

低温辐射计不同结构黑体腔吸收率仿真与实验测量

刘红波, 史学舜, 庄新港, 张鹏举, 刘长明, 王恒飞

中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555

摘要 目前, 国际最高光辐射功率基准为低温辐射计, 其可探测光谱范围覆盖真空紫外到太赫兹波段(115 nm~THz), 利用真空低温超导条件下的电替代测量原理, 将光辐射功率参数溯源到可以精确测量的电参数进行高精度测量, 实现超宽光谱范围的光辐射绝对功率测量, 其测量不确定度达到 10^{-5} 量级, 尤其在国防军事和光辐射计量领域, 光电有效载荷、定量遥感、超高光谱成像以及光辐射量值溯源等应用领域具有不可替代的作用。低温辐射计黑体腔作为光辐射吸收的核心器件, 具有光谱吸收平坦、0.999以上的超高吸收比, 其吸收率参数是影响低温辐射计高精度测量的主要因素之一。目前, 针对低温辐射计黑体腔不同结构及涂层参数开展了很多的理论及仿真工作, 但针对不同结构参数黑体腔吸收率的实验测量及比对工作还未见报道。因此, 为实现低温辐射计宽光谱、高精度测量要求, 光电子一级站开展了适用于低温辐射计的黑体腔研制及吸收率测量的研究工作。课题组研制了四种不同结构参数, 以高电导无氧铜(OFHC)为材质, 壁厚0.1 mm, 内壁电镀镍磷黑(NiP)涂层的超高吸收率黑体腔; 采用蒙特卡罗光线追迹算法分别对四种结构黑体腔吸收率进行了光学仿真, 得到不同结构参数之间的吸收率差异; 采用替代法测量吸收率, 搭建了以高稳定光源、积分球系统组合的黑体腔吸收率测量装置, 通过将标准白板与黑体腔之间切换, 准确测量黑体腔吸收率, 并分析了黑体腔吸收率的影响因素。实验结果表明: (1)通过比对仿真数据与实验测量结果, 验证测量方法的有效性和测量数据的可靠性; (2)研制的黑体腔实现了 $(0.999\ 962 \pm 0.000\ 005) @ 632.8\ \text{nm}$ 的超高光谱吸收率, 满足了低温辐射计的高精度测量要求; (3)斜底圆柱腔的吸收性能优于圆锥柱腔; (4)通过设计螺纹结构增加腔内表面积、设计圆锥口径类比光阑结构形式并没有明显增加黑体腔吸收率。

关键词 低温辐射计; 黑体腔; 吸收率; 结构

中图分类号: O443.1

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)02-0654-06

引言

低温辐射计采用先进的低温、真空和超导技术, 利用电替代原理, 将光辐射参数溯源到可以精确测量的电参数测量, 得到光辐射的绝对功率值, 其测量不确定度可达到 10^{-5} , 在高准确度的光电载荷辐射校准、定量遥感以及光辐射量值溯源等领域具有不可替代的作用^[1-3]。黑体腔吸收率是影响低温辐射计高精度测量的主要因素之一, 需要具有光谱吸收平坦、0.999以上的超高吸收比, 因此, 为实现低温辐射计宽光谱、高准确度测量要求, 需要研制高吸收率黑体腔并准确测量其吸收率。

国内外很多学者开展了大量的理论和实验研究。国外方面, 2004年美国国家标准技术研究院(NIST), Alexander V Prokhorov等推导了黑体腔有效发射率的数学模型, 通过蒙

特卡罗法仿真了腔体结构、腔内涂层材料等影响黑体腔吸收率的因素^[4]。2005年, 德国物理技术研究所(PTB), Marco López等开展了黑体腔在可见及近红外波段的测试实验, 测得腔体在632.8 nm处吸收率为 $0.999\ 879 \pm 1.0 \times 10^{-5}$ ($k=1$), 在近红外波段吸收率为 $0.999\ 777 \pm 0.000\ 014$ ($k=1$)^[5]。国内方面, 中国计量科学研究院白山, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所方茜茜、衣小龙等^[6-7]分别利用蒙特卡罗法仿真、替代法测量了黑体腔的吸收比, 为腔体结构设计、涂层材料选择提供了一定的数据支持。2018年光电子一级站庄新港等, 仿真了光束不同入射位置对腔体吸收率的影响^[10]。

目前, 上述都是关于黑体腔吸收率的理论仿真和单一结构下黑体腔吸收率的测量, 但针对不同结构参数黑体腔吸收率的仿真与实验测量的比对研究鲜有报道。本文对研制的四种不同结构腔体的吸收率进行仿真与实验测量对比研究,

收稿日期: 2021-01-05, 修订日期: 2021-02-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0504602), 国家重点实验室基金项目(JCKYS2019204016)资助

作者简介: 刘红波, 1987年生, 中国电子科技集团公司第四十一研究所工程师 e-mail: lhbcetc@163.com

分析了不同腔体结构对吸收率的影响因素，为设计和研制低温辐射计黑体腔提供了实际的参考。

1 黑体腔结构及吸收率仿真

根据 Prokhorov 等的理论仿真结果^[4]，高吸收率主要来源于光线在腔内多次反射被吸收的结果，因此，腔体内表面

的吸收特性、腔体结构是影响腔体吸收的主要因素。在我们的前期研究工作中，利用蒙特卡罗光线追迹方法重点研究了光谱波长、腔体长度、黑材料漫反射系数、黑材料吸收率和入射角度、光空间位置等对斜底黑体腔光谱吸收率的影响^[10]。为研制宽光谱范围、超高吸收率的黑体腔，研制了四种不同结构参数的黑体腔，分别为 1#、2#、3# 和 4#，其结构参数如表 1 所示，对应结构示意图如图 1 所示。

表 1 黑体腔结构参数
Table 1 The cavity parameters

No.	Long/mm	Thick/mm	Weight/g	Diameter/mm	Inlet-Diameter/mm	Angle
1#	75	0.1	2	10	10	Cone-30°
2#	75	0.1	2	10	10	Inclined-30°
3#	75	0.1	2	10	10	Inclined-30°
4#	75	0.1	2.2	12	8	Inclined-30°

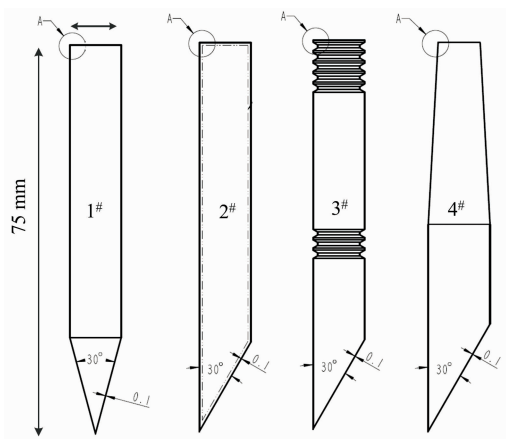


图 1 黑体腔结构示意图(1#、2#、3#、4#)

Fig. 1 The structure of cavity (1#, 2#, 3#, 4#)

黑体腔研制所用材质为高电导无氧铜(OFHC)，壁厚 0.1 mm，内表面高度抛光处理^[8]。黑体腔内壁所选用镍磷黑(NiP)涂层具有吸收率高、化学性质稳定，抗氧化能力强的优点，适于作为光辐射吸收材料。为验证不同结构参数对黑体腔吸收率的影响，利用 TracePro 软件，采用蒙特卡罗光学追迹法分别对上述四种结构黑体腔吸收率进行光学仿真。根据实际情况完成对黑体腔吸收涂层光学特性、光线特性参数设定，当追迹光线反射出腔外或功率衰减到 10^{-7} ，即终止追迹，具体如表 2 所示。

2 黑体腔吸收率测量原理

黑体腔吸收率通常采用替代法进行测量^[5, 9]，激光水平入射积分球入光口，垂直照射样品区域，探测器放置于积分球顶端。首先，将黑体腔放置于样品区域，白板放置于积分球底部出光口，探测器输出感应电压信号 U_C ；其次，将标准白板放置于样品区，黑体腔交换放置于底部出光口，探测器输出感应电压信号 U_S ；最后，将标准白板移除，激光从样品区出射，探测器输出背景光的感应电压信号 U_B 。

表 2 黑体腔吸收率仿真参数设置

Table 2 The absorptance of simulation parameter setup

No.	Item	Parameter
1	Wave-length	632.8 nm
2	Laser Power	1 W
3	Light diameter	2 mm
4	追迹光线数量	119 401
5	追迹门槛设定	10^{-7}
6	涂层材料吸收率	0.94
7	涂层镜面反射系数	0.05
8	朗伯漫反射系数(ABg)	0.01

根据测量原理得到黑体腔反射率的比例关系

$$\frac{U_C - U_B}{U_S - U_B} = \frac{\rho_C}{\rho_S} \times \delta \tag{1}$$

由式(1)得到黑体腔吸收率的计算公式

$$a_C = 1 - \rho_C = 1 - \frac{U_C - U_B}{U_S - U_B} \times \frac{\rho_S}{\delta} \tag{2}$$

式(2)中， a_C 为黑体腔吸收率， ρ_C 为黑体腔反射率， ρ_S 为标准白板在该波长下反射率。其中 δ 为两次测量时几何位置变化的修正系数，因本次测量时没发生变化，修正系数取 $\delta=1$ 。

3 实验部分

黑体腔吸收率测量装置原理框图如图 2 所示。使用波长 633 nm 的 He-Ne 激光器作为光源，激光经空间滤波器、起偏器和功率稳定系统，利用检偏器控制到达积分球的激光功率。探测器输出电压信号经放大后输出，经数字多用表采集 200 个数据点，采样频率 1 Hz，取其平均值；激光器选用美国 CVI 公司，25-LHP-828-230 系列产品，功率稳定性达到 $0.1\% \cdot h^{-1}$ ；激光功率稳定系统选用美国 BEOC 公司，LPC-VIS 系列，通过光电调制器和反馈控制单元实现激光功率的稳定度达到 0.005% (40 min)。探测器选用德国联邦物理技术研究院(PTB)研制的硅陷阱探测器，经 PTB 进行溯源校

准, 测量不确定度达到: $U=0.0073\% (k=2)@632.8\text{ nm}$ 。选用 KEITHLEY 公司, 2000 型六位半数字多用表采集硅阱探测器的响应电压。测试用标准白板 D50, 经中国计量科

学研究院校准(校准证书编号 GXcl2018-5597), 在 633 nm 的反射率为 0.983, 测量不确定度为 $U=1.0\% (k=2)$, 采用上述装置对黑体腔吸收率进行测量。

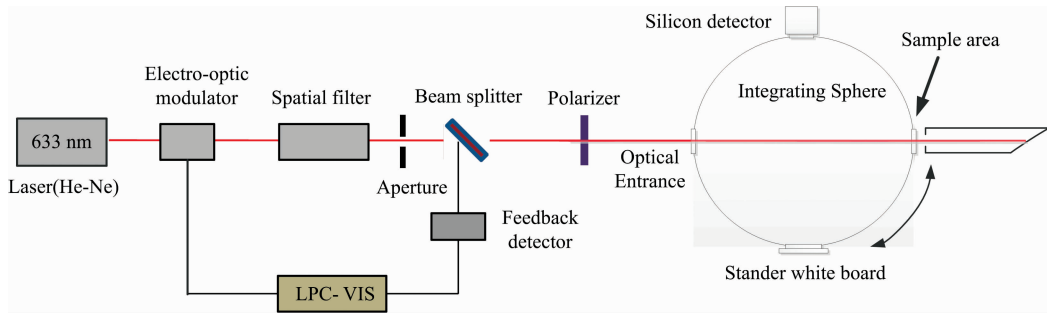


图 2 黑体腔吸收率测量装置

Fig. 2 Schematic diagram of the cavity absorption experimental setup

4 结果与讨论

4.1 黑体腔吸收率仿真结果

利用 TracePro 光学仿真软件, 根据表 2 参数设置, 对四种不同结构黑体腔吸收率进行仿真, 得到黑体腔每个面辐照度分布的详细信息, 统计黑体腔每个面的辐照度结果, 如表 3 所示。仿真结果表明: 斜底柱腔的吸收率比圆锥柱腔的吸收率高; 不同结构黑体腔吸收率均达到 0.999 以上。两种典

型结构黑体腔(圆锥柱腔 1#, 斜底柱腔 2#)的辐照度分布图, 如图 3 所示。

表 3 黑体腔吸收率仿真结果

Table 3 The cavity parameters

No.	1#	2#	3#	4#
Absortance	0.999 658	0.999 952	0.999 964	0.999 974

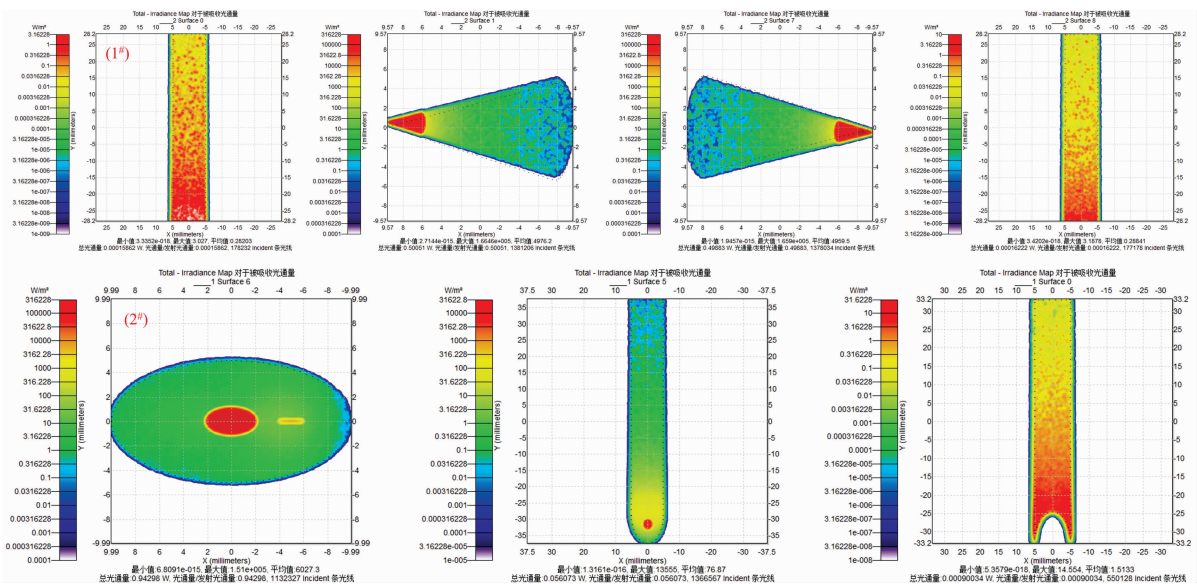


图 3 黑体腔辐照度分布图(1#, 2#)

Fig. 3 Distribution diagram of blackbody cavity irradiance (1#, 2#)

4.2 黑体腔吸收率测量结果

通过图 2 所示测量装置, 首先, 对激光功率的稳定性进行测试, 采集频率 1 Hz, 测试结果如图 4(a)所示, 激光功率稳定性达到 0.006%(70 min), 功率标准偏差为 1.23×10^{-4} V; 然后, 分别对不同结构 1#, 2#, 3# 和 4# 黑体腔进行吸收率测量, 依次交替测量样品区为标准白板、黑体腔、背景时探测器的响应电压, 测量时间为 200 s, 采集频率 1 Hz, 每

个腔连续测量 3 组。激光感应电压的标准差均在 0.01% 以内, 测量结果如图 4 所示。

根据测量数据, 利用式(2)依次计算黑体腔的吸收率, 取 3 组的平均值, 如表 4 所示。结果表明, 上述四种结构黑体腔的吸收率均在 0.999 以上, 但因黑体腔结构不同, 导致测量结果有较大差异。

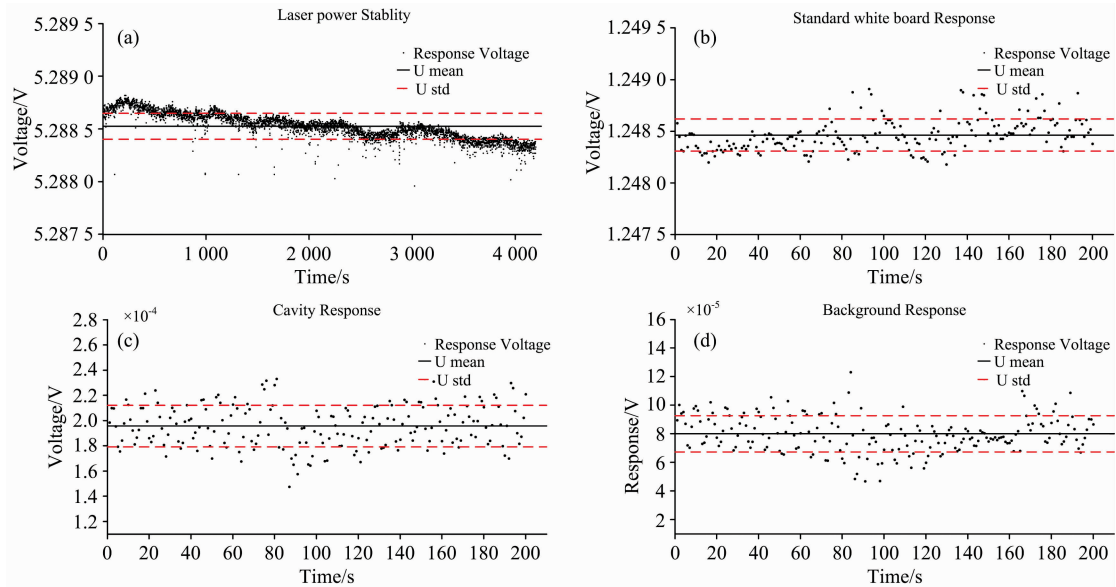


图 4 激光功率稳定性测量结果

(a): 激光功率稳定性(70 min); (b): 标准白板响应电压的稳定性 U_S ;
 (c): 黑体腔响应电压稳定性 U_C ; (d): 背景噪声响应电压稳定性 U_B

Fig. 4 Measurement

(a): Stability of the laser power (70 min); (b): Stability of white standard signal U_S ;
 (c): Stability of the cavity signal U_C ; (d): Stability of the background signal U_B

表 4 黑体腔吸收率测量结果

Table 4 Measurement results of cavity absorption coefficient

No.	Item	White standard	Cavity	Background	Absorptance
1#	Signal(\bar{V})	1.017 78	0.000 667 279	0.000 217 806	0.999 568±0.000 05
	Std(V)	1.2×10^{-4}	6.4×10^{-6}	5.8×10^{-6}	
2#	Signal(\bar{V})	1.041 72	0.000 315 926	0.000 275 275	0.999 962±0.000 005
	Std(V)	9.2×10^{-5}	7.5×10^{-6}	4.9×10^{-6}	
3#	Signal(\bar{V})	1.041 89	0.000 329 386	0.000 268 882	0.999 943±0.000 005
	Std(V)	1.6×10^{-4}	7.2×10^{-6}	4.8×10^{-6}	
4#	Signal(\bar{V})	1.013 92	0.000 340 901	0.000 280 262	0.999 942±0.000 005
	Std(V)	1.9×10^{-4}	6.9×10^{-6}	4.3×10^{-6}	

4.3 黑体腔吸收率仿真结果与测量结果比对分析

(1)黑体腔吸收率测量数据可靠

不同结构黑体腔吸收率仿真结果与测量结果如图 5 所示。结果表明：黑体腔吸收率的仿真结果与实验测量结果保持了较好的一致性；验证测量方法的有效性，测量数据的可靠性。后续利用 TracePro 软件进行仿真时，表 2 列出的仿真参数设置符合黑体腔光辐射吸收特性。

(2)斜底圆柱腔吸收性能优于圆锥柱腔

通过对比圆锥柱腔(1#)与其他三种腔的测试结果，表明斜底柱腔的吸收性能优于圆锥柱腔，吸收率由 0.999 568 提高到 0.999 962。分析原因，斜底圆柱腔的 30° 倾角斜底面结构设计，使得光束沿黑体腔轴线水平入射时，入射光束可在腔内镜面反射至少 5 次，提高了黑体腔的吸收率；而圆锥柱腔的锥角处基本为平面，光束沿黑体腔轴线水平入射至锥角

顶点，未被吸收的部分光束将被反射出腔外，而该区域恰为高斯光束的峰值功率密度区，降低了黑体腔的吸收率。

(3)腔体内表面积对黑体腔吸收率的影响

通过对比斜底圆柱腔(2#)与斜底螺纹柱腔(3#)的测试结果，通过增加螺纹结构增加腔体表面积，并没有提高吸收率。分析原因，根据光束在斜底腔内的反射特性，光辐射的吸收主要集中在斜底面区域，圆柱腔其他区域主要吸收光辐射的漫反射光。因此，当黑体腔的腔长 L /半径 R 比固定时，通过增加螺纹结构来增加腔内表面积并没有提高腔体吸收率。

(4)腔体锥口设计对黑体腔吸收率的影响。

通过对比斜底圆柱腔(2#)与斜底锥口腔(4#)测试结果，发现通过设计圆锥口来类比光阑，增加光束在内表面的反射次数，吸收率并没有明显提高。分析原因，斜底锥口腔对光

束的吸收主要集中在斜底面区域,而圆锥面主要对漫反射光进行反射和吸收。镍磷黑(NiP)涂层的单次吸收率高、镜面特性明显,导致漫反射光占比较少。因此,通过设计圆锥口来类比光阑并没有提高腔体吸收率。

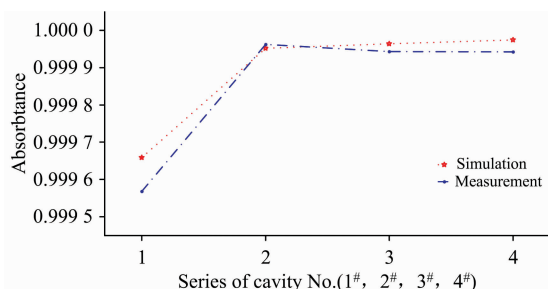


图 5 不同结构黑体腔仿真结果与测量结果比较图

Fig. 5 Comparison of simulation results and measurement results of the cavity with different structures

5 结 论

黑体腔是低温辐射计的核心部件,本文建立了不同结构黑体腔的三维结构模型,并研制了该结构参数的黑体腔实物,系统分析了结构对黑体腔吸收率的影响因素。采用蒙特卡罗光线追迹法,对不同结构的黑体腔吸收率进行了仿真;采用替代法对不同结构黑体腔的吸收率进行测量。结果表明,(1)黑体腔吸收率的仿真结果与测量结果保持了较好的一致性,验证测量方法的有效性和测量数据的可靠性;(2)在黑体腔长度/口径相同的情况下,斜底面 30° 倾角圆柱腔的吸收性能优于圆锥 30° 顶角圆柱腔,斜底圆柱腔(2#)在波长 632.8 nm 处吸收率达到 $(0.999\ 962 \pm 0.000\ 005)$,满足低温辐射计使用要求;(3)在腔体长度、口径和斜底面倾角相同的情况下,通过设计螺纹结构增加腔内面积、设计圆锥口径类比光阑并没有提高腔体吸收率。以上结论对于低温辐射计黑体腔结构参数选择具有一定的指导作用。

References

- [1] Hoyt C C, Foukal P V. Metrologia, 1991, 28(3): 163.
- [2] Houston J M, Cromer C L, Hardis J E, et al. Metrologia, 1993, 30(4): 285.
- [3] LIU Chang-ming, SHI Xue-shun, et al(刘长明, 史学舜, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2016, 45(9): 0912002.
- [4] Alexander V Prokhorov, Leonard M Hanssen, et al. Metrologia, 2004, 41: 421.
- [5] López M, Hofer H, Kück S, et al. Metrologia, 2005, 42(5): 400.
- [6] Fang Qianqian, Fang Wei, et al. Metrologia, 2012, 49(4): 572.
- [7] YI Xiao-long, YANG Zhen-ling, et al(衣小龙, 杨振玲, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2015, 23(10): 2733.
- [8] Houston J M, Rice J P. Metrologia, 2006, 43: 31.
- [9] Fox N P, Haycocks P R, Martin J E, et al. Metrologia, 1995, 32(6): 581.
- [10] ZHUANG Xin-gang, LIU Hong-bo, ZHANG Peng-ju, et al(庄新港, 刘红博, 张鹏举, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2019, 39(7): 2018.

Simulation and Experimental Measurement of Cryogenic Radiometer Cavity With Different Structures

LIU Hong-bo, SHI Xue-shun, ZHUANG Xin-gang, ZHANG Peng-ju, LIU Chang-ming, WANG Heng-fei
The 41st Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China

Abstract At present, the highest international benchmark for optical radiation power is cryogenic radiometer, and it can detect radiation covering the vacuum ultraviolet to terahertz spectrum ($115\text{ nm} \sim \text{THz}$). Using the optical and electric alternative principle with the vacuum, low temperature and superconducting technology, it traced the radiation power to the electrical parameters with the high precision measurement, realized super wide spectrum of optical radiation absolute power measurement, the uncertainty reached 10^{-5} . In the field of national defence military, and optical radiation measurement, photoelectric payload, quantitative remote sensing, high spectral imaging and optical radiation quantity traceability, and others have an irreplaceable role. As the core device of radiation absorption, the cavity of the cryogenic radiometer has a flat spectral absorption with an ultra-high absorption ratio of over 0.999. The absorptance is one of the main factors affecting the high accuracy measurement of the cryogenic radiometer. The scholars at home and abroad have carried out a large number of studies with the theoretical and simulation for the different cavities. However, the experimental measurement and comparison of absorption rates of the cavity with different structural parameters have not been reported. Therefore, to realize the requirement of the wide spectrum and high

precision measurement of the radiometer, the research work of developing the cavity suitable for the radiometer has been carried out. We developed four different structures. The wall was 0.1 mm thickness with high conductivity oxygen-free copper (OFHC), the inner surface electroplated nickel-phosphorus (NiP) black coating. The Monte Carlo tracing algorithm was used to simulate the absorptivity of the cavity of four structures. The absorptivity of the cavity was measured by the alternative method, and the measuring device was set up, which was composed of the high stable light source and integrating ball system. By switching the standard whiteboard and the cavity, the absorption rate of the cavity was measured, and the influencing factors of the absorption rate were analyzed. By comparing the simulation and the experimental results, the rationality of the simulation parameter setting is verified. The experimental results show that: (1) comparing the simulation and the experimental result shows, the measurement method and result are verified; (2) the cryogenic radiometer cavity has achieved $0.999\ 962 \pm 0.000\ 005$ @632.8 nm; (3) the absorption of the cylindrical cavity with the inclined bottom is better than that of the conical cavity; (4) By designing the screw structure to increase the cavity surface area and the conical aperture to compare with the diaphragm structure, the absorptivity is not significantly increased.

Keywords Cryogenic radiometer; Cavity; Absorption coefficient; Black paint

(Received Jan. 5, 2021; accepted Feb. 24, 2021)