



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200480008733.4

[45] 授权公告日 2008 年 11 月 26 日

[11] 授权公告号 CN 100437165C

[22] 申请日 2004.3.31

US5042905A 1991.8.27

[21] 申请号 200480008733.4

US2002/0181856A1 2002.12.5

[30] 优先权

US6455851B1 2002.9.24

[32] 2003.3.31 [33] US [31] 60/459,108

CN1343873A 2002.4.10

[86] 国际申请 PCT/US2004/010048 2004.3.31

EP0766080A1 1997.4.2

[87] 国际公布 WO2004/090496 英 2004.10.21

US6016372A 2000.1.18

[85] 进入国家阶段日期 2005.9.29

US4360372A 1982.11.23

[73] 专利权人 佐勒技术公司

US5802222A 1998.9.1

地址 美国科罗拉多

US6160255A 2000.12.12

[72] 发明人 安德鲁·D··萨匹

审查员 房元锋

詹姆斯·豪厄尔 亨里克·霍夫范德
B··P··马斯特森[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

代理人 杜日新

[56] 参考文献

权利要求书 6 页 说明书 30 页 附图 6 页

US5960129A 1999.9.28

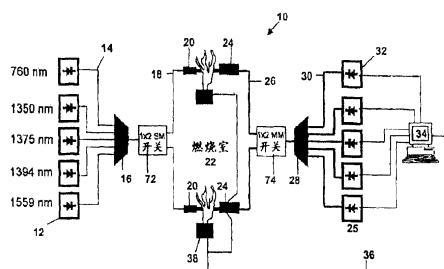
US2002/0158202A1 2002.10.31

[54] 发明名称

监视与控制燃烧过程的方法与设备

[57] 摘要

传感设备，包括多于一个具有选择激光频率的二极管激光器、与上述二极管激光器的输出光耦合的复用器而此复用器再光耦合投射侧光纤。复用的激光经此投射侧光纤传至与一可以是燃煤或燃气发电设备的燃烧室或锅炉的处理室有效结合的投射光学件。此投射光学件定向成将复用激光输出投射通过此处理室。此外，由此处理室有效定向的是一与该投射光学件光通信以接收投射通过此处理室的复用激光输出的捕集光学件。此捕集光学件光耦合一将此复用激光输出传给分用器的光纤。此分用器分用上述激光并将所选激光频率的光光耦合到一对此所选激光频率之一敏感的探测器。



1. 一种传感设备，包括：

一个以上的二极管激光器，各具有一选择的激光频率；

光耦合到这一个以上的二极管激光器的复用器，此复用器输出复用的激光输出，此复用的激光输出光耦合到投射侧光纤的近端；

光耦合到此投射侧光纤远端的有源投射光学件，此有源投射光学件有效地与一处理室结合并定向成将该复用激光输出投射通过此处理室；

有效地与此同有源投射光学件光通信的处理室结合的有源捕集光学件，接收投射通过此处理室的复用激光输出；

在近端与此有源捕集光学件光耦合的捕集侧光纤；

与此捕集侧光纤的远端光耦合的分用器，此分用器分用各个选择激光频率的激光；以及

与此分用器光耦合的探测器，此探测器对所选激光频率之一敏感。

2. 根据权利要求 1 所述的传感设备，它还包括：

使上述一个以上的二极管激光器的各个与上述复用器光耦合的输入光纤；以及

使上述分用器的输出耦合上述探测器的输出光纤。

3. 根据权利要求 1 所述的传感设备，其中所述投射侧光纤是单模光纤。

4. 根据权利要求 1 所述的传感设备，其中所述捕集侧光纤是多模光纤。

5. 根据权利要求 1 所述的传感设备，还包括：

与所述投射侧光纤远端光耦合的投射侧光路选择装置，此光路选择装置还与一个以上投射光学件光耦合；

与所述捕集侧光纤近端光耦合的捕集侧光路选择装置，此捕集侧光路选择装置还与一个以上捕集光学件光耦合。

6. 根据权利要求 5 所述的传感设备，其中所述投射侧光路选择装

置是光开关或分光器。

7. 根据权利要求 1 所述的传感设备，还包括数据处理系统用以从探测器接收输入并确定燃烧参数。

8. 根据权利要求 7 所述的传感设备，还包括用来影响燃烧参数与上述数据处理系统有效结合的装置。

9. 根据权利要求 1 所述的传感设备，其中所述复用器与分用器之一包括中阶梯光栅。

10. 根据权利要求 9 所述的传感设备，其中所述复用器与分用器之一还包括：

复用光波导，它传播多个复用作单一光信号的不同波长的光信道；

准直或聚焦光学件，它以选定的焦距与上述复用光波导耦合；以及

与上述准直或聚焦光学件光耦合的中阶梯光栅，此中阶梯光栅包括槽纹间距与闪耀角，用来同时分用或复用多个波长范围，使各个波长范围集中于多个中心波长周围且此各个中心波长对应于中阶梯光栅工作的一个选择级。

11. 根据权利要求 10 所述的传感设备，其中所述多个不同波长的光信道，其范围从波长 $\geq 670\text{nm}$ 至波长 $\leq 5200\text{nm}$ 。

12. 根据权利要求 10 所述的传感设备，其中所述中阶梯光栅的选择级是从第 2 级至第 14 级。

13. 根据权利要求 10 所述的传感设备，其中所述中阶梯光栅的槽纹间距是 171.4 线/mm 而所述中阶梯光栅的闪耀角为 52.75°。

14. 根据权利要求 2 所述的传感设备，其中所述复用器光耦合到所有的激光二极管中几个之上，还包括使所述投射侧光纤的远端与一未复用输入光纤的远端耦合的光耦合器，此光耦合器将来自投射侧光纤的复用激光与来自未复用输入光纤的未复用激光进行光耦合，此光耦合器与所述投射光学件光耦合。

15. 根据权利要求 14 所述的传感设备，其中所述光耦合器通过选定长度的传输光纤与投射光学件光通信，而此传输光纤的这段长度是

选择成将模噪声电平保持于选择电平之下。

16. 根据权利要求 15 所述的传感设备，其中所述复用激光范围的波长范围从 1240nm 至 5200nm 而未复用激光波长小于 1240nm。

17. 根据权利要求 14 所述的传感设备，其中所述光耦合器通过选定长度的传输光纤与投射光学件光通信，此传输光纤的上述长度选择成使未复用的激光在通过传输光纤传输时不会变为多模的。

18. 根据权利要求 17 所述的传感设备，其中所述传输光纤长度 ≤ 3 米。

19. 根据权利要求 1 所述的传感设备，还包括用机械方式操纵一段所述捕集侧光纤以使捕集侧模噪声最小的装置。

20. 根据权利要求 19 所述的传感设备，其中所述捕集侧光纤具有平行于光纤长向的纵轴线，而所述机械式操纵包括使此捕集侧光纤绕所述纵轴线转动。

21. 根据权利要求 20 所述的传感设备，其中所述以机械方式操纵上述这段捕集侧光纤的装置包括有效地与此捕集侧光纤结合的马达，以使这段光纤相对于此马达的轴位置接附上，而此马达的轴则重复地转过 $+360^\circ$ 与 -360° 。

22. 根据权利要求 21 所述的传感设备，其中所述马达轴的摆动频率足以有效地均化所传输的信号以减少捕集侧模噪声的影响。

23. 根据权利要求 22 所述的传感设备，其中所述马达轴的摆动频率 $\geq 10\text{Hz}$ 。

24. 根据权利要求 1 所述的传感设备，还包括有效地与所述捕集侧光学件结合的捕集侧校直机构，用于使捕集光学件相对于所述复用激光输出的投射方向校直，以增大耦合到捕集侧光纤中的激光量。

25. 根据权利要求 24 所述的传感设备，其中所述捕集侧校直机构包括使所述捕集光学件沿第一与第二相互正交的轴线倾斜的装置，此第一与第二轴线两者都与所述复用激光输出的投射方向正交。

26. 根据权利要求 25 所述的传感设备，其中使捕集光学件倾斜的所述装置包括步进马达。

27. 根据权利要求 26 所述的传感设备，还包括数据处理系统，所述数据处理系统有效地与所述捕集侧校直机构相结合，而此数据处理系统从与所述捕集侧光纤光耦合的探测器接收有关耦合到此探测器中的复用激光输出的强度，还使此捕集侧校直机构校直此捕集光学件成使得耦合到此探测器的所述复用激光输出强度最大化。

28. 根据权利要求 27 所述的传感设备，还包括投射侧校直机构，用以校直所述投射光学件和调节所述复用激光输出的投射方向。

29. 根据权利要求 28 所述的传感设备，其中所述投射侧校直机构包括使投射光学件沿基本上垂直于所述复用激光输出投射方向的所述第一与第二轴线倾斜的装置。

30. 根据权利要求 29 所述的传感设备，其中所述使所述投射光学件倾斜的装置包括步进马达。

31. 根据权利要求 30 所述的传感设备，其中所述数据处理系统还使得所述投射侧校直机构校直该复用激光输出，以使为所述捕集光学件接收与耦合到探测器中的复用激光输出的强度最大。

32. 一种传感燃烧过程的方法，此方法包括：

提供多个选择激光频率的激光；

复用此激光；

沿投射侧光纤将此复用激光传至与处理位置相关的一个有源投射侧光学件；

将从有源投射侧光学件来的此复用激光投射通过燃烧过程；

用与捕集侧光纤相光连通的有源捕集侧光学件接收此复用激光；

分用此复用激光；

将分用激光的频率传送给探测器。

33. 根据权利要求 32 所述方法，还包括根据上述探测器的输出测定燃烧参数。

34. 根据权利要求 33 所述方法，还包括根据上述测定的燃烧参数来控制燃烧过程。

35. 一种中阶梯光栅基的二极管激光器光谱法气体传感设备，此

设备包括：

具有选择的激光频率的一个以上二极管激光器；

与此二极管激光器光耦合的输入中阶梯光栅，此输入中阶梯光栅具有选择的槽纹间距与选择的闪耀角，用以在选择的复用频率下复用激光；

以其近端光耦合此中阶梯光栅而从此中阶梯光栅接收复用的激光的光纤；

与上述光纤远端光耦合的有源投射光学件，此有源投射光学件有效地与处理室结合且定向成将激光投射通过此处理室；

与此有源投射光学件光通信的输出中阶梯光栅，此输出中阶梯光栅具有选择的槽纹间距与选择的闪耀角，用以在选择的激光频率下分用激光；

对光耦合到相应分用激光频率的上述选择的激光频率之一敏感的探测器。

36. 根据权利要求 35 所述中阶梯光栅基的二极管激光器光谱法气体传感设备，还包括与所述投射光学件光通信同时与所述输出中阶梯光栅光通信的捕集光学件。

37. 根据权利要求 35 所述中阶梯光栅基的二极管激光器光谱法气体传感设备，还包括一个以上准直光学件，其中的一个准直光学件光耦合在所述输出中阶梯光栅与一对应探测器之间。

38. 根据权利要求 35 所述中阶梯光栅基的二极管激光器光谱法气体传感设备，其中各所述输入中阶梯光栅和输出中阶梯光栅还包括槽纹间距与闪耀角，用以同时分用/复用多个波长范围，而这多个波长范围的每一个都集中于多个中心波长周围，且此各个中心波长对应于阶梯光栅工作的一个选择级。

39. 根据权利要求 38 所述中阶梯光栅基的二极管激光器光谱法气体传感设备，其中多个所述激光频率的波长范围从波长 $\geq 670\text{nm}$ 到波长 $\leq 5200\text{nm}$ 。

40. 根据权利要求 38 所述中阶梯光栅基的二极管激光器光谱法气

体传感设备，其中所述中阶梯光栅的选择级为第 2 级至第 14 级。

41. 根据权利要求 38 所述中阶梯光栅基的二极管激光器光谱法气体传感设备，其中所述中阶梯光栅的槽纹间距是 171.4 线/mm 而所述中阶梯光栅的闪耀角为 52.75°。

42. 根据权利要求 35 所述中阶梯光栅基的二极管激光器光谱法气体传感设备，其中所述输入中阶梯光栅与所述输出中阶梯光栅不是单一光栅。

43. 一种用于二极管激光器光谱法的投射侧光学系统，它包括：

具有选择激光频率的一个以上的激光二极管，各激光二极管耦合一输入光纤的近端；

与全部输入光纤中的几个的远端耦合的复用器，此复用器将来自全部输入光纤中的几个的复用激光与投射侧光纤的近端光耦合；

光耦合所述投射侧光纤的远端与未复用输入光纤远端的耦合器，此耦合器将来自所述投射侧光纤的复用激光与来自所述未复用输入光纤的未复用激光耦合入传输光纤的近端；

与上述传输光纤的远端光耦合的有源投射光学件。

44. 根据权利要求 43 所述投射侧光学系统，其中所述输入光纤、投射侧光纤以及传输光纤都是单模光纤。

45. 根据权利要求 43 所述投射侧光学系统，其中所述传输光纤的长度经选择成将模噪声保持可选择电平之下。

46. 根据权利要求 45 所述投射侧光学系统，其中所述复用激光波长范围为 1240nm 至 5200nm 而未复用激光的波长小于 1240nm。

47. 根据权利要求 46 所述投射侧光学系统，其中所述传输光纤选择成使得未复用激光在通过此传输光纤时不会成为多模的。

48. 根据权利要求 47 所述投射侧光学系统，其中所述传输光纤长度≤3 米。

监视与控制燃烧过程的方法与设备

技术领域

本发明涉及监视与控制燃烧过程的方法与设备，具体涉及应用可调谐二极管激光吸收光谱法监控燃烧过程。

背景技术

在美国，所产生的电功率中有很大百分比是来自燃烧发电设备。类似地，世界范围内的电力生产也多数依靠煤为初始能源。煤在可以预见的未来很可能仍将作为初始能源，只要是仍存在着因储存核能生产作业中的废料涉及到长期性的环境问题以及太阳能发电的低效率问题。此外，整个世界上煤的现有储量按当前的发电率至少足用 200 年。

但是，现今存在着并将继续有着减小燃煤发电过程的排污和提高其总效率的强烈要求。传统上，发电厂与其他工业燃烧设备中，燃烧过程的效率与排污的水平是以例如非分散型红外 (NDIR) 光度测定法一类技术，通过对提取的气体试样进行测量而间接测定的。提取采样系统并不特别适用于闭环控制的燃烧过程，这是由于在气体提取与最终分析二者的时间之间存在着显著的延时，此外，提取过程一般会导致单一点上的测量结果，而此结果则可能或不可能代表高度变化与动态性的燃烧室内所测物质的实际浓度。

基于激光的光学类传感器业已用来解决与提取测量技术有关的问题。基于激光的测量技术可以在现场实施，还能提供适于动态过程控制的高速反馈优点。用来测量燃烧气体成分、温度与其他燃烧参数的一种特别看好的技术是可调谐二极管激光吸收光谱法 (TDLAS)。TDLAS 通常用在近红外与中红外区工作的二极管激光器来实施。适用的激光器业已在电信工业的应用中广泛地研制成功，因而能迅即供 TDLAS 应用。以不同程度适用于传感与控制燃烧过程的 TDLAS 的各

种技术业已开发成功。

周知的技术为波长调制光谱法、调频光谱法与直接吸收光谱法。每种方法都是根据探测器在激光业已传递过燃烧室并在表征此过程或燃烧室中存在的气体的特殊波段被吸收后所接收到的激光光量与性质之间的预定关系。为此探测器所接收的吸收光谱用来测定所分析的各种气体量以及相关的燃烧参数如温度。

例如，Von Drasek 等的美国专利申请系列 No. 2002/00 317 37 A1 提出了将可调谐二极管激光器用来监视和/或控制高温过程。Von Drasek 此专利申请的特征在于用直接吸收光谱法测定众多的燃烧物质、温度与其他参数。Calabro 的美国专利 No. 5813767 提出了类似的系统用来监控燃烧室中进行的燃烧与产生的污染物。Calabro 利用一种间接光谱技术，其中将所观察到的吸收特性曲线形状的多普勒谱线增宽用作温度分析基础。

Teichert、Fembolz 与 Ebert 将作为周知的试验室分析技术的 TDLAS 推展为可操作的现场技术方案，到用来传感满负荷的燃煤发电设备锅炉火球内某些燃烧参数。上述三位作者在他们的论文

“Simultaneous in situ Measurement of CO、H₂O and Gas Temperature in a Full-Sized, Coal-Fired Power Plant by Near-Infrared Diode Lasers,” (Applied Optics, 42(12): 2043, 20 April 2003) 中，提出了对燃煤发电设备有效地实现直接吸收光谱法，同时讨论了由于这种燃煤过程的规模极大及其激烈的性质带来的某些技术问题。尤其是一些典型的燃煤发电设备具有直径达 10-20 米的燃烧室，这类设备燃烧粉碎的煤，使得由于高的粉尘负荷妨碍了激光透过而在同时又极端的耀眼，由于宽广波段上的吸收、颗粒所致散射或折射率波动引起的光束转向，导致通过这种处理室的光的总透过率急剧变动。还存在着来自燃烧中的煤粒的热背景辐射，这种辐射会干扰探测器信号。这类发电设备的外部环境也会给 TDLAS 传感或控制系统的实施带来问题。例如，任何电子的、光学的或其他的敏感光谱元器件，都必须远离强热或加以合适的屏蔽与冷却。

尽管在上述条件下极难实施 TDLAS 系统，但 TDLAS 却是特别适合监视与控制燃煤过程。本发明便是用来解决一或多个上述实施 TDLAS 时的问题。

发明内容

本发明的一个方面是传感设备，它包括一或多个具有选定的激光频率的二极管激光器、与此二极管激光器的输出光耦合的复用器，而此复用器又与一投射侧光纤光耦合。复用的激光经投射侧光纤传至一与处理室有效关联的投射光学件，此处理室则可以是燃煤或燃气发电设备的燃烧室或锅炉。此投射光学件定向成通过处理室投射复用的激光输出。此外，由此处理室有效定向的是与上述投射光学件作光通信的捕集光学件，用来接收通过此处理室投射的复用激光输出。在此用到的“耦合”、“光耦合”或“与...作光通信”，定义为两配对部件的功能关系，这里的光可以从第一部件传至第二部件，通或不通过中间部件或自由空间。此捕集光学件光耦合到一将复用激光输出传至分用器的光纤。此分用器分用激光并将选择了激光频率的光光耦合至一探测器，使此探测器对所选激光频率之一敏感。或者，上述传感设备也可使各激光二极管在该复用器与探测器光耦合到该分用器的输出光纤之前与一不同的相对应的输入光纤耦合。上述投射侧光纤可以是单模光纤而捕集光纤可以是多模光纤。或者，上述传感设备还包括一投射侧光路径选择装置，它与投射侧光纤耦合且对与处理室有效关联的多于一对的投射与捕集光学件的复用激光输出作路径选择。上述光路径选择装置可为光开关、分光器或其他当前通用的电信光路选择设备。或者，此传感设备还可包括数据处理系统，它接收探测器的输入并应用周知的激光光谱技术，根据探测器数据测定燃烧参数。此传感设备还可具有根据数据处理系统的输出改变燃烧参数的装置。例如此传感设备可以对燃烧输入例如气流、燃料流或催化剂或化学试剂添加物提供闭环控制，而这种控制依据数据处理系统确定的燃烧参数。响应此数据处理系统。

上述传感设备可将一中阶梯光栅用于此复用器或分用器中。复用器或分用器的其他元器件还可包括光波导与准直/聚焦光学件。与准直/聚焦光学件耦合的反射式中阶梯光栅通常见有一纹槽间距和闪耀角，给多个范围的广为分开的波长提供同步分用。适用的中阶梯光栅通常能够复用或分用从等于或大于 670nm 的波长至等于或小于 5200nm 的波长。为了实现上述目标，此中阶梯光栅应在衍射级从第二级到至少第四级下工作。这样的中阶梯光栅通常具有纹槽间距约 171.4 线/mm 而闪耀角约 52.75°。

或者，此传感设备可以具有光耦合到少于全部二极管激光器上的复用器，同时还包括与此复用器输出以及与任何未复用的二极管激光器的独立输出耦合的光耦合器。在这一非限制性的实施例中，上述光耦合器将通过选定长度的传输光纤与投射光学件光通信。例如，此传输光纤可以由长度≤3 米的实现，并由 Corning SMF 28 光纤制成，这样将保证在波长小于 1240nm 特别是在 760nm 时，在通过此传输光纤传送时不会成为多模的。

上述传感设备还可包括用机械方法操纵一段捕集侧光纤以使模噪声最小。用来由机械方式操纵一段捕集侧光纤的适当装置包括具有与捕集侧光纤的纵轴线平行的轴的马达，此马达接附到光纤上，提供围绕上述纵轴线的旋转作用。这种旋转运动可以包括以至少 10Hz 的速率作转过+360°与-360°的摆动，以有效地均化所发送的信号而由此减少捕集侧的模噪声。

或者，此传感设备还可包括与捕集光学件关联的捕集侧校直机构，用以为捕集光学件相对于复用激光输出的投射方向提供校直，此准直机构可以加大捕集光学件从投射光学件接收的和由此耦合到捕集侧光纤的激光量。此准直机构可以包括一装置用来让此捕集光学件沿一第一轴线以及与此第一轴线正交的第二轴线倾斜，而此第一与第二轴线两者基本上都与复用激光输出的投射方向正交。可以采用步进马达使此捕集光学件倾斜，同时还可使一数据处理系统上此捕集侧机构关联，并从上述探测器接收与耦合到此探测器的复用激光输出强度相关的数

据，而使此捕集侧校直机构将捕集光学件校直。也可以换一种方式，将独立的校直光束投射到此捕集光学件上用作校直基准。可以在传感设备的投射侧实现一类似的校直机构，用来校直投射光学件并调节已复用的激光输出的投射方向。

本发明的另一个方面是一种传感燃烧过程的方法，包括在多个选择的激光频率下提供激光，复用此激光，于投射侧光纤中将此复用激光传至一处理位置。此处理位置可以是燃烧室，例如燃气或燃煤的发电设备的锅炉。在将复用激光传至此处理位置后，此方法还包括通过燃烧过程将此复用激光投射，于捕集侧光纤中接收此复用激光，分用此复用激光并将此分用激光的频率传送给探测器。或者，此方法还包括根据此探测器的输出测定燃烧参数以及依据此测定的燃烧参数控制燃烧过程。

本发明的另一个方面是 - 基于二极管激光器光谱法气体传感设备的中阶梯光栅，此设备包括多个一个的具有选择激光频率的二极管激光器，此种激光器光耦合到一输入中阶梯光栅，具有选择槽纹间距与选择闪耀角提供给在选择激光频率下的激光进行复用。前述设备还包括与该中阶梯光栅输出光耦合并从此中阶梯光栅接收复用激光的光纤。此外，有一投射光学件光耦合该光纤的远端且以此投射光学件有效地与一处理室关联，而此处理室可以是一燃烧室，同时此投射光学件还取向成使此激光通过此处理室投射。此设备还包括一与上述投射光学件光通信的输出中阶梯光栅，而此输出中阶梯光栅具有的选择槽纹间距与选择的闪耀角则提供用来分用选择激光频率下的激光。此外，有敏感上述选择激光频率之一的多于一个的探测器与输出中阶梯光栅光耦合。本发明上述方面的设备还可包括与此投射光学件光通信且与输出中阶梯光栅光通信的捕集光学件。再有，一或多个准直光学件可光耦合于此中阶梯光栅与对应探测器之间。此激光二极管光谱法气体传感设备的中阶梯光栅可以有一槽纹间距和闪耀角，得以同步地分用复用多个范围的广为分开的波长。合适的中阶梯光栅可以（去）复用具有从波长 $\geq 670\text{nm}$ 直到滤长 $\leq 5200\text{nm}$ 的光信道。这种中阶梯光栅可

以从二极工作到四级衍射，并可以具有约 171.4 线/mm 与约 52.75° 闪耀角的槽纹间距。

本发明的另一个方面是传感燃烧过程的方法，包括提供多个选择频率下的激光、由中阶梯光栅复用此激光、通过燃烧过程投射此复用激光，由中阶梯光栅分用此复用激光，将分用激光的频率传送给一探测器。此方法还可包括根据此探测器的输出确定燃烧参数并依据所测定的燃烧参数控制燃烧过程。

本发明的另一个方面是一用于二极管光谱法的投射侧光学系统，包括一个以上具有选择激光频率的二极管激光器，每个二极管激光器耦合到不同输入光纤的一端。此投射侧光学系统还包括一复用器，此复用器光耦合到个数少于全部输入光纤的另一端，且由此复用器将复用激光输出给投射侧光纤。一般，这些二极管激光器与复用器将罩入一远离燃烧处理室的气候调节室内。上述投射侧光纤还包括一光耦合着投射侧光纤远端以及一未复用的输入光纤远端的耦合器，由此耦合器结合复用的激光与未复用的激光且将此结合的光输出给一传输光纤。通常，上述耦合器是位于燃烧过程进行处的附近。上述投射侧光学系统还包括一耦合此传输光纤的投射光学件。典型的情形下，用于此投射侧光学系统中的所有光纤为单模光纤。可以选择这种传输光纤的长度使噪光最小。特别是当波长较短例如 760nm 的激光已与波长较长例如 1240-5200nm 的激光复用，且此复用的光束已沿合运的市售通信光纤传输，而这种通信光纤在整个传输光谱上又未显现出高比例的弯曲与其他传输损耗时，则较短的波长在传输较远的距离时有可能变为多模的。这样，可以选择传输光纤的长度得以最小限度地形成模噪声。例如长度≤3 米且为 Corning SMF 28 的传输光纤，能够将波长 760nm 的激光从上述耦合器传至投射光学件而不会引入有影响的多模行为。

本发明的另一方面是用于二极管激光光谱法的捕集侧光学系统，它包括光耦合到捕集侧多模光纤的捕集侧光学件以及用机械方式操纵一段捕集侧光纤以使捕集侧模噪声最小的装置。上述机械式操纵可以

是使捕集侧模光纤绕其纵轴线旋转。以此方式机械式操纵这段捕集侧多模光纤的装置可以是与此多模光纤相结合的马达，使得有一段光纤相对于马达的轴位置固定地保持住而此马达轴则重复地转过+360°与-360°。此马达轴的旋转频率可以是至少 10Hz 而能有效地均化所传输的信号，以减少捕集侧模噪声的影响。

本发明的另一个方面是二极管激光器光谱法气体传感设备，它包括具有选择激光频率的二极管激光器、与此二极管激光器耦合的投射光学件，此投射光学件能有效地与一处理室相关联且取向成能将激光沿通过此处理室的投射光束投射。本发明的这个方面还包括一与此投射光学件光通信的用以接收通过此处理室投射的激光的捕集光学件以及一与此捕集光学件光耦合的光纤。此外，该捕集光学件有效地与一捕集侧校直机构结合，此校直机构使捕集光学件相对于该投射光束校直，以增大通过此捕集光学件从投射光学件接收的且与光纤耦合的激光量，同时此捕集光学件还有效的与一敏感此选择的激光频率与上述光纤光耦合的探测器结合。上述捕集侧校直机构可包括使捕集光学件沿第一轴线和与此第一轴线正交的第二轴线倾斜的装置，而此第一与第二轴线都与投射光轴基本正交。此用来使捕集光学件倾斜的装置可以是步进马达。上述二极管激光光谱法气体传感设备也可以包括为投射光学件投射而为捕集光学件接收的校直光轴以及一数据处理系统，此系统有效地与探测器和捕集侧校直机构结合，从此接收器接收与校直光束强度有关的数据，且使此捕集侧校直机构将捕集侧光学件与投射光束校直以将与此探测器耦合的校直光束强度最大化。本发明这方面的二极管激光光谱法的气体传感设备还可包括一用来使投射光学件校直和调节投射光束方向的投射侧校直机构。此投射光学件基本上可按前面相对于捕集光学件所述的实施。

本发明的另一个方面是校直二极管激光光谱法气体传感光学系统的方法。此方法包括：提供校直光束、将此校直光束通过一处理室投射、由捕集光学件接收此校直光束，此捕集光学件则与上述处理室有效地结合。此方法还包括将此校直光束通过一光纤与探测器耦合以及

测定从捕集光学件耦合到光纤的校直光束的强度。再有，此方法还包括校直此捕集光学件以使从捕集光学件耦合到此光纤的校直光束强度最大化。这一使二极管激光器光谱法气体传感光学系统校直的方法还包括使此捕集光学件沿第一轴线和与此第一轴线正交的第二轴线。或者，可由一投射光学件将此准直光束投射，此投射光学件则可作同样的校直，使得从捕集光学件耦合到光纤的上述校直光束进一步最大化。

本发明的再另一个方面是由可调谐二极管激光器吸收光谱法来传感燃烧过程中 NO 的方法。此 NO 传感法包括提供波长约 670nm 的激光、使此激光于投射侧光纤内传至燃烧位置、将此激光投射过一燃烧过程、于一捕集侧光纤中接收此激光。此方法还包括将上述激光沿捕集侧光纤内传至一探测器而由此探测器产生一与传于此探测器的与这束激光有关的信号。除此，此方法还包括据上述信号计算 NO₂ 浓度并据此 NO₂ 浓度测定 NO 浓度。上述 NO 传感法可以按下述方法实施：通过由二极管激光器产生波长约 1340nm 的激光，再由准相位匹配的周期性接入的波导将此激光倍频，提供波长为 670nm 的激光。

适用的波导是准相位匹配的周期性探询的铌酸锂波导。

附图说明

图 1 是本发明传感设备的示意图。

图 2 是本发明传感设备的示意图，其特点是位于远处的部件与邻近燃烧室的部件光耦合。

图 3 例示以具有多个传感栅为特征的本发明的一个方面。

图 4 例示先有技术的单光束气体探测设备。

图 5 例示先有技术的多光束气体探测设备。

图 6 例示将中阶梯光栅用于本发明中。

图 7 例示本发明的基于中阶梯光栅的二极管激光器光谱法气体传感设备。

图 8 例示适于用来使模噪声最小化的投射侧光学系统。

图 9 例示与气体传感设备耦合的光纤。

图 10 例示投射光学件与捕集光学件间的光损耗。

图 11 例示光纤系统的角形受光锥。

图 12 是本发明准直机构的示意图。

具体实施方式

如图 1 所示，本发明一实施形式是适用于传感、监视与控制燃烧过程的传感设备 10。此传感设备 10 利用产生选择频率在近红外或中红外光谱段的激光的一系列可调谐二极管激光器 12 所发出的激光，执行可调谐激光吸收光谱法 (TDLAS)，各可调谐二极管激光器 12 的输出耦合一独特的光纤，它可以是单模光纤 14 并通向复用器 16。在此用到的“耦合”、“光耦合”或“与…作光通信”，定义为两配对部件的功能关系，这里的光可以从第一部件传至第二部件，通或不通过中间部件或自由空间。在复用器 16 内，所产生频率中的某些或所有的激光被复用形成具有多个选择频率的复用探测光束。此复用的探测光束耦合到投射侧光纤 18 内，传至一与处理室有效结合的投射光学件 20 或准直仪，此处理室在图 1 中是燃烧室 22。

投射光学件 20 定向成使复用的探测光束通过燃烧室 22。通过整个燃烧室 22 而与投射光学件 22 光通信的是捕集光学件 24。此捕集光学件 24 最好与投射光学件 20 基本上相对且有效地与燃烧室 22 结合。捕集光学件 24 定位并取向成可接收通过燃烧室 22 投射的上述复用探测光束。捕集光学件 24 光耦合一捕集侧光纤 26，它传送复用探索光束的为捕集光学件 24 接收的这部分给一分用器 28。在分用器 28 内，为捕集光学件 24 接收的这部分复用探测光束被分用，而各个波长的分用激光则耦合到一输出光纤 30 内。各输出光纤 30 又光耦合一探测器 32，这通常是对所产生的且复用形成上述探测光束的激光的选择频率之一敏感的光电探测器。探测器 32 根据在探测器频率下传送给它的光的性质与数量产生一电信号，来自各探测器 32 的电信号一般在数据处理系统 34 中数字化并进行分析。后面将要详细讨论到，此数字化与已分析的数据可用来传感处理室内的物理参数，包括但不限于燃烧室 22

内各种气体的浓度以及此室内的燃烧温度。数据处理系统 34 还可用来通过反馈环路 36 将信号发送给燃烧控制设备 38 以有效地控制选择过程参数，在燃烧过程，所控制的过程参数可以包括燃料（例如粉碎的煤）的供给速率、氧供给速率、催化剂或化学试剂的添加率。在传感设备 10 的投射侧与捕集侧两侧上将电子与光学元器件用光纤耦合，就能使精细的与温度敏感的装置如可调谐二极管激光器 12、探测器 32 以及数据处理系统 34 位于具有稳定工作环境的控制室内。这样，只需将较结实的投射与捕集光学件 20、24 置于燃烧室 24 的严荷环境附近。

图 2 示意地给出了光纤耦合的复用传感系统 40 中所有元器件的布设情形。此传感系统 40 一般包括：系统机架 42、断接盒 44、具有投射光学件 48 的发送机头 46、具有捕集光学件 50 且与光纤连接的接收机头、系统机架 42 最好位于距离燃烧室 54 例如 1km 的遥控室内。此遥控室一般应具有适度的环境。系统机架 42 包括激光器 56、探测器 58、波长复用器 60 与波长分用器 62。此系统机架 42 内还装有系统电子器件与控制软件（图 2 中未示明）。系统机架 42 内或也可以设置一准直光源 64。

将系统支架 42 与断接盒 44 连接的光纤是通常标准的单模通信光纤。这种光纤价廉、易购得、损耗低且能使光纤导引到各个现有的用来操作光的电信元器件，例如光开关、分光器与波分复用器。如果不经光纤耦合，激光就必须自始至终通过自由空间导引到燃烧室 54，而这是很难实施的，否则敏感的电子与光学元器件就不得不位于燃烧室 54 的邻近。

图 2 中还示明一断接盒 44，它是位于锅炉附近的加固的机壳，其中包含光开关、分光器以及如下所述可用来将光信号导引到成对的、多个发送机一接收机头的耦合器（总计为 66）。

图 2 所示的第三组系统元器件是发送机与接收机头 46、50。这些机头 46、50 中的光学件与电子器件需将光纤 68 中的光变换为校直光束，并将此光束精确地引导通过燃烧室 54，使此光束俘获到燃烧室 54 的远侧再耦合入光纤 70。为完成上述过程所选择的光学件取决于传输

距离、燃烧区的扰动、扰动对所传送的光束的影响、光纤 70 的芯子直径。光纤芯子直径最好有 50 微米，但这是所折衰的结果：较大的纤芯可俘获较多的激光而同时也会截获更多的背景光。于捕集（接收器）侧上作光纤耦合具有若干优点。特别是只有在与激光处于同一位置且按同一方向行进的光才会聚焦到光纤 70 内。这样就能显著减少所传感的背景光量。在另一实施形式中，可将光俘获到若干接收器光纤之一中，而光开关或其他的光路径选择装置则可从一根光纤中选择光束通到探测器 58。

在捕集侧应用光纤耦合要求精确地保持发送机与接收机光学件的对准误差（发送机与接收机两者指向小于 0.5 毫弧度）。下面讨论的校直系统易于在严荷的发电设备环境中满足上述公差要求。此投射光学件 48 与捕集光学件 52 最好都是专门设计的，并相对于 660-1650nm 的波长进行过像差校正，以使多个激光信号能在同一时刻有效的传输和接收。

具有多组传感光学件的传感设备

再来参看图 1，其中示意描绘的实施形式的特征是，具有多于一组的与单一燃烧室 22 结合的投射光学件 20 与捕集光学件 24。复用的探测光束可以由路径选择装置选定路径，此路径选择装置如图 1 所示对各组投射光学件 20 可以是一光开关 72。适用的路径选择装置包括光开关与分光器，光开关可以用来为探测光束选择以最小衰减按预定顺序通过各组投射捕集光学件的路径；分光器用来同步地将部分探测光束分送到各组光学件。

类似的一种光路径选择装置在图 1 中是作为一种多模光开关 74 示明的，可以用在此系统的捕集侧，以将各捕集光学件 24 接收的部分的复用探测光束选定通向捕集侧分用器 28 的路径，尽管图 1 表明的实施形式只示明两组投射与捕集光学件，但此系统可以使用任意多组投射与捕集光学件。在此系统的投射侧与捕集侧应用光纤耦合以及分用/复用探测光束，可以由一组激光器 12 与探测器 32 来实现多组投射与捕集光学件。如果不引入光复用技术，对于每对发送器/接收器全部都

要求校正不同组的激光器、探测器与光缆。正如后面将详细讨论到的，多对发送器/接收器允许在整个燃烧室 22 或别处实现一或多个二维传感栅，例如用于传感下游的气体过程，图 3 例示了两个高度简化的传感栅，即一个火球传感栅 76 和一个下游传感栅 78。此外，本发明的光纤耦合性质具有允许采用现有的通信元器件的有益效果。例如可以用纤维光学开关可以用来为复用探测光束选择到不同位置的路径用于测量。可以从许多的供应商处作为现有的元器件立即购到 $1\times N$ 光开关 (N 可以高达 8)。对于 N 高达 16 的这类光开关可以专门订货。

在整个燃烧室内的不同位置处可以采用一个开关和多对投射与捕集光学件序列探测气体种类。对于只需要平均结果的情形。可允许对不同的光路进行序列的探测。但在某些应用中则要求整个传感栅作即时的探测。例如某些燃烧过程流显示出高频率的波动，或者这种过程流可以只是短时间的存在激波管或激波 N2 洞。在这种情形下，可用 $1\times N$ 分光器将探测光束分成 N 分支，每个分支占据此传感栅的不同位置。由于整个传感栅是同时被照明，故可以很快地产生二维分析结果。但同时进行二维分析则可能要求在捕集侧的各个元器件对于各个光束路径是重现的，包括分用器；电子器件如 A/D 卡，在某种程序上还有计算机。

这样，以具有光开关或分光器为特点的上述实施形式使多少简化了由粗层折 X 射线摄影方法对所探测区二维横剖面作重现的工作。利用二极管激光器对气体浓度作层折 X 射线摄影是周知技术，但在本发明中由于采用了波长复用的探测光束还获得了另外的优点。波长复用的光束能同时进行多于一条吸收谱 26 线的光谱分析。于是，依赖于多于一条吸收谱线的 TDLAS 技术，例如在温度测定中，便将如下面详细讨论的能够在整个传感栅上进行。温度与气体种类浓度两者都能用这种方法绘出图像。

层析 X 射线摄影法在 SCR 与 SNCR 中的特殊应用

上述的粗层析 X 射线摄影的特殊应用示意地表明于图 3 中，同时涉及到在 SCR (选择催化还原) 与 SNCR (选择非催化还原) 中注射

氨，以从燃煤或燃气发电锅炉的排出物中将 NO_x 还原。在这种应用中，将氨或脲注射器 80 置入锅炉排出物的物流中。为了使 NO_x 的浓度最低，可将过量的氨（或脲）加入这种排出物中。NO_x 是受到严格管制的极其有害的一族空气污染物。加入的氨以化学方法使 NO_x 还原，作为其产物形成了无害的氮气与水。但是必须使所添加的过量氨（或脲）最小化，这是由于这类化合物本身是有毒的空气污染物且颇为昂贵。通常，过量浓度<3-5ppm 的氨为理想。但在发电设备燃烧排放物中，NO_x 的分布是不均匀的，也非暂稳的。此外，任何时间都可能堵塞一或多个氨注射器，导致氨浓度局部减少从而只是局部地渗过浓集的 NO_x。由于能通过上述的下游 TDLAS 栅 78 传感监视氨或 NO_x 的空间浓度，本发明便可探测与减少不均匀的氨分布。这样，在二维的气体种类浓度下同时通过注射器作分别的控制来优化氨的注射栅 78，便可优化 SCR/SNCR 法。上述探测器与氨注射器可以链接到数据处理系统上，对此氨注射器提供自动反馈控制。

优化的氨滑流探测系统，例如上述的这种，最好还能监视 NO_x 浓度。NO_x 包括 NO 与 NO₂。不幸的是，耐用的 NIR 二极管激光器只能触及到发生在 1.7-1.8 μ m 区中 NO 谐波跃近。这种跃近太弱，若是在大多数排放物的流动中存在较低的浓度，就不能探测 NO。因此，直接监视 NO 浓度是不实际的。但是，NO₂是由形成 NO 的相同过程形成的。这些过程在发电工业中周知为热 NO_x 过程，产生出 NO 与 NO₂两者，在通常条件下 NO 约占 NO_x 总浓度的 95%而 NO₂则为余剩的 5%。两者的确切比率一般取决于环境的温度和氧化势。如上所述，这种方法同样还可用于测定采样气体的温度。但是如所期望的，NO 与 NO₂两者的浓度是相互依随的。因此，NO₂可以用作 NO 的代用分析物质。本发明能在 670nm 波长下监视 NO₂。此波长是用 1340nm 分布反馈（DFB）激光器于相位匹配的周期性接入的铌酸锂波导倍频产生的。虽然 NO₂浓度只是 NO 浓度的 5%，但 NO₂吸收强度则要强几个数量级。这种就能在锅炉中存在的 NO_x 的浓度下迅速测出 NO₂，以促进优化 NO 的还原过程。

可调谐二极管激光器吸收光谱法

本发明应用激光光谱法方面内行人周知的技术执行 TDLAS。一般为了执行 TDALS，是使激光通过一目标环境，再来探测由于目标气体例如一氧化碳或氧所致的激光在特定波长下的吸收。对所探测出的光进行光谱分析能识别沿着激光路径的气体类型与数量，直接吸收光谱法的细节已描述于 Teichoert、Fernholz 与 Ebert 的“Simultaneous situ Measurement of CO、H₂O and Gas Temperature in a Full-sized, Coal-Fired Power Plant by Near-infrared Diode Lasers”(Applied Optics, 42(12); 2043, 20 April 2003)，此参考文献的整个内容已综合于此。激光吸收光谱法的非接触性质使之能良好地适用于严苛的环境，如燃煤发电厂的燃烧区可是不能用其他探头的易燃或有毒环境中。应用激光，能在某些环境中有可能遇到的出现严重衰减（典型的情形有大于 99.9% 的光损耗）时，提供能获得可探知的传光效应所必须的高亮度，为了能更好地经受上述目标应用的严苛环境，激光可以通过铠装的光纤传送到目标环境。

为了有效传感温度或多个燃烧过程的组分气体，需要具有多个宽广频率的激光的 TDLAS 性能。所选择的频率必须匹配所监视的跃迁的吸收谱线。例如在上面的讨论中，有效的是在近似排出物 NO 浓度的 670nm 波长下监视 NO₂。这还同样相当有效地可用来在燃煤的电站锅炉中监视氧、水（温度）与一氧化碳。假定通过燃烧室的激光探测路径长度等于 10 米，而各种物质的摩尔分数为 CO (1%)、O₂ (4%)、CO₂ (10%) 与 H₂O (10%)，则可以选择适当的吸收谱线因而可以选择适当的激光频率。出于选频的目的，可以假定过程温度为 1800°K，它略高于通常在燃煤发电设备中所观察到的，以供计算中用作安全系数的缓冲目的。

例如，可以为 TDLAS 选择满足下述准则的三条水吸收谱线；

1. 分别为在~1000、2000、3000cm⁻¹ 时的低能态。
2. 提供约 0.1-0.4 附近的吸收，这同样又导致约 20% 光束的共振吸收。

3. 最佳情形是利用 1250-1650nm 区的跃近，在此区域中可购到廉价的、高功率的 DFB 二极管的通信激光器。

4. 这些跃近必须良好地分开便于复用。

5. 所选的波长必须能为现有的（去）复用器栅有效地衍射。

在以下波长下存在合适的水吸收谱线。

表 1

波长 (nm)	波数 (cm^{-1})	低能态 (cm^{-1})	光栅级	吸收在 1800K 与 10M	UNP 光栅效率 (模型)
1349.0849	7412.432	1806.67	6.87	19.7%	81%
1376.4507	7265.062	3381.662	6.73	28.1%	77%
1394.5305	7170.872	1045.058	6.65	6.8%	72%

可以预料没有来自任何其他燃烧气体的干扰。模拟出最可能干扰的物质 CO_2 ，在 1.3-1.4 μm 区不存在强的干扰线。

类似地，根据前面述及并综合于此的 Ebert 的工作，可以选择适当的一氧化碳线。应用燃煤电站锅炉中的 R (24) 线，在 1559.562nm 处存在合适的一氧化碳线。选择这条线便避免了水与二氧化碳的干扰。在此波长区由于它是光通信的 C 波段，已有的光栅相当有效。此波长上的吸收预期为 0.7%。

此外，在 760.0932nm 处可测得氧。最佳的（去）复用光栅效率计算出在此区域中只为 40%，但在合理的测量效率下可以获得适合的激光功率。

如上所述，在 TDLAS 传感设备的投射侧与捕集侧采用光纤耦合时需要严格的对准投射光学件与捕集光学件。最好是用选择的对准波长来实现上述的有效对准。一种可能的对准波长是 660nm，这是因为在此相应频率下可购到高功率 (45mw) 的二极管而 660nm 则邻近 14 级光栅作业。其他的对准波长可以同样地或更适当地确定。

总起来说，对于实施于本发明中的 TDLAS，为了复用到探测光束选定的一组合理的波长示明于表 2 中。应该指出，这组波长是用于适合传感与控制燃煤发电设备的 TDLAS 传感设备一实施形式的。其他

的波长组可以同样地适用。

表 2

目的	波长 (nm)
对准	660
O ₂ b-a 波段	760.0932
H ₂ O (中温线)	1349.0849
H ₂ O (高温线)	1376.4507
H ₂ O (低温线)	1394.5305
CO R (24) of (2, 0) 谐波	1559.562

应用复用光束的 TDLAS 的特殊优点

具有波长复用探测光束的 TDLAS 的特殊优点是提高了测温精度，为了由 TDLAS 作精确的浓度测量，必须知道所监视气体的温度，分子吸收强度是温度的函数。这样，为了将吸收特点即幅度转换为浓度，必须知道温度。以前所从事的测量燃烧物质如 CO 浓度的某些努力苦于测温精度不充分而导致量化的误差。这对于传统上未结合测温的基于二极管激光器的氨滑流监视尤其如此。在本发明的传感系统中，可以通过测量两或更多个分子水线的强度比来测定温度，这样两条线的积分强度比只是温度的函数(假定整个系统恒压)。这样，从原理上说，两条谱线能提供精确温度。但在不均匀温度分布情形下(例如工业燃烧过程中通常所见的)，两条谱线则不足以确定温度分布。在这种不均匀温度分布中，两条谱线只能确定“路径平均”温度、相反，测量(同类物质)的两条以上谱线的积分幅度则允许测量温度的不均匀性。这种方法的一个例子业已由 Sanders、Wang、Jeffries 与 Hanson 在“Applied Optics”(Vol. 40, num. 24, 20 August 2001) 中，用氧作为探测分子示明，该文的整体内容已综合于此。最佳的方法依赖于这样的事实，沿视线测量的峰值强度分布对于平均温度为 500K 的路径是不相同的，例如在此可能一半路径为 300K 而另一半为 700K。

除能较精确地测温外，应用复用探测光束还能同时监视多于一个的燃烧气体物质，可以更精细地控制燃烧过程。

基于中阶梯光栅的设备

本发明得益于使用了较廉价的可普遍购到的设计用于通信工业中的光学元器件。这种通信元器件能良好地用于由光纤耦合此系统的投射侧与捕集侧。通信应用中通常采用光复用器，接收波长很近地分开且分开一常数值（如 0.8nm ）的许多光束。然后这些光束一般与单模光纤耦合。分用器则进行相反的过程。通信设备一般设计成在 $1520\text{-}1620\text{nm}$ 间的波长下工作，而以光学 C 波段 $1528\text{-}1563\text{nm}$ 用到得最多。

在分用复用器情形，可以根据光通过它的方向把相同的物理装置用于复用或分用。因此，这里所用到的“复用器”或“多路调制器”应理解为包括复用与分用两种功能。

光复用器可以采用几种实现复用/分用功能的工艺中的任何一种。但是中阶梯光栅基的复用器最有利之处在于它可体现到极为简单与紧凑的设计中。中阶梯光栅是较粗的衍射光栅，以异于第一级的级工作，闪耀角通常大于 45° 。光栅上粗的槽纹间距与高衍射级作业相结合，形成了可允许装置紧凑的大的角色数。

某些通信应用可能要求光复用器同时使用相当多地超出 C 波段的其他波长（例如 1310nm ）。此外，在通信领域之外的应用，例如本发明的 TDLAS 传感与控制设备可能需要复用宽广分开波长的激光，例如分开到约为数百 nm。例示中阶梯光栅基复用传感设备的优点展示于图 4-7 中。图 4 例示一气体传感设备 82，其中将光 84 从一侧导引通过火焰 86。此火焰另一侧的传感器 88 探测此传输的光同时测定火焰 86 中的气体吸收了多少光。在图 4 所示装置中只有单束光通过火焰 86。可选择这种光的波长以与一特定气体的吸收波长对应。或者这种光可以是日光，它在通过火焰 86 后例如由棱镜分成各种波长的光。然后可以测量各有关波长的光吸收。

在另一稍较复杂的先有技术中，可用例如图 5 所示的装置将几个不同的光束 90A-90n 传输过火焰 92。各光束 90A-90n 分别取有关的不同波长，在火焰 92 另一侧的传感器 94A-94n 则测量相对于各波长的吸收，指明有关的所选气体的相对量。采用多个不同的光束会有许多

缺点。首先通达到火焰可能受到限制而企图将许多光束通过受限空间投射即使不是不可能也是很难处理的。其次通常在火焰中存在扰动，同时还存在不均匀的坑。这多个光束即使它们是非常接近地分开，但或不能通过同一采样空间因而不能产生一致性的可比结果。最后，投射与传感光学件和探测器在多光束设备中与在单光束设备中的相比，较为复杂与价昂。

本发明的中阶梯光栅基的传感设备有着显著优于先有技术之处。中阶梯光栅由于能在异于第一级的一些级下工作且具有一般大于 45° 的闪耀角，从而提供了异乎寻常的灵活性。例如 Zolo Technologies, Inc. Zmux 经状化成以利特罗 (Littrow) 构型于第 6 级在 1545nm 下工作，采用的机械划线的光栅的槽纹间距为 171.4 线/mm 而闪耀角为 52.75° 。利特罗架的光栅方程为

$$m\lambda = 2d \sin\theta_b \quad (1)$$

式中， m 是级， λ 是波长， d 是划线间的间距，而 θ_b 是闪耀角。

对给定的光栅， $m\lambda$ 是常数，对于前述的 Zmux 光栅， $m\lambda=6(1.545)=9.27$ 微米。这种光栅对于 1.545 微米，6 级提供了最优效率。但这种光栅对于其他的级同样提供了很高的效率。例如第 7 级存在于 $9.27/7=1.32$ 微米处，这样，例如 Zmux 这样的光栅就能以高效率同时复用 C 波段的光以及 1310nm 的光。图 6 示明中阶梯光栅 96 复用光 98A-98n 为准直线 100 准直成单一光束。

与本发明特别有关的是对于宽广分开到通常超过数百 nm 的波长的复用光在通信领域以外的应用。在例如本发明的基于 TDLAS 的气体传感设备中，关键的问题在于探测光束的所有波长分量要对空间的同一区域采样，而为了探测单一物质或是探测多种物质则可能要利用许多波长。对于这类应用，中阶梯光栅级的复用器/分用器提供了优异的解决方法。例如上述的中阶梯光栅基的复用/分用器就能复用围绕下面表 3 给出的中央波长相当宽的一个波长区，而这里的各个波长区则对应着不同的光栅级。

表 3

级	中心波长（微米）	近似波长范围（微米）
2	4.63	4.40-4.80
3	3.09	2.90-3.30
4	2.32	2.15-2.40
5	1.85	1.70-1.95
6	1.55	1.50-1.51
7	1.32	1.24-1.39

高达以及超过 14 级的较高级也可以由相应地较窄波长范围复用。应该注意到，用迅即可以购到的光纤是不能对所有上述这些波长作单模传输的。本发明的气体传感设备 104 的一个方面示意地表明于图 7 中。这个方面凸显了具有复用激光输出的 TDLAS 优于前述先有技术实施形式之处。在图 7 中，以宽广分开波长工作的几个激光源 106A-106n 为中阶梯光栅 108 复用到单模光纤 110 上。来自此光纤 110 的光为准直仪或投射光学件 112 校直，通过待分析的样品 114（例如火焰）。在通过样品 114 后，此光即为另一种阶梯光栅 116 分用。各个波长的透射光由对应的光电探测器 118A-118n 探测。激光器 106A-106n 调谐到窄的光谱区（例如 1-2nm），而为样品 114 的吸收则在各扫描的光谱区上受到监视。依此方式，所测试的气体就能完全识别并得以定量。其他的参数如温度与压力可以同样测出。除用于燃烧传感外，宽广分开的波长的中阶梯光栅复用/分用技术能让医疗装置测量呼气中的气体，同时能让国防装置检测化学战争毒气试剂。通过采用中阶梯光栅级的复合器以及红/绿/蓝耦合器，还可应用于显示与微观工艺。

模噪声

本发明的 TDLAS 系统的光学系统以及类似装置，要求根据宽广分开的波长来复用信号，由于这在设计中需要减少模噪声和能高效率地集光，相应地便提出了许多复杂的设计问题。模噪声在此定义为所探测的光的信号电平的变化，这种变化是来自用于相对所测量的处理室集光和传光的光纤芯子中不一致时间的与波长变动的光分布。

在多模光纤中，不同的模因折射率变化而以不同的速度传播。于是，光纤中的光分布乃是经过不同的有效路径长度的所有传播模干涉形成的斑点图。要是聚集并探测此斑点图中所有的光，则相长干涉与破坏性干涉，正好抵消，因而总的传输功率不取决于波长或光纤长度。如果引入了削波、渐晕或其他损耗，则不能恰切相消而探测的功率随波长和/或时间变化。所探测的功率在光纤的一段长度 Z 后的一般表示式为：

$$P = P_0 + \sum_{ij} C_{ij} E_i E_j \cos[(2\pi v_0 \Delta n_{ij} z)/c + \Delta\phi_{ij}(T, \sigma)] \quad (2)$$

式中， P_0 =波长无关的平均功率； E_i =光在第 i 个横模中的振幅； C_{ij} =第 i 个与第 j 个横模间的重叠整数； Δn_{ij} =第 i 个与第 j 个模之间的折射率差； $\Delta\phi_{ij}$ =第 i 个与第 j 个模之间因温度与应力所致的相移。

对于正交集的模而无损耗时， $C_{ij}=0$ 。但是对于任何光束削波或渐晕或任何其他的模相关损耗将使某些 $C_{ij}\neq 0$ 。这将导致平均传输功率起伏。

对于具有 50 微米芯径的一般的渐变折射率光纤，总的折射率变化 Δn 为 1%，但在接近光纤芯子中心处的绝大多数模要耗费大量传输时间，因而一般 $\Delta n_{ij} < 0.0005$ 。通常市售的光纤 GIF50 载承约 135 个模，这在给定了合理的可实现的削幅电平下波长扫描之际，大致足以产生有重要影响的模噪声。

作为具体地模噪声例子，或者可以考虑这样一个显现出模噪声的最简单的可能例子；矩形波导，以一个方向只支承最低次模而于正交方向上只支承两个最低次模：

$$\text{最低次模: } E_1 = E_1^0 [\exp i(kz - \omega t)] \cos \pi x / 2a$$

$$\text{低次模: } E_2 = E_2^0 [\exp i(kz - \omega t)] \sin \pi x / a$$

沿光纤在 Z 点处的强度为

$$I(x) = |E_1 + E_2|^2 \text{ 而总功率为 } P = \int |E_1 + E_2|^2 dx \quad (3)$$

上述积分必须包括削波与渐晕效应。

在没有削波时， $P \sim E_1^2 + E_2^2$ 而无波长相关性。加上削波量来改变积分限则可以证明削波导致一附加项 $\sim E_1 E_2 \cos \Delta\phi$ ，其中

$$\Delta\phi = \Delta kL = 2\pi\Delta nL/\lambda.$$

要是能把单模光纤用于本发明捕集侧的光学系统中，则不会出现模噪声，但出于以下两个原因通常需将多模光纤用于本发明的捕集侧光学系统中。第一，在通过测量空间（具有 10 米以上测量路径的燃烧室）后，初始的单模（高斯空间分布）光束的质量显著恶化。这样，将这一严重畸变的光束耦合到单模光纤内的效率便很低。在通过此测量空间时，主要由于散射与烟怠和飞灰导致光束衰减了 3-4 个量级而成为不合格情形。这种由于采用单模光纤而另外增大了衰减将使测量成为不可能。第二，火球中的折射光束转向效应导致光束的位置与指向不稳定。在这类影响下，便很难以任何规则性“对准”单模光纤的芯子。

另一方面，单模光纤的芯子则能给出至少 25 倍于单模光纤靶的横剖面积。这样便可显著减少上述光束的转向效应。此外，由于到多模光纤内的耦合效率与光的空间模无关，就不会让光束在通过火球后降低其质量。

但是，多模光纤系列中存在的模相关损耗则给设计提出了难题。从多模光纤芯子发射出的光分布呈现出无规则的斑点图，亦即形成了由于光纤中不同模之间相长干涉与破坏性干涉造成的光区与暗区的随机分布图。要是此斑点图完全不变地为时间与波长的函数，就不会带来问题，但是，假若光束如上所述在多模光纤捕集侧的光学系统中任何地方被削波时，此斑点图特别是作为波长函数时的缓慢变化便会造成模噪声，上述削波是不可能避免的而只能加以减少。为此必须另采取措施来减少模噪声以改进此系统的探测灵敏度。

存在几种减少模噪声的方法。根据上式 (2) 可以按以下所述减少模噪声：

- (1) 减少模相关损耗，即减少削波将 C_{ij} 保持到很小；
- (2) 减短 λ ，使模噪声周期远大于有关吸收线的；
- (3) 用低色散光纤减小 Δn_{ij} ；
- (4) 对模加扰，但如以下所述并非所有扰模技术都是同等有效的。

最好将本发明的捕集光学件设计并实现成能综合所有上述方法以便减少模噪声。这种光学件要设计成使得任何光束削波应发生在给出此系统近似理想准直的低电平下。虽应努力使多模光纤的长度保持到最短，但在某些应用中，Z 必须很长才得以在环境受控的区域中控制电子元器件。 Δn_{ij} 的值则可以用优质的低色散多模光纤来减小。此外，通过机械方式操纵捕集侧多模光纤来扰模可以求得优异的结果。

上述出现于多模光纤中的班点图作为时间与波长的函数而变化，但同时也作为光纤机械位置的函数而变化。以特殊方式弯曲光纤并操纵它可以改变班点图。若是连续地施行这种机械操纵，经过一段时间后从光纤出射的光的空间分布便均化到较匀的班点图。本发明的扰动器的关键在于通过机械地操纵多模光纤，以在受到不可避免的低电平光束削波影响下，产生平均意义上不生成模噪声的均匀光束，由此来减少模噪声。

在减少模噪声方面，某些操纵光纤的特殊方式会比另一些方式更有效。特别是使光纤绕其纵（Z）轴线相对于光纤上的某些其他点转动会改变班点图。尤其是取得这种决定性变化的是班点图绕 Z 轴的变化。重要的是，事实上此班点图在光纤被机械方式转动时并不如光纤那样绕 Z 轴转动得太多。副作用是实际的光分布因上述转动而略有改变。班点图的转动并非由于光纤中应力感生的折射率变化，虽然这种变化或可说明此班点强度图中的小变化，但宁可认为上述转动是源于光纤被扭转时光不能完全依循光纤所致。

上述观察结果可以用来实质上消除因将多模光纤用于捕集侧光学系统而造成的模噪声。本发明的一个极佳实施形式采用了一种空心轴马达而将多模光纤固定于此空心轴之中。相对于马达的轴位置固定光纤的远端段，让马达反复的转达 $+360^\circ$ 与 -360° 。这种转动的频率最好 $\geq 10\text{Hz}$ ，来保证有效地平均所传输的信号并显著减少捕集侧噪声影响。

本发明的投射侧光学系统由于需为拟通过测量区的所有波长产生单模光束，同样也提出了设计方面的难题。要是能把单模光纤用于整个投射侧光学系统中则不会出现模噪声。但是，光纤只在有限的波长

窗口才作为单模波导工作的。对于特定的光纤，超过短的截止波长，光就能以几个较高次空间模通过光纤传输。这些较高次模在光从光纤出射时将干涉产生斑点图。此时即使少量的光束削波，也会在测量中引起噪声。

相反，若把光纤选择成具有匹配需要传输的最短波长的单模截止，则较长的波长在与此光纤耦合时将会产生显著的损耗，而此光纤对这些较长的波长会产生大范围的弯曲损耗。

上述问题会在本发明的光纤耦合波长复用的 TDLAS 传感与控制设备中变得严重起来，这是由需要将长达 1.67 微米的波长与短至 760nm 或 670nm 的波长复用。对于如此宽范围的波长，尚不知道有单一的市售光纤可提供单模工作、高耦合效率与低弯曲损耗的。光子晶体光纤或可在将来解决这一难题，但是光子晶体允许工艺当前还处在其萌芽期。

如图 8 所示，本发明缓解了上述将 670nm 或 760nm 至 1.67m μ 的光复用与投射入单模光束中的问题，这里利用了多模光纤 120 这样一个很短的传输段，它不允许波长短于此单模截止的空间模形成。参考前述式 (2)，如过多模光纤的长度 L 短，就将使模噪声最少。在此情形下，要是将 760nm 的光耦合到具有 1280nm 截止波长的一短段单模光纤（例如 Corning SMF28）中，则此 760nm 的光至少在几米之内保持为单模的。因此，解决投射侧模噪声的问题便是去把 760nm 的光耦合到这样的光纤中，此光纤对于超过 1280nm 的波长是单模的，但对于 760nm 的光则可以是多模的，且在将其校直以传输过该测量区之前只走过一段短的距离。

上述这种系统的示意图示明于图 8 与图 2。首先参看图 8，以宽广激光频率发射激光的多个二极管激光器光源 120 耦合着分散的单模光纤 122A-122n。这些二极管激光器发射波长在 1349nm 与 1670nm 间的激光，由复用器 124 复用。复用器 124 的输出耦合投射侧光纤 126，后者具有适当的尺寸用以传输波长范围从 1349nm 到 1670nm 的光，两者都未显著的传输损耗也没有引入模噪声。适合用于上述波长的光

纤是 Corning SMF28。但 760nm 的输入要是复用并耦合 SMF28 光纤，则在传输过较短距离后会成为多模的。为此，760nm 激光器的输出便耦合到波长小于 1280nm 的单模光纤例如 Corning SMF750 之上，在输入光纤 122n 内传输的激光以及在投射侧光纤 126 中传输的复用激光可以就近地与投射光学件 128 耦合。耦合器 130 与投射光学件 128 最好由短长度的传输光纤 132 作光学连接，此传输光纤 132 经选择成可传输所有耦合的与复用的波长而无显著损耗，适用于图 8 所示系统中的光纤为 Corning SMF28。假定此传输光纤较短，则耦合入传输光纤 132 中的 760nm 激光将不显现多模行为。对于图 8 所示的系统与光纤，业已测定此传输光纤需保持不超过 3 米的长度以免引入显著的模噪声。

在图 2 所示的类似系统中，此耦合器 136 从 760nm 二极管激光器接收输入，还从具有显著较长波长的二极管激光器接收复用光束。

校直系统

本发明的传感系统最好还包括有自动校直特征，能允许投射与捕集光学件保持光学准直性，即使这两种光学件栓接于锅炉或本身受到热效应运动、风与振动影响的其他严苛环境的处理室上，在本系统的最佳实施形式中，上述投射与捕集光学件两者是安装在反馈控制的倾翻/倾斜台上。之所以要把投射与捕集光学件两者安装在倾斜台上是由于此传感器完全是光纤耦合的。这样，复用光便为直接装附于输入光纤上的校直投射光学件投射通过测量区，而捕集光学件则将所传输的光直接耦合通常为多模光纤的输出光纤。因此，此捕集光学件必须定向成与从投射光学件出射的光束共线。之所以需如此是为了使聚焦的传输光束可到达此多模捕集光纤的接收光锥内。

为了使所传输的激光有别于强的背景光（例如来自烧煤炉的火焰的背景光），可以限制探测器的视场与焦点使之只探测方向与位置都同于输入激光的光。这只需方便地将探测光聚焦到耦合到适当探测器上的光纤内便可。本发明一实施形式的基本光学系统设计示意于图 9。

图 9 的发送机 136 包括投射光学件 138 或准直仪例如一或多层的准直

透镜，还包括相关的安装与校直结构以及电子元器件。类似的，图 9 的接收机 140 包括具有与投射光学件类似或不同的结构捕集光学件 142 或准直仪，还包括要对的安装与校直结构与电子元器件。发送机—接收机对的效率与背景区别本领域取决于校直公差。为了获得最高的效率与区别本领，发送机与接收机两者的校直公差要求很严。发送机必须取足够精确的指向以使绝大部分传输的光能投射到捕集光学件 146 的透光孔径中，如图 10 所示，对于典型的系统，上述公差相当于 10 米的典型传输距离有 1cm 公差或是 1 毫弧度（靶距离在 5 到 30 米之间，投射光点大小在 1 与 3cm 之间，衍射影响小）。

如图 11 概示，接收机的受光角是由光纤芯子 148 的直径除以捕集光学件 150 的焦距决定。较短的焦距虽可增大受光角，但接收机的透光孔径则相应地变小。具有适当的透光孔径与受光角的折衷方法是采用 50mm 焦距的透镜和 50 微米的芯径，这样可以获得 2cm 的透光孔径与 1 毫弧度受光角锥。

于是，最佳的校直系统必须相对于总的四个自由度，使两个光学件定位成在倾倒与倾斜时以 1 毫弧度的公差相互对准。

为了实现这四个自由度，可以先粗调一侧然后再进行四维校直（倾倒、倾斜以及 X 与 Y 的侧向位置），但这是假定了允许进行大的侧向运动的。由于靶环境的通道口可以小到 1 寸，这就可能会带来问题。或者当只有有限的空间可供侧向运动用时，在两端作有效的对准校直就能保证合适的校直。

在严苛与多变的环境中必须保持投射与捕集光学件作严格的校直。波动、风力载荷、温度变化与其他的结构移位都可能导致失准直，这是因为在发送机与接收机的光学机械中会产生机械蠕变。在定期保养之后，当发送机与接收机的机头卸下用于清洗再安装上时，也有可能失准直。理想上，本发明的光学系统可以在系统失准直约达 50 毫弧度时保持 1 毫弧度的光学校直。这一校直系统应在断电时保持其位置、允许信号的总损耗、停机而不损失准直性，最后，此系统本身最好能足够的耐用，以在开放的工业环境中长时间的连续起作用。

图 12 示意地表明可校直的投射或捕集光学件的实施形式。发送机与接收机在设计上类似，发送机根据光纤出射的光产生准直的激光束，而接收机则捕获准直的激光束并将其聚焦到光纤内（也可能使光反向通过上述光学系统，而此发送机与接收机的绝大多数元器件是一致的。此发送机与接收机的光学件可以安装于 NEMA-4 机壳内使其不受环境影响。以下的描述适用于发送机或接收机组件。）

如图 10 所示，预准直好的光纤/透镜对 152 装附在运动的倾斜台 154，此倾斜台定位成可垂直于光轴倾倒与倾斜，由两台直接驱动的步进马达 156 实施上述倾倒与倾斜。这些马达通过以太网或类似连接系统由计算机控制，这种连接可以通过光纤来避免电力干扰。步进马达 156 在撤下电源时保持其位置，因而停电不会影响光学校直。

在定期或连续的系统校直作业中，控制用计算机监视着所传输与所探测的激光量。最好能提供离散的校直波长，例如由图 3 的可见光源提供的，用来进行连续或定期的校直。任何失对准将减弱所探测的信号。在自动校直方式中。由计算机测量所探测信号，指令这两台步进马达之一沿一个方向作小量运动，然后再测所探测的信号。若是信号增强，计算机便指令该步进马达再沿同向运动，直至信号不再增强。然后该计算机指令另一步进马达沿正交轴线运动以使探测信号最强，再对其他传感器头重复整个过程。随着所探测的信号增强，探测器的放大器增益自动减小，以使自动校直过程进行数十个信号长度。这种自动校直系统可以以纳瓦至毫瓦的探测功率工作。

上述这种“爬山法”算法能在存在极大噪声，信号接近完全损失后校直系统，并可以允许光束阻断。停电、机械振动或可导致其他校直系统偏移到控制电子器件限度之外的其他滚动。自动校直所要求的只是在定位空间中具有全局最大值的信号。取决于具体安装条件，自动校直可以在长时间地例如工作了数日之后根据需要以固定时间间隔例如每小时定期地进行。上述控制用计算机可以监视所探测的信号并只当此信号变弱到预定阈值之下才自动校正。

发送机与接收机组件可以包含适用工业应用的若干其他特点。任

选的传感器可以探测这些组件何时离位去进行清洗或保养，而出于安全考虑将所有激光器关闭。如图 10 所示，所有的电连接与光连接都可以通过铰链 158 形成，以使所有的连接不受保养作业干扰。机壳 16 保护内部的灵敏光学件不受污染且最好可以用软管连接。对镜链的移动范围可加以限制，以免伤及操作人员。最好是使各传感器头在自动校直时输入的电功率要小于 10 瓦而在自动校直结束后要小于 0.1 瓦。

可以有另外一些设计来适合不同的应用。要是不需对 NEMA-4 机壳进行评级，则可以显著减小尺寸与重量，不同的传输距离允许采用不同焦距的光学件与透光孔径以优化捕获的信号，作为不同于上述的由步进马达驱动的倾斜台通过移动整个光纤透镜组件来控制指向的方法，可使光纤相对于透镜横移来实现相同的指向改变，但在同时则只移动了小得多的物质。还可以采用不同的机电器件如压电元件或音圈以提高自动校直系统的工作速度。

除了上面讨论到与校直有关的种种事项外，对投射与捕集光学件作特殊的选择也能以下述几种方式影响到本发明的 TDLAS 传感系统的性能：

- (1) 耦合到探测器上的信号强度依存于投射/捕集效率；
- (2)耦合到探测器上的不希望有的背景发射依存于捕集光学件的 *etendue*；
- (3) 760nm 处一些模噪声对投射/捕集构型非常敏感；
- (4) 噪声特征（小但较稳定或较大而具有无序的摆动）看来与发射光束束径有关。最好采用较大的发射光束。
- (5) 系统的失准直灵敏度是投射与捕集焦距以及相关的光纤尺寸的直接函数。

可以采用典型的燃煤发电设备的极简单的图像来进行光学部件的选择分析。进行这种分析的目的在于以尽可能少的火球细节的知识，来弄清通过火球的激光束的一般效应。光束通过火球的会受到三种影响：

- (1) 烟臭粒子吸收某些光；

(2) 大角度折射或散射阻碍了一些光到达捕集光学件；

(3) 光通过众多的小的热梯度因而会作不规则的转向，但仍可到达捕集光学件。

仅仅是上述第三类光才可供收集。假设典型的光线在通过火球时经过多次折射，于是此光线方向遵循无规的路径并且会偏离其初始方向。要是此光线为包括其他的以类似方式行进但漂移不一致的光线的较大光束中一部分时，则火球会影响此光束作四种不同类型的变化：

(1) 整个光束的总方向改变；

(2) 光束心迹线的位置改变；

(3) 光束大小改变；

(4) 光束的发散度/波前改变。

以上四种变化是包括将影响到集光效率的所有对光束起主要影响的参数，但不涉及造成这种影响的物理参数。

要是这些光线在火球中的方向作随机漂移，则根据标准的扩散关系，这些光线方向将离开初始（名义上最优的）方向扩散开。但光线离原始轴线的距离则取决于其初始方向。这样，对于一定 rms 的光束转向，可以预期有一为火球细节决定的成正比的光束偏移量，如果行径火球的激光束有几次扩展到它原始大小，则最终的光束尺寸与最终的光束发散度之间将保持相同的关系。

若是知道了入射到捕集光学件上光的角度、位置与光束尺寸，则可估算集光效率。在此估算中取简单的光线光学、平顶强度与简单的评估入射到捕集光学件上的光学亦即在光纤数值孔径(NA)中的光量，而这种光是对准地入射到光纤芯子内的。最终结果是偏斜角空间中一座“山”。假定是在最优的校直下，集光效率接近山顶，但是随着光束角与位置的波动则可快速地在此小山之上及其周围移动。这种集光效率山最好是尽可能的高与宽广。关于这种山有如下几点值得指出：

(1) 集光效率山（零光束偏移与零倾斜）的峰值高度正比于捕集光学件 etendue（焦距乘 NA）的平方，除非是此捕集光学件大的足以俘获整信入射光束而此时的捕集效率为 100%；

(2) 此山为椭圆形，改变捕集焦距就会使一个轴线较长而另一轴线较短；

(3) 集光效率因光束跳动而波动乃是噪声源。

根据上述分析方法，可以比较不同投射/捕集组合的信噪比。假定这些多重噪声是相同的，则只当火球背景噪声或探测器噪声占支配地位时，不同的捕集光学件最终的性能才会不同。

本发明的目的通过在此公开的实施形式业已完全实现。内行的人当知在不脱离本发明的基本功能的前提下，本发明的各个方面是可以通过不同的实施形式实现的。这些具体的实施形式是用于说明目的而不是限制继后的权利要求书所陈述的本发明的范围。

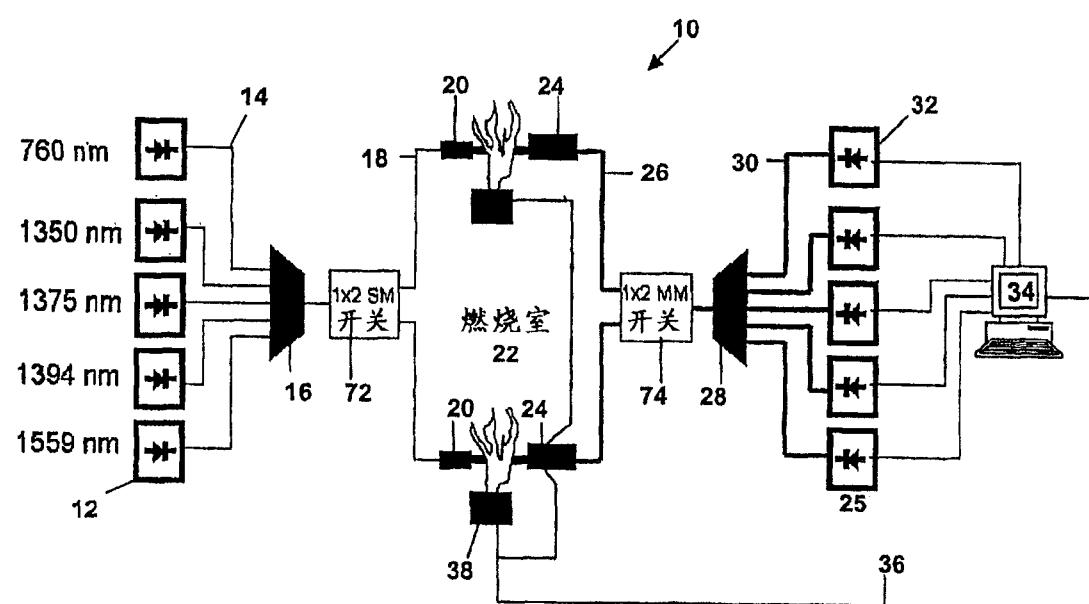
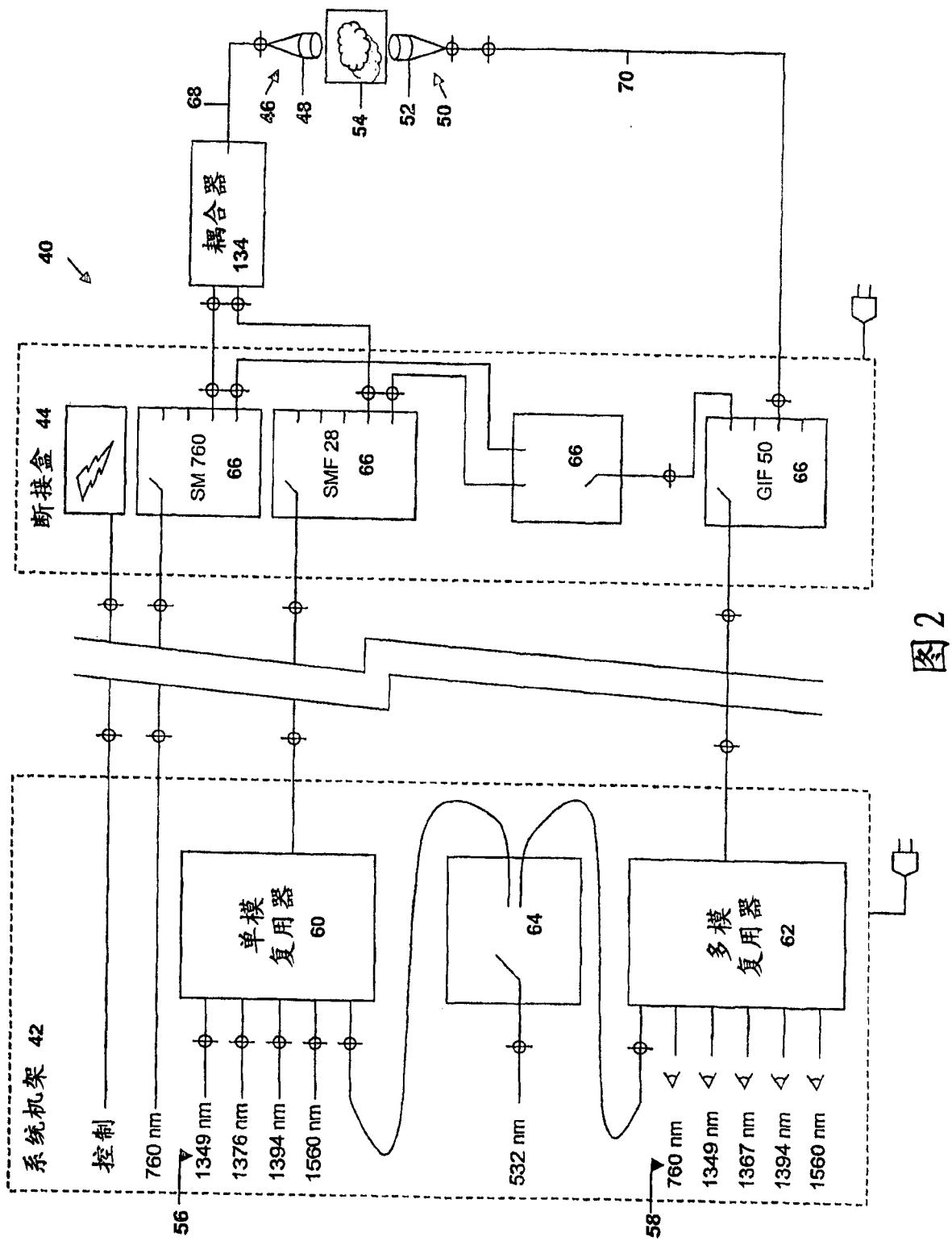


图 1



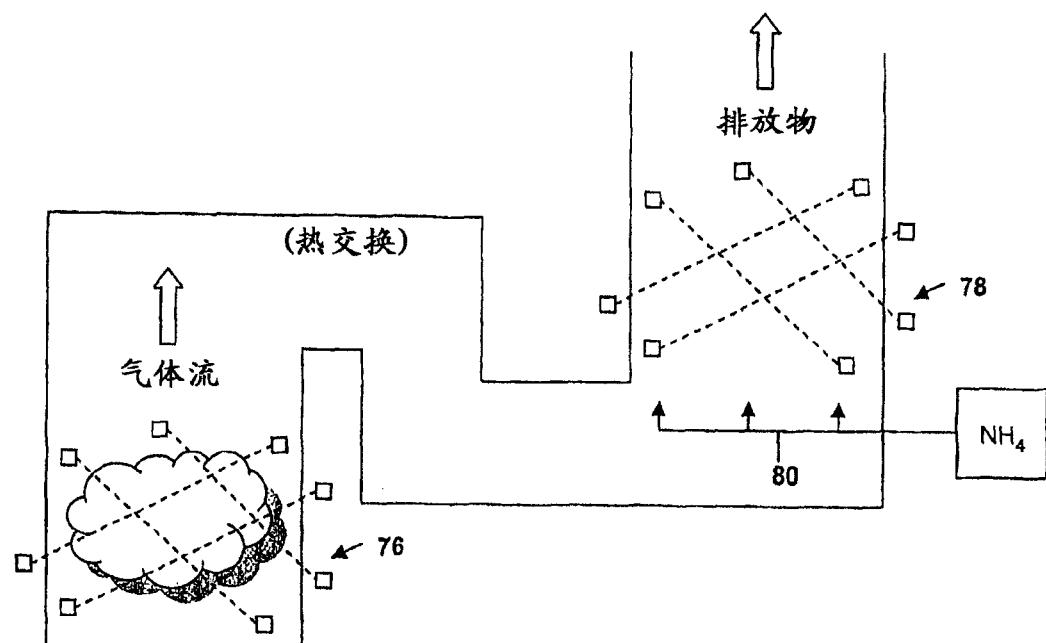


图 3

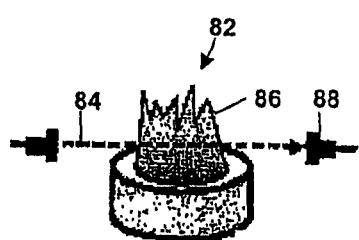


图 4

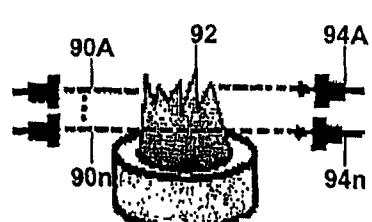


图 5

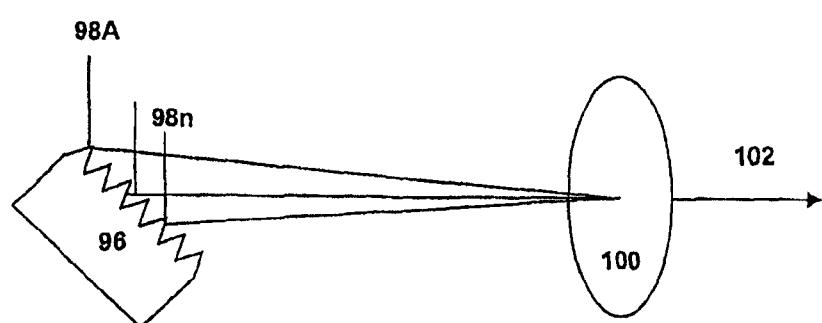


图 6

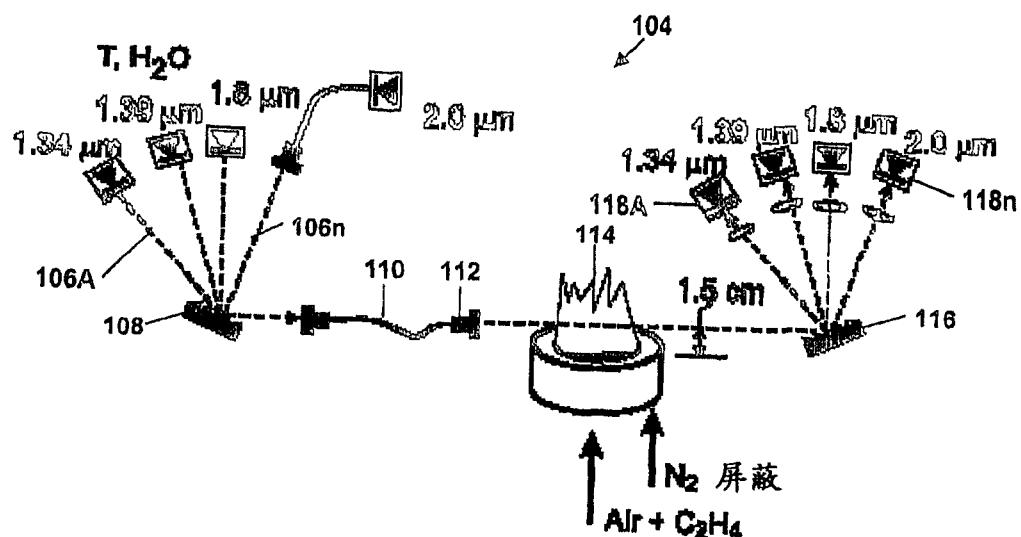


图 7

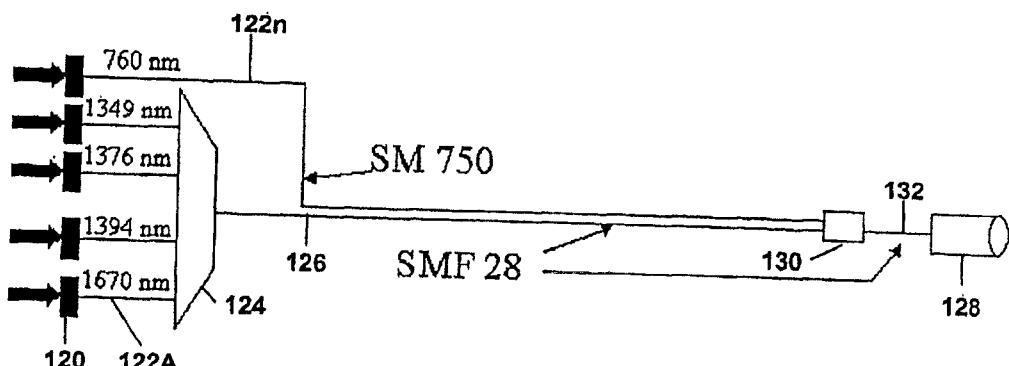


图 8

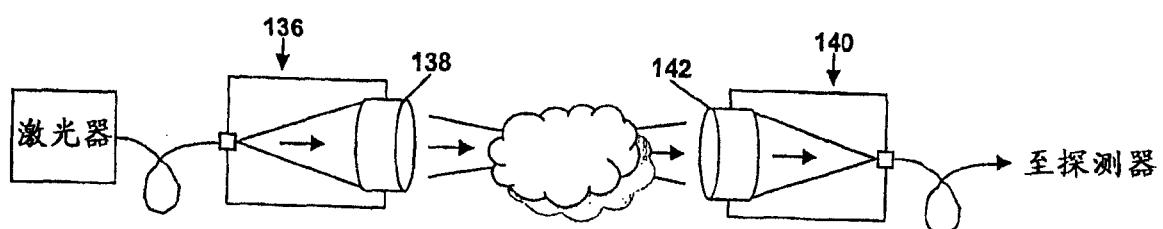


图 9

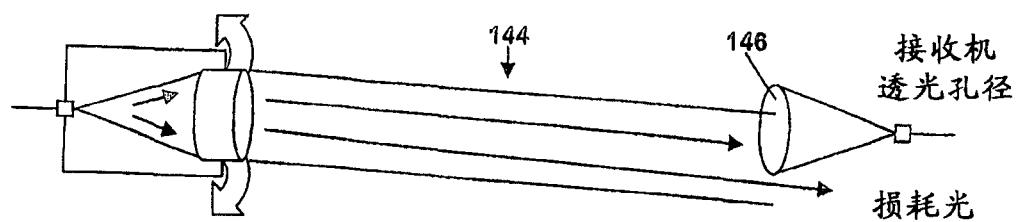


图 10

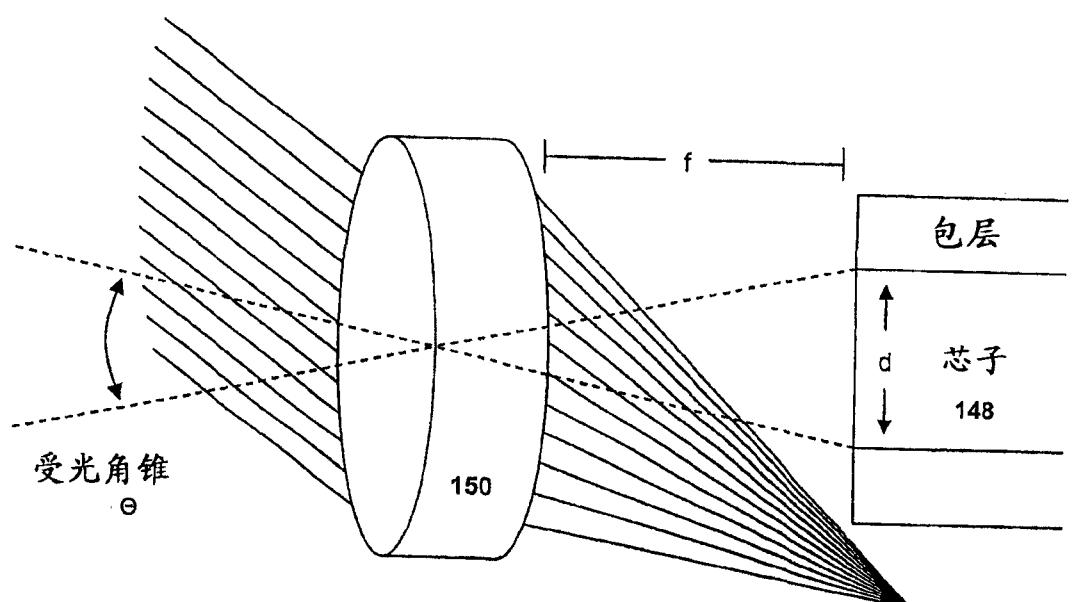


图 11

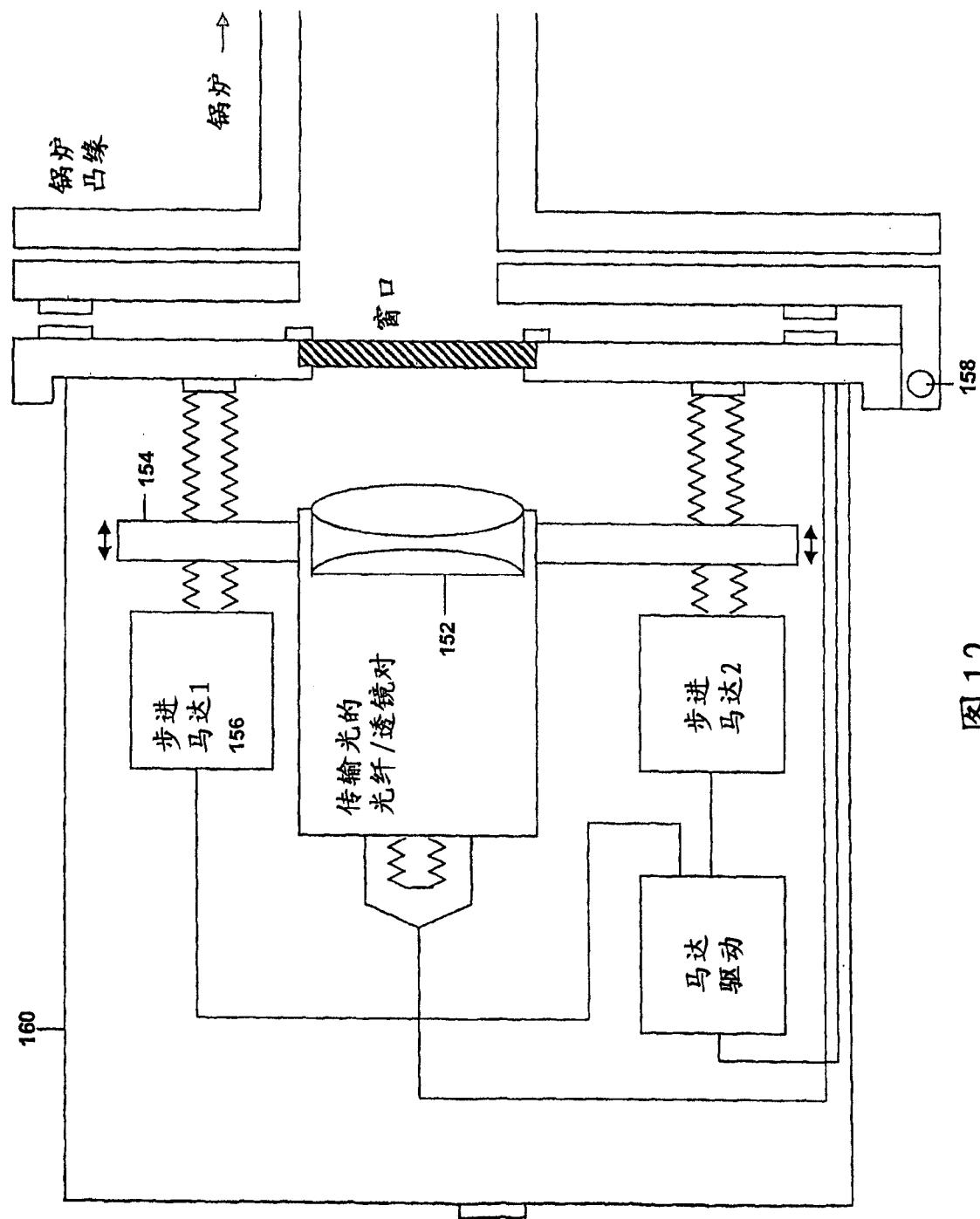


图 12