



普适光谱调制传感器 原理及应用

史永基 史建军 史战军

文章编号：1006-883X (2000) 01-0006-07

摘要：本文介绍了性能稳定可靠、精度高、成本低的普适光谱调制传感器。使用这种传感器的光学测量装置不受光源强度变化的影响，也不受由于光纤弯曲和光纤连接器损失所引起的透射率变化的影响。该光谱调制传感器系统可探测多种物理参数，如压力、温度、气体密度和多种化学物质，文章中将加以介绍。

关键词：光谱调制传感器、光谐振结构、化学物质传感器、气体密度传感器、pH 值传感器、压力传感器、温度传感器。

一、普适光谱调制传感器的原理和结构

1、引言

许多传感器可用于传感和测量不同的物理参数，如激光多普勒振动传感器^[1]、液晶微位移传感器^[2]、CCD 图像传感器^[3]及各种光纤传感器^[4-6]。这些传感器比较简单，其精度受多种因素制约。

本文介绍一种性能稳定可靠、精度高、成本低的普适光谱调制传感器。使用这种传感器的光学测量装置不受光源强度变化的影响，也不受由于光纤弯曲和光纤连接器损失所引起的透射率变化的影

响。该光谱调制传感器系统可探测多种物理参数如压力、温度、气体密度和多种化学物质。

2、结构

光谱调制传感器系统的基本结构由光源、光传输装置、具有光谐振结构的光谱调制传感器和把光谱调制传感器的输出光转换为电信号的探测装置等组成。

光传输装置由输入光纤、分束器、光纤连接器、传感器光纤和输出光纤组成。分束器和光纤连接器把传感器光纤和输入、输出光纤连接起来。

来自光源的输入光连续经过输入光纤、分束器、光纤连接器和传感器光纤进入光谱调制传感器，光谱调制传感器的输出光连续经过传感器光纤、光纤连接器、分束器和输出光纤进入探测装置。这样，单根传感器光纤既完成了输入光的传递，又完成了输出光的传递。既简化了光学测量装置，又使体积减小，成本降低。与使用两根独立的传感器光纤分别传递输入光和输出光的系统相比，提高了其可靠性。

光谐振结构是光谱调制传感器的关键部件，不同形式的光谱调制传感器根据其光谐振结构特性可



探测不同的物理参数。光谱振结构通常由一对分离的反射面组成，光谱振结构的反射率和透射率是其光敏物理特性（如反射面间的距离、反射面的光学特性、反射面间介质的折射率）的函数。如果光谱振结构的光敏物理特性至少有一个随被测物理参数而变化，那么，光谱调制传感器的反射或透射光作为被测物理参数的函数也将发生变化。因此，光谱调制传感器的输出光将被光谱振结构作为被测物理参数的函数而调制，并且传递被测物理参数的信息。

光谱调制传感器调制的输出光经探测装置转换为电信号。探测装置由光电探测器和放大器组成。当光学测量装置校准后，在被测物理参数的一定值域内，输出电信号就可提供被测物理参数的准确值。

图 1 所示即为上述光谱调制传感器系统的基本结构。在这种系统中，若光源强度发生变化及光纤弯曲或光纤连接器损失造成透射率变化，可能引起测量误差。

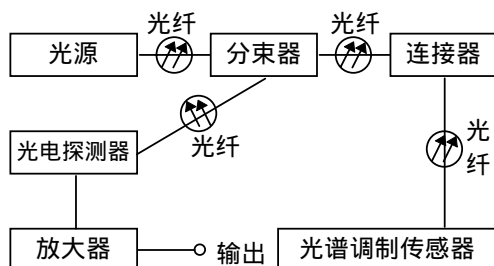


图 1 光谱调制传感器系统的方框图

为了消除上述测量误差，下面给出提高测量精度的第二种结构。它与上述的基本结构相类似，具体参见图 2。

首先，选择的光源应该能发射至少两种波长的光或一段波带，可以是一发光二极管。该光谱调制传感器同前面一样，它的光谱振结构的反射率和透射率是被测物理参数的函数，光谱调制传感器的输出光，将被光谱振结构作为被测物理参数而调制，并传递被测物理参数的信息。

其次，光谱调制传感器调制的输出光的波长在

探测装置中被分成独立的两部分，分别被光电探测器转换为电信号，经放大器放大后，由分配器电路根据这两个电信号的比率提供一输出信号。当光学测量装置校准后，在被测物理参数的一定值域内，分配器电路的输出信号提供被测物理参数的准确测量值。

重要的是，该结构不会由于光源强度的变化和光纤弯曲或连接器损失引起的透射率变化，使测量精度受到影响。这是因为这些变化对光谱调制传感器的两部分输出光的影响是相同的。因此，两部分输出光的电信号经分配器电路后，由光源强度变化和透射率变化产生的影响相互抵消，分配器的输出信号则不受影响。

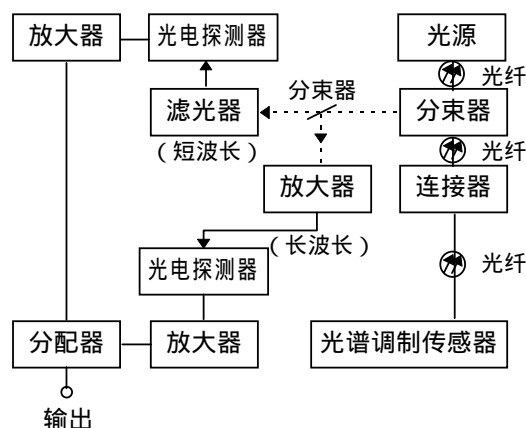


图 2 改进后的光谱调制传感器系统方框图

3、工作原理

这种传感器的工作原理涉及光谱振结构的反射率曲线的周期性光学特性，这种光学特性是由输入光和被测物理参数决定的。曲线上无论多小的位移均称微位移，都能用于传感和测量多种物理参数如压力、温度、气体密度和化学物质等。

最简单的光谱振结构是由一对分离的平行反射面组成的平行板光谱振结构，其反射率 R 由下式给出：

$$R = 1 - S^2 / [(1 - r)^2 + 4r \sin 2\theta] \tag{1}$$

式中， $S = \sqrt{S_1 + S_2}$ ， S_1 、 S_2 分别是两反射面的透射

率；

$$r = \sqrt{r_1 + r_2} \quad r_1, r_2 \text{ 分别表示两反射面的反射率；}$$

$$\theta = 2\pi n t \cos \phi / \lambda + e \quad (2)$$

其中， n —两反射面间介质的折射率；

t 两反射面间的距离；

ϕ —两反射面间光的反射角；

λ —输入光的波长；

e —任一反射面因反射引起的相移。

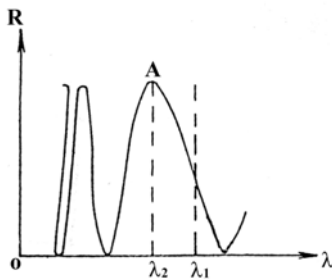


图3 光谐振结构的反射率曲线

图3所示是有所给物理特性的平行板光谐振结构的典型反射率曲线。可以看出，平行板光谐振结构的反射率 R 是输入光波长的周期函数，这是光谐振结构的共同特性。

由式(1)、(2)可以看出，平行板光谐振结构的反射率 R 是参数 $nt \cos \phi / \lambda$ 的周期函数。

当 $nt \cos \phi / \lambda = (2m+1)/4$ 时，反射率最大；

当 $nt \cos \phi / \lambda = m/2$ 时，反射率最小 ($m=0,1,2, \dots$)。

相邻的最大值和最小值之间， $nt \cos \phi / \lambda$ 参数的绝对值刚好变化 $1/4$ 。

如果平行板光谐振结构的某些光敏物理特性(如折射率 n 或距离 t 、反射角 ϕ 或相移 e 等)能作为被测物理参数的函数而变化，那么， $nt \cos \phi / \lambda$ 参数能随被测物理参数的变化而改变。通常，平行板光谐振结构的光敏物理特性是被测物理参数的函数。其反射率随任一物理特性而变化。

以上有关平行板光谐振结构的阐述适用于非平行板光谐振结构的其它各种光谐振结构。

通常，任何光谐振结构的反射率曲线随波长 λ 左右移动(这样的移动均称微位移)。任何光谐振结

构的光敏物理特性都是一定的，其反射率曲线的谐振周期定义为反射率曲线上的一个完整周期。当然，在反射率曲线上，由于谐振周期可能在任意位置开始，因而有许多这样的谐振周期。

研究表明，可以用光谐振结构的反射率曲线上的工作段对物理参数进行精确测量。工作段是指在反射率曲线上长度小于一个谐振周期的任意段。由于任何光谐振结构的反射率曲线都具有周期性，因而有许多这样的工作段。

光谱调制传感器的光谐振结构将波长为 λ_1 的输入光作为被测物理参数的函数进行调制，产生波长为 λ_1 的调制输出光，传递被测物理参数的信息。这些信息经光电探测器、放大器转换为电输出测量信号。

为了获得更高的灵敏度和尽可能宽的值域，最好再设计这样一种光谐振结构，使其输出光根据工作段的微位移随被测物理参数而变化，并把被测物理参数的值域扩大到最大限度。例如，可通过光谐振结构的合理设计、特殊工作段的合理选择、输入测量光波长和振幅的合理选择来实现，使光谱调制传感器的输出光被明显调制获得最长的工作段，且大于被测物理参数的值域。

光谐振结构的输出光根据工作段的微位移，使光谐振结构反射率曲线的工作段发生尽可能大的变化，输入测量光的波长也可根据输入测量光的频率或振幅而发生变化。另外，也可以仅利用工作段的一部分(如它的接近直线部分)，以提高光谐振结构的输出光的线性度，如图4所示。

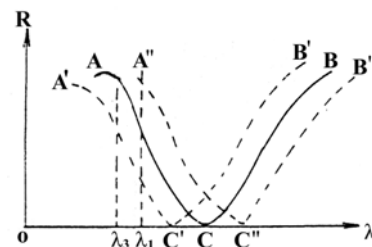


图4 光谱调制传感器系统工作期间图2曲线A的一部分

如果光谐振结构只由被测物理参数决定，则其



调制的输出光信号与被测物理参数不是一一对应的关系，那么输出光信号可能提供不确切的信息。如对单色输入测量光波长 λ_1 ，当光谱谐振结构仅由被测物理参数决定时，它的工作段 AC 被左右移动，就不再覆盖波长 λ_1 。

如果发现调制输出光没有预期的一一对应关系，可通过选择不同波长或振幅的输入测量光、选择不同物理结构的光谐振结构或选择不同的工作段，直到得到唯一的一一对应关系。

在改进后的光谱调制传感器系统中，把光谱谐振结构的输出光分为长波、短波两部分而光电探测器综合长波、短波两部分，产生各自的电信号，分配器电路再根据其比率提供输出信号。

研究表明，把调制输出光分离为长波、短波两部分，并取其比率，不仅提供了精确的输出测量信号，而且消除了一定的误差，从而提高了测量的可靠性。

二、普适光调制传感器的应用

1、光谱调制压力传感器

图 1 测量系统中的光谱调制传感器由基片、圆柱形谐振腔和谐振腔的端盖组成。谐振腔有一反射底面，端盖有反射内表面和外表面，谐振腔的反射底面与传感器光纤间的基片厚度大约和传感器光纤的直径相等。图 5 所示为一光谱调制型压力传感器的结构图。

绝对压力传感器的谐振腔为真空，端盖用粘接剂密封；差动压力传感器的谐振腔通过光导管和压力源的一端相连，压力源的另一端对着端盖的外表面。通常绝对压力传感器，光导管可省略。

反射面涂有一层厚 10~20nm 的高折射率透明介质（如金红石、二氧化钛、立方氧化锆或硅等），以提高其反射率。谐振腔的反射底面和端盖的反射内表面构成光谱谐振结构，由于谐振腔为真空，其折射率为 1.000。

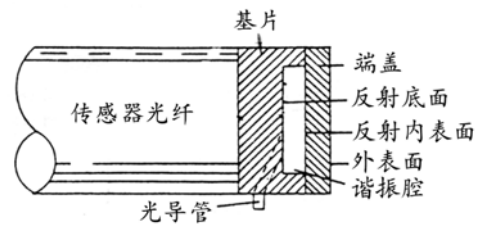


图 5 光谱调制压力传感器

谐振腔的直径为 200 μm ，深 1.27 μm 。传感器有一玻璃基片，直径为 76.2mm，厚为 (0.275 \pm 0.025)mm。玻璃基片表面先用热肥皂水清洗，再用清水漂净，在 HF 稀释液（由 3ml 水、2g 的 NH_4F 和 48% HF 溶液组成）里腐蚀、抛光 1 分钟后，漂洗干净，然后在 300 $^\circ\text{C}$ 烘干半小时。

用传统的真空淀积技术，在玻璃基片上涂敷一层 20nm 厚的铬，使光致抗蚀剂能较好粘附于玻璃基片上，光致抗蚀剂以 3000rpm 旋涂在铬面上，然后在 90 $^\circ\text{C}$ 温度下烘干半小时。

用传统技术，准备好一照相掩膜，其上有排成阵列的圆孔，圆孔直径和谐振腔直径(200 μm)相等，将掩膜和涂有光致抗蚀剂的玻璃基片装好，然后曝光、显影，用水洗净、晾干。在玻璃基片上就留下了直径为 200 μm 的没有光致抗蚀剂的圆。在铬腐蚀液（由一份 HCl 和一份丙三醇组成）里腐蚀，无光致抗蚀剂的铬层被腐蚀掉，这样在玻璃基片上就留下直径为 200 μm 的圆。再在上述的 HF 稀释液 (20.50 $^\circ\text{C}$) 中浸蚀大约 20 分钟，以产生 1.2 μm 深的空腔。

用传统的真空淀积技术，在空腔的底面涂一层 20nm 厚的 TiO_2 ，以提高空腔底面的反射率，这样可提高调制输出光的强度。然后在丙酮和铬腐蚀液中，使留下的光致抗蚀剂和铬被蚀掉，在清水中清洗后，通风晾干。

传感器谐振腔的端盖是一直径为 76.2mm、厚为 0.46mm 的硅基片，采用溅射技术，在其表面产生厚 4.0 μm 、每平方厘米有 10^{20} 个硼原子的阻蚀层。为了增加其粘附性，先把硅基片在 900 $^\circ\text{C}$ 的烘箱里烘烤一小时，使其在阻蚀层上形成约 20nm 厚的二



氧化硅层。在热肥皂水里清洗玻璃基片和硅基片，再在超声波中清洗 15 分钟，依次用水和酒精漂洗，再有水和酒精清洗，通风晾干。然后放置硅基片并调整它与玻璃基片的位置，使其形成夹层，将它们粘接在一起。先放入一真空箱(用一小时，将真空箱帛空到 8.0×10^{-4} Pa)里，真空箱的正极与硅基片的外表面相接，负极与玻璃基片的外表面相接，通过加热器加热夹层，并保持在 500°C ，在该温度下装配。加在正、负极间的直流电压在 0~800V 范围内逐渐增加，并在 800V 保持 8~10 分钟，直到电流稳定，断开电源。这时，硅基片和玻璃基片紧密地粘接在一起，在这个过程中，硅基片上的二氧化硅层起辅助作用。

为了激活谐振腔底部的通气管，将粘接温度继续在 500°C 保持 1.5 小时。通气管的作用是除去残留气体或硅基片和玻璃基片粘接后放出的气体，因此，在谐振腔内形成高真空。然后关闭加热器，当夹层冷却到 300°C 打开真空箱，继续冷却到 200°C ，取出夹层。

在粘合的硅基片和玻璃基片夹层中，通过抛光去掉 70%~80% 厚的硅基片，然后放在 115°C 的 EDP 腐蚀液(由 8ml 水、17ml 乙二胺和 3g 邻苯二酚制成)里腐蚀，使其只留下 $4.0\mu\text{m}$ 厚的阻蚀层，和玻璃基片粘接形成端盖。

为了把传感器安装到传感器光纤的自由端，先将传感器光纤的自由端夹住并抛光成光学平面，然后用适当折射率的粘合剂将传感器安装在传感器光纤的自由端，这种粘合剂的折射率最好能与传感器光纤和传感器基片的折射率相近。

当光谱调制压力传感器承受外部压力时，端盖根据外部压力大小向谐振腔的反射底面弯曲。当作用在端盖的外部压力增大时，弯曲度增加；反之则减小；当外部压力为零时，弯曲度为零。因此，当作用在端盖的外部压力增大时，光谱振结构的反射面间的间隙减小；反之，间隙增大；当外部压力为零时，间隙最大。

对差动压力传感器，压力源的一端通过导管与

谐振腔相连，另一端对着端盖的外表面。当端盖外表面压力超过谐振腔内的压力时，端盖向谐振腔的底面弯曲，弯曲度依赖两者的压力差；当压力差为零时，端盖不弯曲，当空腔内表面压力大于端盖外表面压力时，端盖将向外弯曲，弯曲度也依赖于压力差的大小。

无论是绝对或差动压力传感器，端盖的弯曲度由压力(差)决定。端盖弯曲度的变化将引起光谱振结构反射面间的间隙发生变化，使光谱振结构的反射率曲线和工作段发生相应的微位移，传感器的输出光作为压力的函数被调制，并传递压力的准确信息。

图 6 所示的光谱调制压力传感器的测量曲线是用上述方法并利用图 2 所示的光学测量系统描绘的。输出测量信号是用任意单位测量的。

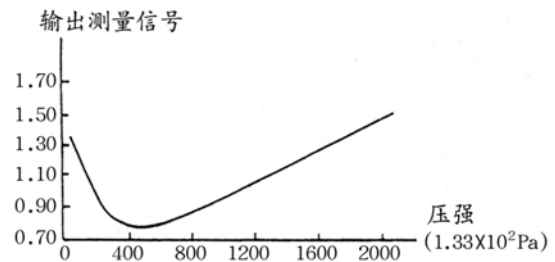


图 6 光谱调制压力传感器的输出测量曲线
(用图 2 的光学测量系统)

2、光谱调制气体密度传感器

光谱调制压力传感器很容易改造成气体密度传感器，如图 7 所示。除了下面讨论的明显不同点外，在其它方面均与压力传感器相同。

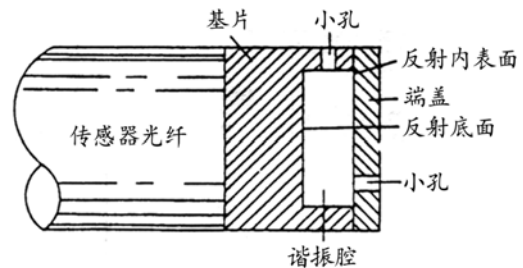


图 7 光谱调制气体密度传感器

由图 7 可以看出：气体密度传感器的端盖和基



片上分别有一小孔，使气体进入谐振腔以便检测。它的光谐振结构由反射面和谐振腔中的气体组成。谐振腔中气体的折射率是气体密度的函数，气体密度的变化将使气体的折射率发生变化，使光谐振结构的反射率曲线和工作段产生相应的微位移，传感器的输出光作为谐振腔中气体密度的函数被调制，传递气体密度的准确信息。

该传感器反射面间隙不会发生变化，因为传感器的内部和外部压力相等，由于其谐振腔不是真空，因此不需导管。气体密度传感器适用于图 1、图 2 所示的光学测量系统。

3、光谱调制温度传感器

光谱调制温度传感器有一个具有周边的基片，如图 8 所示。该基片涂有一层敏感介质，敏感介质有反射内表面、外表面和周边，其反射内表面和外表面组成光谐振结构。

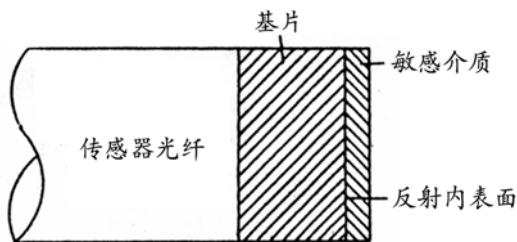


图 8 光谱调制温度传感器

敏感介质的外表面和周边可吸收或反射其表面的光，不让外部光进入光谐振结构。另外，用金属或其它热传导材料制成的光屏蔽罩，能确保传感器和传感器光纤末端与非要求的外部光隔绝。

下面讨论温度传感器的两种形式：

第一种温度传感器的敏感介质是厚 $0.7\mu\text{m}$ 的硅层，有内、外两个光学平面，其厚度为输入光平均波长的 $1/20$ ，基片是一层耐热玻璃。使用时，从传感器光纤进入光谐振结构内表面的光在反射面间被内反射，当硅层温度变化时，硅层的折射率也发生变化，从而使光谐振结构的反射率曲线和工作段产生相应的微位移，传感器的输出光作为温度的函数被调制，传递温度的准确信息。

第二种温度传感器的敏感介质是一层具有较高热胀系数的物质，如聚氯乙烯或聚乙烯，基片也是一层耐热玻璃。

使用时，从传感器光纤进入光谐振结构内表面的光在反射面间被内反射，当敏感介质的温度发生变化时，敏感介质发生膨胀或收缩，使反射面间距发生变化，从而使光谐振结构的反射率曲线和工作段产生相应的微位移，输出光作为温度的函数被调制，传递温度的准确信息。

4、光谱调制 pH 值传感器

温度传感器很容易改造成 pH 值传感器，即把敏感介质改为玻璃或其它能随 pH 值变化而膨胀或收缩的物质。pH 值传感器中，敏感介质是 pH 敏感玻璃，pH 敏感玻璃和其反射面构成光谐振结构。

工作时，pH 敏感玻璃根据 pH 变化膨胀或收缩，使光谐振结构的两反射面随 pH 值靠近或远离，两反射面间距离变化使反射率曲线和工作段发生微位移，传感器的输出光作为 pH 的函数被调制，传送 pH 的准确信息。

5、光谱调制化学物质传感器

光谱调制化学物质传感器由基片、具有反射底面的谐振腔和具有反射内表面的端盖组成，如图 9 所示。谐振腔内充满敏感介质，其物理性质随被测物理参数而变化，端盖透析被测物理参数。传感器的光谐振结构由反射面和敏感介质组成，传感器固定在传感器光纤的末端，图 1、图 2 光学测量系统可用于探测原子、分子和离子等化学物质。

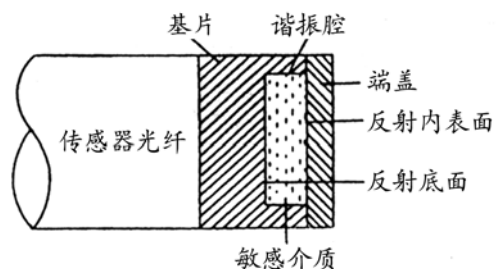


图 9 光谱调制化学物质传感器

端盖由金属或其它物质在敏感介质的外表面蒸镀成微孔状花样，通过微孔可把敏感介质和外



界连通。另外，端盖也可由离子或气体选择性渗透膜组成，如渗透性或半渗透性薄膜；也可以是聚合材料，如聚乙烯、醋酸纤维或硅橡胶。端盖可用上述任一方法通过旋涂、浸涂或真空淀积技术在基片或敏感介质上形成。

敏感介质的折射率是被测物理参数或浓度的函数，也就是被测化学物质如 pH、PO₂、PCO₂ 或某一离子的函数。工作过程中，敏感介质折射率变化，使光谐振结构的反射率曲线和工作段发生相应变化，输出光作为被测化学物质参数或浓度的函数被调制，传递被测化学物质参数或浓度的准确信息。

三、结论

光谐振结构是光谱调制传感器的关键部件，不同形式的光谱调制传感器，根据其光谐振结构的特性可传感和测量不同的物理参数，如压力、温度、气体密度及各种化学物质。这些光谱调制传感器是稳定可靠、成本低、精度高的光学测量装置。

参考文献

1. 史永基，《激光多普勒振动传感器》，仪器仪表学报，1990，11(2): 207~210
2. 史永基，《液晶微位移传感器》，半导体光电，1994，15(2): 259~262
3. Wai-Hon L., *Signal Processing Techniques for CCD Image Sensor*. Appl. Opt., 1984, 23(23):280
4. Davis C M., *Fiber Optic Sensor: An Overview*. Opt. Eng., 1985, 5(3):133

5. Main R P. *Fiber Optic Sensors-future light*. Sensor Rev., 1985, 5(3):133

6. Stueflotten S, Christenson T, Iverson S, et al. *An Infrared Fiber Optic Gas Detection System*. Proc. SPIE, 1984, 478:87

Universal Spectral Modulation Sensors

Abstract: A universal spectral modulation sensor with low cost, stable, reliable and accurate performances is presented. The optical measuring device using a universal spectral modulation sensor is immune to change the intensities of the light source and light transmission due to optical fiber bending and optical fiber connector loss. The application of spectral modulation sensor system are presented that is to detect and measure various physical parameters such as pressure, temperature, gas density, and various chemical species.

Keywords: Spectral Modulation Sensor, Optically Resonant Structure, Chemical Species Sensor, Gas Density Sensor, pH Sensor, Pressure Sensor, Temperature Sensor.

作者简介

史永基、史战军：洛阳工业高等专科学校校加工厂
21 信箱（471003）

史建军：武汉士官学校

读者服务卡编号 002