

〈测量技术〉

硅基 MEMS 红外光源光谱特性测试研究

孙玉虹^{1,2}, 曹嘉峰^{1,2}, 王成^{1,2}, 陈晓勇^{1,2}, 孔龄婕^{1,2}, 丑修建^{1,2,3}, 孙立宁³

(1.中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

2.中北大学电子测试技术国防科技重点实验室, 山西 太原 030051;

3.苏州大学机电工程学院&江苏省先进机器人技术重点实验室&苏州纳米科技协同创新中心, 苏州 215123)

摘要: 硅基 MEMS 红外光源作为红外应用系统的核心部件, 其光学辐射特性直接影响着整个红外装置的性能, 然而, 国内外对于硅基 MEMS 红外光源的辐射特性尤其是辐射光谱特性未见详细报道, 因此, 为确定硅基 MEMS 红外光源的辐射光谱分布, 对 MEMS 红外光源光谱特性进行准确测试是非常必要的。实验采用 OL (Optronic Laboratories) 系列光谱测量系统对 MEMS 红外光源进行光谱特性测试, 相对辐射光谱测试结果显示该光源的红外光谱波段主要分布在 3~5 μm, 中心波长在 3.6 μm 处, 其大气透过率接近 90%, 具有很好的大气透射度。

关键词: MEMS 红外光源; 光谱测试; 光栅衍射; 光谱辐射

中图分类号: TN212 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2015)04-0347-04

The Testing Research of Spectral Characteristics of Silicon MEMS Infrared Source

SUN Yu-hong^{1,2}, CAO Jia-feng^{1,2}, WANG Cheng^{1,2}, CHEN Xiao-yong^{1,2}, KONG Ling-jie^{1,2},
CHOU Xiu-jian^{1,2,3}, SUN Li-ning³

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement (North University of China),

Ministry of Education, Taiyuan 030051, China;

2. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering & Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Robotics & Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215123, China)

Abstract: As a core component of infrared applications, the optical radiation characteristics of Silicon MEMS infrared source directly affects the performance of the infrared devices, however, there was not detailed report for the radiation characteristics of silicon MEMS infrared source radiated spectral characteristics at home and abroad. Therefore, to determine the radiation spectrum of a silicon MEMS infrared source distribution, the accurate testing for spectral characteristics of the MEMS infrared source is necessary. MEMS infrared source spectral characteristics are tested by using OL (Optronic Laboratories) series spectrum measurement system. The results show that the relative radiation spectrum infrared spectral band of the source is mainly distributed in 3~5 μm, and the center wavelength is at 3.6 μm and its atmospheric transmittance is nearly 90 percent with a good transmittance of the atmosphere.

Key words: MEMS infrared source, Spectral test, Grating diffraction, Spectral radiance

0 引言

现代微机械系统的迅猛发展, 极大地促进了微机械传感与执行器件在各领域的应用与完善^[1-2]。光电标

收稿日期: 2014-08-29; 修订日期: 2014-11-03。

作者简介: 孙玉虹 (1988-), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 器件测控技术。E-mail:sunyuuhong361@126.com

通讯作者: 丑修建 (1979-), 男, 湖北咸宁人, 中北大学教授、硕士生导师、博士, 主要研究方向微纳智能光-机-电器件与系统。

基金项目: 国家自然科学基金项目, 编号: 51275492; 中国博士后科学基金特别资助项目, 编号: 2013T60557; 中国博士后科学基金面上资助项目, 编号: 2012M521118; 江苏省博士后科研资助计划项目, 编号: 1201038C。

识装置作为一种新型微机械集成设备，正在光电对抗技术、红外通讯技术、特殊作业环境人员搜救等领域发挥着不可替代的重要作用^[3-4]。微机械红外光源是光电标识装置的核心部件，其光学辐射特性直接影响着整个装置的性能^[5-7]。硅基 MEMS 红外光源是近几年新兴的微机械红外光源，国内外对于硅基 MEMS 红外光源的辐射特性尤其是辐射光谱特性从未有过详细报道，因此，为确定硅基 MEMS 红外光源准确辐射光谱分布，展开对硅基 MEMS 红外光源光谱测试的研究是非常必要的。

1 硅基 MEMS 红外光源

文中测试光源采用本课题组研制的一种新型悬浮薄膜结构的 MEMS 红外光源，如图 1 所示。以浓硼掺杂多晶硅为红外辐射层，重掺杂单晶硅为光源反射层，通过电感耦合等离子体刻蚀技术形成正面空腔，深反应离子刻蚀工艺去除基底背面硅形成悬浮结构，极大程度改善了因辐射体部热容引起的热积累损伤，提高了 MEMS 红外光源的电光转化效率和驱动响应速率，实现了光源器件可深度变频调制。

通过溅射铝电极实现器件电气互连，并采用可靠性同轴密封封装，利用半导体-金属键合工艺将 MEMS 红外光源芯片贴装到超硬铝合金材料的 TO-39 管脚封装器件基座上，并通过金丝球焊机将芯片端与

封装管脚的电极引线连接，光源器件的封装成品如图 2 所示。

2 硅基 MEMS 红外光源光谱特性的测试

2.1 测试原理

光栅分光是指利用光栅衍射原理从复合光中分离开各种不同波长的光，将从光源激发出来的复合光展开成光谱^[8]。光波在传播时，阵面上的每个点都可以被认为是一个单独的次波源，这些次波源发出球面次波，以后某一时刻的波阵面就是该时刻这些球面次波的包络面（惠更斯原理）^[9]。光栅分光示意图如图 3 所示。

光栅分光具体原理方程如下：

$$n\lambda = d(\sin\alpha \pm \sin\beta) \quad (1)$$

式中： n 代表光谱级； λ 为波长； α 为入射角； β 为衍射角； d 为光栅常数。当 $n=0$ 时，得到零级光谱， β 与 λ 无关，此时无分光作用但可得到最大光强，当 $n=\pm 1$ 时，得到一级光谱，若 λ 短， β 小，则靠近零级光谱，若 λ 长， β 大，则远离零级光谱，此状态下可以实现光波分光，且光强相对较大；当 $n=\pm 2$ 时，得到二级光谱，此时也可以实现分光，但光强较小，一般作滤波处理，以免干扰测定。光栅分辨率与波长无关，分离后的光谱属于均排光谱。

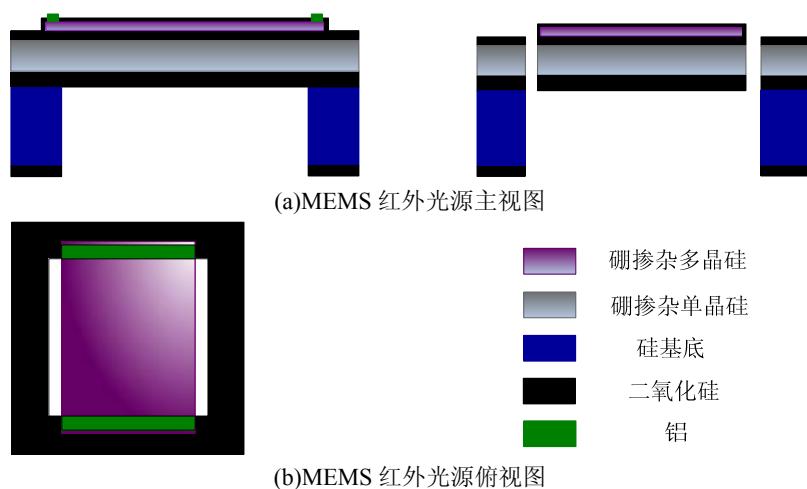


图 1 MEMS 红外光源微结构示意图

Fig.1 Micro-structure diagram of MEMS infrared source

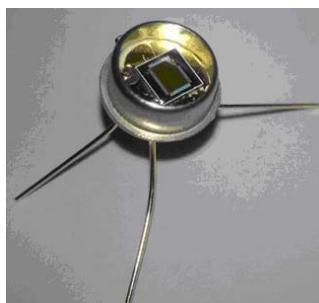


图 2 TO-39 封装的 MEMS 红外光源器件



Fig.2 MEMS infrared source device of TO - 39 package



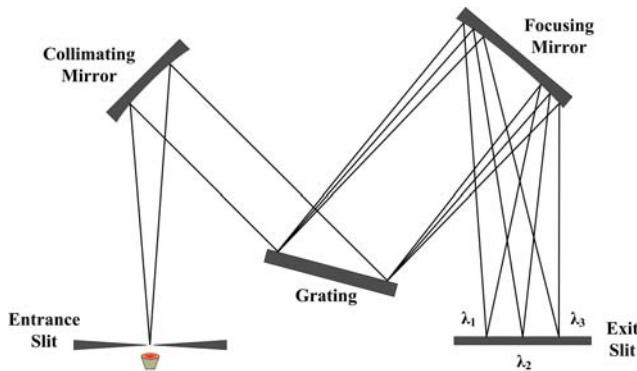


图3 光栅分光示意图

Fig.3 The schematic of grating spectrometer

2.2 测试仪器基本构成

本实验采用的光谱测量装置为红外探测器件相对光谱响应校准装置, 该装置是由美国 Gooch & Hacsgo 公司生产的 OL (Optronic Laboratories) 系列光谱测量系统。该系统主要由精密直流源、红外光源、单色仪、控制器(含信号检测)、标准探测器、计算机以及测控软件组成, 采用替代法测量相对光谱响应, 通过传递探测器溯源到低温辐射计。该系统拥有 3 个分立光栅, 分别为 $1.0\sim2.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.5\sim6.3\text{ }\mu\text{m}$ 和 $6.3\sim15\text{ }\mu\text{m}$ 三个光谱段, 形成连续可调光栅体系, 实现光谱测量响应范围 $1\sim15\text{ }\mu\text{m}$, 采用分光棱镜解析入射辐射光波长最小分辨率为 10 nm , 精确度 $\pm 0.01\%$ 。装置测试红外器件的原理框图如图 4 所示。

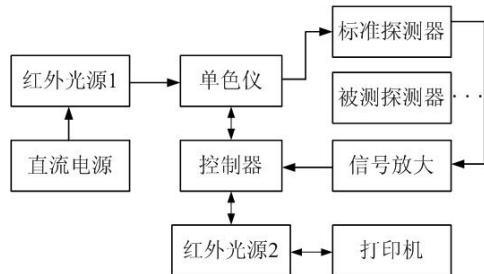


图4 红外探测器相对光谱响应测试原理框图

Fig.4 The principle diagram of infrared detector relative spectral response test

2.3 测试步骤

测试时, 将系统中的红外光源替换为被测 MEMS 红外光源, 即可实现对 MEMS 红外光源相对光谱图的测试。具体测试步骤如下:

1) 将光源装夹在原系统红外光源 1 位置处, 拆取系统红外光源时做好位置标记, 保证被测红外光源的安装位置与原光源位置绝对统一。装夹完成后, 连接光源供电线路, 保证光源测试时供电稳定性, 同时为减少光源测量时外部热源的影响, 将供电装置置于距测试系统较远位置。

2) 启动光源和红外辐射计, 并开动红外辐射计

调制盘为 $50\sim80\text{ Hz}$, 待被测光源工作状态稳定后, 记下脉冲电压峰-峰值 U_{\min} 、低频调制峰值电压 U_{\max} 及 $U_{\min}/2$ 处脉冲持续时间。

3) 关闭测试间其他一切发光光源, 将所有可能影响红外光源的外部热源移除系统周围, 接通被测红外光源外部供电线路。为保证测试稳定性, 待光源工作一定时间后打开测试程序开始测试。

测试时光源供电采用数显可调直流稳压电源(精度 $\pm 10\%$), 波长步进 100 nm 。由于测试采用光栅分光法, 会对红外光源的辐射进行多次反射, 消耗光强, 无法实现绝对光谱强度的测试, 最终实现的是相对光谱强度测试。相对光谱测试环境为全黑氛围, 温度 22°C , 湿度 56%。

2.4 测试结果

1) 单一电压驱动测试结果

测试结果显示, 当驱动电压为 5 V 时, 硅基红外光源的光谱辐射波段位于 $3\sim5\text{ }\mu\text{m}$ 波段内, 中心波长 λ_m 在 $3.6\text{ }\mu\text{m}$ 处, 半峰宽约为 $1.9\text{ }\mu\text{m}$ 。在 $2.4\sim2.6\text{ }\mu\text{m}$ 内出现短暂小波峰, 经多次重复测试及研究光谱测量系统内部工作原理, 分析该结果是由于系统内部测量过程中光栅切换造成的; 在 $4.1\sim4.4\text{ }\mu\text{m}$ 波段内, 波形变化出现骤降, 是由于大气吸收所致。光谱分布图如图 5 所示。

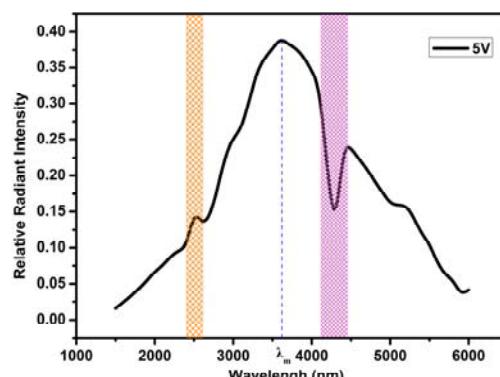


图5 5 V 驱动电压下 MEMS 红外光源光谱辐射特性

Fig 5 The MEMS infrared source spectral radiation characteristics under the driving voltage of 5 V

2) 不同电压驱动测试结果

实验中, MEMS 红外光源的表面温度特性是采用 Thermalert TX 系列在线式红外测温仪测试, 该测温仪适合多种光谱测量, 测量温度范围为 $-18\sim2000^\circ\text{C}$ 。实验时环境温度为 23°C , 湿度为 28%。MEMS 红外光源在外接不同驱动电压时, 其表面温度曲线图如图 6 所示, 图中显示随驱动电压的增大, 光源表面温度在不断升高。当驱动电压为 5.8 V 时, 光源表面温度约为 750 K , 此时 MEMS 红外光源未有可见红光辐射; 当

驱动电压超过 5.9 V 时，明显辐射出可见红光，驱动电压升至 7.0 V 时，其表面温度几乎接近 1000 K，同样可以看到红光。因此工作时所加驱动电压应小于 5.9 V。

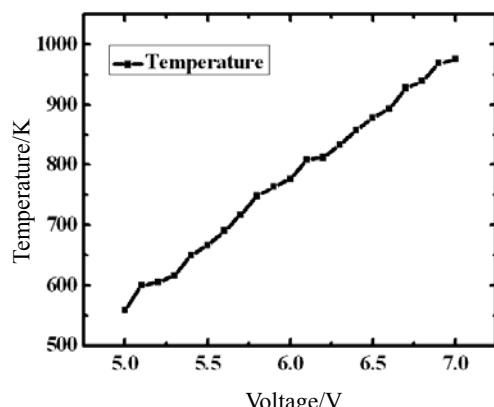


图 6 不同驱动电压温度特性测试图

Fig.6 Temperature characteristics test pattern under different driving voltages

实验中，采用不同的驱动电压为被测红外光源供电，同一被测光源在不同驱动电压下光谱响应如图 7 所示。设定初始电压为 5 V，以 0.4 V 步长增加，最大至 7.4 V，测试结果显示，不同电压驱动下，同一光源的中心波长保持不变，随温度的增大，中心波长有向短波方向移动的趋势。

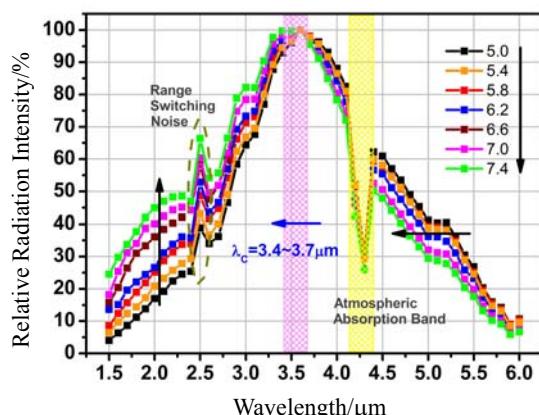


图 7 不同驱动电压下 MEMS 红外光源光谱辐射特性

Fig 7 The MEMS infrared source spectral radiation characteristics under different driving voltage

综合分析 MEMS 红外光源光谱分布测试结果可知，光源光谱图主要分布在 3~5 μm 之间，中心波长 λ_m 为 3.6 μm，光谱在 2.5~2.7 μm 及 4.2~4.4 μm 波段内出现明显的小范围波谷，相对光谱强度随着电压的增大而增大，光谱分布受电压影响不明显，当驱动电压达 5.9 V 时光源出现明显的可见红光，具体应用时可根据隐秘性要求选择驱动电压的大小。测试中，红外光在大气传输中特定的传输窗口及仪器内部结构造成了两个短暂的波谷，其中在 4.2~4.4 μm 波段内

出现的短暂波谷由于大气中二氧化碳与水蒸气吸收所致^[10]，2.5~2.7 μm 波段内的短暂波谷则是由于仪器内部更换光栅造成的光噪声。

2.5 测试中应注意的问题

为减少测试中人为造成的差异，注意光源每次测量所处位置的固定性，采用多记号标定方式增加准确性，做到聚光镜与被测光源及聚光镜始终在同一平面高度，控制好测试间的温湿度，关闭测试间其他发光源，保证所测光源的单一性，采用多次测量方法，验证光源辐射光谱分布的重复性。一定要多测几组数据求其平均值，重复测量看光源辐射光谱分布的重复性。

3 结束语

由于红外辐射^[11]具有高温、不可见、易受环境影响等特征，使其光波测试一直难以做到准确、直接。本文利用红外探测仪相对光谱测试技术，采用代替法实现了光源的光谱测试，测试结果显示该 MEMS 红外光源的输出光谱主要集中在 1.0~6.5 μm 波段，中心波长集中在 3.0~4.2 μm 波段之间，在此波长范围内的红外光在大气传播中衰减较小，其大气透过率接近 90%，具有很好的大气透射度，明显区别于环境背景，具有较高的信噪比，满足红外传输隐蔽性，可适用于人员搜索和营救、飞机降落指引以及军事敌我识别等领域，具有广泛的应用前景。

参考文献：

- [1] 张永林, 狄红卫. 光电子技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [2] 万兹蒂 (美). 红外技术的实际应用[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [3] 淦元柳, 宋斌, 王晓飞, 等. 红外探测与应用分析[J]. 红外与激光工程, 2007(2): 62-66.
- [4] Lord Bowden. The story of IFF (Identification Friend or Foe)[J]. IEEE Proceedings, Part A: Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, 1985, 132: 435-437.
- [5] 李军, 王佳铁, 孙彦峰, 等. 红外目标探测与应用分析[J]. 舰船电子工程. 2008, 164(2): 26-28.
- [6] 严后选, 张天宏, 孙健国. 近距离红外无线数据通信技术研究[J]. 应用基础与工程科学学报. 2004, 4(12): 407-415.
- [7] 周维虎, 韩晓泉. 军用光电系统总体技术研究[J]. 红外与激光工程. 2006, 35: 9-14.
- [8] 王挺峰, 付有余, 郭劲, 等. 利用光栅测量远场入射激光波长的方法研究[J]. 激光技术, 2005, 29(2): 156-158.
- [9] 段存丽, 韩军, 路绍军, 等. 基于惠更斯原理确定单轴晶体光轴方向的新方法研究[J]. 光学仪器, 2008, 30(4): 55-59.
- [10] 韩玉阁, 宣益民. 大气传输特性对目标与背景红外辐射特性的影响 [J]. 应用光学, 2002, 23(6): 8-11.
- [11] 严赵军, 韩芳芳, 易凡, 等. 冰水混合云红外辐射传输特性研究[J]. 红外技术, 2013, 35(1): 56-60.