

文章编号: 1672-8785(2017)04-0017-06

一种冰醋酸红外气体传感器设计

刘延祥 李 铁

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200233)

摘 要: 提出了一种基于非色散红外原理的冰醋酸红外气体传感器。介绍了冰醋酸红外气体传感器的原理, 然后对其结构设计进行了详细描述, 并利用 Light Tools 软件对其光路进行了仿真验证, 最后获得了冰醋酸红外气体传感器样机。测试结果表明, 该传感器在 0 ~ 5000 ppm 范围内的测量精度优于 $\pm 1\%$ F.S., 响应时间 (T_{90}) 为 29 s。这种传感器的光源部分采用电调制方式, 舍弃了传统的红外气体传感器光源部分的机械斩波结构, 进而减小了传感器的体积, 提高了稳定性。因此, 该传感器在冰醋酸运输、储存和使用等领域具有广泛的应用前景。

关键词: 冰醋酸; 红外; 气体传感器

中图分类号: TN219; TP216.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.04.004

Design of a Glacial Acetic Acid Infrared Gas Sensor

LIU Yan-xiang, LI Tie

(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: A glacial acetic acid infrared gas sensor based on nondispersive infrared principle is proposed. The principle of the glacial acetic acid infrared gas sensor is presented. Then, the structure design of the sensor is described in detail. The optical path of the sensor is simulated by using the LightTools simulation software. Finally, the prototype of the glacial acetic acid infrared gas sensor is obtained. The test results show that the measurement accuracy of the sensor is better than $\pm 1\%$ F.S. in the range from 0 to 5000 ppm. Its response time (T_{90}) is 29 s. In the light source of the sensor, electric modulation is used and the mechanical chopper structure in the light source of the traditional infrared gas sensor is removed. Thus, the volume of the sensor is reduced and its stability is improved. So, this sensor has a wide application prospect in the fields of acetic acid transportation, storage and use etc.

Key words: glacial acetic acid; infrared; gas sensor

0 引言

作为一种重要的有机原料, 冰醋酸是合成纤维、胶粘剂、医药、农药和染料的重要原料。随着社会经济的快速发展, 国内冰醋酸的需求量和产量持续增长。2006 年的市场需求量约为

220.45 万吨, 2014 年的市场需求量达到 515.10 万吨; 生产能力也从 2007 年的 361 万吨/年增至 2014 年的 972 万吨/年^[1-3]。冰醋酸蒸气可与空气生成爆炸性混合物, 直接引起火灾或者释放出氢气, 进而造成火灾危害。同时, 冰醋酸还具

收稿日期: 2016-12-20

作者简介: 刘延祥 (1978-), 男, 山东聊城人, 工程师, 主要从事红外气体传感器方面的研究。

E-mail: liuyanxiang@mail.sim.ac.cn

有低毒性。吸入浓度超过 50 ppm 的冰醋酸蒸气就会导致眼、鼻、喉、肺等器官的刺激；若重复暴露于高浓度环境中，咽喉则会有充塞感；如皮肤接触会导致灼伤。

本文提出一种基于非色散红外原理的冰醋酸红外气体传感器，其具有体积小、检测精度高、稳定性好、使用寿命长、能实现连续监控等特点，可满足冰醋酸运输、储存和使用等环节中的实时检测需要。

1 检测原理

冰醋酸红外气体传感器基于非色散红外原理制成。具体说来，当待测气体受到红外光束照射时，其分子将吸收特定波长的红外光，并产生振动或转动运动，从而引起偶极矩的净变化，产生气体分子的振动能级和转动能级从基态到激发态的跃迁，使对应于这个波长吸收区域的透射光的强度减弱，进而发生气体对特定波长红外光的吸收。其吸收满足朗伯 - 比尔定律，即

$$I = I_0 \exp(-\mu CL) \quad (1)$$

式中， I_0 为入射光的强度； I 为透射光的强度； μ 为吸收系数； L 为气体介质的厚度； C 为待测气体的浓度。

由式 (1) 可知，当气室中没有待测气体时，通过气室到达探测器表面的光强为 I_0 ；当气室中充满浓度为 C 的待测气体时，通过气室到达探测器表面的光强为 I ；由 I/I_0 的比值便可得到待测气体的浓度。

2 结构设计

本文设计的冰醋酸红外气体传感器主要由敏感头、信号采集模块、信号处理模块和信号输出模块等组成。其中，敏感头包括红外光源、热电堆探测器、气室以及放大电路。图 1 为该传感器的工作示意图。

2.1 检测波长的选择

由于非对称双原子和多原子气体 (如 CH_4 、 CO_2 、 CO 、 SO_2 等) 在红外波段均存在特征吸收峰，基于其吸收谱图可对该气体进行识别。图 2 为冰醋酸的红外吸收谱图。

从图 2 中可以看出，冰醋酸的主要特征吸

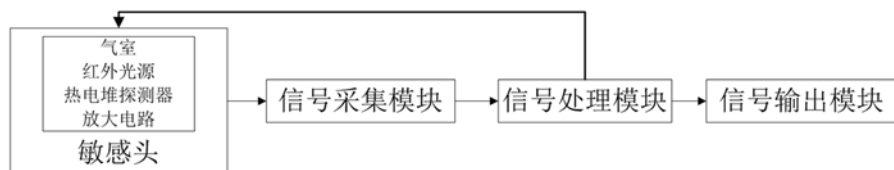


图 1 冰醋酸红外气体传感器的工作示意图

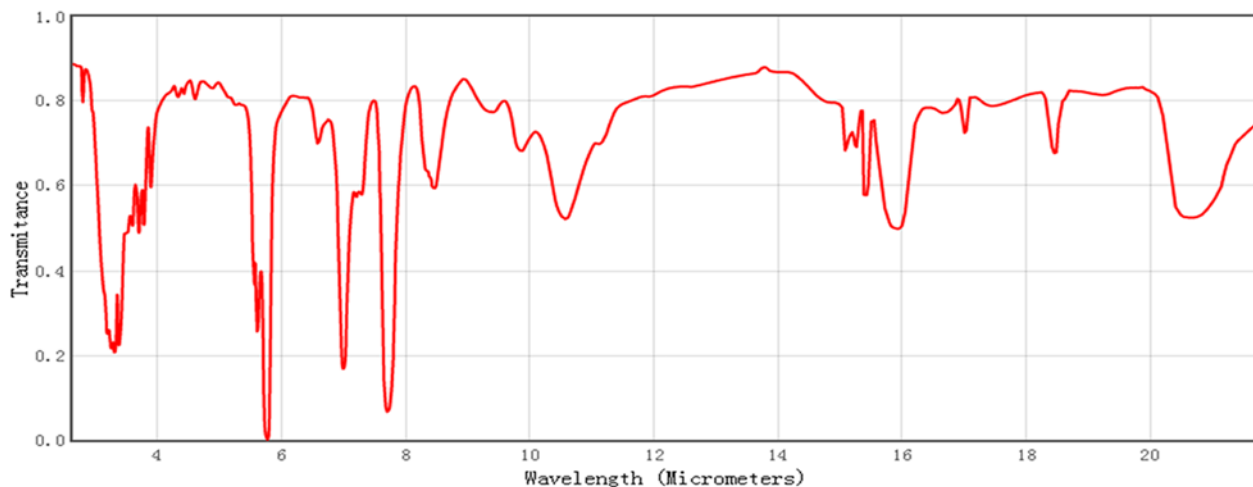


图 2 冰醋酸的红外吸收谱图

收波长为 $3.31\ \mu\text{m}$ 、 $5.78\ \mu\text{m}$ 、 $7.0\ \mu\text{m}$ 、 $7.72\ \mu\text{m}$ 和 $8.47\ \mu\text{m}$ 。其中, $3.31\ \mu\text{m}$ 为烃类气体检测中的常用波长, 此时干扰气体较多, 因而不适合作为冰醋酸的测量波长。冰醋酸在 $5.78\ \mu\text{m}$ 处的红外吸收最强, 且干扰气体较少, 因此本文选用 $5.78\ \mu\text{m}$ 作为冰醋酸的测量波长。

2.2 红外光源及其调制

红外光源一般可分为传统白炽灯型和微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) 型两种^[4-6]。其中, 白炽灯是一种将灯丝通电加热到白炽状态, 然后利用热辐射发光的电光源, 其辐射波长范围为 $0\sim 5\ \mu\text{m}$; MEMS 光源将用微加工技术制造的金属薄膜作为发热材料, 基于电热效用产生高温辐射, 其辐射波长范围为 $0\sim 20\ \mu\text{m}$ 。鉴于本文选择 $5.78\ \mu\text{m}$ 作为冰醋酸的检测波长, 相应的红外光源选用瑞士 Axteris 公司生产的 EMIR 200 型 MEMS 光源, 其发射红外光的波长范围为 $2\sim 14\ \mu\text{m}$ ^[7], 辐射光谱与波长的关系见图 3。

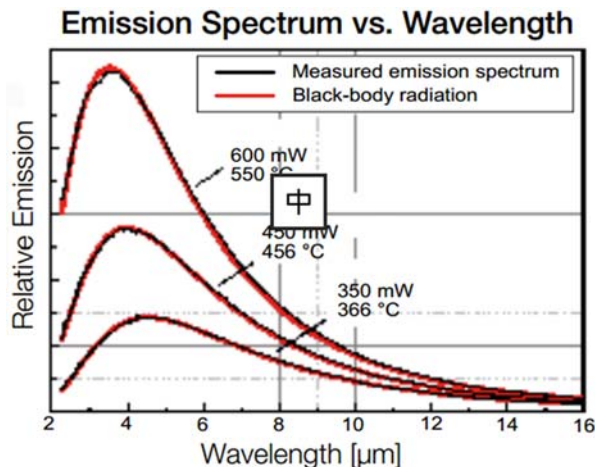


图 3 辐射光谱与波长的关系图

红外光源的调制方式主要包括机械调制和电调制两种。在机械调制方式下, 光源持续工作, 同步电机带动切光片旋转以对红外光源发出的光线进行切割, 从而把此光线调制成频率固定的间断光束。由于切光片和同步电机的加入, 其结构的体积较大, 且装配精度的要求较高^[8]。电调制方式利用脉冲信号驱动红外光源, 使光源间断工作, 进而实现对红外光源发出光线

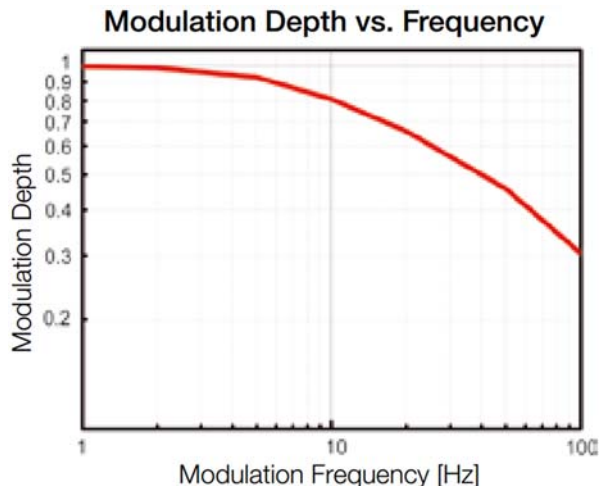


图 4 调制深度与调制频率的关系图

的调制, 达到与机械调制相同的效果。该方式不使用机械结构, 因此体积较小, 使用灵活^[9]。经过对比和分析, 本文选用电调制方式, 并根据图 4 所示的 EMR 200 型光源调制深度与调制频率的关系曲线, 选定 $1\ \text{Hz}$ 作为该光源的调制频率。

2.3 探测器

作为一种能量变换器, 探测器用于将通过测量气室的待测组分经吸收后剩余的红外辐射转换为某种形式的电信号, 是气体传感器的核心部件。它主要可以分为光子探测器和热探测器两种。其中, 光子探测器的探测率较高, 但是其工作条件要求比较苛刻; 热探测器可在常温下工作, 无需制冷装置, 使用方便。热探测器主要包括热电堆探测器和热释电探测器。其中, 热释电探测器的信号较强, 而热电堆探测器的输出信号则相对比较稳定, 受外界环境的干扰较小^[10]。经综合考虑, 本文选用双通道热电堆探测器, 其内部封装 1 个热敏电阻和 2 个热电堆芯片, 管帽上封装 $5.78\ \mu\text{m}$ 和 $3.9\ \mu\text{m}$ 的窄带滤光片。其中, 对应于 $5.78\ \mu\text{m}$ 窄带滤光片的热电堆芯片的输出信号为测量信号, 用于检测腔室中冰醋酸气体浓度的变化; 对应于 $3.9\ \mu\text{m}$ 窄带滤光片的热电堆芯片的输出信号为参考信号, 用于补偿由光源发光不稳、外界环境改变引起的变化; 热敏电阻用于测量热电堆芯片周围环

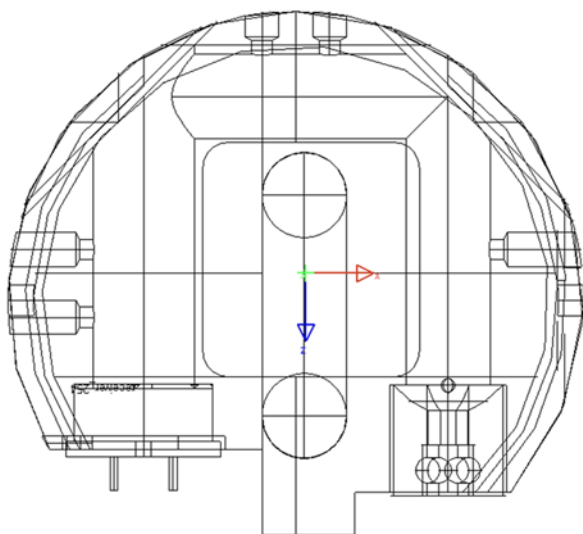


图 5 腔体的结构平面图

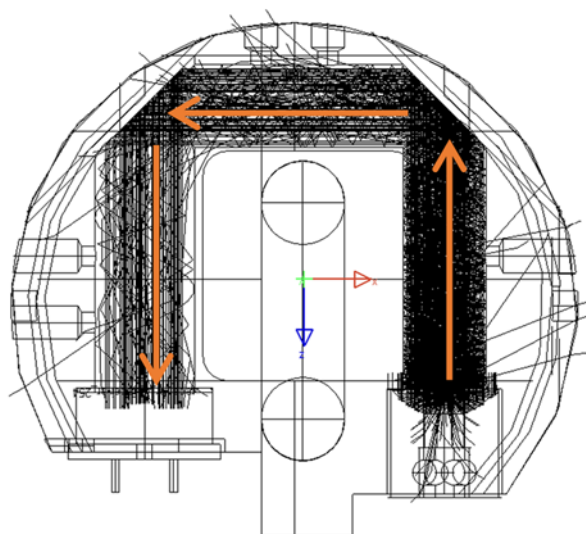


图 6 腔体内部的光线追迹图

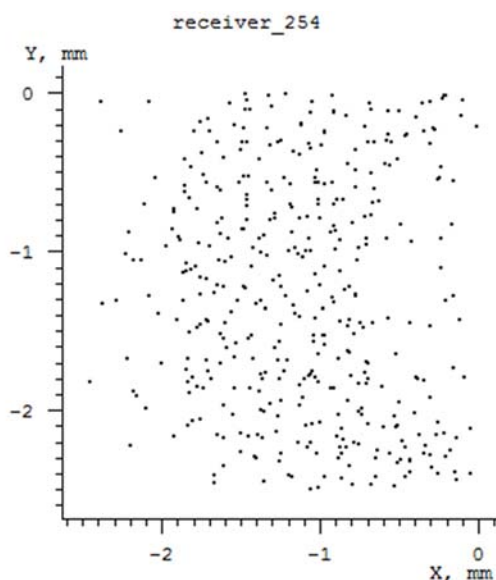
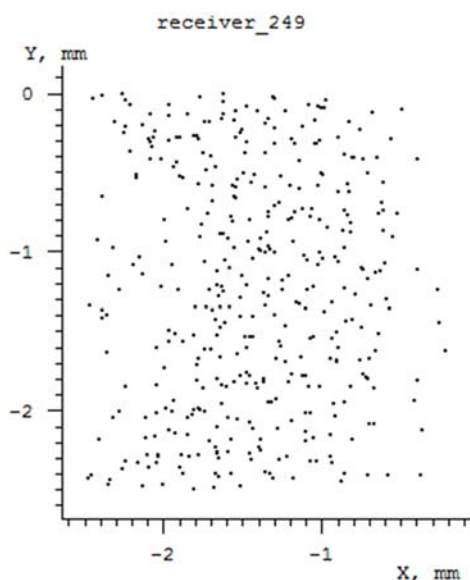


图 7 探测器接收表面上的光线分布图

境的温度，并对传感器进行温度补偿。

2.4 腔体

2.4.1 光路设计

传统的红外气体分析仪的腔体设计比较复杂，且不便安装。鉴于此，本文设计了一种结构简单、便于装配的“Π”形折叠反射光路（见图 5）。

2.4.2 光路模拟

Light Tools 是由美国 Optical Research Associates (ORA) 公司于 1995 年开发的一种光学系统建模软件。它是一款理想的光学仿真软件。为

了验证所设计光学腔体的性能，本文利用 Light Tools 光学仿真软件对所设计的微型红外气体传感器的光学腔体进行了仿真验证，并通过对腔体内部的光线传播进行追迹，得到了其光线传播图（见图 6）。

从图 6 中可以看出，红外光源发出的光线经反光镜反射汇聚后进入腔体；平行光线经平面镜反射后直接到达探测器的接收表面，非平行光线经腔体侧壁和平面镜多次反射后到达探测器的接收表面，其光线在探测器两个窗口的分布情况见图 7。可以看出，光线均匀分布在参考

和测量通道的窗口上, 证明腔体的光学设计合理。

2.4.3 腔体加工

选用黄铜作为原材料, 利用数控加工中心对腔体进行了加工。为了提高反射率, 我们对腔体的内表面进行了抛光和镀金处理。同时, 为了增强腔体对冰醋酸气体腐蚀的抵抗力, 我们还对腔体表面进行了钝化处理。

2.4.4 冰醋酸红外气体传感器样机

本文设计了一种具有防尘效果的金属外壳, 并通过一系列的组装调试得到了图 8 所示的冰醋酸红外气体传感器样机。



图 8 冰醋酸红外气体传感器样机

3 性能测试

冰醋酸在 25 °C 时的饱和蒸气压为 25 kPa, 且在常温下为液态。为此本文采用挥发配气的方式配制了浓度分别为 57 ppm、752 ppm、2440 ppm、2950 ppm、3610 ppm、4150 ppm 和 4900 ppm 的冰醋酸气体, 并用英国 Hidden 公司生产的 HPR-20 型全自动在线定量分析质谱仪对配制气体的浓度进行了标定。表 1 列出了传感器在各种浓度下的测试数据。

从表 1 中可以看出, 在 0 ~ 5000 ppm 范围内, 冰醋酸红外气体传感器的示值偏差的最大值为 0.96%F.S., 优于 $\pm 1\%$ F.S.。

同时, 本文在气体流量为 500 mL/min 的条件下, 利用钢瓶气对冰醋酸红外气体传感器的响应时间进行了测试 (结果见图 9)。

表 1 传感器的通气测试数据

冰醋酸气体的浓度 (ppm)	传感器示值 (ppm)	精度 (%F.S.)
57	65	0.16
752	773	0.42
2440	2427.5	-0.25
2950	2905	-0.9
3610	3585	-0.5
4150	4202	0.96
4900	4853	-0.94

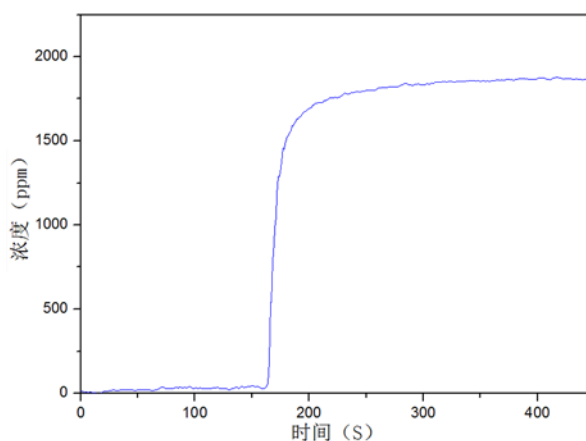


图 9 传感器的响应时间测试曲线

从图 9 中可以看出, 传感器的响应时间 (T_{90}) 为 29 s, 可满足冰醋酸泄漏的实时检测需求。

4 结束语

本文提出了一种基于非色散红外原理的冰醋酸红外气体传感器设计。光学仿真结果表明, 红外光源发出的红外光到达探测器表面后均匀分布在热电堆探测器的两个窗口上, 因此光路设计具有可行性。性能测试结果表明, 该传感器在 0 ~ 5000 ppm 范围内的测量精度优于 $\pm 1\%$ F.S., 响应时间 (T_{90}) 为 29 s, 可满足冰醋酸运输、储存和使用等过程中冰醋酸气体的实时检测需求。

参考文献

- [1] 崔小明. 国内外醋酸的供需现状及发展前景分析 [J]. 煤化工, 2015, 43(2): 69-74.
- [2] 周颖霏, 钱伯章. 醋酸生产技术进展及市场分析 [J]. 化学工业, 2010, 28(9): 19-23.

- [3] 钱松. 醋酸生产技术进展与市场分析 [J]. 精细化工原料及中间体, 2012, 20(1): 13-17.
- [4] 王汝琳, 王咏涛. 红外检测技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] Puton J, Jasek K, Siodlowski B, et al. Platinum IR Sources for NDIR Gas Monitors [C]. Calimanesti-Caciulata: 24th International Spring Seminar on Electronics Technology, 2001.
- [6] 纪新明, 吴飞碟, 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.
- [7] Axetris AG. Axetris Infrared Sources Datasheet [EB/OL]. 2015.
- [8] 康永济. 红外线气体分析器. 北京: 化学工业出版社, 1993.
- [9] 熊友辉, 蒋泰毅. 电调制非分光红外 (NDIR) 气体传感器 [J]. 仪表技术与传感器, 2003, 21(11): 4-5.
- [10] 郑奕挺, 王晓丹. 石油录井中红外 CO₂ 气体传感器的选择方法 [J]. 传感器与微系统, 2013, 32(6): 73-76.

(上接第 16 页)

4 结论

建立了一套基于双柱罐结构的三波段杂光测试装置。该装置的测试口径可达 1 m, 测试波长包括可见光 0.66 μm 、短波红外 2.2 μm 和长波红外 10.6 μm 三个, 测试精度 $\lg(\text{测量值} / \text{真实值})$ 小于 ± 0.5 。测试间内配有转台, 可对相机方位角 $\pm 100^\circ$ 、俯仰角 $\pm 15^\circ$ 范围内的 PST 进行测试。介绍了该套杂光测试装置的主要组成部分、功能和性能参数, 并用该装置对某空间相机在东西方向和南北方向的 PST 曲线进行了测试。结果表明, 该装置具有较高的精度和可靠性, 能满足目前国内空间相机的杂光测试需求。

参考文献

- [1] Stauder J L. Stray Light Design and Analysis of the Wide-Field Infrared Explorer (WIRE)[C]. SPIE, 1997, 3122:35-44.
- [2] Aminou D M A. Characteristics of the Meteosat Second Generation (MSG) Radiometer/Imager: Sevir [C]. SPIE, 1997, 3221:19-31.
- [3] Lowman A E, Stauder J L. Stray Light Lessons Learned from the Mars Reconnaissance Orbiter's Optical Navigation Camera[C]. SPIE, 2004, 5526: 240-248.
- [4] Grochowski F, Fleming J. Stray Light Testing of the OLI Telescope[C]. SPIE, 2010, 7794: 77940W.
- [5] 高万荣, 查冠华, 苗兴华. 长焦距光学系统杂光系数测试仪 [J]. 光子学报, 1996, 25(6):537-539.
- [6] 廖胜, 沈忙作. 红外光学系统杂光 PST 的研究与测试 [J]. 红外与毫米波学报, 1996, 15(5): 375-378.
- [7] 徐亮, 赵建科, 薛勋. 月基望远镜杂散光 PST 研究与测试 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4):1289-1295.
- [8] Kemp J C, Stauder J L, Turcotte S J, et al. Terrestrial 'Black Hole' for Measuring High-rejection off-axis Response[C]. SPIE, 1997, 3122: 45-56.
- [9] Fleming J, Grochowski F, Finch T, et al. New Stray Light Test Facility and Initial Results[C]. SPIE, 2008, 7069:70690O.

新闻动态 News

美国 Teledyne 公司将为 JUICE 木星任务提供红外探测器

据 <http://teledyne.com> 网站报道, 美国 Teledyne 公司最近从法国国家空间研究中心 (CNES) 获得了一份价值 998 万美元的合同, 他们将为欧洲空间局 (ESA) 为期 3 年半的木星冰卫探测器 (JUICE) 任务提供红外探测器及电子器件。JUICE 探测器预计于 2022 年发射, 并将在

2030 年抵达木星。

JUICE 任务的科学有效载荷将由 JANUS 光学相机系统、木星及其卫星成像光谱仪 (MAJIS) 和紫外成像光谱仪 (UVS) 等 10 台顶尖仪器构成。Teledyne 公司此次要研制的 1024×1024 元 H1RG 型红外探测器阵列将用于其中的 MAJIS 光谱仪。基于可见光-近红外 (0.50 ~ 2.35 μm) 和中红外 (2.25 ~ 5.20 μm) 两个光谱通道, 该光谱仪将研究木星大气层及其三颗卫星 (Callisto、Ganymede 和 Europa) 的表面环境。

□ 岳桢千