



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101625319 B

(45) 授权公告日 2011. 06. 29

(21) 申请号 200910140237. 9

CN 1940528 A, 2007. 04. 04,

(22) 申请日 2009. 07. 09

US 6377349 B1, 2002. 04. 23,

(30) 优先权数据

审查员 杨婷

2008-179311 2008. 07. 09 JP

(73) 专利权人 佳能株式会社

地址 日本东京

(72) 发明人 末平信人

(74) 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专

利商标事务所 11038

代理人 杨国权

(51) Int. Cl.

G01N 21/45 (2006. 01)

G01N 21/01 (2006. 01)

(56) 对比文件

JP 特开 2002-340789 A, 2002. 11. 27,

US 2004/0080761 A1, 2004. 04. 29,

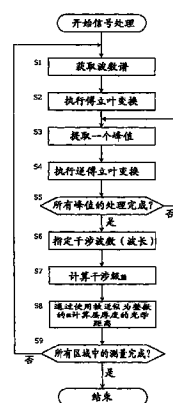
权利要求书 2 页 说明书 12 页 附图 6 页

(54) 发明名称

多层结构测量方法和多层结构测量设备

(57) 摘要

本发明公开了一种多层结构测量方法和多层结构测量设备。根据本发明的断层图像测量方法包括：第一步，从波数谱计算与每个层厚度的光学距离对应的信息；第二步，从与每个层厚度的光学距离对应的信息分离并提取每层的信息；第三步，分别将每层的信息再转换为波数谱；第四步，从第三步的结果获得干涉波数；第五步，从干涉波数和每层的光学距离计算干涉级；和第六步，利用干涉级为整数的事实计算每层的光学距离。从而，当使用离散傅立叶变换时，层的测量精确性得到改进。



1. 一种设备中的多层结构测量方法,所述设备包括:
光源;
光学系统,其将来自所述光源的光引向待观察的多层结构的对象,同时将来自所述待观察对象的回光引向检测位置;
分光仪,其被置于所述检测位置处,用于检测入射在其上的光的波数谱;和
分析单元,其从检测的波数谱测量所述待观察对象的多层结构;
所述方法包括:
第一步,从所述波数谱计算与每个层厚度的光学距离对应的信息;
第二步,从与所述每个层厚度的光学距离对应的信息分离并提取与每层的光学距离对应的信息;
第三步,分别将与所述每层的光学距离对应的信息再转换为波数谱;
第四步,从所述第三步的结果获得干涉发生的波数或波长;
第五步,从在所述第四步中获得的所述波数或波长和所述每层的光学距离计算干涉级;和
第六步,将在所述第五步中获得的所述干涉级近似为最接近的整数,并从如此近似的所述干涉级和干涉发生的所述波数或波长计算每层的光学距离,
其中,所述第一步是将傅立叶变换应用于所述波数谱的步骤,
其中,所述第三步是将逆傅立叶变换应用于与光学距离对应的信息的步骤。
2. 根据权利要求1所述的多层结构测量方法,其中,所述第二步是通过带通滤波器提取与每层的光学距离对应的信息,以及对于每层的提取范围是可变的。
3. 根据权利要求1所述的多层结构测量方法,其中,在所述第五步中,通过利用每层的光学距离的两倍是波长的整数倍的事实来计算所述干涉级。
4. 根据权利要求1所述的多层结构测量方法,其中,在所述第五步中,通过利用每层的光学距离的两倍是波长的半整数倍的事实来计算所述干涉级。
5. 根据权利要求1所述的多层结构测量方法,其中,在所述第五步和第六步中,将取作所述第一步的结果中的峰值的光学距离用作每层的光学距离。
6. 根据权利要求1所述的多层结构测量方法,还包括:
从所述第三步的结果获得干涉发生的多个波数或波长并从如此获得的所述波数或波长和干涉条件计算每层的光学距离的步骤;
其中,在所述第五步和第六步中,在从所述第三步的结果获得多个波数或波长的所述步骤中计算的每层的光学距离被用于计算所述干涉级。
7. 根据权利要求1所述的多层结构测量方法,还包括:
第七步,在所述第六步之后将每层的光学距离转换为空间距离。
8. 根据权利要求1所述的多层结构测量方法,其中,所述设备的所述光学系统包括:
用于将来自所述光源的光划分为测量光和参考光的单元;
用于将所述测量光引向所述待观察对象并同时将来自所述待观察对象的回光引向所述检测位置的单元;和
用于将所述参考光通过参考臂引向所述检测位置的单元;
其中,所述分光仪检测所述回光和所述参考光的组合光的波数谱;以及

所述分析单元基于所述组合光的波数谱测量所述待观察对象的多层结构。

9. 根据权利要求 8 所述的多层结构测量方法,其中,所述参考光和在所述待观察对象的表面上反射的回光之间的光程差的光学距离比所述待观察对象的整个多层结构的光学距离长。

10. 根据权利要求 8 所述的多层结构测量方法,其中,用于将所述参考光引向所述检测位置的所述单元包括用于反射所述参考光的参考反射镜;

所述方法还包括:第七步,在所述第六步之后将每层的光学距离转换为空间距离;以及

在所述第七步中,通过从到位于远离所述参考反射镜的一侧的界面的光学距离中减去到位于接近所述参考反射镜的一侧的界面的光学距离并将它除以所述两个界面之间的折射率来计算所述空间距离。

11. 一种用于测量待观察对象的多层结构的多层结构测量设备,所述设备包括:

光源;

光学系统,其将来自所述光源的光引向待观察的多层结构的对象,同时将来自所述待观察对象的回光引向检测位置;

分光仪,其被置于所述检测位置处,用于检测入射在其上的光的波数谱;和

分析单元,其从检测的波数谱测量所述待观察对象的多层结构;

其中,所述分析单元执行以下步骤:

第一步,从所述波数谱计算与每个层厚度的光学距离对应的信息;

第二步,从与所述每个层厚度的光学距离对应的信息分离并提取与每层的光学距离对应的信息;

第三步,分别将与所述每层的光学距离对应的信息再转换为波数谱;

第四步,从所述第三步的结果获得干涉发生的波数或波长;

第五步,从在所述第四步中获得的所述波数或波长和所述每层的光学距离计算干涉级;和

第六步,将在所述第五步中获得的所述干涉级近似为最接近的整数,并从如此近似的所述干涉级和干涉发生的所述波数或波长计算每层的光学距离,

其中,所述第一步是将傅立叶变换应用于所述波数谱的步骤,

其中,所述第三步是将逆傅立叶变换应用于与光学距离对应的信息的步骤。

12. 根据权利要求 11 所述的多层结构测量设备,其中,所述设备的所述光学系统包括:

用于将来自所述光源的光划分为测量光和参考光的单元;

用于将所述测量光引向所述待观察对象并同时将来自所述待观察对象的回光引向所述检测位置的单元;和

用于通过参考臂将所述参考光引向所述检测位置的单元;

其中,所述分光仪检测所述回光和所述参考光的组合光的波数谱;以及

所述分析单元基于所述组合光的波数谱测量所述待观察对象的多层结构。

多层结构测量方法和多层结构测量设备

技术领域

[0001] 本发明涉及一种通过使用光学相干光学系统来测量多层结构的技术。

背景技术

[0002] 如今,作为通过使用光学相干光学系统来测量多层结构的多层结构测量设备(光学相干设备),各种类型的这样的设备被使用。例如,存在反射谱膜厚度测量设备和光学相干断层成像设备(optical-coherence tomographic imaging apparatus)(光学相干断层技术:OCT,以下称为OCT设备),反射谱膜厚度测量设备测量在半导体或玻璃的表面上布置的薄膜的厚度,OCT设备对诸如活体等的光散射介质的断层结构成像。这些设备的相同之处在于都使用光干涉,但是设备的名称和/或构造根据使用领域和待观察对象而不同。这里,在表面上具有膜结构的对象(诸如半导体的抗蚀剂等)被称为膜,在其内部具有结构的对象(诸如眼睛的视网膜)被称为断面层(sectioned layer)或者简单地称为层。

[0003] 在上述设备中,通过将测量光照射到待观察对象上并分析从其反射的光,可测量对象的膜、层等的结构。对于它的光源(根据使用领域,有时称为宽带光源、白光源、低相干光源等),应该根据待观察对象的结构和特性来选择合适的波长和带宽。另外,存在通过仅使用来自待观察对象的反射光来观察待观察对象的每级或每层的反射光的干涉的方法以及观察由从参考反射镜反射的光和从待观察对象反射的光构成的组合光的干涉的方法。通过使用分光仪对这些反射光进行分析,并通过线传感器等使这些反射光成像为光谱。

[0004] 通过使用傅立叶变换等对如此成像的谱数据进行分析,从而可获得膜或层的结构。此外,可通过以二维方式在样本上扫描测量光来获得二维断层图像。

[0005] 日本专利申请特开第H11-325849号公开了用于医学应用的OCT。这里,以不连续的方式三次改变参考反射镜的位置,以使得在每个位置获得光谱。然后,通过执行使用这些个数据的计算来获得断层图像。据说,通过这样的技术,可防止分辨率劣化。

发明内容

[0006] 在日本专利申请特开第H11-325849号中,对于一次测量多次改变参考反射镜的位置。这样的方案不仅花费过多的时间用于测量,而且还要求对参考反射镜进行精确的位置控制。另一方面,在医学领域中使用的OCT中,存在通过具有被固定的参考反射镜的分光仪并通过对来自分光仪的谱数据进行傅立叶变换来测量断面层的方法。由于线传感器的像素的数量有限,所以此时的谱数据变为离散傅立叶变换。结果,层的值可能仅被表示为离散值。因此,要求改进层的测量精度。

[0007] 因此,鉴于上述问题提出本发明,本发明的目的是以更精确的方式获得断层图像。

[0008] 本发明的第一方面是下述设备中的多层结构测量方法,所述设备包括:光源;光学系统,其将来自所述光源的光引向待观察的多层结构的对象,同时将来自所述待观察对象的回光引向检测位置;分光仪,其被置于所述检测位置处,用于检测入射在其上的光的波数谱;和分析单元,其从检测的波数谱测量所述待观察对象的多层结构;所述方法包括:

- [0009] 第一步,从所述波数谱计算与每个层厚度的光学距离对应的信息;
- [0010] 第二步,从与所述每个层厚度的光学距离对应的信息分离并提取与每层的光学距离对应的信息;
- [0011] 第三步,分别将与所述每层的光学距离对应的信息再转换为波数谱;
- [0012] 第四步,从所述第三步的结果获得干涉发生的波数或波长;
- [0013] 第五步,从在所述第四步中获得的所述波数或波长和所述每层的光学距离计算干涉级 (order of interference);和
- [0014] 第六步,将在所述第五步中获得的干涉级近似为最接近的整数,并从如此近似的所述干涉级和干涉发生的所述波数或波长计算每层的光学距离。
- [0015] 根据本发明的第二方面是一种用于测量待观察对象的多层结构的多层结构测量设备,所述设备包括:光源;光学系统,其将来自所述光源的光引向待观察的多层结构的对象,同时将来自所述待观察对象的回光引向检测位置;分光仪,其被置于所述检测位置处,用于检测入射在其上的光的波数谱;和分析单元,其从检测的波数谱测量所述待观察对象的多层结构;其中,所述分析单元执行以下步骤:
- [0016] 第一步,从所述波数谱计算与每个层厚度的光学距离对应的信息;
- [0017] 第二步,从与所述每个层厚度的光学距离对应的信息分离并提取与每层的光学距离对应的信息;
- [0018] 第三步,分别将与所述每层的光学距离对应的信息再转换为波数谱;
- [0019] 第四步,从所述第三步的结果获得干涉发生的波数或波长;
- [0020] 第五步,从在所述第四步中获得的所述波数或波长和所述每层的光学距离计算干涉级;和
- [0021] 第六步,将在所述第五步中获得的所述干涉级近似为最接近的整数,并从如此近似的所述干涉级和干涉发生的所述波数或波长计算每层的光学距离。
- [0022] 根据本发明,在多层结构测量设备中,可获得其测量精度得到改进的断层图像。
- [0023] 从以下参考附图对示例性实施例的描述,本发明的进一步的特征将变得清楚。

附图说明

- [0024] 图 1 是用于解释本发明的第一实施例中的 OCT 设备的光学系统的视图。
- [0025] 图 2 是用于解释本发明的第一实施例中的层结构的视图。
- [0026] 图 3A 是示出本发明的第一实施例中的信号处理的流程的流程图。
- [0027] 图 3B 是示出本发明的第一实施例中的测量光的谱波形的示意图。
- [0028] 图 3C 是示出本发明的第一实施例中的离散傅立叶变换的结果的示意图。
- [0029] 图 3D 是示出本发明的第一实施例中的作为谱信号在被带通滤波之后的逆傅立叶变换的结果的谱波形的示意图。
- [0030] 图 4 是用于解释本发明的第二实施例中的使用参考反射镜的 OCT 设备的光学系统的视图。
- [0031] 图 5 是用于解释本发明的第二实施例中的层结构的视图。
- [0032] 图 6A 是示出本发明的第二实施例中的测量光的谱波形的示意图。
- [0033] 图 6B 是示出本发明的第二实施例中的离散傅立叶变换的结果的示意图。

[0034] 图 6C 是示出本发明的第二实施例中的作为谱信号在被带通滤波之后的逆傅立叶变换的结果的谱波形的示意图。

[0035] 图 7 是用于解释本发明的第三实施例中的眼用 OCT 设备的光学系统的视图。

具体实施方式

[0036] 根据本发明的光学相干设备（多层结构测量设备）使测量光通过样本臂（arm）（测量光路）照射到待检验对象（待观察对象）上，并将这个测量光的回光从待检验对象引向检测位置。回光是包含关于在照射到待检验对象的光的方向上的界面的信息等的反射光或散射光。另外，通过使用分光仪和分析单元获取待检验对象的断层图像，分光仪检测引向检测位置的回光的波长谱，分析单元分析该谱。

[0037] 为了解决上述问题，本发明以这样的方式构造多层结构测量设备中的分析单元，即，它可根据将如下所述的第一步至第六步来测量多层结构的每级或每层的光学距离。

[0038] 在第一步中，通过傅立叶变换等从回光的波数谱计算与光学距离对应的信息。可从每个对应的峰值的位置获得每层的光学距离 nd 。在第二步中，从与光学距离对应的信息分离并提取与多层结构的每层的光学距离对应的信息。在第三步中，通过逆傅立叶变换等将与每层的光学距离对应的信息又转换为波数谱。在第四步中，从波数谱获得干涉（相长干涉或相消干涉）发生的波数（或波长）。在第五步中，从如此获得的波数（波长）和每层的光学距离计算干涉级。在第六步中，通过利用干涉级在理论上变为整数的事实将干涉级近似（校正）为整数，并从如此近似的整数和干涉发生的波数（波长）计算每层的光学距离。

[0039] 通过上述构造，可获得改进的测量精度的断层图像。

[0040] 现在，将论述本发明的特定实施例。

[0041] [第一实施例]

[0042] 在本发明的第一实施例中，将使用附图讨论应用本发明的光学相干设备。

[0043] < 光学系统的构造 >

[0044] 首先，将参考图 1 大致地描述光学相干设备的构造。从光源 101 发射的测量光通过透镜 102、分束器 103、XY 扫描仪 104 和物镜 105 到达作为待观察对象的样本或样品 106，诸如半导体。透明的膜设置在样本的表面上，被样本的表面和膜与样本之间的界面反射的光通过物镜 105、XY 扫描仪 104、分束器 103 和成像透镜 107 到达分光仪 108。

[0045] 对于光源 101，例如，使用具有 400 ~ 800nm 波长的卤素灯等。这里，对于分光仪 108，使用衍射光栅型分光仪。在这种情况下，分光仪 108 包括衍射光栅 109、图像拾取元件 110 等。通过分光仪 108 中的图像拾取元件 110 获取被衍射光栅 109 分光的光作为其波长的谱数据。图像拾取元件 110 为 CCD 型线传感器等。这里，采用衍射光栅型分光仪的长处或优点包括其种类多、在所使用的波长的区域中散射基本恒定等。另一方面，其缺陷或缺点包括低透射率、大量杂散光、干涉级的重复或重叠的发生、发射光的过多偏振等。另外，可将棱镜用于分光仪 108。

[0046] 计算机 111 对通过图像拾取元件 110 成像的谱数据进行分析。当然，计算机 111 不仅具有分析谱数据的功能，而且还具有存储谱数据、显示图像和发出测量命令的功能。另外，可通过 XY 扫描仪 114 在计算机 111 的控制下在与其光轴垂直的方向上使测量光对样本

进行光栅扫描来获得样本的截面图像。计算机 111 包括 CPU、存储器等,并通过 CPU 执行程序来实现上述功能。然而,可用硬件实现上述各功能的一部分或者全部。

[0047] <干涉条件>

[0048] 将使用图 2 讨论多层结构的干涉条件。这里,为了简化起见,不考虑多个反射的影响。

[0049] 多层结构的样本或样品具有这样的构造,该构造具有在折射率 N_s 的基底 204 上布置的折射率 N_2 的第二膜 203 和折射率 N_1 的第一膜 202。假设这个样本设置在折射率 N_0 的介质中。各边界为表面 205、第一界面 206 和第二界面 207。用 D_1 表示表面 205 和第一界面 206 之间的空间距离,用 D_2 表示第一界面 206 和第二界面 207 之间的空间距离。这里,假设彼此接触的相邻介质的折射率彼此不同。

[0050] 这里,当光从低折射率的介质进入到高折射率的介质时,在它们之间的界面上反射的光的相位不变。然而,当光从高折射率的介质进入到低折射率的介质时,在它们之间的界面上反射的光的相位改变 π 。这里,考虑对具有折射率 N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_s 的样本进行测量, N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_s 满足关系 $N_0 < N_1 < N_2 < N_s$ 。例如,这些样本为折射率 N_0 ($N_0 = 1$) 的空气、折射率 N_1 ($N_1 = 1.5$) 的抗蚀剂、折射率 N_2 ($N_2 = 2.0$) 的硅氮化物和折射率 N_s ($N_s = 3.5$) 的硅基底。在这种条件下,在其反射之前和之后,测量光 201 的相位不改变。

[0051] 因此,通过下面的使用膜的折射率 n 、界面之间的空间距离 d 、整数(干涉级) m 和波数 k 的表达式 1 来将下述条件表示为相长条件,在所述条件下,在某个膜的相对两侧的界面上反射的光彼此干涉或相干。

[0052] (表达式 1)

$$[0053] \quad k_m = \frac{m}{2nd}$$

[0054] 另外,通过以下表达式 2 表示相消条件。

[0055] (表达式 2)

$$[0056] \quad k_{m+0.5} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{1}{2nd}$$

[0057] 当然,膜的构造各种各样,因此,应该考虑折射率的组合的情况,在所述情况下,在其反射之前和之后存在光的相位的变化。结果,可通过上述表达式 1 和 2 使相长条件和相消条件变得相反。

[0058] <信号处理>

[0059] 将使用图 3A 至图 3D 描述本发明的信号处理步骤。这里,将通过将对如图 2 中示出的构造的膜进行测量的情况作为示例来进行解释。这里,由计算机 111 执行以下各个步骤。

[0060] 在步骤 S1 中,获取来自分光仪 108 的谱数据。在图 3B 中用曲线图示出此时的数据。在图 3B 中,纵坐标轴表示强度或幅度,横坐标轴表示波数。这里,通常用强度相对于其波长表示普通分光仪的谱。然而,这里,使用波数谱,因而,必须将波长转换为对应的波数,波数为波长的倒数。此外,波长谱为相对于波长的相等间隔的数据,所以,当被转换为作为波长的倒数的对应的波数时,转换之后的数据相对于波数具有不相等的间隔。因此,必须通

过内插处理等使如此转换的数据具有相等的间隔。

[0061] 在步骤 S2(与本发明的第一步对应)中,对谱数据进行傅立叶变换。这里,线传感器的样本的数量有限,所以,执行离散傅立叶变换。通常,将值 512、1024、2048 等选择为样本的数量 N (线传感器的像素的数量)。在图 3C 中概略示出此时的结果。在离散傅立叶变换的情况下的横坐标轴表示与光学距离成比例的值(即,与光学距离对应的信息)。可分别从这些值计算光学距离。为了简化解释的目的,以下将通过傅立叶变换获得的结果称为光学距离,尽管该结果为与光学距离成比例的值。用于光学距离的横坐标轴被划分为线传感器的抽样的数量。

[0062] 这里,如图 3C 所示,对 N_1D_1 、 N_2D_2 和 $N_{12}D_{12}$ 的峰值进行测量。当然,可将这些峰值的值用作各个膜的光学距离。然而,在离散傅立叶变换中,测量的结果变为离散值。也就是说,如在下面的使用整数 i 和图 3B 中示出的分光仪的带宽 ΔK 的表达式 3 中所示的那样来表示光学距离的测量结果。这里, i 为满足关系 $0 \leq i \leq N/2$ 的整数。另外, $\lambda_{\max}$ 和 $\lambda_{\min}$ 分别为分光仪的最大检测波长和最小检测波长。

[0063] (表达式 3)

$$[0064] \quad nd = \frac{i}{2\Delta K}$$

[0065] 如在下面的表达式 4 中所示的那样来表示膜厚度的测量分辨率 $\delta(nd)$, $\delta(nd)$ 为可被取作测量结果的光学距离的最小的可能间隔。这里,这个表达式还表示可被测量的最小距离 $nd_{\min}$ 。

[0066] (表达式 4)

$$[0067] \quad \delta(nd) = \frac{1}{2\Delta K}$$

[0068] 另外,如在下面的表达式 5 中用 $N/2$ 代入以上表达式 3 的 i 所示的那样来获得可被测量的最大距离 $nd_{\max}$ 。这通过抽样定理来决定。

[0069] (表达式 5)

$$[0070] \quad nd_{\max} = \frac{N}{4\Delta K}$$

[0071] 然而,在干涉在多层结构的第 i 层和第 t 层的相对端发生的情况下,如在下面的表达式 6 中所示那样,第 i 层至第 t 层的光学距离 $N_{it}D_{it}$ (即,第 i 层和第 t 层之间的光学距离)为第 i 层至第 $(t-1)$ 层的光学距离 $N_{it-1}D_{it-1}$ (即,第 i 层和第 $(t-1)$ 层之间的光学距离)与第 t 层的光学距离 N_tD_t (即,第 $(t-1)$ 层和第 t 层之间的光学距离)之和。如果这被连续地重复,则第 i 层至第 t 层(作为一个整体)的光学距离 $N_{it}D_{it}$ 与第 i 层至第 t 层的各个层的光学距离之和一致。

[0072] (表达式 6)

$$[0073] \quad N_{it}D_{it} = N_{it-1}D_{it-1} + N_tD_t$$

[0074] 当然,这些值在傅立叶变换之后作为峰值出现。当存在 n 层时的峰值的数量为当从 $(n+1)$ 层选择两层时的组合的数量。例如,如图 3C 所示,从如图 2 所示的两层构造的膜获得三个峰值。

[0075] 在步骤 S3(与本发明的第二步对应)中,通过将滤波器应用于傅立叶变换的结果来选择与一个峰值对应的光学距离。带通滤波器可被用作这样的滤波器。就此而言,这里的带具有与就物理量而言所表示的长度对应的单位。当按数字数据考虑它时,在不考虑单位的情况下处理相同,所以方便地这样称呼它。此外,带宽是通过将像素数量乘以用于数字处理目的的转换系数而获得的值,这里,有时将像素的数量称为带宽来进行讨论。因此,这里所使用的带宽不同于一般频率或一般波长的带宽。如图 3C 所示,根据 N_1D_1 、 N_2D_2 和 $N_{12}D_{12}$ 的峰值的每个设置滤波器的带宽 301。顺便一提的是,将这些光学距离存储在存储器等中,从而可在步骤 S7 中再次读出它们。

[0076] 可使在滤波器中设置的带宽(提取范围)为例如这样的范围,在该范围中,峰值等于或者高于阈值 302。另外,理想情况是这样设置带宽,以使得各个区域应该彼此不重叠。此外,带宽越宽,包含越多不同于理想的光学距离的分量,所以每个带宽应该为必要的最小值。例如,接触阈值的宽度两倍的宽度被设置为带宽。当然,理想情况是使得带宽可变,以使得处理强度小如 N_2D_2 的峰值的情况。当大致的层构造已知时,可使带宽固定。

[0077] 在步骤 S4(与本发明的第三步对应)中,对滤波后的信号进行逆离散傅立叶变换。在图 3D 中概略示出如此获得的信号的波形。存在光学距离的一个峰值,从而导致产生与单层的结果对应的基本正弦波。也就是说,获得这样的波形,在该波形中,最大值和最小值重复。

[0078] 在步骤 S5 中,确定是否已对必要数量的峰值进行了逆傅立叶变换。如果还没有,则对后面的峰值的数据进行逆傅立叶变换。在这个示例中,执行三个逆傅立叶变换。

[0079] 在步骤 S6(与本发明的第四步对应)中,提取与正弦波的最大值或最小值对应的波数。这里,如图 3D 所示,获得与相长条件对应的包括 k_m 的四个波数和与相消条件对应的包括 $k_{m+0.5}$ 的三个波数。

[0080] 在步骤 S7(与本发明的第五步对应)中,计算干涉级。具体地讲,通过在相长条件的表达式(这里,表达式 1)中代入在步骤 S3 中提取的峰值的光学距离和在步骤 S6 中提取的最大值的波数来计算干涉条件中的干涉级 m 。计算两个反射波之间的光程差(层厚度的光学距离的两倍)与在图 3D 中取作最大值的波数(对应的波长)的比率。对于此时的波数,可从多个最大值中选择最小的一个,或者在其波形稳定的峰值的波数。这里,指出,通过使用最大值处的波数和相长条件表达式获得 m ,但是还可通过使用最小值处的波数和相消条件表达式获得它。

[0081] 然而,可从步骤 S6 中的结果计算在步骤 S7 中使用的每级或每层的光学距离。换句话说,可通过使用图 3D 中的两个峰值处的波数 k_m 和 k_{m+1} 计算它,其中,1 表示图 3D 中的从 m 起的第 1 个。如下面的表达式 7 所示,通过从在上述表达式 1 中分别代入 k_m 和 k_{m+1} 而获得的两个方程消去 m ,可获得每层的光学距离。以这种方式,可通过从经过逆傅立叶变换之后的波数谱获得取作峰值的多个波数来计算各层的光学距离,这些值也可在步骤 S7 中使用。

[0082] (表达式 7)

$$[0083] \quad nd = \frac{l}{2(k_m - k_{m+1})}$$

[0084] 通常,当对多层结构进行分析时,每级或每层的折射率已知,因此,可预先决定在

步骤 S6 中是使用表达式 1 还是使用表达式 2。然而,在各层的折射率未知的情况下,应该使用哪个表达式也是未知的。在这样的情况下,分别通过使用表达式 1 和表达式 2 计算 m 。其后,分别在 $k_{m+1}, k_{m+2}, \dots$ 中计算光学距离 nd 。通过选择提供 nd 的最小误差的一个,可决定 m 。另外,通过这种方式,可知道各层的折射率之间的幅度相关性。

[0085] 在步骤 S8(与本发明第六步对应)中,通过将在步骤 S7 中获得的 m 四舍五入为整数 M_m 并再次使用相长条件或相消条件来重新计算光学距离。本质上,在相长干涉条件中,光程差变为整数倍的波长。在步骤 S7 中获得的 m 没有变为整数的情况下,这种情况的原因是由于误差而导致的。因此,通过将如此获得的值 m 近似(校正)为最接近的整数 M_m ,可消除 m 中包含的这样的误差。当在步骤 S7 中使用相长条件时,通过使用下面的表达式 8 计算光学距离。

[0086] (表达式 8)

$$[0087] \quad nd = \frac{M_m}{2k_m} = \frac{M_m \lambda_m}{2}$$

[0088] 另一方面,在相消条件中,光程差应该为半整数倍的波长。在步骤 S7 中使用相消条件的情况下,通过下面的表达式 9 计算光学距离。

[0089] (表达式 9)

$$[0090] \quad nd = (M_m + \frac{1}{2}) \frac{1}{2k_{m+0.5}} = (M_m + \frac{1}{2}) \frac{\lambda_{m+0.5}}{2}$$

[0091] 在步骤 S9 中,确定在期望的区域中是否完成测量。当还没有完成时,在后面的区域中执行测量。如果通过重复这些步骤完成期望次数的测量,则可获得与图 2 的断层图像对应的断层图像。

[0092] 这里,根据样本的数量 N 为断层图像的深度方向划定界线。在本方法中,执行等于或者少于抽样数量的次数的测量。因此,必须构造反映这样的测量或计算结果的断层图像。另外,即使当没有构造新的断层图像时,也可附属地显示测量值。

[0093] <数值的示例>

[0094] 这里,将通过使用数值给出简单的描述。假设这样进行测量,以使得检查或检验制备的样本是否满足设计构造。也就是说,这是样本不明显偏离设计值的条件。

[0095] 假设测量系统使用卤素灯的 400nm ~ 800nm 的整个光谱。此时,如从上述表达式 4 所计算的,可被测量的最小距离 $nd_{\min}$ 或测量分辨率为 400nm(0.4 μm)。这里,分光仪 108 的带宽 ΔK 为 $1.25 \times 10^6 [\text{m}^{-1}]$ ($= 1/400\text{nm} - 1/800\text{nm}$)。另外,在分光仪 108 的抽样的数量 N 为 1,024(即, $N = 1024$) 的情况下,如从上述表达式 5 所计算的,可被测量的最大距离 $nd_{\max}$ 为 205 μm 。

[0096] 这里,假设样本具有约 5 μm 的空间距离 D_1 ($D_1 = 5 \mu\text{m}$) 和约 10 μm 的空间距离 D_2 ($D_2 = 10 \mu\text{m}$),在 $N_s = 3.5$ 的 Si 基底上形成 $N_1 = 1.5$ 的层和 $N_2 = 2$ 的层。光学距离近似如下:分别地, $N_1 D_1 = 7.5 \mu\text{m}$, $N_2 D_2 = 20 \mu\text{m}$, $N_{12} D_{12} = 27.5 \mu\text{m}$,在其附近,将产生作为傅立叶变换的结果的峰值(图 3A 中的 S2)。

[0097] 当对抽样数量 N (这里,1,024)的数据进行离散傅立叶变换时,将横坐标轴划分为 N 段。这里,如此获得的结果变为相对于 $N/2$ ($= 512$) 对称,因此,仅对一侧进行以下讨论。

首先,测量分辨率为 $0.4\mu\text{m}$,所以,在步骤 S2 中,在被划分成 512 段的横坐标轴上,峰值将分别在第 19 像素 ($\approx 7.5/0.4$)、第 50 像素 ($\approx 20/0.4$) 和第 69 像素 ($\approx 27.5/0.4$) 附近出现。由于相邻峰值之间的间隔彼此分离,所以可通过在步骤 S3 中在三个带中设置带通滤波器来使三个峰值彼此分离。在步骤 S4 中,执行逆离散傅立叶变换。首先,当层厚度的光学距离为 $7\mu\text{m}$ 时, $m = 19$ ($\lambda = 789.4\text{nm}$) 至 $m = 37$ ($\lambda = 405.5\text{nm}$) 的峰值出现在作为相长条件的 $400\text{nm} \sim 800\text{nm}$ 范围内。此外,当层厚度的光学距离为 $20\mu\text{m}$ 时,具有 $m = 50$ ($\lambda = 800\text{nm}$) 至 $m = 100$ ($\lambda = 400\text{nm}$) 的峰值作为相长条件出现。然而,由于不能将相对端确定为峰值,所以实际上, m 变为 $51 \sim 99$ 的范围。

[0098] 这里,将进一步论述层厚度的光学距离约为 $7.5\mu\text{m}$ 的情况。从步骤 S2 中的傅立叶变换的结果(在第 19 像素出现峰值),获得 $7.6\mu\text{m}$ (0.4×19) 作为这层的光学距离。该值之前和之后的值分别变为 $7.2\mu\text{m}$ 和 $8.0\mu\text{m}$,所以,可仅以增量 $0.4\mu\text{m}$ 进行测量。另一方面,假设在步骤 S7 中,最小的最大值的波数为 2.466×10^6 ($\lambda = 405.5\text{nm}$)。通过在上述表示相长干涉条件的表达式 1 中代入这些值,获得 37.03 的 m 。通过将 m 的这个值近似为整数,获得 $M = 37$ 。另外,通过在步骤 S8 中在上述表达式 8 中代入如此获得的 M ,可更精确地获得这层的光学距离为 $7.502\mu\text{m}$ ($= 37 / (2 \times 2.466 \times 10^6)$)。

[0099] 这里,将描述测量精度。测量精度指示在使各层彼此分离之后的定位精确性,测量分辨率是各层彼此分离的空间距离。由于分光仪 108 根据 1,024 个像素划分 400nm 的带,所以分光仪 108 的谱分辨率为 0.39nm 。可消除相对于 m 的误差,所以,在理论上用下面的表达式 10 表示测量精度。在 m 近似等于 100 的上述条件下,测量精确约为 20nm 。当然, m 的值越小,测量精度改进得越多。

[0100] (表达式 10)

$$[0101] \quad \delta(nd) = \frac{m\delta\lambda}{2}$$

[0102] 另一方面,在仅通过离散傅立叶变换测量光学距离的情况下,测量精度和测量分辨率相同,并根据上述表达式 4 变为 400nm 。

[0103] 因而,根据本发明的测量方法,将测量精度在显著的程度得到改进。换句话说,由于在通过仅使用离散傅立叶变换计算多层结构中的光学距离的传统方法中,仅用上述表达式 3 表示的光学距离可被表示,所以变为离散值。因而,在实际值存在于离散值之间的情况下,发生所谓的谱泄漏,在谱泄漏中,数据在它的边缘分散(即,导致图 3C 的例子情况下的具有钝的峰值的波形),并且通过光源的带宽(即,波数的宽度 ΔK) 决定它的分辨率。另一方面,在本发明的方法中,通过带通滤波器截掉多个数据,然后对这些数据进行逆离散傅立叶变换,由此可构造用于一层的基本正弦波形的波数谱。换句话说,收集泄漏的谱以重新构造波形。在这种情况下,意味着可用分光仪的带宽 ΔK 表示具有非整数值周期的正弦波。然而,当带宽为最小分辨率(即,1 个像素)时,它将与离散傅立叶变换的结果一致。这是由于泄漏到边缘中的数据不能被使用。因此,当通过离散傅立叶变换用足够的带宽分离数据时,本发明的方法是有效的。另外,在折射率取决于波长的情况下,由于可使用与波长对应的折射率,所以可进行更高精确性的测量。

[0104] 这里,当然存在层构造不满足测量条件的情况。例如,这是这样的情况,在该情况下,即使多层结构的各层满足可用上述表达式 3 表示的条件,加到彼此的这些层的状态也

超过 $nd_{\max}$ 。即使在这样的情况下,本发明的技术也不是完全不能使用,尽管这样的分量作为测量噪声施加于分光仪。

[0105] 另外,在能够扫掠波长的扫掠光源用作光源的情况下,光电二极管用作检测器,通过 AD 转换器将被运算放大器放大之后的光电二极管的检测信号输入进个人计算机中。即使在这样的情况下,也可使用本发明的技术。

[0106] [第二实施例]

[0107] 在本发明的第二实施例中,将参考附图论述使用参考反射镜的构造的光学相干设备。这里,以下主要描述与第一实施例的不同之处。

[0108] <光学系统的构造>

[0109] 首先,将使用图 4 论述根据这个第二实施例的光学相干设备的构造。分束器 103 将从光源 101 发射的光划分为参考光 404 和测量光 112。测量光被作为待观察对象的样本 106 反射,从而它作为回光 113 返回。另一方面,参考光被参考反射镜 401 反射。这里,参考反射镜 401 可通过位置调整机构 402 调整光路长度。通过分束器 103 将参考光与回光组合。因而,这个第二实施例中的光学相干设备的光学系统将来自光源的光划分为测量光和参考光,将测量光引向样本 106,还将其回光引向检测位置,进一步将参考光通过参考臂(参考光路)引向检测位置。

[0110] 组合光通过成像透镜 107 到达分光仪 403。这里,棱镜 405 用于分光仪 403。棱镜具有各种优点,诸如高透射率、杂散光减少、没有级数重叠、发射光的偏振有限等。另一方面,存在缺陷,诸如存在材料的限制、存在色散的波长依赖性等。这里,衍射光栅型分光仪可用于分光仪 403。

[0111] 这里,将论述使用参考反射镜 401 的原因。首先,来自样本的回光为在样本的表面、第一界面、第二界面等上反射的光。用 $E_s(k)$ 表示波数 k 处的这个回光的电场,用 $E_r(k)$ 表示波数 k 处的参考反射镜上的反射光(参考光)的电场。此时,被划分进入图像拾取元件 110 的波数 k 处的光的光学强度 $P(k)$ 变为如通过下面的使用表示复共轭的符号 $*$ 的表达式 11 所示的关系。

[0112] (表达式 11)

$$[0113] \quad P(k) \propto E_r^2(k) + E_r(k)E_s^*(k) + E_r^*(k)E_s(k) + E_s^2(k)$$

[0114] 在没有使用参考反射镜 401 的情况下,入射在图像拾取元件上的光的强度变为仅用右侧的第四项表示。当样本的反射率低时,变得不可能获得足够的光学强度,所以,光被掩蔽在噪声中,变得不能被检测到。

[0115] 另一方面,在使用参考反射镜 401 的情况下,上述表达式 11 的所有项对入射光的强度起作用。在这些项中,与来自样本 106 的回光和来自参考反射镜 401 的参考光之间的干涉相关的分量是右侧的第二项和第三项。当 E_s 小时,这些分量变小。通过诸如视网膜的多层结构,相邻层之间的折射率之差小,所以层之间的界面上的反射率低, E_s 变小。即使在这样的情况下,也可通过增加参考光的光量来提高入射在图像拾取元件上的光的光学强度。

[0116] 另外,在不使用参考反射镜的情况下,将存在这样的问题,诸如不能知道各层的相对位置关系、不能使各层彼此分离等。由于这些原因,可采用使用参考反射镜的技术,尽管

光学系统的构造变复杂。

[0117] < 到参考反射镜的光学距离 >

[0118] 接下来,将使用图 5 论述多层结构。这里,为了简化起见,不考虑多个反射的影响。另外,可考虑参考反射镜 501 与样本对准,所以如图 5 所示布置参考反射镜 501。这里,将回光和参考光之间的光程差表示为从参考反射镜到样本的表面的距离 L_0 。此外,分别用 $N_{m1}L_1$ 和 $N_{m2}L_2$ 表示从参考反射镜到第一界面的光学距离和从参考反射镜到第二界面的光学距离。这里,多层结构的样本具有下述构造并被设置在折射率 N_0 的介质上,所述构造具有在折射率 N_s 的基底 204 上布置的折射率 N_2 的第二层 203 和折射率 N_1 的第一层 202。分别用 D_1 和 D_2 表示各层的空间距离。

[0119] < 信号处理 >

[0120] 将取图 5 的构造作为示例论述这个实施例的信号处理步骤与第一实施例的信号处理步骤的不同之处。在步骤 S1 中,从分光仪获取谱数据。在图 6A 中概略示出此时的数据。

[0121] 在步骤 S3 中,将滤波应用于谱数据的傅立叶变换的结果。首先,傅立叶变换的结果变为如图 6B 所示,在图 6B 中,光学距离的峰值分别在位置 N_0L_0 、 $N_{m1}L_1$ 和 $N_{m2}L_2$ 出现。这些光学距离分别对应于样本表面 205、第一界面 206 和第二界面 207 距参考反射镜 501 的光学距离。同时,与第一实施例类似,由于多层结构自身的干涉,而导致峰值还分别在 N_1D_1 、 N_2D_2 和 $N_{12}D_{12}$ 出现。

[0122] 这里,优选以这样的方式设置参考反射镜 501,即,该反射镜 501 和样本表面 205 之间的光学距离 N_0L_0 比整个多层结构的厚度 $N_{12}D_{12}$ 长。结果,可使第一区域 601 和第二区域 602 彼此分离,在第一区域 601 中,样本自身的干涉分量出现,在第二区域 602 中,样本和参考反射镜的干涉分量出现。

[0123] 在通过滤波器选择作为以上结果而获得的峰值之一之后,通过与上述第一实施例中的技术类似的技术计算如此选择的峰值的光学距离。换句话说,在步骤 S4 中,通过对所选择的峰值执行逆傅立叶变换获得如图 6C 中示出的结果。

[0124] 然后,在步骤 S6 (与本发明的第七步对应) 中,通过从图 6C 的结果指定波数根据上述干涉条件表达式 1 计算干涉级 m 。在步骤 S7 中,将如此获得的干涉级 m 四舍五入为整数,然后通过干涉条件表达式中代入该整数来计算光学距离。

[0125] 这里,在使用参考反射镜的情况下,各层的距离为以下关系。

[0126] (表达式 12)

$$[0127] \quad N_{m1}L_1 = N_0L_0 + N_1D_1$$

[0128] 因此,第一层的空间距离变为如下面的表达式 13 所示。

[0129] (表达式 13)

$$[0130] \quad D_1 = \frac{N_{m1}L_1 - N_0L_0}{N_1}$$

[0131] 类似地,第二层的空间距离变为如下面的表达式 14 所示。

[0132] (表达式 14)

$$[0133] \quad D_2 = \frac{N_{m2}L_2 - N_{m1}L_1}{N_2}$$

[0134] 通过将这个表达式扩展到第 (i+1) 层, 将获得下面的表达式 15。

[0135] (表达式 15)

$$[0136] \quad D_{i+1} = \frac{N_{mi+1}L_{i+1} - N_{mi}L_i}{N_{i+1}}$$

[0137] 换句话说, 每层的空间距离是通过从到其位于远离参考反射镜的一侧的界面的光学距离 ($N_{mi+1}L_{i+1}$) 中减去到其位于接近参考反射镜的一侧的界面的光学距离 ($N_{mi}L_i$) 并将它除以这两个界面之间的折射率 (N_{i+1}) 来获得的。

[0138] 如果使这些空间距离成像, 则可获得基于图 5 的空间距离的断层图像。这里, 传统的断层图像为光学距离的断层图像。

[0139] [第三实施例]

[0140] 在本发明的第三实施例中, 将使用图 7 论述应用本发明的眼用光学相干设备中的光学系统。该系统具有使用第二实施例的参考反射镜的类型的基本构造。

[0141] <光学系统的构造>

[0142] 图 7 示出构造作为整体的 Mach-Zehnder 干涉系统。通过分束器 703-1 将从光源 701 发射的光划分为参考光 705 和测量光 706。测量光 706 在通过反射或散射被作为待观察对象的眼睛 707 作为回光 708 返回之后, 通过分束器 703-2 与参考光 705 组合而进入分光仪 721。

[0143] 首先, 将论述光源 701 的环境。光源 701 为作为典型的低相干光源的 SLD (Super Luminescent Diode, 超辐射发光二极管)。光源 701 具有 830nm 的波长和 50nm 的带宽。这里, 由于带宽影响将获得的断层图像的光轴方向上的分辨率, 所以带宽为重要的参数。另外, 虽然这里选择 SLD 用于光源, 但是可使用仅需要能够发射低相干光的任何类型的光源, ASE (Amplified Spontaneous Emission, 放大自发发射) 等可被使用。此外, 考虑到对眼睛进行测量的事实, 近红外光适合于将使用的波长。此外, 由于波长影响将获得的断层图像的水平方向上的分辨率, 所以理想情况是波长尽可能地短。这里, 使用 830nm 的波长。当然, 可根据待观察对象的测量部分选择其它波长。将从光源 701 发射的光通过单模光纤 710-1 引向透镜 711-1。

[0144] 接下来, 将论述参考光 705 的光路。被分束器 703-1 划分的参考光 705 进入连续的反射镜 714-1 至 714-3, 通过反射镜 714-1 至 714-3, 它在其行进方向上改变以通过分束器 703-2 进入分光仪 721。这里, 标号 715-1 和 715-2 表示色散补偿玻璃。色散补偿玻璃 715-1 补偿当测量光 706 相对于眼睛 707 往复来回时测量光 706 相对于参考光 705 的散射。换句话说, 理想情况是色散补偿玻璃 715-1 的长度 L1 等于一般眼睛深度的两倍。这里, 将长度 L1 设置为 46mm, 46mm 为假设为日本人的平均眼球的直径的 23mm 的两倍。此外, 电子级 717 可在箭头所指示的方向上移动, 从而它可调整和控制参考光 705 的光路长度。色散补偿玻璃 715-2 用于补偿用于扫描眼睛 707 的透镜 720-1 和 720-2 的色散的目的。

[0145] 将论述测量光 706 的光路。被分束器 703-1 划分的测量光 706 通过色散补偿玻璃 715-3, 并被分束器 703-3 反射。然后, 测量光 706 入射在 XY 扫描仪 719 的反射镜上。XY 扫

描仪 719 在与测量光 706 的光轴垂直的方向上对视网膜 723 进行光栅扫描。另外,调整测量光 706 的中心,以使得与 XY 扫描仪 719 的反射镜的旋转的中心一致。透镜 720-1 和 720-2 一起构成用于扫描视网膜 723 的光学系统,具有使测量光 706 在被设置为支点的角膜 722 附近的位置对视网膜 723 进行扫描的作用。这里,透镜 720-1 和 720-2 的焦距分别为 50mm 和 50mm。当测量光 706 进入眼睛 707 时,它从视网膜 723 作为回光 708 反射或散射。此外,通过分束器 703-3 将回光 708 划分为回光 708-1 和回光 708-2,从而将一个回光 708-1 引向分光仪 721,另一回光 708-2 通过分束器 703-1 被引向检测器 724。与干涉信号类似,检测器 724 的输出信号被以电的方式取到计算机 725 中,从而可记录和显示回光 708-2 的强度。另外,通过检测器 724 获得的信号为由于视网膜 723 上的反射或散射而引起的回光 708-2 的强度信号,它不具有任何深度分辨率。例如,作为高速度高灵敏性传感器的 APD(Avalanche PhotoDiode,雪崩光电二极管)被用作检测器 724。

[0146] <数值的示例>

[0147] 这里,将使用数值给出描述。待观察对象为眼睛,其物理大小和结构不根据个人而变化许多。然而,为了简单起见,假设眼睛的结构如下。首先,整个视网膜的空间距离为 $560\text{ }\mu\text{m}$,包括七层,每层的空间距离为 $80\text{ }\mu\text{m}$ 。另外,每层的折射率为 1.5(虽然除非各层的折射率彼此不同,否则在相邻层之间的每个界面上将没有反射发生,但是为了简化数值的计算,这里将所有的折射率设置为相同值)。因此,每层的光学距离为 $120\text{ }\mu\text{m}$,整个视网膜的光学距离为 $840\text{ }\mu\text{m}$ 。这样设置反射镜的位置,以使得空间距离 L_0 变为 $400\text{ }\mu\text{m}$ ($L_0 = 400\text{ }\mu\text{m}$),其光学距离为 $600\text{ }\mu\text{m}$ 。

[0148] 当使用 $805\text{nm} \sim 855\text{nm}$ 的所有光谱时,可被测量的最小距离 $nd_{\min}$ 为 $6.9\text{ }\mu\text{m}$ 。此外,当 $N = 1,024$ 时,可被测量的最大距离 $nd_{\max}$ 为 3mm (光学距离)。如果对干涉谱进行离散傅立叶变换,则由于每个像素的 $6.9\text{ }\mu\text{m}$,所以峰值在 87、104、122、139、157、174、191 和 209 像素的附近出现。这些峰值彼此远离,所以可使它们彼此分离。当光学距离为 $600\text{ }\mu\text{m}$,即,最短时,相长条件为 $m = 1,404 \sim 1,490$,而当光学距离为 $1,440\text{m}$,即,最长时,相长条件为 $m = 3,369 \sim 3,577$ 。另一方面,为了将 50nm 划分为 1,024 个部分,分光仪的分辨率为 0.049nm 。当 $m = 4,000$ 时,尽管条件根据将计算的波长而改变,但理论上,测量精度将约为 100nm 。由于根据离散傅立叶变换的测量精度为 $6.9\text{ }\mu\text{m}$,所以可以说,测量精度在显著的程度得到改进。

[0149] 尽管已参考示例性实施例描述了本发明,但是应该理解,本发明不限于所公开的示例性实施例。将给予权利要求的范围以最广泛的解释以包括所有这样的修改及等同的结构和功能。

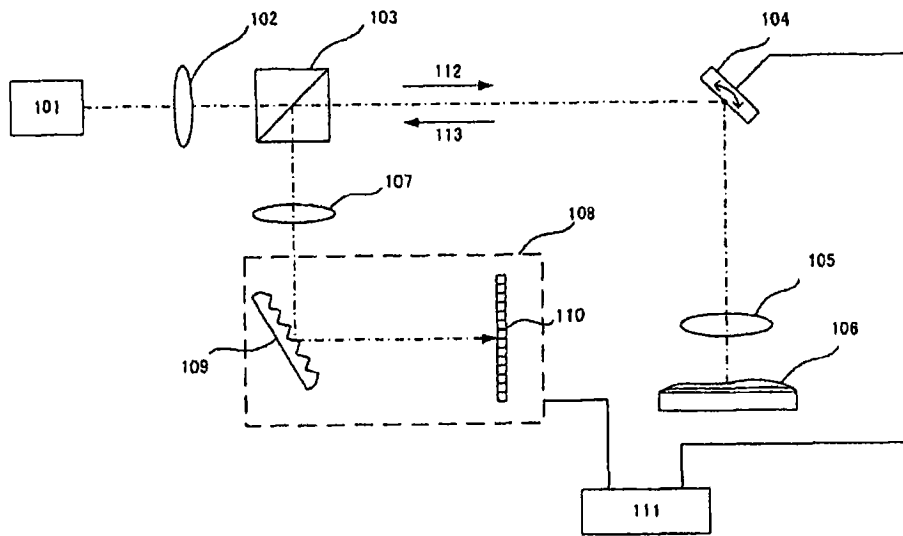


图 1

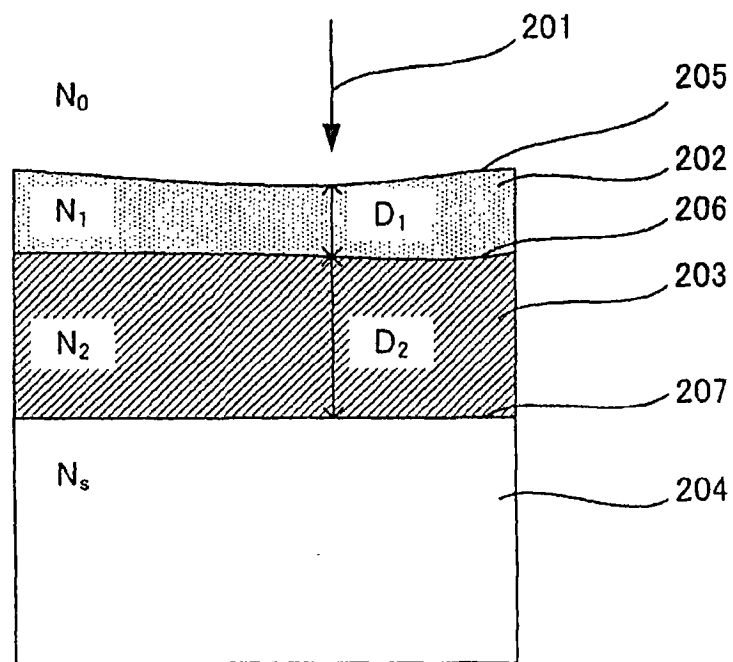


图 2

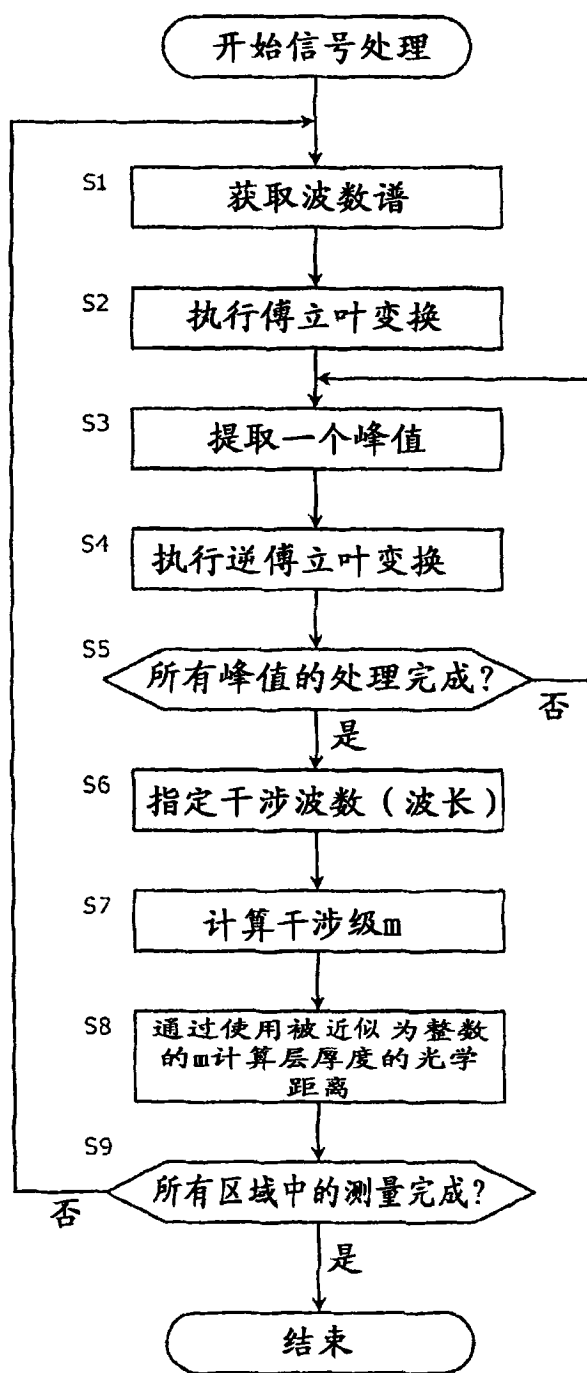


图 3A

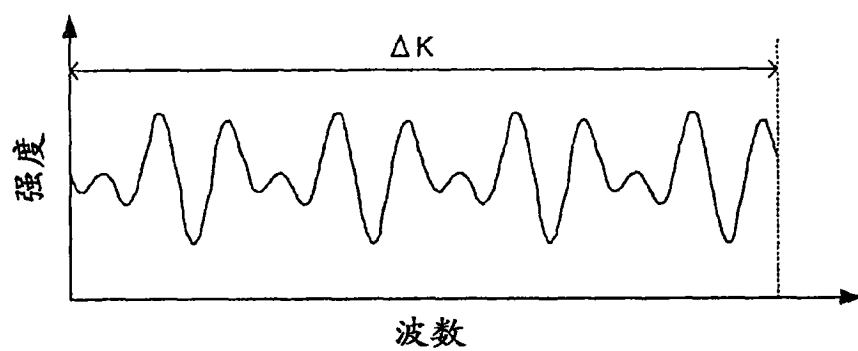


图 3B

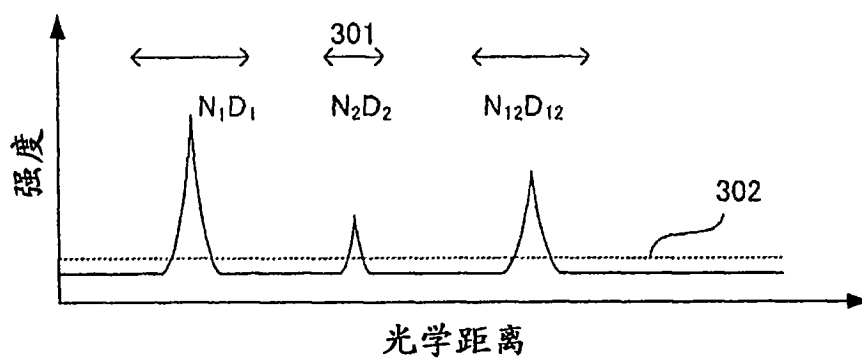


图 3C

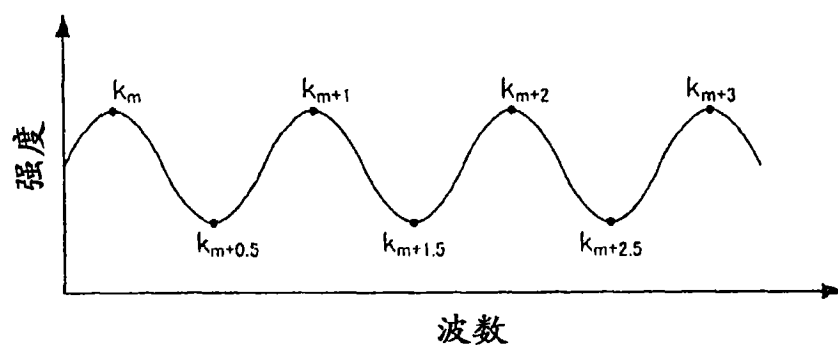


图 3D

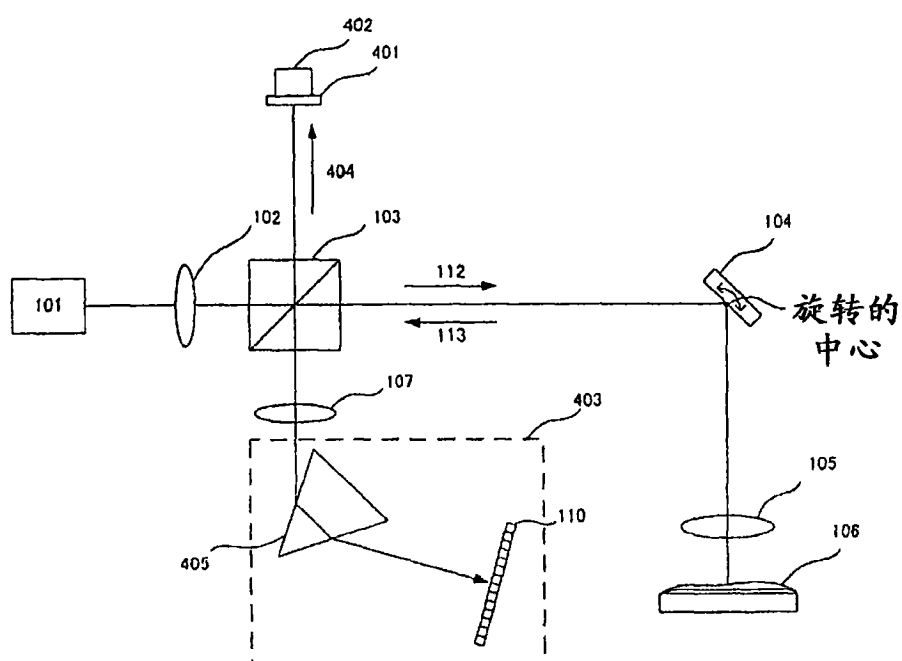


图 4

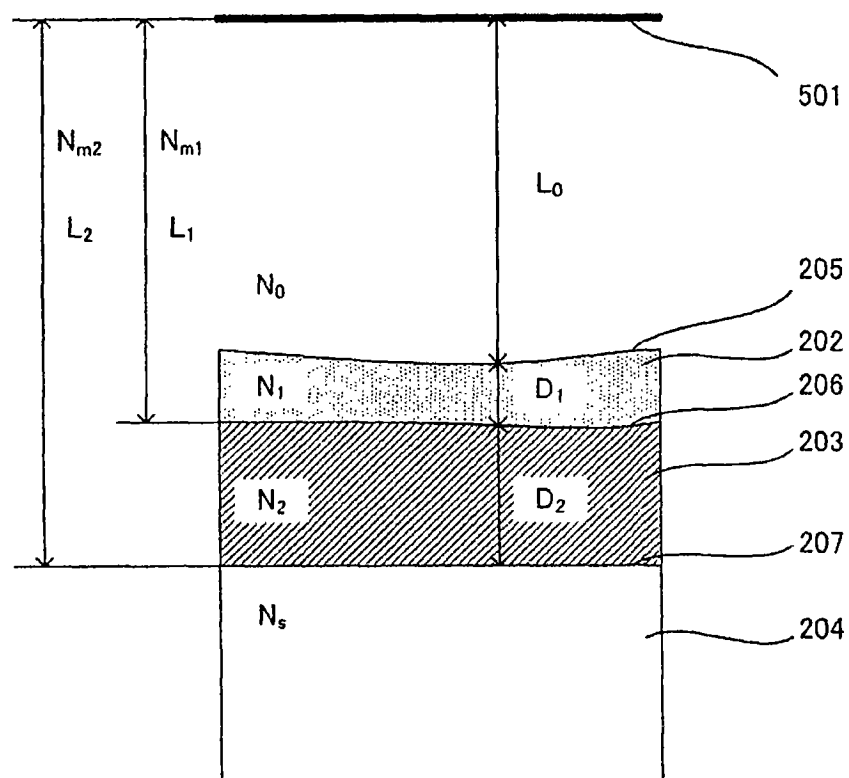


图 5

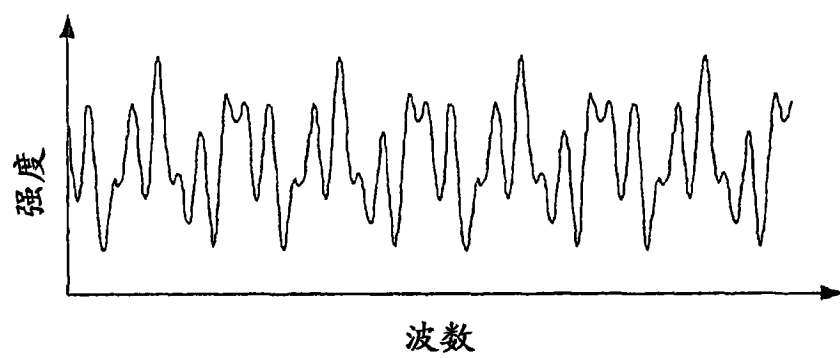


图 6A

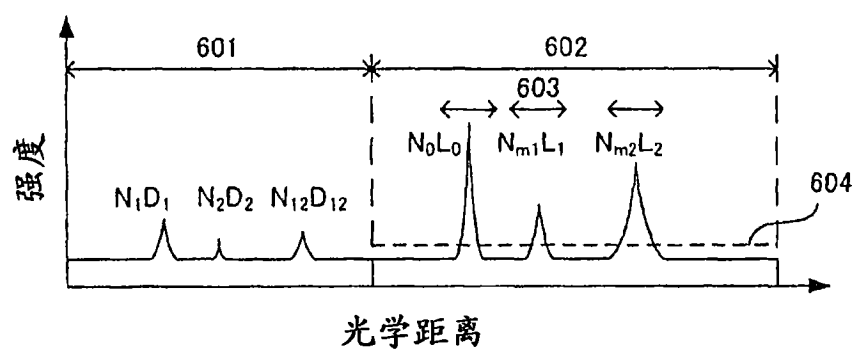


图 6B

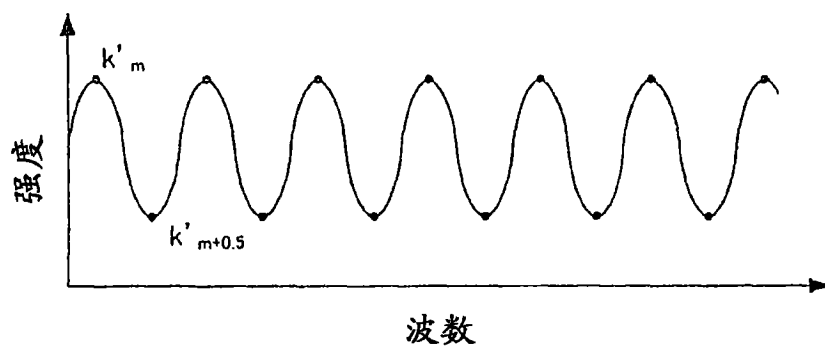


图 6C

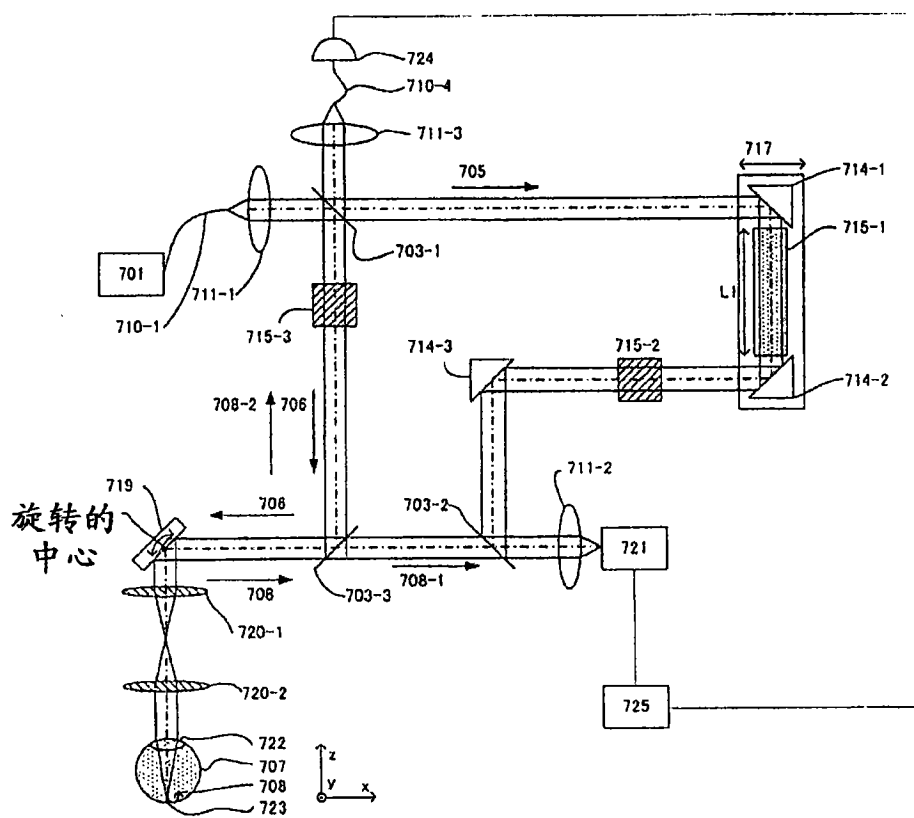


图 7