1. 实验目的

金属凝固点黑体作为基准黑体，对作为计量标准的可变温黑体进行固定温度点的辐射温度和辐射亮度的校准，验证金属凝固点黑体作为基准黑体的性能和计量标准黑体之间的溯源关系，评定计量标准的辐射温度和辐射亮度的不确定度，满足计量检定系统表的要求。

实验地点及时间

实验地点：中国计量科学研究院13号楼（光学楼）119房间。

实验时间：2023年09月12日

环境条件

温度：（24±1）℃ 相对湿度：35% 暗室

1. 实验报告

2.1 测量原理

黑体辐射源的全辐射出射度Mb为：

 （2.1）

式中：*Tb*—— 黑体有效辐射面的绝对温度，K；

*ε*—— 黑体辐射源的有效发射率；

σ—— 斯忒藩-玻尔兹曼常数，σ=5.670 32×10-8 W•m-2•K-4

黑体的全辐射亮度为：

 （2.2）

待测黑体辐射源的全辐射亮度为：

 （2.3）

式中：*Vs*，*Vb*—— 分别为红外辐射计对准待测黑体和标准黑体时的响应。

待测黑体的有效发射率εs按下式计算：

 （2.4）

式中：*Ls*、*Ms*、*Tsr*—— 分别为待测黑体的全辐射亮度、全辐射出射度和全辐射温度；

*Lb*、*Mb*、*Tb*—— 分别为与待测黑体温度相同的绝对黑体的全辐射亮度、全辐射出射度和绝对温度。

待测辐射源的全辐射出射度(全辐射亮度)与某绝对黑体相同时，此时绝对黑体的温度即待测辐射源的全辐射温度*Tsr*。

通过红外辐射计分别测量标准黑体和待测黑体或黑体辐射源的红外响应值，此红外响应值正比于标准黑体或待测黑体的全辐射亮度*Lb*或*Ls*。

通过铂电阻温度计测得标准黑体的电阻值*Rb*，根据式（1）到式（4）利用相应程序，计算得出对应的标准黑体绝对温度*Tb*、和全辐射亮度*Lb*，进而得出待测黑体或黑体辐射源*Rs*对应的待测黑体全辐射温度Tsr、全辐射亮度Ls，最终得出待测黑体或辐射源的有效发射率*εs*。

2.2 测量装置

测量装置示意图如图2.1所示。

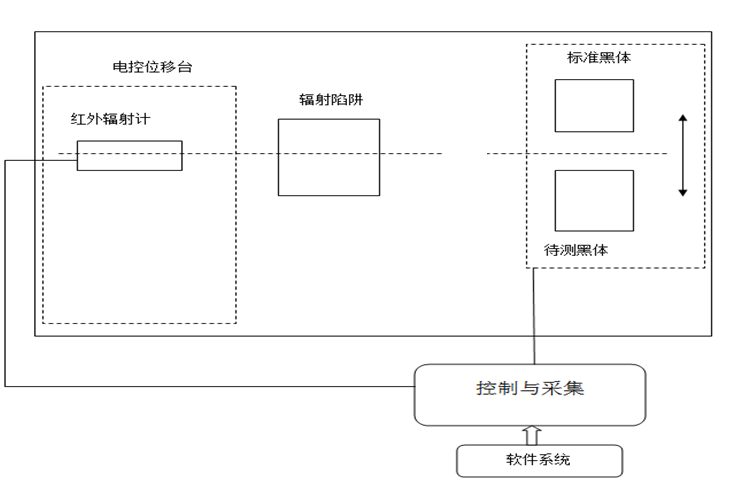
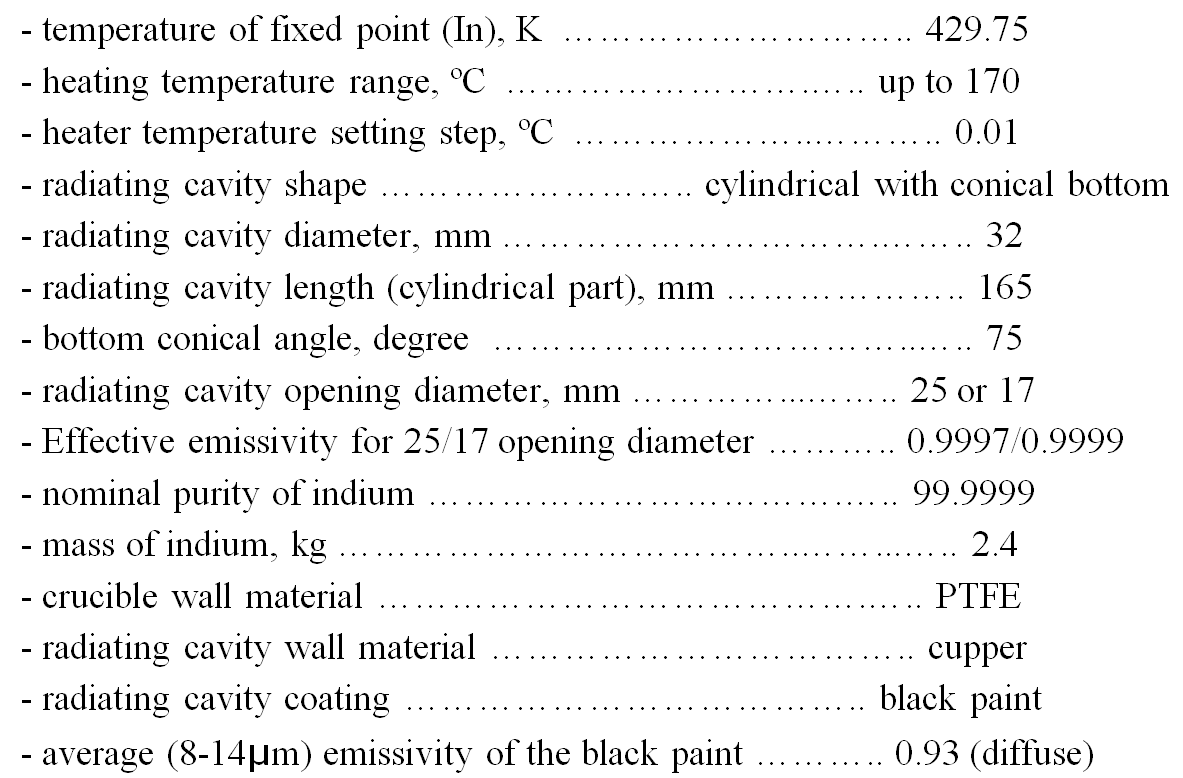


图2.1 常温黑体标准装置示意图

2.2.1 In固定温度点黑体

采用固定温度点黑体作为标准黑体。基本参数如下所示：

In固定温度点黑体技术参数：



结构示意图如图2.2所示：

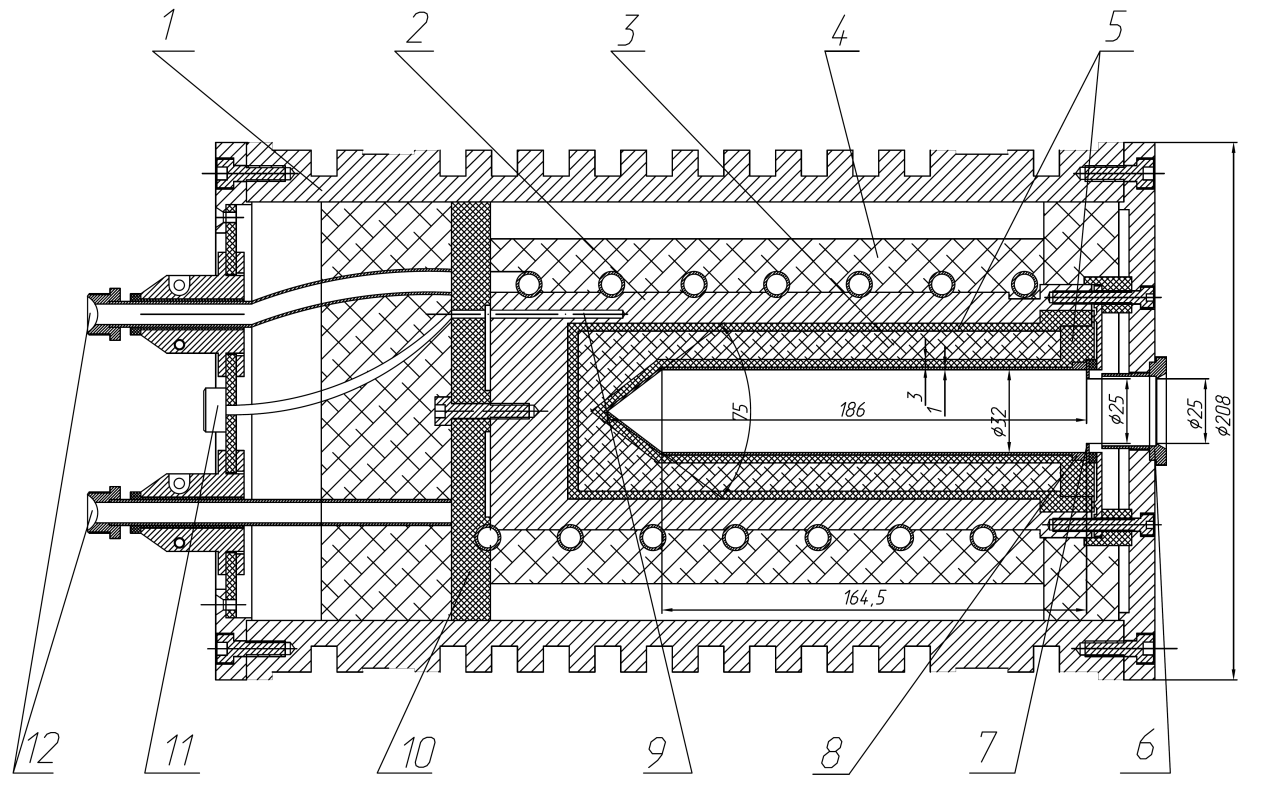


图2.2 Cross-section of the blackbody radiator

2.2.2 In固定温度点黑体温度坪曲线的测量

1、设定黑体温度为150°C，黑体加热温控系统开始加热热传导油，通过油泵和管道与黑体的加热系统相连接。经过30分钟，温度会稳定在142°C左右。

2、设定黑体温度为166°C，继续加热，黑体温度会继续上升。经过15分钟，会进入In的熔点期，熔点平台持续大概30分钟。

3、继续加热，直到温度达到最高点，这一过程需要40分钟。

4、设定温度为150°C，黑体温度开始下降，经过15分钟，黑体温度进入In的凝固点平台，In的凝固点温度156.5985°C。

图2.3是黑体温度坪曲线：

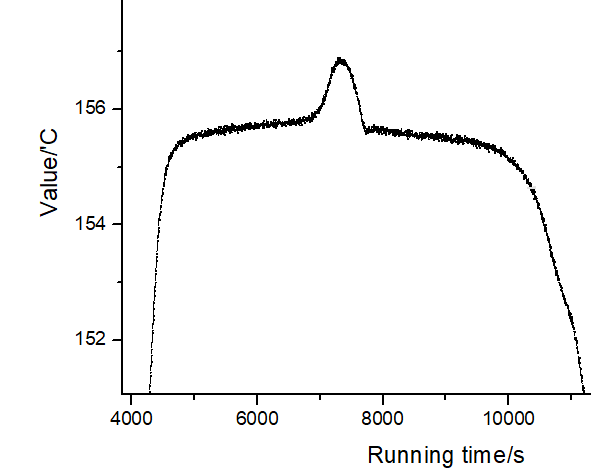


图2.3 In固定温度点黑体辐射温度坪曲线

2.3 辐射温度计

辐射温度计采用德国HEITRONICS公司的KT19型号的辐射温度计，可更换两种滤光片，探测器波长范围(3 μm ~ 5 μm)和(8 μm ~ 20 μm)。温度范围0 °C ~ 1000 °C。测量精度±0.5℃+ 0.7%。光学视场(8 μm ~ 20 μm): 23.4mm@1258mm。

2.3.1 辐射温度计测量重复性

利用In固定温度点黑体，进行辐射温度计的重复性测量。加热固定温度点黑体，使得黑体加热进入凝固点平台期。选择平台期中间最平坦的20分钟作为固定温度点黑体的工作区间。进行10次测量，测量结果如表1所示：

表2-1 重复性测量

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测试次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 辐射温度/**℃** | 155.54 | 155.56 | 155.52 | 155.60 | 155.57 | 155.54 | 155.55 | 155.50 | 155.50 | 155.48 |
| 平均值/**℃** | 155.54 | | | | | | | | | |
| 实验标准差/**℃** |  | | | | | | | | | |

2.3.2 辐射温度计的稳定性

利用In固定温度点黑体，进行辐射温度计的稳定性测量。加热固定温度点黑体，使得黑体加热进入凝固点平台期。选择平台期中间最平坦的10分钟作为固定温度点黑体的工作区间。每隔一分钟测量一次，进行10次测量，测量结果如表2所示：

表2-2 稳定性测量

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测试次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 辐射温度/**℃** | 155.56 | 155.56 | 155.56 | 155.57 | 155.55 | 155.53 | 155.55 | 155.52 | 155.52 | 155.51 |
| 稳定性/**℃** |  | | | | | | | | | |

2.3.3 被测黑体辐射温度的测量

根据公式计算被校准黑体辐射源的辐射温度：

 （2.5）

式中：

Tc——被校准黑体的辐射温度；

Ts——标准黑体的辐射温度；

Tsr——辐射温度计测量标准黑体辐射温度示值；

Tcr——辐射温度计测量被测黑体辐射温度示值；

△Tr——Tcr与Tsr的差值。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 黑体温度/**℃** | 辐射温度/**℃** | 平均值/**℃** |
| In固定温度点黑体 | 156.60 | 155.22 | 155.22 |
| 155.22 |
| 155.23 |
| 待测黑体 | 156.00 | 152.63 | 152.64 |
| 152.64 |
| 152.65 |

校准结果：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 设定温度/**℃** | 辐射温度/**℃** |
| 待测黑体 | 156.00 | 154.02 |

2.3.4辐射温度测量的不确定度评定

测量的数学模型由公式2.5确定。

不确定度来源：

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **不确定度来源** | **分项符号** | **不确定度种类** |
| 1 | 由红外辐射温度计重复性 | u1 (t) | A |
| 2 | 由红外辐射温度计稳定性 | u2 (t) | A |
| 3 | 由黑体辐射源发射率偏离 | u3 (t) | B |
| 4 | In金属凝固点 | u4 (t) | B |
| 5 | 辐射温度计线性校准方法 | u5 (t) | B |
| 6 | 红外辐射温度计的装调 | u6 (t) | B |
| 7 | 环境杂散辐射 | u7 (t) | B |
| 8 | 源尺寸效应 | u8 (t) | B |

In固定温度点黑体发射率为0.9997，在156.6℃温度下引入的不确定度为0.01℃。

In的凝固点为156.5985℃，由纯度和实际坪曲线温度特性引入的不确定度为0.10℃.

辐射温度计采用直接差值的方法进行校准，由于非线性引入的不确定度为0.10℃。

红外辐射温度计在装调中的误差引起的不确定度，0.06℃。

环境杂散辐射引起的不确定度，预估为0.10℃。

测量系统源尺寸效应引起的不确定度，0.10℃。

以上各项均不相关，合成标准不确定度：

扩展不确定度：

U=2×uc=0.44℃ *k*=2

2.4 辐射亮度计

辐射亮度计采用法国HGH公司的RAD314红外辐射计。仪器采用反射式成像结构，视场角8 mrad；内有两个液氮致冷型号的探测器，分别是InSb（波长响应范围2.00 μm-5.50 μm）和MCT（波长响应范围5.50 μm-14.00 μm）；内带有自校准环境温度黑体，用以校准背景温度对辐射源的测量影响。辐射计的结构示意图如图2.4所示：

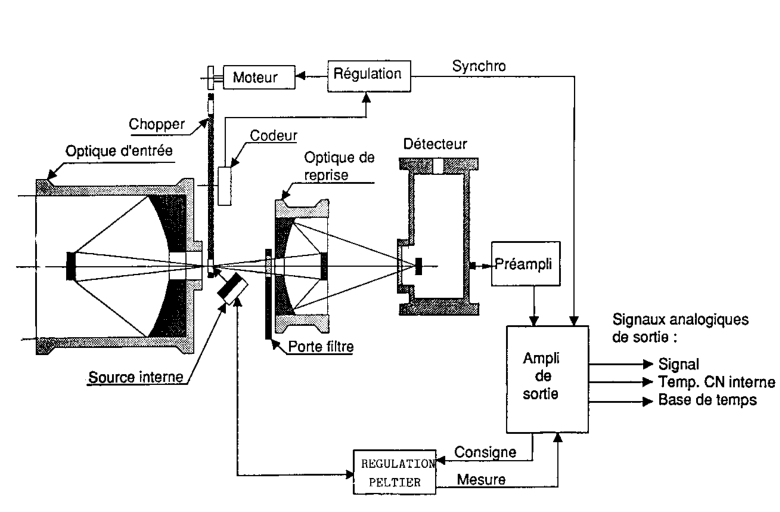


图2.4 RAD314结构示意图

调节内部校准黑体的温度，使得其与背景温度一致，这时辐射计内部探测器产生的电信号有如下公式表示：

(2.6)

其中，V为探测器产生的电信号，k为探测器响应系数，FS为辐射源在探测器上的辐射通量，Fbs是由背景辐射叠加在辐射源上的辐射通量，在进行黑体测量时，Fbs可看作是0。则进行黑体测量时，有：

辐射通量： (2.7)

辐射亮度： (2.8)

其中：Sp是入瞳大小；Φ是被测辐射源的大小；d是物距。

2.4.1 辐射亮度计测量重复性

利用In固定温度点黑体，进行辐射亮度计的重复性测量。加热固定温度点黑体，使得黑体加热进入凝固点平台期。选择平台期中间最平坦的20分钟作为固定温度点黑体的工作区间。进行10次测量，测量结果如表2-3和表2-4所示：

表2-3 探测器1（2-5.5）μm

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测试次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 辐射计读数 | 539.83 | 540.36 | 540.71 | 540.36 | 539.83 | 539.30 | 538.06 | 537.18 | 537.36 | 536.65 |
| 平均值 | 538.96 | | | | | | | | | |
| 实验标准差 |  | | | | | | | | | |
| 相对实验标准差 | 1.51/538.96=0.3% | | | | | | | | | |

表2-4 探测器2（5.5-14）μm

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测试次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 辐射计读数 | 571.09 | 571.38 | 571.09 | 571.09 | 571.09 | 571.67 | 571.38 | 571.38 | 571.67 | 570.81 |
| 平均值 | 571.27 | | | | | | | | | |
| 实验标准差 |  | | | | | | | | | |
| 相对实验标准差 | 0.28/571.27=0.1% | | | | | | | | | |

2.4.2 辐射亮度计的稳定性

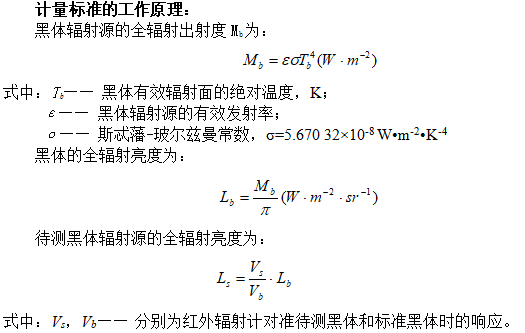
利用In固定温度点黑体，进行辐射亮度计的稳定性测量。加热固定温度点黑体，使得黑体加热进入凝固点平台期。选择平台期中间最平坦的10分钟作为固定温度点黑体的工作区间。每隔一分钟测量一次，进行10次测量，测量结果如表2-5和表2-6所示：

表2-5 探测器1（2-5.5）μm

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测试次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 辐射计读数 | 538.06 | 537.00 | 537.36 | 536.29 | 537.71 | 537.89 | 538.24 | 538.42 | 539.48 | 537.71 |
| 平均值 | 537.82 | | | | | | | | | |
| 稳定性 |  | | | | | | | | | |
| 相对稳定性 | 3.19/537.82=0.1% | | | | | | | | | |

表2-6 探测器2（5.5-14）μm

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测试次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 辐射计读数 | 571.95 | 571.38 | 571.24 | 570.81 | 571.38 | 571.67 | 571.09 | 570.81 | 569.35 | 570.81 |
| 平均值 | 571.05 | | | | | | | | | |
| 稳定性 |  | | | | | | | | | |
| 相对稳定性 | 2.60/571.05=0.1% | | | | | | | | | |

2.4.3 被测黑体辐射亮度的测量

（2.11）

（2.10）

（2.9）

表2-7探测器1（2-5.5）μm

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 黑体温度/**℃** | 辐射计读数 | 平均值 |
| In固定温度点黑体 | 156.60 | 539.83 | 540.30 |
| 540.36 |
| 540.71 |
| 待测黑体 | 159.6 | 475.56 | 475.91 |
| 476.09 |
| 476.27 |
|  | | |  |

表2-8探测器2（5.5-14）μm

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 黑体温度/**℃** | 辐射计读数 | 平均值 |
| In固定温度点黑体 | 156.60 | 571.95 | 571.52 |
| 571.38 |
| 571.24 |
| 待测黑体 | 159.6 | 609.62 | 609.43 |
| 609.19 |
| 608.48 |
|  | | |  |

2.4.4辐射亮度测量的不确定度评定

测量的数学模型由公式2.11确定。

不确定度来源：

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **不确定度来源** | **分项符号** | **不确定度种类** |
| 1 | 由红外辐射计重复性 | u1 (t) | A |
| 2 | 由红外辐射计稳定性 | u2 (t) | A |
| 3 | 由黑体辐射源发射率偏离 | u3 (t) | B |
| 4 | In金属凝固点 | u4 (t) | B |
| 5 | 辐射计线性校准方法 | u5 (t) | B |
| 6 | 红外辐射温度计的装调 | u6 (t) | B |
| 7 | 环境杂散辐射 | u7 (t) | B |
| 8 | 源尺寸效应 | u8 (t) | B |

In固定温度点黑体发射率为0.9997，在156.6℃温度下引入的相对不确定度为0.1%。

In的凝固点为156.5985℃，由纯度和实际坪曲线温度特性引入的相对不确定度为0.1%。

辐射计采用直接差值的方法进行校准，由于非线性引入的相对不确定度为0.1%。

红外辐射计装调的误差，产生的不确定度0.05%。

环境杂散辐射产生的不确定度，0.1%。

测量系统源尺寸效应引起的不确定度，0.1%。

以上各项均不相关，合成相对标准不确定度：

扩展不确定度：

U=2×uc=0.78% *k*=2