



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104535009 B

(45)授权公告日 2017.07.25

(21)申请号 201410820296.1

(22)申请日 2010.09.16

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104535009 A

(43)申请公布日 2015.04.22

(30)优先权数据

61/243,746 2009.09.18 US

61/255,575 2009.10.28 US

61/350,343 2010.06.01 US

12/874,901 2010.09.02 US

(62)分案原申请数据

201080041709.6 2010.09.16

(73)专利权人 直观外科手术操作公司

地址 美国加利福尼亚州

(72)发明人 马克·E·弗罗加特

贾斯丁·W·克莱恩

道恩·K·吉福德

史蒂芬·托德·克瑞格

(74)专利代理机构 北京聿宏知识产权代理有限公司 11372

代理人 吴大建 刘华联

(51)Int.Cl.

G01B 11/16(2006.01)

G01B 11/24(2006.01)

(56)对比文件

US 2008/0212082 A1, 2008.09.04,

US 2007/0065077, 2007.03.22,

CN 1880913 A, 2006.12.20,

审查员 谢岗

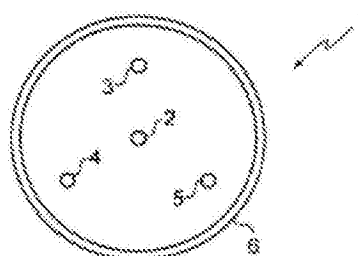
权利要求书2页 说明书17页 附图18页

(54)发明名称

光位置和/或形状感测

(57)摘要

本发明公开了用多芯光纤进行形状感测的精确测量方法和装置。检测直到多芯光纤上一点处的多芯光纤内的各个芯的光程变化。基于所检测到的光程变化来确定多芯光纤上该点处的位置和/或指向。该确定的精度优于直到多芯光纤上该点处的多芯光纤的光程变化的0.5%。在一个优选的示例性实施例中,该确定包括基于所检测到的光程变化来确定多芯光纤的至少一部分的形状。



1. 一种用于具有带有布拉格光栅的纤芯的光纤的测量方法,包括:

跟踪与一段长度的纤芯上的布拉格光栅上的应变相关联的相位变化,其中,跟踪到的相位变化与光纤的该纤芯中的光程总变化成比例,该总变化反映针对纤芯的多个分段长度直到光纤上的一点处的所有光程变化的累积,以及

基于所跟踪到的相位变化来测量该段长度的纤芯上的应变。

2. 如权利要求1所述的方法,其中,跟踪步骤包括:

采用光频率域反射计来获得沿所述纤芯的相位数据值。

3. 如权利要求2所述的方法,其中,所述纤芯被分成多个分段,以及其中,跟踪步骤还包括:

获取针对多个分段中的每个分段的参考测量,从而产生针对所述多个分段的每个分段的参考数据集合;

获取针对多个分段中的每个分段的随后的测试测量,从而产生针对所述多个分段中的每个分段的测试数据集合;

确定多个分段中的一个分段的延迟;

调整对该一个分段的延迟,以对准所述参考数据集合和所述测试数据集合;以及

计算对准的参考数据集合和测试数据集合之间的相位变化。

4. 如权利要求1所述的方法,其中,跟踪包括检测光纤中的该纤芯中针对多个分段长度中的各个分段到光纤上的该点的光程中的递增变化,并且其中,所述光程总变化基于递增变化的组合。

5. 如权利要求4所述的方法,其中,跟踪步骤包括检测光纤的纤芯中从纤芯中的多个分段长度反射的光信号的相位响应,以及其中多个分段长度上的光纤的应变导致了从纤芯的多个分段长度反射的光信号的相移。

6. 如权利要求5所述的方法,其中,该方法还包括连续监测沿所述光纤的该纤芯中的光程的相位响应。

7. 如权利要求5所述的方法,其中,所述方法包括:

检测针对各个分段长度的反射光信号中的反射的瑞利散射模式,

比较针对各个分段长度的所述反射的瑞利散射模式与参考的瑞利散射模式,和

基于该比较来确定针对各个分段长度的相位响应。

8. 如权利要求1所述的方法,其中,光程变化的确定通过计算各个分段长度沿光纤的光相位变化以及解绕该光程变化以确定光程来进行。

9. 如权利要求1所述的方法,其中,所述方法还包括:

沿光纤传输具有至少两个偏振态的光,以及

将具有至少两个偏振态的光的反射相组合以确定光程变化。

10. 如权利要求9所述的方法,其中,所述两个偏振态包括至少正交的第一偏振态和第二偏振态,并且该方法还包括:

采用偏振控制器来沿光纤传输处于第一偏振态的第一光信号,

采用所述偏振控制器来沿光纤传输处于第二偏振态的第二光信号,以及

利用第一光信号和第二光信号的反射来计算光纤的纤芯中直到光纤的该点处的光程中与偏振无关的变化。

11. 一种采用具有带有布拉格光栅的纤芯的光纤进行测量的装置, 包括:

检测模块, 其配置成跟踪与一段长度的纤芯上的布拉格光栅上的应变相关联的相位变化, 其中, 跟踪到的相位变化与光纤中的该纤芯中的光程总变化成比例, 该总变化反映针对纤芯的多段长度直到光纤上的一点处的所有光程变化的累积, 以及

处理模块, 其配置成基于所跟踪到的相位变化来测量该段长度的纤芯上的应变。

12. 如权利要求11所述的装置, 其中, 所述检测模块配置成采用光频率域反射计来获得沿所述纤芯的相位数据值。

13. 如权利要求12所述的装置, 其中, 所述纤芯被分成多个分段, 以及其中, 检测模块配置成:

获取针对多个分段中的每个分段的参考测量, 从而产生针对所述多个分段的每个分段的参考数据集合;

获取针对多个分段中的每个分段的随后的测试测量, 从而产生针对所述多个分段中的每个分段的测试数据集合;

确定多个分段中的一个分段的延迟;

调整对该一个分段的延迟以对准所述参考数据集合和所述测试数据集合; 以及

计算对准的参考数据集合和测试数据集合之间的相位变化。

14. 如权利要求11所述的装置, 其中, 检测模块配置成跟踪光纤中的该纤芯中针对多段长度中的各个分段到光纤上的该点的光程中的增量变化, 并且其中, 所述光程总变化基于递增变化的组合。

15. 如权利要求11所述的装置, 其中, 检测模块配置成检测光纤的纤芯中从纤芯中的多个分段长度反射的光信号的相位响应, 以及其中多个分段长度上的光纤的应变导致了从纤芯的多个分段长度反射的光信号的相移。

16. 如权利要求15所述的装置, 其中, 检测模块配置成连续监测沿所述光纤的该纤芯中的光程的相位响应。

17. 如权利要求15所述的装置, 其中, 检测模块配置成:

检测针对各个分段长度的反射光信号中的反射的瑞利散射模式,

比较针对各个分段长度的所述反射的瑞利散射模式与参考的瑞利散射模式, 和

基于该比较来确定针对各个分段长度的相位响应。

18. 如权利要求11所述的装置, 其中, 光程变化的确定是通过计算各个分段长度沿光纤的光相位变化以及解绕该光程变化以确定光程进行的。

19. 如权利要求11所述的装置, 其中, 所述装置还包括:

传输器, 其配置成沿光纤传输具有至少两个偏振态的光, 以及

组合器, 其配置成将具有至少两个偏振态的光的反射相组合以确定光程变化。

20. 如权利要求19所述的装置, 其中, 所述两个极态包括至少正交的第一偏振态和第二偏振态, 并且该装置还包括:

偏振控制器, 其配置成用以沿光纤传输第一偏振态的第一光信号和沿光纤传输第二偏振态的第二光信号,

其中, 处理模块配置成利用第一光信号和第二光信号的反射来计算光纤的纤芯中直到光纤的该点处的光程中与偏振无关的变化。

光位置和/或形状感测

[0001] 本申请是申请日为2010年9月16日、题为“光位置和/或形状感测”的中国发明专利申请201080041709.6的分案申请。

[0002] 本申请要求享有2009年9月18日提交的美国临时专利申请61/243,746、2009年10月28日提交的美国临时专利申请61/255,575以及2010年6月1日提交的美国临时专利申请61/350,343的优先权,其全部内容通过引用结合到本文中。

技术领域

[0003] 本技术领域涉及光测量,更具体地涉及光位置和/或形状感测。

背景技术

[0004] 形状测量是一个通用的术语,其包括感测三维空间中的某一结构的位置。此测量与人眼看见的物体的位置相符。由于人眼持续地完成此任务,因此可能会觉得这种测量很简单。如果考虑的是绳子的长度,那么人可能要物理性地测量沿绳子上的每一英寸处的位置,以便估计其形状。但是,这种任务是单调的,并且形状越复杂其越困难。另一考虑是,如果该绳子无法物理性地够到或看到,那么如何进行这种测量。如果绳子装在一个密封的盒子里,它的位置就不可能通过常规的测量技术来确定。这种例子中的绳子可用光纤来代替。

[0005] 感测细长形圆柱体如光纤的形状在例如从制造和施工到医药和航空的许多应用中都是有用的。在大多数的这些应用中,形状感测系统必须能精确地确定光纤的位置,误差例如小于其长度的百分之一,而在许多情况下要小于其长度的千分之一。针对形状测量问题存在许多方法,但是均未充分满足多数应用的要求,因为它们太慢,不能接近所需要的精度,在出现拉紧弯曲时无法工作,或者不能充分地补偿光纤的扭转。在许多应用中,存在使光纤扭转的扭力降低了精度,因此也消弱了这些方法的有效性。

[0006] 测量光纤形状的常规方法是采用应变作为基础测量信号。应变是受压后的光纤分段的长度相对于该分段的原始长度(受压前)的变化比率。当象光纤这样的物体被弯曲时,弯曲外侧上的材料被拉长,而弯曲内侧上的材料被压缩。如果知道局部应变的这些变化以及物体的原始位置,就可以粗略地估计出光纤的新位置。

[0007] 为了有效地高精度地感测位置,必须解决几个关键的因素。首先,对于基于应变的方法来说,应变测量优选精确到10个纳米级应变(每10亿10份)的水平。然而,通过常规的电阻式或光学式应变仪无法容易地获得高精度的应变测量。因此,必须设计出一种能以非常高的精度来测量应变的新技术,它不是常规意义上的基于应变的技术。

[0008] 其次,必须要高精度地测量到光纤中存在的扭转,且要在形状计算中对其加以考虑。通过形成螺旋式的且具有中心芯的多芯光纤,就可以感测光纤的扭转。但问题是,如何获得高于1度的旋转位置精度。对于高精度的旋转传感器,必须以高精度的方式来确定一段光纤上的应变传感器的位置。因此,希望有一些可测量螺旋光纤中的外芯的旋转率的方法,其能够用来校正光纤位置的计算。

[0009] 第三,具有以足够比率形成螺旋的多个芯和布拉格光栅(常规的光学应变仪)的光

纤难以制造且成本昂贵。因此,希望提供一种不用布拉格光栅就能实现纳米级应变分辨率的方法。

[0010] 第四,多芯光纤通常不是保偏的,因此最好还要考虑到偏振效应。

发明内容

[0011] 以下所描述的技术阐明了如何按照上述因素和考虑来利用光纤的内在属性以实现非常精确的形状计算。事实上,光纤的位置通过解释光纤内的激光散射出的玻璃分子的背反射来确定。这种测量可以高分辨率地快速进行,并且达到高精度。

[0012] 公开了一种用于采用多芯光纤来测量位置和/或方向的非常精确的测量方法和装置。检测直到多芯光纤上的一点处的多芯光纤的各个芯中的光程变化。基于所检测到的光程变化来确定多芯光纤上的该点处的位置和/或指向。该指向对应于基于正交应变信号所确定的在多芯光纤上的该位置处的多芯光纤的弯曲角度。这种确定的精度优于直到多芯光纤上该点处的多芯光纤的光程的0.5%。在一个优选的示例性实施例中,该确定包括基于所检测到的光程变化来确定多芯光纤的至少一部分的形状。

[0013] 该确定可包括基于所检测的直到该位置的长度变化来计算在多芯光纤上任何位置处的多芯光纤的弯曲角度。之后,可基于所计算的弯曲角度来确定多芯光纤的形状。可以两维或三维的方式来计算该弯曲角度。

[0014] 检测光程变化优选地包括检测直到多芯光纤上的一点处的对于多个分段长度中的每一分段长度的多芯光纤的各个芯的光程的递增变化。总的所检测到的光程变化基于这些递增变化的组合。通过计算多芯光纤上各个分段长度处的光相位变化并解绕该光相位变化以确定光程,从而来确定光程的变化。

[0015] 更具体地说,在一个非限制的示例性实施例中,可以检测来自多个分段长度的在多芯中的至少两个芯中反射的光信号的相位响应。这些分段长度处的光纤上的应变导致了这两个芯中的来自分段长度的反射光信号的相移。优选地,针对各个分段长度连续地监控多芯光纤的光程上的相位响应。

[0016] 在另一个非限制的示例性实施例中,针对各个分段长度来检测反射光信号中的反射的瑞利散射模式,从而不需要采用布拉格光栅等。针对各个分段长度将反射的瑞利散射模式与参考瑞利散射模式进行比较。基于该比较来确定针对各个分段长度的相位响应。

[0017] 一个非限制的示例性实施例还基于多芯光纤的所检测到的光程变化来确定在多芯光纤上的一点处与多芯光纤相关联的扭转参数。随后基于所确定的扭转参数将多芯光纤上该点处的位置转化到正交坐标系统中。优选地,针对各个分段长度来校正所确定的扭转参数。

[0018] 在一个示范性应用中,多芯光纤包括三个外围芯,它们围绕着沿多芯光纤中心的第四芯与之间隔开,可以确定来自各个分段长度的四个芯中的每一个芯中反射的光信号的相位响应。多芯光纤的在一个或多个分段长度处的应变导致了各个芯中的反射光信号的相移。对三个外围芯的相位响应进行平均。平均后的相位响应与第四个芯的相位响应相结合,以消除共模应变。然后,根据所结合的相位响应来确定扭转参数。

[0019] 在另一个非限制的示例性实施例中,确定多芯光纤上由弯曲引发的光程变化,并在确定扭转参数时加以考虑。计算一个分段长度处的弯曲,并对其进行平方。平方后的弯曲

与一常数相乘,得到弯曲积,其与所述这个分段长度处的多芯光纤的外芯的所确定的光程变化相结合。此实施例的一个示范性的有利应用是弯曲半径小于50mm的情况。

[0020] 另一个非限制的示例性实施例确定在各个分段长度处的多芯光纤上的一点处多芯光纤关于其轴线的旋转方位。基于所检测的多纤芯中的光程变化来校正扭转效应和在该确定方位上所产生的扭转。需要用这种校正来计算正确的弯曲方向。

[0021] 假设多芯光纤具有公称自旋率,另一非限制的示例性实施例确定各个分段长度处的多芯光纤上的一点处的多芯光纤相对于多芯光纤的公称自旋率的角度旋转。确定并校正多芯光纤上该点处的公称自旋率的变化。通过在一个平面中将多芯光纤约束成弯曲的定向,可以确定多芯光纤的“抖动因子”。随后在基于所检测的光程变化来确定多芯光纤上的该点处的位置时对抖动因子进行校正。

[0022] 在另一个非限制的示例性实施例中,光以至少两个偏振状态沿多芯光纤传输。具有至少两个偏振状态的光的反射被组合起来,并用于基于所检测的光程变化来确定多芯光纤上的该点处的位置或指向。这两个偏振状态包括至少标准正交的第一偏振状态和第二偏振状态。采用偏振控制器来沿多芯光纤传输第一偏振状态的第一光信号,以及沿多芯光纤传输第二偏振状态的第二光信号。采用第一光信号和第二光信号的反射来计算直到达多芯光纤上的该点处的多芯光纤中的多芯中各个光纤的与偏振无关的光程变化。

附图说明

[0023] 图1显示了一示范性多芯光纤的截面图;

[0024] 图2显示了弯曲的多芯光纤;

[0025] 图3显示了光纤中的弯曲与偏心纤芯中的应变成比例;

[0026] 图4显示了在光纤上任何位置处的弯曲角度可通过累加所有之前的角度来确定;

[0027] 图5显示了在含有布拉格光栅的光纤产生应变时,相对于参考状态所测得的相位差开始累积;

[0028] 图6显示了有助于直观化相移和位置之间的关系的时钟;

[0029] 图7说明了在测量相位时缺乏分辨率是如何产生问题的;

[0030] 图8是显示了在处于拉伸下的光纤部分的开始处的参考扫描和测量扫描之间的瑞利散射信号的相位差的图表;

[0031] 图9是显示了在从处于拉伸下的光纤向下更大的距离处失去了参考和测量之间的相干性的图表;

[0032] 图10显示了对于二个不同的延迟而言的相对于频率绘制的光相位;

[0033] 图11显示了在已发生了三分之一分度偏移的一段光纤上的恢复的相位;

[0034] 图12说明了一个螺旋式旋转的多芯形状感测光纤的例子;

[0035] 图13说明了一个非限制性的示范测试多芯光纤;

[0036] 图14说明了螺旋形光纤的截面图,其中外芯的位置沿光纤长度向下渐进地围绕中心芯旋转;

[0037] 图15是说明光纤的自旋率的变化例子的图表;

[0038] 图16是显示了一个示范抖动信号的图表,该抖动信号在形状感测光纤的长度上具有相对于制造自旋率的周期性相位变化;

- [0039] 图17显示了扭矩如何基于力相对于光纤的公称自旋方向的方位而改变形状感测光纤的自旋率；
- [0040] 图18显示了外芯，其建模为展平柱体的情况下在沿表面平移时经历了扭转；
- [0041] 图19是说明了用来计算光纤上的外部扭转的非限制性示范过程的流程图；
- [0042] 图20显示了更详细地说明图19所示过程的针对一般形状的示范数据集；
- [0043] 图21是显示了两个相位曲线之间的微小偏差的图表；
- [0044] 图22是说明了根据图21产生的扭转信号的图表；
- [0045] 图23说明了在形状计算中补偿扭转的必要性；
- [0046] 图24描绘了针对处于全都出现在同一平面中的若干弯曲下的光纤的示范性正交应变曲线；
- [0047] 图25显示了描述用于根据应变计算形状的非限制性示范步骤的流程图；
- [0048] 图26说明了如果多个指向矢量中的每一个均首尾放置，则可得到形状的准确测量；
- [0049] 图27是非限制性的示范光位置和形状感测系统；
- [0050] 图28是说明了用于计算双折射校正的非限制性示范步骤的流程图；
- [0051] 图29显示了形状感测光纤的横截面的由弯曲引起的应变曲线；
- [0052] 图30显示了将中心芯相位信号与外芯的平均相位进行比较的两个相位点图；
- [0053] 图31显示了对于40mm直径的光纤环的外芯的示范性应变响应；
- [0054] 图32是显示了对于40mm直径的光纤环的由弯曲引起的双折射校正的图表；
- [0055] 图33是比较具有和不具有二阶双折射校正的扭转信号的图表；
- [0056] 图34显示了形状感测光纤和位置与形状感测系统之间的非限制性的示范环形偏振控制器；
- [0057] 图35显示针对相对简单形状的平面内信号，其中1.4米的形状感测光纤以50mm的弯曲半径进行了180度的转弯；
- [0058] 图36显示了三次连续的平面外测量，其中在各次测量之间采用偏振控制器改变了偏振；
- [0059] 图37是显示了具有不同的输入偏振状态的中心芯的两次连续测量在相位响应中不会产生明显变化的例子的图表；
- [0060] 图38是显示了外芯的两次连续测量不同地响应于输入偏振的例子的图表，提供了针对形状感测光纤中的双折射的证据；
- [0061] 图39是显示了双折射的校正提高了系统精度的图表；以及
- [0062] 图40是显示了针对一次和二次双折射的校正提高了系统的准确度和精度的图表。

具体实施方式

[0063] 在以下说明中，出于解释而非限制的目的，为理解所描述的技术而陈述了具体的细节，例如特定的节点、功能实体、技术、协议、标准等。对于本领域的技术人员而言，显然可以采用除了以下公开的特定细节之外的其它实施例。在其它情况下，为了不让本说明收因不必要的细节而变得晦涩难懂，省略了众所周知的方法、装置、技术等详细描述。在附图中显示了各个功能块。本领域的技术人员可以理解，那些块的功能可采用单个硬件电路、与

适当编程的微处理器或通用计算机相结合的软件程序和数据、特定应用集成电路 (ASIC) 和/或一个或多个数字信号处理器 (DSP) 来实现。软件程序指令和数据可存储在计算机可读的存储介质上,并在计算机或其它合适的控制处理器执行指令时,计算机或处理器执行这些功能。

[0064] 因此,本领域的技术人员将会理解,例如这里的方框图可表示实现本发明的技术原理的说明性电路或其它功能单元的概念图。同样也可理解,任何流程图、状态转变图、伪代码等表示各种处理,其基本上可表示在计算机可读介质中,并由计算机或处理器执行,无论是否明确显示出这种计算机或处理器。

[0065] 包括功能块的各种元件的功能,包括但不限于标记或描述为“计算机”、“处理器”或“控制器”,可通过利用硬件如电路硬件和/或能够执行形式为计算机可读介质上存储的代码化指令的软件的硬件而提供。因此,这种功能和所示出的功能块将被理解为由硬件实现和/或由计算机实现,并因此是由机器实现的。

[0066] 就硬件实现而言,功能块可包括或涵盖但不限于数字信号处理器 (DSP) 硬件、精简指令集处理器、硬件 (如数字或模拟) 电路 (包括但不限于特定应用集成电路 (ASIC)), 以及可完成这些功能的状态机 (如适用的话)。

[0067] 就计算机实现而言,计算机通常理解为包括一个或多个处理器或一个或多个控制器,而术语计算机和处理器以及控制器这里可互换使用。当由计算机或处理器或控制器提供时,这些功能可由单个专用计算机或处理器或控制器、单个共享的计算机或处理器或控制器、或多个单独的计算机或处理器或控制器提供,其中的一些可以是共享的或者分布式的。此外,术语“处理器”或“控制器”的使用还应当理解为指其它可完成这些功能和/或执行软件的硬件,例如上面所记载的示范硬件。

[0068] 用于提高的角度准确度的相位跟踪

[0069] 图1显示了示范性多芯光纤1的截面图,该多芯光纤包括被涂层6所包围的中心芯2和三个外围芯3、4和5。在该例子中所示出的芯3-5大约间隔开120度。

[0070] 如在该截面图中所看到的,利用多芯光纤的形状感测假设光纤中的芯之间的距离保持恒定,而与光纤的形状无关。这种假设通常是有效的,因为玻璃很硬且很有弹性。此外,当与光纤所受到的弯曲的大小 (例如弯曲半径大于5mm) 相比较时,光纤的截面 (如~125微米) 是比较小的。芯的截面位置的这种维持意味着,光纤的所有变形必须要容纳于芯的拉长或挤压。如图2所示,当一形状光纤弯曲时,弯曲的外侧7上的芯会被拉长,而弯曲的内侧8上的芯会受到挤压。

[0071] 由于光纤芯分段的平均长度假设保持不变,几何变换显示出,可基于芯长度的变化和芯之间的距离来计算指向 (即描述了光纤分段的中心轴线的位置的矢量) 的变化。必须考虑其它的影响,例如应变光学系数。结果是,给定光纤分段的指向的变化与该分段内的芯的长度变化的差异成正比。

[0072] 图3显示出光纤中的弯曲 θ 与偏心芯中的应变 ϵ 成比例,其中 s 是分段长度, r 是半径, k 是常数。为消除测量中的拉力和温度的影响,采用了芯之间的差分测量。

$$[0073] \quad \Delta\theta = k \left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{r} \right) = k(\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad \text{式 (1)}$$

[0074] 上式描述了对于给定光纤分段的角度变化,以及它如何与应变的变化相关。来看

光纤的下一分段,前一分段的角度变化必须加入到下一分段的下一角度变化中,以便计算光纤的当前指向。在二维中,所有的先前角度可以累积起来,以得到光纤上任何特定位置处的弯曲角度。图4显示了光纤上任何点或位置处的弯曲角度可通过直到该点的所有角度之和来确定,例如 $\theta_5 = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5$ 。如果测量角度中存在误差,这些误差沿光纤累积,从而产生了总误差。光纤越长,此误差越大,以分段数量的平方根增长。

[0075] 为避免这种累积的角度测量误差,发明人构想出直接测量分段长度的变化而不是测量应变。在数学意义上,角度的累加随后成为光纤上的长度变化的累加,如式(2)所示,其中L对应于光纤长度。

$$[0076] \quad \theta = \sum \Delta\theta = k \sum \frac{(d_{s2} - d_{s1})}{s} = \frac{k(\Delta L_2 - \Delta L_1)}{s} \quad \text{式(2)}$$

[0077] 因此,光纤上任何位置Z处的角度就与直到该位置的芯长度的总变化之间的差异成线性比例关系,如式(3)所示。

$$[0078] \quad \theta(z) \propto \Delta L_2(z) - \Delta L_1(z) \quad \text{式(3)}$$

[0079] 因此,如果可连续准确地跟踪沿光纤的总长度变化,而不是累加应变的各个单独的局部变化,就可以防止角度误差的增长。稍后将说明如何可以优于10nm的精度来跟踪芯长度的变化,且在光纤的整个长度上保持此精度。在芯之间具有70微米的间隔时,此精度级别可产生0.3度的角度精度,并且理论上具有约0.5%的光纤长度位置精度。

[0080] 遗憾的是,式(3)中定义的累积关系在三维空间中并不成立。然而,大多数三维形状可精确地表示为连续的二维曲面,并且在较小的角度变化(小于10度)的条件下,三维角度也具有这种简单的累加关系。因此,此方法可用于估计三维中的误差贡献。

[0081] 通过这种几何变换提供的见解是,采用作为多芯光纤上的距离的函数的总长度变化而不是局部应变。换句话说,只要对应于直到该点的总长度变化的测量应变的积分保持精确,则所测量的局部应变值中的相对较大的误差都可以接受。当在其上计算纳米级应变的距离较大(如许多厘米,如10-1000cm)时,不需要非常大的信噪比就可以得到纳米级应变精度。如稍后所述的那样,跟踪长度变化还可用于评估沿这段光纤的旋转,允许在光纤卷筒(fiber roll)的测量中所得到的高于所期望的精度,或者用于评估围绕光纤轴线的旋转角度。

[0082] 光纤中的相位跟踪

[0083] 作为传感器,光纤可提供沿其整个长度的空间连续测量。连续测量是重要的,这是因为采用光相移来提供非常高分辨率的位移测量。后面将会说明如何使用光纤中的固有散射来实现这种测量,然而以光纤布拉格光栅(FBG)开始进行说明从概念上比较容易理解。光纤布拉格光栅是光纤折射率的周期性调制。各个周期大约为光在光纤中的波长的一半。光在真空中的波长约为1550nm,而在光纤中的波长大约为1000nm。因此,光栅的周期约为500nm。通常来说,布拉格光栅通过测量其反射频谱而可用作传感器。采用下式来计算布拉格光栅条件。

$$[0084] \quad \lambda_B = 2n \Lambda \quad \text{式(4)}$$

[0085] 在此式中, λ_B 表示波长,n是光纤的折射率, Λ 对应于光栅的周期。如果假设折射率保持恒定,则反射的波长仅依赖于光栅的周期。当光纤产生应变时,光栅的周期变形,产生了反射波长的偏移。因此,对于波长偏移来说,可以导出施加于光纤上的应变变量。布拉格光

栅的周期是高度一致的,可以方便地将这种周期性模拟为正弦调制。当表示为正弦时,光栅周期中的变形可描述为相移。为说明此概念,可以考虑图5中的例子,其中显示了当含有布拉格光栅的光纤产生应变时,相对于参考状态测得的相位差开始累积。

[0086] 图5所示的已应变的布拉格光栅的图示以交替的白色和剖面线部分表示了折射率的局部变化。假设为理想的布拉格光栅,那么所有的周期均相同,调制模式的相位沿光栅移动时线性地增加。换句话说,相位随距离的变化率与光栅周期成反比。如果光栅的一小部分被拉伸,则拉伸部分中的相位变化率减小。

[0087] 在图5中,顶部的图形描述了未变形的光栅,其具有作为位置的函数的绝对线性的相位。下方的移位了的图形描述了由于应变而变形的光栅。底部的图表显示了在各个位置处的二个光栅之间的相位差。光栅中的变形导致了光栅的反射信号相对于原始未变形相位的相移。图中示出了90度的相移。在发生应变的分段之后,变化率回到无应变的状态。然而,该区域中的相位此时相对于原始相位偏移了相当于应变分段中的总相位变化的量。此相位偏移与光纤的实际长度变化成正比。

[0088] 此图仅显示了光栅的15个周期。由于周期是500nm,因此达到7.5um的长度。拉伸光纤以产生90度的相移使其余未应变的光栅位移了四分之一周期,即125nm。典型的光频率域反射计(OFDR)测量可具有50微米级的空间分辨率。换句话说,各个OFDR数据点或分度间隔开50 μ m。因此,125nm的变形仅导致了光栅实际位置的很小一部分的OFDR分度偏移。虽然125nm的位置变化其本身是不可检测到的,但是利用OFDR系统可以相对容易地测量90度的相移。

[0089] 因此,OFDR可用来测量布拉格光栅内的变形,而不是仅测量相位的变化率(即波长),可以测量绝对相位,且根据相位测量光纤芯上各个分段处的距离变化。这对于在观察到光栅中的相位已发生变化而光栅的位置并未显示出容易辨别的变化的情况下的精确形状测量而言是重要的。常规的光纤测量技术将这种相移和位置作为单独的效应来处理。

[0090] 一种将相移和位置之间的关系直观化的方法是想象光信号的相位用时钟的秒针表示,而沿光纤的分度位置用时钟的时针表示。图6显示了没有分针的时钟。这种时钟难以用1分钟的分辨率来确定时间。但是,此时钟仍然可用于计时,用秒针计时短期事件,而用时针计长期事件。由于没有分针,因此无法以一秒的精度来测量中期事件(如1小时12分钟32秒)。将这两个级别联系起来的困难使得常规的光测量系统只是单独地来处理这种现象。

[0091] 该时钟模拟有助于澄清为什么需要沿光纤的整个长度来进行连续测量。通过连续地监控秒针的位置,可以测量完整转动的数量,这允许高精度地同时监控长期事件。将该时钟模拟与之前讨论的布拉格光栅联系起来,每360度或 2π 的相位变化相当于500nm的位置偏移。通过连续跟踪沿光纤的相位,可以非常高的精度来测量光纤的局部应变和整体的长度变化。

[0092] 连续跟踪相位中的挑战是测量的分辨率必须足以使得从一个分段到下一个分段的相位变化不超过 2π 。图7说明了缺乏这种分辨率如何会产生问题,这是因为没有办法来在例如 $\pi/3$ 的变化和 $\pi/3+2\pi$ 的变化之间进行区分。因此,两个不同的相移在单位圆上将会具有相同的值。换句话说,一个分度的误差必定导致一个完整的 2π 转动。在此例子中,光纤中的整体长度变化的测量必定少了500nm。

[0093] 因此,重要的是,形状感测系统具有足够的分辨率来保证沿整个长度的形状感测

光纤的跟踪相位的能力,从而确保形状感测系统的精度。

[0094] 基于瑞利散射的测量

[0095] 如上所述,用于感测的FBG的典型应用涉及测量沿光纤向下以一定间距间隔开的单个布拉格光栅的反射频谱中的偏移。可以从各个布拉格光栅的测量中得到光纤的各个部分的应变。对于采用FBG的形状感测,各个应变测量表示了给定的分段弯曲了多少以及向哪个方向弯曲。此信息针对所有的测量分段汇总,以给出总的光纤位置和/或形状。然而,采用此方法,各个分段中的误差会沿光纤累积。光纤越长,测量误差越大。采用多个布拉格光栅的这种误差限制了运算速度和应用范围。

[0096] 如果存在沿光纤的连续光栅,那么如上所述可跟踪沿光纤的每一点处的相位。沿纤芯的整体长度来跟踪相位避免了累积误差。这样就不存在作为光纤分段数量的平方根的累积误差,总的长度误差保持恒定,为光在该材料中的波长的一小部分。如前所述,光在真空中的波长约为1550nm,在光纤中约为1000nm,其在反射时实际为500nm。由于测量的往返行程(反射)特性,50的信噪比提供了10nm的精度。一米光纤上的所得应变精度将是10纳米级应变。

[0097] 瑞利散射可视为具有随机相位和幅度的布拉格光栅,或全部由缺陷构成的布拉格光栅。此瑞利散射模式虽然是随机的,但在光纤芯内当制造该纤芯时是固定的。施加到光纤上的应变导致了瑞利散射模式的偏移或变形。通过将在光纤具有已知形状时的参考光纤扫描与在光纤已被弯曲或拉伸时的新光纤扫描进行比较,就可将瑞利散射模式的这些所引发的变形用于针对形状感测的高分辨率的应变测量。

[0098] 图8显示了这种比较的一些示范结果。该图显示了在进入处于拉伸下的区域的光纤部分的开始处参考扫描和测量扫描之间的瑞利散射信号的相位差。数据标绘为光纤分度的函数,该光纤分度表示沿光纤的距离。一旦进入拉伸区域,相位差便开始累积。由于 π 和 $-\pi$ 在单位圆上具有相同的值,因此当相位差沿光纤的长度增大时,那么每隔多个 2π 时该信号便产生“缠绕”。这在大约3350的分度时可以看到,在此处其左边的值接近 π ,随后该值突然变为 $-\pi$ 。如图所示,各个缠绕表示光纤中大约500nm的长度变化。由于一个分度表示大约50微米的长度,因此需要大约100次相位缠绕来累积测量和参考之间的完全分度的延迟变化。

[0099] 图9中的数据来自与图8相同的数据集,但是来自大约35个相位缠绕、即大约一个分度的三分之一之后的沿光纤进一步向下的区域。相位差数据的噪声已增加,并由参考散射模式和测量散射模式之间的增加的偏移所引起。这减少了用来确定相位差的参考和测量数据之间的相干性。如果单个散射光纤分段的视位置偏移超过一个分度,那么便会失去参考和测量之间的相干性,并且从散射信号的比较中无法得到应变测量。

[0100] 因此,参考数据应当通过补偿因沿光纤的应变而产生的偏移来与测量数据匹配。如果一个分度约为50微米,那么在一米的分段上这仅达到百万分之五十,这并不是大的应变。事实上,光纤本身的重量也能产生此级别的应变。此外,仅几摄氏度的温度变化也会产生类似的偏移。因此,这种分度偏移在计算纤芯的变形时应当被补偿。

[0101] 由拉伸产生的偏移是单个分段的物理膨胀,其会增加散射光的飞行时间。参考和测量之间的偏移称为延迟。该延迟可通过研究到感测芯中的任何点的延迟中的偏移如何影响从该点反射的信号的模式而得到补偿。如果场(光)以频率 ν 振荡且经历了延迟 τ ,那么作为延迟的函数的光相位由下式给出,

[0102] $\phi = 2\pi\tau\nu$ 式 (5)

[0103] 如果光相位 ϕ 标绘为频率 ν 的函数,那么就可以得到穿过原点的直线。在实际中,在通过材料如玻璃时该绝对直线会变形成为曲线,这在将测量值与利用此模型所预测的值进行比较时应当记住。但是出于直接的目的,此模型是足够的。图10显示了两个不同延迟的相位。在一个采用上述原理的非限制的示例性测量系统中,激光的典型扫描可覆盖从192.5到194.5THz的范围。这些频率表示从1542nm (194.5THz) 到1558nm (192.5THz) 的扫描,这对于非限制性的测试形状感测应用而言已是一种测试扫描范围。在这段范围上,给定延迟的相位扫描过 $\Delta\phi$ 的范围。对于所示的两个延迟 τ_1 和 τ_2 ,该扫描范围内的差 $\Delta\phi_2 - \Delta\phi_1$ 小于中心频率 (193.5THz) 处的相位变化 $d\phi$ 。中心频率处的相位变化与相位扫描范围中的变化之间的因子将是中心频率与频率扫描范围之比。在该示例的情况下,该比值是96.7。

[0104] 在一示范性测试应用中,扫描范围 $\Delta\nu$ 确定了测量的空间分辨率 $\delta\tau$ 。换句话说,它确定了时域中一个分度的长度。这些以反比关系相关:

[0105] $\delta\tau = 1/(\Delta\nu)$ 式 (6)

[0106] 对于上述示例性的频率范围,分度的长度为0.5ps,或者在玻璃中为50微米。在中心频率处, 2π 的相移由仅为0.00516ps或者在玻璃中为516nm的延迟变化而引起。 2π 的相移仅表示时域数据中的一小部分分度偏移。为了在时域中使该延迟偏移一个分度,该延迟必须有足够大的变化,以引起中心频率处的 $96.7 \times 2\pi$ 的相位变化。

[0107] 这些例子说明,线性的相位变化表示了在时域中事件位置的偏移或延迟。如上所看到的,一个分度的偏移将使得沿一段光纤的相位变化的测量完全失真。为了正确地比较相位,这些偏移在它们发生时就应当被补偿,且参考数据应当与该整段纤芯向下的测量数据校准。为了校正相干性的劣化,需要参考数据的暂时偏移。这可通过将给定分段的参考数据 r_n 乘以线性相位而获得。这里, n 表示时域中的分度,或者是沿光纤的增大的距离。通过对之前的延迟值执行线性匹配来得到此相位校正的斜率 γ 。在此校正项中的相位偏差 ϕ 选择成使得此相位的平均值是零。

[0108] $\tilde{r}_n = r_n e^{i(\gamma n + \phi)}$ 式 (7)

[0109] 图11显示了在已发生了三分之一分度的偏移的一部分光纤上的校正相位差。此位置处的相位差保持了与光纤的最接近部分相同的信噪比。通过基于特定距离处的延迟来施加暂时偏移,可以恢复相干性,从而降低了相位噪声。

[0110] 示范性形状感测光纤

[0111] 跟踪光纤瑞利散射中的变形提供了应变的高分辨率的连续测量。采用多芯形状感测光纤的几何形状来解释这种多芯结构如何测量沿一段光纤上的弯曲和弯曲方向。

[0112] 光纤包括多个芯,它们处于允许独立于弯曲的方向来感测外部扭转和应变的构造。这种光纤的一个非限制的示例性实施例在图1中示出,并在下面进行描述。光纤含有四个芯。一个芯沿光纤的中心轴线设置。三个外芯以此芯为中心间隔开120度且相距70 μ m地设置。外芯相对于中心芯旋转,产生了周期为每米66转的螺旋。图12显示了这种螺旋形缠绕的多芯形状感测光纤的图示。图13中绘制了讨论中所采用的非限制性测试多芯光纤的布局。

[0113] 形状感测光纤的另一非限制性例子包含超过三个外芯,以便于光纤的制造,或获得额外的数据以改进系统性能。

[0114] 在螺旋形光纤的截面中,各个外芯的位置明显围绕着中心芯沿这段光纤向下渐进地旋转,如图14所示。

[0115] 扭转光纤中的抖动校正

[0116] 为将来自外芯的应变信号转化成弯曲和弯曲方向,必须高精度地确定外芯的旋转位置。假设螺旋的自旋率恒定(参见图12),外芯的位置可基于沿光纤的距离而确定。在实际中,螺旋形光纤的制造在理想自旋率中引入了一些变化。沿这段光纤的旋转率的变化导致了角度偏离于由公称自旋率所带来的期望线性变化,而此角度偏离称为“抖动”,且标记为抖动信号 $W(z)$ 。

[0117] 一个制有螺旋形多芯几何形状的示范性测试光纤就平均自旋率(每米66转)而言具有非常高的精度。然而,在短距离(如30cm)上自旋率的变化明显,并可导致角度位置相比于单纯的随距离的线性相位变化而言改变达12度。自旋率中的此误差可通过使光纤置于会导致处于一个平面内的连续弯曲的构造中而测得,如同置于平表面上的卷绕光纤的情况。当光纤置于这种卷绕结构中时,螺旋芯因其经过弯曲的外部 and 弯曲的内部而在拉伸和压缩之间交替变化。如果相对于距离来绘制相位变形,那么将形成周期与光纤的自旋率相匹配的正弦信号。多芯光纤的制造中的变化可从光纤的期望恒定自旋率中作为小的相移而被检测到。

[0118] 自旋率中的这些变化的例子如图15所示。实线曲线是取自平面卷绕的相位数据(弯曲信号),而虚线是在与螺旋相同的频率和相位上产生的理想正弦曲线。应注意到,在数据段开始时,这些曲线的相位具有对齐的零交叉。到数据段的中部时,实曲线稍微超前于虚曲线,而到数据段的最后,可观测到明显的偏移。如果消除了相位信号中的DC分量且计算出相移,那么这两个信号之间的差异很明显,且具有一定程度的周期性。

[0119] 图16显示了示例性的抖动信号 $W(z)$,其具有相对于这段形状感测光纤上的制造自旋率的周期性变化。相位变化显示为以光纤分度表示的长度的函数。示例性的数据集表示大约三米的光纤。在三分之一米的级别上,检测到光纤的自旋率的固有周期性。在该段光纤上产生了光纤的一致平均自旋率,但是为了正确地解释由多芯扭转光纤所产生的相位数据,应当校准这些小的波动。测量自旋率的变化或“抖动”是可再现的,并且对于给定的实际制造的光纤的形状计算而言是重要的。

[0120] 多芯光纤中的扭转感测

[0121] 施加到光纤上的扭力也可能会引起外芯的旋转偏移。为了将芯的应变信号适当地映射到校正的弯曲方向,必须测量沿形状感测光纤的整个长度的抖动和所施加的扭转。螺旋形多芯光纤的几何形状可实现对这段光纤上的扭转以及由弯曲引起的应变的直接测量,如下所述。

[0122] 如果多芯光纤在拉制时旋转,则中心芯实质上未受到干扰,而外芯沿光纤向下顺应着螺旋的路径,如图17的中部所示。如果这种结构随后受到扭应力,则中心芯的长度保持不变。然而,如果扭应力的方向与螺旋拉制相匹配,则螺旋的周期增加,并且外芯将被均匀地拉长,如图17的顶部所示。相反,如果扭转方向与螺旋的拉制相反,则外芯将会“解绕”,并会沿其长度承受到挤压,如图17的下部所示。

[0123] 为得到多芯构造对扭转的敏感度,要估计外芯因扭矩而会经历的长度变化。将光纤的分段模拟为柱体。柱体的长度 L 对应于分段大小,而从中心芯到外芯的距离表示柱体的

半径 r 。如果沿纵向剖开柱体并之后展平其表面,则可将柱体的表面表示为矩形。该表面的长度等于分段长度 L ,而表面的宽度相当于柱体的周长 $2\pi r$ 。当光纤被扭转时,光纤的终点围绕柱体移动,而起点保持固定。投射到展平表面上,扭转的芯形成了比矩形的长度 L 更长的对角线。外芯长度的这种变化与光纤的扭转有关。

[0124] 图18显示了受到扭转的外芯当沿表面平移时可模拟为展平的柱体。根据以上展平的表面,可给出:

$$[0125] \quad \Delta d \approx \frac{2\pi r^2}{L} \Delta \phi \quad \text{式 (8)}$$

[0126] 在上式中, Δd 是外芯长度的变化,该变化是由于光纤相对于其原始螺旋状态的旋转变化 $\Delta \phi$ 而产生的。中心芯和外芯之间的径向距离由 r 表示,且 $2\pi/L$ 是以每单位长度旋转表示的螺旋光纤的自旋率。

[0127] 在本示例中,最小可检测距离假设为光波弧度的十分之一。对于示范性测试系统,可操作的波长为1550nm,而玻璃的系数约为1.47,因此最小可检测距离约为10nm。如果半径是70微米,螺旋周期是15mm,则式(8)表示了形状感测光纤具有0.3度的扭转灵敏度。如果感测光纤通过直接转90度而开始其形状,使得由扭转而产生的误差最大化,则所产生的位置误差将为光纤长度的0.5%。在大多数应用中,90度弯曲不会出现在光纤的始端,因此误差将小于0.5%。

[0128] 计算四芯光纤中的扭转

[0129] 扭转测量的灵敏度基于单个芯的灵敏度,但是沿该段光纤上的扭转的感测取决于所有四个芯。如果已知外芯的平均值和中心芯之间的长度变化的差异,则可计算出在光纤上出现的扭转(就绝对度数而言)。

[0130] 可采用图19所示流程图中列出的非限制性的示范过程来计算沿光纤的外部扭转。确定所有四个芯A-D的相位信号,并对外芯B-D的信号进行平均。通过将外芯相位信号的平均值与中心芯的相位信号进行比较来计算外部扭转。如果光纤承受到扭力,所有的外芯将经历类似的拉长或压缩,其由力针对螺旋旋转方向的方位而定。中心芯不会出现因所施加的扭力而导致的长度变化。然而,中心芯容易受到拉伸和温度变化,并且用于直接测量共模应变。因此,如果从三个外芯的平均值中减去或除掉中心芯的相位信号,则可以得到由扭转产生的相位变化的测量。此相位变化可与外部扭转或者说是光纤旋转的测量成比例。在该段光纤上的施加了不到完整一圈的扭转的区域里,此比例因子可近似为线性的。在有高扭力的情况下,应当优选考虑二阶项。此外,扭转在结合点之间线性地分布,使得可沿该段光纤观测到扭转的不同区域。

[0131] 图20显示了针对一般形状的示范数据集,其更详细说明图19所示的算法。该图表显示了由对于普通弯曲而言形状感测光纤的中心芯(黑色)和外芯(灰色)的长度局部变化所引起的相位变形。图20所示的两个相位曲线表示多芯形状感测光纤中的两个芯所经历的长度的局部变化。为保持图表清楚,未显示两个外芯的曲线,但在确定光纤的最终形状时使用了这另外两个芯的值。

[0132] 中心芯的相位信号未经历周期性的振荡。这些振荡是在螺旋于给定弯曲上传播时由外芯在挤压和张紧模式之间转变而产生的。即使中心芯不容易受到弯曲或扭转所引发的应变,它也累积沿该段形状感测光纤上的相位。中心芯相位信号体现了光纤的所有芯所经

历的共模应变。外芯被取平均(灰色),并在图21中相对于中心芯(黑色)而标绘。

[0133] 当外芯处于120度的异相时,相位信号中的弯曲引发的变化平均为零。参见图21,可观测到两个相位曲线之间的微小偏离。减去中心芯相位,在共模应变的直接测量中留下因扭力累积的相位。通过适当比例的缩放,此信号被比例换算成表示为“扭转”信号 $T(z)$ 的光纤卷的测量,其由图21产生并在图22中示出。根据扭转信号 $T(z)$,可确定由该段形状感测光纤范围上的扭转所产生的外芯的旋转位置中的偏移。这允许将弯曲信号映射到校正的弯曲方向。

[0134] 图23所示的数据集合说明了补偿形状计算中的扭转的希求。形状感测光纤的顶端转化成一个平面内的形成了一个250毫米方格的五点格栅,其中一个点在其中心,具有考虑了扭转的形状处理(填充)。在标示为未填充点的数据集的处理中,未使用用于外部扭转的校正。在该图中,如果不采用扭转计算,就无法辨别出利用光纤顶端追踪出的初始形状。甚至对于小的光纤顶端平移,也会沿该段光纤累积明显的扭转。因此,如果在形状感测中未考虑此扭转,那么就不可能得到高水平的精度。

[0135] 弯曲引发的应变的计算

[0136] 除了描述施加到形状感测光纤上的扭转量的信息之外,多芯光纤还可以提取标准正交系统中的弯曲信息。针对形状感测光纤的四个光芯的相位信号可解释为提供了两个正交的差分应变测量,如下所述。这些应变值随后可用于跟踪沿这段光纤的指向矢量,最终提供光纤位置和/或形状的测量。

[0137] 在消除了共模应变的情况下,采用这三个校正的外芯相位信号来提取沿形状感测光纤的弯曲的测量。由于对称性,其中两个外芯可用来重构沿该段光纤的应变信号。首先,针对两个外芯的相位信号进行求导。此导数优选计算成使得关于该导数的积分的误差不可以变大,该误差会转化为系统精度的损失。对于双重精度的运算来说这并不是问题。但是如果运算在有限的数值精度下进行,则必须用到取整,以使得积分值不会累积误差(收敛取整)。

[0138] 对于这种解释来说,假设应变可以线性方式投影。因此,给定芯的相位响应是针对径向间隔所投影的两个正交应变的组合。

$$[0139] \quad \frac{d\phi_n}{dz} = b_y(z) \sin(kz + \Delta_n) + b_x(z) \cos(kz + \Delta_n) \quad \text{式 (9)}$$

[0140] 在上式中, b_x 和 b_y 是用来计算弯曲的正交应变信号。相位 ϕ_n 表示芯的相位响应, z 是沿光纤的轴向距离, k 是螺旋的自旋率, Δ 表示芯的径向位置(120度的间隔)。

[0141] 两个外芯的相位响应是:

$$[0142] \quad \frac{d\phi_1}{dz} = b_y(z) \sin(kz + \Delta_1) + b_x(z) \cos(kz + \Delta_1) \quad \text{式 (10)}$$

$$[0143] \quad \frac{d\phi_2}{dz} = b_y(z) \sin(kz + \Delta_2) + b_x(z) \cos(kz + \Delta_2) \quad \text{式 (11)}$$

[0144] 求解 b_x 和 b_y :

$$[0145] \quad b_y(z) = \frac{1}{\sin(\Delta_1 - \Delta_2)} \left[\frac{d\phi_1}{dz} \cos(kz + \Delta_2) + \frac{d\phi_2}{dz} \cos(kz + \Delta_1) \right] \quad \text{式 (12)}$$

$$[0146] \quad \delta_x(z) = \frac{1}{\sin(\Delta_2 - \Delta_1)} \left[\frac{d\phi_1}{dz} \sin(kz + \Delta_2) + \frac{d\phi_2}{dz} \sin(kz + \Delta_1) \right] \quad \text{式 (13)}$$

[0147] 在上式 (12) 和 (13) 中, 假设自旋率 k 沿该段光纤为恒定的。如果在自旋率中加入校正项, 那么以上推导保持有效。具体地说, 测量的抖动 $W(z)$ 和扭转信号 $T(z)$ 均包括在内, 以补偿外芯沿该段光纤的旋转变化的。上式 (12) 和 (13) 则变成下式:

$$[0148] \quad \delta_y(z) = \frac{1}{\sin(\Delta_1 - \Delta_2)} \left[\frac{d\phi_1}{dz} \cos(kz + T(z) + W(z) + \Delta_2) + \frac{d\phi_2}{dz} \cos(kz + T(z) + W(z) + \Delta_1) \right] \quad \text{式 (14)}$$

$$[0149] \quad \delta_z(z) = \frac{1}{\sin(\Delta_1 - \Delta_2)} \left[\frac{d\phi_1}{dz} \sin(kz + T(z) + W(z) + \Delta_2) + \frac{d\phi_2}{dz} \sin(kz + T(z) + W(z) + \Delta_1) \right] \quad \text{式 (15)}$$

[0150] 根据正交差分应变信号的形状计算

[0151] 式 (14) 和 (15) 产生两个差分的正交应变信号。图24描述了对于处在均出现在同一平面中的几个弯曲下的光纤的正交应变曲线。对这两个差分正交应变信号进行处理, 以进行沿这段形状感测光纤的最终积分, 从而产生三个表示光纤的位置和/或形状的笛卡儿信号。

[0152] 图25显示了用于说明根据应变来计算形状的非限制示范步骤的流程图。正交应变信号A和B根据式 (14) 和 (15) 而定。

[0153] 在数据获取网络处所获得的数据优选存储在计算机存储器的分离阵列中。为此, 在此点处需要将式 (15) 中的连续表示改变为基于分度的离散表示。此外, 采用式 (1), 阵列中各个点处的弯曲可转换为角度旋转, 这是因为分段长度 (Δz) 是固定的和有限的。参数 a 根据各个芯到光纤中心的距离以及应变光学系数而定, 该应变光学系数是将应变与光路长度的变化相关联的比例常数。

$$[0154] \quad \theta_{y,n} = a b_{y,n} \Delta z \quad \text{式 (16)}$$

$$[0155] \quad \theta_{x,n} = a b_{x,n} \Delta z \quad \text{式 (17)}$$

[0156] 由于光纤的局部弯曲而产生的旋转 θ 的这些测量可用来形成三维的旋转矩阵。如果假想在开始时光纤与 z 轴对齐, 那么两个弯曲分量将表示光纤的第一分段的矢量转动过这两个小的旋转。在数学意义上, 这是采用矩阵相乘得到的。对于小的旋转, 可采用如下式 (18) 所示的简化旋转矩阵。

$$[0157] \quad \overline{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \theta_{x,n} \\ 0 & 1 & \theta_{y,n} \\ -\theta_{x,n} & -\theta_{y,n} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{式 (18)}$$

[0158] 如果 $\theta_x \ll 1$ 且 $\theta_y \ll 1$, 则上述旋转矩阵是有效的。如果系统的分辨率是微米级的, 就会出现不难维持的情况。在旋转后, 光纤分段将具有新的终点和新的方向。所有进一步的弯曲均从该新指向中测量。因此, 光纤上任何位置处的指向 (或矢量) 取决于光纤中该位置与起始位置之间的所有指向。光纤的任何点处的指向矢量可在跟踪沿这段光纤的旋转坐标系统的迭代处理中求解得到, 如下式所示:

$$[0159] \quad \overline{C}_{n+1} = \overline{C}_n \overline{R}_n \quad \text{式 (19)}$$

[0160] 换句话说, 沿光纤的各个分段引入了与沿该分段的弯曲的大小和方向成比例的旋转。此迭代计算可采用以下的数学标记表达:

$$[0161] \quad \vec{C}_p = \vec{C}_s \prod_{k=1}^p \vec{R}_{\theta_k} \quad \text{式 (20)}$$

[0162] 在这里同样的是,对于较小的旋转和近似平面的旋转而言,角度被有效地累加,通过保持在整段形状感测光纤上的应变(长度变化)的积分的精确测量,可以获得比仅用应变更高的精度。以上计算的矩阵含有关于芯的局部方位的信息,这允许进行适当的旋转。如果主要关心的是确定沿光纤的位置,那么就只需要描述了该位置处的光纤指向的局部矢量。此指向矢量可通过简单的点乘运算得到。

$$[0163] \quad \vec{P} = \vec{C}_s \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{式 (21)}$$

[0164] 如果这些指向矢量中的每一个是首尾设置的话,如图26所示,就产生了形状的精确测量。因此,沿这段光纤的任何点处的位置和/或方向可通过累加所有之前的指向矢量而得到,其与系统的分辨率成比例:

$$[0165] \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \Delta s \sum_{k=1}^p \left(\vec{C}_s \prod_{k=1}^p \vec{R}_{\theta_k} \right) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{式 (22)}$$

[0166] 下面结合图27来描述一个非限制的示范性形状感测系统。也可采用其他实现方式和/或部件。此外,并不是每一个所显示的部件都是必须的。系统控制器和数据处理器(A)在所定义的波长范围和调谐速率下触发可调谐激光器(B)的两次连续的扫描。从可调谐激光器发出的光经由光耦合器(C)路由到两个光网络中。这两个光网络中的第一个是激光监控网络(E),而第二个为应答网络(D)。在激光监控网络(E)内,光经由光耦合器(F)分离,并传送到用于C带波长调校的气体(如氰化氢)单元基准(G)。气体单元频谱通过链接到数据获取网络(U)的光敏二极管检测器(L)获得。

[0167] 在光耦合器(F)处分离的光的剩余部分路由至由与两个法拉第旋转器镜(I,J)相连的光耦合器(H)所构成的干涉仪中。第一法拉第旋转器镜(FRM)(I)用作干涉仪的参考臂,而第二法拉第旋转器镜(J)通过光纤的延迟卷轴(K)间隔开。此干涉仪产生用来校正激光调谐的非线性度的监控信号,该监控信号经由光敏二极管检测器(M)通过数据获取网络(U)而获得。

[0168] 通过光耦合器(C)路由至应答网络(D)的光进入偏振控制器(N),其将激光旋转成两个连续激光扫描之间的正交状态。此光随后经由一系列光耦合器(O)在四个获取干涉仪(P,Q,R,S)之间均匀地分开。在用于中心芯的获取干涉仪内,光在参考路径和测量路径之间通过光耦合器(AA)分离。来自耦合器AA的“探测”激光经过光循环器(T),并经用于形状感测光纤(W)的多芯输出(V)的中心芯线进入到形状感测光纤(W)的中心芯。形状感测光纤(W)包含与三个螺旋式缠绕的外纤芯同轴的中心纤芯。光纤(X)的截面表明了外芯(Z)均匀地间隔开、同轴,并与中心芯(Y)间隔开给定的径向距离。作为激光扫描的结果的中心纤芯(Y)的所得瑞利背散射经过光循环器(T),并在于光耦合器(BB)处重组时与获取干涉仪的参考路径光发生干涉。

[0169] 干涉图案经过光偏振光束分离器(DD),将干涉信号分离成二个主偏振状态(S1,P1)。两个偏振状态中的每一个采用两个光敏二极管检测器(E,E',F,F')由数据获取网络(U)来

获取。可调节偏振旋转器(CC)以平衡光敏二极管检测器处的信号。以类似的方式采用相应的获取干涉仪(Q,R,S)来测量形状感测光纤的外纤芯。系统控制器和数据处理器(A)解释四个单独纤芯的信号,并产生沿这段形状感测光纤(W)的位置和方位的测量。随后数据从系统控制器(A)中输出,以用于显示和/或使用(GG)。

[0170] 双折射校正

[0171] 当光纤弯曲时,芯的圆形对称性受到破坏,并且通过弯曲平面中的方向和垂直于该弯曲平面的方向之间的明显差别产生了优选的“垂直”和“水平”。沿光纤向下传播的光则经历不同的取决于其偏振状态的折射率。作为偏振状态的函数的这种折射率变化称为双折射。这对于形状测量而言提出了一个重要的问题,因为测量的相位变化取决于入射的偏振状态,而该入射状态在标准光纤中不可能被控制。

[0172] 此问题可通过测量两个正交偏振状态处的纤芯响应来解决。如果在这两个状态的响应作适当平均,则可消除或至少显著地减少作为偏振的函数的测量响应中的变化。图28中的流程图示出了用于在测量值和参考值中校正双折射如固有双折射、弯曲引发的双折射等的非限制性示范过程。以下的非限制性示例涉及弯曲引发的双折射,但是可更普遍地用于任何双折射。

[0173] 此过程的第一步是测量在称为“s”和“p”的两个正交偏振状态下的芯的响应。在各个偏振状态下测量s响应和p响应,得到四个阵列。为简单起见,对第一偏振状态的响应称为a和b,而对第二偏振状态的响应称为c和d,其中a和c是s检测器处的响应,而b和d是p检测器处的响应。

[0174] 第二步骤是计算以下两个阵列的乘积:

$$[0175] \quad x = ad^* \quad \text{式 (23)}$$

$$[0176] \quad y = bc^* \quad \text{式 (24)}$$

[0177] 这些信号中的每一个的低通滤波版本记为<x>和<y>。在这里使用期望值标记来表示低通滤波运算。相对慢变化的函数的相位用于使更高频率的散射信号同相,从而使得它们可叠加:

$$[0178] \quad p = a + de^{i\angle\langle x \rangle} \quad \text{式 (25)}$$

$$[0179] \quad q = b + ce^{i\angle\langle y \rangle} \quad \text{式 (26)}$$

[0180] 随后重复此过程,以产生最终的标量值:

$$[0181] \quad u = p + qe^{i\angle\langle pq^* \rangle} \quad \text{式 (27)}$$

[0182] 下面,可产生缓慢变化的矢量,其表示在无宽带瑞利散射分量的情况下沿光纤向下的变化的矢量本质,这是因为这些分量均包含到u中:

$$[0183] \quad \vec{v} = \left[\langle ae^{i\angle u^*} \rangle, \langle be^{i\angle u^*} \rangle, \langle ce^{i\angle u^*} \rangle, \langle de^{i\angle u^*} \rangle \right] \quad \text{式 (28)}$$

[0184] 随后采用下式来计算因双折射影响而产生的校正:

$$[0185] \quad \phi_n = \angle(\vec{v}_n \cdot \vec{v}_0^*) \quad \text{式 (29)}$$

[0186] 其中 ϕ_n 是由双折射影响而产生的校正,n是该阵列的指数。这里,矢量显示为与阵列中的第一元素(指数0)比较,但是它也可以容易地与矢量阵列中的任意选定的元素进行比较。

[0187] 双折射校正补偿了因制造期间的芯的不对称性而产生的双折射,以及超过100mm的弯曲半径。当形状感测光纤处于半径小于100mm的张紧弯曲中时,第二级的双折射影响变得明显。

[0188] 假定相当大级别的应变仅出现在平行于多芯形状感测光纤的中心芯的方向,那么考虑图29中的图。当光纤弯曲时,在区域 $0 < X \leq r$ 之间测得拉伸应变,而在区域 $-r \leq X < 0$ 中测得压缩应变。外弯曲区域的扩张施加了会增大光纤的内部压力的侧向力。当光纤的内部压力增加时,第二级应变项 ϵ_x 变得明显。如第二幅图表所示,该压力应变项在光纤的中心轴线处为最大值,并朝向光纤的外缘以距离的平方而减小。在张紧弯曲中,该压力应变项可改变光纤的折射率,导致可测量的双折射。此外,当中心芯响应于该最大值时,外围的螺旋芯经历了针对此压力引发的应变的正弦响应。

[0189] 图30显示了产生于40mm直径的光纤环的两个相位图。这些信号中的振荡是多芯组件偏离于光纤中心的结果。在更紧的弯曲中,应变信号高得足以从这种细微的偏心中产生响应。该图显示了螺旋形外芯的平均在弯曲区域中累积了比中心芯明显更小的相位。此相位减小用作弯曲引发的双折射的证明。要记得的是,通过寻求中心芯和三个外芯的平均之间的绝对相位差而进行外部扭转计算。图30中的图表显示了在弯曲区域中将测得的错误的扭转信号。

[0190] 所测得的外芯的相位响应指示了相对于压力引发的应变曲线 ϵ_x 的位置。因此,外芯应变响应的平方提供了相对于压力场的位置和大小的测量。此响应可被比例缩放并可用作对外芯的校正,以匹配中心芯所观测的 ϵ_x 水平,由此校正该错误的扭转。

$$[0191] \quad \phi_{\text{corrected}} = \phi_n - k \left[\left(\frac{d\phi_n}{dz} - \frac{\sum_{i=1}^N \frac{d\phi_i}{dz}}{N} \right)^2 \right] \quad \text{式 (30)}$$

[0192] ϕ_n 是外芯上的相位响应, N 是外芯的数量, k 用作比例因子。图31显示了对于40mm直径的光纤环的外芯的应变响应,其中减去了共模应变。如图32中的图表所示,从该应变响应信号中可近似得到用于弯曲引发的双折射的校正。

[0193] 如图33所示,应用此校正对在弯曲区域中测得的扭转具有显著的影响。比较具有和不具有第二级校正的扭转信号可以看到,在本示例中,在没有第二级双折射校正情况下,在弯曲区域中累积了25度的误差。

[0194] 应用双折射校正和对精度的影响

[0195] 以下说明偏振对于形状感测系统的精度的影响。为了获得测量之间的变化的输入偏振,在形状感测光纤和形状感测系统之间增设了环形偏振控制器,如图34所示。

[0196] 为了说明上述校正对系统精度的影响,如图35所示地考虑对于相当简单的形状的面内信号,其中使1.4米的形状感测光纤以50mm的弯曲半径转一个180度的弯。图36显示了对于三次连续测量的面外测量。在各次测量之间,采用图34中的偏振控制器来改变偏振。

[0197] 如果不考虑双折射,则可观测到精度和准确度的明显降低。当偏振状态改变时,在面外信号中观测到较大的响应。作为系统测量到错误扭转信号的结果,光纤仅在弯曲区域中捕获角度误差。因此,当离开此弯曲时,在光纤的指向方面存在着明显的误差。预测光纤的偏振响应是一个难题,并且对于给定弯曲来说不是每个芯都具有相同程度的响应。图37说明了这一点,显示出针对纤芯的双折射校正。然而,对于中心芯的两次相同测量在它们的

相位响应中具有明显的变化,如图38所示。两次连续的测量会不同地响应于输入偏振,提供了形状感测光纤中的双折射的证据。

[0198] 触发双折射校正改进了系统的准确度,如图39所示。当输入偏振状态改变时,形状测量之间的变化被最小化,这极大地提高了系统的准确度。然而,仍然可以观测到系统精度的明显误差。如果还进行基于弯曲引发的双折射的第二级校正,则还可以进一步改进系统,如图40所示。面外信号的准确度和精度大大提高。

[0199] 虽然已经详细地显示和说明了各种实施例,但是权利要求并不限于任何特定的实施例或例子。以上说明不应当理解为暗示了任何特定的元件、步骤、范围或功能都是必要的而必须包括在权利要求的范围中。授予专利权的主题的范围仅由权利要求限定。合法保护的程序由记载在授权权利要求中的文字及其等同物来限定。本领域普通技术人员已知的与上述优选实施例中的元件等效的所有结构性和功能性的等同物通过引用明确地结合到本文中,并被本权利要求书所涵盖。此外,对于装置或方法而言,其不必要解决本发明所寻求解决的每一项问题,因为它由本权利要求所涵盖。没有一项权利要求意图援引美国法典第35条§112第6段,除非采用了“用于…的装置”或“…的步骤”这样的词语。此外,本说明书中没有一个实施例/特征/元件或步骤对公众来说是专有的,而不管该实施例/特征/元件或步骤是否在权利要求书中有记载。

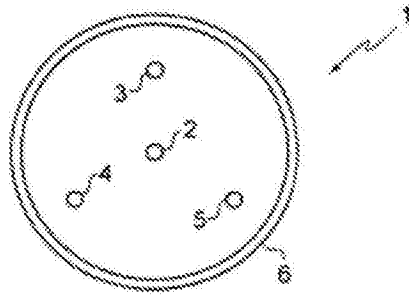


图1

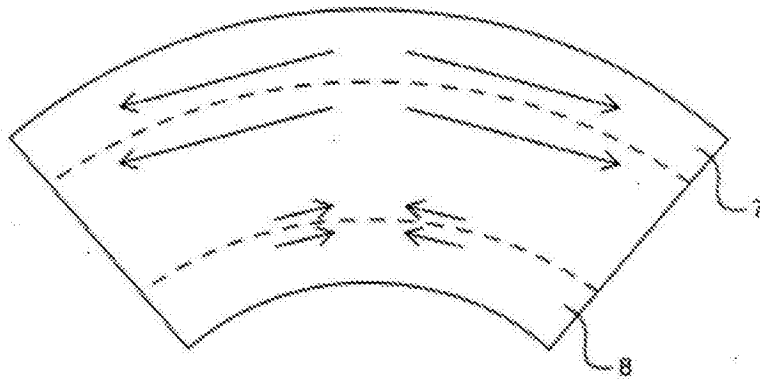


图2

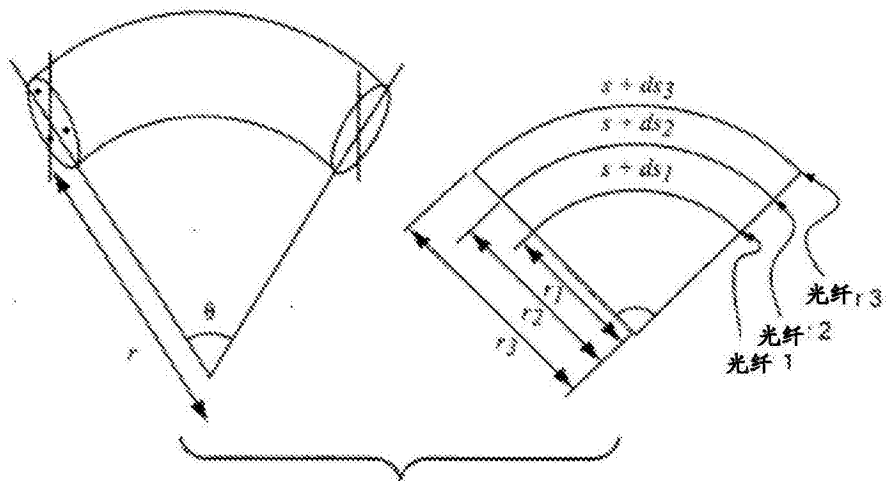


图3

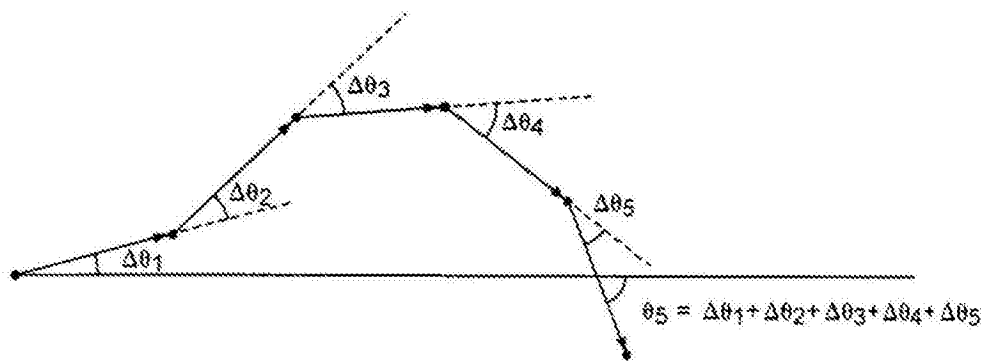


图4

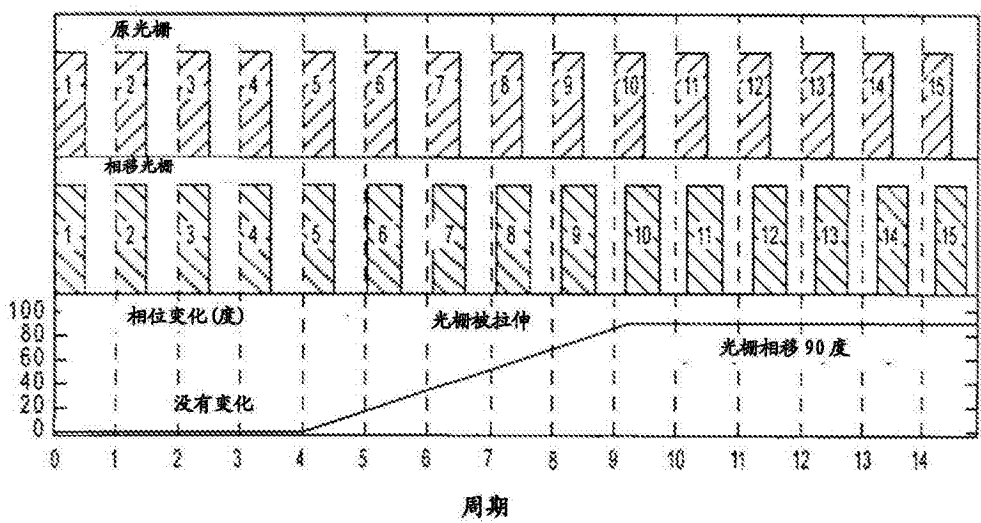


图5

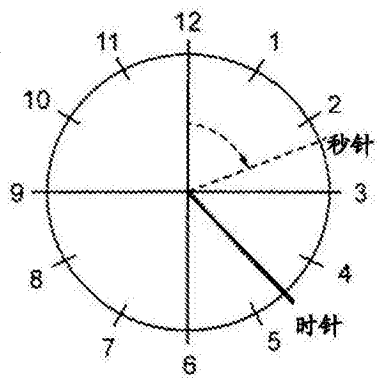


图6

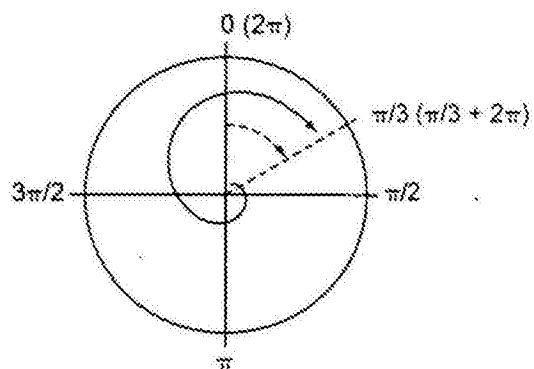


图7

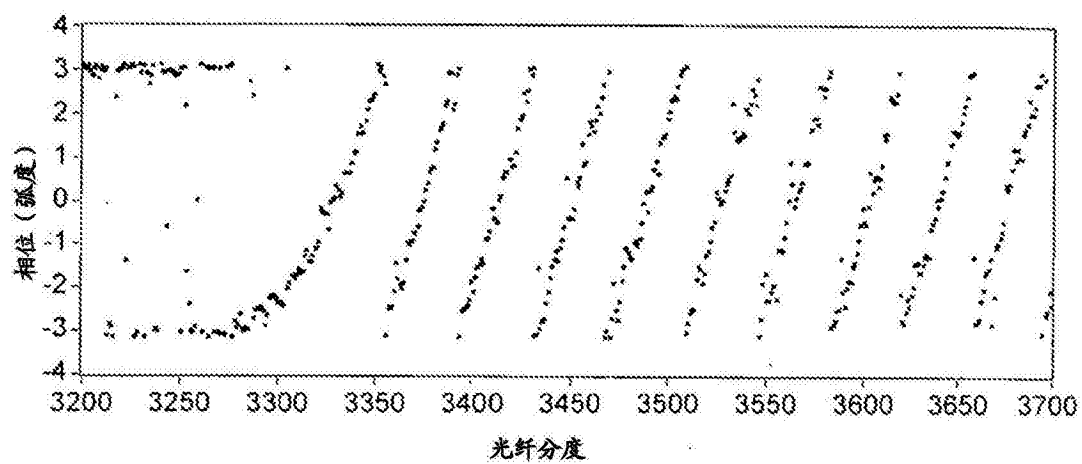


图8

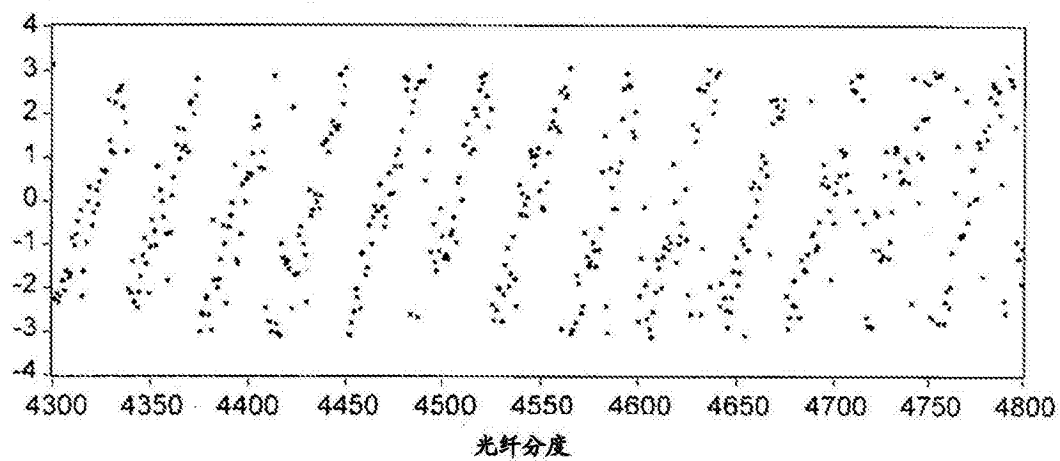


图9

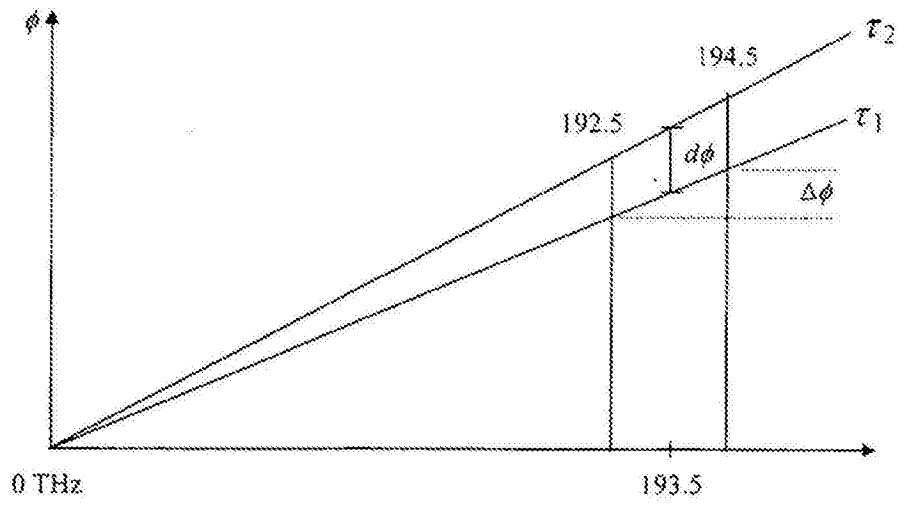


图10

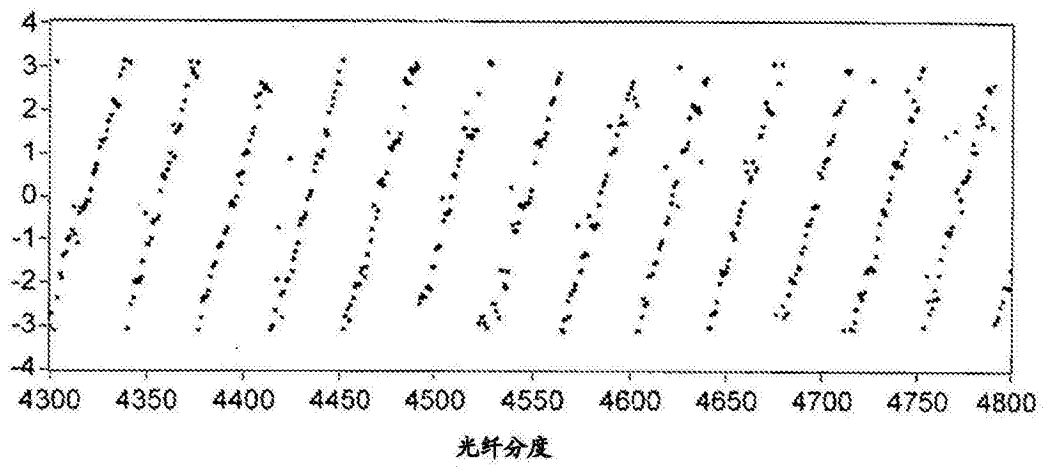


图11

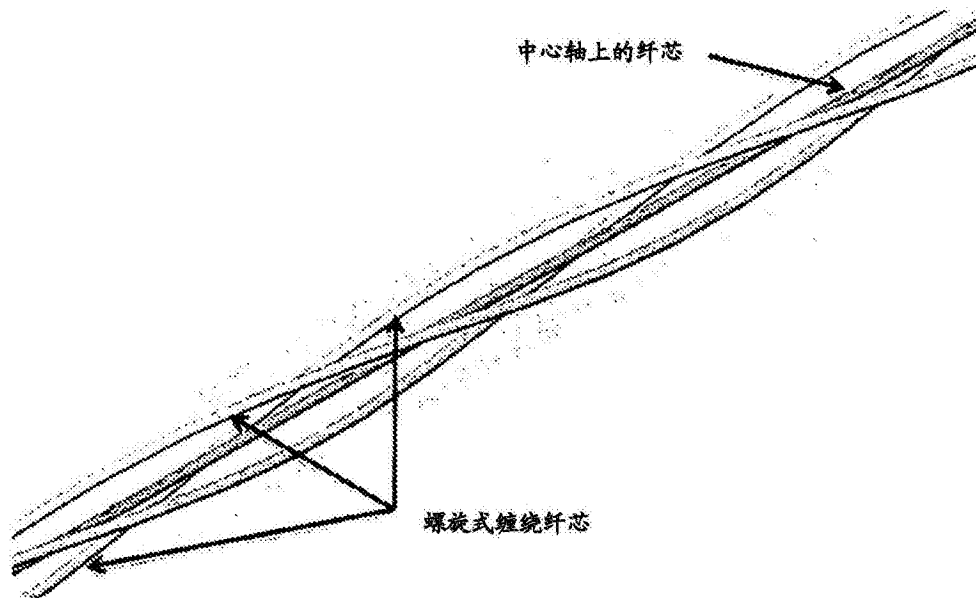


图12

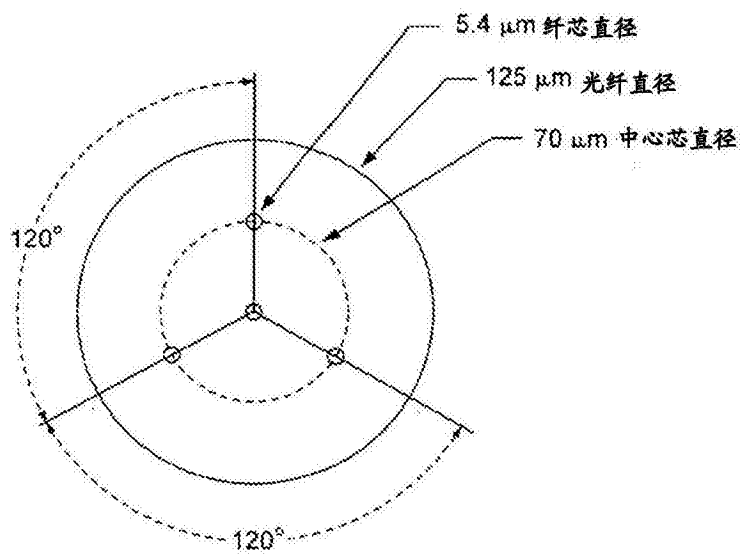


图13

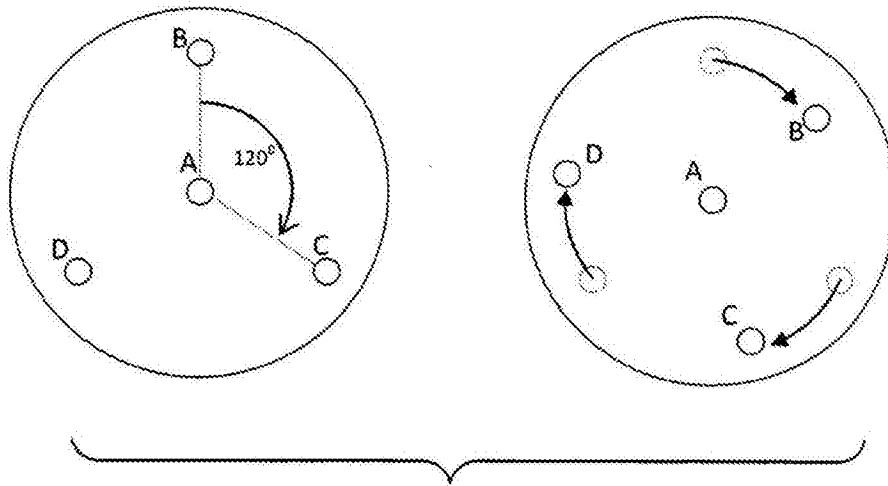


图14

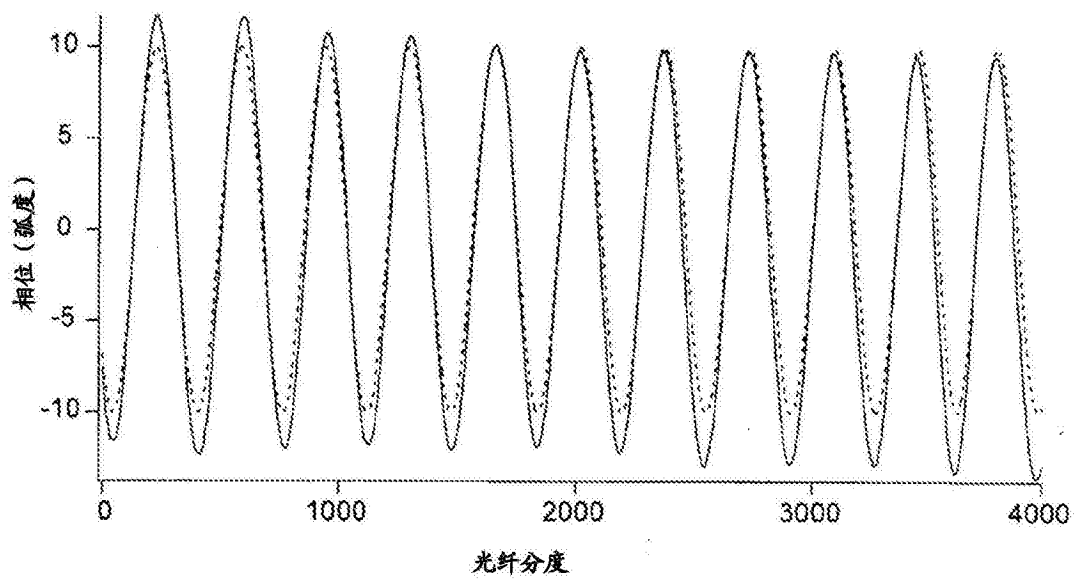


图15

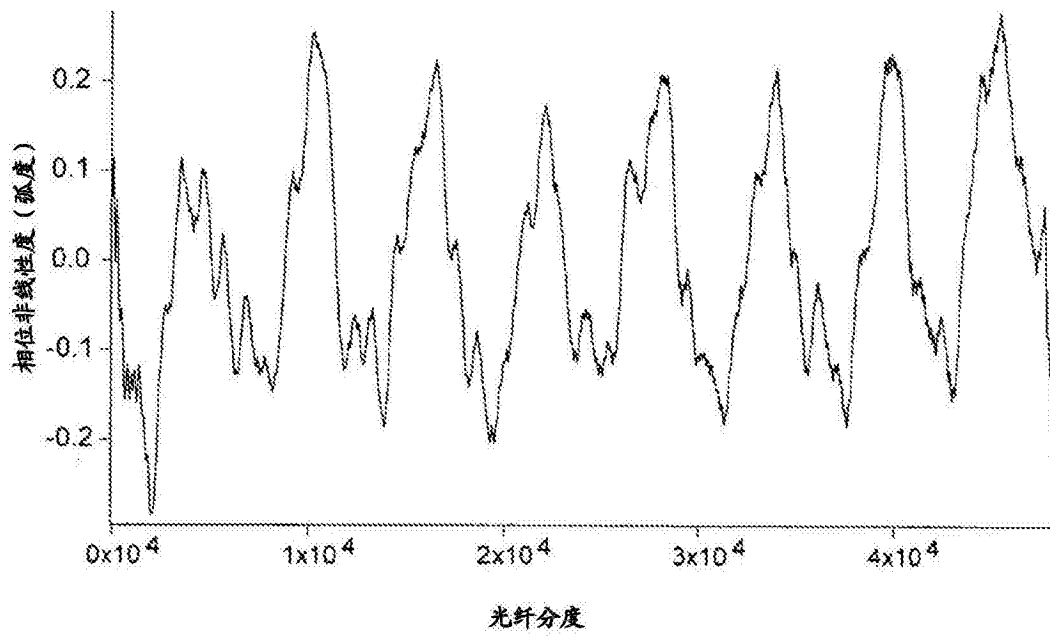


图16

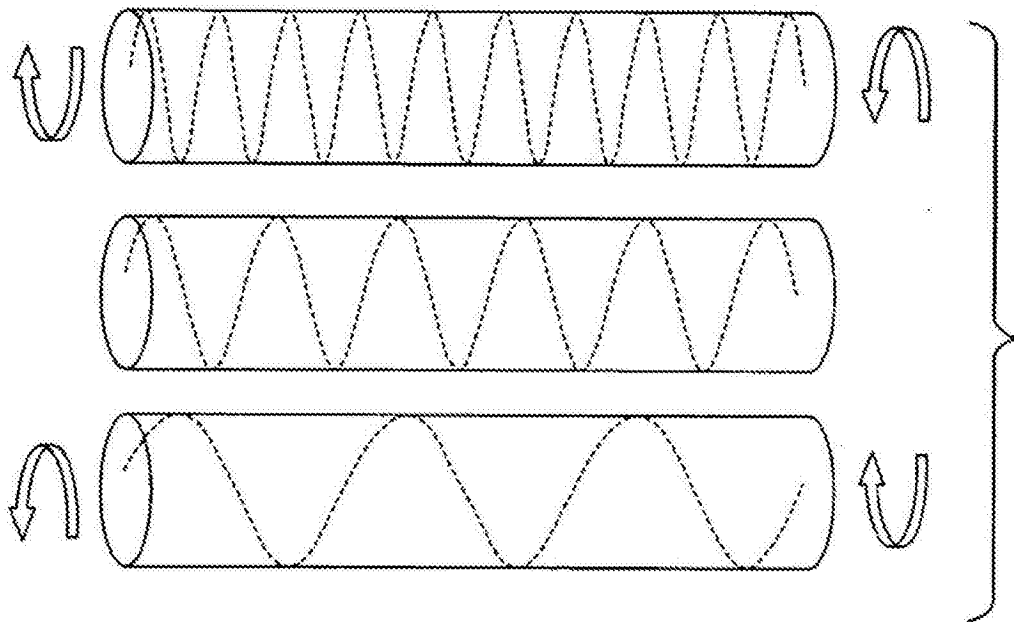


图17

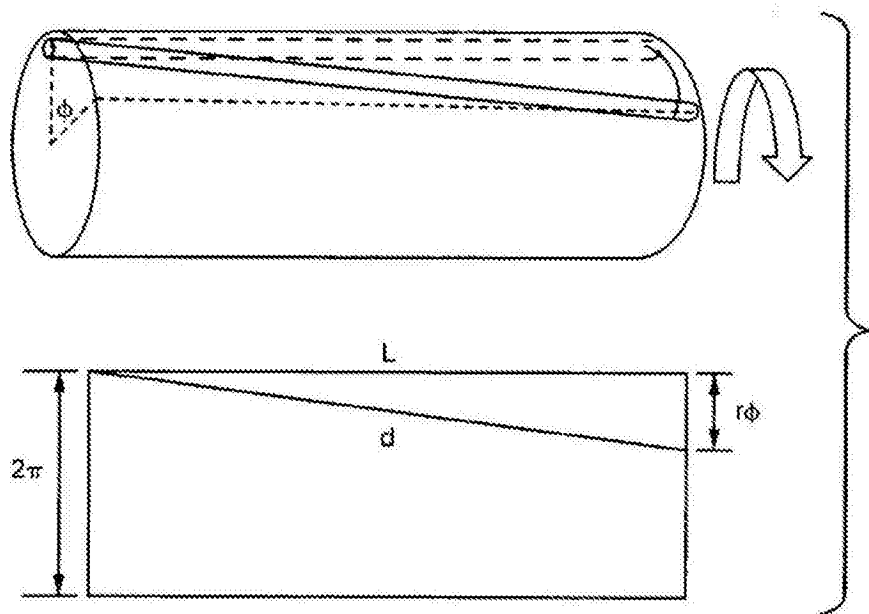


图18

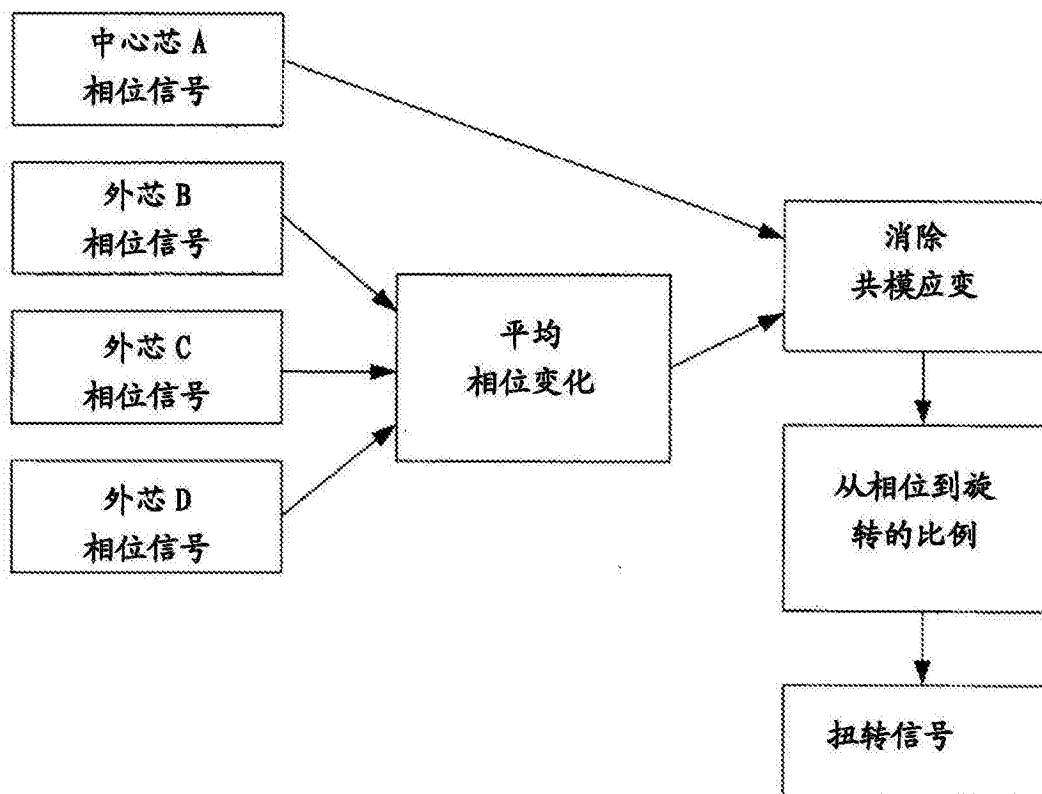


图19

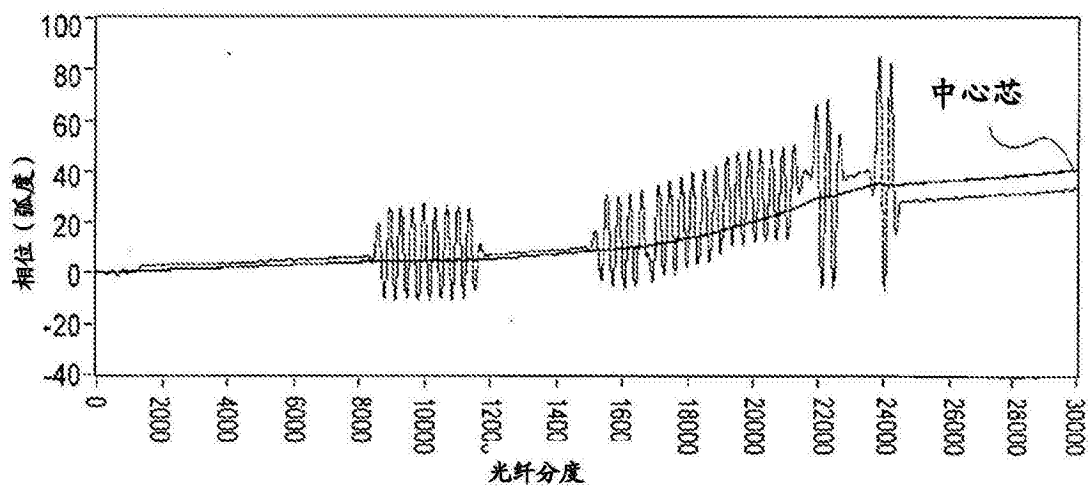


图20

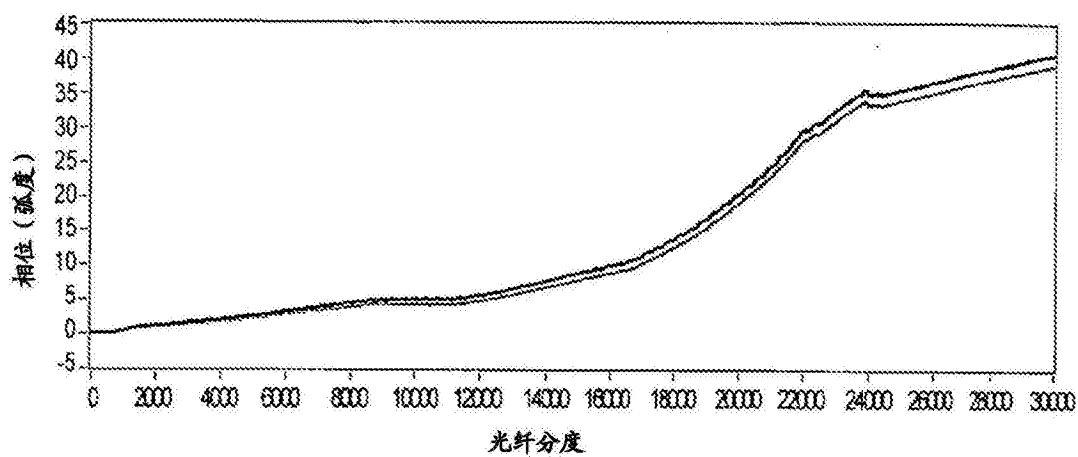


图21

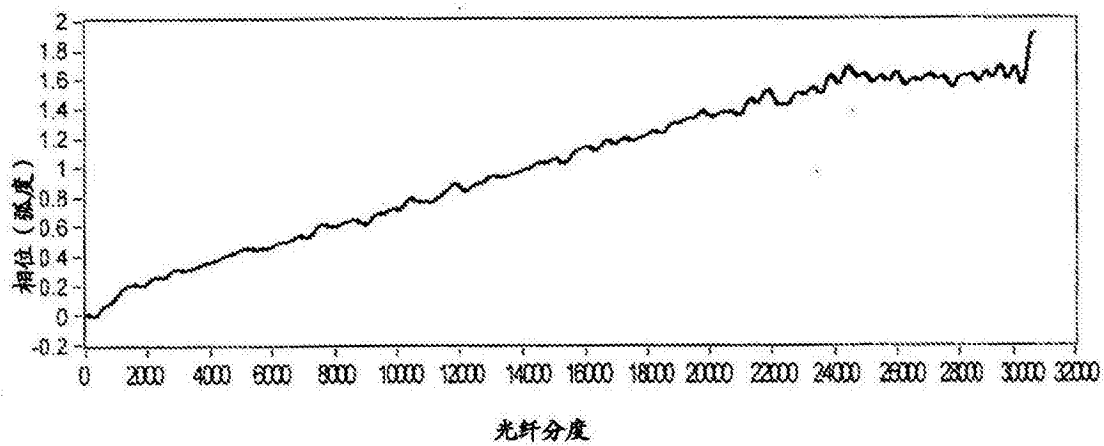


图22

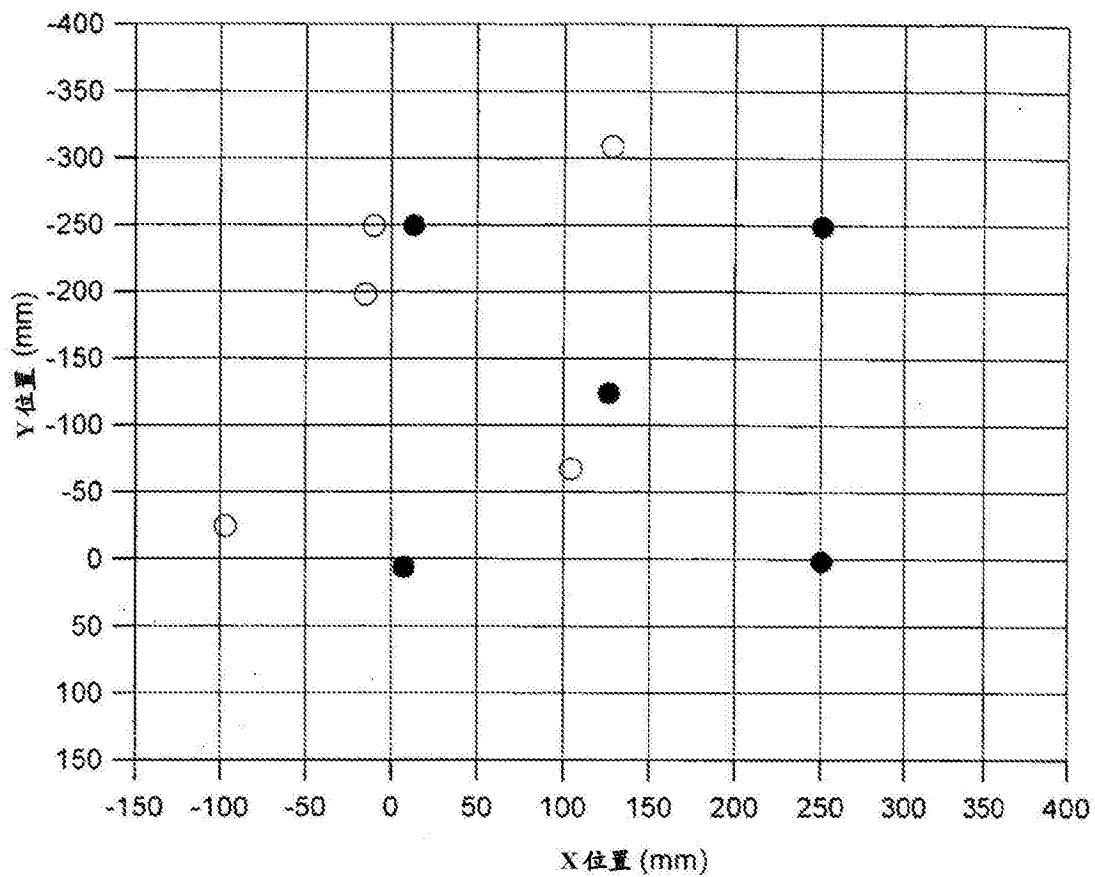


图23

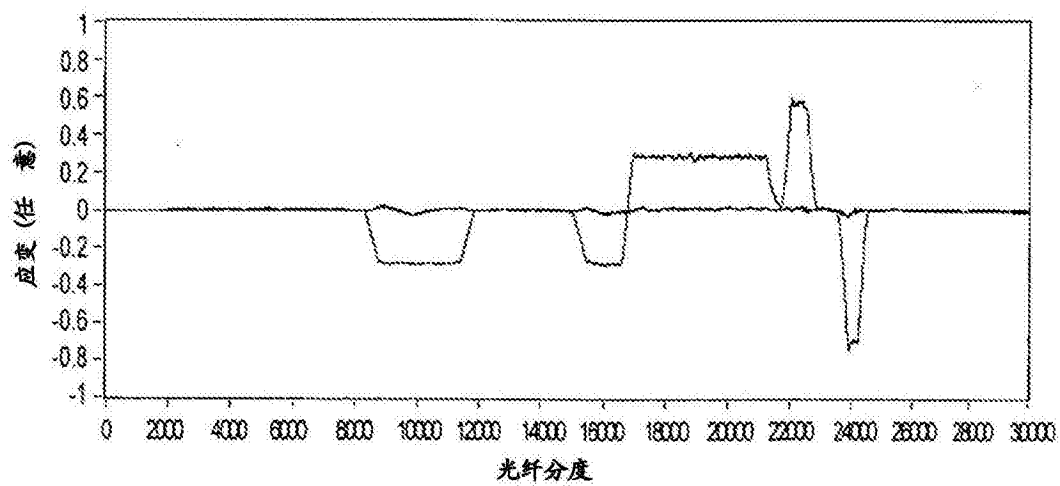


图24

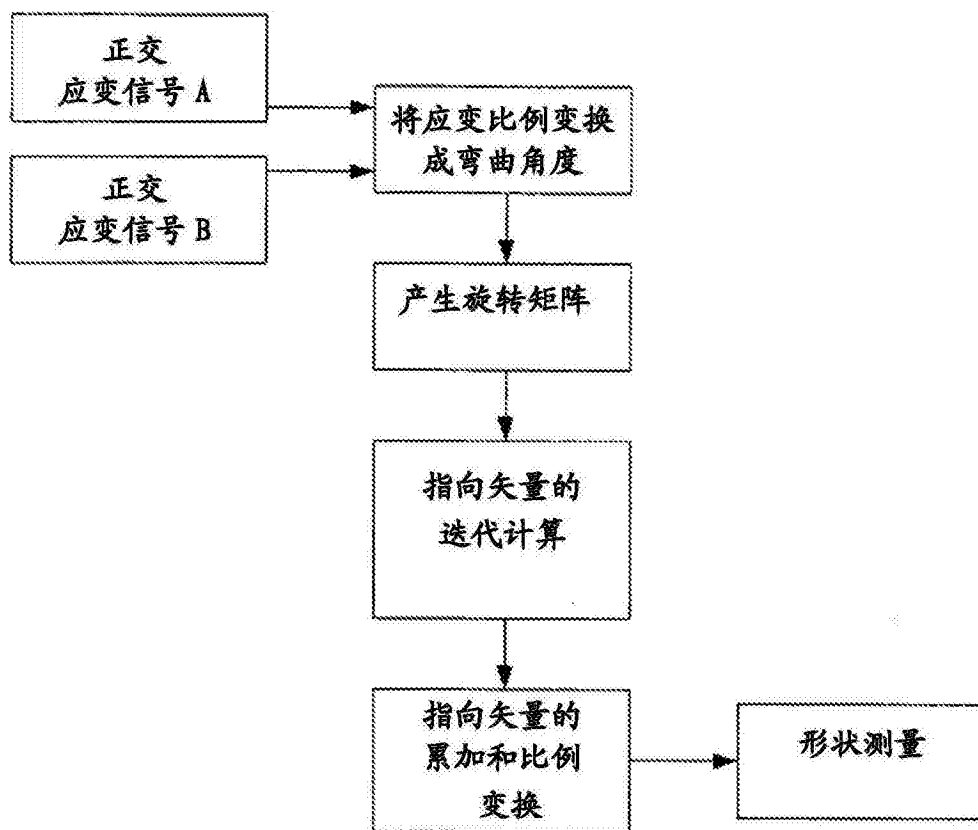


图25

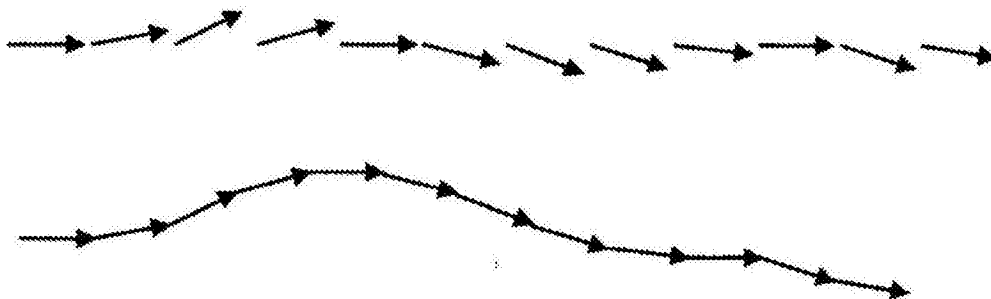


图26

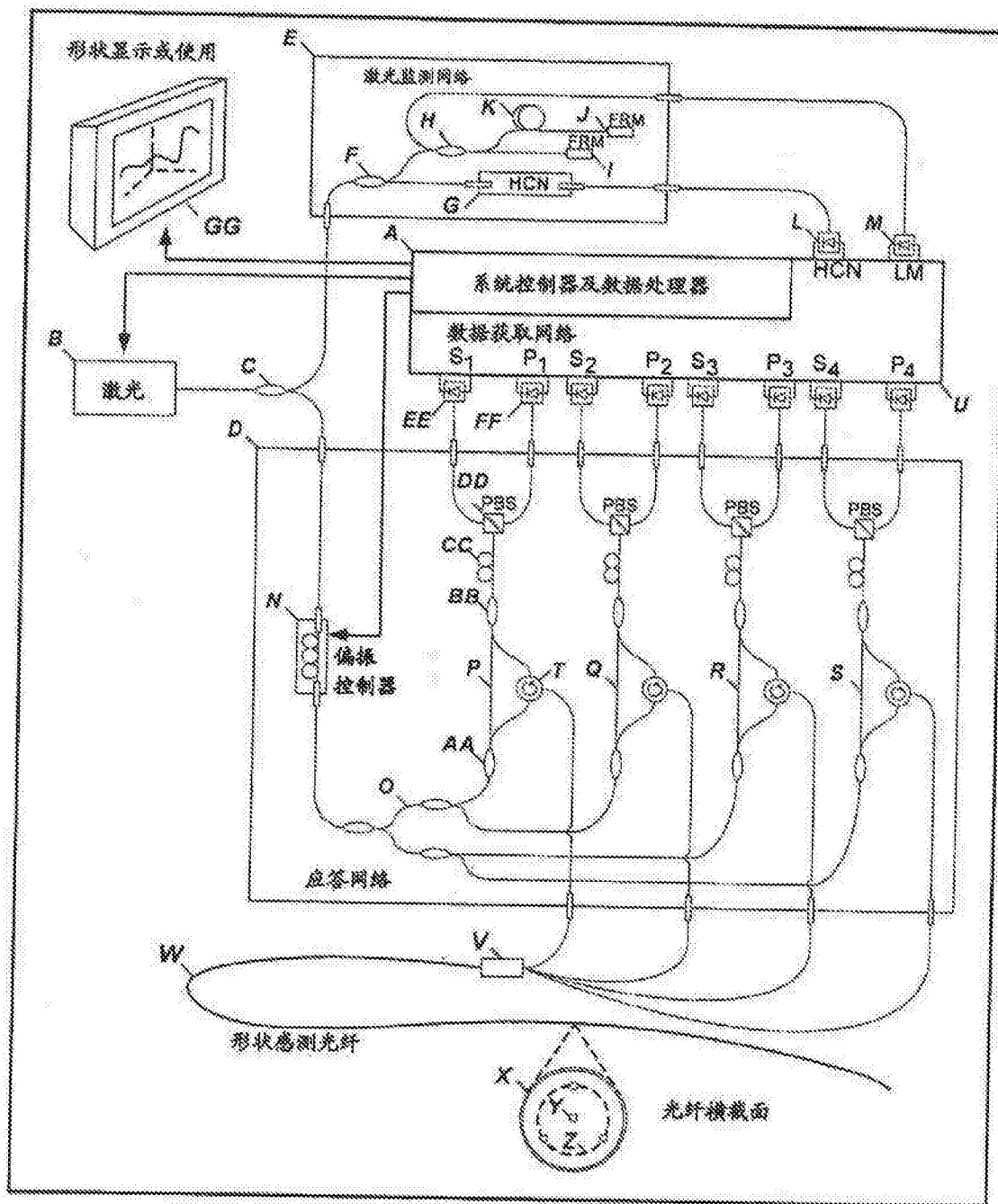


图27

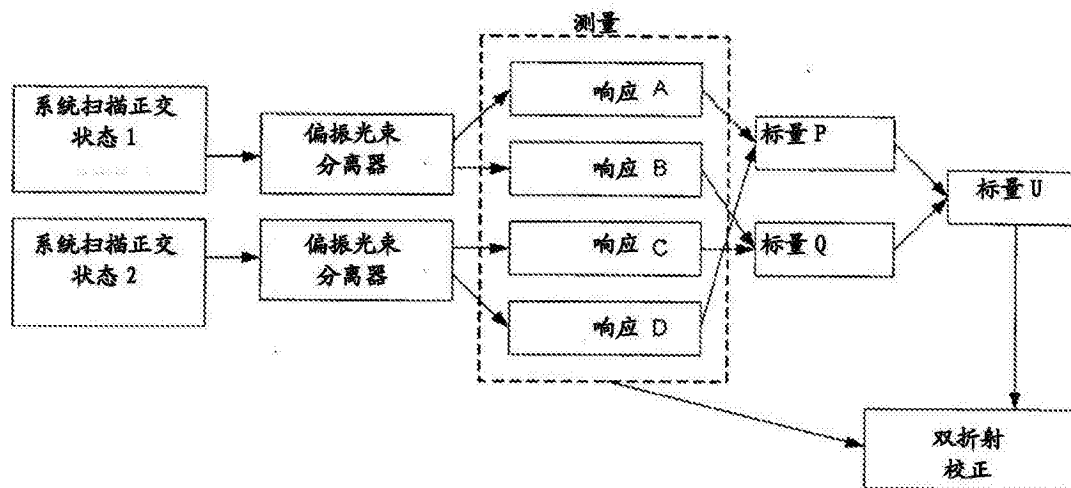


图28

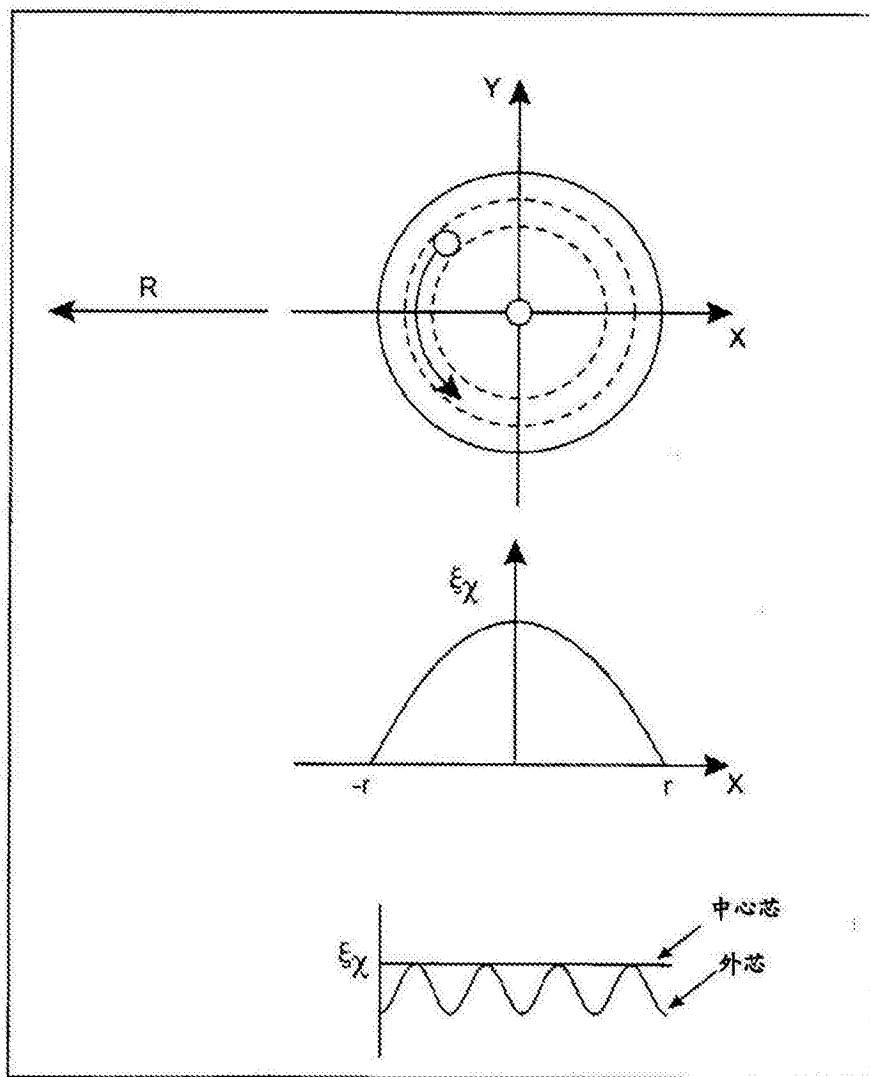


图29

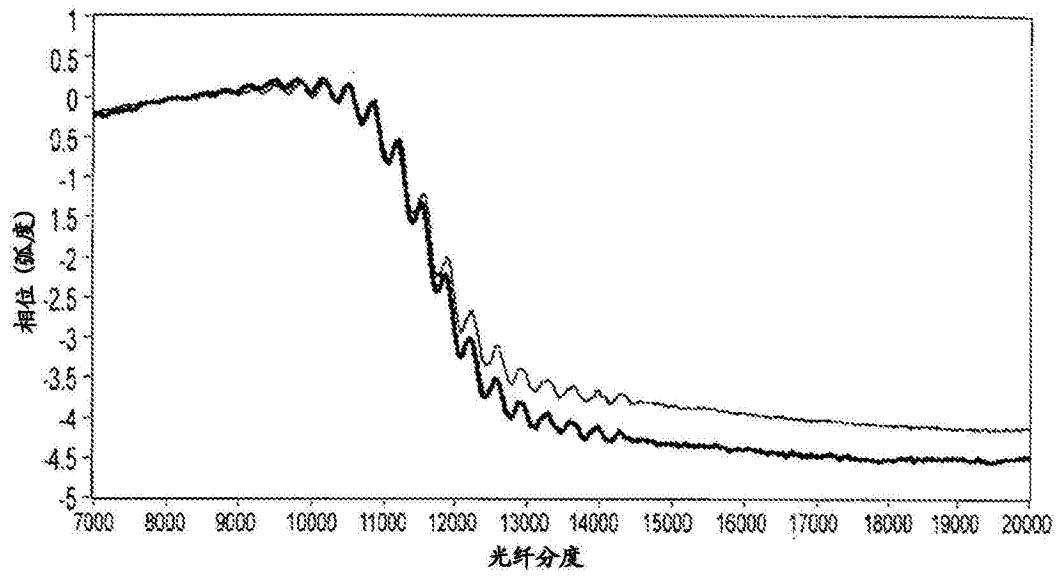


图30

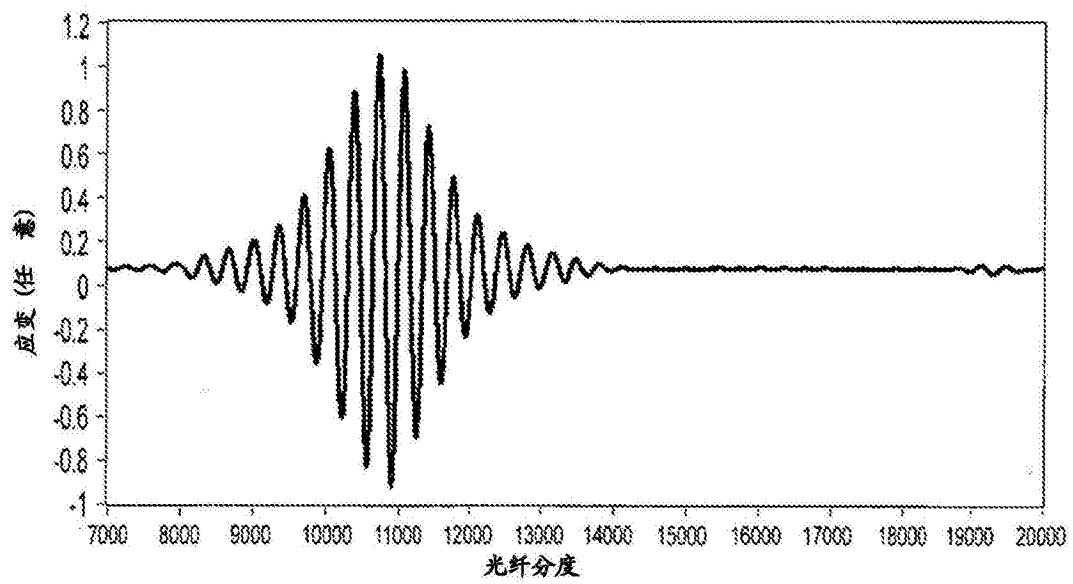


图31

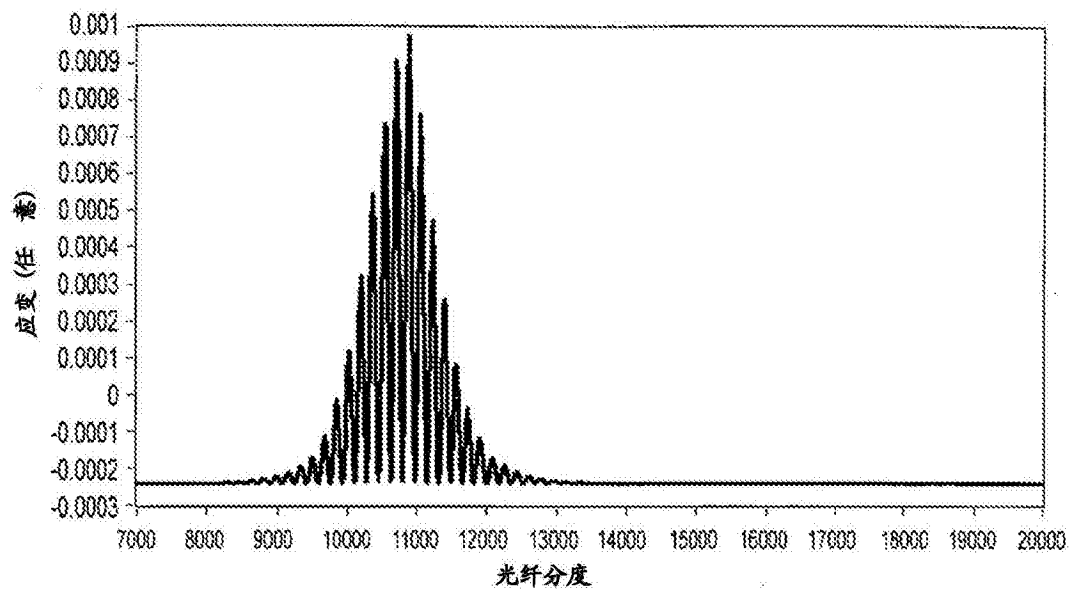


图32

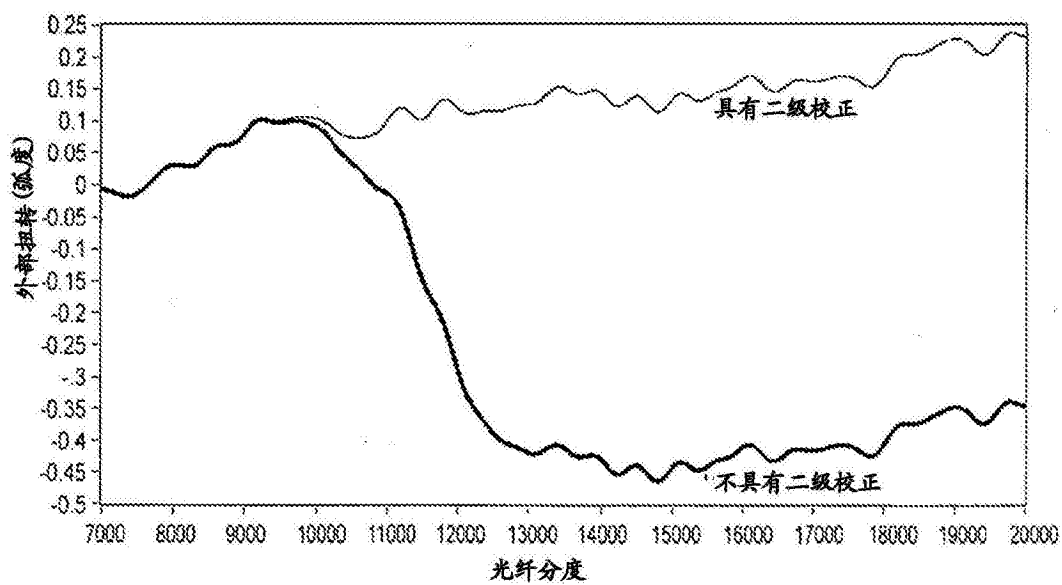


图33

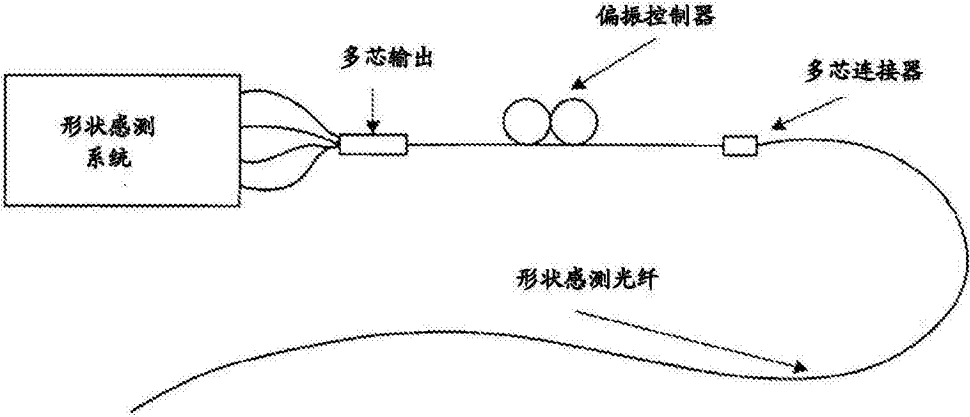


图34

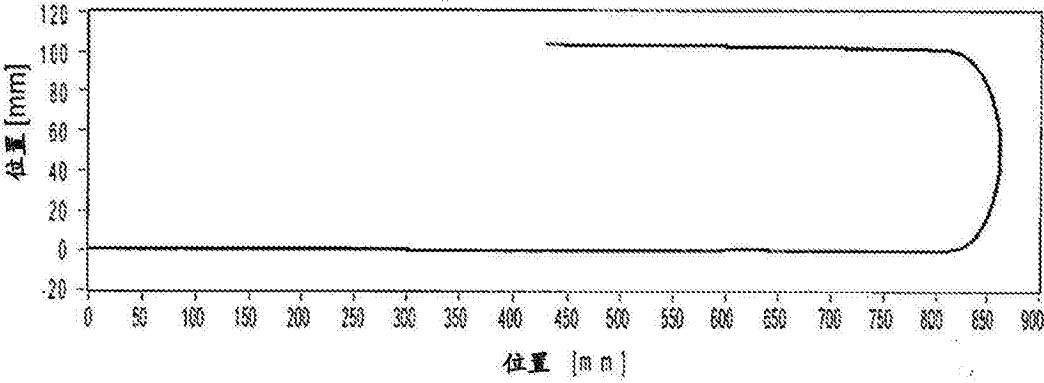


图35

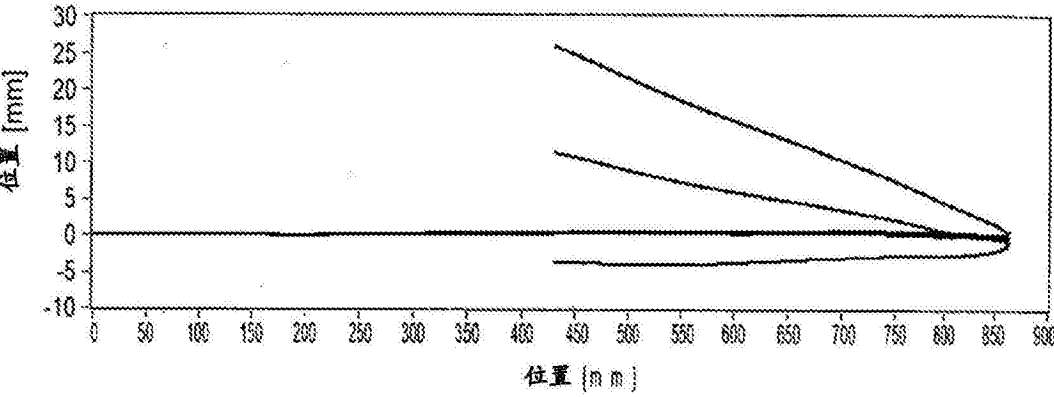


图36

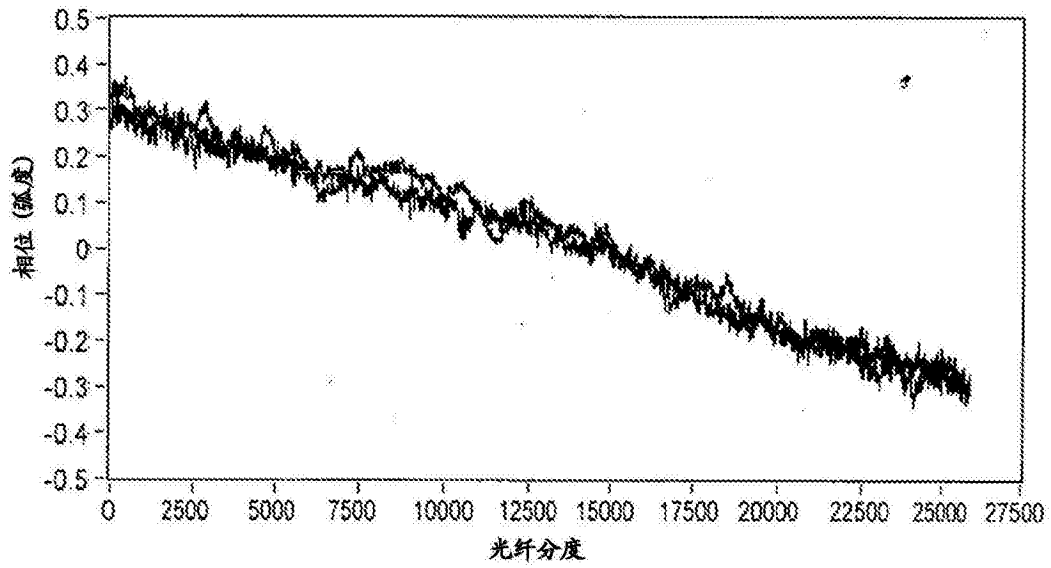


图37

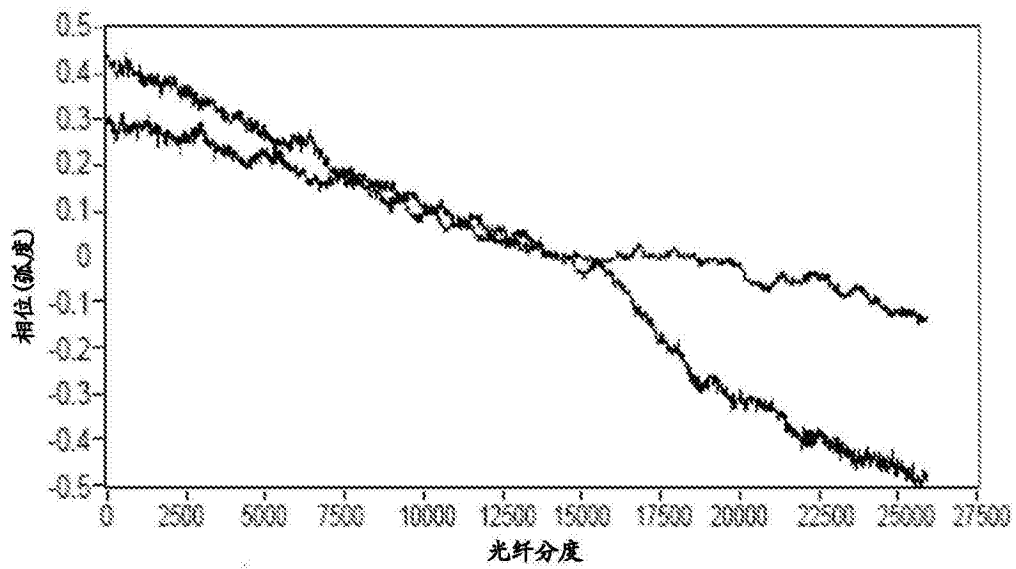


图38

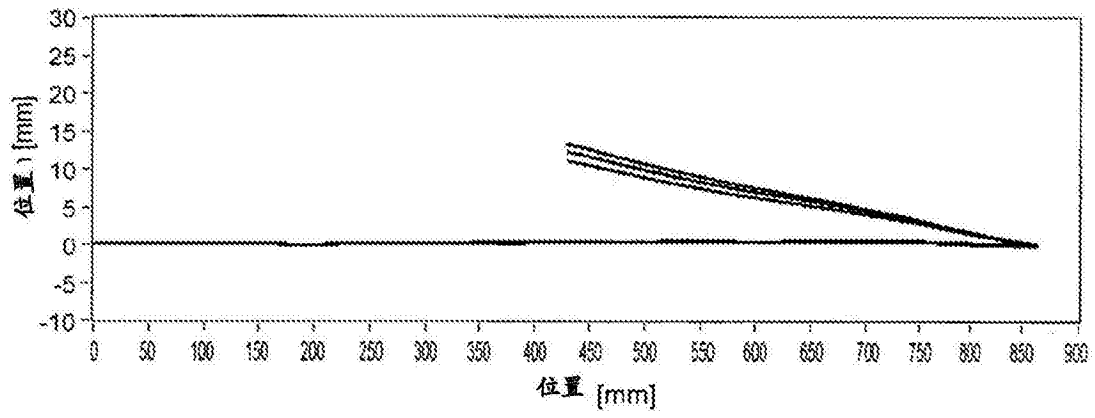


图39

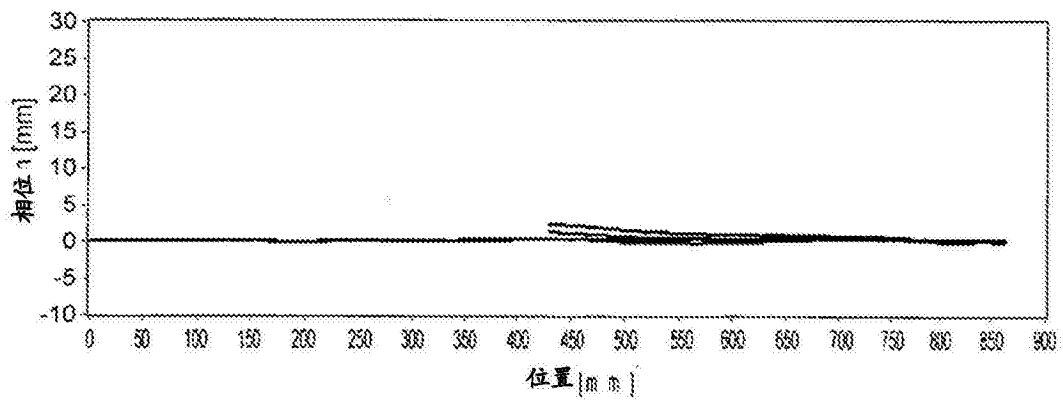


图40