

引用格式: ZHANG Kailin, ZHAO Zhiyuan, REN Chuanyun, et al. Gallium Fixed-point Blackbody Radiation Source for Calibration of Sea Surface Temperature Radiometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(1):0112002

张凯临, 赵治园, 任传运, 等. 用于定标海表测温辐射计的镓黑体辐射源[J]. 光子学报, 2024, 53(1):0112002

# 用于定标海表测温辐射计的镓黑体辐射源

张凯临<sup>1</sup>, 赵治园<sup>1</sup>, 任传运<sup>1</sup>, 杨铭伦<sup>2</sup>, 曲利芹<sup>1</sup>

(1 中国海洋大学 信息科学与工程学部, 青岛 266100)

(2 中国海洋大学 三亚海洋研究院, 三亚 572024)

**摘要:** 设计了镓黑体对海表测温辐射计进行定标。首先, 介绍了该黑体的结构与工作原理, 对黑体发射率进行仿真, 并开展发射率的测量实验, 讨论其不确定度的来源。然后, 开展了电加热和水浴加热下镓的相变复现实验, 讨论电加热功率对镓相变复现的影响。最后, 通过红外海面温度自主辐射计实验对该黑体进行验证。结果表明: 该黑体基于蒙特卡罗软件仿真的发射率优于 0.998 8, 实验测得的黑体辐射源发射率结果与仿真结果较为吻合, 测量重复性(标准偏差)达 0.1%; 相变温度平台的复现性均优于  $\pm 0.03$  K; 相变温坪附近时, 红外海面温度自主辐射计和 FLUKE 1524 测温仪测得的黑体腔附近温度的数据差值均在  $\pm 0.15$  K 以内。设计的镓黑体可以应用到海表测温辐射计进行校准, 为发展自主知识产权的海表测温设备提供校准源。

**关键词:** 红外测温; 黑体辐射源; 镓固定点; 船载辐射计定标

中图分类号: TB942

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20245301.0112002

## 0 引言

海水能够储存和输送大量热能, 对当地的天气和气候产生影响<sup>[1]</sup>。目前海表温度(Sea Surface Temperature, SST)应用的领域有气候预测和天气预报等<sup>[2]</sup>。SST 的测量方式分为接触式测量方法和非接触式测量方法, 非接触式测量方法用到的仪器有星载辐射计和船载辐射计。目前国内外较为先进的船载辐射计有红外海面温度自主辐射计(Infrared SST Autonomous Radiometer, ISAR)<sup>[3]</sup>和中国海洋大学研制的首个海表温度辐射测量系统<sup>[4]</sup>(The First Infrared Radiometer for Measurements of Skin SST Made by OUC, OUCFIRST)。

星载辐射计和船载红外辐射计在使用前后需要进行温度标定, 以保证测量的准确性。而温度标定的主要依据是黑体辐射源(Blackbody Radiation Source, BRS)的辐射温度信息。黑体辐射源是标定过程的关键设备, 其性能直接影响定标精度。因此, 研究黑体辐射源的特性和优化方法尤为重要。

对于船载辐射计定标, 大多数辐射计在部署前后都需要进行定标。“搅拌罐”的方案是一种辐射计的校准策略<sup>[5]</sup>。在该方案中, 辐射计定期观察(通常每分钟一次)剧烈搅拌的海水浴进行校准。但是使用“搅拌罐”方案进行测量时会反射水桶壁的温度<sup>[6]</sup>, 从而导致测量误差。

DONLON C 等提出一个参考黑体单元的设计方案<sup>[7]</sup>, 该黑体可用于在实验室和室外校准各种海上红外辐射计系统。该参考黑体有一个旋转铜腔, 铜腔浸在使用强水泵进行持续混合的水浴中, 通过测量的水浴温度来确定黑体腔的辐射温度。但水会结露, 且受大气压强影响较大。

英国国家物理实验室研制出了氨热管参考黑体辐射源<sup>[8]</sup>, 该黑体可在 10~1 064 °C 温度范围内使用, 用于辐射温度计的校准, 以及用于波长范围为 0.9~14  $\mu\text{m}$  的工业黑体腔的评估和校准。地球观测卫星委员会为了评估黑体和红外辐射计的一致性程度, 在 2016 年用该黑体对 ISAR 辐射计和 OUCFIRST 等海表测温辐射计进行了测量<sup>[9]</sup>。结果表明, 参与测量的辐射计与参考黑体的相应温度之间的差异在测量的不确定性

基金项目: 海南省自然科学基金(No. 122CXTD519)

第一作者: 张凯临, zhangkl@ouc.edu.cn

收稿日期: 2023-06-05; 录用日期: 2023-09-11

<http://www.photon.ac.cn>

范围内。氨热管黑体温度分布均匀、稳定性好,但是价格昂贵且体积较大,不易运输。

我国船载海表测温辐射计定标的整体水平与国外有较大差距,国外的船载定标水平达0.1 K,国内对专门用于船载辐射计的定标黑体的研究较少。上述提到的氨热管黑体和水浴定标黑体存在体积大、温度可变以及难以运输的问题。因此,亟需研制出一种受大气压强影响较小且便于运输的定标黑体用于监测海表辐射计的稳定性。

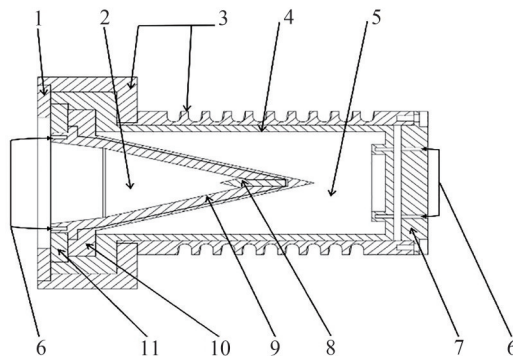
镓固定点黑体为解决国内船载辐射计的定标提供了新的方向。镓(Ga)固定点是ITS-90国际温标中非常重要的定义固定点<sup>[10]</sup>,其理论值为302.914 6 K (29.764 6°C)。研究表明,镓固定点具有极高的复现性和稳定性<sup>[11]</sup>。

由ITS-90国际温标可知:大气压强对水的影响是-7.5 mK/101.325 kPa,而对镓的影响是-2 mK/101.325 kPa,即大气压强对镓的影响比较小。镓黑体可以在相变温度29.764 6°C提供稳定的辐射源,该黑体可以作为高精度的校准源,用于检验海表测温辐射计的固有误差和重复性。镓黑体具有结构简单、易于控制、寿命长等优点。

本文设计了一个镓黑体,该黑体能够实现镓的三相点温度。其空腔对于检验海表测温辐射温度计的稳定性具有实用价值。该黑体的黑体腔利用普朗克辐射定律,作为建立国际温标ITS-90的主要来源。在复现镓的相变平台时,基于镓固定点的黑体辐射源对海表测温辐射计进行校准。

## 1 工作原理与结构设计

镓黑体整体结构如图1。黑体锥9采用双段锥设计,第一段的锥角为32°,第二段锥角为18°,腔长107.5 mm,开口直径50 mm,黑体锥材质为紫铜。设计的黑体锥锥角是平齐的,误差在0.1°以内。在黑体锥的锥底部设计了一个直径为 $\Phi 4$  mm的孔,以便放置小逆锥8。这种设计可以避免在黑体锥底部直接制作成锥形时,锥顶部出现弯月形。因为通过各种机械加工方式加工的锥形,很难加工成很细很尖的尖锥,必然是一个头部是弧形的形状,像弯月形,尤其是涂覆黑体漆之后,这个弯月形会更为明显。但逆锥很容易加工得很尖,涂覆黑体漆后也会保持较为尖锐的形状,这样可以减少对发射率的影响。



1—front cover of blackbody radiation source; 2—cavity of the blackbody radiation source; 3—copper shell; 4—teflon cylinder; 5—teflon container; 6—thermometer trap; 7—back cover of the blackbody radiation source; 8—small inverse cone; 9—cone the blackbody radiation source; 10—teflon sleeve; 11—front cover made of teflon

图1 用于海表测温辐射计的镓黑体辐射源整体装配结构

Fig.1 Overall assembly structure of gallium fixed-point blackbody radiation source used for sea surface temperature radiometer

采用锥和小逆锥结合设计可以使黑体腔2腔中心的反射率降低3倍<sup>[12]</sup>。根据反射率和发射率的关系:反射率和发射率的和为1,可知这种设计能使黑体发射率提高。聚四氟乙烯筒4和聚四氟乙烯套10组装后形成了盛放镓的容器5,在四氟乙烯容器5中将会灌注纯度为99.999 9%的高纯镓。黑体腔2将会涂上高发射率黑漆Nextel Velvet 811-21,该黑漆的发射率为0.95。温度计阱6将会放置温度传感器以监测镓在凝固/熔化过程时的温度。

聚四氟乙烯前盖11和黑体辐射源的前盖1用于压紧聚四氟乙烯套、黑体锥以及聚四氟乙烯筒。黑体辐射源外壳3采用铜作为材料,因为铜的导热性较好。黑体辐射源的外壳3上设计了圈数为7.5,螺距为

12 mm 的凹槽,以便后期放置换热盘管以实现用水浴对黑体辐射源进行加热制冷。黑体辐射源的后盖7上设计了4个直径为 $\Phi 2$  mm 的温度计阱以便与聚四氟乙烯筒的温度计阱组装。

该黑体辐射源的主要设计指标如表1。

表1 镓黑体红外辐射源的设计指标

Table 1 The technical index of the gallium fixed-point blackbody infrared radiation source

Index	Value
Aperture diameter of cavity/mm	50
Cone angle at the bottom of the cavity/(°)	32
Target emissivity of cavity	0.999 0
Operating temperature range/K	263.15~313.15
Reproducibility/K	0.03

图2为镓黑体相变复现实验的系统框图。该黑体的加热方式有电加热和水浴加热两种方式。电加热黑体时,在黑体外面均匀包裹一层加热丝,使用温控器控制加热丝的温度以实现黑体的加热和制冷;水浴加热黑体时,在图1所示的黑体外壳的凹槽上缠绕内径为6.5 mm 的换热盘管,将换热盘管的两端分别接上外径为8 mm、内径为5 mm 的水管,将两个水管两端接入恒温水槽,如此可以实现水的外循环从而给整个黑体辐射源加热或者制冷。在电加热或者在水浴加热下,将 FLUKE 1524 测温仪的温度探头放入图1所示的靠近黑体腔附近的温度计阱中以实现黑体的温度测量。

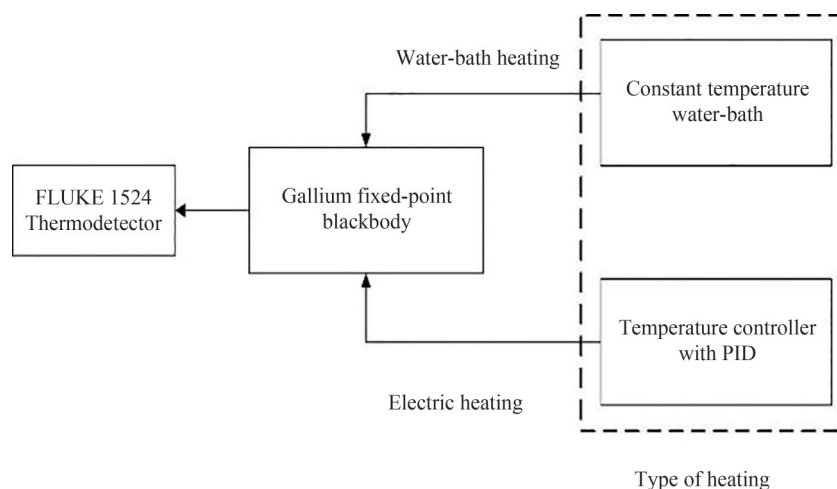


图2 镓黑体相变复现实验系统框图

Fig.2 System block diagram of gallium fixed-point blackbody's phase transition recurrence experiment

## 2 发射率

### 2.1 发射率的仿真和测量结果

本文研制的镓黑体属于人工黑体,有效发射率是评价人工黑体性能的重要指标之一。等温漫射腔有效发射率的近似计算通常有三种方法:积分方程法、多重反射理论和蒙特卡罗计算方法。

设计的黑体腔适用于蒙特卡罗计算方法对其发射率进行计算,空腔在 $\xi$ 方向上的定向有效发射率 $\epsilon_e(\xi)$ 可以表示为

$$\epsilon_e(\xi) = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \rho_i (1 - \epsilon)^i \quad (1)$$

式中, $\rho_i$ 为射线在反射后离开空腔的概率, $\epsilon = 1 - \rho$ 是空腔壁的发射率, $\rho$ 是空腔壁的反射率。此处的材料发射率是指黑体腔表面喷涂的黑漆的发射率。

使用维里尔国际有限责任公司([www.virial.com](http://www.virial.com))的蒙特卡罗射线追踪程序 STEEP321 完成了对黑体空腔有效发射率的仿真计算。根据黑体空腔尺寸建立黑体空腔数学模型,空腔观察条件选择普通锥形。选择

漫反射率为0.5、发射率为0.95的半镜面反射黑漆 Nextel Velvet 811-21 作为黑体辐射源的空腔涂层。

该黑漆在0~55 μm 波段内有持续低的反射率<sup>[13]</sup>。如果在与黑体工作的温度不同的温度下对空腔发射率进行测量,该黑漆辐射特性的未知温度依赖性可能成为发射率测量不确定度的来源。许多观察研究表明,如果黑漆材料在加热或冷却过程中没有改变化学成分,并且不改变表面状态,那么其辐射特性的温度变化是小的和可逆的。该黑漆在25℃左右时的标准不确定度上限约为0.013<sup>[14]</sup>。

用KT19.85热辐射计对镓黑体的发射率进行测量(KT19.85热辐射计的发射率设为1)。KT19.85热辐射计在9.6~11.5 μm 的光谱波段工作,并提供60 mK 的温度分辨率。该辐射计的目标直径为95 mm,目标范围为2 m,该辐射计的测量可以追溯到ITS-90标准。实验流程为:水浴加热镓黑体时,将FLUKE 1524测温仪的精密铂电阻放在图1所示的靠近黑体腔附近的温度计阱中,将KT19.85热辐射计对准黑体腔腔口进行测量,并记录环境温度,将恒温水槽温度设为25℃,测量10次。

根据式(2)(斯蒂芬-玻尔兹曼定律的变形)计算黑体空腔有效发射率,其中, $\epsilon_e$ 为黑体的有效发射率, $T_{bb}$ 为FLUKE 1524测温仪测得的黑体的温度,即实际温度, $T_R$ 为KT 19.85热辐射计测量的温度,即辐射温度, $T_{bg}$ 为环境温度,单位为K。

$$\sigma T_R^4 = \epsilon_e \sigma T_{bb}^4 + (1 - \epsilon_e) \sigma T_{bg}^4 \quad (2)$$

取10次结果的平均值作为黑体空腔有效发射率。实验结果表明:KT19.85热辐射计测得的黑体有效发射率约为0.998 1,测量的偏差约为0.000 9。基于蒙特卡罗软件仿真的发射率和KT19.85热辐射计测得的发射率结果如图3。

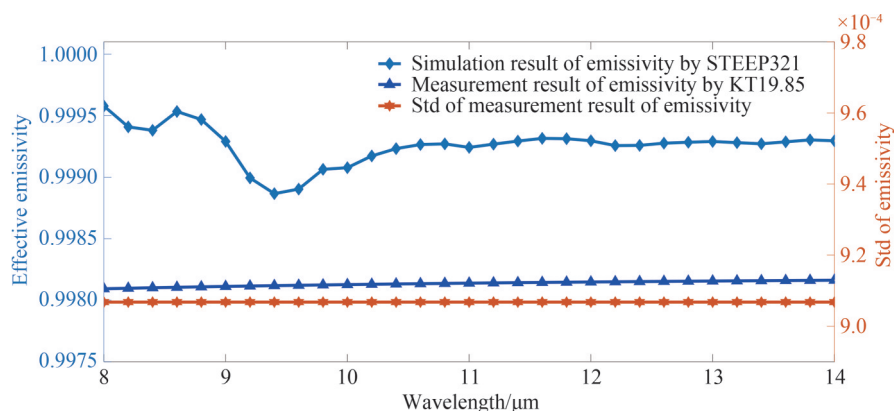


图3 镓固定点黑体的发射率

Fig.3 Emissivity of gallium fixed-point blackbody

## 2.2 发射率的不确定度

发射率测量不确定度主要来源有:1)由于KT19.85热辐射计的发射率不准引起的不确定度;2)由于KT19.85热辐射计的温度不准引起的不确定度;3)由于被测黑体的温度测量不准引起的不确定度,即FLUKE 1524测温仪的精密铂电阻的测量不确定度;4)黑漆的发射率引入的不确定度。

合成标准不确定度 $u_c$ 可表示为<sup>[15]</sup>

$$u_c = \left( \left( \frac{\partial u_1}{\partial \epsilon_1} \right)^2 \Delta \epsilon_1 + \left( \frac{\partial u_2}{\partial T_1} \right)^2 \Delta T_1 + \left( \frac{\partial u_3}{\partial T_0} \right)^2 \Delta T_0 + \left( \frac{\partial u_5}{\partial \epsilon_2} \right)^2 \Delta \epsilon_2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

由于KT19.85热辐射计发射率不准引起的相对不确定度假设为 $u_1$ 。KT19.85热辐射计提供的技术说明书给出其发射率值为 $0.999 \pm 0.001$ 。假设发射率为正态分布,置信概率为95%, $k=2$ ,按B类方法评定,可得KT19.85热辐射计发射率不准引起的相对不确定度 $u_1$ 为

$$u_1 = \frac{0.001}{2 \times 0.999} = 0.0005 \quad (4)$$

由于KT19.85热辐射计的温度不准引起的相对不确定度假设为 $u_2$ :其技术说明书给出它的温度变化区间为 $\pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C} + |T_{\text{targ}} - T_{\text{env}}| \times 0.7\%$ ,环境温度约为20℃。假设为均匀分布,按B类方法评定,选择目标温度和

环境温度差的最大值来计算,所以KT19.85热辐射计温度不准引起的相对不确定度  $u_2$  为

$$u_2 = \frac{0.03675}{\sqrt{3}} = 0.0212 \quad (5)$$

假设FLUKE 1524测温仪的精密铂电阻具有国家自愿实验室认可计划(The National Voluntary Laboratory Accreditation Program, NVLAP)的校准证书,其测量不确定度服从均匀分布,其不确定度为  $u_3$ 。查阅其检定证书,得到测量不确定度的上限为0.005 K,可得  $u_3$  的表达式为

$$u_3 = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029 \quad (6)$$

假设黑漆发射率引入的不确定度服从均匀分布,其不确定度为  $u_4$ ,黑漆不确定度的上限为0.013,可得  $u_4$  的表达式为

$$u_4 = \frac{0.013}{\sqrt{3}} = 0.0075 \quad (7)$$

最终得到的发射率的合成不确定度  $u_c$  表示为

$$u_c = (u_1^2 + 4u_2^2 + 4u_3^2 + u_4^2)^{\frac{1}{2}} = 0.0437 \quad (8)$$

所以,发射率的合成标准不确定度约为0.0437,其实际测量结果与仿真结果较为一致。

### 3 实验结果

#### 3.1 电加热下的相变复现实验

电加热下测得的镓熔化曲线结果如图4,镓的温坪复现结果(cavity)与标准镓熔点302.9146 K有很长一段的重合区域,即温坪复现时间较长,大约持续11.5 h。这段时间内的数据与标准镓熔点的温度差值如图5

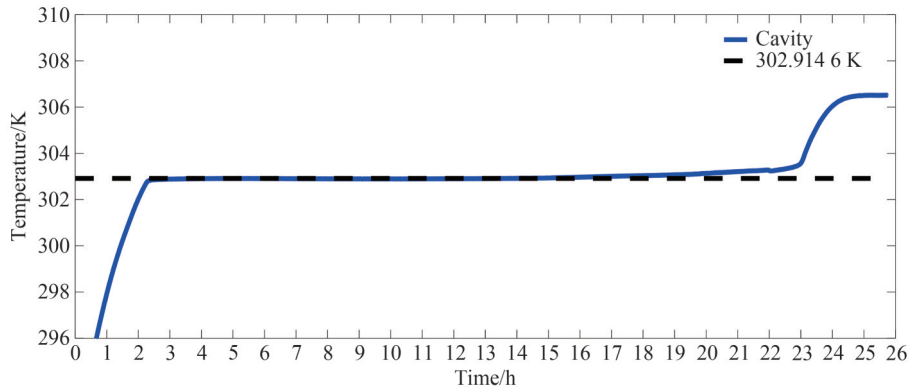


图4 电加热下的镓相变复现结果

Fig.4 Results of phase transition recurrence of gallium under electric heating

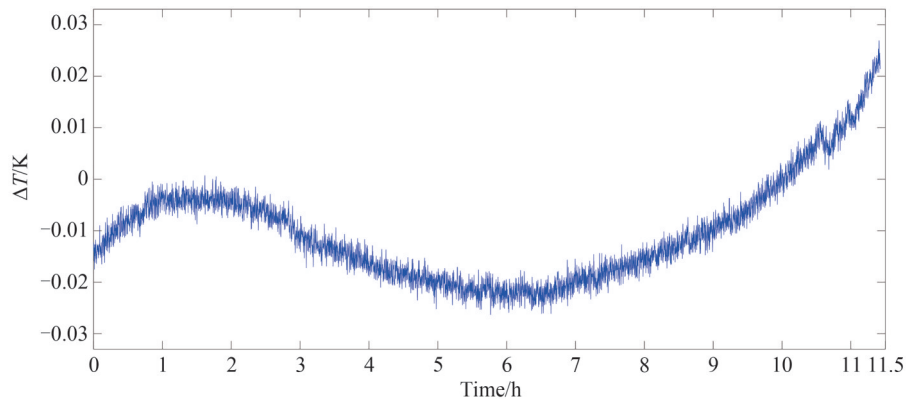


图5 电加热下相变复现结果与镓熔点的偏差

Fig.5 Deviation between the phase transition results and the melting point of gallium under electric heating

所示,由图可知,在电加热情况下,FLUKE 1524测得的黑体的温度与理论温度的温差在 $\pm 0.03$  K以内,满足设计指标要求。

### 3.2 电加热丝加热功率对镓相变温坪的影响

为了探究电加热条件下加热功率对镓的相变温坪复现结果的影响,分别在四种加热功率下(6.039 W, 6.232 W, 6.574 W, 6.835 W)进行电加热黑体实验。图6为电加热丝在不同功率下 FLUKE 1524测温仪测得的镓熔化曲线。由图可知,加热功率会影响镓相变温坪持续时间,随着加热功率增大,温坪持续时间变短。在电热丝功率为6.039 W时,镓的相变温坪持续时间最长;在电热丝功率为6.835 W时,镓的相变温坪持续时间最短。

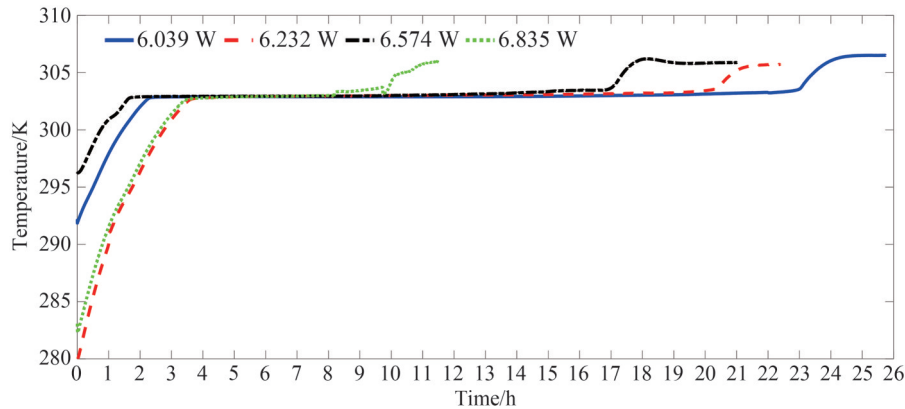


图6 不同功率下的镓熔化曲线

Fig.6 Gallium melting curves at different electric heating powers

图7(a)~(d)分别对应加热丝功率为6.039、6.232、6.574、6.835 W时的相变温坪数据与镓熔点之间的偏差结果。由图7可知,当给电加热丝施加的功率为6.039 W时与标准镓熔点的偏差最小,结果在 $\pm 0.03$  K以

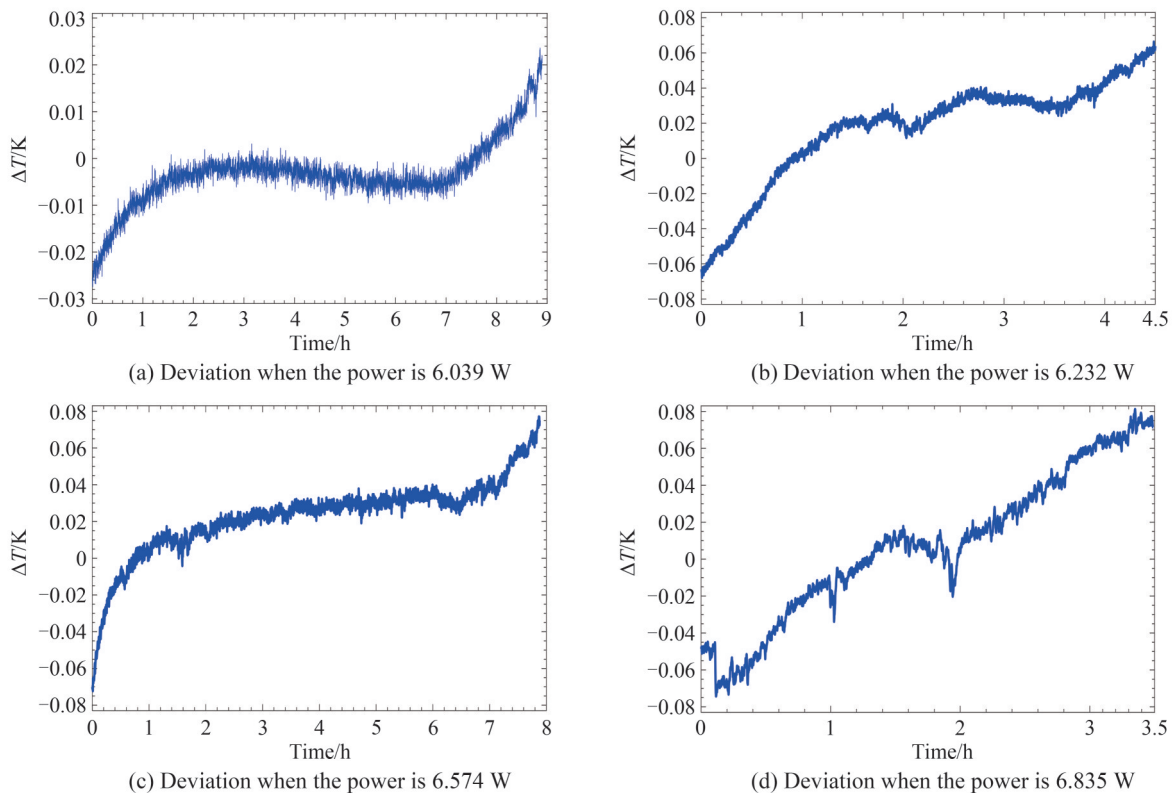


图7 不同加热功率下的测量结果与镓熔点之间的偏差

Fig.7 Deviation between the measured results and the melting point of gallium at different electric heating powers

内,其他功率下的偏差在 $\pm 0.08$  K以内。

### 3.3 水浴加热下的相变复现实验

水浴加热镓黑体的实验过程为:1)设置恒温水槽目标温度为 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保持 $5\text{ h}$ ,确保在黑体内部的镓处于完全凝固的状态;2)为防止水槽升温过快,将水槽目标温度设为 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,同时FLUKE 1524测温仪探头放在黑体的靠近黑体腔开口处的温度计阱中测量黑体温度;3)等待 $1.5\text{ h}$ ,再将水槽温度设为 $30.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,等待黑体里的镓完全熔化完成整个相变过程。

图8为水浴加热下靠近黑体腔开口处的温度计阱(cavity)的测量结果。选坪台中部近 $5.7\text{ h}$ 的实验数据,计算其平均值为 $302.9165\text{ K}$ ,该段数据与标准镓熔点的偏差(平均值减去镓熔点 $302.9146\text{ K}$ )为 $0.0019\text{ K}$ 。

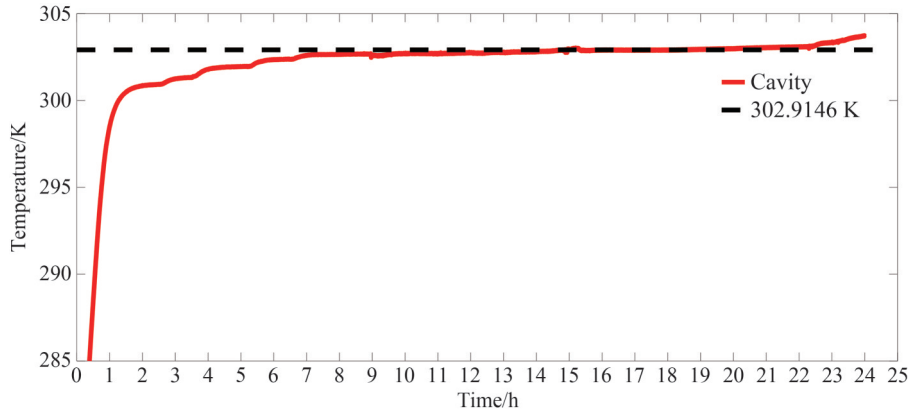


图8 水浴加热镓相变复现实验结果

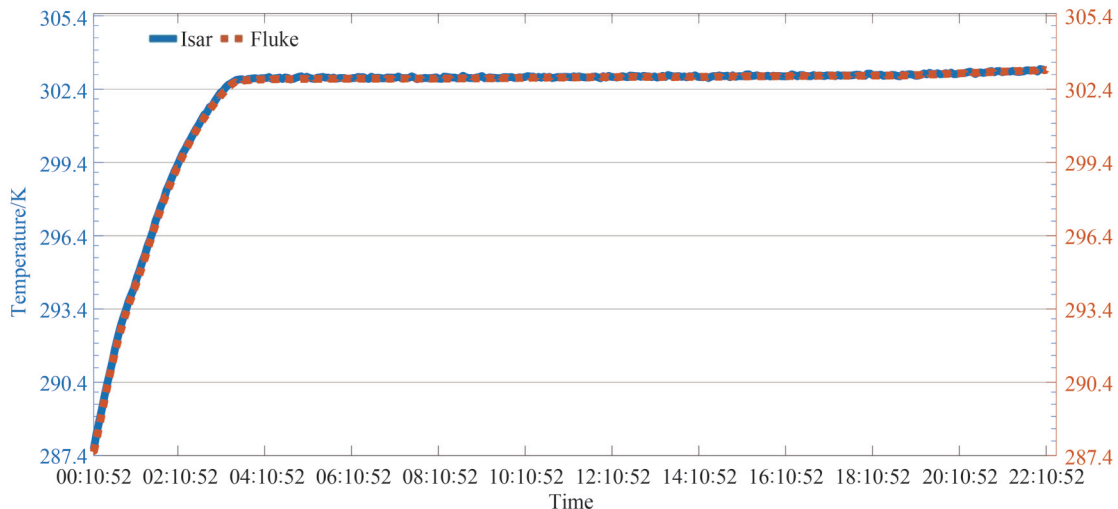
Fig.8 Results of phase transformation recurrence of gallium under water-bath heating

### 3.4 ISAR 辐射计联合测量实验

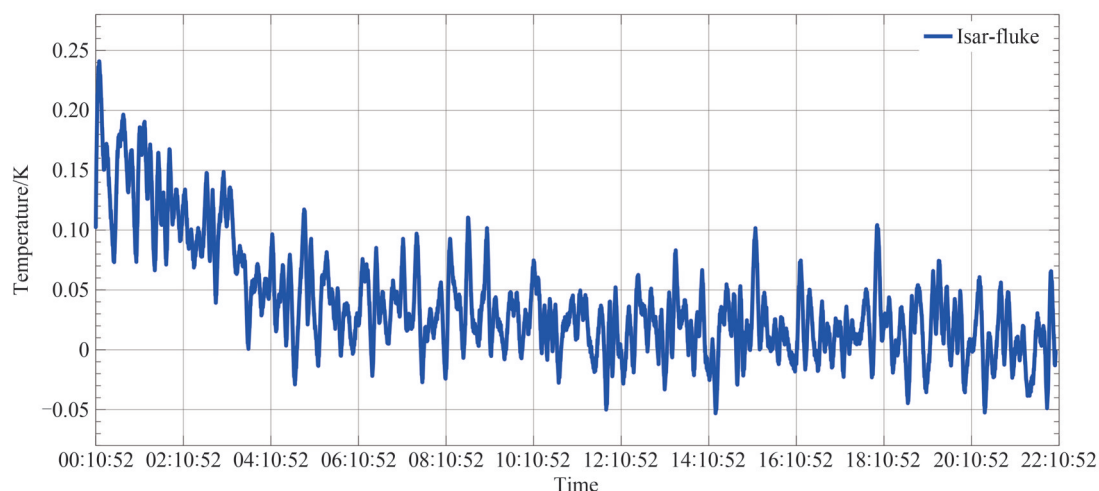
ISAR 辐射计是国际知名的海表测温辐射计,其精度为 $\pm 0.1\text{ K}$ 。该辐射计的视场为 $7^{\circ}$ ,其光心直径约为 $15\text{ mm}$ ,并响应于 $9.6\sim 11.5\text{ }\mu\text{m}$ 光谱波段的波长。为了验证所设计黑体的准确性,将ISAR辐射计测量得到的黑体腔温度结果与FLUKE 1524测温仪同步测量得到的结果进行对比。

图9(a)为电加热黑体时,2023年2月26日0时10分52秒到22时10分52秒ISAR和FLUKE 1524测温仪采集到的靠近黑体腔附近的温度数据的同步测量结果。图9(b)为ISAR和FLUKE 1524测温仪的差值(ISAR数据减去FLUKE 1524测温仪的数据)。

从图9(b)可以得到:ISAR与FLUKE 1524测温仪测量得到的差值从正数降为负数。这是由于在26日的数据中,大约从 $12.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右开始记录起始温度,因此差值最初为正值。由于镓的熔化需要吸收大量热量,且聚



(a) The synchronous temperature data of blackbody's cavity collected by ISAR (isar) and FLUKE 1524 thermometer (fluke) under the condition of electric heating (horizontal axis time interval of 2 hours)



(b) Difference between ISAR's data and FLUKE 1524 thermometer's data under electric heating condition (ISAR's data minus FLUKE 1524 thermometer's data)

图9 电加热下联合 ISAR 的测量结果

Fig.9 Measurement results of the blackbody combined ISAR under electric heating

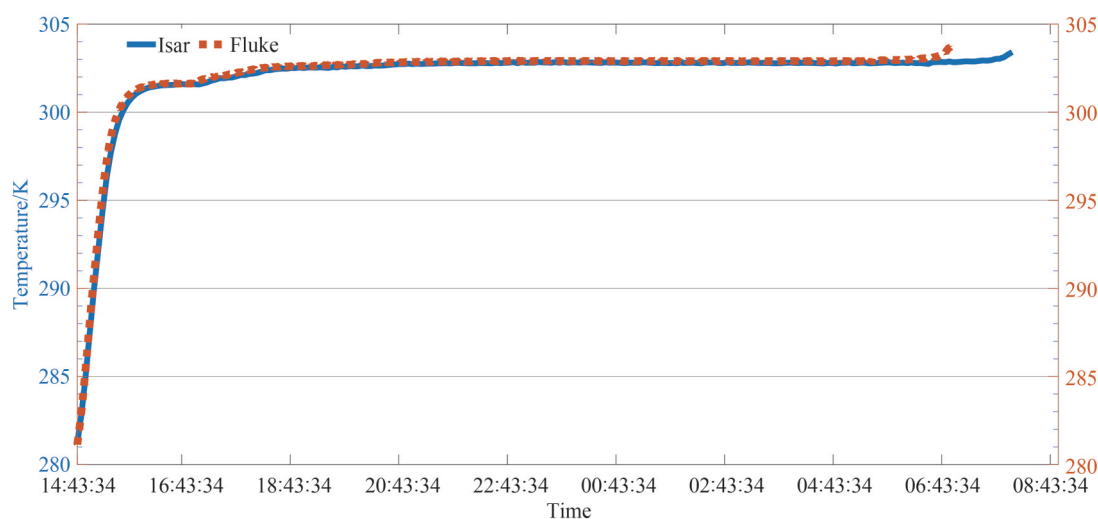
四氟乙烯的导热系数较小,因此在初始阶段,ISAR测量得到的数据略高于FLUKE 1524测温仪测量得到的值。

图10(a)为水浴加热黑体时,2022年12月15日14时43分34秒到12月16日8时43分34秒ISAR和FLUKE 1524测温仪采集到的靠近黑体腔附近的温度数据的同步测量结果。图10(b)为ISAR和FLUKE 1524测温仪的差值(ISAR数据减去FLUKE 1524测温仪的数据)。

从图10(b)可以得到:ISAR和FLUKE 1524测温仪的差值也是从正数降为负数,但是之后差值有持续下降的趋势。差值曲线有下降的趋势是因为夜里环境温度下降,ISAR测得的温度偏低,所以温度差进一步下降。

在镓相变温度附近时,图11(a)、(b)分别为2月26日电加热时,ISAR和FLUKE 1524测温仪测得的黑体温度数据以及ISAR和FLUKE 1524测温仪在这个时间段内的差值曲线。图11(c)、(d)分别为12月16日水浴加热时,ISAR和FLUKE 1524测温仪测得的数据以及ISAR和FLUKE 1524测温仪在这个时间段内的差值曲线。

由图11(b)可以得到:在2月26日电加热条件下,相变温坪附近时ISAR数据和FLUKE 1524的差值范围为 $-0.06\sim 0.1$  K。由图11(d)可以得到:在12月16日水浴加热条件下,相变温坪附近时ISAR和FLUKE 1524的数据差值范围为 $-0.13\sim -0.05$  K。



(a) The synchronous temperature data of blackbody's cavity collected by ISAR (isar) and FLUKE 1524 thermometer (fluke) under the condition of water-bath heating (horizontal axis time interval of 2 hours)



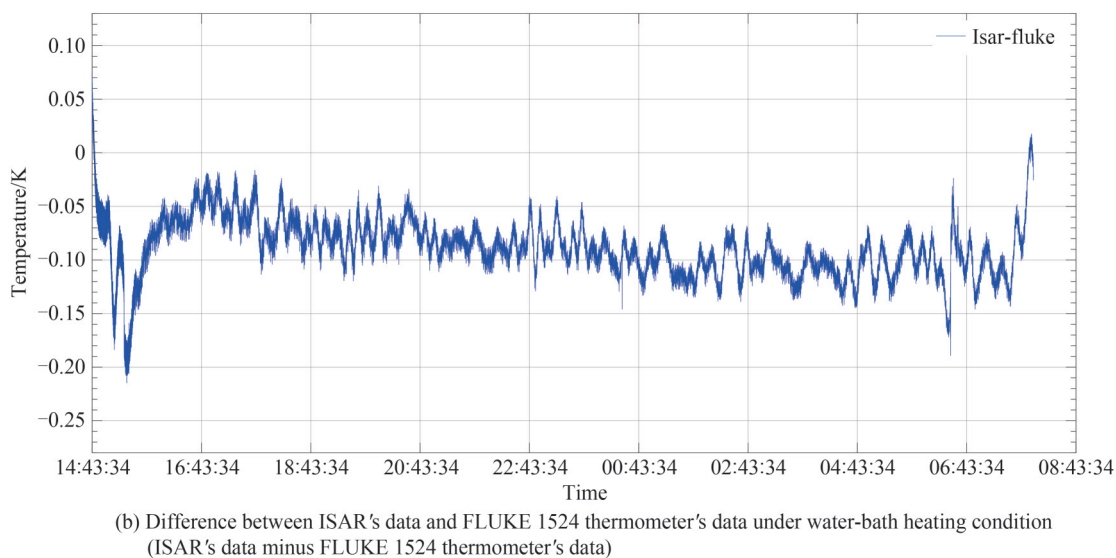


图 10 水浴加热下联合 ISAR 的测量结果

Fig. 10 Measurement results of the blackbody combined ISAR under water-bath heating

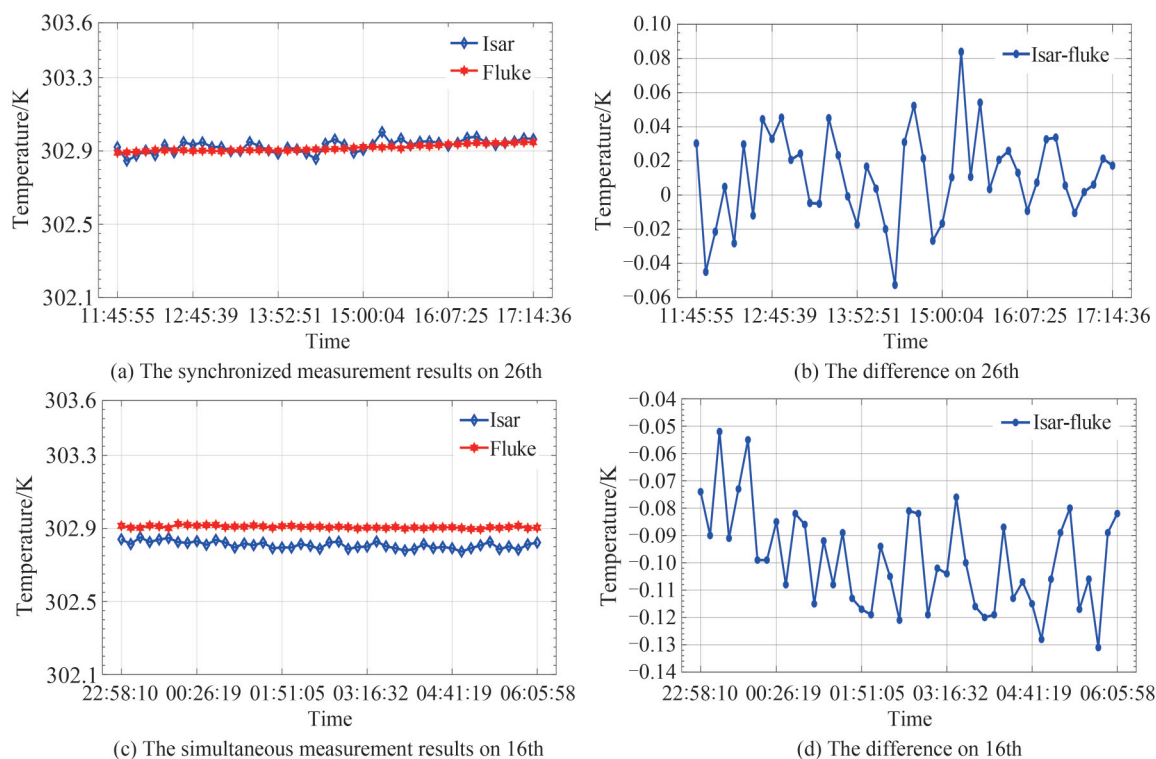


图 11 在镓相变温度附近时,电加热和水浴加热条件下 ISAR 和 FLUKE 1524 测得的黑体腔的同步温度测量结果以及偏差  
Fig.11 The synchronized measurement results collected by ISAR and FLUKE 1524 thermometer and the difference between ISAR's data and FLUKE 1524 thermometer's data under electric heating and water-bath heating conditions when the blackbody is heated by electricity near the gallium phase transition plateau

## 4 结论

本文设计了镓黑体用于校准海表测温辐射计。无论是电加热还是水浴加热该黑体,在相变温坪附近时,FLUKE 1524 测得的该黑体的温度与理论温度的温差在  $\pm 0.03$  K 以内,证明了该黑体的研制是成功的。基于辐射法使用 KT19.85 热辐射计测得的该黑体的有效发射率结果为 0.998 1,发射率测量重复性(标准偏

差)为0.1%,实验测量发射率的结果与理论计算的结果吻合。通过联合 ISAR 海表测温辐射计进行实验验证得到:ISAR测得的黑体腔附近温度的数据与 FLUKE 1524测得的数据差值在 $\pm 0.15$  K以内。理论计算的发射率偏高,实际测量的发射率低的原因有:黑体的腔长和开口直径的比值不够大以及测量过程存在不确定度等。ISAR测得的黑体腔附近温度的数据差值在 $\pm 0.15$  K以内,造成偏差的原因有:ISAR辐射计是被校准的仪器,本身精度不高( $\pm 0.1$  K),以及黑体的发射率不够高等等。如果将设备继续改造,以适应科考船环境,那么本黑体可以应用到 ISAR 和 OUCFIRST 等海表测温辐射计进行校准。

本文设计的黑体适用于室内和野外定标。但是由于红外仪器的线性度会随使用场景的工况(气压、温度等)变化而变化,因此野外定标时往往采用多个温度定标。野外定标时可以增加其他相变温度的黑体,或者采用一个镓标准黑体加一个冰水混合物标准黑体来试验。

#### 参考文献

- [1] CZAJA A, FRANKIGNOUL C. Influence of the North Atlantic SST on the atmospheric circulation [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(19): 2969-2972.
- [2] OHRING G, WIELICKI B, SPENCER R, et al. Satellite instrument calibration for measuring global climate change [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86(9): 1303.
- [3] DONLON C, ROBINSON I S, WIMMER W, et al. An infrared sea surface temperature autonomous radiometer (ISAR) for deployment aboard Volunteer Observing Ships (VOS) [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(1): 93-113.
- [4] ZHANG Kailin, GUAN Lei, YANG Minglun, et al. Autonomous infrared radiometer for sea surface skin temperature measurements [C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2018: 5632-5635.
- [5] GRASSL H, HINZPETER H. The cool skin of the ocean [R]. *Gate Report 14 of the World Meteorological Organization*, 1975: 229-236.
- [6] ZHANG Kailin, WANG Xinyu, QU Liqin, et al. The water cycle blackbody device for calibration of sea surface temperature radiometers: China, CN 115219042A [P]. 2022-10-21.  
张凯临,王新瑜,曲利芹,等.用于海表测温辐射计校准的水循环黑体装置:中国,CN 115219042A [P]. 2022-10-21.
- [7] DONLON C, NIGHTINGALE T, FIEDLER L, et al. The calibration and intercalibration of sea-going infrared radiometer systems using a low cost blackbody cavity [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1999, 16(9): 1183-1197.
- [8] CHU B, MCEVOY H C, ANDREWS J W. The NPL reference sources of blackbody radiation [J]. *Measurement Science and Technology*, 1994, 5(1): 12-19.
- [9] THEOCHAROUS E, FOX N P, BARKER-SNOOK I, et al. The 2016 CEOS infrared radiometer comparison: part II: laboratory comparison of radiation thermometers [J]. *American Meteorological Society*, 2019, 36(6): 1079-1092.
- [10] PRESTON THOMAS H. The international temperature scale of 1990 (ITS-90) [J]. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1990, 22(2): 107-110.
- [11] BEST F A, ADLER D P, PETTERSEN C, et al. On-orbit absolute temperature calibration using multiple phase change materials: overview of recent technology advancements [C]. *SPIE*, 2010, 7857: 1-10.
- [12] HANSEN L M, MEKHONTSEV S N, ZENG J, et al. Evaluation of blackbody cavity emissivity in the infrared using total integrated scatter measurements [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2008, 29(1): 352-369.
- [13] BETTS D B, CLARKE F J J, COX L J, et al. Infrared reflection properties of five types of black coating for radiometric detectors [J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1985, 18(8): 689.
- [14] ADIBEKYAN A, KONONOVA E, MONTE C, et al. High-accuracy emissivity data on the coatings Nextel 811-21, Herberts 1534, Aeroglaze Z306 and Acktar Fractal Black [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2017, 38(6): 1-14.
- [15] BICH W, COX M G, DYBKAER R. Revision of the 'guide to the expression of uncertainty in measurement' [J]. *Metrologia*, 2012, 49(6): 702-705.

## Gallium Fixed-point Blackbody Radiation Source for Calibration of Sea Surface Temperature Radiometer

ZHANG Kailin<sup>1</sup>, ZHAO Zhiyuan<sup>1</sup>, REN Chuanyun<sup>1</sup>, YANG Minglun<sup>2</sup>, QU Liqin<sup>1</sup>  
(1 Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)  
(2 Institute of Oceanology of Sanya, Ocean University of China, Sanya 572024, China)

**Abstract:** A gallium fixed-point blackbody infrared radiation source is designed to calibrate the sea surface temperature radiometer. Due to the fact that the sea surface temperature radiometer requires additional regular calibration data before and after deployment to monitor the performance characteristics of the instrument, water bath blackbodies and ammonia heat pipe blackbodies are commonly used internationally for calibration. However, water bath blackbodies are greatly affected by atmospheric pressure, and ammonia heat pipe blackbodies are large in volume and difficult to transport. Therefore, a gallium blackbody is designed for the calibration of sea surface temperature radiometers.

Firstly, the structure and working principle of a gallium fixed-point blackbody radiation source are introduced. The simulation software, which is based on the Monte Carlo algorithm, then simulate the emissivity of STEEP321 blackbodies and conducted experiments to measure the emissivity. The source of emissivity uncertainty is discussed. Experiments on phase transformation reproducibility of gallium under electric heating and water-bath heating are carried out and the effect of electric heating power on phase transformation reproducibility of gallium is discussed. Finally, the measurement experiment of ISAR thermometer radiometer is carried out to verify the blackbody.

The results show that the emissivity is better than 0.998 8, and the emissivity measured by the radiation method is in good agreement with the theoretical simulation results, and the measurement repeatability (standard deviation) reaches 0.1%. The results show that the reproducibility of phase change temperature table is better than  $\pm 0.03$  K. The difference between ISAR and FLUKE 1524 measurements of the temperature near the blackbody cavity is within  $\pm 0.15$  K.

The blackbody is developed successfully and can be used to calibrate the sea surface temperature radiometer after modification, and it can provide calibration sources for the development of sea surface temperature measurement equipment with independent intellectual property rights. The theoretical calculation of emissivity is high, but the actual measurement of emissivity is lower than the theory for the following reasons: the ratio of black body cavity length to opening diameter is not large enough, and the uncertainty in the measurement process of emissivity. The craft used for the fixed-point container is generally to spray polytetrafluoroethylene film on its surface. Thicker polytetrafluoroethylene cylinder and polytetrafluoroethylene sleeve are installed with gallium fixed point, which greatly avoids the pollution caused by direct contact of metal when the sprayed polytetrafluoroethylene film is relatively thin.

**Key words:** Infrared temperature measurement; Blackbody radiation source; Gallium fixed-point; Calibration of shipborne radiometer

**OCIS Codes:** 120.0280; 120.6780; 120.5630