

文章编号: 1672-8785(2016)03-0001-05

# 红外光源在有害气体检测中的应用研究

胡莉军 任向红 董超

(第二炮兵工程大学, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 研究了红外光源在有害气体检测中的地位和作用。介绍了三类不同红外光源的结构原理, 比较了它们相互之间的优缺点, 并对其应用情况进行了综述。然后详细分析了气体检测技术对红外光源性能的要求以及在光源选型时的注意事项。最后, 根据有害气体检测的发展需求, 阐明了红外光源的发展趋势。

**关键词:** 红外光源; 有害气体; 光谱检测

中图分类号: TN212

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.03.001

## Application of Infrared Source in the Detection of Harmful Gases

HU Li-jun, REN Xiang-hong, DONG Chao

(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** The status and role of an infrared source in gas concentration detection are studied. The structural principles of three different kinds of infrared sources are presented. Their advantages and disadvantages are compared with each other and their applications are overviewed. Then, the performance requirements of infrared sources for gas detection are analyzed in detail. The notes for source selection are given. Finally, the development trend of infrared sources are elucidated according to the development demands for harmful gas detection.

**Key words:** infrared source; harmful gas; spectral measurement

## 0 引言

基于光谱吸收原理的气体检测系统主要由红外光源、气体吸收池、探测器以及硬件电路等几部分组成<sup>[1]</sup>。作为该系统的核心元件<sup>[2]</sup>, 红外光源在很大程度上决定着整个检测系统的准确性和检测精度, 其波长范围、热稳定性和调制特性等都会对检测系统造成重要影响<sup>[3]</sup>。对于不同性质、不同浓度的有害气体, 检测时所使用

的光源也不尽相同。针对不同的使用环境, 选择合适的红外光源来构成检测系统, 可以有效提升系统的检测精度, 并可避免造成元器件性能不匹配、光能量浪费等问题。

## 1 红外光源在有害气体检测中的应用

红外光源是一种以产生红外辐射为主要目的的非照明用电光源。红外辐射是指波长大于红光波长一定范围的电磁辐射, 可分为近红外

收稿日期: 2016-01-12

作者简介: 胡莉军 (1989-), 男, 河南登封人, 硕士, 主要研究方向为空气质量检测与控制。

E-mail: 1126710744@qq.com

( $0.78 \sim 1.4 \mu\text{m}$ )、中红外( $1.4 \sim 3 \mu\text{m}$ )和远红外( $3 \sim 1000 \mu\text{m}$ )三个波段，其相应的光源称为近红外、中红外和远红外光源。

在对有害气体进行检测时，极性气体会对红外光形成一定的吸收区域。首先，光源对着气体发出一定波长范围内的红外光。当受到光束照射后，与气体吸收区重叠的部分会被气体吸收。经检测得到初始光强度以及通过气体后的光强度。然后根据朗伯-比尔定律反演出有害气体的浓度，从而实现对有害气体的精确检测。不同有害气体的红外吸收区不尽相同。比如， $\text{CH}_4$ 的基频吸收带为 $3.3 \mu\text{m}$ ， $\text{CH}_3\text{O}$ 为 $3.5 \mu\text{m}$ ， $\text{NO}_2$ 为 $3.5 \mu\text{m}$ ， $\text{NH}_3$ 为 $3 \mu\text{m}$ ， $\text{CO}$ 为 $4.6 \mu\text{m}$ 。只有选择与有害气体吸收带相对应的红外光源，才能实现有害气体检测系统<sup>[4]</sup>。

## 2 红外光源的分类及应用

根据红外光产生原理的不同，红外光源主要分为热辐射红外光源、气体放电红外光源和激光红外光源三种。根据加工技术的不同，热辐射红

外光源又可分为传统的热辐射光源和基于微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)的红外光源；气体放电红外光源包括氙灯、汞灯和钠灯等；激光红外光源主要有化学激光器、光学参量放大器、光纤激光器和量子级联激光器等。不同类型的光源具有不同的特性，其应用领域以及可检测的有害气体也不尽相同。

### 2.1 热辐射红外光源

#### 2.1.1 传统的热辐射红外光源及其应用

传统的热辐射红外光源是一种宽光谱体辐射光源，其常见类型包括红外白炽灯、碳化硅棒、能斯脱灯以及乳白石英加热管等<sup>[5]</sup>。由于该光源的调制特性一般较差，在实际应用中，需要加设机械斩波器来实现光源的调制特性输出。这不仅会增大系统体积，导致使用不便，而且还会降低检测系统的整体性能。便携式红外气体传感器系统大多使用此类光源，其优点是成本低廉，但电光转换效率低，调制频率输出较低，使用寿命较短<sup>[6]</sup>。表1列出了不同类型的传统热辐射光源的优缺点。

表1 不同类型光源的性能比较

类 型	波长范围	优 点	缺 点
红外白炽灯	近、中红外光源	寿命长、机械强度高、体积小、成本低	辐射强度不高，辐射较为分散
碳化硅棒	中、远红外光源	寿命长、工作温度高	机械强度不高，容易起燃
能斯脱灯	近、中红外光源	寿命长、辐射谱宽、工作温度高、黑体特性好	体积较大，使用前需要预热，工作时需要冷却

红外白炽灯的工作温度约为 $2200 \text{ K}$ ，峰值波长略短于 $2 \mu\text{m}$ 。作为一种近红外和中红外光源，红外白炽灯在寿命、机械强度、体积等方面均优于能斯脱灯和碳化硅棒等，其缺点是辐射强度较低。在一些低精度便携式检测系统中，由于对辐射强度的要求不高，可将红外白炽灯作为理想的红外光源使用。崔铮<sup>[7]</sup>选用美国PerkinElmer公司生产的IRL715型红外白炽灯作为光源，并采用电调制方法，因而具有体积小、功耗低、抗震性强等优点，适合吸收谱带在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 处的气体检测。实验结果表明，该系统对 $\text{CO}_2$ 的检测分辨率为 $200 \text{ ppm}$ 。

通电加热后，碳化硅棒在 $2 \sim 20 \mu\text{m}$ 波长范围内近似为黑体辐射。作为一种中红外和远红外光源，碳化硅棒被加热到 $1500 \text{ K}$ 左右时，其在 $2 \sim 40 \mu\text{m}$ 光谱范围内的辐射与发射率为0.85的灰体接近。碳化硅棒具有使用寿命长、工作温度高等优点，但是其机械强度较低，且在使用过程中容易起燃。

能斯脱灯是用锆、钇、钍等稀有金属耐熔氧化物烧结而成的圆柱体或空心炽热体，其峰值波长一般位于 $2 \mu\text{m}$ 附近。在 $1100 \text{ K}$ 左右时，能斯脱灯处于充分导电状态，能够产生较大的辐

射功率。该光源具有使用寿命长、辐射谱宽等优点，但是其体积较大，且工作时需要冷却。当利用能斯脱灯构成检测系统时，系统体积会增大，这不利于现场检测和便携式仪器使用。

### 2.1.2 MEMS 红外光源

MEMS 红外光源以绝缘体硅作为基底材料，以多晶硅作为发光材料，采用微机电加工技术，使整个光源具有体积小、能耗低、波谱范围宽、调制频率高等特性。MEMS 红外光源是红外传感系统中较为理想的一种光源(结构见图 1)。该光源在发光面所对应的  $180^\circ$  范围内辐射光能量，能量分散，光能利用率低<sup>[8]</sup>。因此，在使用过程中，需要对光能量进行汇聚，以提高辐射能量。文献 [1] 利用 TracePro 和 Zemax 光学软件对自由曲面反光杯和非球面准直透镜进行仿真，使 MEMS 红外光源的发散角从  $180^\circ$  压缩到  $15^\circ$  左右，提高了光能量的利用效率。

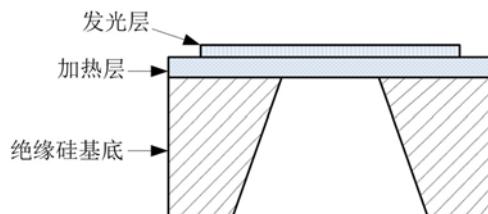


图 1 MEMS 红外光源的结构图

美国 INTEX 公司生产的 INTX 系列 MEMS 红外光源可以覆盖  $1 \sim 20 \mu\text{m}$  波段，其响应速度快，电调制超过  $100 \text{ Hz}$ ，发射率大于  $90\%$ ，寿命长、性价比高，无需单独调制，维护次数少。因此，在红外传感系统中，该光源已经得到了较为广泛的使用。吴飞蝶等人<sup>[9]</sup>设计了一种辐射性能稳定的 MEMS 红外光源，其辐射波长为  $2 \sim 14 \mu\text{m}$ ，上升时间为  $28 \text{ ms}$ ，下降时间为  $16 \text{ ms}$ 。该光源在  $10 \text{ Hz}$  左右时能够实现满深度调制。在利

用基于此种光源的小型红外传感系统对不同体积分数的  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  气体进行探测时，测量精度分别达到  $20 \times 10^{-6}$  和  $50 \times 10^{-6}$ 。

### 2.2 气体放电红外光源

由于放电时会产生红外辐射，某些气体可以作为红外光源使用。当填充不同的气体时，输出的光学性能不同。某些金属蒸气也可用作此类填充物，常见的有氩灯、汞灯和钠灯等<sup>[10]</sup>。其中，氩灯在  $0.8 \sim 1.1 \mu\text{m}$  波段具有较强辐射，且光谱容易调制，所以可用作辐射标准光源<sup>[11]</sup>；汞灯在  $1.01 \mu\text{m}$ 、 $1.13 \mu\text{m}$ 、 $1.37 \mu\text{m}$ 、 $3.94 \mu\text{m}$  和  $4.02 \mu\text{m}$  等波段具有较强辐射；钠灯在  $0.82 \mu\text{m}$ 、 $1.14 \mu\text{m}$ 、 $1.85 \mu\text{m}$  和  $4.05 \mu\text{m}$  等波段具有较强辐射。在对有害气体进行检测时，可以根据不同有害气体的吸收区域来选择对应的红外光源。气体放电红外光源的外壳也是一种有用的红外光源。当温度为  $480 \sim 520 \text{ }^\circ\text{C}$  时，其红外辐射可从  $2 \mu\text{m}$  伸展到  $15 \mu\text{m}$ ，且中心波长约为  $4 \mu\text{m}$ 。由于温度更高，石英制外壳的短波辐射能延展到可见光区域。虽然有时可将此类外壳作为光源使用，但在精确检测时却会存在相互干扰等问题，因此在具体的使用过程中需要对此加以考虑。

### 2.3 激光红外光源

激光红外光源包括化学激光器、光纤激光器和量子级联激光器等，其优缺点见表 2。

#### 2.3.1 化学激光器

化学激光器是一种利用化学反应所释放的能量来实现粒子数反转的激光器，其优点是输出能量大，光束质量好。但是该激光器的输出能量分布较宽，可能会产生有毒有害物质。另外，在使用过程中所需的部分化学物质或气体价格

表 2 不同类型红外光源的优缺点

类 型	优 点	缺 点
化学激光器	成本低，输出能量大、光束质量好	能量分散，会产生有害物质
光纤激光器	体积小，转化效率高，激光阈值低，环境适应性好	成本较高，光纤纤芯较小；与固体激光器相比，单脉冲能量小
量子级联激光器	调制频率高、调制特性好、输出功率高	成本高，技术复杂且不成熟，对使用环境要求高

较高<sup>[12]</sup>，增加了使用成本。化学激光器主要包括氟化氢(HF)激光器(2.6~3.3 μm)、氟化氘(DF)激光器(3.5~4.2 μm)、溴化氢(HBr)激光器(4.0~4.7 μm)和一氧化碳(CO)激光器(4.9~5.8 μm)等<sup>[13]</sup>。其中，铅盐激光器是最早用于气体检测的中红外激光器，其中心波长为3~30 μm，且可对大气中的CH<sub>4</sub>、CO、氮氧化物和甲醛等进行高灵敏度检测。但是该激光器结构复杂，并且需要液氮制冷，因此在便携及在线检测时受到限制<sup>[14]</sup>。

### 2.3.2 光纤激光器

光纤激光器是指采用掺稀土元素的玻璃光纤作为增益介质的激光器。根据光纤材料的不同，光纤激光器可分为晶体光纤激光器、非线性光学型光纤激光器、稀土类掺杂光纤激光器和塑料光纤激光器等。图2为纵向泵浦光纤激光器的结构示意图。该激光器的主要结构包括泵浦光源和光学谐振腔，并且具有体积小、转化效率高、激光阈值低以及环境适应性好等优点。但是其光纤纤芯较小，而且与固体激光器相比，单脉冲能量较低。近年来，针对此类激光器的研究较多。例如，李秀丽等人<sup>[15]</sup>研制了一种小型光纤型中红外光源样机，该样机经差频过程后可实现3.05~4.009 μm内的宽带无缝调谐。林宏等人<sup>[16]</sup>利用超辐射发光二极管和掺铒光纤放大器研制了一种用于CO<sub>2</sub>检测的宽光谱红外激光光源，其中心波长为1.584 μm，光谱有效范围为1.564~1.604 μm，输出功率大于2 W，且具有体积小、功率大和成本低等优点。沈炎龙等人<sup>[18]</sup>采用中心波长为975 nm的半导体激光器抽运高掺铒氟化物双包层光纤，设计了一种可在室温下工作、中心波长为2.79 μm、最大输出功率为

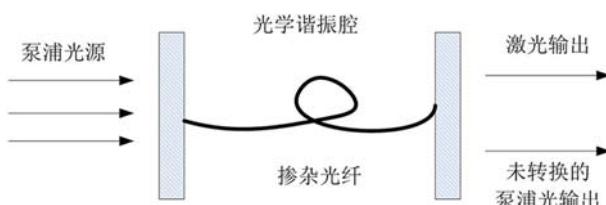


图2 光纤激光器的原理示意图

9.2 W、光束质量因子M<sup>2</sup><1.2的单模中红外光纤激光器。

### 2.3.3 量子级联激光器

量子级联激光器是一种基于导带子带间跃迁和声子辅助隧穿原理，实现粒子数反转的新型单极半导体器件<sup>[19]</sup>。该激光器能够实现3.5~24 μm的光谱输出，并且具有调谐性好、输出功率高以及可在室温下工作等优点。近几年来，量子级联激光器表现出了良好的发展势头<sup>[20]</sup>，无论在民用还是在军用方面都有着广阔的应用前景。但是由于制造技术比较复杂，能够在室温下连续工作的量子级联激光器还不够成熟，且使用成本相对较高，环境适应性较低<sup>[21]</sup>。国外在这方面研究相对较多。例如，瑞士Neuchatel大学的Faist小组研制了一种波长为7.96~8.84 μm、可在室温下连续工作、具有宽调谐性能、峰值功率达20 mW的量子级联激光器<sup>[22]</sup>。美国西北大学的Razeghi小组研制了一种波长为4.9 μm、最高输出功率为5.1 W、可在室温下工作的法布里-珀罗量子激光器<sup>[23]</sup>。

## 3 性能比较及选型原则

### 3.1 各种红外光源的性能比较

激光红外光源和气体放电红外光源在光学特性方面优于热辐射红外光源，但在成本、配套设备以及使用便捷性等方面却不如热辐射红外光源。传统的红外光源需要另加调制部件，使整个检测系统体积大、价格高。不同类型的红外光源具有不同的使用特性，其优缺点见表3。在检测有害气体时，如果对辐射光强度的要求不高，那么通常选用热辐射红外光源。

### 3.2 选择红外光源的基本原则

红外光源的性能指标包括使用环境、辐射强度和光电转换效率等。为了避免出现元器件性能不匹配、光能量浪费等问题，我们在选择红外光源时应遵循以下几个原则。

#### 3.2.1 使用环境

不同的使用环境对光源性能的需求不同。在军用领域，红外光源需要具有可在室温下长期工作、能耗低、在较宽的波长范围内可快速调

表 3 不同红外光源的优缺点比较

类型	优 点	缺 点
热辐射红外光源	成本低, 使用方便	光学性能较差, 输出功率较低
气体放电红外光源	光学性能好, 有较强的输出功率, 光谱易调制, 使用寿命长	工作温度较高, 存在有毒有害物质, 对工作电流稳定性的要求较高
激光红外光源	光学性能强, 波谱稳定性好, 输出功率高	成本高, 结构复杂, 配套设备多

谐、光源可靠性高以及发射谱稳定等特点, 以满足军事活动机动性强的要求。

### 3.2.2 匹配性

光源的光谱分布与系统工作的光谱范围须尽可能地相互匹配, 另外还应包含被测有害气体的特征吸收峰, 且保证吸收峰值较高, 以使系统具有较高的检测灵敏度; 光源与探测器必须匹配, 即光源的输出功率要大于探测器的最低输入功率。

### 3.2.3 输出功率

根据比尔-朗伯定律可知, 初始光强与探测光强是用于反演气体浓度的重要因素。在检测过程中, 由于各种原因会引起相应的吸收和损耗, 到达探测器的红外信号非常微弱。因此, 在光谱检测系统中, 要求红外光源具有较高的输出功率。为了使仪器能在较宽的波段范围内有效工作, 我们希望光源的辐射能量分布在较宽的波段范围内且变化不大。另外, 为了使光束尽可能多地平行出射, 且提高光能利用率, 还需要对发散的红外光源进行准直和汇聚等处理。

### 3.2.4 经济适用性

文献 [24] 列出了一种由瑞士 AlpesLasers 公司研制的波长为  $5 \sim 12 \mu\text{m}$ 、功率在毫瓦级的量子级联激光器。该激光器价格昂贵, 单个未封装的产品就在十万元人民币左右, 且订货周期较长<sup>[25]</sup>。因此, 在实际的选型过程中, 对光源还有一些特殊的要求, 例如成本、订货时间和使用寿命等。

## 4 结束语

随着光谱检测技术的不断发展, 红外光源已经成为了有害气体浓度检测领域中必不可少的设备之一。基于近年来的较快发展, 实际检测中使用的光源类型也相对较多, 但光源性能

参差不齐的问题却难以解决, 而且采取一体化结构设计、性能稳定、抗干扰性强的新型红外光源仍然比较匮乏。因此, 研发或改进现有红外光源, 使其具有外形结构紧凑、稳定可靠、辐射范围宽、调节方便、光能量集中、辐射强度大以及抗干扰能力强等特性, 是解决光谱检测技术中的痕量气体检测问题的关键所在。近年来, 激光红外光源凭借自身优势发展较快, 能够有效提高光谱检测技术的检测精度, 并可实现对痕量气体的精确检测, 因此将会成为未来红外光源的发展趋势。

## 参考文献

- [1] 杜彬彬, 张鹏, 高文宏, 等. 基于微机电系统红外光源的长光程气体检测 [J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(4): 977-981.
- [2] 任耀辉. MEMS 气体传感器用红外光源研究 [D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [3] 纪新明, 吴飞蝶, 王建业, 等. 一种可直接脉冲调制的 MEMS 红外激发源 [J]. 光学·精密工程, 2005, 13(2): 144-150.
- [4] 陈东, 刘文清, 张玉钩, 等. 差频产生中红外光源的大气痕量成分高灵敏检测系统研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(2): 126-130.
- [5] 田英, 熊继军, 关新峰, 等. MEMS 红外光源研究及其应用 [J]. MEMS 与传感器, 2012, 49(9): 607-612.
- [6] 周南权. 基于红外成像光学系统的光源设计研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [7] 崔铮. 痕量气体浓度的快速监测技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [8] 关新峰. 基于 MEMS 红外光源阵列的光电标识技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [9] 吴飞蝶, 纪新明, 王建业, 等. MEMS 红外光源及应用 [J]. 传感器与微系统, 2006, 5(25): 78-82.
- [10] 张斌. 1.9 ~ 4.3  $\mu\text{m}$  全光纤中红外超连续谱光源 [J]. 中国激光, 2013, 11(40): 1102013.
- [11] 曹福刚. 红外光源辐射强度测试的初步研究 [J]. 光电技术应用, 2003, 4(7): 30-34.

(下转第 15 页)