和偏振状态分析仪中不同地布置。光学元件旋转型光谱学椭圆仪中的至少一个可旋转偏振元件需要以具有恒定角频率的恒定速度旋转,并且其他可旋转偏振元件均停在指定位置处。可旋转偏振元件的方位角可以通过空心轴马达远程调节,并且如果可旋转偏振元件位于方位角参考点处,也就是说空心轴马达的指标原点(index origin)处,则可旋转偏振元件的性质轴可以在不同的位置处。为了进行适当的测量,需要找到可从任意确定的参考轴旋转的偏振元件的性质轴的方位角位置中的每一个。如果使用已经公知的校准,则可以在参考轴坐标系处分别找到偏振元件的性质轴的方位角位置。因此,当在参考轴坐标系上变换时,等式(2)给出如下。

$$[0159] \quad I(\theta_r) = I_0 + \sum_{n=1}^{N_{ho}} \left[A_n \cos(n\theta_r) + B_n \sin(n\theta_r) \right] \quad (11)$$

[0160] 在此, θ_r 表示由于相对于参考轴测量的恒定角速度而引起的方位角变化, I_0 表示校正后的傅立叶系数的直流分量,以及 A_n 和 B_n 是校正后的傅立叶系数的交流分量。在等式(11)中,如果由 $\omega t = \theta_r + \theta_{r0,n}$ 表示方位角,则当 $t=0$ 时, $-\theta_{r0,n}$ 成为 θ_r 的值,并且根据等式(2)与等式(11)之间的恒等关系式如下给出未校正的与校正后的傅立叶系数之间的关系式。

$$[0161] \quad I_0 = I'_0 \quad (12)$$

$$[0162] \quad A_n = A'_n \cos(n\theta_{r0,n}) + B'_n \sin(n\theta_{r0,n}) \quad (13)$$

$$[0163] \quad B_n = -A'_n \sin(n\theta_{r0,n}) + B'_n \cos(n\theta_{r0,n}) \quad (14)$$

[0164] 在椭圆仪中,由于使用数据缩减函数从校正后的傅立叶系数中提取样本的偏振椭圆参数,因此找到适合于光学元件旋转型光谱学椭圆仪的数据缩减方法非常重要。根据斯托克斯(Stokes)表达式,将通过偏振状态发生器入射的光波的斯托克斯向量设置为 $S^{(LS)} = (L_0, L_1, L_2, L_3)^T$,样本的穆勒矩阵由 $M^{(SP)} = (M_{jk})_{4 \times 4}$ 表示,并且偏振状态发生器和偏振状态分析仪的穆勒矩阵分别由 $T_{PSG} M^{(PSG)}$ 和 $T_{PSA} M^{(PSA)}$ 表示,其中, T_{PSG} 和 T_{PSA} 分别表示偏振状态发生器和偏振状态分析仪的有效透射系数, $M^{(DOS)} = (D_{jk})_{4 \times 4}$ 是偏振状态分析仪与光电检测器之间设置的检测器光学系统(DOS)的穆勒矩阵,并且最后, $S^{(PDE)} = (S_0^{(PDE)}, S_1^{(PDE)}, S_2^{(PDE)}, S_3^{(PDE)})^T$ 是入射在光电检测器上的光波的斯托克斯向量。设置在偏振状态发生器和偏振状态分析仪中的固定偏振器、恒定速度旋转偏振器、恒定速度旋转分析仪和固定分析仪的性质轴的方位角位置由 P, P_r, A_r 和 A 在任意参考轴坐标系中表示,并且由用于坐标系的旋转的穆勒矩阵来分别描述方位角的变化。

[0165] 相对于准单色光波,入射在光电检测器元件上的光波的斯托克斯向量可以描述如下。

$$[0166] \quad S^{(PDE)} = T_{PSA} T_{PSG} M^{(DOS)} M^{(PSA)} M^{(SP)} M^{(PSG)} S^{(LS)} \quad (15)$$

[0167] 当光电检测器元件的面积为 A_{PDE} 且光电检测器元件的量子效率为 μ_{QE} 时,由光电检测器元件测量的光谱辐射通量由 $I(\theta_r) = \mu_{QE} A_{PDE} S_0^{(PDE)}$ 表示,并且通过关系式获得的校正后的傅立叶系数的解分别作为用于样本的穆勒矩阵元素的联立线性方程给出。为了更简单地表示联立线性方程,介绍具有用于样本的穆勒矩阵元素的列向量如 $V^{(SP)} = (M_{11}, \dots, M_{1v}, \dots, M_{u1}, \dots, M_{uv})^T$ 。在此, u 和 v 是根据所使用的光学元件旋转型光谱学椭圆仪的种类而不同地给出的整数。因此,校正后的傅立叶系数由标量积给出,如下。

$$[0168] \quad I_0 = \gamma \sum_{j=1}^u \sum_{k=1}^v i_{0,jk} M_{jk} = \gamma \mathbf{i}_0 \cdot \mathbf{V}^{(SP)} \quad (16)$$

$$[0169] \quad A_n = \gamma \sum_{j=1}^u \sum_{k=1}^v a_{n,jk} M_{jk} = \gamma \mathbf{a}_n \cdot \mathbf{V}^{(SP)} \quad (17)$$

$$[0170] \quad B_n = \gamma \sum_{j=1}^u \sum_{k=1}^v b_{n,jk} M_{jk} = \gamma \mathbf{b}_n \cdot \mathbf{V}^{(SP)} \quad (18)$$

[0171] 在此,

$$\mathbf{i}_0 = (\partial I_0 / \partial M_{11}, \dots, \partial I_0 / \partial M_{1v}, \dots, \partial I_0 / \partial M_{u1}, \dots, \partial I_0 / \partial M_{uv}) / \gamma, \quad \mathbf{a}_n =$$

[0172]

$$(\partial A_n / \partial M_{11}, \dots, \partial A_n / \partial M_{1v}, \dots, \partial A_n / \partial M_{u1}, \dots, \partial A_n / \partial M_{uv}) / \gamma, \quad \mathbf{b}_n = (\partial B_n / \partial M_{11}, \dots, \partial B_n / \partial M_{1v}, \dots, \partial B_n / \partial M_{u1}, \dots, \partial B_n / \partial M_{uv}) / \gamma$$

通常仅是固定光学元件的方位角的函数,但是如果包括补偿器并且由行向量描述,则是如下函数,该函数还包括补偿器的方位角和延迟角。在此, γ 是与以下因素相关联的公因子:光学元件旋转型光谱学椭圆仪中使用的光源的强度和偏振特性、光电检测器元件

的有效测量面积和量子效率、DOS的偏振相关特性、以及光学元件的透射状态, γ 如下给出。

$$[0173] \quad \gamma = \kappa (1 + d_{12} \cos 2A + d_{13} \sin 2A) (1 + l_1 \cos 2P + l_2 \sin 2P) \quad (19)$$

[0174] 在此, $\kappa = \mu_{OE} A_{PDE} T_{PSA} T_{PSG} D_{11} L_0$, $d_{12(13)} = D_{12(13)} / D_{11}$, $l_{1(2)} = L_{1(2)} / L_0$ 。

[0175] 根据用于数据缩减的线性方程的总数, 联立线性方程的解以唯一 (Unique) 或超确定 (Overdetermined) 的形式给出。与数据缩减有关的等式可以应用于所有类型的光学元件旋转型椭圆仪。

[0176] 介绍了通用的数据缩减方法, 该方法可以从所有校正后的傅立叶系数中获得样本的椭圆参数。如果校正后的傅立叶系数的列向量表示为 $X = (I_0, A_1, B_1, A_2, B_2, \dots, A_{N_{ho}}, B_{N_{ho}})^T$, 并且由行向量作为分量组成的 $(2N_{ho} + 1) \times uv$ 的系数矩阵被表示为 $\Omega = \gamma (i_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \dots, a_{N_{ho}}, b_{N_{ho}})^T$, 等式 (16) 至 (18) 可以由 $X = \Omega V^{(SP)}$ 表示。如果 Ω 的矩阵秩等于或大于 $M^{(SP)}$ 中未知矩阵元素的总数, 则用于样本的穆勒矩阵元素的向量的解如下给出。

$$[0177] \quad V^{(SP)} = (\Omega^T \Omega)^{-1} \Omega^T X \quad (20)$$

[0178] 因此, 如果从使用具有公知的光学性质的参考样本的测量结果中或者基于等式 (19) 而没有样本的直线上的测量结果中获得用于每个波长的 $\kappa, d_{12}, d_{13}, l_1$ 和 l_2 的值, 则样本的穆勒矩阵元素可以基于等式 (20) 根据校正后的傅立叶系数的值直接计算。在本文中应该强调的是, 以上述方式计算的穆勒矩阵元素的向量的解也可以应用于各向异性样本。

[0179] 即使 $\kappa, d_{12}, d_{13}, l_1$ 和 l_2 的值未知, 也可以获得由归一化的穆勒矩阵元素如 $m_{jk} = M_{jk} / M_{11}$ 限定的样本的偏振测量参数的测量值。此外, 在各向同性样本的情况下, 通常地, 其可以由如 $N_{sp} = -m_{12}$ (或 $-m_{21}$) 和 $C_{sp} = m_{33}$ (或 m_{44}) 限定的样本的偏振椭圆参数简单地表示。

[0180] 如上所述, 测量光的光谱辐射通量, 建立样本的光学理论公式, 使用多个未知参数来计算样本的穆勒矩阵元素的数据, 所述多个未知参数针对为所建立的理论公式而设置的区域, 以及使用最小二乘法等来优化数据, 从而估计要从样本获得的光学性质。也就是说, 可以根据穆勒矩阵来分析其他物理特性。以这种方式, 根据本发明的示例性实施方式的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪可以根据测得的傅立叶系数和测得的穆勒矩阵的分量来分析样本的各种物理性质, 例如界面性质、薄膜厚度、复折射率、纳米形状、各向异性性质、表面粗糙度、构成比、结晶度等, 并且可以将分析结果应用于半导体元件工艺的测量设备、平板显示工艺的测量设备、太阳能元件的测量设备、薄膜光学测量设备、生物传感器、气体传感器等。具体地, 在类似于纳米图案形状测量的分析方法在根据本发明的示例性实施方式的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪中非常复杂的情况下, 物理性质分析方法如下。首先, 获得要测量的样本的傅立叶系数或穆勒矩阵元素的测量数据, 建立样本的光学理论公式, 通过使用在为所建立的理论公式而设置的区域中确定的多个未知参数来获得计算出的傅立叶系数或穆勒矩阵元素的数据, 为计算出的数据创建未知参数的连续函数, 以及通过使用测量数据的最小二乘法来优化连续函数, 从而获得样本的物理性质。在这种情况下, 根据本发明的椭圆仪可以包括由高性能并行计算机配置的大容量高速计算系统、基于严格耦合波分析 (RCWA) 算法的分析软件、以及大容量数据存储, 以便从针对样本所测量的穆勒矩阵的分量或傅立叶系数的测量数据中快速找到样本的物理性质。

[0181] [使用本发明的正交入射椭圆仪测量样本的光学性质的方法]

[0182] 图6是示出了使用本发明的线性偏振器旋转型正交入射椭圆仪测量样本的光学性质的方法的流程图。将描述使用如上所述的原理测量光学性质的方法。如图6所示, 使用本

发明的正交入射椭圆仪测量样本的光学性质的方法可以包括样本安装操作(S10)、方位角选择操作(S20)、方位角移动操作(S30)、暴露测量操作(S40)、傅立叶系数计算操作(S50)、穆勒矩阵元素计算操作(S60)和样本光学性质分析操作(S70)。

[0183] 在样本安装操作(S10)中,将其光学性质要被测量的样本安装并且对准在正交入射椭圆仪的样本支持器上。在方位角选择操作(S20)中,由处理器选择固定偏振器和固定分析仪的方位角值。在方位角移动操作(S30)中,通过处理器使固定偏振器和固定分析仪移动以设置方位角。在暴露测量操作(S40)中,由光电检测器元件来测量根据恒定旋转偏振器和恒定旋转分析仪的方位角的变化反射准直光束的暴露值。在傅立叶系数计算操作(S50)中,由处理器根据暴露值来计算光谱辐射通量波形的傅立叶系数值。在穆勒矩阵元素计算操作(S60)中,由处理器根据傅立叶系数值来计算样本的穆勒矩阵元素值。在样本光学性质分析操作(S70)中,由处理器根据穆勒矩阵元素值来分析并计算样本的光学性质。

[0184] 本发明不限于上述示例性实施方式,应用范围是多样的,并且在不脱离权利要求书中要求保护的本发明的主旨的情况下,与本发明有关的本领域的技术人员可以对本发明进行各种修改。

[0185] **【工业适用性】**

[0186] 根据本发明,波长不相关线性偏振器在配置正交入射椭圆仪中被用作用于分析偏振状态的装置,从而可以解决由于使用相关技术中波长相关补偿器而可能引起的各种问题,即复杂的设备校准过程和所导致的误差。另外,根据本发明,与相关技术相比,可以更自由地扩展测量波长区域,从而提高正交入射椭圆仪的测量可靠性。

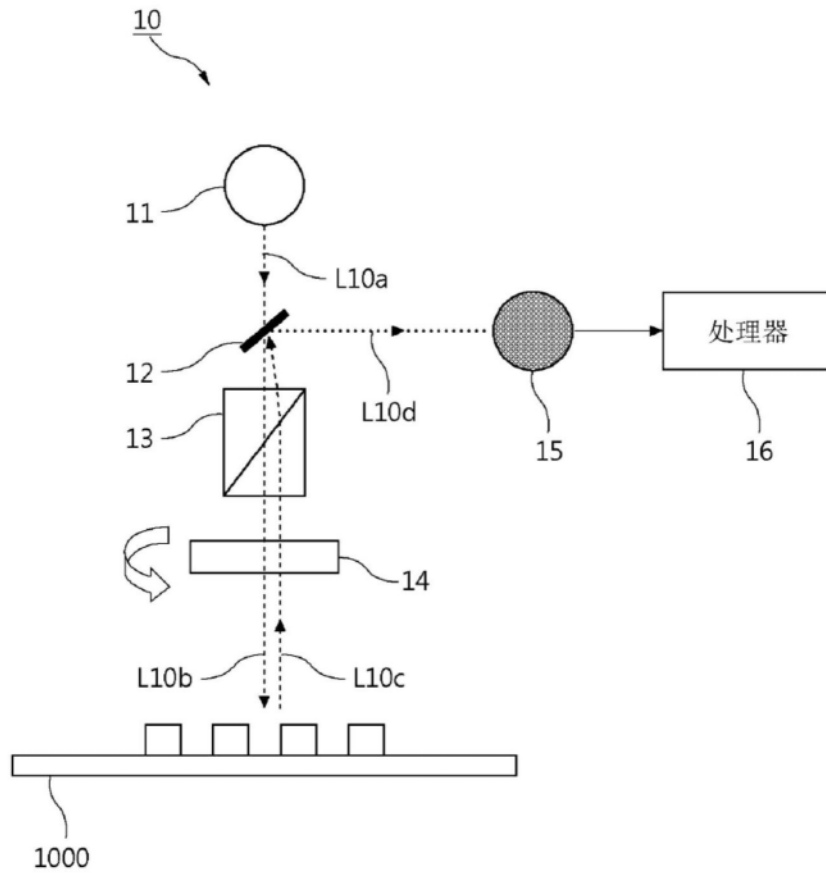


图1

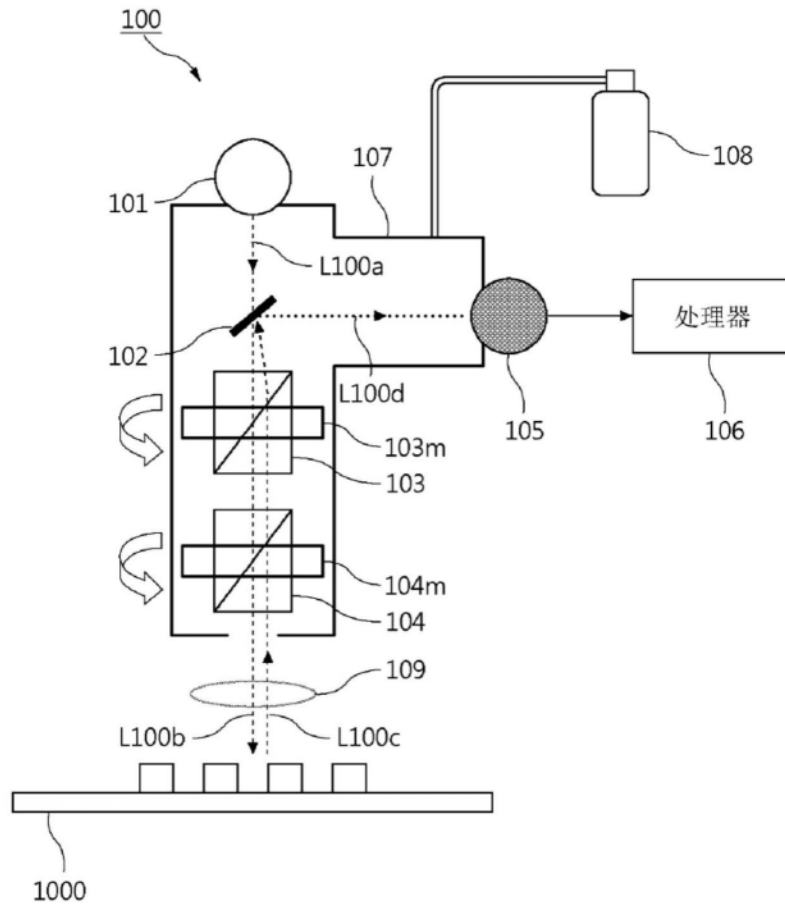


图3

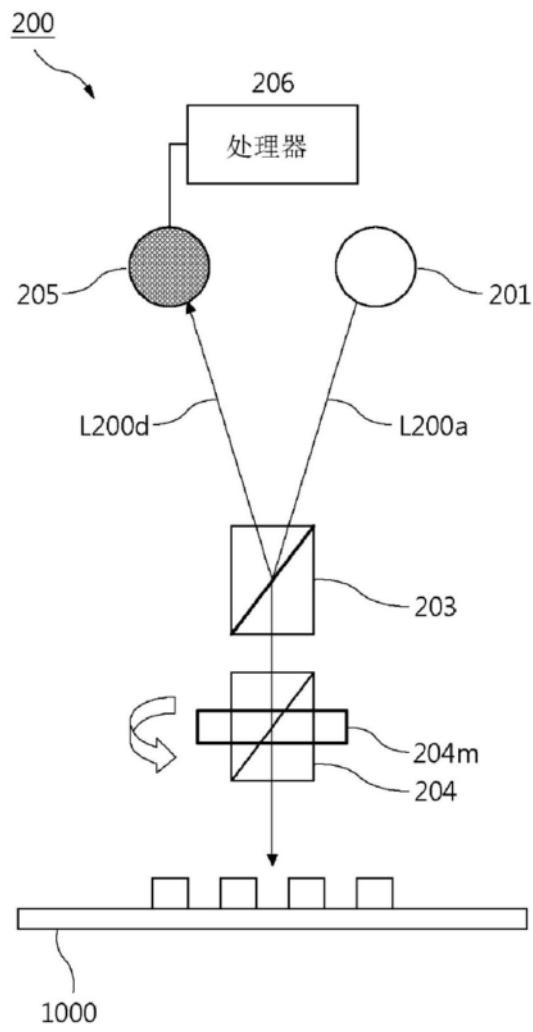


图4

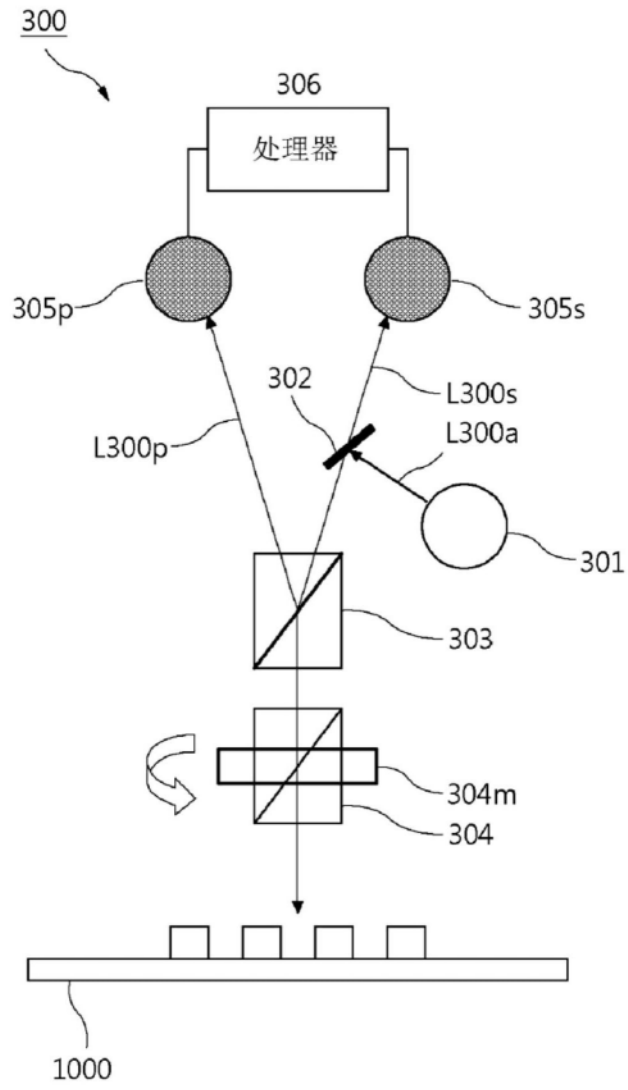


图5

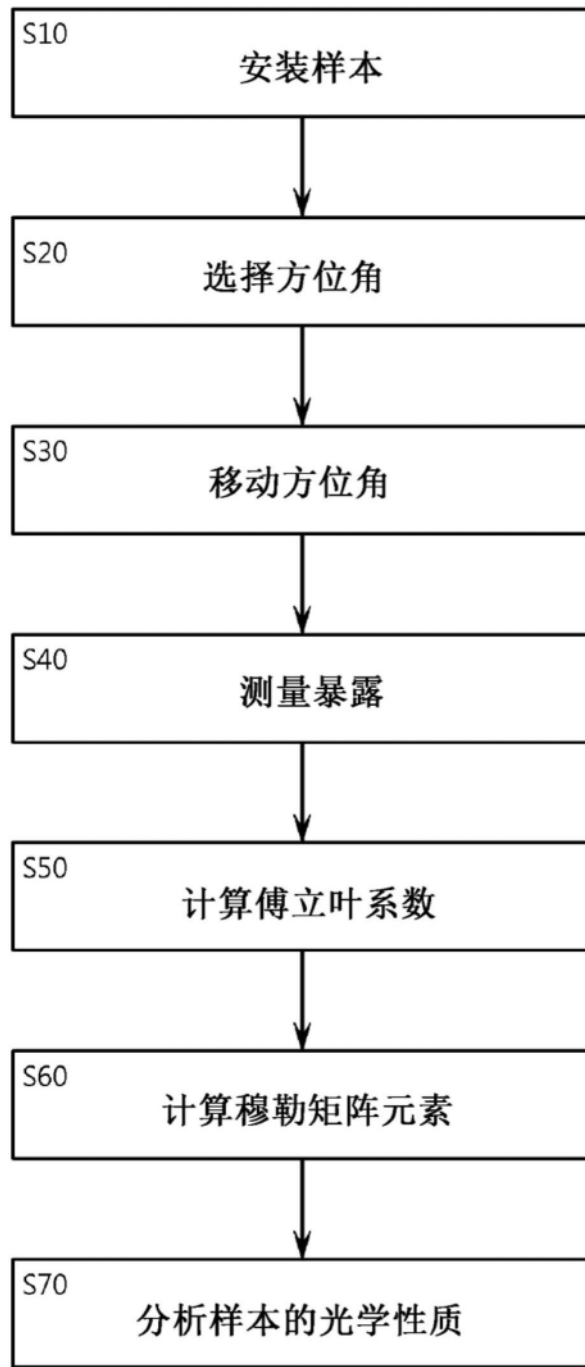


图6