

## 低温辐射计热结构设计与分析

庄新港 刘红博 张鹏举 史学舜 刘长明 刘红元 王恒飞

Design and analysis of thermo-structure for cryogenic radiometer

Zhuang Xin-Gang Liu Hong-Bo Zhang Peng-Ju Shi Xue-Shun Liu Chang-Ming Liu Hong-Yuan Wang Heng-Fei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 060601 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181880

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181880>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 无云情况下L波段微波辐射计快速大气校正方法

A rapid atmospheric correction model for L-band microwave radiometer under the cloudless condition

物理学报. 2015, 72(7): 079501 <https://doi.org/10.7498/aps.64.079501>

#### 平面环形谐振腔微光学陀螺结构设计与优化

Design and optimization of integrated micro optical gyroscope based on a planar ring resonator

物理学报. 2015, 72(10): 107802 <https://doi.org/10.7498/aps.64.107802>

#### 基于超材料的平板二维定向传热结构设计

Design of two-dimensional plate directional heat transmission structure based on meta materials

物理学报. 2015, 72(22): 224401 <https://doi.org/10.7498/aps.64.224401>

#### 基于人工表面等离激元的双通带频率选择结构设计

Design of dual-band-pass frequency selective structure based on spoof surface plasmon polariton

物理学报. 2018, 75(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180696>

#### 低温冷冻靶温度动态特性的数值模拟研究

Numerical simulation of dynamic thermal characteristics of cryogenic target

物理学报. 2017, 74(19): 190702 <https://doi.org/10.7498/aps.66.190702>

## 低温辐射计热结构设计与分析\*

庄新港<sup>1)2)†</sup> 刘红博<sup>1)2)</sup> 张鹏举<sup>1)2)</sup> 史学舜<sup>1)2)</sup>  
刘长明<sup>1)2)</sup> 刘红元<sup>1)2)</sup> 王恒飞<sup>1)2)</sup>

1) (中国电子科技集团公司第四十一研究所, 青岛 266555)

2) (国防科技工业光电子一级计量站, 青岛 266555)

(2018年10月21日收到; 2019年1月7日收到修改稿)

低温辐射计利用低温超导下的电替代测量原理, 将光辐射计量溯源到可以精确测量的电参数测量, 是目前国际上光功率测量的最高基准. 本文实验研究了低温辐射计的热路结构, 系统分析了腔体组件与热链材料的热学特性对低温辐射计响应率和时间常数特性参数影响的机理. 在此基础上, 设计了由黑体腔、热链和支撑结构组成的热结构机械件, 搭建了低温辐射计特性参数测试系统, 并针对 OHFC 铜、6061 铝、304 不锈钢和聚酰亚胺四种不同热链材料测试了低温辐射计的时间常数和响应率, 时间常数跨度为 23—506 s, 响应率跨度为 35.5—714.8 K/W. 结果表明, 在腔体组件确定的情况下, 通过调节热链的材料和结构, 可以实现对低温辐射计特性参数的调控. 实验结果对低温辐射计特性参数指标分配和指导下一代低温辐射计的研制具有一定参考价值.

**关键词:** 低温辐射计, 热结构, 时间常数, 响应率**PACS:** 06.20.-f, 07.60.-j, 42.79.-e**DOI:** 10.7498/aps.68.20181880

## 1 引言

低温辐射计是目前国际上测量光功率的最高基准, 它利用低温超导下的电替代测量原理, 将光辐射计量溯源到可以精确测量的电参数测量, 可以实现对光辐射功率的绝对测量, 测量不确定度达到  $10^{-5}$  量级, 并在“高分探测”、“探月工程”、“军事对抗”等国防军工领域发挥了重要基础性作用<sup>[1-4]</sup>.

自 20 世纪 80 年代初, 英国国家物理研究所<sup>[5]</sup> 和美国国家计量标准实验室 (NIST)<sup>[6,7]</sup> 等国际领先的计量机构就已开展了低温辐射计的研制工作, 并且朝着更低的光功率检测下限和更宽的光谱范围不断发展. 例如, 当前 NIST 研制出的第三代 pW 低温辐射计, 噪声等效功率达到  $6.5 \text{ fW/Hz}^{1/2}$ <sup>[8]</sup>;

法国天体物理与空间研究所于 2009 年研制出一种可探测动态范围在 150—11000 eV 的远紫外到 X 射线波段低温电替代的高精度辐射计<sup>[9]</sup>; 加拿大国家研究院于 2018 年初报道了一种基于激光驱动光源的光谱型低温辐射计, 可同时实现 300—1000 nm 范围内任意波长点下光辐射功率的绝对校准, 测量不确定度达 0.011%<sup>[10]</sup>. 在国内, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所开展了空间太阳光谱辐照度绝对辐射计的研究工作<sup>[11,12]</sup>, 中国科学院高能物理研究所研制出了软 X 射线低温辐射计<sup>[13]</sup>. 另外, 中国计量科学研究院<sup>[14,15]</sup>、中国科学院安徽光学精密机械与物理研究所<sup>[16,17]</sup> 和中国电子科技集团公司第四十一研究所 (中国电科 41 所)<sup>[18,19]</sup> 等少数研究机构从国外引进了不同型号的光学计量用低温辐射计开展紫外到长波红外波段绝对光谱响

\* 国防技术基础 (批准号: JSJL2016210A001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xingangzhuang@163.com

应率校准技术研究. 该类光学计量用低温辐射计至今尚无国产替代产品, 且探测功率在 nW 及以下低温辐射计西方国家对我国禁运. 中国电科 41 所于“十三五”期间在国内率先开展了光学计量用低温辐射计研制工作.

低温辐射计最核心的部分当属其内部热结构, 它利用超低温环境下电加热等效替代光加热的方式实现对光功率的精确测量. 本文首先介绍了低温辐射计的热路结构, 并从导热微分方程出发分析了腔体组件与热链材料的热学特性对低温辐射计响应率和时间常数特性参数影响的内在机理. 在此基础上, 完成了低温辐射计热结构设计, 测试并分析了四种不同热链材料所对应的时间常数和响应率参数, 同时分析了其他影响低温辐射计特性参数的因素.

## 2 低温辐射计热结构模型

### 2.1 低温辐射计热路结构

作为一种热探测器, 低温辐射计同样包含能量吸收体(黑体腔)、测量光电加热后温度变化的温度传感器、提供恒定低温环境的热沉, 以及吸收体与热沉之间的弱热连接(热链), 由于低温辐射计采用光电加热等效替代测量原理, 所以它在热探测器的基础上增加了电加热器, 图 1 所示为低温辐射计的热路示意图. 这里将黑体腔、加热器和温度传感器统称为腔体组件, 腔体组件、热链与支撑热沉共同构成低温辐射计热结构. 热结构决定了低温辐射计的响应率、时间常数等重要参数, 热链又是连接黑

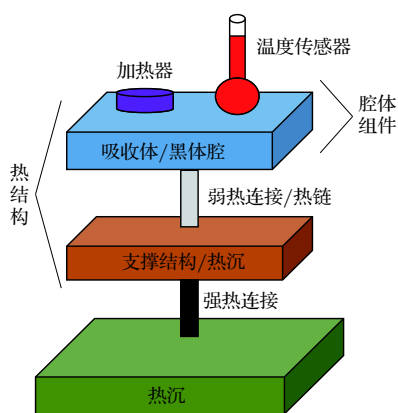


图 1 低温辐射计热路示意图

Fig. 1. Schematic diagram of thermal circuit of cryogenic radiometer.

体腔与热沉并进行热传递的唯一纽带, 是低温辐射计光电加热等效替代的中枢.

### 2.2 热结构导热模型

在直角坐标系下, 热源为  $\Phi$ 、空间分布均匀的物体内部各点温度  $T$  与时间  $t$  的内在联系可由导热微分方程表示为 (1) 式, 它揭示了连续物体内的温度分布与空间坐标和时间的内在联系.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \frac{\Phi}{\rho c}, \quad (1)$$

其中  $t$  为时间;  $\rho$  为物体密度;  $c$  为比热容;  $\Phi$  为单位时间、单位体积中热源生成的热量 (单位为  $\text{W}/\text{m}^3$ );  $a$  为热扩散系数 ( $a = \lambda/\rho c$ ), 用于表征物体内部温度的扯平能力,  $\lambda$  为材料的导热系数.

为简化模型计算复杂度, 考虑到黑体腔材料的导热系数极大, 黑体腔内部热阻与热链热阻相比可以忽略, 黑体腔中温差不大, 温度梯度变化主要体现在热链中, 采用集总参数法可以得到温度响应  $T$  的解<sup>[20]</sup>. 图 2 所示为零维问题传热模型, 表示零维物体 (密度、比热、体积和温度分别为  $\rho, c, v, t_0$ ) 置于恒温  $T_0$  的环境中, 物体与环境之间总热导率为  $K$ . 此时, 可近似认为导热过程中物体内的温度分布与坐标无关, 仅随时间变化, 因此 (1) 式可简化为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\Phi}{\rho c}. \quad (2)$$

零维问题无几何边界, 而在实际模型界面上交换的热量应折算成整个物体的体积热源, 对于低温辐射计热传递模型,  $\Phi$  由两部分构成: 入射光辐射功率  $\Phi_1 V$ , 以及物体与环境之间热传递所消耗的功率  $\Phi_2 V$ , 其中  $V$  为物体的体积. 且有  $\Phi_1 V = P_0$ ,  $\Phi_2 V = K(T - T_0)$ ,  $P_0$  为入射光功率,  $K$  为总热导

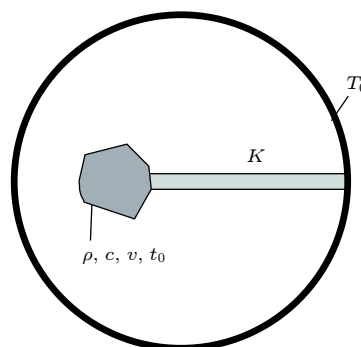


图 2 零维问题传热模型

Fig. 2. Heat-transfer model of zero dimensional problem.

率,  $T$  为物体温度,  $T_0$  为环境温度, 所以有

$$\begin{cases} \Phi_1 = \frac{P_0}{V}, \\ \Phi_2 = \frac{K(T - T_0)}{V}. \end{cases} \quad (3)$$

考虑到  $\Phi_2$  为散热过程, 所以  $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ , 即

$$\Phi = \frac{P_0 - K(T - T_0)}{V}. \quad (4)$$

将 (4) 式代入 (2) 式可以得到

$$C \frac{\partial \Delta T}{\partial t} + K \Delta T = P_0, \quad (5)$$

其中  $C = \rho c V$  为总热容,  $\Delta T = T(t) - T_0$ , 代入初始条件:  $t = 0, \Delta T(0) = 0$ , 可以得到

$$\Delta T(t) = \frac{P_0}{K} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (6)$$

式中  $\tau = C/K$ . 至此, 得到零维物体的时间常数公式和响应度公式为

$$\begin{cases} \tau = \frac{C}{K}, \\ \Delta T_{\max} = \frac{P_0}{K}. \end{cases} \quad (7)$$

$\tau$  为时间常数, 即温度升高到最大恒定值的  $(1 - 1/e)$  所需要的时间, 表征响应速度;  $\Delta T_{\max}$  为  $t$  趋向于无穷大, 物体达到热平衡时的最大温升, 表征响应度. 为了更好地表征低温辐射计加热功率响应灵敏度特性, 引入响应率  $R$  来表征低温辐射计对单位加热功率的温度响应特性, 则  $R = \Delta T_{\max}/P_0$ , 单位为  $K/W$ . 可以看到, 时间常数和响应率两个参数是相互制约的, 在低温辐射计热结构设计过程中要根据实际情况在两者之间进行权衡, 此外还要考虑支撑结构对整个热结构稳定的机械支撑性和良好的热屏蔽作用.

仅仅依靠上述公式进行低温辐射计特征参数设计是远远不够的, 但上述公式能够反映各物理量

与低温辐射计特性参数的定性关系. 在实际设计过程中往往需要通过大量实验测试得到各物理量与响应率和时间常数的定量化约束关系, 进而根据上述特性参数公式对热结构各部件进行调整, 以得到符合预期指标的设计结构.

### 3 热结构设计

#### 3.1 黑体腔设计

黑体腔是整个低温辐射计的核心部件之一, 作为能量吸收体, 黑体腔的设计要满足如下 3 个条件. 1) 高光谱吸收率. 黑体腔吸收率越高, 低温辐射计的光电加热不等效性越小, 另外高吸收率可以避免过多杂散光溢出吸收腔产生额外光加热, 进而减少对低温辐射计测量不确定度的影响. 2) 高热导率. 在腔体结构确定的情况下, 腔体材料的热导率越大, 腔体自身热阻越小, 有利于黑体腔自身快速达到热平衡, 减小腔体自身温度分布梯度差异. 3) 低热容. 腔体热容与其材质和质量有关, 由 (7) 式可知热容越小, 时间常数越小, 完成一次光电等效替代加热的时间越短.

本文采用底面倾角为  $30^\circ$  的斜底黑体腔结构, 这种结构已被证明具有较高的吸收率<sup>[21]</sup>. 腔体采用 OFHC 铜材质, 为了便于腔体和热链之间的配合, 黑体腔采用外反沿设计, 如图 3(a) 所示. 腔体长 75 mm, 外径 10 mm, 腔体壁厚 0.1 mm. 腔体内壁涂有高光谱吸收率低漫反射系数的吸收黑材料, 黑体腔整体质量约 2 g, 在 633 nm 处的吸收率达 0.999995.

#### 3.2 热链设计

热链是黑体腔和低温热沉之间的热传递纽带, 它直接决定了低温辐射计的响应率和时间常数等

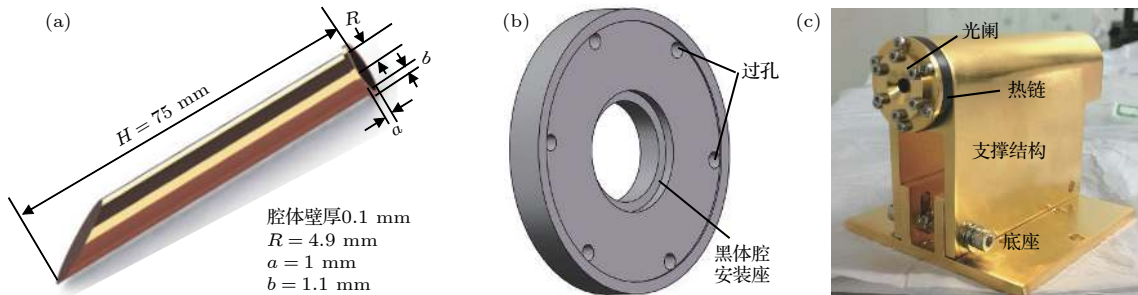


图 3 热结构仿真和实物图 (a) 黑体腔; (b) 热链; (c) 热结构

Fig. 3. Picture of thermal structure: (a) Blackbody cavity; (b) heat link; (c) heat sink.

指标<sup>[22]</sup>. 在热链的设计过程中, 对材质和形状并无统一要求, 对于不同的低温辐射计设计方案, 除了要根据设计指标平衡响应率和时间常数外, 还要保证其具有足够的机械支撑应力和良好的热接触<sup>[23]</sup>, 从而减小因机械制冷机振动带来的影响. 现有研究一般采用 6061 铝、SS304 不锈钢和聚酰亚胺等低导热系数材料作为热链材料, 并使用低温胶或无缝焊接等工艺进行热链与黑体腔之间的连接. 但使用低温胶容易造成接触热阻过大、支撑应力不足的问题, 无缝焊接又使得各零部件之间不可拆卸, 不利于后期维护和部件更换.

本文设计了一种垫片式同心圆环热链结构, 圆环内径由黑体腔外径决定,  $R_1 = 5 \text{ mm}$ , 外径由二级冷屏内部空间决定, 取  $R_2 = 14 \text{ mm}$ , 通过改变热链片的厚度  $L$  和材质, 便可以调节其热阻. 为了便于热结构装配和减小接触热阻, 在原导热结构的基础上进一步设计了黑体腔安装座、6 个螺钉过孔和两侧边缘处凸出的圆环, 见图 3(b). 黑体腔安装座用于和黑体腔配合, 配合处使用低温导热胶进行黏合; 6 个螺钉过孔用于装配过程中防止热量经螺钉直接传递到外部热沉; 两侧边缘处的圆环可避免装配后导热结构两侧面直接与热沉接触, 使热量未充分传输经过整个导热结构便传递到热沉. 研究过程中设计了四种不同材质 (OFHC 铜、6061 铝、SS304 不锈钢和聚酰亚胺) 的热链, 并通过实验测试分析不同热链对低温辐射计特性参数的影响.

### 3.3 支撑结构设计

支撑结构由黑体腔屏蔽罩、强热链接、底座及其他夹持部件构成. 支撑结构的设计目的主要有以下几点: 一是在二级冷屏内进一步对黑体腔起到热屏蔽作用, 减小加热过程中微弱的辐射和对流等因素对黑体腔温度稳定性的影响; 二是作为腔体组件的安装结构, 要便于实现黑体腔与外部待标定光束的同轴调节; 三是作为加持安装部件, 要便于外围孔径光阑、四象限探测器等光学元件的安装和调节.

支撑结构在热力学上可以视为热沉, 本文采用高导热系数的 OFHC 铜材质 ( $RRR > 150$ ) 进行支撑结构设计, 来提高其控温温度稳定性<sup>[24]</sup>. 在进行热结构的装配过程中, 首先将温度传感器和加热器用低温导热胶安装在黑体腔底部, 传感器采用美国 Lake shore 公司生产的 SD 封装硅探测器, 灵敏度为 4 mK, 加热器采用阻值为 1000  $\Omega$  的贴片电阻,

加热器和传感器均通过超导线与外部连接; 然后依次完成腔体结构与热链、热链与支撑结构的装配, 所有机械配合处皆垫有钢片并涂抹低温导热硅脂来减小配合热阻; 最后装配光阑等光学元件, 装配完成后的热结构实物如图 3(c) 所示, 通过调节支撑结构和底座之间的螺丝可实现对黑体腔高度和水平的调节, 以保证与外部通光孔和布儒斯特窗同轴.

## 4 测试与分析

### 4.1 测试装置

低温辐射计的热量流入近似认为只有入射光辐射这单一来源, 且功率恒定, 热量流入值等于流出至热沉的热量, 最终达到热平衡<sup>[25]</sup>. 热结构置于低振动高温度稳定性低温系统中, 低温系统采用两级 KDE415 (1.5 W@4.2 K) GM 制冷机进行制冷. 制冷机的一级冷头与一级冷屏连接, 中部设置有柔性导冷结构, 隔离制冷机振动; 二级冷头与二级冷屏以及热结构等连接, 提供样品降温以及温度保持所需冷量, 同样采用柔性导冷结构进行连接, 隔离制冷机振动. 低温系统整体处于真空状态, 真空度为  $10^{-5} \text{ Pa}$ . 温度稳定性方面除上述被动控制方式外, 还采用 lakeshore 336 高精度温控仪对内部热沉进行主动控温, 最低控温温度可维持在 10 K 左右, 温度稳定性优于 0.2 mK/30 min; 温度均匀性主要和系统漏热、传热距离、传热材料的导热系数有关, 设计过程中除了对高导无氧铜的各级冷屏和热沉进行表面抛光镀金处理外, 还要合理分布控温和制冷点, 本低温系统内部热沉的温度均匀性优于 0.1 mK. 图 4 所示为装配后的低温辐射计实物图和特性参数测试原理图.

### 4.2 测试结果与分析

本次实验目的是测试不同热链对低温辐射计响应率和时间常数特性参数的影响, 因此只进行电加热. 待低温系统内部热结构温度稳定后, 首先利用标准电流源给贴片电阻提供加热电流, 通过调节加热电流使加热电阻片获得 1 mW 的恒定电加热功率输出; 电加热后实时记录低温系统内部各温度传感器的温度变化, 用于后续计算低温辐射计的响应率和时间常数. 各温度传感器利用 lakeshore 372 交流电阻桥进行控制和温度读取, 全部加热和

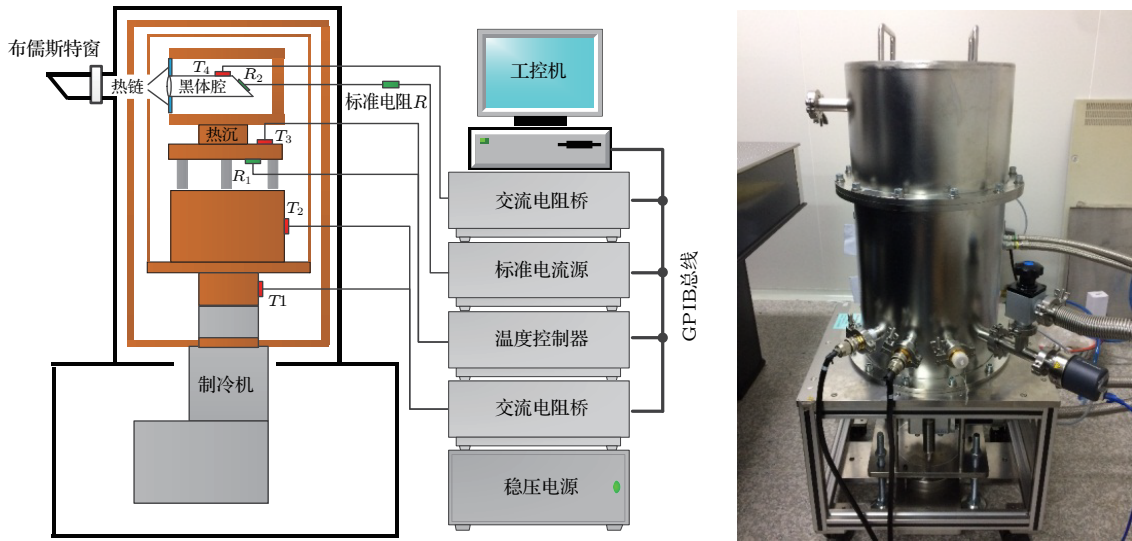


图 4 低温辐射计实物与特性参数测试原理图

Fig. 4. Picture of cryogenic radiometer and schematic for characteristic parameters test.

温度传感数据均经 GPIB 总线传输至工控机上的 LabVIEW 软件进行数据显示、换算和分析。

图 5 所示为 1 mW 电加热条件下四种不同材料的热链对应的低温辐射计响应曲线, 热链材料以及对应低温辐射计的黑体腔温度变化情况、时间常数、响应率等参数同时整理在表 1 中。可以看出, 随着热链材料导热系数的不断变化, 低温辐射计的响应率和时间常数两个参数发生了显著变化, 变化

趋势与 (7) 式一致, 响应率与时间常数成正比, 说明在其他条件不变的情况下要想提高低温辐射计的响应率, 只能牺牲时间常数。本组实验中, 四种不同材料的热链对应的低温辐射计时间常数跨度为 23—506 s, 响应率跨度为 35.5—714.8 K/W。实验结果为后期低温辐射计定型提供了很好的数据参考, 一方面可依据待测光功率大小确定低温辐射计响应率, 进一步选择并设计合适材料的热链, 在

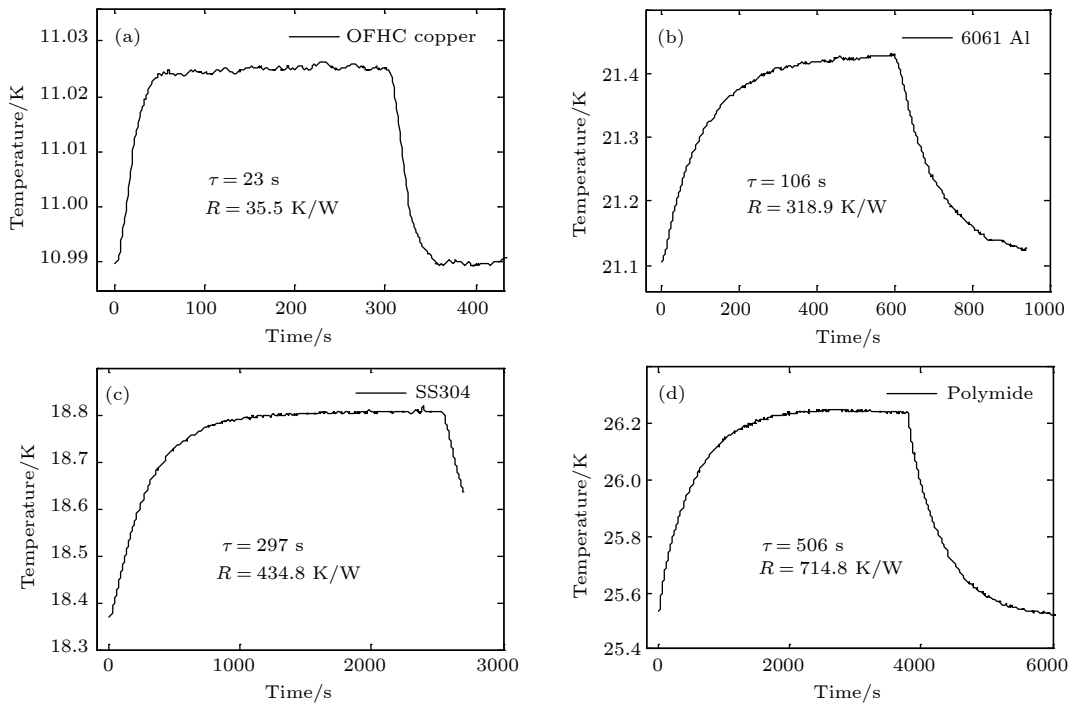


图 5 不同热链对应的低温辐射计响应曲线 (a) OFHC 铜; (b) 6061 铝; (c) SS304 不锈钢; (d) 聚酰亚胺

Fig. 5. Response curve of cryogenic radiometer with different heat links: (a) OFHC copper; (b) 6061 Al; (c) SS304; (d) polyimide.

表 1 不同热链对应的低温辐射计特性参数

Table 1. Characteristic parameters of cryogenic radiometer corresponding to different heat links.

热链材料	$T_0/K$	$T/K$	$\tau/s$	$R/K \cdot W^{-1}$
OFHC铜	10.9897	11.0252	23	35.5
6061铝	21.1046	21.4235	106	318.9
304不锈钢	18.3688	18.8036	297	434.8
聚酰亚胺	25.5322	26.247	506	714.8

满足测试指标的同时最大限度地缩短测试时间;另一方面可以设计对应不同梯度响应度的可替换热链,拓展低温辐射计的动态范围.

同时需要注意的是,低温辐射计特性参数除了与热链材料有关外,还受热链结构、黑体腔自身热阻、涂黑材料、导线漏热、辐射漏热及各元件之间的接触热阻影响.此外,采用不同的热链可能会导致整体热结构的工作温度存在差异,使得各低温材料的导热系数和热容发生变化,进而也会导致低温辐射计特性参数的变化.这些影响因素是不容忽视的,其影响力有时甚至会超过热链自身.

## 5 结 论

绝对低温辐射计作为光辐射功率计量基准,结构复杂、技术难度大,涉及到低温超导、真空、传热学与光学等多个学科.本文从低温辐射计核心热结构的理论模型出发,分析并构建出其内部热路结构和传热模型,在此基础上成功设计加工出基于四种不同热链材料的完整热结构样件,完成低温辐射计整机测试系统搭建,系统分析了不同热链材料对低温辐射计响应率和时间常数的影响,其中时间常数跨度为23—506 s,响应率跨度为35.5—714.8 K/W.研究结果在指导低温辐射计指标分配和研制下一代绝对低温辐射计方面具有重要参考价值.响应率和时间常数是一对相互制约的参量,温度稳定性又是低温辐射计热结构设计过程中的重要指标,在提高响应率的同时势必会增加测量时间,这不仅会造成过多的资源和时间消耗,过长的测试时间还会影响温度控制稳定性,限制了测量精度.

## 参考文献

- [1] Hoyt C C, Foukal P V 1991 *Metrologia* **28** 163  
 [2] Houston J M, Cromer C L, Hardis J E, Larason T C 1993

*Metrologia* **30** 285

- [3] Pang W W, Zheng X B, Li J J, Shi X S 2014 *J. Atmosph. Environ. Opt.* **9** 138 (in Chinese) [庞伟伟, 郑小兵, 李健军, 史学舜 2014 *大气与环境光学学报* **9** 138]  
 [4] Liu C M, Shi X H, Chen H D, Liu Y L, Zhao K, Ying C P, Chen K F, Li L G 2016 *Acta Phot. Sin.* **45** 0912002  
 [5] Goebel R, Pello R, Köhler R, Haycocks P, Fox N 1996 *Metrologia* **33** 177  
 [6] Carter A C, Lorentz S R, Jung T M, Datla R U 2005 *Appl. Opt.* **44** 871  
 [7] Houston J M, Rice J P 2006 *Metrologia* **43** S31  
 [8] Carr S M, Woods S I, Jung T M, Carter A C, Datla R U 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 075105  
 [9] Troussel P, Coron N 2010 *Nucl. Instrum. Meth. A* **614** 260  
 [10] Gamouras A, Todd A D W, Côté É, Rowell N L 2018 *J. Phys. Conf. Ser.* **972** 012014  
 [11] Yi X, Fang W, Luo Y, Xia Z, Wang Y 2016 *IET Sci. Meas. Technol.* **10** 564  
 [12] Tang X, Fang W, Wang Y P, Yang D J, Yi X L 2017 *Optoelectron. Lett.* **13** 179  
 [13] Zhao X, Zhao Y, Tang K, Zhao Y, Li F, Zheng L 2018 *Rad. Dete. Technol. Meth.* **2** 32  
 [14] Xu N, Lin Y, Gan H, Li J 2016 *Proc. SPIE* **10155** 1015513  
 [15] Lin Y D, Lv L, Bai S 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 1212005 (in Chinese) [林延东, 吕亮, 白山 2011 *光学学报* **31** 1212005]  
 [16] Li J J, Zheng X B, Lu Y J, Xie P, Zou P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6273 (in Chinese) [李健军, 郑小兵, 卢云君, 张伟, 谢萍, 邹鹏 2009 *物理学报* **58** 6273]  
 [17] Pang W W, Zheng X B, Li J J, Shi X S, Wu H Y, Xia M P, Gao D Y, Shi J M, Qi T, Kang Q 2015 *Chin. Opt. Lett.* **13** 051201  
 [18] Liu C M, Shi X S, Liu Y L, Zhao K, Chen H D, Liu H B 2015 *J. Optoelectron. Laser* **26** 667 (in Chinese) [刘长明, 史学舜, 刘玉龙, 赵坤, 陈海东, 刘红博 2015 *光电子·激光* **26** 667]  
 [19] Shi X, Liu C, Liu Y, Yang L, Zhao K, Chen H 2015 *Proc. SPIE* **9449** 94490U  
 [20] Yang S M, Tao W Q 2006 *Heat Transfer* (Beijing: Higher Education Press) p117 (in Chinese) [杨世铭, 陶文铨 2006 *传热学* (北京: 高等教育出版社) 第117页]  
 [21] Prokhorov A V, Hanssen L M 2004 *Metrologia* **41** 421  
 [22] Carr S M, Woods S I, Jung T M, Carter A C, Datla R U 2009 *Proc. SPIE* **7298** 72983Y  
 [23] Zhang X D, Ouyang Z Y 2008 *Cryogenics and Superconductivity* **36** 9 (in Chinese) [张绪德, 欧阳峥嵘 2008 *低温与超导* **36** 9]  
 [24] Gentile T R, Houston J M, Hardis J E, Cromer C L, Parr A C 1996 *Appl. Opt.* **35** 1056  
 [25] Pearson D A, Zhang Z M 1999 *Cryogenics* **39** 299

# Design and analysis of thermo-structure for cryogenic radiometer\*

Zhuang Xin-Gang<sup>1)2)†</sup> Liu Hong-Bo<sup>1)2)</sup> Zhang Peng-Ju<sup>1)2)</sup> Shi Xue-Shun<sup>1)2)</sup>

Liu Chang-Ming<sup>1)2)</sup> Liu Hong-Yuan<sup>1)2)</sup> Wang Heng-Fei<sup>1)2)</sup>

1) (*The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China*)

2) (*National Opto-Electronic Primary Metrology Laboratory, Qingdao 266555, China*)

( Received 21 October 2018; revised manuscript received 7 January 2019 )

## Abstract

Absolute cryogenic radiometer is built based on a new theory of electrical-substitution measurement, which is for measuring the radiant power by using the equivalent electrical power and has recently served as a primary standard for radiant power measurements. This study aims to design and implement a cryogenic radiometers to measure the optical power in a range from 0.1  $\mu\text{W}$  to 2 mW, which can substitute for the imported products. Intensive experiments are performed to study the thermal circuit of cryogenic radiometer, and systematically analyze the influences of cavity assembly and heat link materials on the responsivity and thermal time constant of cryogenic radiometer. On this basis, the thermo-structure mechanical parts are developed, which are comprised of a blackbody cavity, heat link and heat sink. Both the heat sink and the blackbody cavity are made of OFHC copper that is plated with gold. All surfaces are highly polished and reflective to reduce any radiative effects. The absorptance of the cavity can reach up to 0.999995 at 633 nm. And then, a characteristic parameters' test system of cryogenic radiometer is built. Through optimizing the temperature control system and improving the design of the heat sink, the standard deviation of the heat sink can be kept under 0.2 mK for 30 min. By using that test system, the responsivity and thermal time constant of cryogenic radiometer with four different kinds of heat link materials (OHFC copper, 6061 Al, SS304 stainless steel, and polyimide) are tested experimentally. The experimental results show that the responsivity and thermal time constant are 35.5 K/W and 23 s for OHFC copper, 318.9 K/W and 106 s for 6061 Al, 434.8 K/W and 297 s for SS304 stainless steel, 714.8 K/W and 506 s for polyimide. As the thermal conductivity of heat link material changes, the two parameters of responsivity and thermal time constant will simultaneously change significantly. The responsivity and thermal time constant are a pair of mutually constrained parameters, and temperature stability is an important parameter for designing the thermo-structure. After increasing the responsivity, it will not only significantly increase the measurement time and resource consumption, but also affect the temperature control stability, and hence limiting the measurement accuracy. All the test data indicate that the characteristic parameter of cryogenic radiometer can be adjusted by changing the material and structure of heat link. The obtained results will have a certain reference value for the index distribution of cryogenic radiometer characteristic parameters and designing the next generation of absolute cryogenic radiometers.

**Keywords:** cryogenic radiometer, thermo-structure, thermal time constant, responsivity

**PACS:** 06.20.-f, 07.60.-j, 42.79.-e

**DOI:** 10.7498/aps.68.20181880

\* Project supported by the National Defense Science and Technology Foundation, China (Grant No. JSJL2016210A001).

† Corresponding author. E-mail: [xingangzhuang@163.com](mailto:xingangzhuang@163.com)