



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105705922 B

(45)授权公告日 2020.04.14

(21)申请号 201480059458.2

(22)申请日 2014.10.29

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105705922 A

(43)申请公布日 2016.06.22

(30)优先权数据
1319079.8 2013.10.29 GB

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2016.04.28

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/GB2014/053218 2014.10.29

(87)PCT国际申请的公布数据
W02015/063481 EN 2015.05.07

(73)专利权人 圣安德鲁斯大学董事会
地址 英国圣安德鲁斯

(72)发明人 K·德拉起亚 M·马济卢
K·梅茨格

(74)专利代理机构 北京润平知识产权代理有限公司 11283
代理人 顾问 肖冰滨

(51)Int.Cl.

G01J 9/02(2006.01) (续)

(56)对比文件

US 6795190 B1,2004.09.21,说明书第1栏第28-36段、第3栏第24-26段.

US 2009009759 A1,2009.01.08,说明书第0083、0106、0168段.

US 2012095354 A1,2012.04.19,说明书第0032-0044、0069-0074、0091、0105-0107段,附图1-2、9、13.

US 2018107157 A1,2018.04.19,

US 6393037 B1,2002.05.21,

US 2002122444 A1,2002.09.05,

US 2014055792 A1,2014.02.27,

US 2013100456 A1,2013.04.25,

US 2014278220 A1,2014.09.18,

US 5212667 A,1993.05.18,

B.Redding等.Compact spectrometer based on a disordered photonic chip.《Nature Photonics》.2013,第7卷第746-751页. (续)

审查员 蒋呈阅

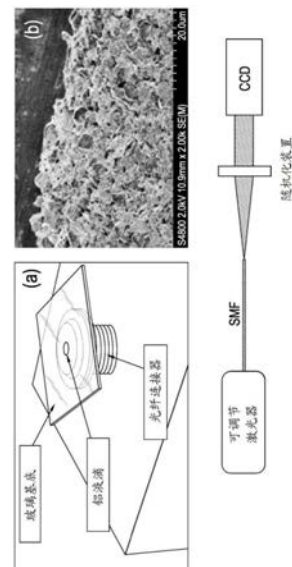
权利要求书3页 说明书9页 附图11页

(54)发明名称

随机波长计

(57)摘要

一种光学系统,包括:随机化装置,其具有多个随机定位的散射体,以用于对光进行散射并由此使光随机化以生成散斑;以及检测器,其用于检测散斑以便确定光的至少一个属性和/或确定光的至少一个属性的变化。



CN 105705922 B

[转续页]

[接上页]

(51) Int.Cl.

G01J 4/00(2006.01)

G01J 3/02(2006.01)

H01S 5/0687(2006.01)

G01J 1/42(2006.01)

(56) 对比文件

D.Masiyano等.Gas cells for tunable diode laser absorption spectroscopy employing optical diffusers. Part 2: Integrating spheres.《Applied Physics B》.2010,第100卷第303-312页.

M.Nixon等.Focusing through disordered media inside a laser cavity.《CLEO Technical Digest》.2012,第1-2.

A.Mourka等.Modal Characterization

using Principal Component Analysis: application to Bessel, higher-order Gaussian beams and their superposition.《Scientific Reports》.2013,第1-8页.

Jung-Hoon Park等.Active spectral filtering through turbid media.《Optics Letters》.2012,第37卷(第15(2008)期),第3261-3263页.

Jung-Hoon Park等.Active spectral filtering through turbid media.《Optics Letters》.2012,第37卷(第15(2012)期),第3261-3263页.

Eran Small等.Spectral control of broadband light through random media by wavefront shaping.《Optics Letters》.2012,第37卷(第16(2012)期),第3429-3431页.

1. 一种用于稳定可控的相干光源或激光源的输出的稳定系统,所述稳定系统包括:
随机化装置,所述随机化装置用于随机化从所述可控的相干光源或激光源输出并入射在所述随机化装置的光,使得所述随机化装置生成散斑;
检测器,所述检测器用于检测并分析所述散斑以确定所述光的一个或多个属性和/或确定所述从所述可控的相干光源或激光源输出的光的一个或多个属性的变化;以及
控制器,所述控制器用于基于所确定的所述光的一个或多个属性和/或所述从所述可控的相干光源或激光源输出的光的一个或多个属性的变化来控制所述可控的相干光源或激光源,其中分析所述散斑包括将检测到的散斑与多个先前记录的散斑进行比较,所述多个先前记录的散斑针对要检测的所述光的所述一个或多个属性的每个值被记录。
2. 如权利要求1所述的稳定系统,其中提供多个检测器,并且所述散斑中的至少一部分入射在所述多个检测器上。
3. 如权利要求2所述的稳定系统,其中所述散斑的不同部分入射在不同的检测器上。
4. 如权利要求2所述的稳定系统,其中所述检测器可操作以确定所述从所述可控的相干光源或激光源输出的光的不同属性。
5. 如权利要求4所述的稳定系统,其中所述不同的检测器可操作以同时确定所述从所述可控的相干光源或激光源输出的光的不同属性。
6. 如权利要求1至5中任一项所述的稳定系统,其中,所述控制器被配置为基于所确定的所述光的一个或多个属性和/或所述从所述可控的相干光源或激光源输出并入射在所述随机化装置的光的一个或多个属性的变化来控制或改变所述可控的相干光源或激光源的至少一个操作参数。
7. 如权利要求6所述的稳定系统,其中,所述控制器被配置为基于所确定的所述光的一个或多个属性和/或所述从所述可控的相干光源或激光源输出并入射在所述随机化装置的光的一个或多个属性的变化来控制或改变所述可控的相干光源或激光源的操作温度或泵电流。
8. 如权利要求6所述的稳定系统,其中,所述控制器被配置为基于所确定的所述光的一个或多个属性和/或所述从所述可控的相干光源或激光源输出并入射在所述随机化装置的光的一个或多个属性的变化来控制或改变所述可控的相干光源或激光源的激光腔的长度和激光增益介质的属性中的至少一者。
9. 根据权利要求6所述的稳定系统,其中,所述控制器被配置为基于所确定的所述光的一个或多个属性和/或所述从所述可控的相干光源或激光源输出并入射在所述随机化装置的光的一个或多个属性的变化来控制或改变所述可控的相干光源或激光源的腔内元件的至少一个属性,所述腔内元件诸如一个或多个滤波器或光束成形器。
10. 如权利要求1所述的稳定系统,其中所述随机化装置具有多个随机定位的散射体,以用于对光进行散射并由此使入射在所述随机化装置上的光随机化以生成所述散斑。
11. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,其中从所述可控的相干光源或激光源输出的所述光的所述一个或多个属性包括以下的一个或多个:所述入射在所述随机化装置上的光的波长、所述入射在所述随机化装置上的光的偏振、所述入射在所述随机化装置上的光的相干性、所述入射在所述随机化装置上的光的光束形状参数以及所述入射在所述随机化装置上的光的空间模。

12. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,其中所述随机化装置包括随机定位的微粒。

13. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,其中所述随机化装置包括在薄的膜或层中随机定位的微粒。

14. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,其中所述随机化装置包括在基体中悬浮的、随机定位的微粒。

15. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,其中所述随机化装置包括生物材料,所述生物材料包含随机定位的散射体。

16. 如权利要求15所述的稳定系统,其中所述生物材料包括生物组织。

17. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,其中所述随机化装置位于光学共振腔中。

18. 如权利要求17所述的稳定系统,其中所述光学共振腔为法布里-珀罗腔。

19. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,包括单模光纤,其用于将单模光传输至所述随机化装置。

20. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,其中所述检测器被布置成使用主成分分析来分析所述散斑以确定所述入射在所述随机化装置上的光的波长。

21. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,其中所述随机化装置包括厚度小于100 μm 的膜层。

22. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,其中所述随机化装置是透射性的。

23. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,其中所述随机化装置是反射性的。

24. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,其中所述随机化装置包括以下的至少一个:空心球体以及中空管。

25. 如权利要求24所述的稳定系统,其中,所述空心球体包括积分球。

26. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,还包括:可变光学元件或设备,其位于所述随机化装置前以用于改变入射在所述随机化装置上的光。

27. 如权利要求26所述的稳定系统,其中所述可变光学元件或设备可操作以改变入射在所述随机化装置上的所述光的幅度和/或相。

28. 如权利要求26所述的稳定系统,其中所述可变光学元件或设备包括以下的至少一个:可变形的镜、空间光调制器以及数字微镜。

29. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,包括多个检测器和用于将所述散斑转移至所述多个检测器的装置。

30. 如权利要求29所述的稳定系统,其中用于转移的所述装置可操作以将所述散斑的不同部分转移至不同的检测器。

31. 如权利要求29所述的稳定系统,其中用于转移的所述装置包括可控光束成形设备。

32. 如权利要求31所述的稳定系统,其中可控光束成形设备包括以下的至少一个:可变形的镜、空间光调制器以及数字微镜。

33. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,所述稳定系统被布置为以下的

至少一个:波长计、光谱仪以及干涉仪。

34. 如权利要求1至5及10中任意一项所述的稳定系统,包括多个随机化装置。

35. 如权利要求3至5和10中任一项所述的稳定系统,其中所述随机化装置包括随机定位的铝微粒。

36. 如权利要求21所述的稳定系统,其中所述随机化装置包括厚度小于50 μm 的膜层。

37. 如权利要求28所述的稳定系统,其中所述空间光调制器包括液晶空间光调制器。

38. 如权利要求10所述的稳定系统,其中,所述随机化装置包括中空元件,所述中空元件用于对所述入射在所述随机化装置上的光进行内部反射。

39. 如权利要求38所述的稳定系统,其中,所述中空元件被配置用于内部反射和随机化所述入射在所述随机化装置上的光以生成所述散斑。

40. 一种激光器系统,包括激光器以及如权利要求1至39中任意一项所述的稳定系统,所述激光器系统适于通过监控散斑随时间的变化从而监控在所述激光器的输出的改变。

41. 一种激光器系统,包括:可控激光源以及如权利要求1至39中任意一项所述的稳定系统。

42. 如权利要求41所述的激光器系统,其中所述随机化装置包括多个随机定位的散射体,其用于对光进行散射并由此使光随机化以生成散斑。

43. 如权利要求41或42所述的激光器系统,其中所述随机化装置是透射性的。

44. 如权利要求41或42所述的激光器系统,其中所述随机化装置是反射性的。

45. 如权利要求44所述的激光器系统,其中所述随机化装置包括中空元件,其用于对光进行内部反射并使光随机化以生成散斑。

46. 如权利要求45所述的激光器系统,其中所述随机化装置包括以下的至少一个:空心球体以及中空管。

47. 如权利要求46所述的激光器系统,其中,所述空心球体包括积分球。

48. 如权利要求41、42、45及46中任一项所述的激光器系统,其中所述控制器可操作以控制或改变激光腔的长度和激光增益介质中的至少一个。

49. 如权利要求41、42、45及46中任一项所述的激光器系统,其中所述控制器可操作以控制或改变腔内元件的至少一个属性。

随机波长计

技术领域

[0001] 本发明涉及一种诸如波长计 (wavelength meter) 的光学系统, 例如光谱仪或干涉仪, 以及一种用于选择波长的方法。

背景技术

[0002] 通过与时间相关的无序或随机介质的光的传播通常被看作光场的随机化过程, 该随机化过程会破坏在原始光束中的所有信息。然而, 在静态随机介质中传播的相干光束产生出确定性的散斑 (speckle pattern), 同时维持其最初的在空间和时间上的相干性。这种特性在若干种新颖的光学设备的设计中被充分利用, 例如利用计算机生成的全息图建立焦斑, 捕获微粒和协调一致处理等离子纳米结构。

[0003] 对基于与时间相关的无序或随机介质的设备而言, 关键的是, 在传输通过随机介质时光场的信息内容被保留。因此, 静态波阵面随机化过程能够被用于检测光场在散射之前的状态。

[0004] 在光子学领域, 波长计的使用是无处不在的。此类设备的微型化是非常有利的。多模光纤可被用于建立波阵面随机化, 从而作为光谱仪, 正如在 B.Redding、S.M.Popoff 和 H.Cao 在 *Opt.Express* 21, 6584 (2013年) 中发表的文章以及 B.Redding 和 H.Cao 在 *Opt.Lett.* 37, 3384 (2012年) 中发表的文章所描述的那样。然而, 要实现在两个相邻激光线之间 8pm 的分辨率将需要 20m 长的无扰动光纤, 这实际上很难实现。此外, 已被单独确认的是, 光谱偏振测量可使用随机介质的传输矩阵来实现, 见 T.W.Kohlgraf-Owens 和 A.Dogariu 在 *Opt.Lett.* 35, 2236 (2010年) 中发表的文章。

[0005] 芯片实验室 (Lab-on-a-chip) 的应用需要小型的集成波长检测器。实现这一点的一种方法是使得光传播通过周期性结构, 比如由特制的光子晶体构成的超棱镜。此种晶体的光色散能够在 1.5 μm 的波长下实现 0.4nm 的分辨率。然而, 这些设备依靠平面外 (out-of-plane) 检测和自由空间传播, 因此不是完全集成到芯片上 (on-chip) 的设备。

发明内容

[0006] 根据本发明, 提出了一种光学系统或仪器, 该光学系统或仪器包括: 随机化装置, 其包含被随机定位的微粒, 以用于使光随机化以提供散斑; 以及检测器, 其用于对被随机化的光进行检测和分析, 以确定光的一个或多个属性。优选地, 该随机化装置是透射性的。

[0007] 光的一个或多个属性能够选自: 波长、偏振、相干性以及光束形状参数。

[0008] 所述系统或仪器可以是波长计或光谱仪或干涉仪。

[0009] 优选地, 随机化装置包括薄的层或膜。该薄的层或膜的厚度可以小于 100 μm , 并且理想的小于 50 μm 。

[0010] 本发明提出了一种波阵面混合过程, 其充当广义的干涉仪, 提供对于每个不同的入射光束而言不同的散斑。这种属性能够用于例如同时测量拉盖尔高斯 (Laguerre-Gaussian) 光束的方位模 (azimuthal mode) 和径向模。相同的方法可用于测量光场的其他

关键属性,比如极化状态或波长。

[0011] 随机化装置可包括随机定位的微粒(例如铝微粒)的膜的层,其导致散斑形成。

[0012] 随机化装置可包括在基体(matrix)中悬浮的随机定位的微粒。基体可包括块体材料(bulk material)或者可以是薄的平面层。

[0013] 随机化装置可包括随机定位的微粒(例如铝微粒)的层。随机化装置可包括生物材料的层或薄片,比如生物组织的薄片。随机化装置可被提供为薄的膜,其能够定位在光源前或定位在从光源引出的光路上。

[0014] 随机化装置可以放置在光学共振腔,例如法布里-珀罗腔中。

[0015] 随机化装置可以是反射性的。随机化装置可包括中空的单元,其用于对光进行内部反射并使光随机化以生成散斑。随机化装置可包括空心球体(例如积分球)或中空管。

[0016] 可提供单模光纤以用于将单模光传输到随机化装置。这避免了光束尺寸匹配和入射光束尺寸方面的问题。

[0017] 主成分分析(PCA)可用于分析被随机化的光,以确定光的波长。

[0018] 可变光学元件或设备可被提供在随机化装置前,以用于改变入射在随机化装置上的光。可变光学元件或设备可操作以改变光的幅度和/或相。可变光学元件或设备可包括可变形的镜、空间光调制器(例如液晶空间光调制器)以及数字显微镜中的至少一个。

[0019] 可提供多个随机化装置。这些随机化装置可以被周期性地间隔开。这些随机化装置可被定位以便传递在特定波长下能效最高的散斑。

[0020] 根据本发明的另一方面,提出了一种激光器,包括:可控激光源;随机化装置,其用于使来自可控激光源的光随机化以生成散斑;检测器,其用于对散斑进行检测和分析以确定光的一个或多个属性;控制器,其用于基于所确定的光的一个或多个属性来控制可控激光源。

[0021] 优选地,随机化装置包括多个随机定位的散射体,其用于对光进行散射并由此使光随机化以生成散斑。随机化装置可包括随机定位的微粒形成的薄的层或膜。随机化装置可包括基体,随机定位的微粒在该基体中悬浮。随机化装置可包括块体材料。

[0022] 随机化装置可以是反射性的。随机化装置可包括中空元件,该中空元件用于对光进行内部反射并由此使光随机化以便生成散斑。随机化装置可包括中空球体(例如积分球)或中空管。

[0023] 根据本发明的又一个方面,提出了一种激光稳定系统,其用于稳定可控激光源的输出,该稳定系统包括:随机化装置,其用于使来自可控激光源的光随机化以生成散斑;检测器,其用于对散斑进行检测和分析以确定光的一个或多个属性;以及控制器,其用于基于所确定的光的一个或多个属性来控制可控激光源。优选地,随机化装置包括多个随机定位的散射体,其用于对光进行散射并由此使光随机化以生成散斑。随机化装置可包括随机定位的微粒形成的薄的层或膜。随机化装置可包括基体,随机定位的微粒悬浮在该基体中。随机化装置可包括块体材料。

[0024] 可提供多个检测器,并且散斑中的至少一部分入射在多个检测器上。散斑的不同部分可入射在不同的检测器上。不同的检测器可操作以确定光的不同属性。不同的检测器可操作以同时确定光的不同属性。

[0025] 根据本发明的又一个方面,提出了一种光学系统,包括:随机化装置,其用于使光

随机化以生成散斑；至少一个检测器，其用于对散斑进行检测和分析以确定光的一个或多个属性；以及可变光学元件或设备，其在随机化装置前，以用于改变入射在随机化装置上的光。可变光学元件或设备可操作以改变光的幅度和/或相。可变光学元件或设备可包括可变形的镜、空间光调制器（例如液晶空间光调制器）和数字微镜中的至少一个。可提供多个检测器和用于将散斑传递或引导至该多个检测器的设备。这些用于传递或引导的设备可操作以便将散斑的不同部分传递至不同的检测器。用于传递或引导的设备可包括一个或多个光学设备或元件。例如，用于传递或引导的设备可包括可控光束成形设备，比如可变形的镜、空间光调制器、数字微镜。

[0026] 还根据本发明的另一个方面，提出了一种光学系统，包括：随机化装置，其用于使光随机化以生成散斑；多个检测器，其用于对散斑进行检测和分析以确定光的一个或多个属性；以及用于将散斑传递或引导至多个检测器的设备。用于传递或引导的设备可操作以便将散斑的不同部分传递至不同的检测器。用于传递或引导的设备可包括一个或多个光学设备或元件。例如，用于传递或引导的设备可包括可控光束成形设备，比如可变形的镜、空间光调制器、数字微镜。可将可变光学元件或设备提供在随机化装置前，以用于改变入射在随机化装置上的光。

[0027] 通过利用非常简单的薄的漫射器的散射属性，可以检测出精确到微米精度的、单色光束的波长。通过使用围绕随机化介质放置的光学共振腔，这种方法可扩展到更高的分辨率。这允许超紧凑的光谱仪，并且允许基于对散斑场的分析来稳定激光/光束的新方法。

附图说明

[0028] 现在将仅通过举例的方式并且参考附图来对本发明的不同方面进行描述，其中：

[0029] 图1是散斑光谱仪的示意图；

[0030] 图2(a)示出了随着激光波长在785.1nm与785.6nm之间改变而检测到的散斑的PCA分解；

[0031] 图2(b)示出了在激光波长为785.234nm时观察到的远场散斑的示例；

[0032] 图2(c)至图2(d)示出了头三个主成分PC1、PC2和PC3，其相应于可通过散斑检测到的头三个自由度；

[0033] 图3示出了在氧化铝情况下所测量到的波长误差分布；

[0034] 图4示出了在法布里-珀罗腔中的随机漫射器的模型化的散斑可变性；

[0035] 图5是使用散斑检测来控制激光参数的激光稳定系统的示意性视图；

[0036] 图6是包括积分球的波长光谱仪的示意性视图；

[0037] 图7是波长光谱仪的基于管的组合件的示意性视图；

[0038] 图8是散斑光谱仪的各种操作阶段的示意性视图；

[0039] 图9是另一个激光稳定系统的示意性视图；

[0040] 图10示出了使用第一方法的激光系统的高分辨率训练和验证；以及

[0041] 图11示出了使用第二方法的激光系统的高分辨率训练和验证。

具体实施方式

[0042] 本发明使用随机散射体来从相干的光生成散斑，从而使得光的属性（比如波长、偏

振和相干性)能够被测量。使用主成分分析来分析穿过随机散射体(scatter)的光。在随机散射体之前,相干光束能够被视为多个子波束的叠加。在其传播通过随机散射体之后,在构成的子波束之间会观察到干涉图样,其中每个构成的子波束都具有被改变的方向、光斑尺寸和相对的相。

[0043] 图1示出了具有可调节的激光源的光谱仪,该激光源将波长可变的光输出到单模光纤中。从该光纤发出的光入射在形成散斑的透射性随机化装置上。已经通过随机化装置的光入射在CCD摄影机(Pike, Allied Vision Technologies, 像素大小:7.4 μ m x 7.4 μ m)上。在检测器上检测到的散斑是与波长相关的,并且能够被用于确定来自源的光的波长。

[0044] 使用了两个激光源来测试图1的光谱仪:可调节的窄线宽的利特曼(Littman)腔二极管激光系统(Sacher Lasertechnik, 785nm, 线宽<1MHz, TEC-510-0780-100),以及掺钛宝石激光器(Ti:sapphire laser)(Spectra-Physics, 线宽0.5GHz, 可调节700nm-1000nm, 型号3900S)。使用了HighFinesse/Angstrom WS7超高精度波长计来为每个可调节的激光源单独校准。二极管激光源被用于窄波长范围研究(\approx 0.5nm),而掺钛宝石激光器则允许在较大的波长范围上进行测试。为了排除在调节激光器时激光束的可变性,通过将它们的输出耦合至单模光纤来过滤该两个激光束。

[0045] 考虑了随机化装置的两个不同几何形状。在第一种方法中,使用了随机铝微粒的薄层。该随机铝微粒的薄层使用市售的氧化铝微粒(其平均尺寸为5 μ m)溶液的小液滴(\approx 0.5 μ l)和在玻璃基底上的去离子水来形成。该玻璃基片为160 μ m厚,并且通过将其浸入于超声波清洗器中的丙酮和异丙醇内长达5分钟的时间并随后通过在100W的条件下以基于氧的等离子体除尘从而进行清洗。要注意的是,要使得去离子水缓慢地蒸发以便最小化逐渐干燥的液滴的表面卷曲(见图1(a-b))。干燥后的液滴所测得的厚度为40 μ m \pm 10 μ m。在第二种方法中,两个高反射性的激光腔镜(在其中插入有随机漫射器)被用来生成随机化的法布里-珀罗腔。

[0046] 为了确定相应于给定的散斑的波长,必须对随机波长计进行校准。这通过记录要检测的每个波长的散斑来完成。更精确地,测量数量为N个的图样,其中每个散斑通过相应于由CCD摄影机测量的强度的二维矩阵来定义。这提供了与通过摄影机 $A_{i,j,k}$ 测量的强度相对应的较高阶的矩阵,其中下标i和j是摄像机上的像素坐标,而k是用于分别不同测量的索引。这些不同的测量对应于不同的波长 λ 或对应于具有相同的波长的多次曝光,但其探测光学系统的波动。图2(b)示出了在实验的校准部分中使用的示例散斑。

[0047] 一旦完成校准,则使用多变量主成分分析(PCA)来测量在不同散斑之间的最大变化。在第一步中,平均散斑图像从每个测得的图像减去 $\hat{A}_{ijk} = A_{ijk} - \langle A \rangle_{ij}$,其中 $\langle \cdot \rangle$ 代表索引k的平均值。强度矩阵的像素坐标部分被扁平化(例如图像中2被扁平化为:像素(1,1) \rightarrow 1,像素(1,2) \rightarrow 2,像素(2,1) \rightarrow 3和像素(2,2) \rightarrow 4)。这种扁平化过程将高阶矩阵转换成正常矩阵 $a_{mk} = \hat{A}_{ijk}$,其中索引 $m=1 \cdots N$ 相应于从(i,j)对到线性索引m的独特映射。主成分是通过计算矩阵的特征向量来获得的:

$$[0048] \quad M = aa^T$$

[0049] 其中上标T代表矩阵转置。协方差矩阵M的大小为N乘N。每个特征向量具有N个元素,并且能够通过将线性索引m交换到成对索引(i,j)在图像模式中重新塑造(recast)。具

有最大特征值的特征向量被称作第一主成分 (PC)，具有第二大特征值的特征向量被称作第二主成分，以此类推。

[0050] 特征值的分布允许确定出随着波长改变，散斑能够使用的自由度的数量。一种计算该数量的方法是通过确定其总和等于所有特征值之和的90%或类似阈值的特征值的数量。对于给定的波长变化而言，该数字越大则散斑的可变性越大。随机光谱仪的波长分辨率越高，则自由度的数量就越大。

[0051] PC的确定允许在PC空间中的散斑的表示。每个被测量的散斑能够分解为静态背景（平均散斑）以及导致最大改变的一些主成分的加权和。图2(c-d)示出了头三个主成分PC1、PC2和PC3，其对应于可通过散斑检测到的头三个自由度。三个图样看起来很相似。然而，由于它们特征向量来源，这些图样彼此正交，并且每一个特征向量都相应于一个独立的自由度。事实上，就构造而言，矩阵M是正半定对称矩阵，其特征向量彼此正交。

[0052] 在分解之后，每个散斑能够通过与其PC空间中的点的坐标相应的少数几个幅度来代表。此处，使用了头八个PC来代表每个图样。图2显示了在直接照明下使用氧化铝随机化装置的实验测得的波长。图2(a)显示了随着激光波长在785.1nm与785.6nm之间改变时检测到的散斑的PCA分解。图2(b)示出了在激光波长为785.234nm时观察到的远场散斑的示例。

[0053] 图2a显示了在随着波长在0.5nm的范围上改变时，由散斑在PC空间（由头三个PC定义的子空间）中描述的参数曲线。在该图中，参数曲线不具有作为波长的函数的一致性长度变化。这种效果将对本申请的波长分辨率的一致性有不利影响。在图2a中，仅示出了分解的头三个PC。图2(c)至(e)显示了在分解中使用的头三个主成分。对于每个散斑而言，存在五个其他的分解因数。考虑所有八个PC分解因数将极大地降低这种效果并且解释了PCA方法如何能够提供高分辨率。

[0054] 一旦测波计完成校准，则记录未知波长的散斑。该图样在之前校准的PC空间中分解。可以使用例如最近邻预测、马哈拉诺比斯 (Mahalanobis) 距离或者线性回归分类方法以确定波长。如果检测到的波长是校准集的一部分，则所有这些分类方法都可提供最佳的结果（无误差）。

[0055] 图3显示了直接照明时在氧化铝液滴的情况下测量得到的波长误差分布。柱状图显示了偏最小二乘法回归分析的误差分布（柱状图）以及和最近邻预测分类的误差分布（红色曲线）。该回归分析具有13pm的标准误差偏离。最近邻预测分类是无误差的。这种完美的结果能够通过考虑在波长分类情况下的方法来理解。事实上，对于比用于散斑训练集的步长尺寸更小的散斑波动而言，该分类方法将总是能够提供完全没有误差的标称分类波长。

[0056] 只要在PC空间中的参数曲线是平滑、连续并且局部线性，则还有可能在PC空间中使用例如偏最小二乘法 (PLS) 回归分析来测量未知的波长。在未知的波长未必是校准集的一部分时，PLS被用于检测波长并且确定其标准误差偏离。图3显示了约13pm的误差的标准差。这能够通过考虑在训练集中较小的波长步长来改善，该较小的波长步长在每个训练步长之间的产生局部的较小从线性变化的偏离。

[0057] 有途径通过并入光学反馈机制来改善随机化装置的敏感度。这能够通过将随机散射介质嵌入法布里-珀罗腔内来实现。这两个设备之间的主要差别在于，通过基于法布里-珀罗腔的设备的传输强度大大降低，并且由此导致对于CCD检测器的要增加的曝光时间的需求也大大降低。在使用特定的法布里-珀罗腔时，没有观测到分辨率的改善。

[0058] 图4显示了在法布里-珀罗腔中的随机漫射器的模型化的散斑可变性,该法布里-珀罗腔由两个分布式布拉格(Brag)反射器组成,其中该分布式布拉格反射器具有增加的周期数(即增加的反射性)。不同的颜色对应于不同的入射波长。图4显示了此种配置的潜在优势,即由于腔提供更多的反馈,因此波长的改变相对于散斑的可变性有所提高。而这种改善会最终受限于通过传输效率的损失。

[0059] 有可能将该训练方法一般化到超出检测单个参数,从而使得能够同时测量多个参数。该参数不仅仅包括光束形状参数,而是还包括极化和多个同时的波长。这后一种情况使得能够构造紧凑的专用的光谱仪。进一步地,多个光束参数中的改变的同时检测能够有助于深入分析大量的光学现象(其全部对光束的传输有影响)。这些参数中的细微变化事实上能够通过随机漫射器中的多次散射得以放大并且以高敏感度检测到。

[0060] 虽然图1中的光学系统显示的是单个的随机化装置,但是能够提供多个此类随机化装置。这有助于改善在特定波长条件下的敏感度。可选择每一层的位置以提供在特定波长条件下最有效的干涉图样。事实上,该多个层在一个方向上是周期性的而在两个方向上是随机的,从而使得其在一个方向上表现得像光子晶体而在其他两个方向上表现得像随机散射体。

[0061] 本发明的光学系统的敏感度、对比度和精确度能够通过使用至少一个可控设备来调整,该至少一个可控设备能够控制光场的幅度或相。此类可控设备包括可变形的镜、液晶空间光调制器和数字微镜设备。该可控设备位于随机化装置的输入端处。使用此类设备,能够由相同的光束生成多个图样。这增加了能够同时测量到的信息的量。

[0062] 本发明是通用的,其不仅能够用于检测入射光束的波长,而且通过适当的训练,还能够检测入射光束的偏振状态和/或形状。由于这个原因,限制要训练的随机光谱仪的自由度数量是很重要的。此处,单模光纤(SMF)被用于将系统限制到单个可变的波长。事实上,SMF充当单色器中的输入狭缝 slit,其确保在单色器的输出端处的强度改变仅由波长改变产生。然而,通过使用多模光纤或小孔来替换SMF,将会给散斑的波长可变性添加由于光束形状导致的改变。

[0063] 利用与穿过该无序介质的光传输相关的大量自由度,使用根据本发明的简单随机介质能够提供具有皮米分辨率的波长计。该仪表的实现获得了在800nm的波长的条件下13pm的分辨率和10nm的带宽。该思路能够扩展至腔内的随机介质。这能够在以降低透射强度为代价的情况下增强其波长敏感度。该思路可扩展至专用光谱仪的开发并且用于激光稳定。

[0064] 图5显示了一种激光稳定系统,其使用散斑检测来稳定激光特征。该激光稳定系统具有电脑控制的光源,例如激光器或LED,该光源沿着光路发射输出光束并且穿过透射性的随机化装置,该随机化装置被布置为用于生成散斑。在随机化装置的输出端,提供有检测器以用于检测散斑,由此确定输出光束的一个或多个特征。与所确定的特征相关的数据被反馈至激光器的电脑控制系统,该电脑控制系统改变激光器的一个或多个操作参数,以便实现期望的输出。例如,内部/外部的腔光栅(grating)能够被改变,同样,腔的长度、操作温度和泵电流(pump current)也能够被改变。事实上,任何可控操作参数都能够基于来自检测器的反馈发生改变,直至实现到期望的输出为止。

[0065] 在某些情况下,如果数据采集速度很重要,则能够在光域中实现一些主成分分析

中。为了做到这一点,可控光束成形设备,比如可变形的镜、空间光调制器、数字微镜,被布置在随机化装置的输出端处。因此,可控光束成形设备被布置成将散斑的特定部分引导至不同的检测器。这些新的光束的强度将与主成份相对应。检测器能够是单光电检测器、四光电检测器、平衡光电检测器或一个或多个此类检测器的阵列。增加或减少来自多个检测器的光电流,并且应用适当的权重因子,提供了用于快速数据获取的PC系数。正如对于图5的激光稳定系统中所要求的一样,这是对于实现反馈回路而言典型的需求。

[0066] 图6显示了随机化装置的另一个示例。该随机化装置具有:光纤,其用于将激光传递到积分球;以及摄影机,其用于捕获由积分球生成的散斑。该光纤是单模光纤,其确保波长变化不会影响光束形状。布置积分球以提供具有低损耗的输入光场的空间随机化。

[0067] 积分球具有涂层,该涂层在其内表面上对于感兴趣波长具有高反射性。该涂层以和上述薄的漫射器类似的方式(但是在反射中)漫射光。光在球体的内部前后反射,直至其最终在输出端口处由摄影机或检测器阵列检测到为止。在球体的内部,提供大量被覆涂的挡板(未示出)以便阻挡在输入端口和输出端口之间的直接光路。球体的材料理想地应当具有高热稳定性,由此不会因为小的温度波动而导致其光属性的改变。该球体还可使用例如热电珀尔帖元件来稳定温度。进一步的温度稳定也可通过在恒温液池中对积分球进行冷却来实现。积分球内部的表面经过处理,以便确保高散布性的反射。积分球的成像(imaging)部分对应于积分球的输出端口。在该端口上不需要其他的光学器件,但是可使用一个或多个光学元件来放大或缩小散斑。

[0068] 要被测量或稳定的光束被光耦合到单模光纤。从单模光纤离开的光不会随着波长的改变而改变其光束轮廓。来自光纤的输出光被用于照亮积分球的输入端口。积分球生成对波长高度敏感的散斑。这通过光场在达到输出端口和摄影机之前形成的在球体内的多次漫反射来实现。事实上,摄影机测量在球体内部由多条光的路径之间的干涉所产生的散斑。由于在球体内的连续漫反射之间的距离很大,因此对小的波长改变,散斑具有高敏感度。一般来说,散斑波长分辨率/敏感度与生成散斑的设备内的光路长度成比例。

[0069] 图7示出了中空的、反射性的随机化装置的另一个示例。在这种情况下,该随机化装置是反射管,该反射管具有多个在其中的平行漫射器(例如如前所述的漫射器),以便生成低损耗且高稳定性的光学装置。图7显示了两个漫射器,但应该理解的是,能够使用多个漫射器以形成级联的序列。可选地,管的内表面可用高反射性的、漫射性的材料覆涂,如参考积分球描述的一样。如前所述,光纤被用于将激光传递至反射性的随机化装置,并且摄像机被提供以捕获由反射性的随机化装置生成的散斑。该光纤是单模光纤,其确保波长改变不会影响光束形状。布置管状随机化装置以便提供具有低损耗和高稳定性的输入光场的空间随机化。

[0070] 在图6和图7中所示的示例中,所使用的检测器是摄影机。然而,可使用任何适合的检测器,例如检测器阵列,比如四光电二极管(QPD)检测器阵列。此外,应当注意的是,中空反射器的形状(例如球状或管状)和尺寸能够被改变或设计以便实现不同的波长敏感度和环境稳定性(温度等等)。

[0071] 图8显示了一种用于测量在激光束中的平均波长变化的方法,该激光束的波长是周期性调制的。第一半周期是用于使用主成分方法来训练(校准)散斑的,而随后的半周期是用于验证(再检查一遍)该训练的。在这种情况下,校准和验证步骤需要外部的波长计以

便提供绝对的波长测量结果,该绝对的波长测量结果能够用于校准散斑。在验证步骤中,外部的波长计用于验证由散斑波长计检测到的波长。左侧的视图显示了随时间变化的、通过标准波长计测量到的波长变化,其与通过散斑光谱仪检测的波长相叠加。右侧的视图显示了由激光束、随机化装置、摄影机和检测到的散斑所组成的设置的原理图。图8中下面的部分展示了主成分训练方法。四个面板对应于所检测的散斑到主成分上的投射。按顺序来看,其为:第一主成分相对于第二主成分;第一主成分相对于第三主成分;第二主成分相对于第三主成分;以及,第二主成分相对于第四主成分。

[0072] 根据图8描述的方法要求使用用于校准的外部波长计。在另一种方法中,能够避免对外部仪器的需求。在这种情况下,一个或多个光学组件被改变以导致在激光器输出(例如波长)发生周期性震荡。这种周期性震荡能够被检测作为在头少数几个主成分中的周期性震荡。知晓震荡的幅度使得能够测量和检测相对的波长变化,该相对的波长变化能够用于产生无需事先校准的反馈回路。这种方法能够用于通过监控高频周期性的波长震荡来使热漂移的效果最小化。如果波长调制的频率高于热波动的带宽,则有可能在短时间(即短得足以避免与散斑发生设备的热漂移发生任何干扰)内测量激光束的波长漂移。

[0073] 图9示出了根据本发明的具有波长稳定系统的激光器。其具有通过两个反射器限定的激光腔,该两个反射器中的一个允许一些光被输出。在该腔中,提供了增益介质和腔内元件。在激光器的输出端处是散斑测波计。在所示例子中,散斑测波计具有积分球以及连接到控制器的摄影机/检测器。然而,此处描述的其他散斑测波计中的任何一种都是能够使用的。控制器连接到第一镜、增益介质和腔内元件。这三个部件中的每一个都能够通过控制器来控制,从而改变激光器输出的波长。因此,激光器输出能够经由多个途径来影响。通过改变镜的位置能够改变腔的长度。通过改变施加到增益材料上的电压,能够改变激光器的增益。通过改变腔内活性元件(比如滤波器或光束成形器),例如通过将其移动到光路之中或移动到光路之外,也能够改变激光器输出。这些激光器控制通道中的每一个都能够用于产生在激光束属性中的改变,其能够在随机化装置之后被检测为改变的散斑。

[0074] 图9中的系统能够被校准以补偿相对波长而无需使用外部测波计。作为例子,控制激光器的输入通道能够以高的(已知)频率(在热噪声以上)被调制。每条通道能够以不同频率进行调制。随后,在每个调制频率上确定散斑的变化。这些变化能够使用实时多变量分析(如主成分分析或奇异值分解)来确定。监控这些震荡允许检测到在激光器系统中的任何漂移。这些漂移能够随后经由激光器控制途径来抵消。

[0075] 图10和图11显示了由以上两种方法得到的结果。图10显示了使用分辨率为10pm的外部波长计的高分辨率训练和验证。在图10中,左侧的是训练数据,而右侧的是验证结果。图11示出了使用第二种方法(即使用相对属性并且避免使用用于校准的外部波长计的需求的方法)的高分辨率训练和验证。在图11中,训练数据在上方的绘图中显示。该训练连续使用奇异值分解。这就意味着,随着新的散斑的获得,该训练慢慢地忘记旧的散斑。验证数据在图11下方的绘图中显示。此处,分辨率被激光器调制幅度限制为20MHz($\sim 0.1\text{pm}$)。

[0076] 在激光器中,在激光器腔内的活性增益介质的光学属性很大程度上取决于温度。通常来说,增益介质的温度通过使用恒温器(thermostat)而被稳定,该恒温器使用例如热电偶来测量增益介质的温度。通过根据本发明监控散斑变化,由增益材料的温度中的改变所导致的在输出端的影响能够被监控,并且反馈回路被用于直接稳定其光学属性(例如通

过改变驱动电流)。

[0077] 除了用于稳定激光器,本发明还能够用于稳定其他光学组件,比如光学传感器。特别地,本发明的散斑能够用于稳定、控制或监控光学组件,这些光学组件具有取决于温度的输出。该温度依赖性可能是随着温度改变所导致的热膨胀、收缩和折射率变化。实际上,这些改变中的一些是很细微的。然而,散斑的变化能够用于检测这些细微的改变,并且测量在光学系统中的有效温度改变。该温度改变能随后受到监控或者在反馈回路中使用,反馈回路适于控制一个或多个影响温度的参数。依赖于温度的光学改变可能不仅仅与波长的改变关联,而且还可能改变光束形状和偏振。在这种情况下,散斑设备将在输入端处不包括单模光纤,其仅在检测到波长改变时使用。

[0078] 在以上所描述的所有例子中,检测器可包括处理器或分析器,其用于分析散斑以便确定光的一个或多个参数和/或在这些参数的变化。可选地,可以与任何检测器元件分开地提供分析处理器或分析器。同样地,在所有情况下,能够提供多个检测器或检测器阵列,并且散斑中的至少一部分可入射在多个检测器上。散斑的不同部分可以入射在不同的检测器上。不同的检测器可操作以便确定光的不同属性。不同的检测器可操作以便同时确定光的不同属性。

[0079] 本发明提出了一种高分辨率的、高敏感度的散斑波长计。其允许将激光波长锁定到任何选定的波长。此外,其使得能够得到一种在激光设备的连续波和脉冲操作条件下超稳定的光源,这是因为其具有可能抵消激光设备中瞬时的、光谱上的、空间上的和幅度上的波动。此外,特征化的散斑能够用作“根据需要产生的(dial on demand)”散斑,其用于在成形应用中的结构化照明。

[0080] 本领域技术人员将会认识到的是,可以在不偏离本发明的情况下对本申请公开的布置进行改变。例如,虽然上述的分析技术是基于PCA来描述的,但是可以理解的是,也能够使用其他的检测方法。因此,虽然特定的实施方式使用了单模光纤来过滤被随机化的输入光线,但这并不是必不可少的。除了对波长敏感之外,散斑对光束形状和光场的极化也是敏感的。在需要关于这些参数的信息时,单模光纤将不会被使用。因此,上述特定实施方式的描述仅仅是通过举例说明的方式来进行的,其并不是出于限制的目的。对于本领域技术人员而言,很清楚的是,可以在不需明显改变以上所描述的操作的情况下对本发明稍作修改。

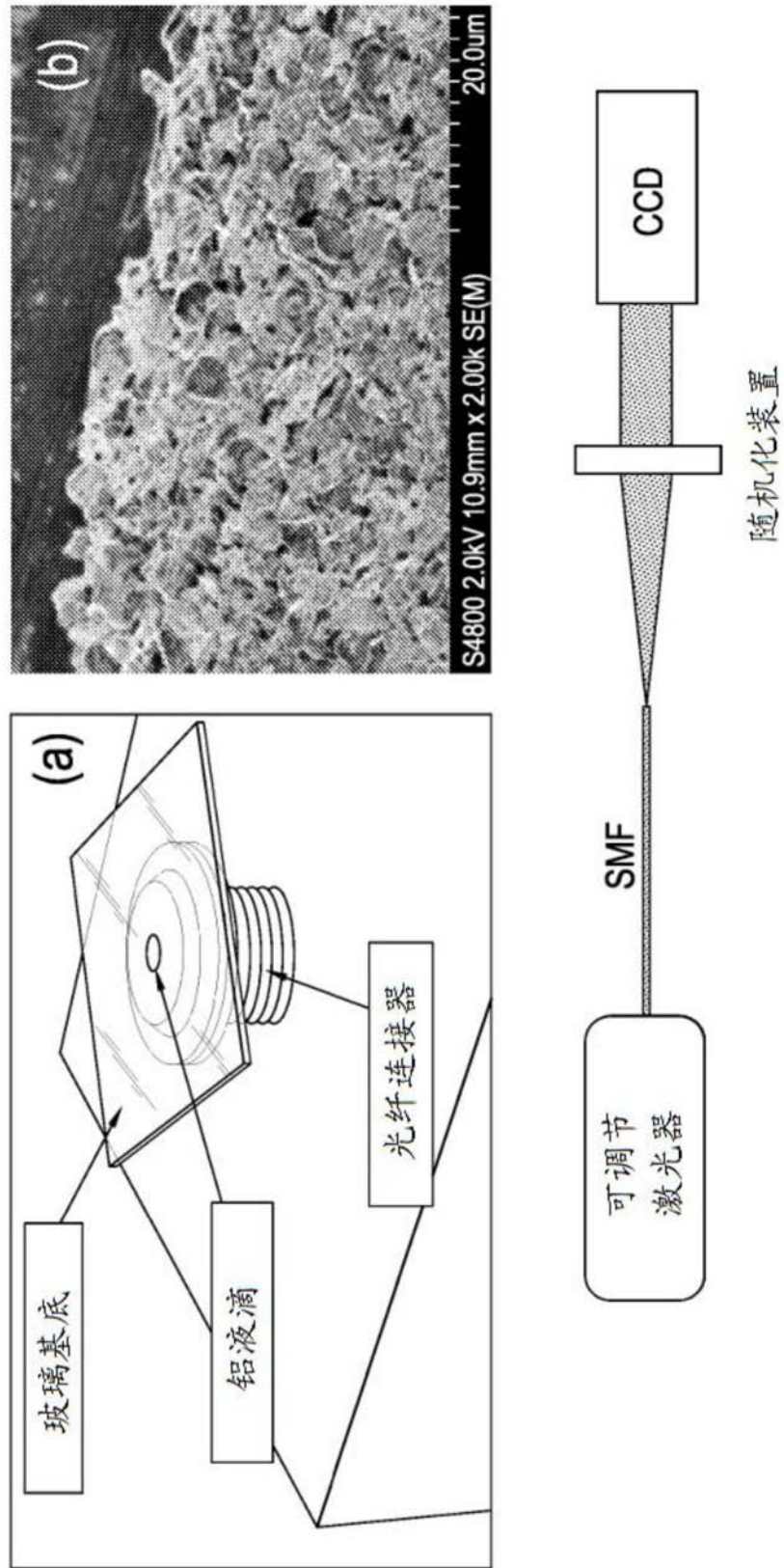


图1

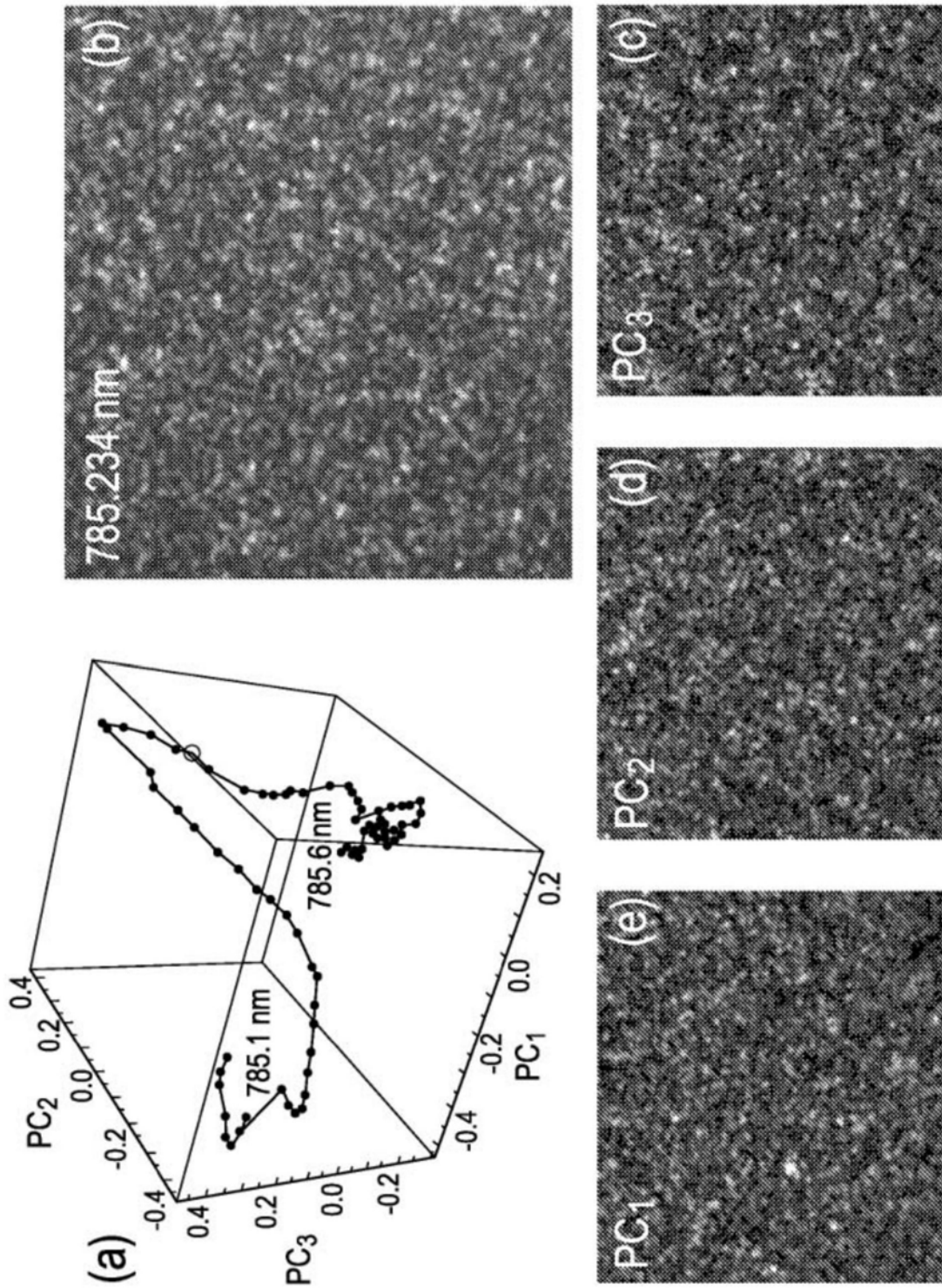


图2

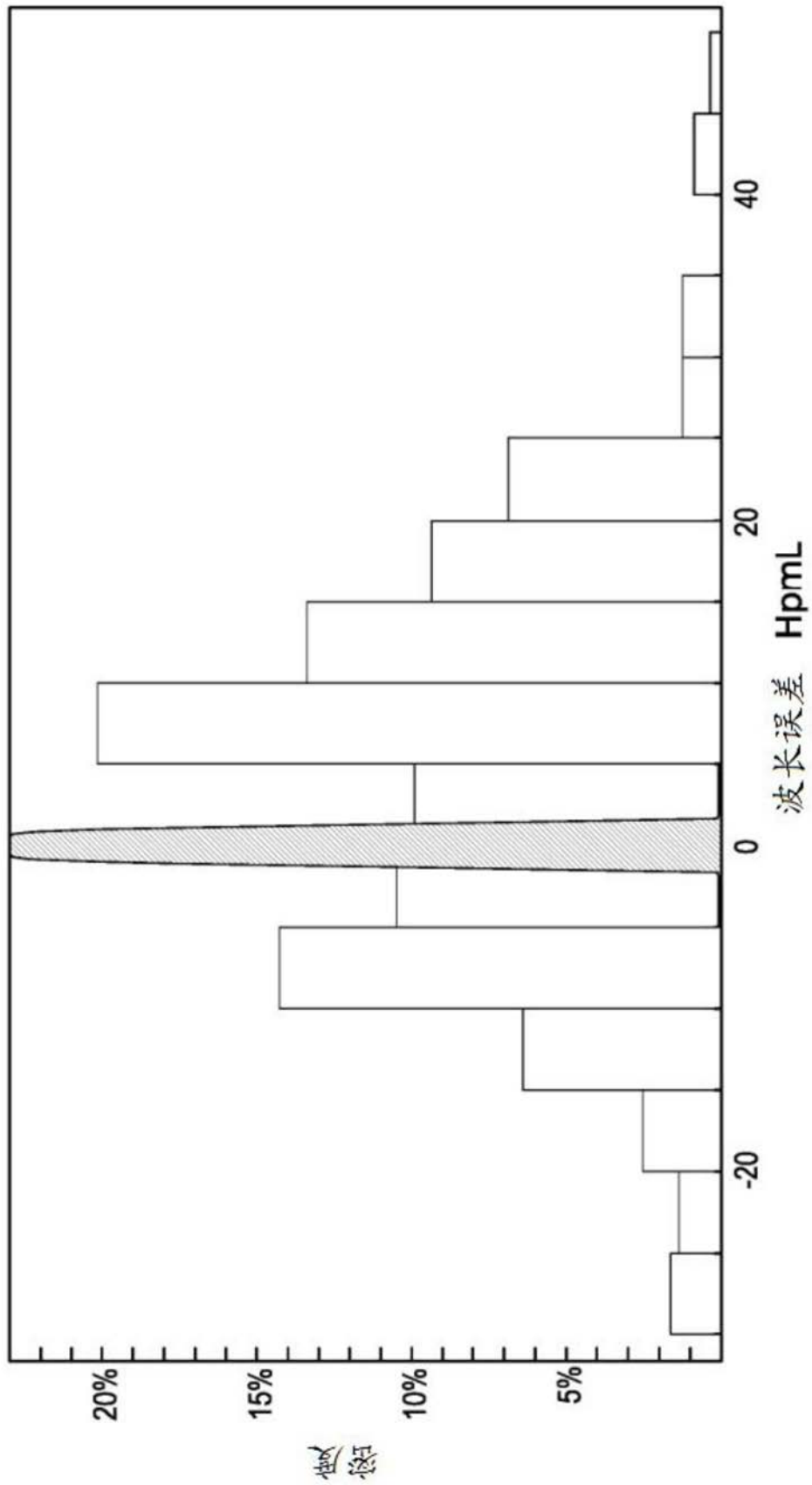


图3

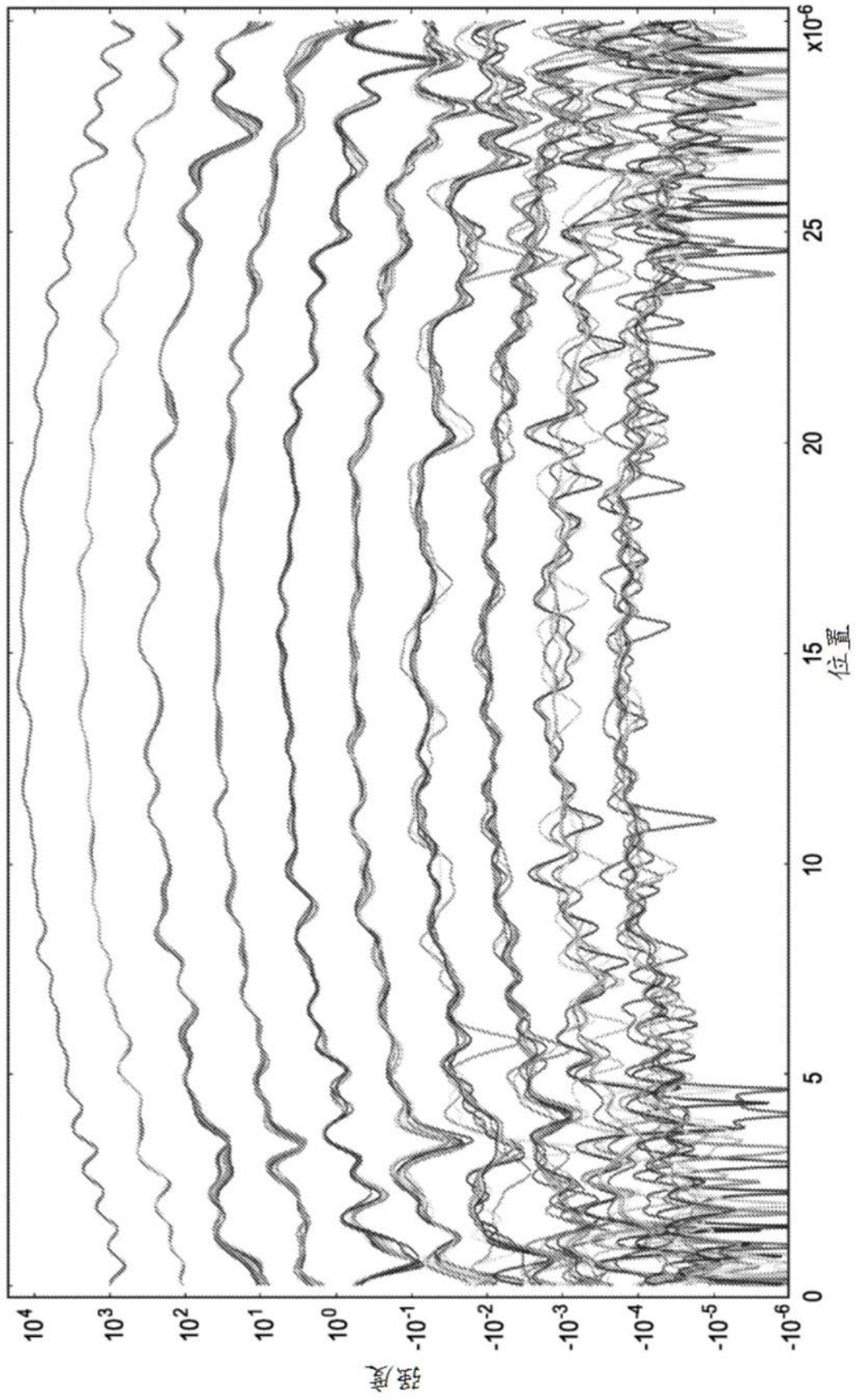


图4

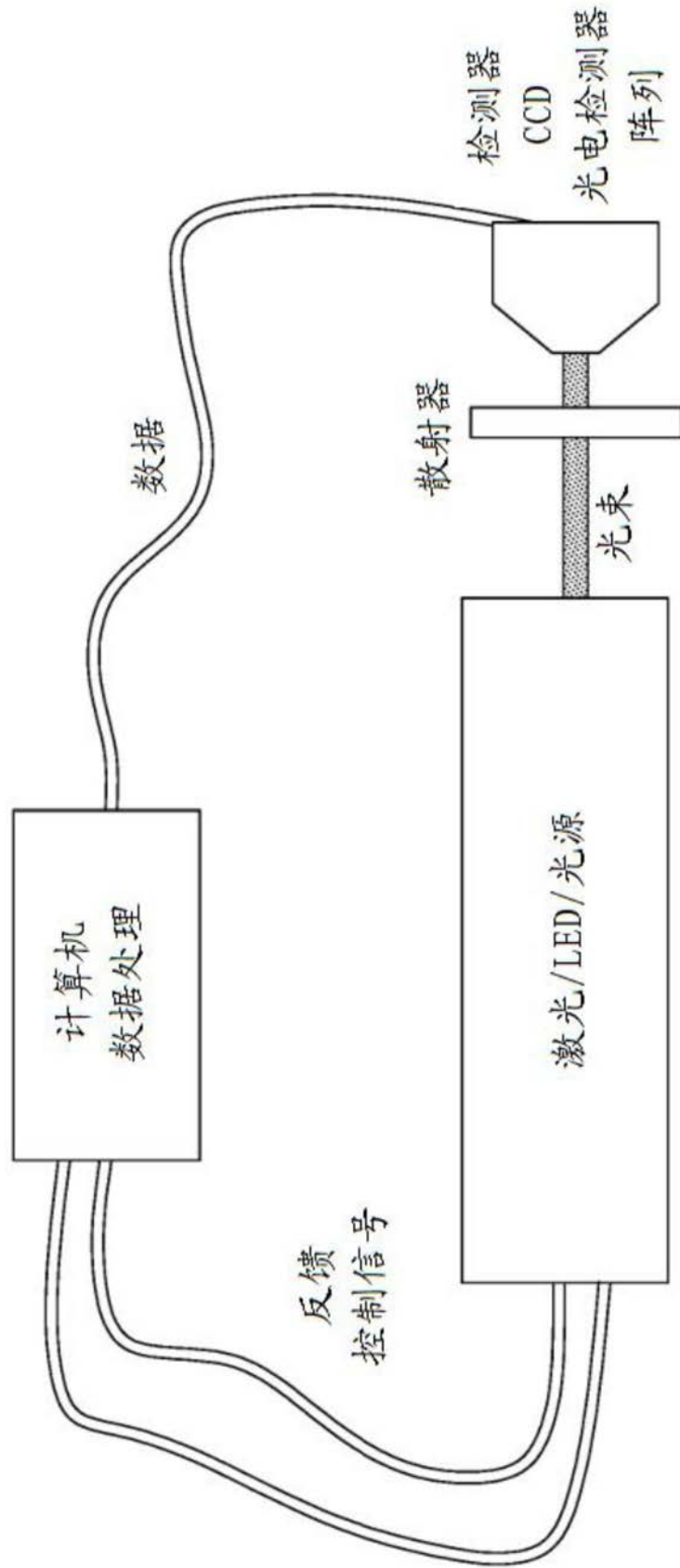


图5

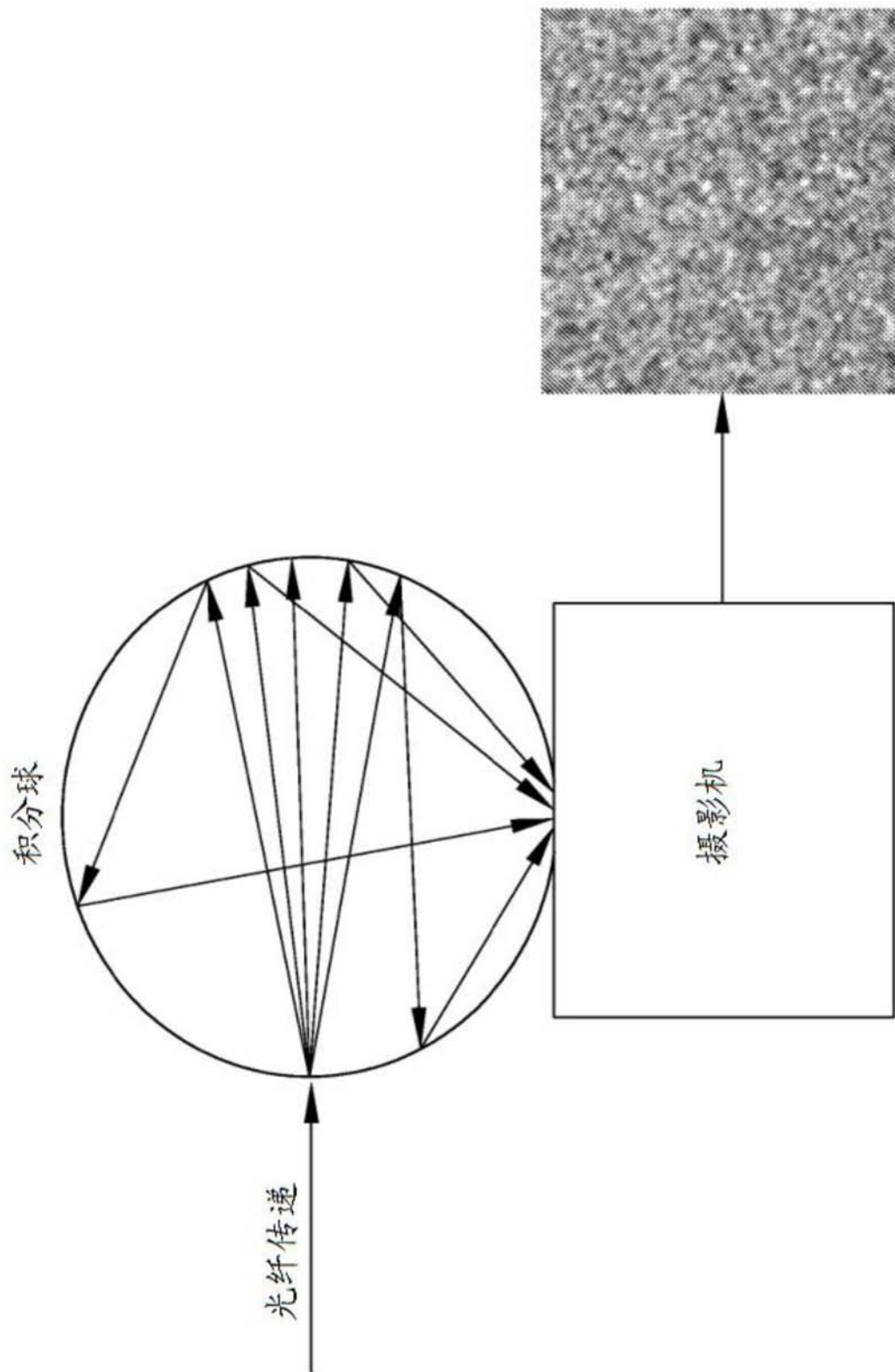


图6

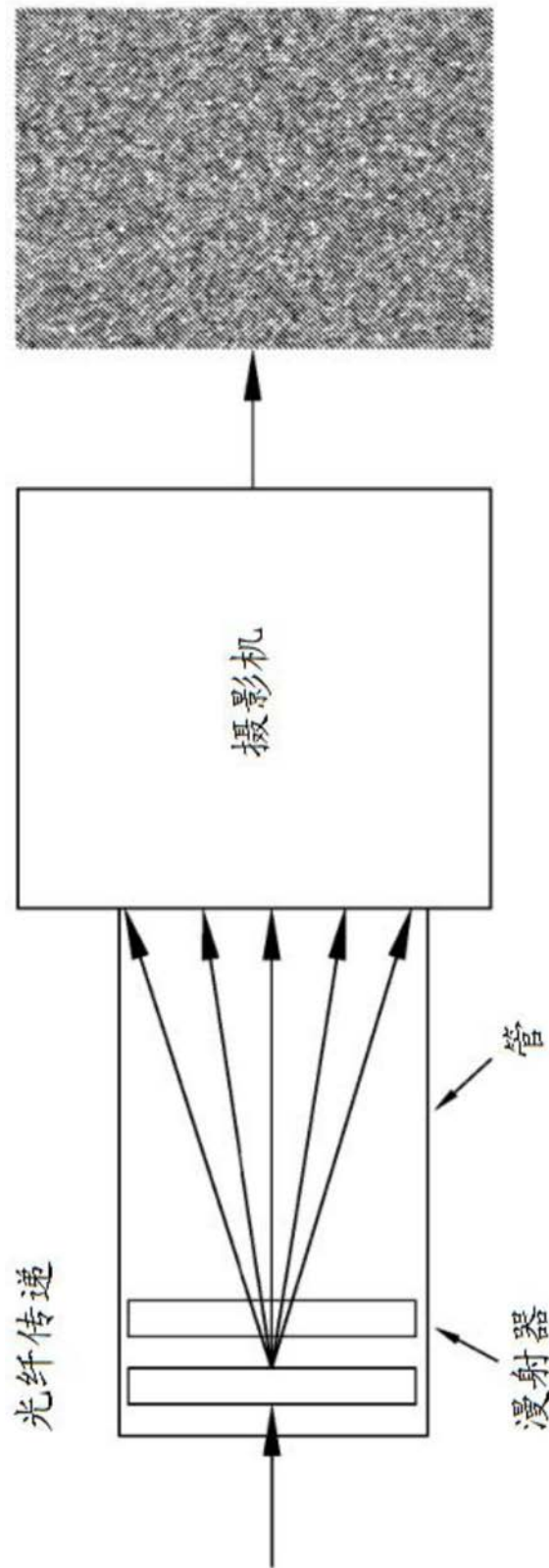


图7

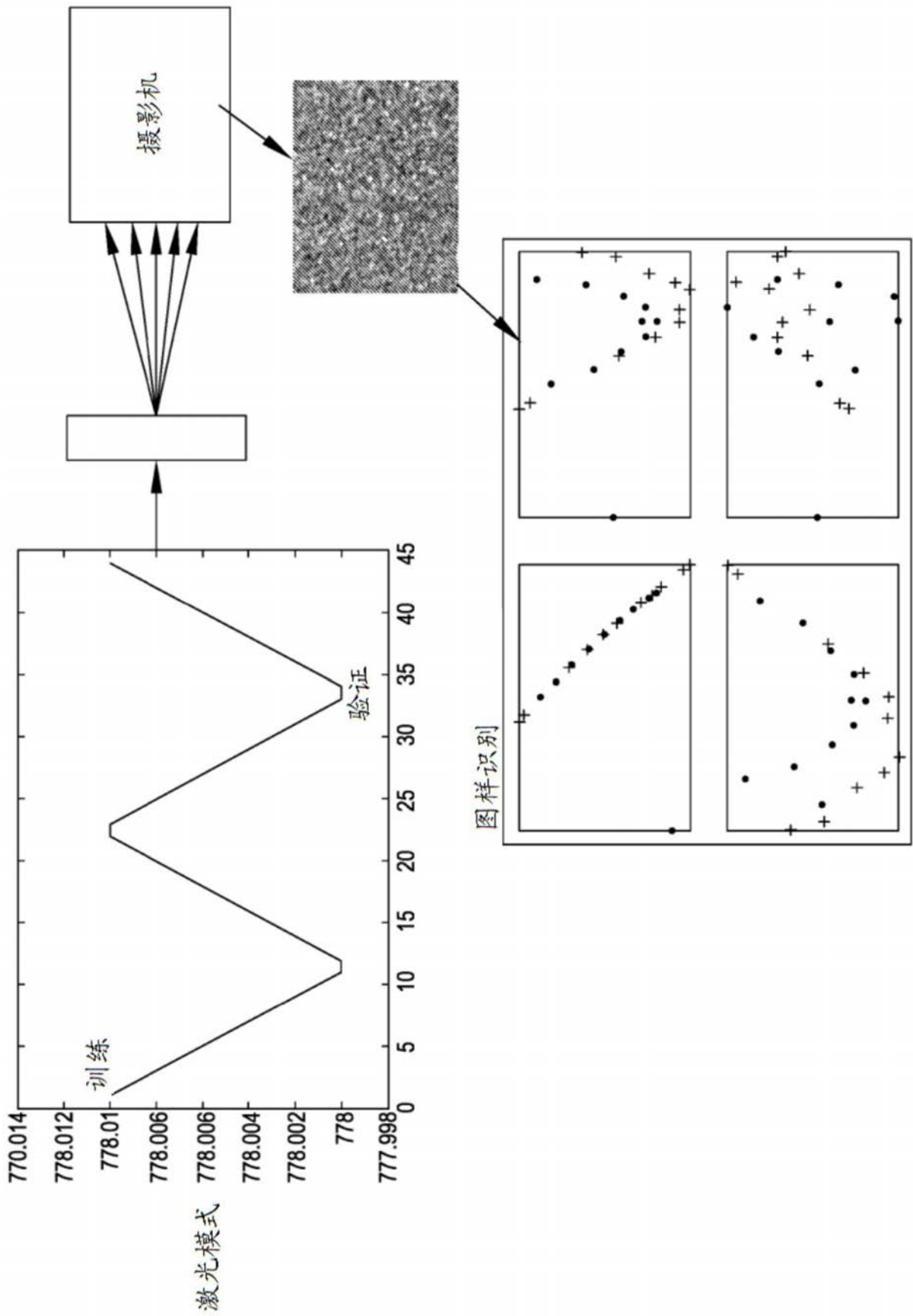


图8

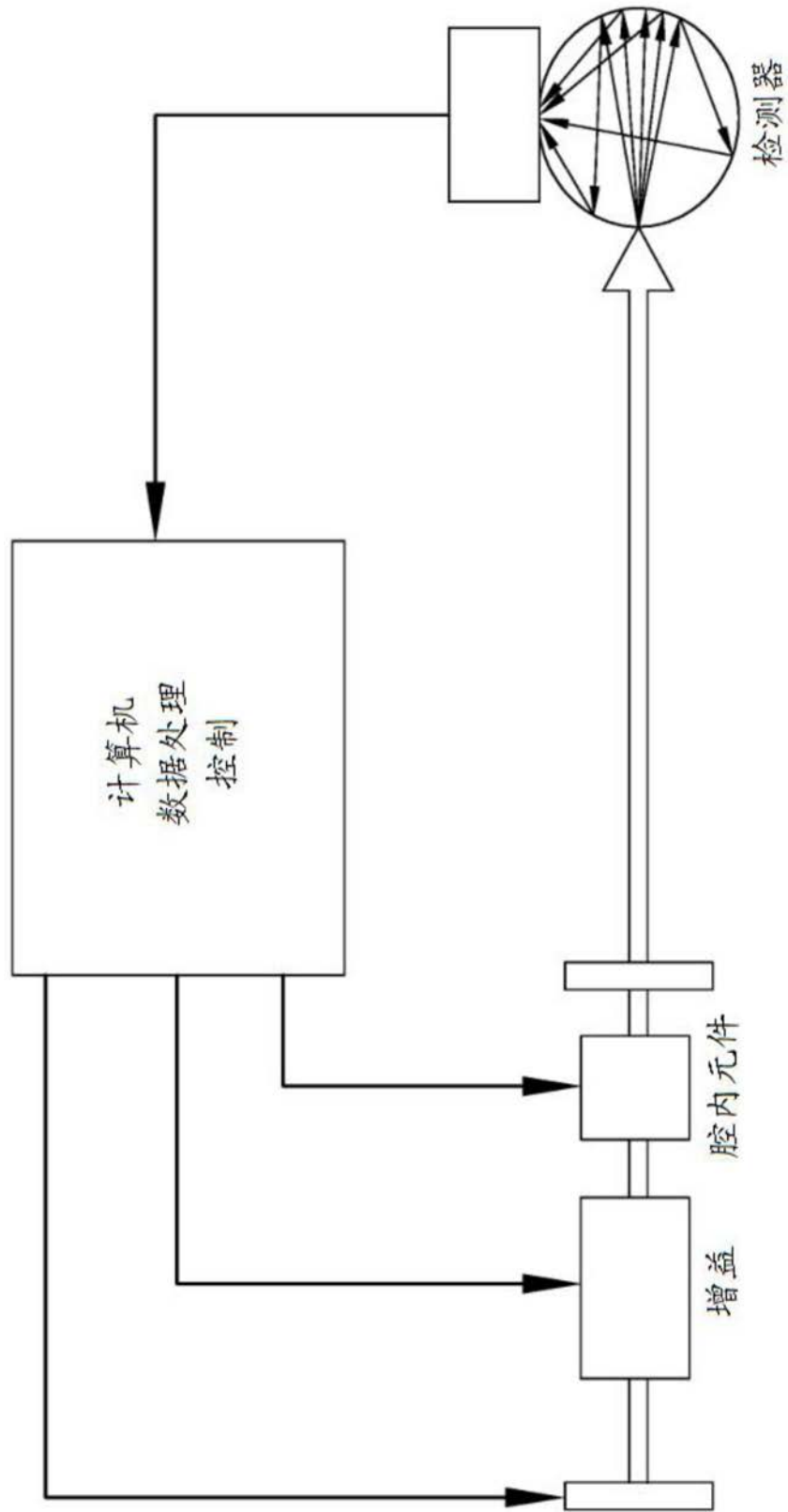


图9

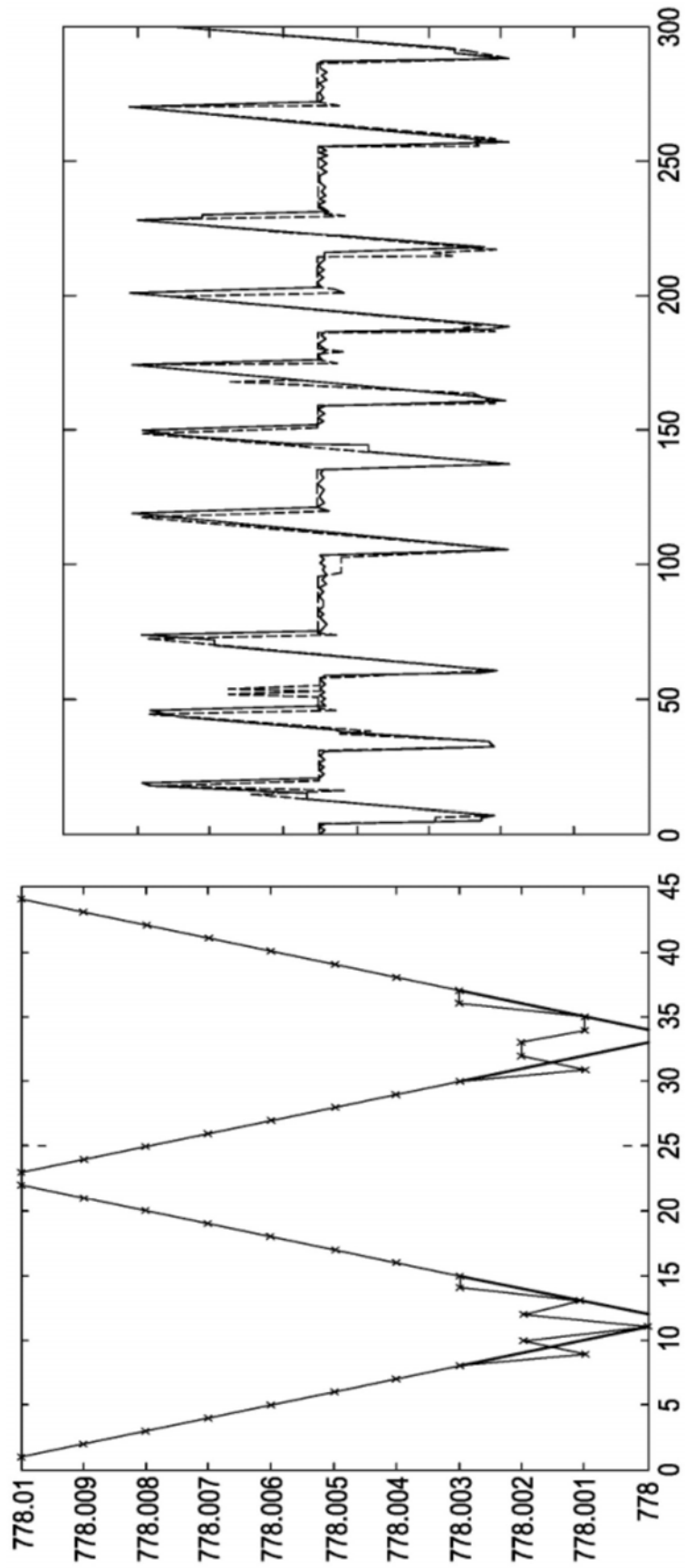


图10

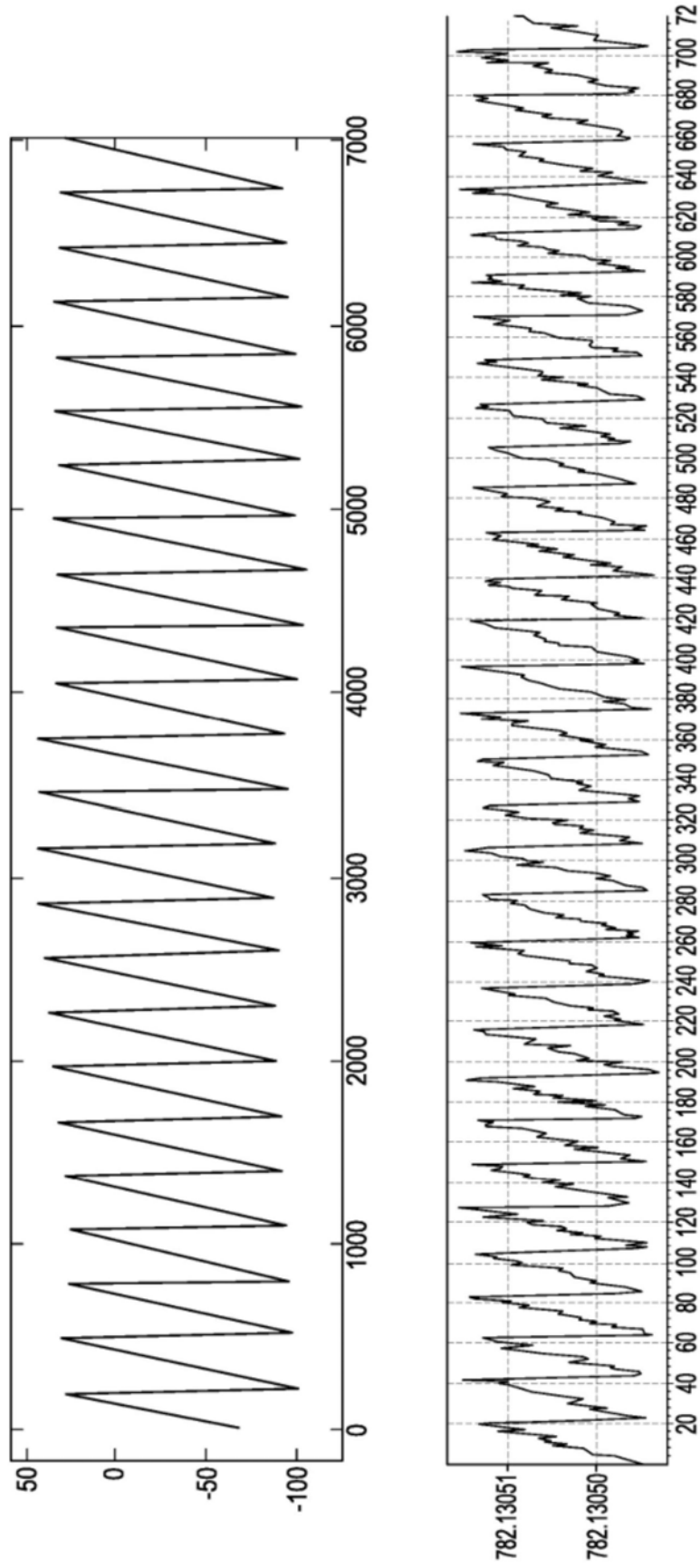


图11