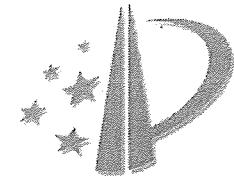


证书号 第 1273475 号



发明 专利 证书

发明名称：变压器故障气体监测系统及方法

发明人：靳伟；何海律；居剑

专利号：ZL 2008 1 0181820.X

专利申请日：2008年11月14日

专利权人：香港理工大学

授权公告日：2013年09月18日

本发明经过本局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发本证书，并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。

本专利的专利权期限为二十年，自申请日起算。专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年11月14日前缴纳。未按照规定缴纳年费的，专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长

司力普





(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101738382 B

(45) 授权公告日 2013.09.18

(21) 申请号 200810181820.X

61, 62, 74, 84-90 页 .

(22) 申请日 2008.11.14

H. B. Yu et al.. Multiplexing of optical fiber gas sensors with a frequency-modulated continuous-wave technique. 《Applied Optics》. 2001, 第 40 卷 (第 7 期), 第 1011-1020 页 .

(73) 专利权人 香港理工大学

地址 中国香港九龙红磡

(72) 发明人 靳伟 何海律 居剑

(74) 专利代理机构 深圳市顺天达专利商标代理有限公司 44217

审查员 崔秀艳

代理人 郭伟刚

(51) Int. Cl.

G01N 21/39 (2006.01)

(56) 对比文件

JP 特开平 6-148068 A, 1994.05.27, 说明书第 22-25 段、附图 4-5.

CN 1888864 A, 2007.01.03, 全文 .

王艳菊. 基于光谱吸收的光纤式有害气体测量技术的研究. 《中国博士学位论文全文数据库 信息科技辑》. 2007, (第 2 期), 第

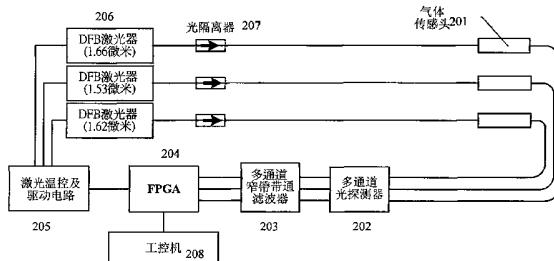
权利要求书1页 说明书8页 附图6页

(54) 发明名称

变压器故障气体监测系统及方法

(57) 摘要

本发明涉及变压器故障气体监测系统及方法, 采用油气分离装置 (100) 和包括分布反馈式激光器 (206) 的光纤气体传感器 (200)。油气分离装置 (100) 将变压器中的故障气体分离到气室 (104); 光纤气体传感器 (200) 中的分布反馈式激光器 (206) 的输出光传至气室 (104) 中的光纤气体传感头 (201), 再送至光探测器 (202) 作光电转换, 然后再送到带通滤波器 (203) 进行滤波及放大, 再输入到FPGA (204) 和工控机 (208) 进行分析进而对变压器状况做出判断。本发明的系统及方法可以使多个不同的气体传感头共用同一套光源和检测系统, 实现低成本、多点、多种气体的同时测量。



1. 一种变压器故障气体监测系统,包括油气分离装置(100)和光纤气体传感器(200),所述油气分离装置(100)包括油泵(101)、油室(102)、气室(104)以及设置在油室(102)和气室(104)之间的薄膜(103);油泵(101)把变压器的绝缘油输送至油室(102),绝缘油经过油室(102)后经回路返回变压器,绝缘油中的变压器故障气体透过薄膜(103)进入气室(104);其特征在于,所述光纤气体传感器(200)包括激光温控及驱动电路(205)和与之相连接的多个不同波长范围的分布反馈式激光器(206),还包括多通道光探测器(202)、多通道窄带带通滤波器(203)、FPGA(204)、工控机(208)、光隔离器(207)、设置在所述气室(104)内的光纤气体传感头(201);所述FPGA(204)控制分布反馈式激光器(206)输出光传至光隔离器(207)、光纤气体传感头(201)、多通道光探测器(202),多通道光探测器(202)将光信号转换成电信号后输入到多通道窄带带通滤波器(203),再送到FPGA(204)进行运算,FPGA(204)将运算后的数据传到工控机(208)分析从而对变压器的状况做出判断;所述分布反馈式激光器(206)的个数等于3,波长范围分别为1.63微米至1.67微米、1.51微米至1.54微米、1.61微米至1.63微米,分别对应甲烷、乙炔及乙烯的气体吸收谱线;所述系统利用三个光纤气体传感头(201)对上述三种气体进行同时检测,其工作过程如下:三个分布反馈式激光器(206)的输出光经光隔离器(207),分别传送至三个光纤气体传感头(201),再传送至多通道光探测器(202)进行光电转换,分别带有三种不同气体浓度数据的信号再被传送到多通道带通滤波器(203)进行滤波及放大,再输入到FPGA(204)和工控机(208)进行分析进而对变压器状况做出判断。

2. 根据权利要求1所述的变压器故障气体监测系统,其特征在于,所述光纤气体传感头(201)由多对已校准的光纤准直器(215)串连而成,每对光纤准直器(215)之间距离为50至500毫米,而串连数量根据不同气体对光吸收的强度及所需要的探测灵敏度而定,所述串连数量为2至50;所述光纤气体传感头(201)包括由一个或多个以金属或其它材料的骨架(216)组成,以固定多对已校准的光纤准直器(215)。

3. 根据权利要求2所述的变压器故障气体监测系统,其特征在于,所述光纤准直器的光学表面镀有不同波长的防反射膜,其中,甲烷传感头防反射膜的工作波长在1.63至1.67微米之间,乙炔传感头防反射膜的工作波长在1.51至1.54微米之间,乙烯传感头防反射膜的工作波长在1.61至1.63微米之间。

4. 根据权利要求1至3中任一项所述的变压器故障气体监测系统,其特征在于,所述光纤气体传感器(200)还包括通过光纤连接在光纤耦合器(209)和多通道光探测器(202)之间的空心光纤气体参考腔(210),所述光纤气体传感头(201)和空心光纤气体参考腔(210)的输出光传至多通道光探测器(202)进行光电转换。

5. 根据权利要求4所述的变压器故障气体监测系统,其特征在于,所述空心光纤气体参考腔(210)由一段空心光纤(2101)构成,所述空心光纤(2101)的两端和实心光纤(211)相焊接,所述空心光纤(2101)的纤心充满参考气体,所述的参考气体分别为甲烷、乙炔及乙烯。

变压器故障气体监测系统及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电力故障监测系统及方法,更具体地说,涉及一种变压器故障气体监测系统及方法。

背景技术

[0002] 变压器是电力系统中最重要和昂贵的电气设备之一,它一旦发生故障,将会造成严重的损失和后果。为了有效提高电力系统的可靠性及预先发现潜伏性故障,适当的检测及维修是不可缺少的。在正常情况下,充油式变压器内部的绝缘油及固体绝缘材料在热电应力作用下会逐渐老化和分解,产生不同的气体,其中包括氢气、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔、一氧化碳及二氧化碳等。当变压器存在着潜伏性过热或电气故障时,这些气体的产生速度便会加快,部分气体会溶解到绝缘油中。油中故障气体的相对浓度及其形成速度主要取决于故障点能量及严重程度,所以根据监测这些气体的浓度及其变化,便可以进一步推断出变压器内部是否存在潜伏性故障及其类型。

[0003] 目前,油中溶解气体分析 (Dissolved Gas Analysis) 是诊断和监测大型充油式变压器潜伏性故障最有效的方法之一。而监测方法大致可分为离线和在线两种。离线监测主要透过从变压器中抽取油样,在实验室进行油气分离,再用气相色谱仪测定不同气体的含量,而这个程序最少每半年至一年进行一次,以监测变压器的运行情况。但离线分析明显地存在缺点,就是它不能有效监测变压器在两次检验期间的实时状态,而根据有关变压器故障统计数据显示,突发性故障占了高压变压器事故相当大的比重,由此可见,变压器的在线监测在加强电力系统的稳定性、及时发现潜在故障、提供变压器老化情况数据和检讨维护周期方面可起到决定性作用。在线监测系统一般利用不同的油气分离技术,让油中所溶解的故障气体渗透到气室,由气室中的气敏组件检测故障气体的含量并转换成相应强弱的电信号而达到在线监测的目的。

[0004] 在油气分离技术方面,在线监测系统最多采用的是平板结构的高分子膜如聚四氟乙烯薄膜,其优点是结构简单,透气率高、机械强度好、耐油和耐高温等。其它油气分离技术还包括毛细管柱、血液透析法和中空纤维管装置等。而实验室色谱分析普遍使用的震荡脱气法和真空脱气法,尽管在便携式产品中有应用实例,但由于其结构复杂,对稳定性要求较高而较难应用于在线系统。

[0005] 市场上的在线监测系统中,比较成熟及被广泛应用的主要有加拿大 SYPROTEC 公司研制的 HYDRAN 在线监测装置。HYDRAN 的气体检测技术是利用燃料电池,借助空气中氧气与四种不同的故障气体发生电化学反应,经整流放大和温度补偿后得到与故障气体相关的输出电信号,该信号与四种不同的故障气体的相关系数分别为氢气 1、一氧化碳 0.18、乙炔 0.08、乙烯 0.015。装置的最大优点就是传感器体积小且比较坚固,日常维护工作量少,以及工作寿命长,但利用这种气体检测技术只能提供单一输出信号,对用于推断变压器潜伏性故障类型不能提供足够的数据。近年来,多间生产有关设备的公司都致力研制能同时测量多种故障气体的监测系统,其中在线气相色谱仪的研究占了绝大部分,但由于系统复

杂及昂贵,所以未被广泛采用。因此,一种成本较低而又能监测部分重要故障气体的系统是有一定的市场需求和价值的。

发明内容

[0006] 本发明要解决的技术问题之一在于,针对现有技术的上述系统复杂、成本高、输出信号单一的缺陷,提供一种变压器故障气体监测系统。

[0007] 本发明要解决的技术问题之二在于,针对现有技术的上述系统复杂、成本高、输出信号单一的缺陷,提供一种变压器故障气体监测方法。

[0008] 本发明解决其技术问题之一所采用的技术方案是:构造一种变压器故障气体监测系统,包括油气分离装置和光纤气体传感器,所述油气分离装置包括油泵、油室、气室、设置在油室和气室之间的薄膜,油泵把变压器的绝缘油输送至油室,绝缘油经过油室后经回路返回变压器,绝缘油中的变压器故障气体透过薄膜进入气室;所述光纤气体传感器包括激光温控及驱动电路和与之相连接的多个不同波长范围的分布反馈式激光器,还包括多通道光探测器、多通道窄带带通滤波器、FPGA、工控机、光隔离器、设置在所述气室内的光纤气体传感头;所述FPGA控制分布反馈式激光器输出光并传至光隔离器、光纤气体传感头、多通道光探测器,多通道光探测器将光信号转换成电信号后送到多通道窄带带通滤波器进行带通滤波及放大,再送到FPGA进行运算,FPGA将运算后的数据传到工控机分析、对变压器的状况做出判断。

[0009] 在本发明所述的变压器故障气体监测系统中,所述分布式反馈式激光器的个数等于3,波长范围分别为1.63微米至1.67微米、1.51微米至1.54微米、1.61微米至1.63微米,所述波长范围分别对应甲烷、乙炔及乙烯的气体吸收谱线;所述系统利用三个光纤气体传感头对所述三种气体进行同时检测,其工作过程如下:三个分布反馈式激光器的输出光经光隔离器,分别传送至三个光纤气体传感头,再传送至多通道光探测器进行光电转换,分别带有三种不同气体浓度数据的信号再被传送到多通道带通滤波器进行滤波及放大,再输入到FPGA和工控机进行分析进而对变压器状况做出判断。

[0010] 在本发明所述的变压器故障气体监测系统中,所述光纤气体传感头由多对已校准的光纤准直器串连而成,每对光纤准直器之间距离为50至500毫米,而串连数量根据不同气体对光吸收的强度及所需要的探测灵敏度而定,所述串连数量为2至50;所述光纤气体传感头包括由一个或多个以金属或其它材料的骨架,以固定多对已校准的光纤准直器。

[0011] 在本发明所述的变压器故障气体监测系统中,所述光纤准直器的光学表面镀有不同波长的防反射膜,其中,甲烷传感头防反射膜的工作波长在1.63至1.67微米之间,乙炔传感头防反射膜的工作波长在1.51至1.54微米之间,乙烯传感头防反射膜的工作波长在1.61至1.63微米之间。

[0012] 在本发明所述的变压器故障气体监测系统中,所述光纤气体传感器还包括通过光纤连接在光纤耦合器和多通道光探测器之间的空心光纤气体参考腔,所述光纤气体传感头和空心光纤气体参考腔的输出光传至多通道光探测器进行光电转换。

[0013] 在本发明所述的变压器故障气体监测系统中,所述空心光纤气体参考腔由一段空心光纤构成,所述空心光纤的两端和实心光纤相焊接,所述空心光纤的纤心充满参考气体,所述的参考气体分别为甲烷、乙炔及乙烯。

[0014] 本发明解决其技术问题之二所采用的一种技术方案是：提供一种变压器故障气体检测方法，所述方法利用复用技术，以单个光纤气体传感头同时对多种变压器故障气体的浓度进行检测，所述方法包括下列步骤：

[0015] A. 通过油气分离装置将变压器绝缘油中的变压器故障气体分离到气室；

[0016] B. 多个不同波长范围的分布反馈式激光器的输出光以复用方式传送至设置在所述气室内的单个光纤气体传感头；

[0017] C. 光纤气体传感头输出多个不同波长范围的光，经光纤传送至光探测器进行光电转换；

[0018] D. 将光电转换后的电信号解复用后传送到窄带带通滤波器、FPGA 和工控机作信号处理及分析。

[0019] 在本发明所述的变压器故障气体检测方法中，所述步骤 B 中，所述分布反馈式激光器的个数等于 3，波长范围分别为 1.63 微米至 1.67 微米、1.51 微米至 1.54 微米、1.61 微米至 1.63 微米，分别对应甲烷、乙炔及乙烯的气体吸收谱线；所述复用方式为波分复用方式，其工作过程如下：三个分布反馈式激光器的输出光经由一个 3×3 光纤耦合器耦合到单一根单模光纤，传送至单个光纤气体传感头，再以波分复用器将 3 个不同波长的光分开并传送到多通道光探测器进行光电转换，分别带有三种不同气体浓度数据的信号再经多通道窄带带通滤波器传送到 FPGA 和工控机做信号处理及分析。

[0020] 在本发明所述的变压器故障气体检测方法中，所述步骤 B 中，所述分布反馈式激光器的个数等于 3，波长范围分别为 1.63 微米至 1.67 微米、1.51 微米至 1.54 微米、1.61 微米至 1.63 微米，分别对应甲烷、乙炔及乙烯的气体吸收谱线；所述复用方式为调制频域复用方式，其工作过程如下：用 3 个不同调制频率的信号作为分布反馈式激光器的电流调制，三束不同调制频率的输出光经由一个 3×3 光纤耦合器耦合到单一根单模光纤，再传送到单一个光纤气体传感头，之后再进行光电转换，这三个不同调制频率、分别带有三种不同气体浓度数据的电信号会被作为解复用器的窄带带通滤波器把它们分开及放大，再被传送到 FPGA 和工控机做信号处理及分析。

[0021] 在本发明所述的变压器故障气体检测方法，所述步骤 B 中，所述分布反馈式激光器的个数等于 3，波长范围分别为 1.63 微米至 1.67 微米、1.51 微米至 1.54 微米、1.61 微米至 1.63 微米，分别对应甲烷、乙炔及乙烯的气体吸收谱线；所述复用方式为时分复用方式，其工作过程如下：用控制注入电流的方式控制三个分布反馈式激光器在三个不同时段的开关状态，使每个时段只有单一波长的光束经由一个 3×3 光纤耦合器被传送到单一个光纤气体传感头，分别带有三种不同气体浓度数据的光信号再被光电转换及解调，并以窄带带通滤波器、FPGA 和工控机做信号处理及分析。

[0022] 本发明解决其技术问题之二所采用的另一种技术方案是，提供一种变压器故障气体检测方法，所述方法共用一套光源和检测系统，结合不同复用技术以多路方式对多点即多台变压器的故障气体进行检测，所述方法包括下列步骤：

[0023] A. 于每一台变压器安装一个油气分离装置，通过油气分离装置将变压器绝缘油中的变压器故障气体分离到气室；

[0024] B. 多个不同波长的分布反馈式激光器的输出光会以复用方式，经光纤耦合器耦合及分束，再传送到设置于每一台变压器所述气室内的单个光纤气体传感头；

[0025] C. 不同波长范围的光经过光纤气体传感头，并传送至多通道光探测器进行光电转换；

[0026] D. 光电转换后的电信号会传送到窄带带通滤波器、FPGA 和工控机作信号处理及分析。

[0027] 在本发明所述的变压器故障气体检测方法中，所述步骤 B 中，所述分布反馈式激光器的个数等于 3，波长范围分别为 1.63 微米至 1.67 微米、1.51 微米至 1.54 微米、1.61 微米至 1.63 微米，分别对应甲烷、乙炔及乙烯的气体吸收谱线；所述复用方式为波分复用方式，其工作过程如下：三个分布反馈式激光器的输出光经由一个 $N \times N (N \geq 3)$ 光纤耦合器耦合，再分束传送至多台变压器的光纤气体传感头，每一个光纤气体传感头的输出再由一个波分复用器将 3 个不同波长的光分开并传送至多通道光探测器进行光电转换，分别带有三种不同气体浓度数据的信号再被传送到多通道窄带带通滤波器、FPGA 和工控机作信号处理及分析。

[0028] 在本发明所述的变压器故障气体检测方法中，所述步骤 B 中，所述分布反馈式激光器的个数等于 3，波长范围分别为 1.63 微米至 1.67 微米、1.51 微米至 1.54 微米、1.61 微米至 1.63 微米，分别对应甲烷、乙炔及乙烯的气体吸收谱线；所述复用方式为调制频域复用方式，其工作过程如下：用 3 个不同调制频率的信号作为分布反馈式激光器的电流调制，三束不同调制频率的输出光经由一个 $N \times N (N \geq 3)$ 光纤耦合器耦合，再分束传送至多台变压器的光纤气体传感头，每一个光纤气体传感头的输出再被传送到多通道光探测器进行光电转换，这三个不同调制频率、分别带有三种不同气体浓度数据的电信号会被作为解复用器的窄带带通滤波器把它们分开及放大，再传送到 FPGA 和工控机作信号处理及分析。

[0029] 在本发明所述的变压器故障气体检测方法中，所述步骤 B 中，所述分布反馈式激光器的个数等于 3，波长范围分别为 1.63 微米至 1.67 微米、1.51 微米至 1.54 微米以及 1.61 微米至 1.63 微米；所述复用方式为时分复用方式，用控制注入电流的方式来控制三个分布反馈式激光器在三个不同的时段的开关状态，使每个时段只有单一波长的光束经由一个 $N \times N (N \geq 3)$ 光纤耦合器耦合，再分束传送至多台变压器的光纤气体传感头，每一个光纤气体传感头的输出再被传送到多通道光探测器进行光电转换，并以窄带带通滤波器、FPGA 和工控机对信号进行处理及分析。

[0030] 在本发明所述的变压器故障气体检测方法中，所述步骤 D 中，工控机做信号处理和分析时，利用戴维三角形图示法，应用测量得到的气体浓度信息来判断充油式变压器内部故障是属于局部放电、低能量放电、高能量放电、温度 <300℃ 的热故障、温度介于 300℃ 和 700℃ 之间的热故障，或温度 >700℃ 的热故障。

[0031] 实施本发明的变压器故障气体检测系统及方法，具有以下有益效果：本发明所述的系统采用谱线窄、功率大的分布反馈式激光器，其输出光可作为多点气体测量系统的光源，能更有效地运用资源及进一步降低成本；本发明还可用同一套光源和监测系统，结合波分复用、调制频域复用、时分复用等方法，来实现低成本多点传感器网络，同时把多个不同监测点的甲烷、乙炔及乙烯气体的浓度检测出来。

附图说明

[0032] 下面将结合附图及实施例对本发明作进一步说明，附图中：

- [0033] 图 1 为现有技术中的光纤气体吸收传感器原理图；
[0034] 图 2 为现有技术中的波长调制 / 扫描、谐波解调原理示意图；
[0035] 图 3 为本发明用于监测变压器绝缘油故障气体的光纤气体监测系统的结构简图；
[0036] 图 4 为本发明用于同时监测甲烷、乙炔及乙烯气体的光纤气体传感器系统示意图；
[0037] 图 5 为本发明以增强探测灵敏度的光纤气体传感头（吸收腔）结构图举例；
[0038] 图 6 为现有技术中的带有空心光纤参考腔的光纤气体传感器系统示意图；
[0039] 图 7 为现有技术中的空心光子带隙光纤 (Crystal Fibre A/S, HC-1550-02) 参考腔结构图；
[0040] 图 8 为本发明以单一光纤气体传感头结合波分复用技术进行同时监测甲烷、乙炔及乙烯气体的光纤传感器系统示意图；
[0041] 图 9 为本发明以单一光纤气体传感头结合调制频域复用技术进行同时监测甲烷、乙炔及乙烯气体的光纤传感器系统示意图；
[0042] 图 10 为本发明以单一光纤气体传感头结合时分复用技术进行同时监测甲烷、乙炔及乙烯气体的光纤传感器系统示意图；
[0043] 图 11 为本发明以单一组光源（三个波长分别在 1.66 微米、1.53 微米及 1.62 微米附近的分布反馈式激光器）结合波分复用技术作多点气体测量的光纤传感器系统示意图；
[0044] 图 12 为本发明以单一组光源（三个波长分别在 1.66 微米、1.53 微米及 1.62 微米附近的分布反馈式激光器）结合调制频域复用技术作多点气体测量的光纤传感器系统示意图；
[0045] 图 13 为本发明以单一组光源（三个波长分别在 1.66 微米、1.53 微米及 1.62 微米附近的分布反馈式激光器）结合时分复用技术作多点气体测量的光纤传感器系统示意图。

具体实施方式

[0046] 图 1 是基于吸收原理的光纤气体测量装置的结构示意图。基于吸收原理之光纤气体传感器是利用气体分子振动或转动对特定波长的光谱的吸收强弱来测量该气体的浓度。采用基于红外吸收原理的光纤气体传感器是一个较可行而又成熟的方法。在测量时，如有一光源，它的光谱刚好覆盖着一条或多条气体吸收线，光通过气体时就会发生衰减。参考图 1，输入光纤将光传输到传感头，该传感头是由输入 / 输出自聚焦透镜组成，从光纤中出射的光，经输入透镜准直，变为平行光并和气体相互作用，再经输出透镜将光耦合到输出光纤中。如输入光强度为 I_0 、输出光强度为 I ，它们与气体浓度之间的关系可根据 Beer-Lambert 定律来描述：

$$I = I_0 \exp[-\alpha_0(\lambda)lC]$$

[0048] 该公式中， C 代表气体浓度，以 ppm 为单位； l 代表光和气体的作用长度（传感长度），以 cm 为单位； $\alpha_0(\lambda)$ 为气体吸收系数，它和激光波长有关，一般在气体吸收线中心处取最大值，该系数就不同气体及其吸收线而有所不同。

[0049] 为了提高光纤气体传感器的灵敏度，谐波检测技术一般都会被采纳应用。谐波检测的基本原理是利用一个可调谐的窄带激光器（如分布反馈式激光器）输出一正弦调频（波长）的光，当激光器输出光的中心波长在气体吸收峰附近扫描或和气体吸收峰对准时，

由于气体吸收系数 $\alpha_0(\lambda)$ 的波长依赖性, 波长调制会被转换为光强调制, 通过对光强谐波分量进行分析, 就可得到气体浓度的信息。例如, 在激光中心波长和吸收峰对准时 (如图 2 所示), 经过气体吸收后光强的二次谐波分量将正比于被测气体的浓度, 因此可用于气体浓度测量。本发明所用的气体传感器是基于图 2 所示的波长调制 / 扫描和諧波分析原理。

[0050] 图 3 为本发明用于监测变压器绝缘油故障气体的光纤气体监测系统简图。该系统可分为两部份, 包括油气分离装置 100 及光纤气体传感器 200。油气分离装置 100 利用油泵 101 把绝缘油输送至油室 102, 绝缘油经过油室 102 后会经回路返回变压器, 而油室 102 和气室 104 之间装有多个聚四氟乙烯薄膜 103 以进行油气分离, 变压器故障气体会透过薄膜 103 进入气室, 气室 104 内的甲烷、乙炔及乙烯气体的浓度会被置于气室 104 内的光纤气体传感头 201 检测出来。参考图 4, 光纤气体传感器 200 包括特定波长的分布反馈式激光器 206 及其温控及驱动电路 205、光纤、光纤气体传感头 201 (吸收腔)、光隔离器 207、多通道光探测器 202、多通道窄带通滤波器 203、现场可编程门阵列 (FPGA) 204 和工控机 208。

[0051] 如图 4 所示, 光纤气体传感器利用三个分布反馈式 (DFB) 激光器 206 作为光源。它们的波长分别在 1.66 微米、1.53 微米及 1.62 微米附近, 可分别覆盖甲烷、乙炔及乙烯的气体吸收谱线。在系统中, 通过改变 DFB 激光器 206 的工作温度令其输出光的中心波长扫描经过指定的气体吸收谱线, 同时通过注入一个由 FPGA 产生、频率为 f ($f = 10\text{kHz} \sim 500\text{kHz}$) 的正弦信号作电流 (波长) 调制, 以实现諧波检测。经调制后的激光器输出光会经光隔离器 207 传至光纤气体传感头 201, 然后传至多通道光探测器 202 进行光电转换。电信号会经过多通道窄带通滤波器 203 进行滤波及放大, 其频率为电流调制频率的一倍或两倍 (一次或二次諧波)。获得的一次或二次諧波信号会被送到一块附于 FPGA 204 的数据采集模块进行 A/D 转换, 转换后的信号会由 FPGA 204 进行锁相放大检测, 得到的数据会传送至工控机 208 进行分析并对变压器的状况做出判断。

[0052] 为了增强光纤气体传感器的探测灵敏度, 本系统采用了一特别设计的光纤气体吸收腔作为光纤气体传感头, 图 5 为该光纤气体传感头的结构图例之一。该光纤气体传感头是由 M (M 为 2 至 50) 对已校准的光纤准直器 215 串连而成并固定于一个环形或其它形状骨架 216 上, 该骨架 216 可以金属或其它材料造成, 每对光纤准直器 215 之间之距离为 50 到 500 毫米。对于每种气体, 会使用两个或多个独立的吸收腔串联起来, 进一步增加光纤气体传感头的传感长度, 所造的吸收腔总长度可以为 1 到 10 米。为了减低因准直器光学表面反射所造成的光信号干扰, 在这些准直器的表面会镀上不同波长的防反射薄膜。其中, 甲烷传感头之防反射薄膜的工作波长是在 1.63 至 1.67 微米之间, 乙炔传感头防之反射薄膜的工作波长是在 1.51 至 1.54 微米之间, 乙烯传感头之防反射薄膜的工作波长是在 1.61 至 1.63 微米之间。

[0053] 由于一般气体的吸收峰很窄, 光源波长有可能随环境、光源工作时间而漂移并引起光源中心波长偏离吸收峰, 光源强度也可能随时间变化, 这些因素都可能导致测量出现误差。采用了加入气体参考腔的方法来保证测量的准确性, 图 6 为带有空心光纤气体参考腔的光纤气体传感器系统示意图。经调制的激光器 206 输出光经过光隔离器 207, 并利用光纤耦合器 209 把光分束, 然后分别传送至光纤气体传感头 201 及空心光纤气体参考腔 210, 然后传送到多通道光探测器 202 进行光电转换。同样地, 电信号会经过多通道窄带通滤波器 203 进行滤波, 及由 FPGA 204 进行锁相放大检测。如发现光源的中心波长偏离吸

收峰, FPGA 204 会实时通过调节激光器 206 的工作温度, 令其输出光的中心波长能返回目标气体的吸收谱线。同时, 通过比较由参考腔和传感头的输出信号, 可以在光源强度发生改变时, 仍能对气体浓度进行正确测量。图 7 为空心光纤气体参考腔的结构图。该气体参考腔是由一段长 50 到 500 毫米的空心光纤 2101 构成, 其中图 7 所示的空心光纤 2101 为 CrystalFibre A/S 生产的型号为 HC-1550-02 的光子带隙光纤, 但其它空心光纤也可以用于此用途。空心光纤 2101 的两端和实心光纤 211 用光纤熔接机相连接, 所述空心光纤 2101 的纤心充满已知浓度的参考气体, 参考气体分别为甲烷、乙炔及乙烯。

[0054] 除了以上利用三个光纤传感头测量三种不同气体的系统, 还可利用波分复用、调制频域复用(即频分复用)及时分复用的方法以单一个光纤气体传感头来测量三种气体, 这些方案能有效降低整个光纤传感器系统的成本。图 8 为以单一光纤气体传感头 201 结合波分复用技术的传感器结构示意图。该传感器同样利用三个不同波长的分布反馈式激光器 206, 它们的输出光经由光隔离器 207 后, 由一个 3×3 光纤耦合器 209 耦合到一根单模光纤, 并经过单一个光纤气体传感头 201, 三个不同波长的光束会被三种不同的气体吸收。其后会利用波分复用器将三个不同波长 ($\lambda_{1.66\mu\text{m}}$, $\lambda_{1.53\mu\text{m}}$, $\lambda_{1.62\mu\text{m}}$) 的光分开并传送至多通道光探测器 202 进行光电转换, 并利用前述之多通道窄带带通滤波器 203、FPGA 204 和工控机 208 作信号处理及分析。

[0055] 图 9 为以单一光纤气体传感头结合调制频域复用技术的传感器结构示意图。传感器利用三个不同调制频率的信号作为激光器 206 的电流调制, 三束不同调制频率、不同波长的输出光经光隔离器 207 及一个 3×3 光纤耦合器 209 耦合到一根单模光纤, 再经过单一个光纤气体传感头 201, 再传送至光探测器 202 进行光电转换, 其后这三个不同调制频率、分别带有三种不同气体的浓度数据的信号会被三个中心频率不同的窄带带通滤波器 203 把它们分开, 再送到 FPGA 204 和工控机 208 作信号处理及分析。

[0056] 而结合时分复用技术的传感器系统则利用三个激光器 206 的不同工作时序将三种不同气体的浓度信息经单一个光纤气体传感头 201 检测出来。如图 10 所示, 传感器利用 FPGA 204 输出三个不同时序的开关调控信号至 DFB 激光器 206 的电流注入电路, 以控制三个不同波长激光器 206 的工作状态。例如当 1.66 微米激光器的状态处于开启时, 1.53 微米及 1.62 微米激光器便会关闭, 在这时段, 只有 1.66 微米波长的光束经光隔离器 207 及 3×3 光纤耦合器 209 传送至光纤气体传感头 201, 然后信号经光探测器 202 再被窄带带通滤波器 203、FPGA 204 和工控机 208 处理及分析。随后, 1.53 微米及 1.62 微米的光束在分别的时段进入光纤气体传感头 201, 并进行光电转换, 再被处理及分析。

[0057] 由于分布反馈式激光器有着谱线窄、功率大等特点, 激光器的输出光实际上可作为一个多点气体测量系统的光源, 这样便能更加有效地用资源及进一步降低成本。本发明提出了三个方案, 就是利用单一组光源(三个波长分别在 1.66 微米、1.53 微米及 1.62 微米附近的分布反馈式激光器)由多路光纤耦合器 209 把输出光耦合及分束, 再传送至三个位于不同检测点的不同光纤气体传感头 201, 再由波分、调制频域及时分的复用方法同时把三个不同检测点的甲烷、乙炔及乙烯气体的浓度检测出来。图 11、图 12、图 13 便分别为结合波分复用技术、调制频域复用(即频分复用)技术及时分复用技术作多点气体测量的光纤气体传感器装置结构示意图。

[0058] 如图 11, 利用三个不同波长的分布反馈式激光器 206, 它们的输出光经由光隔离

器 207 后,由一个 $N \times N (N \geq 3)$ 光纤耦合器 213 耦合到三根或多根单模光纤,并经过三个或多个位于不同检测点的光纤气体传感头 201,三个不同波长的光束会被三种不同的气体吸收。其后会利用波分复用器 212 将每个光纤气体传感头 201 的三个不同波长 ($\lambda_{1.66\mu m}$, $\lambda_{1.53\mu m}$, $\lambda_{1.62\mu m}$) 的光分开并传送至光探测器进行光电转换,并利用前述之窄带带通滤波器 203、FPGA 204 和工控机 208 作信号处理及分析。

[0059] 如图 12,利用三个不同调制频率的信号作为激光器的电流调制,三束不同调制频率、不同波长的输出光经光隔离器 207 及一个 $N \times N (N \geq 3)$ 光纤耦合器 213 耦合到三根或多根单模光纤,再经过三个或多个光纤气体传感头 201,再分别传送至光探测器 202 进行光电转换,每个光纤气体传感头 201 输出的三个不同调制频率、分别带有相应检测点的三种不同气体浓度数据的信号会被三个中心频率不同的窄带带通滤波器 203 把它们分开,再送到 FPGA 204 和工控机 208 作信号处理及分析。

[0060] 如图 13,利用三个激光器 206 的不同工作时序将三个或以上的光纤气体传感头 201 中的三种不同气体浓度信息检测出来。如图 13 所示,传感器利用 FPGA 204 输出三个不同时序的开关调控信号至分布反馈式激光器 206 的电流注入电路,以控制三个不同波长激光器 206 的工作状态。例如当 1.66 微米激光器的状态处于开启时,1.53 微米及 1.62 微米激光器便会关闭,在这时段,只有 1.66 微米波长的光束经光隔离器 207 及 $N \times N (N \geq 3)$ 光纤耦合器 213 传送至三个或多个不同检测点的光纤气体传感头 201,然后信号经光探测器 202 作光电转换,再被窄带带通滤波器 203、FPGA 204 和工控机 208 处理及分析。随后,1.53 微米及 1.62 微米的光束在分别的时段进入三个或以上不同检测点的光纤气体传感头 201,并进行光电转换,再被处理及分析。

[0061] 应用上述技术,可同时对三种气体(甲烷、乙炔及乙烯)的气体浓度进行测量。实验所获得测量精度分别为甲烷优于 5ppm、乙炔优于 1ppm 及乙烯优于 20ppm,测量范围分别为(0 至 2.5%)、(0 至 0.5%) 及(0 至 5%)。

[0062] 基于测量所得的三种气体浓度的信息,可利用现有的充油电气设备安全标准,对变压器状态进行评估及预警,并决定是否需要维护或作进一步跟进。如果发现故障,亦可对变压器故障的类型进行估计,其中基于以上三种气体的浓度,可利用戴维三角形图示法(Duval Triangle Method)来判断故障是属于局部放电、低能量放电、高能量放电、热故障(温度 $< 300^{\circ}C$)、热故障($300^{\circ}C < 温度 < 700^{\circ}C$) 或热故障($温度 > 700^{\circ}C$),以建立基于三种气体浓度的“在线”故障监测系统。

[0063] 上述三种气体(甲烷、乙炔及乙烯)光纤传感器和基于其它原理(如半导体式、固体电解质式、电化学式)的气体传感器相结合,可以得四种或以上的故障气体浓度,从而建立更完善的“在线”故障监测系统。该系统除能测量甲烷、乙炔及乙烯气体的浓度外,还可以测量氢气(H_2)、乙烷(C_2H_6)、一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO_2)等气体的浓度。这些测量数据和被业界公认的油中溶解气体解释模型或标准(如 IEC60599:1999、IEEE C57.104 1999 及中国国家标准 GB/T7252-2001)相结合,能对可能的故障进行更精确的识别。

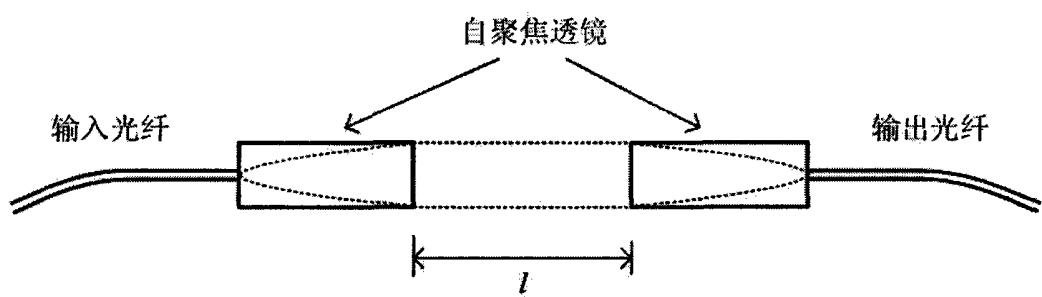


图 1

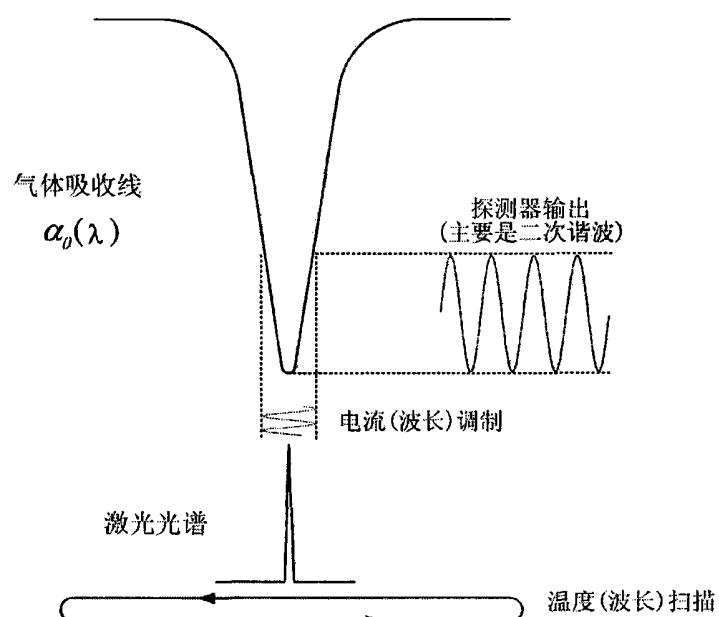


图 2

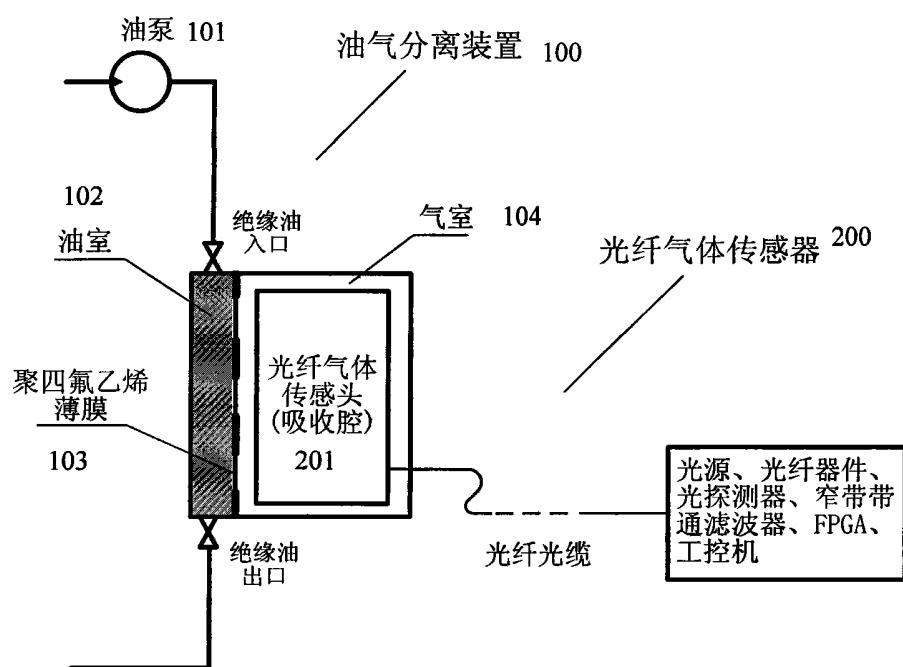


图 3

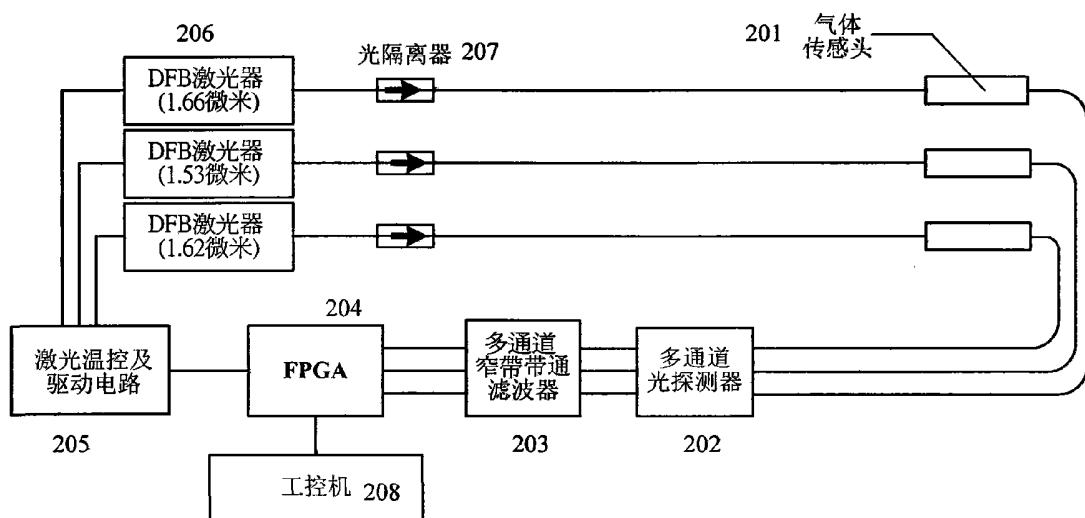


图 4

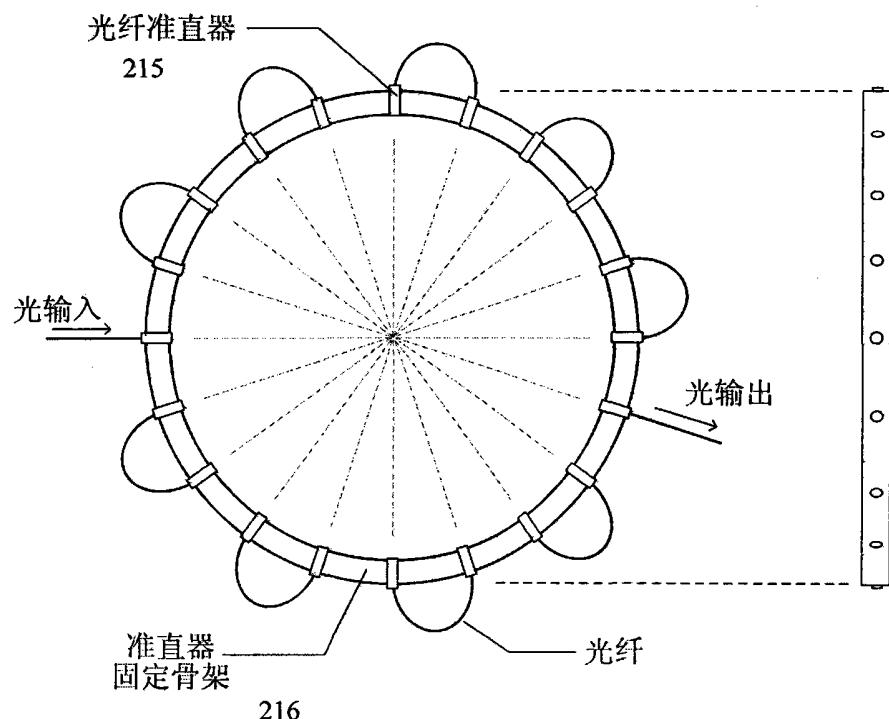


图 5

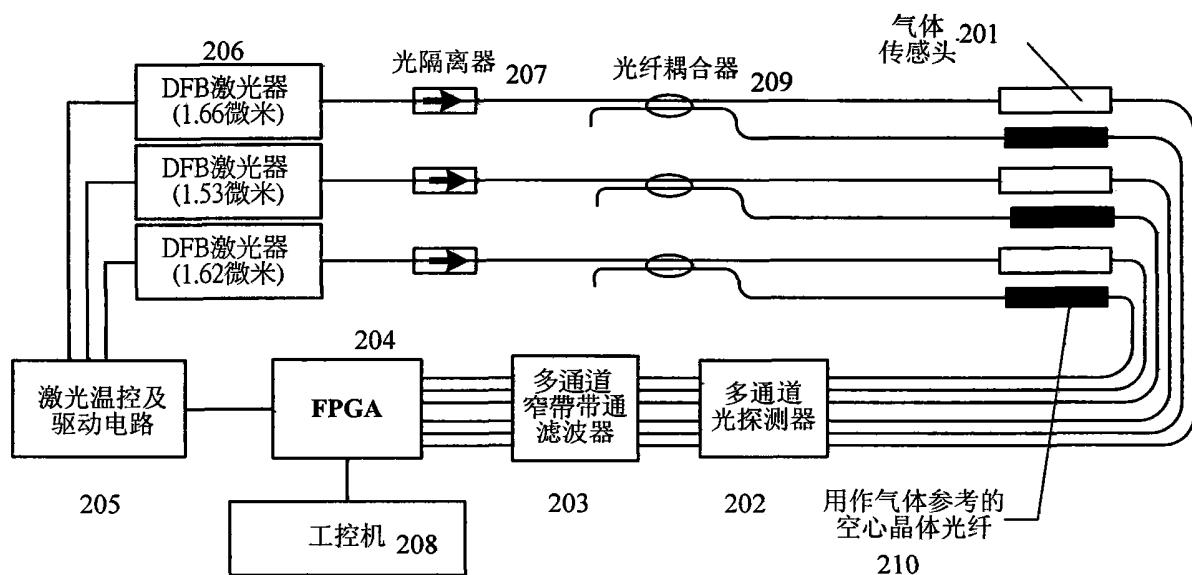


图 6



图 7

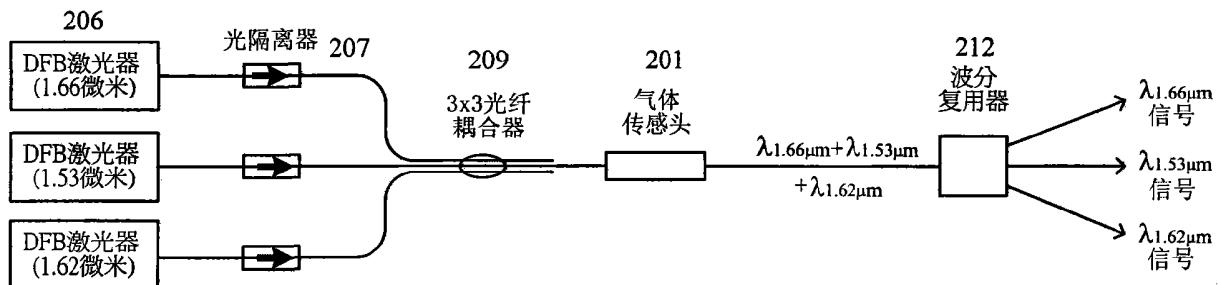


图 8

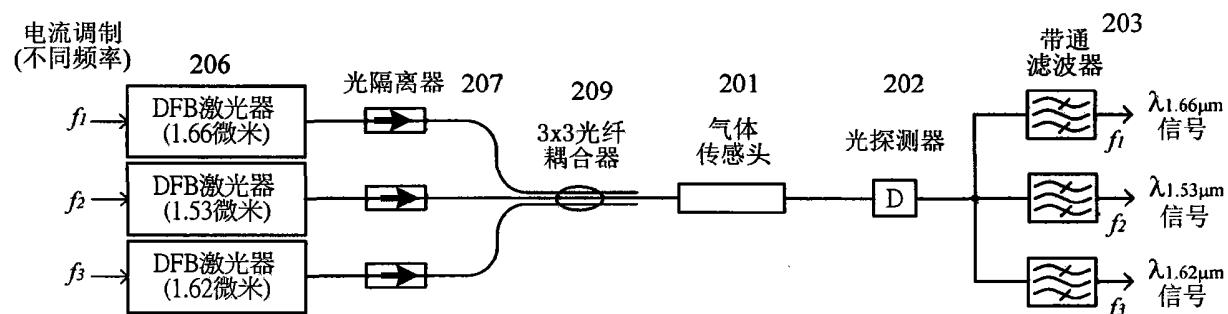


图 9

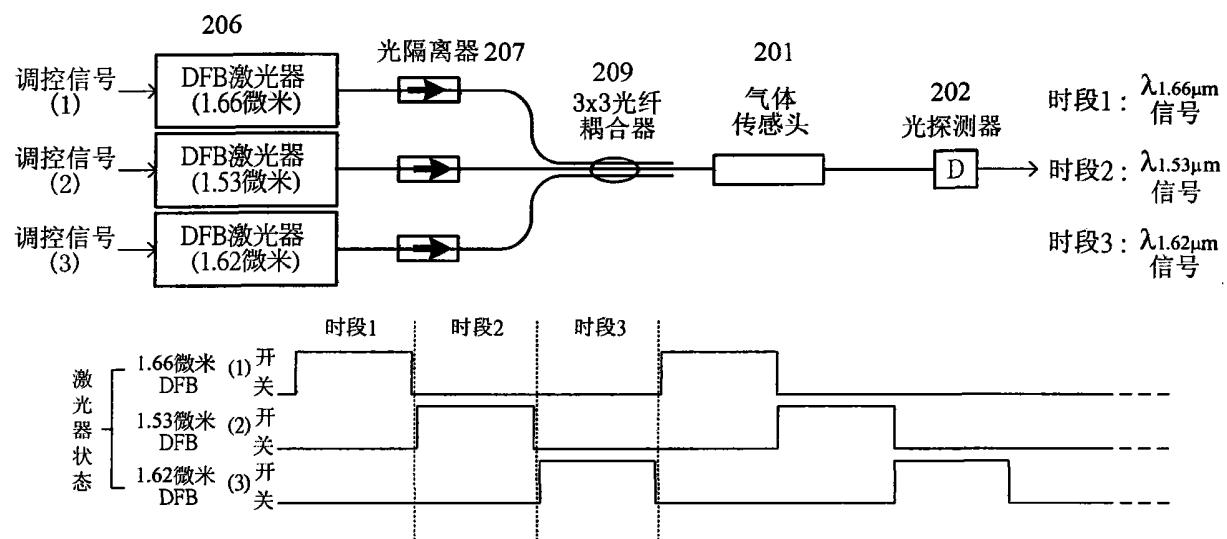


图 10

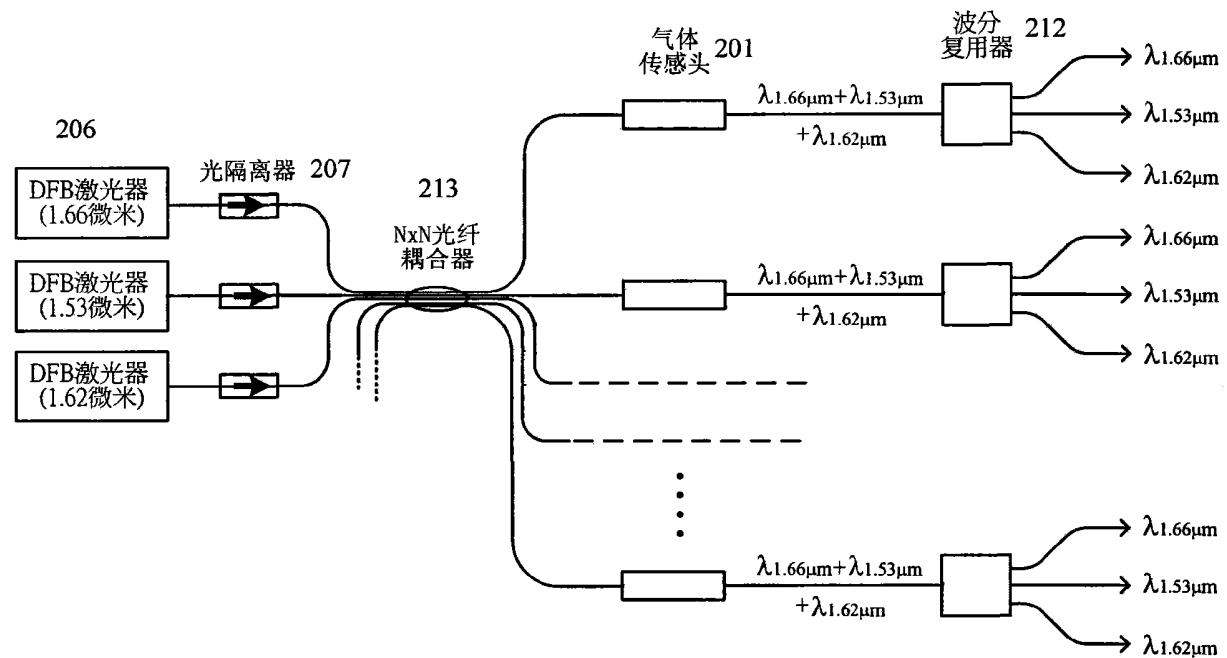


图 11

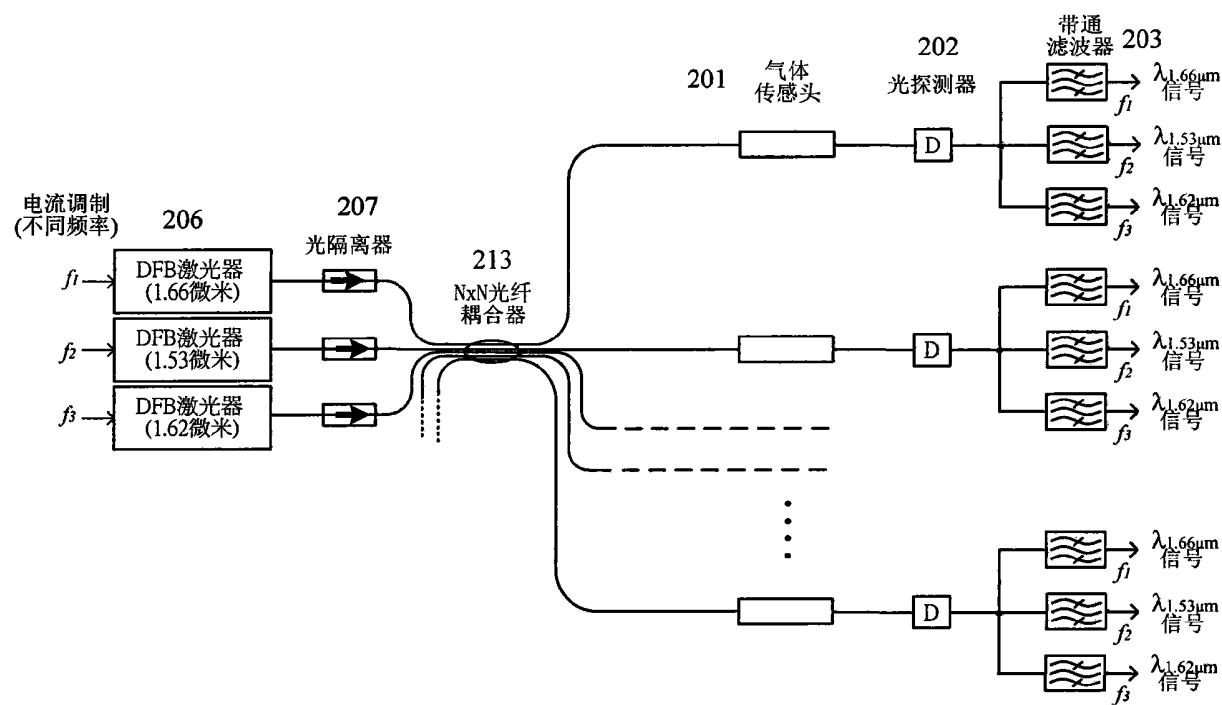


图 12

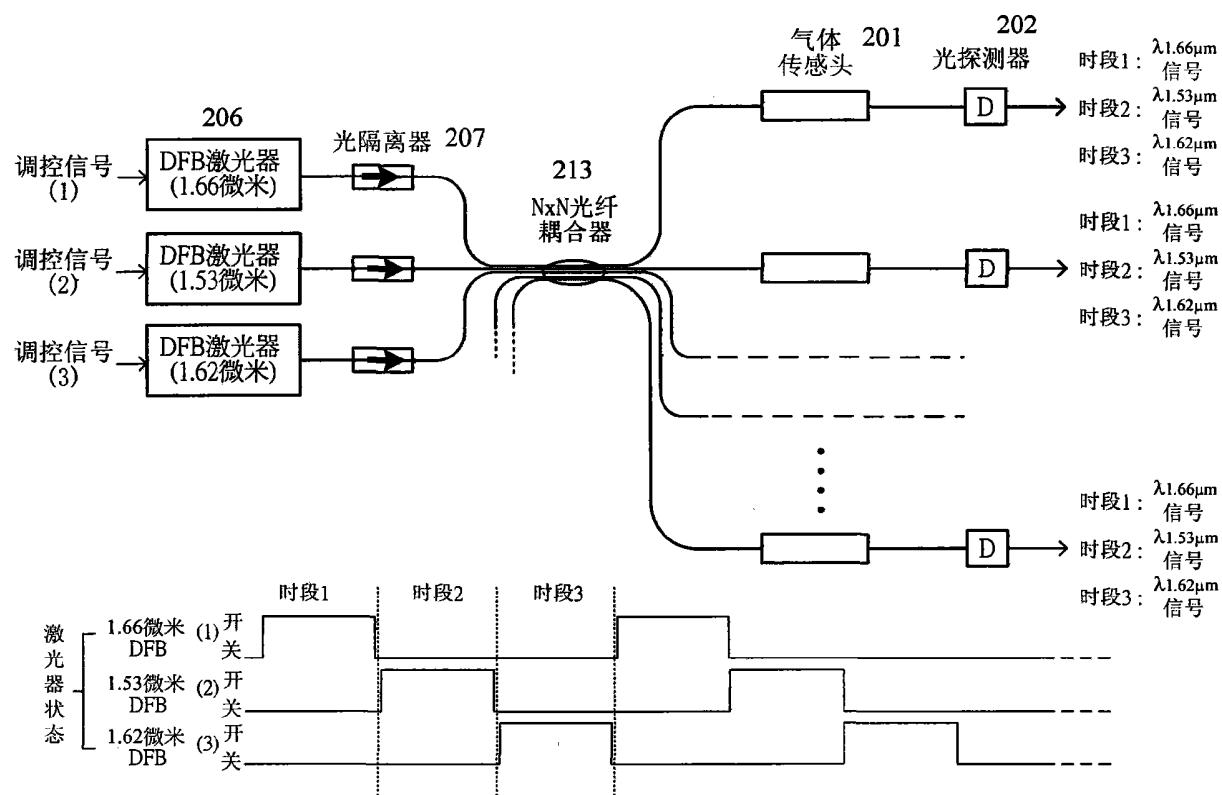


图 13