



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112368554 B

(45) 授权公告日 2024. 08. 16

(21) 申请号 201980033106.2

G01L 1/24 (2006.01)

(22) 申请日 2019.06.21

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

US 2005094151 A1,2005.05.05

申请公布号 CN 112368554 A

US 2007156212 A1,2007.07.05

(43) 申请公布日 2021.02.12

US 2008285916 A1,2008.11.20

(30) 优先权数据

US 2009067785 A1,2009.03.12

2018902308 2018.06.27 AU

US 2015023389 A1,2015.01.22

US 5848204 A,1998.12.08

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

Paul S. Westbrook等.continuous

2020.11.17

multicore optical fiber grating arrays

(86) PCT国际申请的申请数据

for distributed sensing

PCT/NZ2019/050075 2019.06.21

applications.JOURNAL OF LIGHTWAVE

(87) PCT国际申请的公布数据

TECHNOLOGY.2017,第第35卷卷(第第6期期),第

W02020/005077 EN 2020.01.02

1248-1252页.

(73) 专利权人 维多利亚联结有限公司

Paul S. Westbrook等.continuous

地址 新西兰惠灵顿

multicore optical fiber grating arrays

(72) 发明人 R·A·巴德科克 M·菲塞尔

for distributed sensing

(74) 专利代理机构 北京世峰知识产权代理有限公司

TECHNOLOGY.2017,第第35卷卷(第第6期期),第

公司 11713

1248-1252页.

专利代理师 卓霖 许向彤

审查员 乐小琴

(51) Int.Cl.

G01K 11/32 (2021.01)

权利要求书3页 说明书14页 附图16页

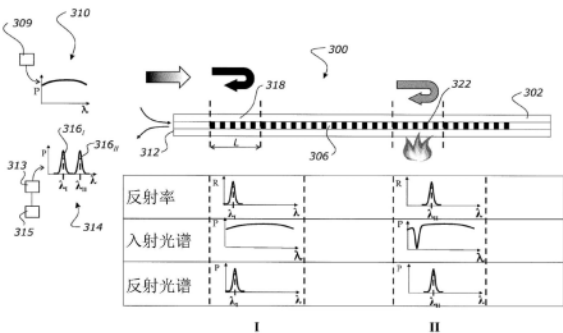
(54) 发明名称

光纤感测系统和方法

的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

(57) 摘要

光纤感测系统(300),具有入射光源(309)、波长光谱询问器(313)和具有基本上连续的光纤布拉格光栅(306)的光纤(302)。光纤的上游部分(318)对于以第一平衡波长到达询问器(313)的光具有衰减长度。当下游部分(322)处的温度和/或应变的变化导致光纤布拉格光栅的一部分以第二波长和第二强度将光反射到询问器(313)时,光纤的下游部分(322)将光反射到询问器(313)。处理器(315)被配置为分析反射光谱(314),以基于反射光谱(314)与对应于初始波长的初始峰值的偏差来确定光纤布拉格光栅(306)



1. 光纤感测系统,包括:

光纤,所述光纤包括基本上连续的光纤布拉格光栅,当所述光纤处于平衡温度和应变条件时,所述光纤布拉格光栅具有沿着所述光纤的长度基本上相同的光栅间距;

用于向光纤的上游端提供入射光的入射光源;和

波长光谱询问器,用于检测来自光纤的入射光的反射光谱;

其中所述光纤的上游部分具有衰减长度,所述衰减长度适于在第一平衡波长下将入射光反射到所述询问器,并且当所述光纤的下游部分处的温度和/或应变的变化引起所述光纤布拉格光栅的一部分以不同于所述第一平衡波长的第二波长且以第二强度将光反射到所述询问器时,所述光纤的下游部分适于将光反射到所述询问器,其中在所述平衡温度和应变条件下,所述下游部分适于不反射所述第二波长的光,或适于反射比所述第二强度低的所述第二波长的光的第一强度;

所述光纤感测系统进一步包括处理器,所述处理器被配置成分析所检测到的反射光谱以基于所检测到的反射光谱与对应于所述第一平衡波长的初始峰值的偏差来确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

2. 如权利要求1所述的光纤感测系统,其中,所述光纤为至少100mm长。

3. 如权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述光纤布拉格光栅基本上沿着所述光纤的整个长度延伸。

4. 如权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述光纤包括多个串联的短光纤布拉格光栅以形成基本上连续的光纤布拉格光栅。

5. 如权利要求4所述的光纤感测系统,其中,所述短光纤布拉格光栅为9mm长。

6. 如权利要求4所述的光纤感测系统,其中,所述短光纤布拉格光栅间隔开1mm。

7. 如权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述光纤包括单个连续的光纤布拉格光栅。

8. 如权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述光纤比所述光纤布拉格光栅的衰减长度更长。

9. 如权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述光纤是所述光纤布拉格光栅的衰减长度的至少两倍。

10. 如权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述光纤是所述光纤布拉格光栅的衰减长度的至少6倍。

11. 如权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述光纤布拉格光栅的总反射率大于20%。

12. 如权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述光纤布拉格光栅的总反射率大于50%。

13. 如权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述光纤布拉格光栅的总反射率大于95%。

14. 如权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述光纤布拉格光栅的总反射率大于99%。

15. 如权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述处理器被配置成通过检测具有非分离峰的反射光谱的包络的变化来分析所述反射光谱以确定所述光纤布拉格光栅的一部

分何时正经历温度和/或应变的变化。

16. 如权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述处理器被配置成基于所述反射光谱的尺寸的变化来确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

17. 如权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述处理器被配置成基于阈值宽度算法来确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

18. 如权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述处理器被配置成基于功率积分算法来确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

19. 根据权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述处理器被配置成基于变化算法确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

20. 如权利要求17所述的光纤感测系统,其中,所述处理器被配置成基于在使用所述阈值宽度算法之前对所述光谱施加权重来确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

21. 如权利要求18所述的光纤感测系统,其中,所述处理器被配置成基于在使用所述功率积分算法之前对所述光谱施加权重来确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

22. 如权利要求19所述的光纤感测系统,其中,所述处理器被配置成基于在使用所述变化算法之前对所述光谱施加权重来确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

23. 如权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述光纤布拉格光栅被适配成当在所述光纤的上游部分中发生温度和/或应变的变化时将处于所述第二波长的光反射到所述询问器。

24. 根据权利要求1或2所述的光纤感测系统,所述光纤感测系统能够确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历小至5开尔文的温度变化。

25. 根据权利要求1或2所述的光纤感测系统,所述光纤感测系统能够确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历小至1开尔文的温度变化。

26. 根据权利要求1或2所述的光纤感测系统,其中,所述光纤具有单芯,所述单芯包括基本上连续的光纤布拉格光栅。

27. 一种感测温度和/或应变的变化方法,包括:

提供光纤,所述光纤包括基本上连续的光纤布拉格光栅,当所述光纤处于平衡温度和应变条件时,所述光纤布拉格光栅具有沿着所述光纤的长度基本上相同的光栅间距;

向光纤的端部提供入射光;

通过波长光谱询问器检测来自光纤的入射光的反射光谱;

其中所述光纤的上游部分具有衰减长度,所述衰减长度适于在第一平衡波长下将入射光反射到所述询问器,并且当所述光纤的下游部分处的温度和/或应变的变化引起所述光纤布拉格光栅的一部分以不同于所述第一平衡波长的第二波长且以第二强度将光反射到所述询问器时,所述光纤的下游部分适于将光反射到所述询问器,其中在所述平衡温度和应变条件下,所述下游部分适于不反射所述第二波长的光,或适于反射比所述第二强度低的所述第二波长的光的第一强度;

其中所述方法还包括使用处理器分析所检测到的反射光谱,以基于所述检测到的反射

光谱与对应于所述第一平衡波长的初始峰值的偏差来确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

28. 如权利要求27所述的方法,其中,所述方法用于检测热点的出现。

29. 如权利要求27或28所述的方法,其中,所述方法用于检测高温超导场绕组中的失超。

30. 如权利要求27或28所述的方法,其中,所述光纤布拉格光栅经受背景非均匀热应变,所述背景非均匀热应变在所述检测到的反射光谱中引起峰值分裂。

31. 如权利要求27或28所述的方法,其中,所述光纤具有单芯,所述单芯包括基本上连续的光纤布拉格光栅。

光纤感测系统和方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种光纤感测系统和一种感测温度和/或应变的变化方法。

背景技术

[0002] 高温超导 (HTS) 电机中的场绕组由相当长度的高温超导材料 (例如ReBCO) 带或线组成,其电感在1-10H范围内,用于兆瓦级机器。使用传统的电压检测方法检测所述线圈中的失超是重大的挑战。检测方法必须在电噪声环境 (大的AC磁场和电场) 中操作,对温度变化具有高的局部灵敏度,其在低温下可靠地操作,并且是成本经济的。

[0003] 光纤光栅 (FBG) 温度传感器EMI灵敏度低、权重轻、热侵入小,是HTS失超检测的优良传感器。然而,已知的FBG技术具有使其不适用于许多商业应用的缺点。

[0004] 图1A示出了光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器100的示意图。FBG传感器包括具有覆层103和芯104的光纤102。光栅106被写入光纤102的芯104中。光栅106具有调制芯104的折射率108的间距 Λ 。光栅106反射一定波长的光,并透射其他波长的光。入射光源109向传感器100的上游端112a提供入射光110的光谱。一些入射光110透射到光纤102的下游端112b以提供透射光谱111。一些入射光110被光栅106反射以提供反射光谱114。询问器113检测反射光谱114。背反射光的光谱114具有特征形状:具有中心波长的峰116,其被称为布拉格波长 λ_B 。反射光谱114由处理器115分析。

[0005] FBG传感器对温度和应变敏感。图1B示出了经受温度和/或应变的变化的图1A的传感器100。由于热膨胀或弹性伸长,温度和应变的变化改变光栅106的间距 Λ 。间距的这种变化改变了光栅106的有效折射率,引起反射光谱114中的峰值偏移。可以通过跟踪布拉格波长 λ_B 来测量温度和应变的变化。温度或应变的增加通常导致布拉格波长 λ_B 增加。

[0006] FBG传感器通常是具有高反射率和大约10mm的感测长度的点传感器。图2示出了一种技术,其中多个点感测FBG传感器 $100_I, 100_{II} \dots 100_n$ 串联连接以形成准分布式传感器100a。为了区分所述点,每个FBG传感器 $100_I, 100_{II} \dots 100_n$ 具有光栅 $106_I, 106_{II} \dots 106_n$,其具有不同的中心波长 $\lambda_I, \lambda_{II} \dots \lambda_n$ 。使用波分复用 (WDM) 来询问光栅 $106_I, 106_{II} \dots 106_n$ 。这种询问技术非常快。然而,每个光纤102的传感器 $100_I, 100_{II} \dots 100_n$ 的数量受到在中心波长 $\lambda_I, \lambda_{II} \dots \lambda_n$ 之间具有足够间隔的需要的限制 (大约3nm)。根据询问设备的分辨率,通常使用大约20-30个传感器 $100_I, 100_{II} \dots 100_n$ 。这限制了可以同时监测的面积/长度。

[0007] 图3示出了另一种FBG技术。连续FBG传感器200由具有相同布拉格波长 λ_B 和低反射率的一系列光栅 $206_I, 206_{II}, 206_{III} \dots 206_n$ (形成100mm直至50m的总长度) 形成。诸如光时域反射计 (OTDR) 询问器213的时分复用 (TDM) 方法用于测量由入射光源209提供的入射光210和反射信号214之间的定时,使得能够询问光纤202的离散间隔。反射信号214由处理器215分析。光栅 $206_I, 206_{II}, 206_{III} \dots 206_n$ 的反射率必须非常低,以使得布拉格波长 λ_B 的入射光210能够在光纤202的整个长度上传播。对于8mm的光栅长度,光纤反射率通常小于0.1%。该技术允许长距离询问,但是相对慢,具有相对低的分辨率并且需要极其昂贵的询问设备。

[0008] WO 2013/093788公开了这种类型的系统。

[0009] US2004/0067003公开了一种需要离散的单独感测区域的系统。诸如D2所示的系统要求在第一和第二波长范围之间没有重叠来检测变化。这意味着需要系统的一个感测区域的长度有显著变化以检测变化。

[0010] 在已经参考专利说明书、其他外部文献或其他信息源的本说明书中,这通常是为了提供用于讨论本发明的特征的上下文。除非另外特别说明,否则对此类外部文献或此类信息源的引用不应被解释为承认此类文献或此类信息源在任何管辖范围内是现有技术或形成本领域公知常识的一部分。

[0011] 本发明的至少优选实施例的目的是提供一种FBG感测系统和方法,其克服已知FBG技术的至少一些问题和/或至少为公众提供有用的备选方案。

发明内容

[0012] 根据本发明的第一方面,提供了一种光纤感测系统,包括:光纤,所述光纤包括基本上连续的光纤布拉格光栅,当所述光纤处于平衡温度和应变条件时,所述光纤布拉格光栅具有沿着所述光纤的长度基本上相同的光栅间距;用于向光纤的上游端提供入射光的入射光源;和波长光谱询问器,用于检测来自光纤的入射光的反射光谱;其中所述光纤的上游部分具有衰减长度,所述衰减长度适于在第一平衡波长下将入射光反射到所述询问器,并且当所述下游部分处的温度和/或应变的变化引起所述光纤布拉格光栅的一部分以不同于所述平衡波长的第二波长且以第二强度将光反射到所述询问器时,所述光纤的下游部分适于将光反射到所述询问器,其中在所述平衡温度和应变条件下,所述下游部分适于不反射所述第二波长的光,或适于反射比所述第二强度低的所述第二波长的光的第一强度;所述光纤感测系统进一步包括处理器,所述处理器被配置成分析所检测到的反射光谱以基于所检测到的反射光谱与对应于所述平衡波长的初始峰值的偏差来确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

[0013] 在一个实施例中,所述光纤是至少100mm长。

[0014] 在一个实施例中,所述光纤布拉格光栅基本上沿着所述光纤的整个长度延伸。

[0015] 在一个实施例中,所述光纤包括多个串联的短光纤布拉格光栅以形成基本上连续的光纤布拉格光栅。在一个实施例中,所述短光纤布拉格光栅约为9mm长。在一个实施例中,所述短光纤布拉格光栅间隔开约1mm。

[0016] 在一个实施例中,所述光纤包括单个连续的光纤布拉格光栅。

[0017] 在一个实施例中,所述光纤比所述光纤布拉格光栅的衰减长度更长。在一个实施例中,所述光纤是所述光纤布拉格光栅的衰减长度的至少两倍。在一个实施例中,所述光纤是所述光纤布拉格光栅的衰减长度的至少6倍。

[0018] 在一个实施例中,所述光纤布拉格光栅的总反射率大于20%。在一个实施例中,光所述光纤布拉格光栅的总反射率大于50%。在一个实施例中,所述光纤布拉格光栅的总反射率大于95%。在一个实施例中,所述光纤布拉格光栅的总反射率大于99%。

[0019] 在一个实施例中,所述处理器被配置成通过检测具有非分离峰的反射光谱的包络的变化来分析所述反射光谱以确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

[0020] 在一个实施例中,所述处理器被配置成基于所述反射光谱的尺寸的变化来确定所

述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

[0021] 在一个实施例中,所述处理器被配置成基于阈值宽度算法来确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

[0022] 在一个实施例中,其中所述处理器被配置成基于功率积分算法来确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

[0023] 在一个实施例中,所述处理器被配置成基于变化算法确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

[0024] 在一个实施例中,所述处理器被配置成基于在使用所述算法之前对所述光谱施加重重来确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

[0025] 在一个实施例中,所述光纤布拉格光栅被适配成当在所述光纤的上游部分中发生温度和/或应变的变化时将处于所述第二波长的光反射到所述询问器。

[0026] 在一个实施例中,所述光纤感测系统能够确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历小至5开尔文(5°C)的温度变化。

[0027] 在一个实施例中,所述光纤感测系统能够确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历小至1开尔文(1°C)的温度变化。

[0028] 根据本发明的第二方面,提供了一种感测温度和/或应变的变化的方法,包括:提供光纤,所述光纤包括基本上连续的光纤布拉格光栅,当所述光纤处于平衡温度和应变条件时,所述光纤布拉格光栅具有沿着所述光纤的长度基本上相同的光栅间距;向光纤的端部提供入射光;通过波长光谱询问器检测来自光纤的入射光的反射光谱;其中所述光纤的上游部分具有衰减长度,所述衰减长度适于在第一平衡波长下将入射光反射到所述询问器,并且当所述下游部分处的温度和/或应变的变化引起所述光纤布拉格光栅的一部分以不同于所述平衡波长的第二波长且以第二强度将光反射到所述询问器时,所述光纤的下游部分适于将光反射到所述询问器,其中在所述平衡温度和应变条件下,所述下游部分适于不反射所述第二波长的光,或适于反射比所述第二强度低的所述第二波长的光的第一强度;其中所述方法还包括使用处理器分析所述检测到的反射光谱,以基于所述检测到的反射光谱与对应于所述平衡波长的初始峰值的偏差来确定所述光纤布拉格光栅的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

[0029] 在一个实施例中,所述方法用于检测热点的出现。

[0030] 在一个实施例中,所述方法用于检测高温超导场绕组中的失超。

[0031] 在一个实施例中,所述光纤布拉格光栅经受背景非均匀热应变,所述背景非均匀热应变在所述检测到的反射光谱中引起峰值分裂。

[0032] 该方法可以使用以上关于第一方面所概述的光纤感测系统来执行。

[0033] 本说明书和权利要求书中使用的术语“包括(comprising)”意指“至少部分地由…组成”。当解释本说明书和权利要求书中的包含“包括”的语句时,除了在每个语句中以该术语开头的特征之外,还可以存在其他特征。相关术语例如“包括(comprise)”和“包括于(comprised)”将以类似的方式解释。

[0034] 本说明书中关于处理器使用的术语“部件”、“模块”、“系统”、“接口”等通常旨在表示与计算机相关的实体,或者是硬件、硬件和软件的组合、软件或者是执行中的软件。例如,部件可以是但不限于在处理器上运行的进程、处理器、对象、可执行程序、执行线程、程序

和/或计算机。作为说明,在控制器上运行的应用程序和控制器都可以是部件。一个或多个部件可以驻留在进程和/或执行线程内,并且部件可以位于一台计算机上和/或分布在两台或多台计算机之间。

[0035] 本文公开的数字范围(例如1至10)还旨在包括该范围内的所有有理数(例如1、1.1、2、3、3.9、4、5、6、6.5、7、8、9和10)以及该范围内的有理数的任何范围(例如2到8、1.5到5.5和3.1到4.7),因此,本文明确公开了本文明确公开的所有范围的所有子范围。所述仅仅是具体意图的实例,并且在列举的最低值和最高值之间的数值的所有可能的组合被认为以类似的方式在本申请中明确地陈述。

[0036] 本发明还可以广泛地描述为包括在本申请的说明书中单独地或共同地提及或指示的零件、元件和特征,以及任何两个或更多个所述零件、元件或特征的任何或所有组合。

[0037] 对于本发明所涉及的领域的技术人员来说,在不脱离所附权利要求书所限定的本发明的范围的情况下,可以想到本发明的结构上的许多变化以及广泛不同的实施例和应用。本文的公开内容和描述仅仅是说明性的,并不意图在任何意义上进行限制。当在此提及具体的整数时,所述具体的整数在本发明所涉及的领域中具有已知的等效物,此类已知的等效物被认为是并入在此如同单独地阐述一样。

[0038] 如在此使用的,“s”在名词后面的术语表示该名词的复数和/或单数形式。

[0039] 如在此使用的,术语“和/或”意指“和”或“或”,或在上下文允许的情况下可以二者皆含。

[0040] 本发明包括前述内容,并且还设想了以下仅给出示例的构造。

附图说明

[0041] 现在将仅通过示例并参考附图来描述本发明,在附图中:

[0042] 图1A示出了已知的光纤布拉格光栅(FBG)传感器的示意图;

[0043] 图1B示出了经受温度和/或应变的变化的图1A的传感器的示意图;

[0044] 图2示出了已知技术的示意图,其中多个点感测FBG传感器串联连接以形成准分布式传感器;

[0045] 图3示出了已知的连续FBG传感器的示意图;

[0046] 图4A示出了包括连续FBG的光纤感测系统的第一实施例的示意图;

[0047] 图4B示出了当FBG的一部分经受温度和/或应变的变化时图4A的传感器的示意图,形成了热点;

[0048] 图5A-D示出了当图4A的FBG的一部分经历温度和/或应变的变化时,反射光谱如何变化的示意图;

[0049] 图6示出了当热点被施加到FBG的一部分时由图4的FBG反射的一系列反射光谱;

[0050] 图7示出了彼此重叠的图6的初始平衡反射光谱和最终反射光谱;

[0051] 图8A示出了当图4A的FBG处于平衡条件(无热点)时应用于反射光谱的阈值宽度算法;

[0052] 图8B示出了当FBG经受热点时,图8A的阈值宽度算法;

[0053] 图9A示出了当图4A的FBG处于平衡条件(无热点)时,由功率积分算法所确定的面积;

- [0054] 图9B示出了当FBG经受热点时由图9A的功率积分算法确定的面积；
- [0055] 图10A示出了从图7的初始光谱中减去图7的最终光谱。
- [0056] 图10B示出了图10A的绝对值,其面积由变化算法确定；
- [0057] 图11示出了实验测试设置的示意图；
- [0058] 图12A-B示出了从图11的实验测试设置中获得的约77K (-196°C) 下的初始结果；
- [0059] 图13示出了图11的实验测试设置的传感器的响应的比较；
- [0060] 图14A-B示出了阈值宽度、功率积分、变化和加权功率积分算法的归一化响应的比较；
- [0061] 图15示出了变化算法对常规FBG和热电偶测量的响应的比较。

具体实施方式

[0062] 参照图4A, 光纤感测系统300包括: 包括基本连续的光纤布拉格光栅 (FBG) 306的光纤302; 用于向光纤302的上游端312提供入射光310的入射光源309; 用于检测来自光纤302的入射光310的反射光谱314的波长光谱询问器313; 以及被配置成分析所检测到的反射光谱314以确定光纤布拉格光栅306的一部分是否或何时正经历温度和/或应变的变化的处理器315。

[0063] 在一个实施例中, 波长光谱询问器313是波分复用 (WDM) 询问器。在可选实施例中, 波长光谱询问器313可以是任何合适的询问器, 例如光谱分析器或分光计。

[0064] 处理器315可以是中央处理单元 (CPU)、图形处理单元 (GPU)、数字信号处理器 (DSP)、专用集成电路 (ASIC)、射频集成电路 (RFIC) 或其任何合适的组合。

[0065] 光纤302具有包层303和芯304。光纤布拉格 (Bragg) 光栅306被写入光纤302的芯304中。

[0066] 当光纤302处于平衡温度和应变条件时, 光纤布拉格光栅306具有沿着光纤302的长度基本上相同的光栅间距。光纤302的上游部分318具有衰减长度L, 其适于以第一平衡波长 λ_1 将入射光310反射到询问器313。当下游部分320处的温度和/或应变的变化导致光纤布拉格光栅306的一部分以第二波长 λ_{11} 而不是平衡波长 λ_1 并且以第二强度将光反射到询问器313时, 光纤302的下游部分320适于将光反射到询问器313。在平衡温度和应变条件下, 下游部分320适于不反射第二波长 λ_{11} 的光, 或者适于反射低于第二强度的第二波长 λ_{11} 的第一强度的光。

[0067] 处理器315被配置为分析由询问器313检测到的反射光谱, 以基于检测到的反射光谱与对应于平衡波长 λ_1 的初始峰值的偏差来确定光纤布拉格光栅306的一部分是否或何时正经历温度和/或应变的变化。

[0068] 光纤布拉格光栅306基本上沿着光纤302的整个长度延伸。

[0069] 这里使用的术语“连续光纤布拉格光栅”包括基本上连续/准连续的光纤布拉格光栅。在一个实施例中, 光纤包括串联的多个短光纤布拉格光栅以形成基本上连续的光纤布拉格光栅。短光纤布拉格光栅之间的间距小于光栅的长度。在一个实施例中, 短纤维布拉格光栅为约9mm长, 并且短纤维布拉格光栅间隔开约1mm。一系列短光纤布拉格光栅目前是用基本上连续的FBG的最可行的制造方法。在可选实施例中, 光纤布拉格光栅可以是任何合适的长度, 例如约20mm长或约30mm长。光纤布拉格光栅可以以任何合适的间隔隔开, 例如间

隔2、3、4或5mm。

[0070] 在一个实施例中,光纤302包括单个连续的光纤布拉格光栅。

[0071] 光纤感测系统300能够沿着光纤302的长度在任何地方快速检测温度和/或应变的变化。具体地,处理器315可以检测反射光谱中的初始变化,以快速确定光纤布拉格光栅306的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

[0072] 光纤302的上游部分318有效地针对于平衡波长 λ_I 的入射光“遮蔽”光纤302的下游部分320。当光纤302处于平衡条件(均匀的温度和应变恢复)时,光纤302的下游部分320基本上不反射任何光,并且由询问器313检测并由处理器315分析的反射光谱314具有单个第一峰316_I。

[0073] 参考图4B,当FBG 306的部分322经受温度和/或应变的变化时,部分322的折射率变化。光被部分322以不同于平衡波长 λ_I 的第二波长 λ_{II} 反射,并且在反射光谱314中出现由询问器313检测并由处理器315分析的附加的第二峰316_{II}。

[0074] 如参考图5A-D和6所示,第一峰316_I和第二峰316_{II}将随着温度升高而随时间分离(例如随着热点形成)。与例如US2004/0067003的系统不同,反射光谱不必具有用于光纤感测系统300的完全分离的离散波长峰值以检测光纤302中的温度和/或应变的变化。相反,利用本系统,第一峰316_I和第二峰316_{II}可以部分重叠。处理器315能够通过检测具有非分离峰的反射光谱包络的变化来分析反射光谱以确定光纤布拉格光栅306的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

[0075] 部分322可以是沿着FBG 306的长度的任何地方,包括在衰减长度L内。当在光纤302的上游部分318(具有衰减长度L)中发生温度和/或应变的变化时,光纤布拉格光栅306适于将第二波长 λ_{II} 的光反射到询问器。当部分322在上游部分318内时,以不同于平衡波长 λ_I 的第二波长 λ_{II} 反射光。因为光纤302的下游部分320具有与上游部分318相同的光栅间距,所以当部分322在上游部分318内时,光将继续以平衡波长 λ_I 反射。反射光谱314对于上游部分318内的部分322将基本上与下游部分320内的部分322相同。

[0076] 粘合剂

[0077] 优选地,光纤302与正在测量的物体(例如,HTS带/导线)紧密热接触和/或机械接触。光纤302可以使用任何合适的粘合剂粘附到物体。该粘合剂可以是可移除的粘合剂,例如真空油脂、GE vanish或kapton胶带。该粘合剂可以是永久性粘合剂,例如环氧树脂。在一个实施例中,粘合剂被特别设计用于低温。

[0078] 与已知的连续FBG比较

[0079] 不同于利用TDM询问技术的已知连续FBG传感器200(再次参见图3),光纤感测系统300不需要平衡波长 λ_I 的高比例的入射光来传播光纤302的整个长度。这使得光纤感测系统300能够使用具有比在已知的连续FBG传感器200中使用的FBG 206高得多的反射率的FBG 306。较高反射率的FBG提供较高分辨率的信号,并且比低反射率的FBG需要较不敏感的询问器。

[0080] 该光纤感测系统300使得能够使用波长光谱询问器在长距离上快速检测温度和/或应变的变化,该波长光谱询问器具有简单的固定色散元件(光栅)和相对简单的强度检测器,例如电荷耦合器件(CCD)或线性检测器。在一个实施例中,光纤至少为100mm长。在一个实施例中,光纤至少为1m长。在一个实施例中,光纤至少为100m长。光纤可以长达几百米或

几公里。

[0081] 光纤感测系统300不确定温度和/或应变的变化的位置,仅确定变化已经发生。这使得光纤感测系统300适用于需要快速识别温度和/或应变的变化,但变化的位置不重要的应用。例如,对于HTS线圈中的失超检测,更重要的是识别可能发生热点而不是热点的精确位置。

[0082] 衰减长度

[0083] 在一个实施例中,上游部分318由光纤布拉格光栅306的衰减长度L限定。衰减长度L是离光纤302的上游端312的距离,在该距离处,具有平衡波长 λ_1 的入射光310的1/e (大约63%)被反射。在离上游端312为2L的距离处,约86%的平衡波长 λ_1 的入射光310被反射。在离上游端312的距离为6L处,约99.8%的处于平衡波长 λ_1 的入射光310被反射。

[0084] 在优选实施例中,光纤302比光纤布拉格光栅306的衰减长度L长。在一个实施例中,光纤302是光纤布拉格光栅306的衰减长度L的至少两倍。在一个实施例中,光纤302是光纤布拉格光栅306的衰减长度L的至少6倍。在一个实施例中,光纤302是光纤布拉格光栅306的衰减长度L的至少1000倍。在一个实施例中,光纤302是光纤布拉格光栅306的衰减长度L的至少10000倍。在一个实施例中,光纤302是光纤布拉格光栅306的衰减长度L的至少100000倍。

[0085] 反射率

[0086] 衰减长度L与FBG 306的反射率成反比。FBG 306的每单位长度的较高反射率导致较短的衰减长度L。更高的反射率有利地改善了可以由询问器检测的分辨率。然而,已知的连续FBG传感器(参见图3)需要低的总反射率以使得TDM询问器能够检测沿着光纤长度的信号。已知的连续FBG传感器通常沿光纤的整个长度具有小于20%的总反射率。

[0087] 优选地,光纤布拉格光栅306的总反射率沿光纤302的整个长度大于20%。在一个实施例中,光纤布拉格光栅306的总反射率大于50%。在一个实施例中,光纤布拉格光栅306的总反射率大于95%。在一个实施例中,光纤布拉格光栅306的总反射率大于99%。在一个实施例中,光纤布拉格光栅306的总反射率接近100%。

[0088] 方法

[0089] 一种感测温度和/或应变的变化的方法包括提供包括基本上连续的光纤布拉格光栅306的光纤302,当光纤302处于平衡温度和应变条件时,光纤布拉格光栅306具有沿着光纤302的长度基本上相同的光栅间距;向光纤302的端部提供入射光;用波长光谱询问器313检测来自光纤302的入射光的反射光谱314;以及分析反射光谱314以确定光纤布拉格光栅306的一部分是否或何时正经历温度和/或应变的变化。

[0090] 光纤302的上游部分318具有衰减长度L,其适于以第一平衡波长 λ_1 将入射光反射到询问器313,并且当下游部分320处的温度和/或应变的变化引起光纤布拉格的一部分时,光纤302的下游部分320适于将光反射到询问器313光栅306以不同于平衡波长 λ_1 的第二波长 λ_{II} 并以第二强度将光反射到询问器313,其中在平衡温度和应变条件下,下游部分320适于不反射第二波长 λ_{II} 的光,或适于反射比第二强度低的第二波长 λ_{II} 的第一强度的光。

[0091] 该方法包括使用处理器315来分析所检测到的反射光谱314,以基于所检测到的反射光谱与对应于平衡波长 λ_1 的初始的第一峰316_I的偏差来确定光纤布拉格光栅306的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。

[0092] 在一个实施例中,波长谱询问器313是波分复用(WDM)询问器。

[0093] 在一个实施例中,所述方法用于检测热点的出现。在一个实施例中,该方法用于检测高温超导场绕组中的失超。

[0094] 反射光谱的示意图

[0095] 图5A-D示出了当FBG 306的部分322经历温度和/或应变的变化时反射光谱314如何变化的示意图。所述图还示出了如何分析阈值强度(在这种情况下为50%)下的反射光谱的宽度以确定光纤布拉格光栅306的一部分是否经历温度和/或应变的变化或何时正经历温度和/或应变的变化的示例。

[0096] 图5A示出了当光纤302处于平衡条件时的反射光谱314。反射光谱314具有中心波长为平衡波长 λ_I 的单个第一峰316_I。在第一峰316_I的最大强度的50%处,第一峰316_I具有宽度T。

[0097] 图5B示出了当热点在FBG 306的部分322处或附近开始发展时的反射光谱314。第一峰316_I开始变宽,中心波长向右移动 $\Delta\lambda$ 。在最大强度的50%处的宽度W增加 ΔT 。

[0098] 图5C示出了当热点继续发展时的反射光谱314。峰316开始分裂成两个不同的第一峰316_I、第二峰316_{II}。在最大强度的50%处的宽度T继续增加。

[0099] 图5D示出了一旦该热点被良好建立的反射光谱314。第一峰316_I、第二峰316_{II}已经完全分离。由第一峰316_I、第二峰316_{II}的外边缘测定的在最大强度的50%处的宽度T现在显著宽于其在平衡条件下的宽度。

[0100] 图5A-D表示理想情况。实际上,第一峰316_I、第二峰316_{II}包括许多更小的峰和谷,并且彼此没有如所述图所示的那么不同。下面将更详细地讨论真实世界场景。

[0101] 实验性FBG

[0102] 以下实验结果利用了光纤302,该光纤302包括使用拉丝塔光栅(DTG®)刻录技术制造的一串相同的短FBG。短FBG以每个单独光栅之间非常小的距离定位以形成准连续FBG 306。每个短FBG为9mm长。每个短FBG之间的距离为1mm。每个短FBG具有1550nm的标称布拉格波长(在零应变和室温下)。9mm光栅的短FBG反射率约为25%。优选短FBG的反射率高于15%。较高反射率的光栅有利地能够检测较短长度的热点。

[0103] 使用Anritsu MS9740A分析反射光谱,其能够在600-1750nm范围内检测波长。对于能够实现约100ms的采样间隔的实验,光谱范围被设置为2nm。

[0104] 使用加热器将热点施加到连续FBG 306的一部分。

[0105] 反射光谱分析

[0106] 图6示出了当热点被施加到FBG 306的部分322时由FBG 306反射的一系列反射光谱314a-314f。最初,在平衡条件下,反射光谱314a具有单个第一峰316_I。当FBG 306经受热点时,反射光谱314b-314f产生第二峰316_{II}。可以看出,第二峰316_{II}已经开始发展并且已经在约2.5秒内被检测到。随着热点的发展,第二峰316_{II}继续增加强度并远离第一峰316_I。

[0107] 图7示出了当FBG 306经受相互重叠的热点时的初始平衡反射光谱314a和最终反射光谱314f。受热点影响的反射光谱314f清楚地具有在平衡反射光谱314a中不存在的第二峰316_{II}。

[0108] 存在几种方式,其中处理器315可以被配置成基于反射光谱314的尺寸变化来确定光纤布拉格光栅306的一部分是否经历温度和/或应变的变化或者何时正经历温度和/或应

变的变化。下面讨论几种可能的算法。

[0109] 术语的解释

[0110] FBG询问器313检测反射光谱314。光谱数据由一系列离散波长的采样点组成。为每个采样点记录强度水平。两个单独采样点之间的共同波长间隔将是0.010nm,但这取决于所使用的询问器。

[0111] 所述采样点数为:

[0112] n

[0113] 在反射光谱314的开始处的波长是起始波长。在反射光谱314的末端的波长是停止波长。反射光谱314的波长范围是跨度。

[0114] 跨度=停止波长-起始波长

[0115] 两个采样点之间的距离是波长分辨率。

[0116] $\text{波长分辨率} = \frac{\text{跨度}}{n-1}$

[0117] 记录和分析两个单独光谱之间的时间是采样时间。采样率是采样时间的倒数。

[0118] $\text{采样率} = \frac{1}{\text{采样时间}}$

[0119] 例如,100ms的采样时间导致10Hz的采样率。

[0120] 各个采样点处的强度被称为:

[0121] i_1 到 i_n

[0122] 在各个采样点处的波长被称为:

[0123] λ_1 到 λ_n

[0124] 各个采样点处的强度阵列为 I :

[0125] $I = \begin{bmatrix} \text{起始波长} & i_1 \\ \vdots & \vdots \\ \text{停止波长} & i_n \end{bmatrix}$

[0126] 引入尺寸为 n 的一维阵列 W 作为线性权重:

[0127] $W = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ n \end{bmatrix}$

[0128] 阈值宽度算法

[0129] 在一个实施例中,处理器315被配置成基于阈值宽度算法来确定光纤布拉格光栅306的一部分是否经历温度和/或应变的变化或者何时正经历温度和/或应变的变化。

[0130] 该算法类似于全宽度半最大值算法。然而,它不限于“半最大值”阈值,并且可以应用于不必类似于单个峰值的谱形状。第一峰 316_I 和第二峰 316_{II} 之间的距离与导致第二峰 316_{II} 出现的温度变化成比例。这意味着阈值宽度算法可用于给出最冷点和最热点之间的温度差的定量值。

[0131] 图8A示出了当FBG 306处于平衡条件时应用于反射光谱314的阈值宽度算法。图8B示出了当FBG 306经受热点时应用于反射光谱314的阈值宽度算法。

[0132] 算法应用如下:

[0133] 1.决定阈值水平。例如,阈值被设置为最大峰值振幅的25%。

[0134] $c_{\text{thresh}} = 0.25$

[0135] 大体上: $0 < c_{\text{thresh}} < 1$

[0136] 2. 归一化所述光谱的最大峰值振幅。

[0137]
$$I_{\text{norm}} = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}$$

[0138] 为了简单起见, 我们现在将各个采样点处的归一化强度称为 i_1 到 i_n 。

[0139] 3. 从光谱的左侧 (起始波长) 开始并且向右 (在增加波长的方向上) 移动以确定强度首先达到高于设定阈值的值的波长 (在这种情况下, 振幅为 0.25)。

[0140] 4. 通过在阈值任一侧上的数据点之间的线性插值来确定达到阈值的精确波长 (位置)。

[0141] 代码形式表示:

$$I = I_{\text{norm}}$$

For I=1..n

 If $i_n \geq c_{\text{thresh}}$

[0142]
$$\lambda_{\text{thresh_left}} = \lambda_{n-1} + (\lambda_n - \lambda_{n-1}) \frac{i_{\text{thresh}} - i_{n-1}}{i_n - i_{n-1}}$$

 Elseif $n=n+1$

Next

[0143] 5. 从光谱的右侧 (停止波长) 开始并且向左 (在减小波长的方向上) 移动以查看确定强度首先达到高于设定阈值的值的波长。

[0144] 6. 通过在阈值任一侧上的数据点之间的线性插值来确定达到阈值的精确波长 (位置)。

[0145] 代码形式表示:

$$I = I^{-1}$$

For I=1..n

 If $i_n \geq c_{\text{thresh}}$

[0146]
$$\lambda_{\text{thresh_right}} = \lambda_{n-1} + (\lambda_n - \lambda_{n-1}) \frac{i_{\text{thresh}} - i_{n-1}}{i_n - i_{n-1}}$$

 Elseif $n=n+1$

Next

[0147] 7. 达到阈值的两个波长之间的距离给出“阈值宽度”的值。此值可用于检测发展中的热点。

[0148]
$$T = \lambda_{\text{thresh_right}} - \lambda_{\text{thresh_left}}$$

[0149] 该阈值水平确定了可见热点的几何形状/长度。应选择阈值以确保检测到最小热点长度:

[0150]
$$c_{\text{thresh}} < \text{热点长度} \times \text{单位长度的反射率}$$

[0151] 还应该将阈值电平选择为明显高于背景噪声电平。根据系统的配置, 10% 和 50%

之间的阈值可能是合适的。

[0152] 功率积分算法

[0153] 在一个实施例中,处理器315被配置成基于功率积分算法来确定光纤布拉格光栅306的一部分是否经历温度和/或应变的变化或者何时正经历温度和/或应变的变化。

[0154] 图9A示出了当FBG 306处于平衡条件时由用于反射光谱314的功率积分算法确定的面积(曲线A.U.C.下的面积)。图9B示出了当FBG 306经受热点时由反射光谱314的功率积分算法确定的面积(曲线下面积A.U.)。

[0155] 积分是曲线下的面积。曲线(光谱)下面积的增加表示热点。

[0156] 功率积分算法在数学上表示为:

$$[0157] \quad P = \int_{\text{起始波长}}^{\text{停止波长}} I d\lambda$$

[0158] 因为 $d\lambda$ 对于强度阵列I中的所有数据点是恒定的,所以简化的方法是将每个采样点处的各个强度相加:

$$[0159] \quad \text{加和功率阵列} = \sum_{z=1}^n i_z$$

[0160] 与阈值宽度算法不同,不必为功率积分算法归一化I。

[0161] 变化算法

[0162] 在一个实施例中,处理器315被配置成基于变化算法来确定光纤布拉格光栅306的一部分是否经历温度和/或应变的变化或者何时正经历温度和/或应变的变化。

[0163] 该变化算法将当前测量的各个采样点处的强度与先前测量的相同采样点的强度或先前测量的平均值进行比较。

[0164] 电流测量的强度为: I_t

[0165] 先前测量的强度为: I_{t-1}

[0166] I_{t-1} 可以仅仅是先前的强度测量。可替代地, I_{t-1} 可以是任何其他单独的强度测量,例如初始强度测量。可替代地, I_{t-1} 可以是若干(k)强度测量的平均值。例如, I_{t-1} 可以是 $k=300$ 次测量的平均值(对于100ms的采样速率为30秒)。

[0167] 该变化算法查看在两个不同时间的反射光谱314的形狀的差异。参考图7,当FBG 306经受热点时,反射光谱314的强度在初始平衡反射光谱314a和最终反射光谱314f之间变化。

[0168] 图10A示出了从初始平衡反射光谱314a(时间 $t-1$)中减去最终反射光谱314f(时间 t)之后的最终反射光谱314f。

[0169] 图10B示出了图10A的绝对值。变化算法考虑所有变更,正和负。总体变化可以通过图10B的积分(曲线下面积)来计算。

[0170] 该变化算法在数学上表示为:

$$[0171] \quad C_k = \int_{\text{起始波长}}^{\text{停止波长}} |I_t - I_{t-1}| d\lambda$$

[0172] 因为 $d\lambda$ 对于强度阵列I中的所有数据点是恒定的,所以简化的方法是将每个采样点处的各个强度相加:

$$[0173] \quad \text{变化值} = \sum_{z=1}^n |i_{z,t} - i_{z,t-1}|$$

[0174] 还可以对已经使用快速傅里叶变换 (FFT) 预先变换到频率空间中的强度谱执行变化算法。频率-空间分析在某些应用中特别有用,因为它对均匀的温度变化不敏感。FFT可用于创建可用于探测变化的“指纹”。例如,如果长光栅处于均匀温度,则频率分量将相对限于单个峰值。如果整个传感器温度升高均匀,FFT没有变化。如果传感器经受热点,则在FFT中将出现第二倍频。

[0175] 与阈值宽度算法不同,不必为功率积分算法归一化I。

[0176] 权重

[0177] 在一个实施例中,处理器315被配置成基于在使用算法之前对光谱施加权重来确定光纤布拉格光栅306的一部分是否或何时正经历温度和/或应变的变化。

[0178] 权重可以应用于上述任何算法。该权重通常是以这样的形式:与对较低波长的光谱移动相比,对对较高波长的光谱移动(如在发生热点时将预期的)施加更重的权重。

[0179] 加权功率积分

[0180] 作为示例,下面讨论应用于功率积分算法的权重。

[0181] 对于加权功率积分,在计算积分之前将强度与权重相乘。

$$[0182] \quad P_W = \int_{\text{起始波长}}^{\text{停止波长}} I \cdot W \, d\lambda$$

[0183] 所述权重可以是线性的:

$$[0184] \quad W = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ n \end{bmatrix}$$

[0185] 可替代地,该权重可以是二次的:

$$[0186] \quad W^2 = W \cdot W$$

[0187] 可替代地,该权重可以是任何其他形式,其中:

$$[0188] \quad w_z < w_{z+1}$$

[0189] 对于加权功率积分,重要的是选择频谱段,使得频谱远端的噪声不会使信号过功率。在一个实施例中,光谱被选择为是FBG主峰,即第一峰316₁的±1-2nm。

[0190] 如上所述,加权功率积分可以简化为:

$$[0191] \quad \text{加和的加权功率阵列} = \sum_{z=1}^n i_z \times w_z$$

[0192] 实验测试设置

[0193] 图11示出了实验测试设置的示意图。将高温超导 (HTS) 带324夹在基板326上。加热器328与HTS带324紧密接触。将9个间隔开的热电偶TC 1至TC 9连接到HTS带324以提供作为位置的函数的独立温度测量。将9个热电偶放置在每个热电偶之间相隔8mm的线中。热电偶5 (TC 5) 直接位于热点/加热器的顶部。

[0194] 包括五个短光栅 (标准技术) 的准分布式FBG传感器100a被附接到HTS带324。准分布式传感器100a具有8mm光栅,光栅之间具有8mm间隔。准分布式传感器100a的五个光栅被

定位成使得每个光栅邻近热电偶TC 1、TC 3、TC 5、TC 7和TC 9中的相应一个。

[0195] 将包括由如上所述的紧密间隔的短FBG链形成的连续FBG 306的光纤感测系统300放置在HTS带324的顶部上。光纤感测系统300的光纤302紧邻准分布式FBG传感器100a定位。

[0196] 使用合适的粘合剂将热电偶TC 1至TC 9、准分布式FBG传感器100a和光纤302粘合到HTS带324。

[0197] 测试结果

[0198] 该装置在室温、0°C和各种低温下测试,没有显著变化。然后将装置冷却至约77K(-196°C)。

[0199] 图12A和图12B示出在77K(-196°C)附近获得的初始结果。图12A和图12B示出了打开加热器的时间(灰色)、中心热电偶处的测量温度(TC 5,较暗的线)和光纤感测系统300的响应(具有x标记的较亮的线)。使用阈值宽度算法询问连续光栅306,阈值设置为最大振幅的25%。

[0200] 光纤感测系统300在甚至小的温度变化下的明显响应是可见的。小至约1K(1°C)的温度差是容易检测的。即,光纤感测系统300能够确定光纤布拉格光栅306的一部分何时正经历小至大约1开尔文(1°C)的温度变化。

[0201] 与准分布式感测技术的比较

[0202] 图13示出了准分布式传感器100a中的每个短FBG的响应与光纤感测系统300的响应的比较。直接放置在加热器顶部(在TC 5处)的短FBG比连续FBG 306响应稍快。然而,与连续FBG 306相比,不直接位于加热器上的FBG以显著的时间延迟和振幅减小进行响应。除非在热点的8mm内放置单个短光栅,否则连续FBG 306将比使用准分布式传感器100a检测到的更快地检测热点。

[0203] 实际上,不可能预测在超导线圈中产生热点的精确位置。有利的是使用具有连续光栅306的传感器,例如光纤感测系统300,而不是准分布式FBG传感器100a。连续的FBG 306能够覆盖更大的长度(或面积,如果以线圈形式布置的话)。

[0204] 不同算法的比较

[0205] 算法的选择受计算速度、对初始变化的敏感性和对长期漂移的鲁棒性等因素的影响。取决于所使用的处理器的类型和由传感器反射的特定光谱,不同的算法可能更适合于某些应用。

[0206] 图14A示出了上述阈值宽度、功率积分、变化和加权功率积分算法的归一化响应的比较。图14B示出了响应的初始部分的特写。功率积分、加权功率积分和变化算法同时响应。阈值宽度算法延迟0.1秒(采样时间长)。两个功率积分首先指示具有负响应的变化。在一些实施例中,该特性可以用作触发器。

[0207] 图15示出了变化算法对常规FBG(短、长)和热电偶测量的响应的比较。将两者直接放置在热点的顶部(加热器启动)。所有测量同时记录。灰色部分指示何时开启加热器。图15示出了变化算法与传统的短FBG一样快速地响应热点的存在。

[0208] 实际应用/优点

[0209] 光纤感测系统300可以适用于在高温超导(HTS)应用中检测失超。在直HTS带上使用100mm连续FBG(10个光栅、长度为9mm)进行实验。还在卷绕的HTS带上使用500mm连续FBG(50个光栅、长度为9mm)进行了实验。在77开尔文(-196.15°C)下,检测到温差小至5K(5°C)

的热点。即,光纤感测系统300能够确定光纤布拉格光栅306的一部分何时经历小至5k (5°C)的温度变化。光纤感测系统300可以用于快速和有效的抑制失超。

[0210] 在HTS应用中灵敏地检测小的温度变化对于避免骤冷是重要的。参照图3描述的类型系统将仅缓慢地检测温度变化,此时正强化将导致热失控并且淬火可能不可恢复。

[0211] US2004/0067003中描述的类型系统将仅检测温度变化,其中温度变化足够高以形成完全分离的离散波长峰值。再次,此时正强化将导致热失控并且淬火可能是不可恢复的。

[0212] 连续FBG 306能够在经受背景非均匀热应变(例如,由于围绕弯曲路径的弯曲或非均匀材料特性等)的同时被询问。该应变引起反射光谱314中的峰值分裂。设计成探测来自“单峰”FBG传感器的对称响应的常规询问系统不能容易地询问所述多个“杂”峰。

[0213] 本申请的算法观察检测到的反射光谱314与对应于平衡波长的初始峰值的偏差,这使得能够检测沿着光纤302的局部热点的形成。这是可能的,因为只有当波长至少稍微移动到由高强度反射形成的“掩蔽峰”之外时,才检测到来自光纤302的延伸长度的信号,所述高强度反射发生在光纤的非常短的前部部分中。

[0214] 反射光谱不必具有用于光纤感测系统300的完全分离的离散波长峰值以检测光纤302中的温度和/或应变的变化。处理器315能够通过检测具有非分离峰的反射光谱包络的变化来分析反射光谱以确定光纤布拉格光栅306的一部分何时正经历温度和/或应变的变化。这意味着光纤感测系统300可以检测光纤布拉格光栅306何时正经历初始温度和/或应变的变化,从而实现快速检测和对小的温度和/或应变的变化的高灵敏度。

[0215] 光纤感测系统300的光纤302可以非常长,高达几百米或几公里长,使得其能够在整个相关物品(例如HTS线圈)上展开。不同于已知的长FBG传感器,光纤感测系统300可以保持非常高的温度灵敏度,并且可以使用标准WDM询问器313进行询问。

[0216] 除了HTS应用中的失超检测之外,光纤感测系统300还可用于热点检测重要的其他应用,例如其他低温系统,或诸如变压器和电动机绕组的室温线圈。

[0217] 光纤感测系统300的一些其他可能的应用包括:

[0218] 航空航天和飞机:测试机翼和机身部件的结构完整性,以及发动机(燃料箱、起落架上的负载和机翼上的结冰)的性能。电动机/发电机中的失超检测。测试航天器的隔热罩、航天器上液氧(和其他燃料)储罐的泄漏传感器(或其他任何地方的泄漏传感器)。

[0219] 能量:风力涡轮机叶片中的应力检测。

[0220] 医学:光纤传感器对于许多医学应用是理想的,特别是其中产生数据的集成、质量、可靠性的放射学设备。围绕眼外科手术的MRI兼容工具和装置。核磁共振磁体高温超导线圈的失超检测

[0221] 已经仅通过示例描述了本发明的优选实施例,并且在不脱离本发明的范围的情况下可以对其进行修改。

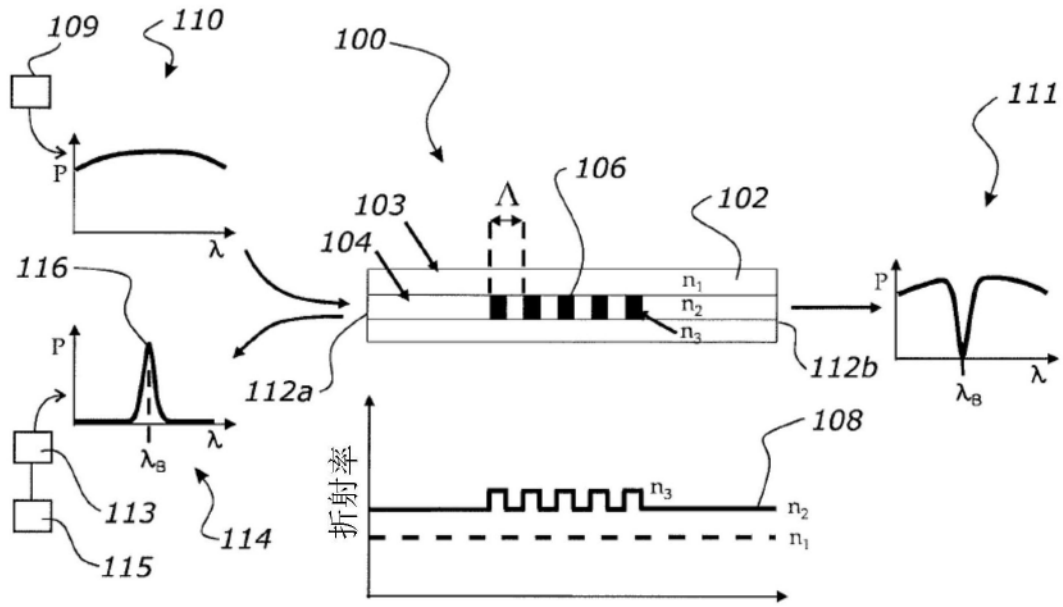


图1A

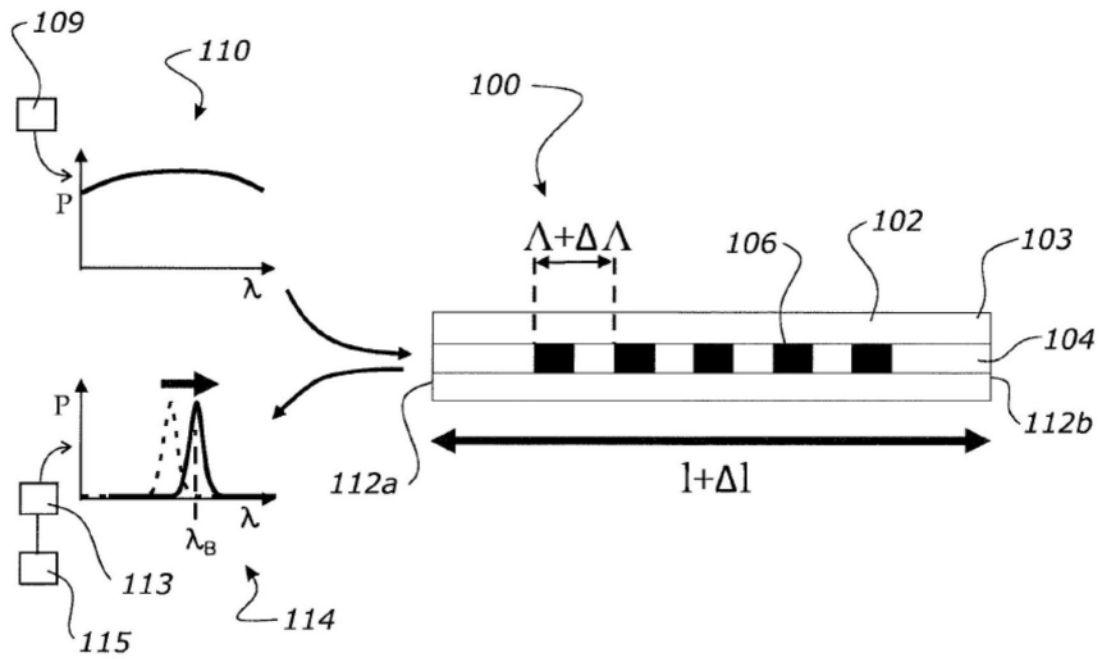


图1B

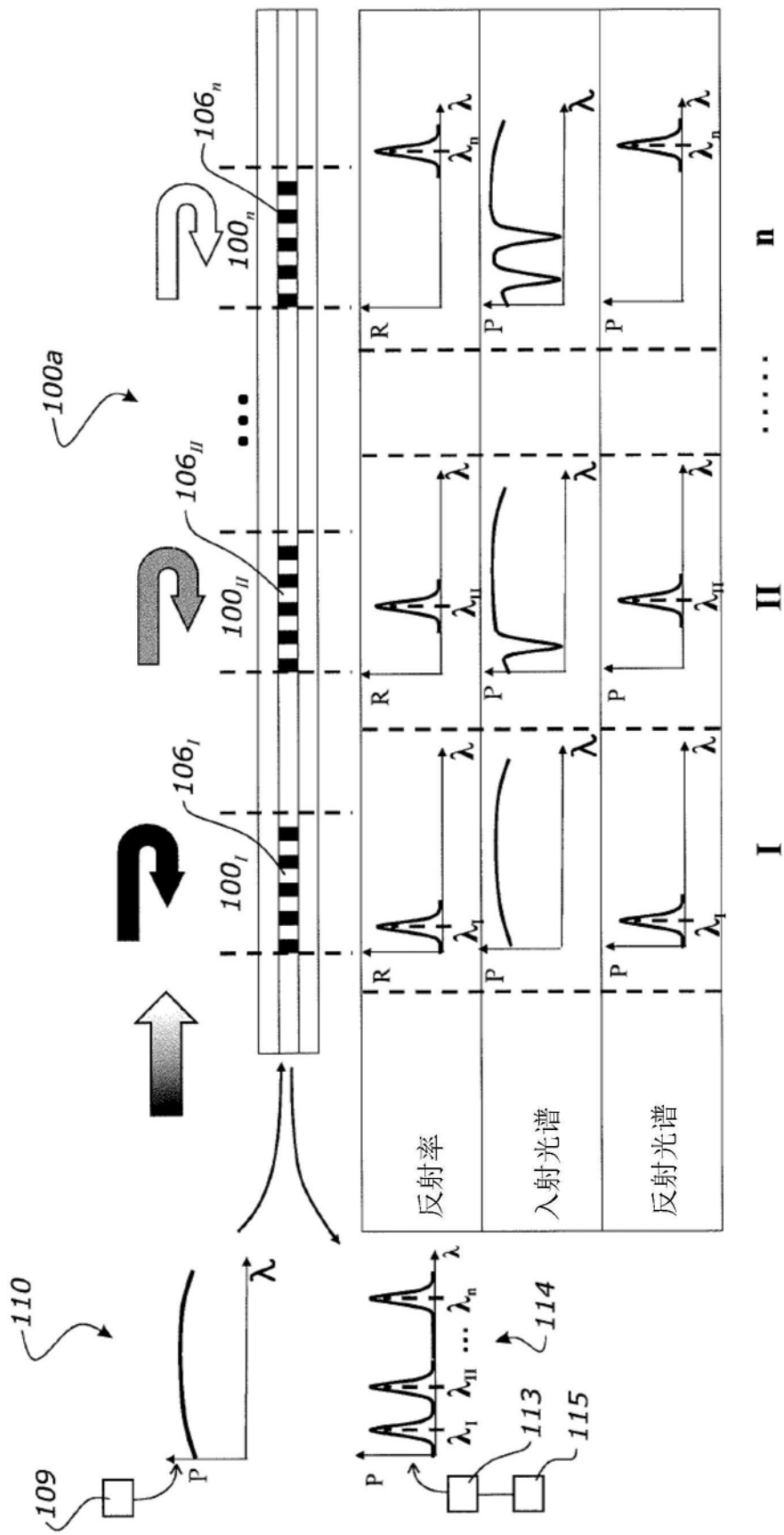


图2

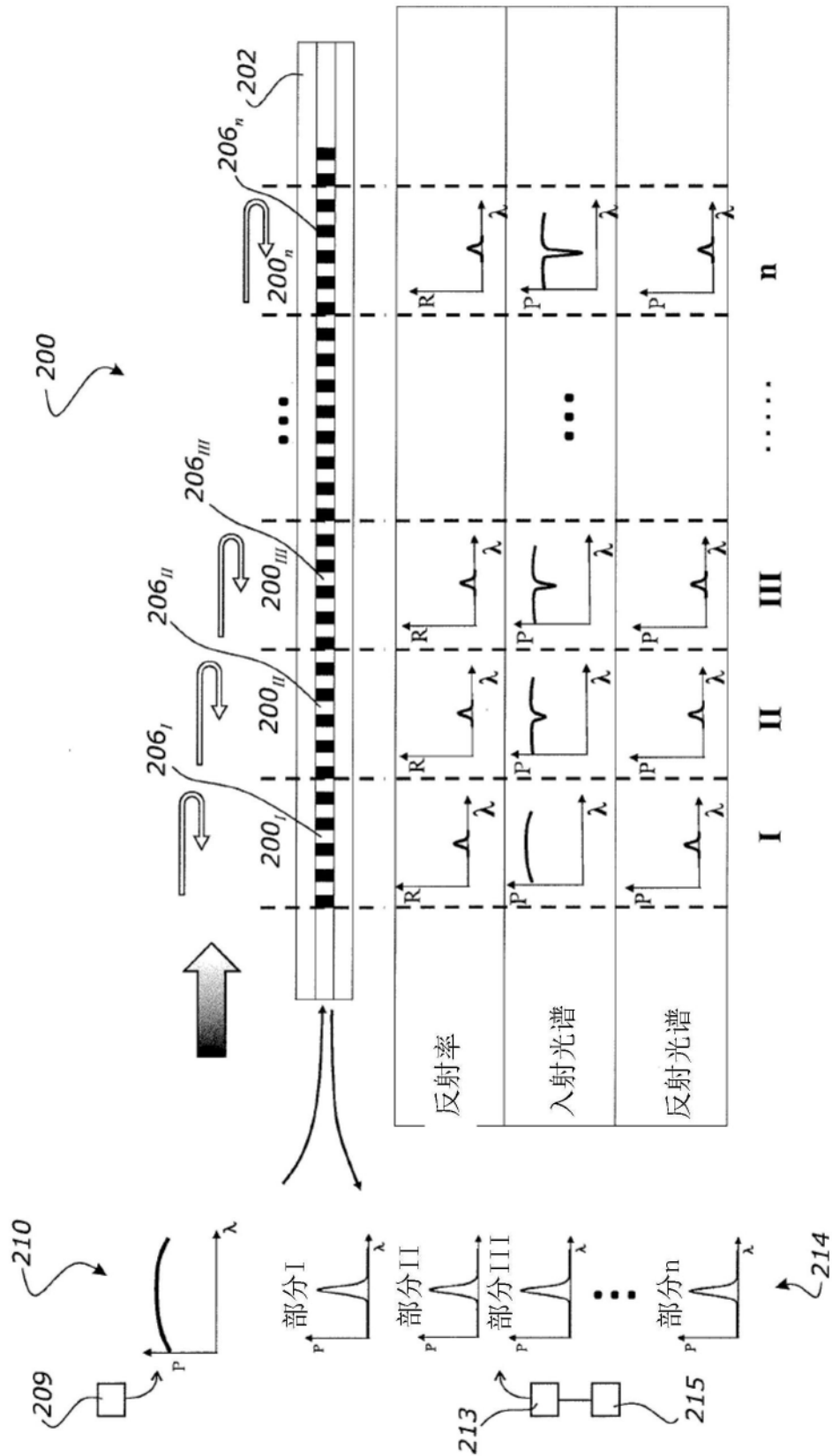


图3

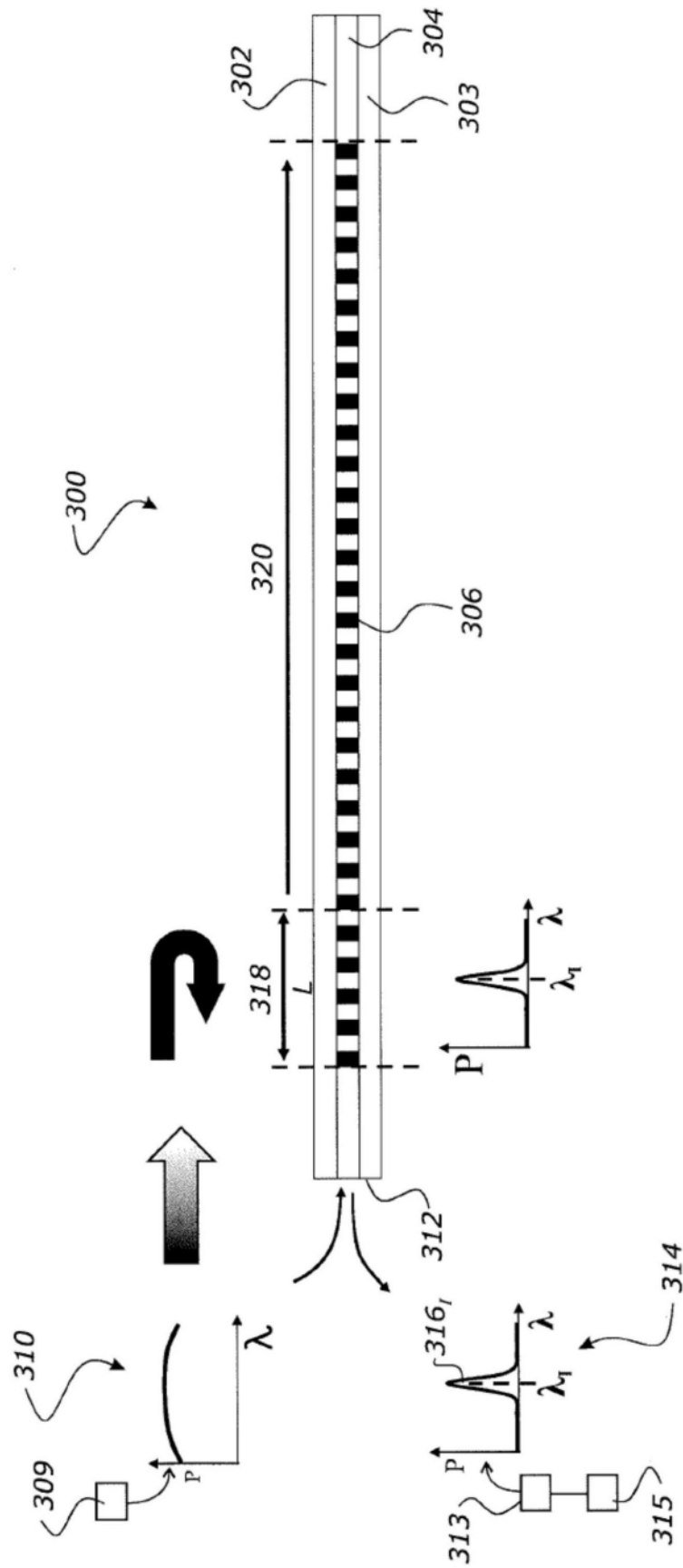


图4A

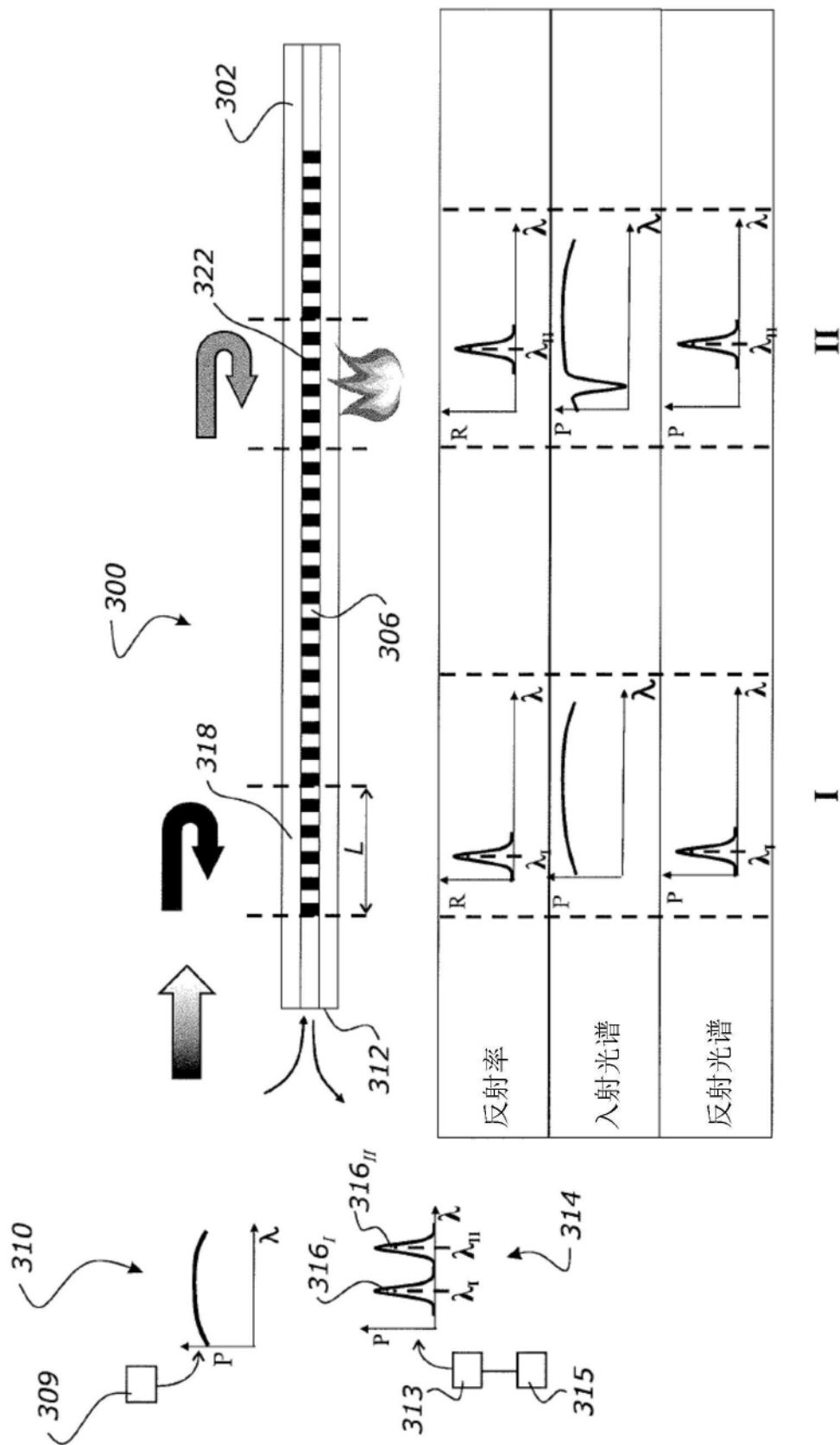


图4B

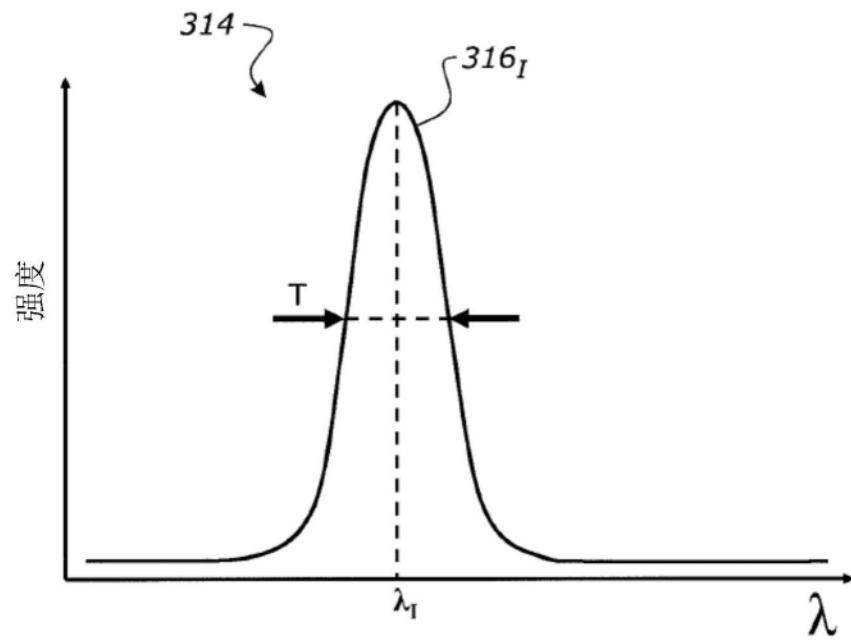


图5A

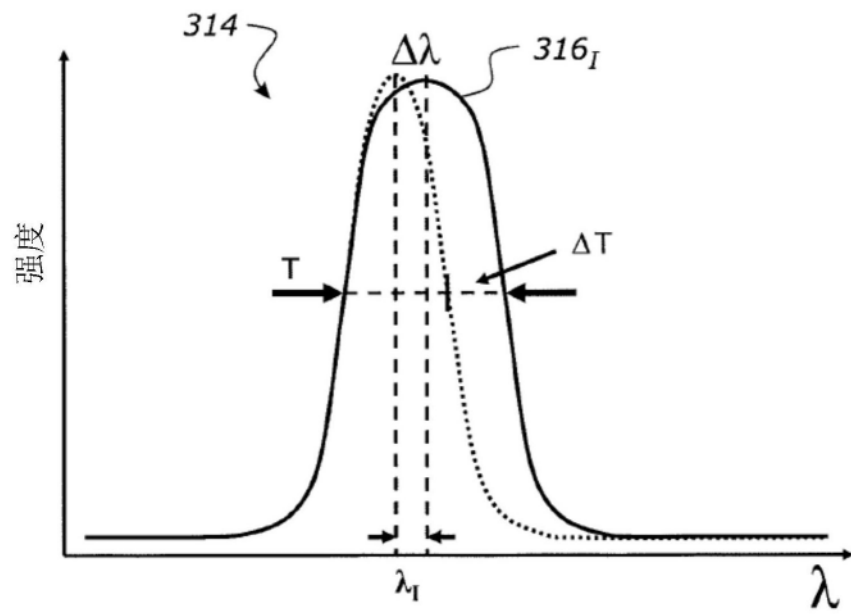


图5B

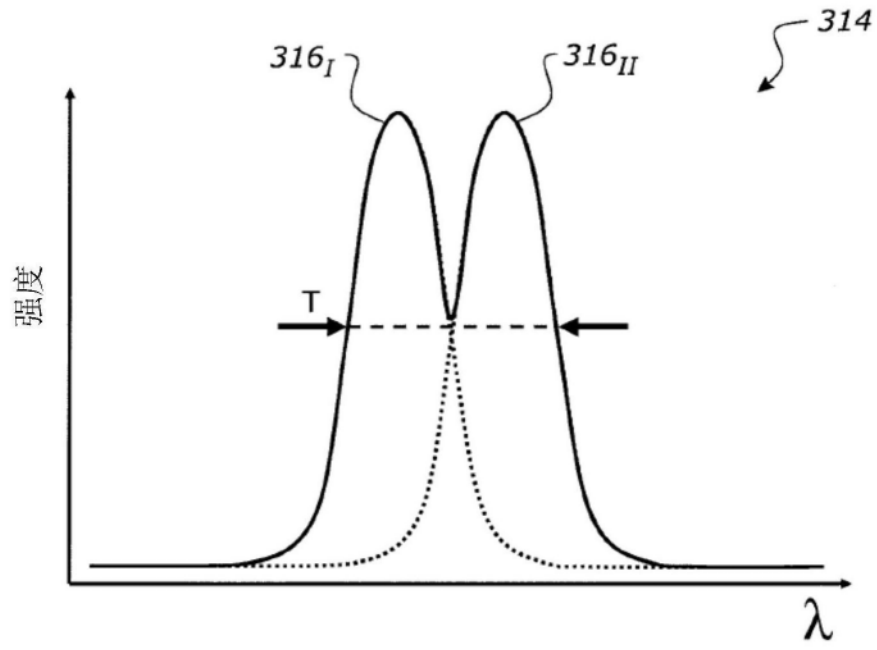


图5C

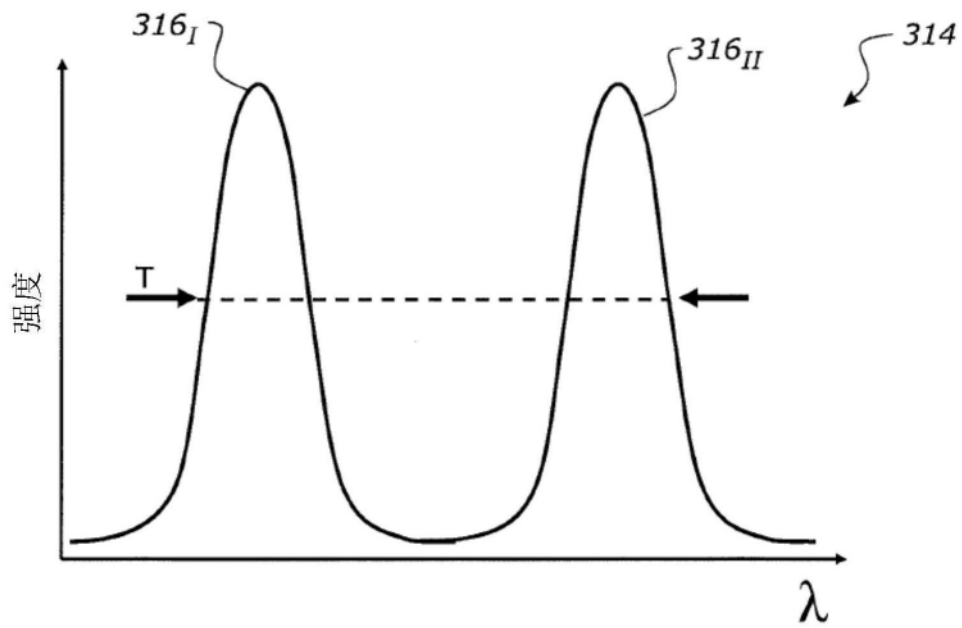


图5D

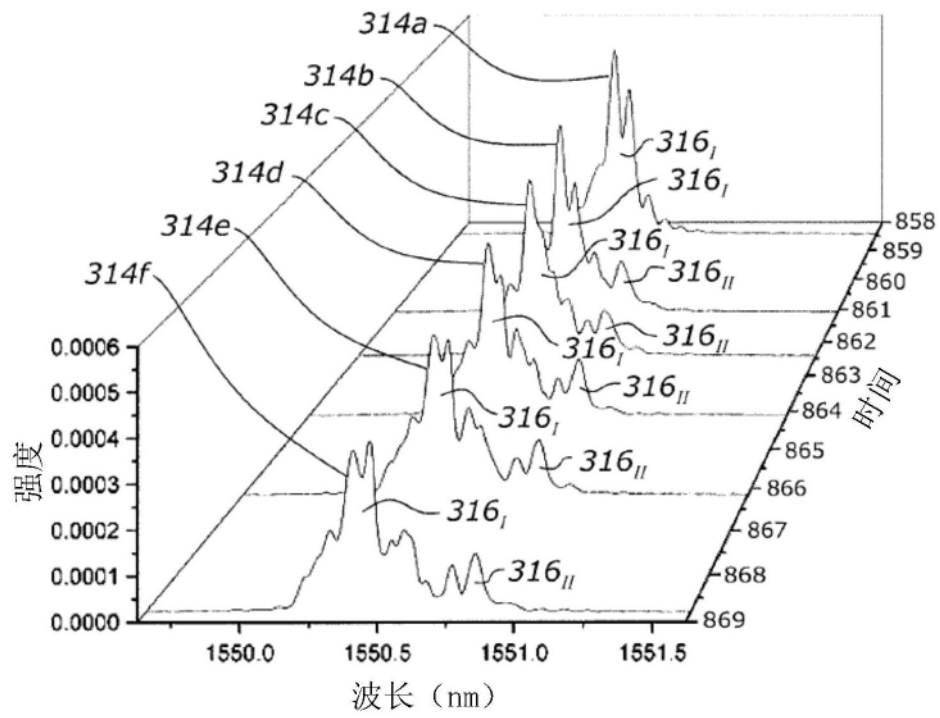


图6

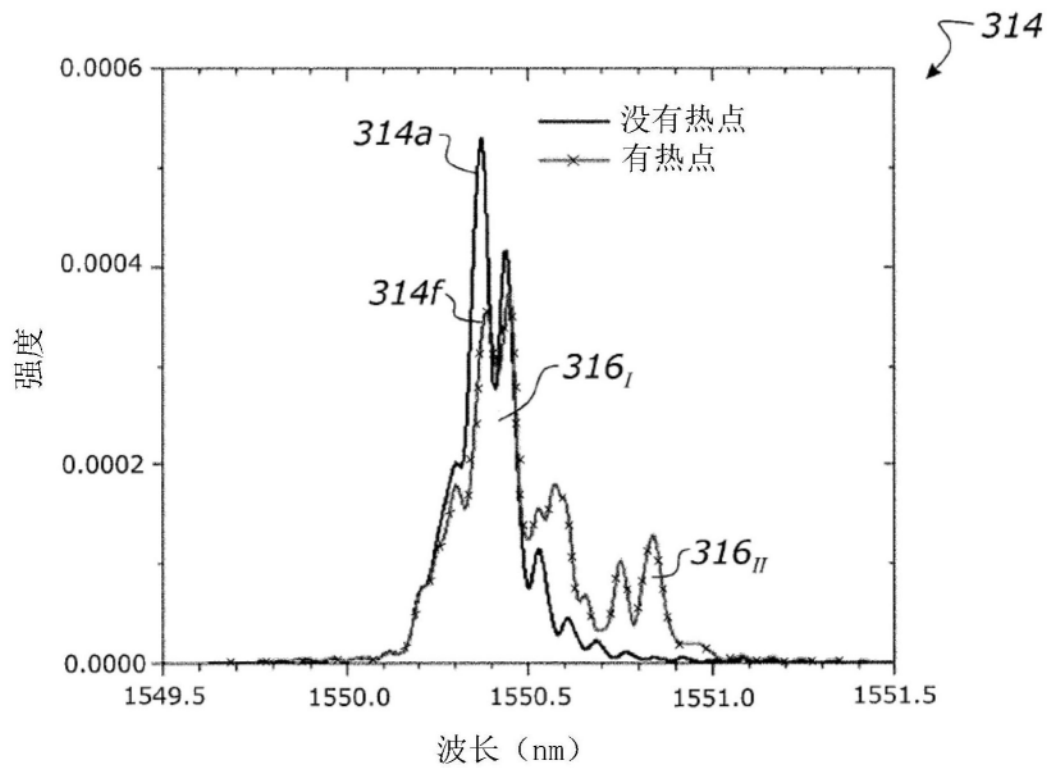


图7

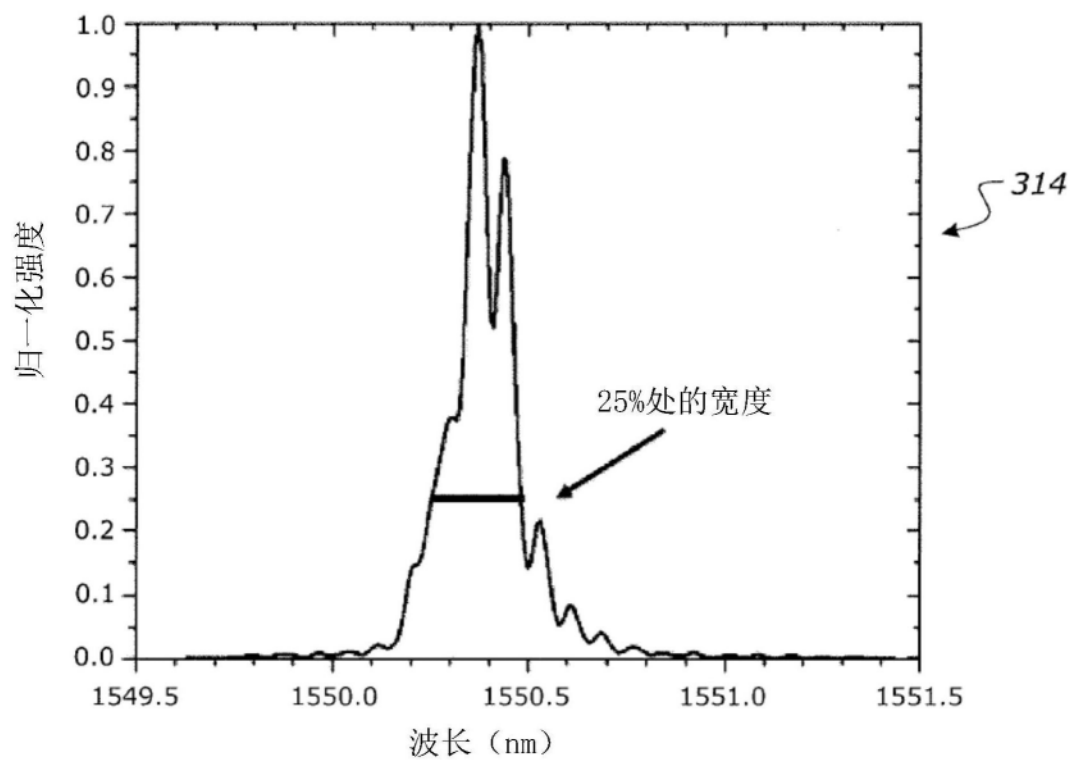


图8A

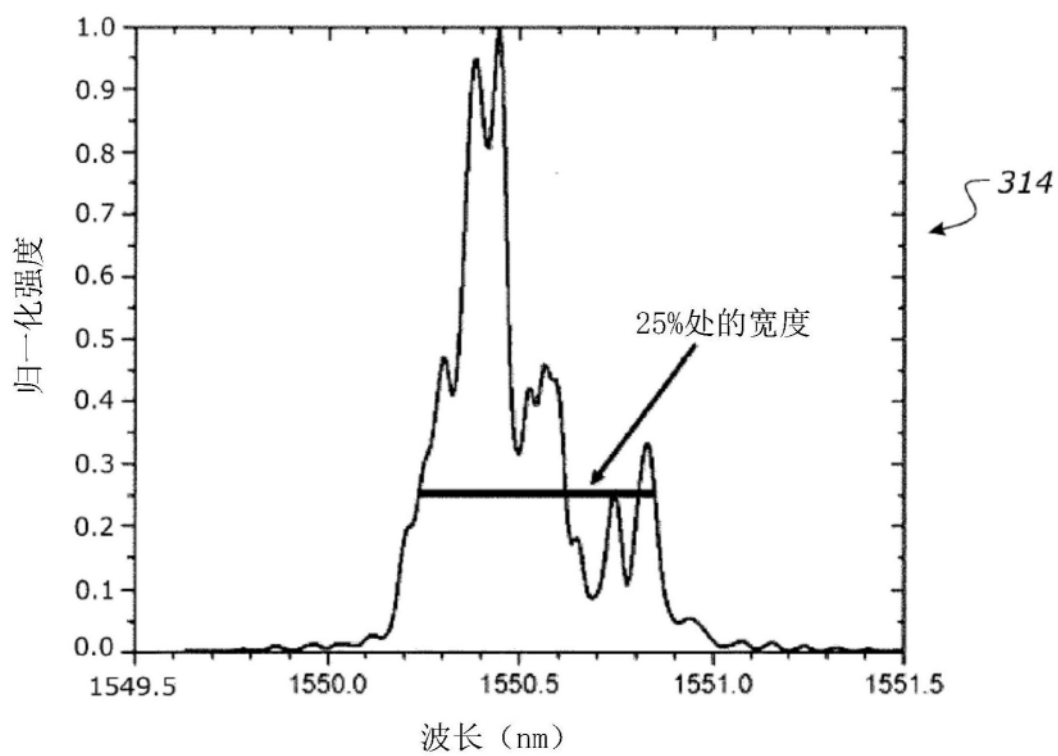


图8B

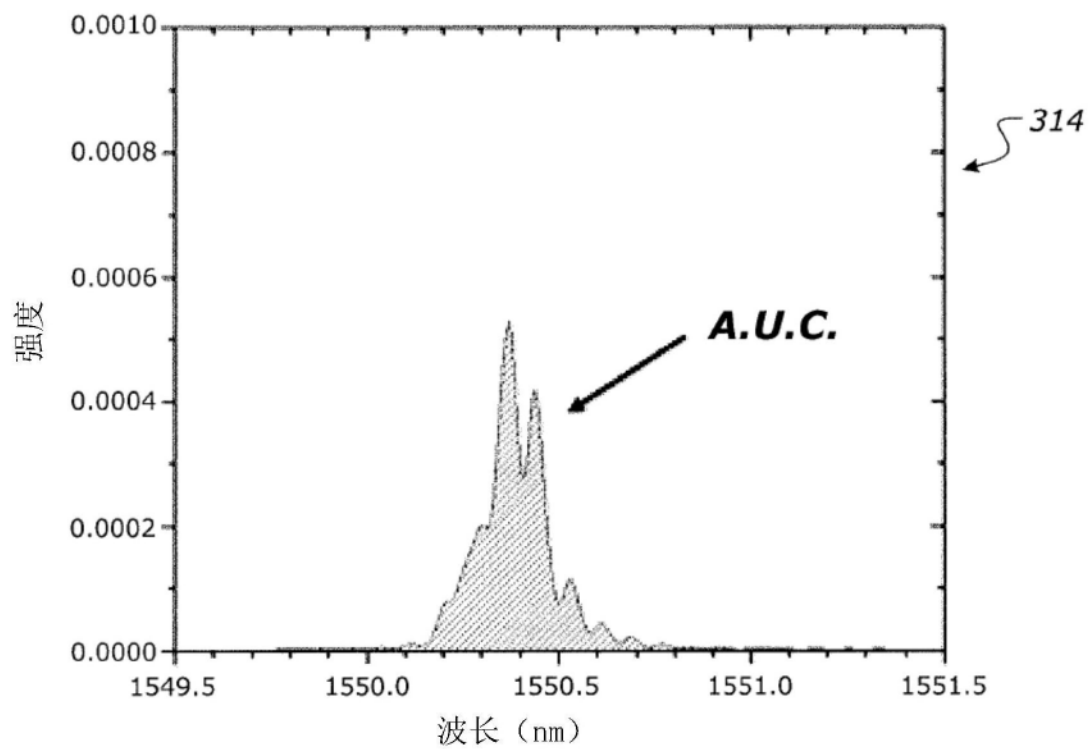


图9A

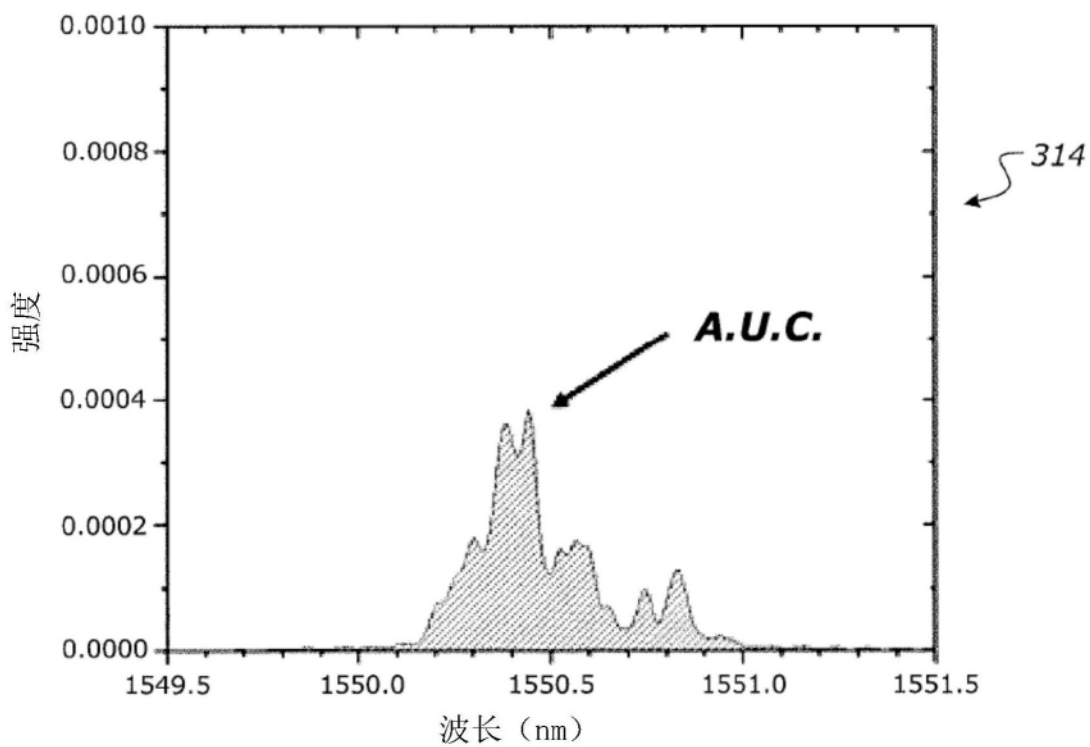


图9B

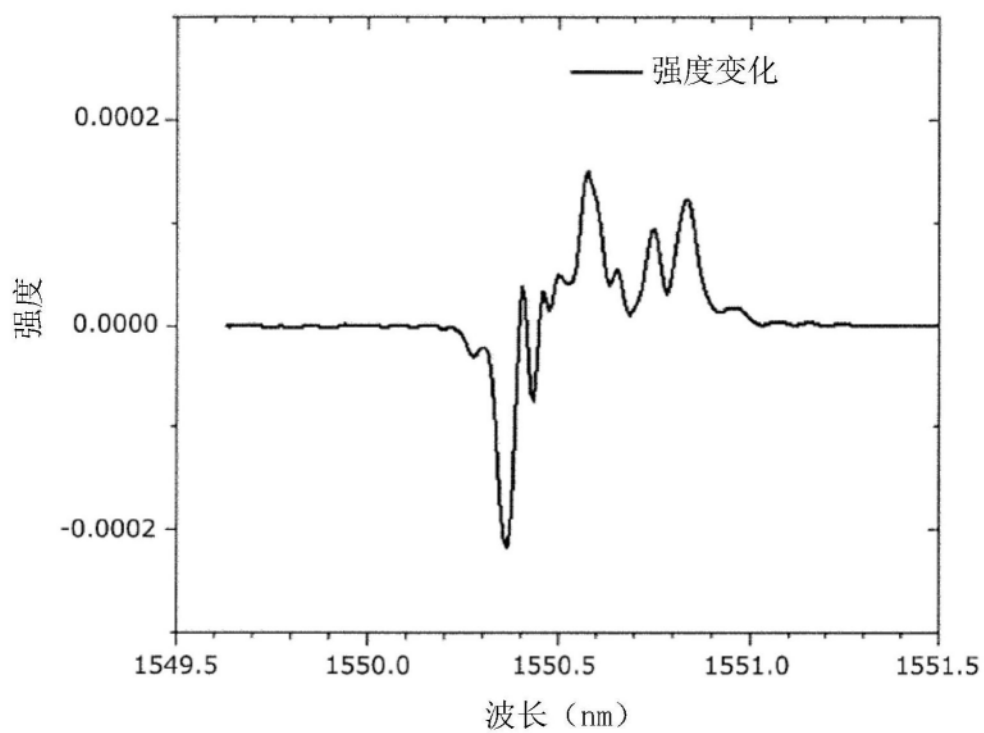


图10A

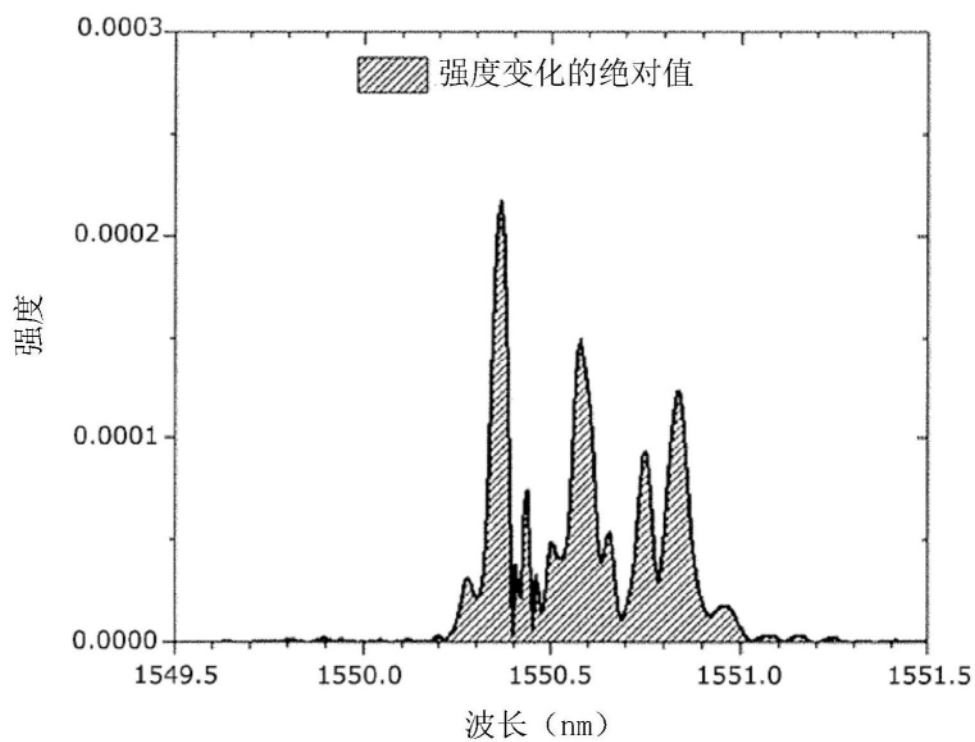


图10B

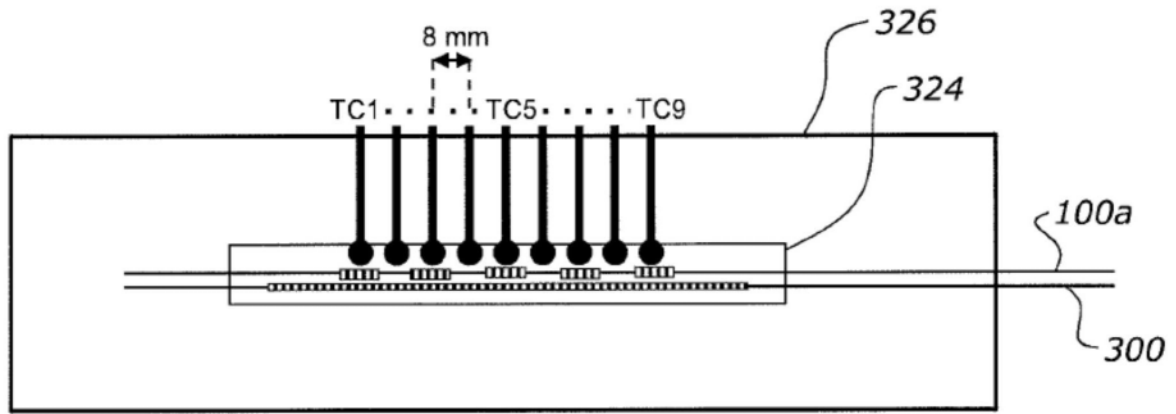


图11

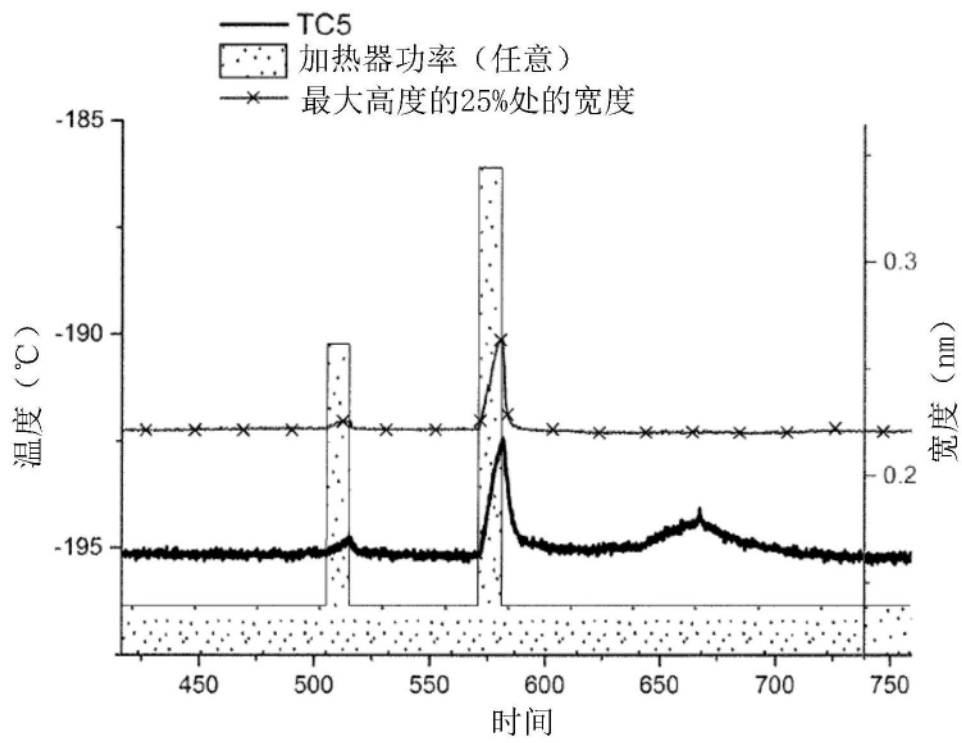


图12A

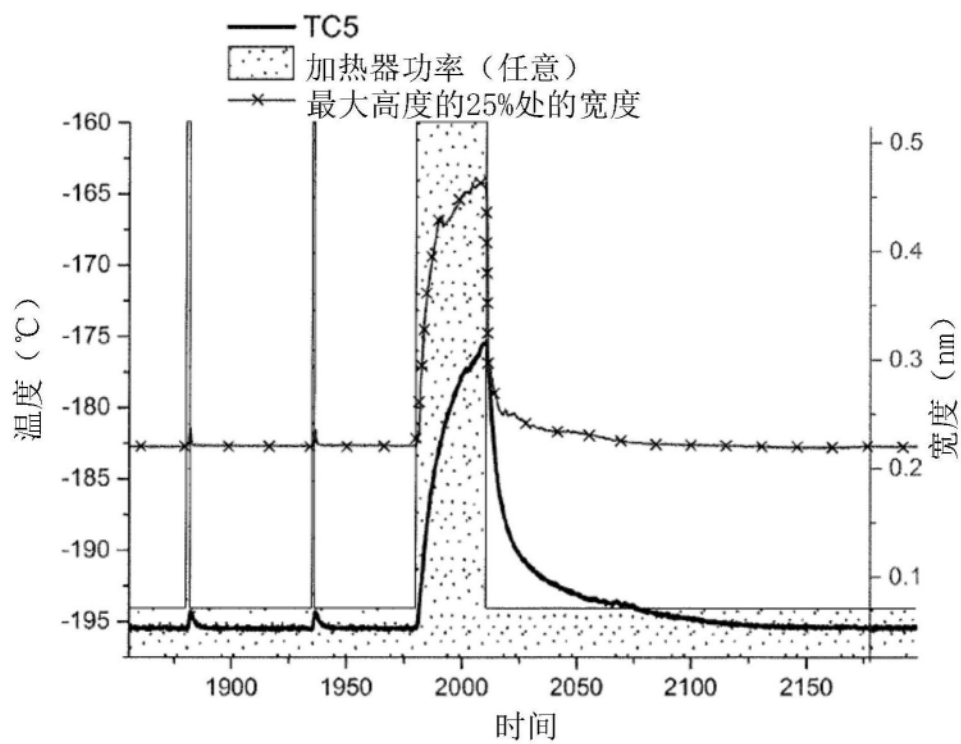


图12B

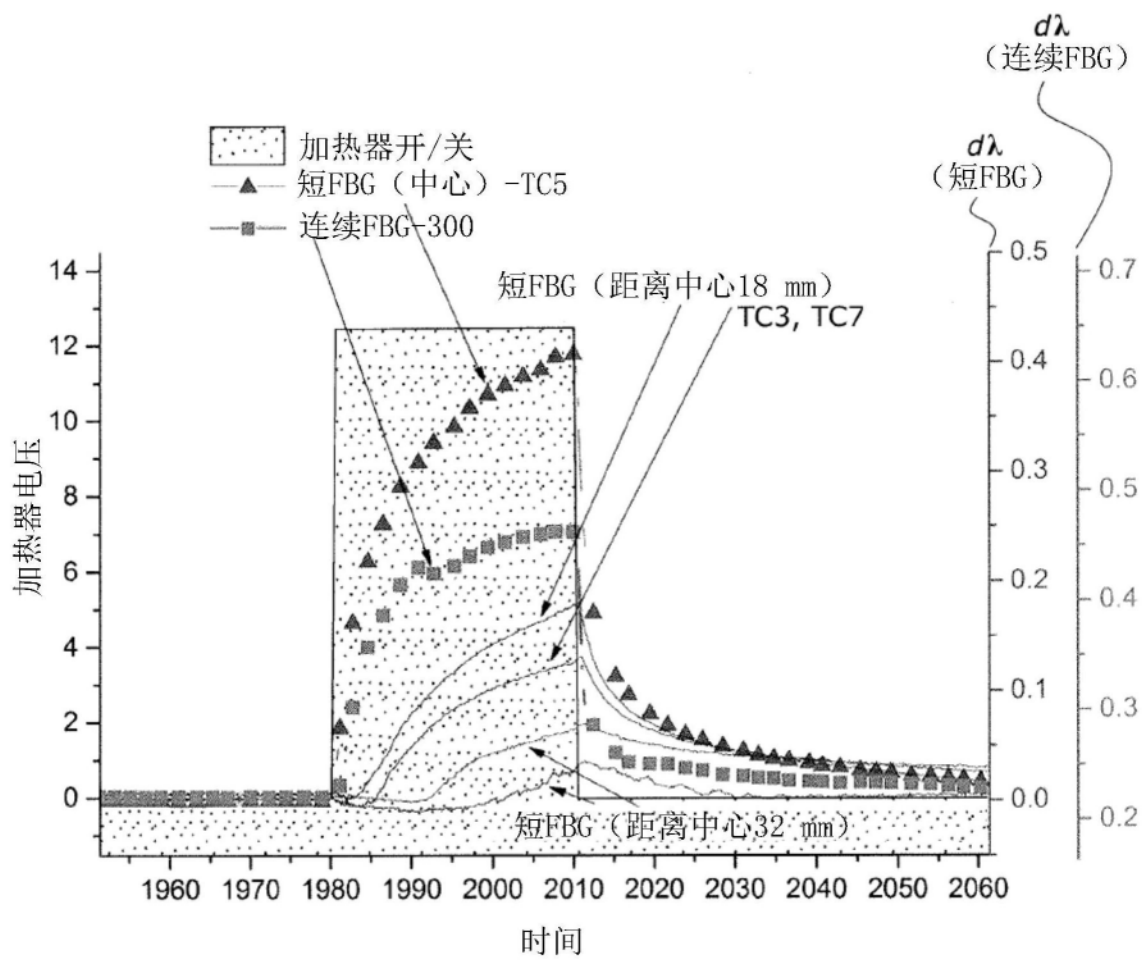


图13

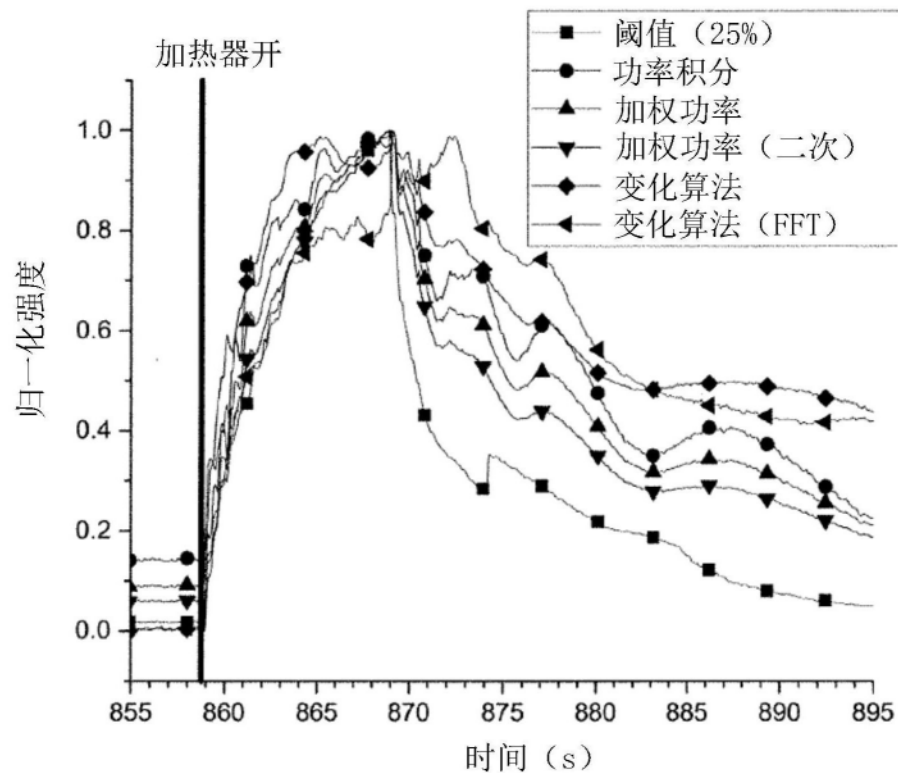


图14A

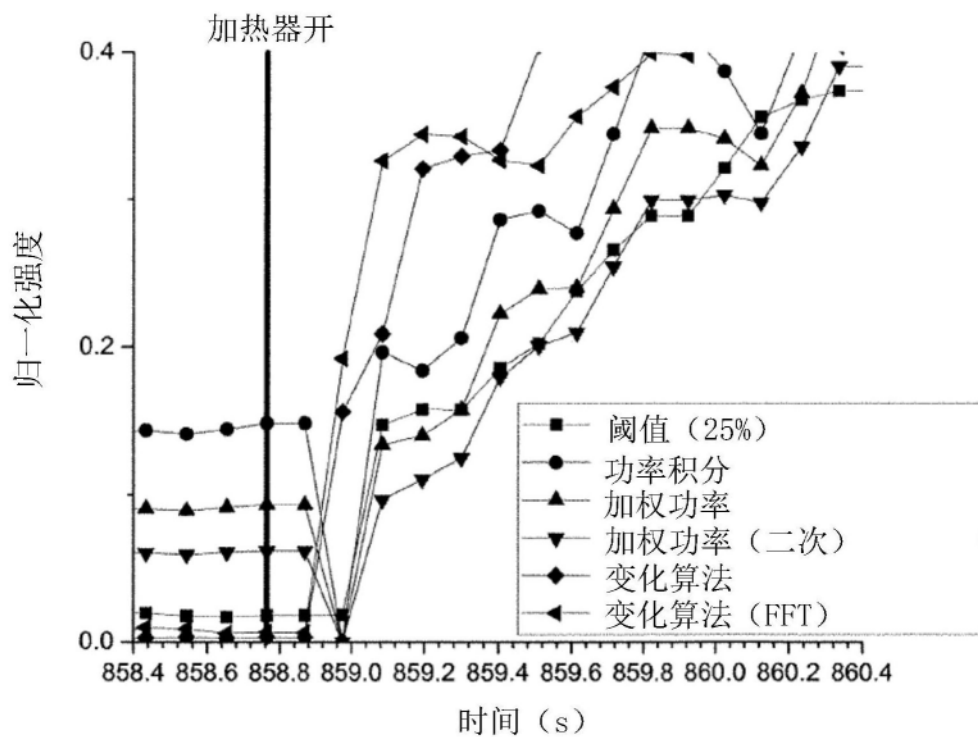


图14B

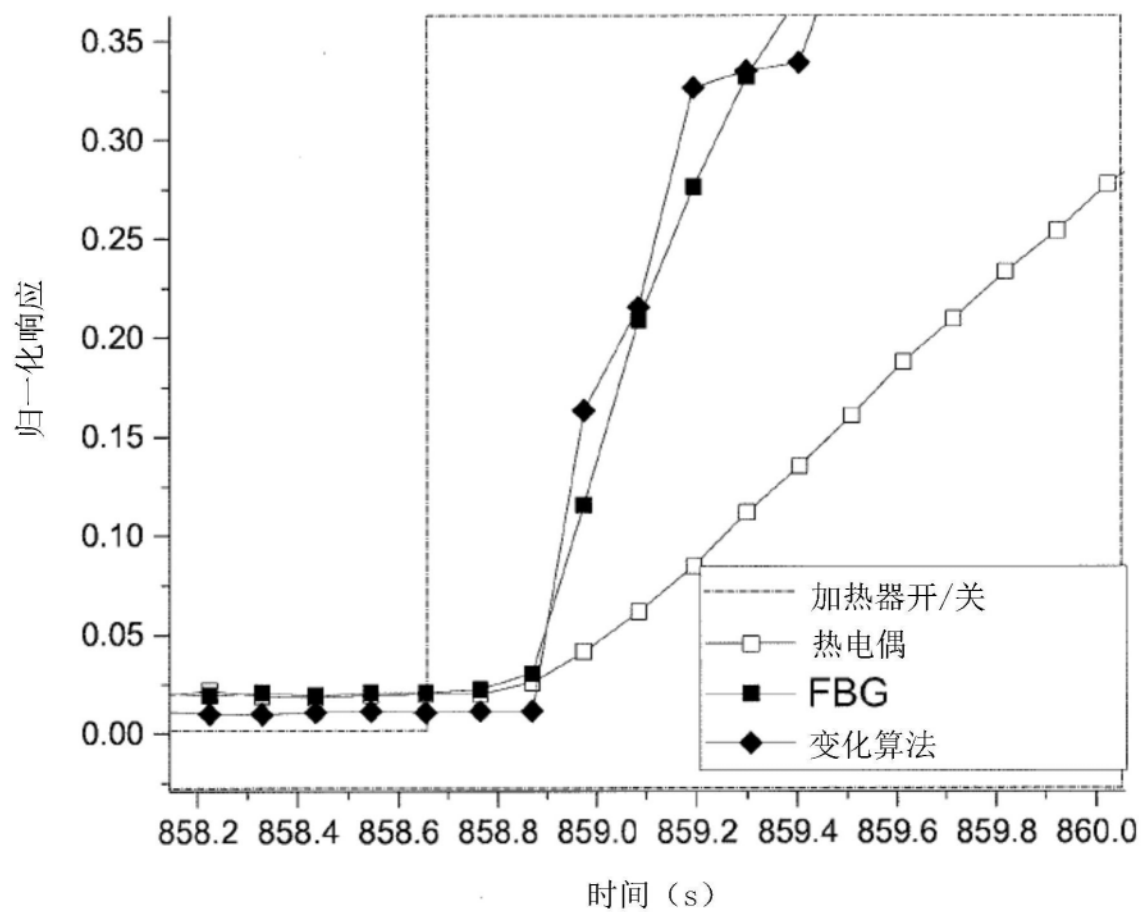


图15