

黑体的太赫兹辐射特性与测试方法

李宏光 杨鸿儒 袁良

(西安应用光学研究所国防科技工业光学一级计量站, 陕西 西安 710065)

摘要 黑体的温度越高,太赫兹波段辐射量越大,测试信噪比越高,但红外辐射量增大的幅度远大于太赫兹辐射量,难以滤除,滤除效果不好则会降低黑体太赫兹辐射测试的准确度。为了准确测试黑体的太赫兹辐射量,选择了合适温度范围的黑体,设计了其太赫兹辐射量测试方法。首先,根据普朗克公式计算温度范围在3~600 K的黑体在太赫兹宽波段和红外波段的辐射出射度以及在不同太赫兹窄带波段的辐射出射度,分析了相对变化趋势;其次,提出了黑体太赫兹辐射锁相探测方法,选择的太赫兹黑体温度范围为223~273 K。实验结果显示,在此温度范围内,黑体在100~3000 μm 波段的太赫兹相对辐射量与实测相对值的误差范围为0.1%~2.0%,且曲线变化趋势一致,说明该方法能够实现黑体太赫兹宽波段辐射量测试。

关键词 测量; 物理光学; 黑体辐射计算; 太赫兹辐射测试; 红外滤除

中图分类号 O439; TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.071202

Terahertz Radiation Characteristics of Blackbody and Test Method

Li Hongguang Yang Hongru Yuan Liang

(Optical Metrology Laboratory, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract The higher the temperature of a blackbody, and the greater the amount of radiation of the terahertz band, the higher the test signal-to-noise ratio, but at the same time the increase of the amount of infrared radiation is far greater than that of terahertz radiation. The infrared radiation is difficult to filter and the blackbody terahertz radiation test accuracy is reduced. To improve the test accuracy, a suitable temperature range is chosen for the blackbody and the test method is designed for its terahertz radiation. Firstly, the distribution of spectral radiant emittance in the terahertz and infrared wave bands is calculated by Planck's law for the blackbody at temperatures between 3~600 K. The radiation difference of blackbodies in this two wave bands is analyzed. Then the relative changes of radiation at different terahertz narrow band wavelengths for blackbody at the same temperature are analyzed. The phase-locking test method for blackbody in terahertz band is put forward, with the suitable blackbody temperature range of 223~273 K. The experimental results show that the terahertz test relative deviation is 0.1%~2.0%. The terahertz test curve is consistent with the related theoretical curve for blackbody in 100~3000 μm at this temperature range.

Key words measurement; physical optics; blackbody radiation calculation; terahertz radiation test; infrared filter

OCIS codes 120.4800; 040.2235; 350.5610

1 引言

太赫兹辐射是指频率在0.1~10 THz,即30~3000 μm 波段的电磁辐射。理论上,自然界任何物体由于分子振动都会发出太赫兹辐射,温度为3~100 K的低温黑体辐射峰值波长在太赫兹波段。太赫兹辐射源

收稿日期: 2013-02-28; **收到修改稿日期**: 2013-04-11; **网络出版日期**: 2013-06-04

基金项目: 西安应用光学研究所科技创新基金(Y09222-3)

作者简介: 李宏光(1981—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事太赫兹辐射和微弱光辐射探测及计量技术等方面的研究。E-mail: optics_lihg@126.com

导师简介: 杨鸿儒(1962—),男,博士,教授,主要从事激光探测及太赫兹探测等方面的研究。

E-mail: ehryang@126.com

的研制日益成为国内外研究的热点^[1-4],太赫兹黑体可作为标准太赫兹辐射源,为太赫兹气体激光器等太赫兹源提供量值溯源^[5-7]。黑体太赫兹辐射的准确测试成为制约各种太赫兹源准确校准和计量的基础。德国物理技术研究院(PTB)开展了太赫兹辐射研究,2009年使用太赫兹黑体作为标准辐射源研制了太赫兹源测量系统^[7]。同时国内外开展了采用热释电阵列探测器、测辐射热计等热探测器进行太赫兹成像的研究^[8-10]。黑体的太赫兹辐射特性是研究物体太赫兹辐射成像探测的理论基础。因此本文研究黑体的太赫兹辐射测试问题。

在黑体太赫兹辐射测试中,黑体的温度越高,太赫兹波段辐射量越大,测试信噪比越高;但是同时红外辐射量增大的幅度远大于太赫兹辐射量,对太赫兹信号探测形成了巨大的干扰。如果黑体温度过高,红外辐射量比太赫兹辐射量高几个数量级,使用光谱滤光片很难滤除,滤除效果不好则会降低黑体太赫兹辐射测试的准确度^[11]。因此,为了准确测试黑体的太赫兹辐射,既要保证太赫兹探测信噪比,又要在测试时有效地抑制红外辐射,需要对黑体的太赫兹辐射和红外辐射特性进行分析比较,选择合适的温度范围。本文根据普朗克公式计算了黑体在太赫兹波段及红外波段的辐射出射度,分析了在相同温度下二者的相对变化趋势;计算了特定温度范围黑体在不同太赫兹波段的辐射出射度差异。进而提出了黑体太赫兹锁相测试方法,使得测试时能有效抑制红外辐射,并兼顾太赫兹探测信噪比。

2 黑体太赫兹波段和红外波段的光谱辐射出射度计算与对比

黑体的光谱辐射出射度是黑体辐射量的基础参数,由于在测试黑体太赫兹辐射时其红外辐射产生了很大干扰,需要计算并对比低温黑体在太赫兹波段和红外波段的光谱辐射出射度。

2.1 低温黑体在太赫兹波段的光谱辐射出射度计算

黑体的光谱辐射出射度由普朗克公式来计算:

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (1)$$

式中 $h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $c = 2.997925 \times 10^8 \text{ m/s}$, $k = 1.38054 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。太赫兹波段为 $30 \sim 3000 \mu\text{m}$,计算时 $\lambda_1 = 30 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 3000 \mu\text{m}$;根据太赫兹探测器的响应波段,计算时红外波段取 $2 \sim 30 \mu\text{m}$,计算时 $\lambda_1 = 2 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 30 \mu\text{m}$ 。

温度为 15、25 和 30 K 的黑体在 $30 \sim 500 \mu\text{m}$ 波段的光谱辐射出射度如图 1 所示。温度为 50、77 和 100 K 的黑体在 $30 \sim 300 \mu\text{m}$ 波段的光谱辐射出射度如图 2 所示。不同温度处的黑体在峰值波长处光谱出射度如表 1 所示。

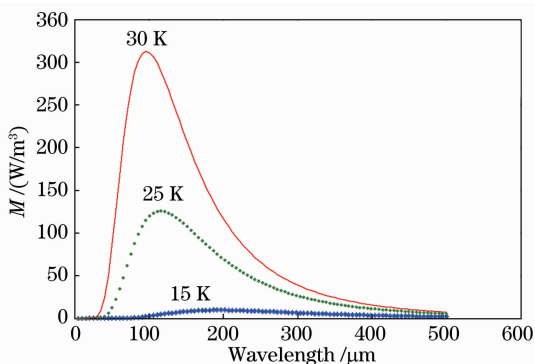


图 1 15~30 K 黑体的光谱辐射出射度曲线

Fig. 1 15~30 K blackbody spectral radiant emittance curves

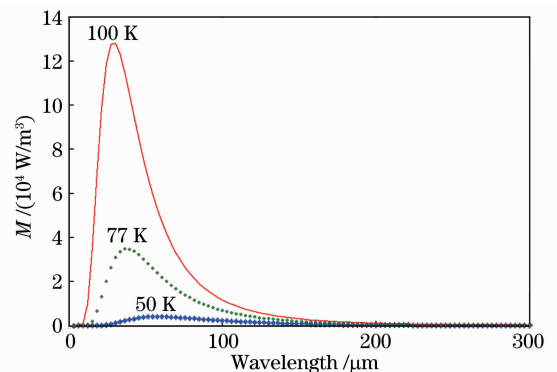


图 2 50~100 K 黑体的光谱辐射出射度曲线

Fig. 2 50~100K blackbody spectral radiant emittance curves

经分析可得:1)黑体的温度越高,峰值波长越小,太赫兹光谱辐射出射度越高。2)温度范围为 $3 \sim 100 \text{ K}$ 的低温黑体辐射的峰值波长在太赫兹波段 $30 \sim 3000 \mu\text{m}$,峰值光谱辐射出射度范围是 $(3.1 \times 10^{-3} \sim 1.742 \times 10^8) \text{ W/m}^2$,最大值约比最小值大 11 个数量级。3)目前国际上黑体产品温度最低为 77 K,其峰值光谱辐射出射度与温度为 423 K 的黑体相比小了 4 个数量级。

表 1 黑体在峰值波长处的光谱辐射出射度

Table 1 Blackbody spectral radiation emittance at peak wavelength

| Blackbody temperature /K | $\lambda_{\text{peak}}/\mu\text{m}$ | $M_{\lambda_m}/(\text{W}/\text{m}^3)$ | Blackbody temperature /K | $\lambda_{\text{peak}}/\mu\text{m}$ | $M_{\lambda_m}/(\text{W}/\text{m}^3)$ |
|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 3 | 966 | 0.0031 | 100 | 28.98 | 1.287×10^5 |
| 10 | 289.8 | 1.287 | 200 | 14.49 | 4.117×10^6 |
| 15 | 193.2 | 9.77 | 250 | 11.59 | 1.256×10^7 |
| 25 | 125.64 | 125.64 | 300 | 9.66 | 3.126×10^7 |
| 30 | 96.6 | 312.63 | 350 | 8.28 | 6.757×10^7 |
| 50 | 57.96 | 4020.5 | 373 | 7.77 | 9.289×10^7 |
| 77 | 37.64 | 34824 | 423 | 6.85 | 1.742×10^8 |

2.2 相同温度黑体在太赫兹不同波段的光谱辐射度分析

由于太赫兹波段光谱范围很宽,在温度范围 15~423 K 内,选取 15、30、77、100、300、350、373 和 423 K 八个温度点,由(1)式计算了在不同波长处的光谱辐射度。通过比较光谱辐射度差异,为测试时选择合适的太赫兹波段提供依据。

2.2.1 15~100 K 黑体在太赫兹不同波段的光谱辐射度分析

15~100 K 黑体在 30~100 μm 太赫兹波段的光谱辐射出射度如图 3 所示,光谱辐射出射度最大为 $1.3 \times 10^5 \text{ W}/\text{m}^3$ 。在此波段,同一温度黑体的光谱辐射出射度随着波长的变大而变小。黑体的温度越高,光谱辐射出射度越大。该温度范围黑体在 100~500 μm 波段的光谱辐射出射度如图 4 所示,波长大于 300 μm 时各温度黑体辐射值很接近。在 500~3000 μm 波段的光谱辐射出射度如图 5 所示,辐射值远远小于另外两个波段。在红外波段 2~30 μm 的光谱辐射出射度如图 6 所示。

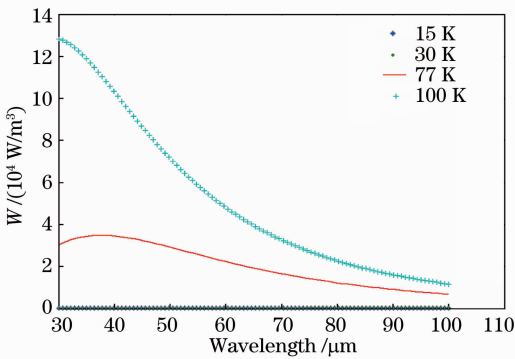


图 3 15~100 K 黑体在 30~100 μm 波段的光谱辐射出射度曲线

Fig. 3 15~100 K blackbody spectral radiant emittance curves at 30~100 μm

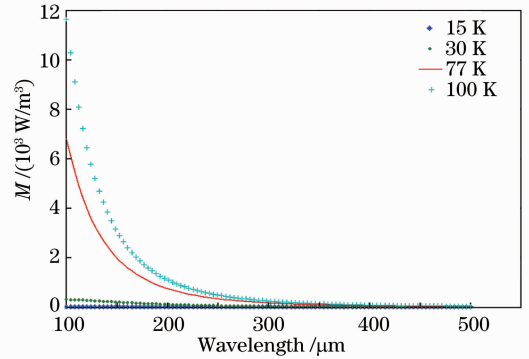


图 4 15~100 K 黑体在 100~500 μm 波段的光谱辐射出射度曲线

Fig. 4 15~100 K blackbody spectral radiant emittance curves at 100~500 μm

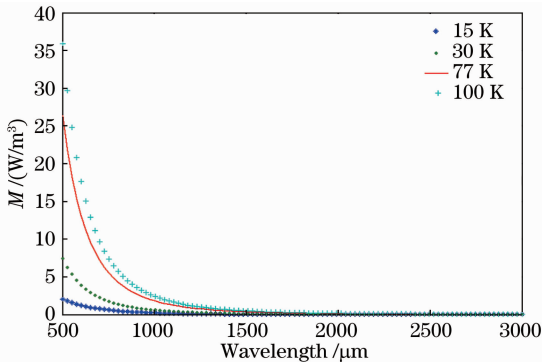


图 5 15~100 K 黑体在 500~3000 μm 波段的光谱辐射出射度

Fig. 5 15~100 K blackbody spectral radiant emittance curves at 500~3000 μm

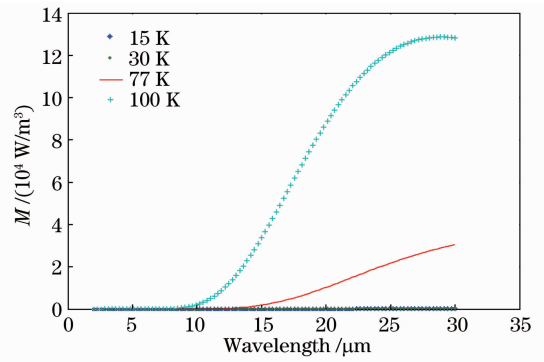


图 6 15~100 K 黑体红外光谱辐射出射度

Fig. 6 15~100 K blackbody spectral radiant emittance curves at 2~30 μm

经分析可知,温度范围为 3~100 K 的黑体在 30~300 μm 太赫兹波段的光谱辐射出射度范围为($100\sim 1\times 10^5$) W/m^2 ;300~3000 μm 波段的光谱辐射出射度范围为 $1\sim 90$ W/m^2 。因此 3~100 K 的黑体大部分辐射能量集中在 30~300 μm 波段。

2.2.2 温度在 300~423 K 黑体在太赫兹不同波段的光谱辐射度分析

300~423 K 黑体在 30~100 μm 波段的光谱辐射出射度如图 7 所示,在 2~30 μm 的光谱辐射出射度如图 8 所示。该温度范围黑体在 30~100 μm 波段的光谱辐射出射度范围为($1\times 10^5\sim 7\times 10^6$) W/m^2 ,在 100~400 μm 波段的光谱辐射出射度范围为($1\times 10^3\sim 8\times 10^4$) W/m^2 ,在 400~3000 μm 波段的光谱辐射出射度范围为 $1\sim 400$ W/m^2 。该温度范围黑体的太赫兹辐射主要集中于 30~400 μm 波段,比红外波段辐射小了 1 个数量级。

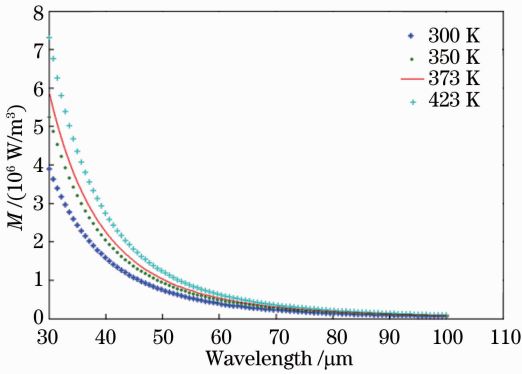


图 7 300~423 K 黑体在 30~100 μm 波段的光谱辐射出射度

Fig. 7 300~423 K blackbody spectral radiant emittance curves at 30~100 μm

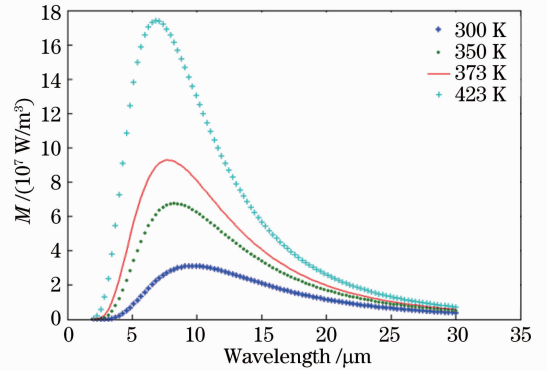


图 8 300~423 K 黑体红外光谱辐射出射度

Fig. 8 300~423 K blackbody spectral radiant emittance curves at 2~30 μm

3 同一温度黑体在太赫兹波段和红外波段总辐射出射度比较

由于太赫兹波段为 30~3000 μm ,光谱范围很宽,同一温度的黑体在太赫兹各波段辐射有很大差异。由

$$M_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda. \quad (2)$$

$$M = \sigma T^4. \quad (3)$$

式中 $\sigma = 5.67032 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。

计算了温度范围为 15~600 K 的黑体在太赫兹波段 30~3000 μm 的总辐射度、30~300、30~100、100~3000 和 300~3000 μm 等各个太赫兹窄带波段的辐射出射度,并与红外波段总辐射度进行比较,如表 2 所示,为在系统设计时选择探测的太赫兹波段提供依据。

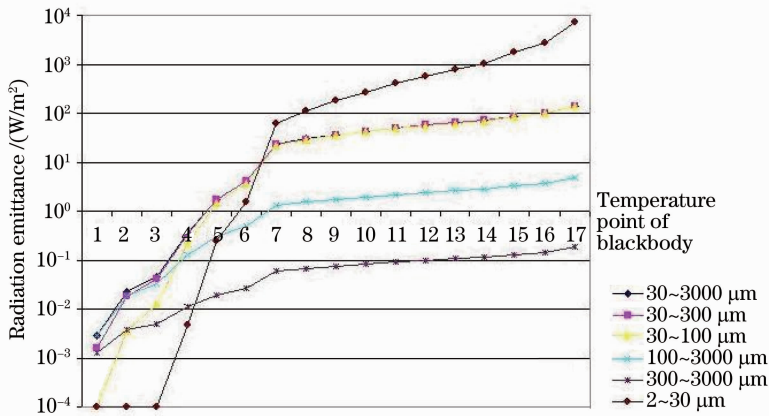
表 2 黑体在太赫兹波段和红外波段辐射出射度

Table 2 Blackbody radiation emittance in the terahertz band and infrared band

| Blackbody temperature /K | M_1 (30~3000 μm) / (W/m^2) | M_2 (30~300 μm) / (W/m^2) | M_3 (30~100 μm) / (W/m^2) | M_4 (100~3000 μm) / (W/m^2) | M_5 (300~3000 μm) / (W/m^2) | M_6 (2~30 μm) / (W/m^2) |
|--------------------------|--|---|---|---|---|---|
| 15 | 0.0029 | 0.0016 | 0.0001 | 0.0028 | 0.0013 | 0.0001 |
| 25 | 0.0221 | 0.0184 | 0.0036 | 0.0185 | 0.0037 | 0.0001 |
| 30 | 0.0459 | 0.0409 | 0.0125 | 0.0334 | 0.0050 | 0.0001 |
| 50 | 0.3498 | 0.3388 | 0.22 | 0.1298 | 0.0110 | 0.0046 |
| 77 | 1.7499 | 1.7305 | 1.4382 | 0.3117 | 0.0194 | 0.2432 |
| 100 | 4.1206 | 4.0940 | 3.6339 | 0.4867 | 0.0266 | 1.5491 |
| 200 | 23.7872 | 23.7286 | 22.4767 | 1.3105 | 0.0586 | 62.929 |
| 223 | 29.5701 | 29.5042 | 28.0648 | 1.5053 | 0.0659 | 110.642 |
| 250 | 36.6844 | 36.6098 | 34.9494 | 1.7350 | 0.0746 | 180 |

| Blackbody temperature /K | M_1 (30~3000 μm) / (W/m^2) | M_2 (30~300 μm) / (W/m^2) | M_3 (30~100 μm) / (W/m^2) | M_4 (100~3000 μm) / (W/m^2) | M_5 (300~3000 μm) / (W/m^2) | M_6 (2~30 μm) / (W/m^2) |
|--------------------------|--|---|---|---|---|---|
| 273 | 42.9600 | 42.8781 | 41.0286 | 1.9314 | 0.0819 | 271.972 |
| 300 | 50.5236 | 50.4330 | 48.3611 | 2.1625 | 0.0906 | 410 |
| 323 | 57.1005 | 57.0026 | 54.7407 | 2.3596 | 0.0979 | 560.03 |
| 350 | 64.9472 | 64.8406 | 62.3556 | 2.5916 | 0.1066 | 790 |
| 373 | 71.7196 | 71.6056 | 68.9302 | 2.7894 | 0.1140 | 1030 |
| 423 | 86.6603 | 86.5303 | 83.4403 | 3.2200 | 0.1300 | 1730 |
| 473 | 101.8265 | 101.6805 | 98.1753 | 3.6512 | 0.1460 | 2740 |
| 600 | 140.9943 | 140.8076 | 136.2463 | 4.7480 | 0.1867 | 7190 |

温度范围为 15~600 K 的黑体在太赫兹各个波段和红外波段的辐射出射度值对比如图 9 所示。由图 9 看出,太赫兹波长越长,辐射出射度随温度变化的幅度越小。30~300 μm 波段的辐射出射度比 1000~3000 μm 波段高了 3 个数量级。因此,需对黑体太赫兹辐射进行光谱分段探测,选择温度范围为 200~373 K 的黑体,有利于提高黑体太赫兹探测的准确度。



| Point number | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|--------------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| T/K | 15 | 25 | 30 | 50 | 77 | 100 | 200 | 223 | 250 | 273 | 300 | 323 | 350 | 373 | 423 | 473 | 600 |

图 9 不同温度黑体在太赫兹波段和红外波段的辐射出射度对比

Fig. 9 Radiation emittance of different temperature blackbodies in the terahertz band and infrared band

4 黑体太赫兹测试方法

黑体的辐射能量传输原理如图 10 所示,因为黑体是朗伯辐射体,其向任意方向辐射的辐亮度相等。根据辐亮度守恒定律,封闭光束在同种介质传输中忽略传输损失时,辐射源的亮度等于探测器接收端的亮度。太赫兹辐射测试系统如图 11 所示^[12],测试方法是采用斩波器对黑体的太赫兹辐射进行周期性调制,由

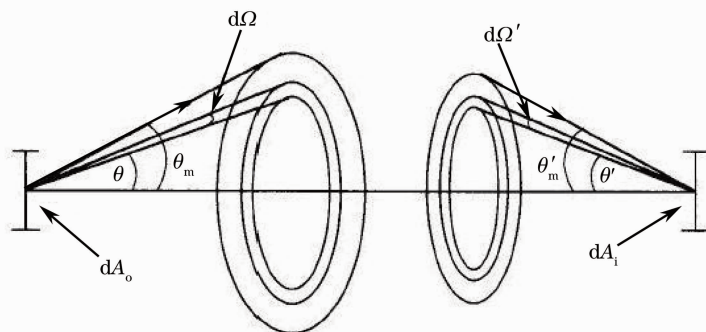


图 10 黑体辐射能量传输原理图

Fig. 10 Schematics of blackbody radiation energy transfer

滤光片滤除红外辐射,由真空低温背景通道屏蔽杂散辐射,由锁相放大器把有效的太赫兹信号从噪声中提取出来。太赫兹黑体的辐射腔直径为 28 mm,卡塞格林系统焦距为 325 mm,物距为 2250 mm,视场为 0.51° 。由于卡塞格林系统在黑体上的取样光斑直径为 22 mm,黑体辐射源面只有部分被探测系统接收,此时可用辐射亮度计算面源产生的辐照度。探测系统接收到的辐射能量与系统的有效孔径、接收立体角和视场有关。当考虑传输损失时,不同温度黑体的太赫兹波段辐射经过光学系统聚焦到探测器光敏面上。探测器对黑体经过光学系统会聚的辐射功率的响应电压值由下式表示:

$$U = R \frac{\tau_0 \tau_t \pi L_0 A D^2}{8b^2}, \quad (4)$$

式中 L_0 为黑体在太赫兹待测波段的辐射亮度, A 为探测器接收面的面积, τ_0 为卡塞格林反射系统的太赫兹透射率, τ_t 为滤光片的太赫兹透射率, D 为卡塞格林系统出瞳直径, b 为成像系统像距, R 为探测器的响应度。

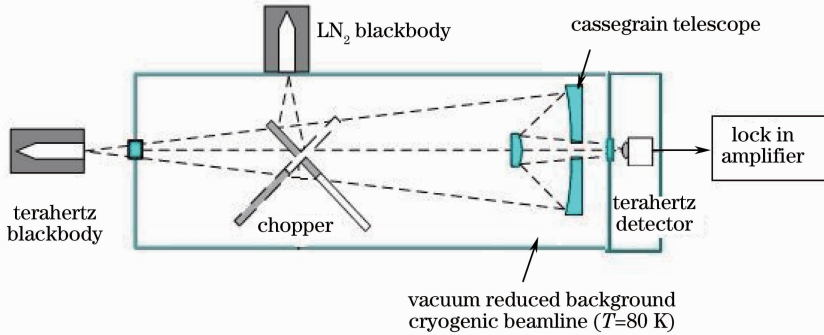


图 11 太赫兹辐射测试系统

Fig. 11 Terahertz radiation test system

太赫兹探测器上带有宽带滤光片^[13],光谱响应范围为 $100 \sim 3000 \mu\text{m}$,输出电压信号与输入太赫兹辐射功率成比例,响应度取决于斩波器调制频率和太赫兹辐射波长,调制频率为 $10 \sim 30 \text{ Hz}$ 。太赫兹辐射测试系统中黑体的温度范围选择 $200 \sim 373 \text{ K}$,根据该温度范围黑体入射到探测器上的辐射功率及探测器的响应度,计算得到探测器输出电压在微伏量级。由于太赫兹探测器的噪声约在 1 mV ,太赫兹信号淹没在噪声中,采用锁相探测方法可从噪声中提取周期性变化的待测信号^[14]。锁相放大器采用美国 SR810,其最小电压探测能力为 10 nV ,可以探测到微伏量级的太赫兹信号。

5 实验结果

在黑体太赫兹测试系统上把太赫兹黑体的温度分别设置为 223、230、240、250、260 和 273 K,分别测试黑体辐射量对应的电压值,实验条件为:斩波器频率 f 为 $10.6 \sim 10.8 \text{ Hz}$,锁相时间常数为 3 s 。其中黑体温

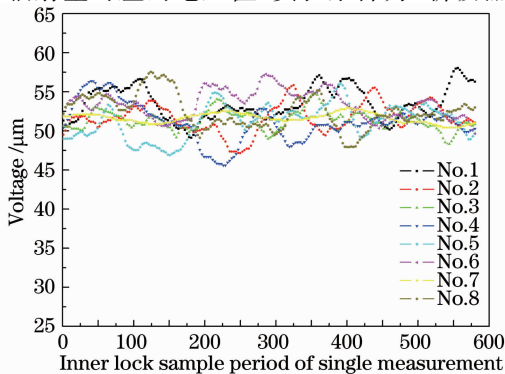


图 12 223 K 黑体在 $100 \sim 3000 \mu\text{m}$ 波段的太赫兹辐射测试值
Fig. 12 Testing results of radiation for 223 K blackbody at $100 \sim 3000 \mu\text{m}$

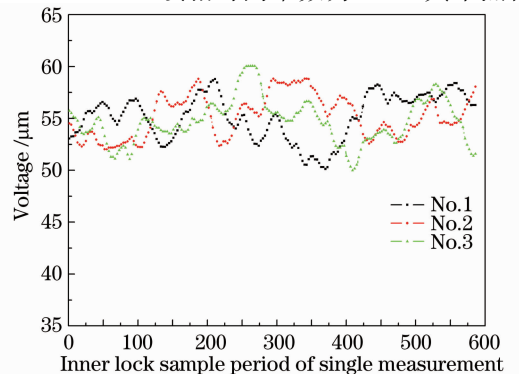


图 13 230 K 黑体在 $100 \sim 3000 \mu\text{m}$ 波段的太赫兹辐射测试值
Fig. 13 Testing results of radiation for 230 K blackbody at $100 \sim 3000 \mu\text{m}$

度为 223、230、240 和 250 K 时黑体辐射测试结果分别如图 12~15 所示,不同温度黑体测量的平均值和标准偏差如表 3 所示。

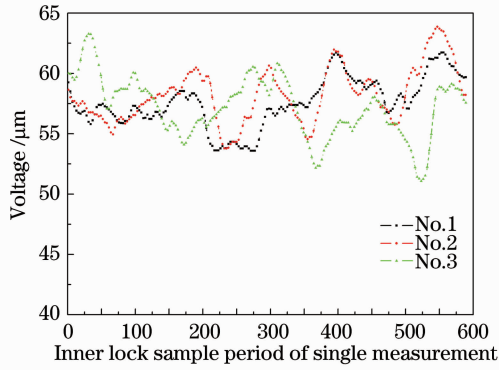


图 14 240 K 黑体在 100~3000 μm 波段的太赫兹辐射测试值
Fig. 14 Testing results of radiation for 240 K blackbody
at 100~3000 μm

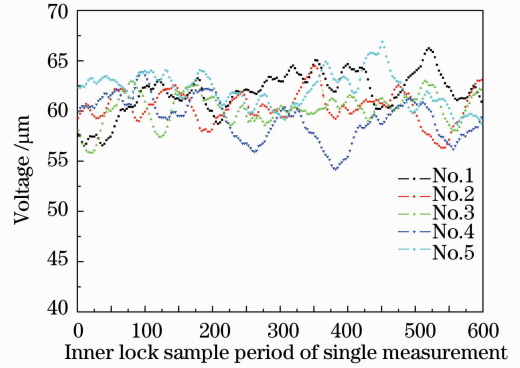


图 15 250 K 黑体在 100~3000 μm 波段的太赫兹辐射测试值
Fig. 15 Testing results of radiation for 240 K blackbody
at 100~3000 μm

表 3 不同温度黑体在 100~3000 μm 太赫兹波段测量的平均值和标准偏差

Table 3 Testing values and standard deviations of radiation for blackbody at 100~3000 μm

| Blackbody temperature /K | Time constant /s | Number of tests | Inner lock sample period of single measurement | Average value / μV | Standard deviation / μV |
|--------------------------|------------------|-----------------|--|-------------------------------|------------------------------------|
| 223 | 3 | 1 | 580 | 53.5197 | 2.11758 |
| | | 2 | 580 | 51.6814 | 1.86753 |
| | | 3 | 580 | 51.4062 | 1.25172 |
| | | 4 | 580 | 51.1158 | 2.39937 |
| | | 5 | 580 | 51.2668 | 2.10858 |
| | | 6 | 580 | 53.4309 | 1.75839 |
| | | 7 | 580 | 51.6592 | 0.62585 |
| | | 8 | 580 | 52.4395 | 2.15913 |
| 230 | 3 | 1 | 588 | 55.1526 | 2.20646 |
| | | 2 | 588 | 55.231 | 2.04642 |
| | | 3 | 588 | 54.7049 | 2.12075 |
| 240 | 3 | 1 | 589 | 57.576 | 2.07105 |
| | | 2 | 589 | 58.2307 | 2.27865 |
| | | 3 | 589 | 57.1821 | 2.49797 |
| 250 | 3 | 1 | 614 | 61.8233 | 2.0942 |
| | | 2 | 614 | 60.4919 | 1.6308 |
| | | 3 | 614 | 60.2499 | 1.52876 |
| | | 4 | 614 | 59.2583 | 2.08565 |
| | | 5 | 614 | 62.0101 | 1.86024 |
| 260 | 3 | 1 | 590 | 64.4331 | 1.77509 |
| | | 2 | 590 | 63.9342 | 16.4081 |
| | | 3 | 590 | 64.7023 | 1.72083 |
| 273 | 3 | 1 | 590 | 67.738 | 1.9017 |
| | | 2 | 590 | 67.6296 | 2.60861 |
| | | 3 | 590 | 68.8055 | 2.08206 |
| | | 4 | 590 | 68.0611 | 2.36021 |
| | | 5 | 590 | 68.7665 | 2.23758 |

黑体在 $100\sim 3000\ \mu\text{m}$ 波段的太赫兹辐射理论值和测试值的对比如表 4 和图 16 所示。在各个温度下,对黑体的太赫兹辐射量理论计算值和测试电压值进行了归一化处理,由表 4 可看出在 6 个温度的黑体对应的太赫兹辐射量的相对理论值和实测值基本相同,其中温度为 223 K 时,测量相对误差为 2.0%;温度为 230 K 时,测量相对误差为 0.4%;温度为 240 K 时,测量相对误差为 1.0%;温度为 250 K 时,测量相对误差为 0.8%;温度为 260 K 时,测量相对误差为 0.1%。由图 16 可看出,在 223~273 K 温度范围内,黑体的太赫兹相对辐射量变化曲线与实测值相对变化曲线趋势一致。

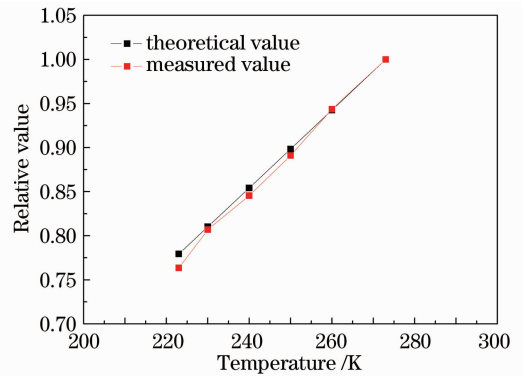


图 16 不同温度黑体太赫兹波段的理论值和测试值对比

Fig. 16 Comparison between testing and theoretical values for blackbody

表 4 不同温度黑体在 $100\sim 3000\ \mu\text{m}$ 太赫兹波段的理论值和测试值对比

Table 4 Testing and theoretical values for blackbody at $100\sim 3000\ \mu\text{m}$

| Blackbody temperature / K | Radiation emittance at $100\sim 3000\ \mu\text{m}$ M_1 | | Average value | |
|---------------------------|--|----------------|--------------------------------|----------------|
| | Absolute value / (W/m^2) | Relative value | Absolute value / μV | Relative value |
| 223 | 1.5053 | 0.7794 | 52.0649 | 0.7635 |
| 230 | 1.5648 | 0.8102 | 55.0295 | 0.8069 |
| 240 | 1.6498 | 0.8542 | 57.6629 | 0.8455 |
| 250 | 1.7350 | 0.8983 | 60.7667 | 0.8910 |
| 260 | 1.8203 | 0.9425 | 64.3565 | 0.9436 |
| 273 | 1.9314 | 1.0 | 68.2 | 1.0 |

6 结 论

通过计算并分析黑体在太赫兹波段和红外波段的辐射特性,指出黑体温度范围制约其太赫兹辐射探测的信噪比。变温黑体选择温度范围为 $200\sim 373\ \text{K}$ 时,有利于提高太赫兹辐射量测试的信噪比和准确度。在此基础上,提出了黑体太赫兹辐射锁相测试方法,搭建了太赫兹辐射测试系统,并对温度范围为 $223\sim 273\ \text{K}$ 的变温黑体的太赫兹辐射值进行了测试实验。根据实验结果,在锁相采集周期大于 500 时,黑体的太赫兹辐射测量电压平均值范围在 $52\sim 68.2\ \mu\text{V}$ 之间,标准偏差范围在 $0.6\sim 2.4\ \mu\text{V}$,黑体在 $100\sim 3000\ \mu\text{m}$ 波段相对电压测试曲线与相对辐射量理论曲线变化趋势一致,误差范围为 $0.1\%\sim 2.0\%$ 。实验结果说明该方法能够实现黑体的太赫兹宽波段辐射量测试,这为研究黑体太赫兹源辐射计量技术提供了方法支持。

参 考 文 献

- 1 Ralph Müller, Arne Hoehl. The metrology light source of PTB-a source for THz radiation[J]. J Infrared Millim Terahz Waves, 2011, 32(6): 742-753.
- 2 Charles Dietlein. Broadband THz aqueous blackbody calibration source[C]. SPIE, 2007, 6548: 65480M.
- 3 Ma Chengju, Chen Yanwei, Xiang Jun, *et al.*. Progress in generation of terahertz radiation[C]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(4): 56-61.
- 4 马成举, 陈延伟, 向 军, 等. 太赫兹辐射产生技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(4): 56-61.
- 5 R Dickhoff, C Jastrow. Characterization of THz beams[C]. CLEO, 2011. JThB116.
- 6 Andreas Steiger, Berndt Gutschwager. Optical methods for power test of terahertz radiation[J]. Opt Express, 2010, 18(21): 21804-21814.
- 7 L Werner, H-W Hübers. Towards traceable radiometry in the terahertz region[J]. Metrologia, 2009, 46(4): s160-s164.
- 8 B Gutschwager, C Monte. Calculable blackbody radiation as a source for the determination of the spectral responsivity of THz detectors[J]. Metrologia, 2009, 46(4): s165-s169.
- 9 Li Qi, Yao Rui, Shan Jixin, *et al.*. A preliminary study on THz imaging and image enhancement based on thermal imager[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(s2): 275-277.

- 李琦, 姚睿, 单纪鑫, 等. 基于热像仪的太赫兹成像及图像增强初步研究[J]. 光学学报, 2008, 28(s2): 275—277.
- 9 Li Qi, Yao Rui, Ding Shenghui, *et al.*. 2.24 THz laser real-time imaging experiments for concealed object detection[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(s2): 145—148.
- 李琦, 姚睿, 丁胜晖, 等. 用于隐藏物探测的 2.24 THz 激光实时成像实验[J]. 光学学报, 2009, 29(s2): 145—148.
- 10 Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen, *et al.*. Comparison between pulsed terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. Chinese J lasers, 2009, 36(11): 2853—2858.
- 杨昆, 赵国忠, 梁承森, 等. 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2853—2858.
- 11 Li Hongguang, Yang Hongru. Study on detection and identification model of passive Terahertz imaging system for extended target[C]. SPIE, 2010, 7854: 785413.
- 12 Li Hongguang. Study on terahertz radiation test of blackbody[C]. SPIE, 2012, 8417: 841730.
- 13 Xue Chaomin, Liu Jiansheng, Zheng Zheng, *et al.*. Terahertz filters[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(1): 43—49.
- 薛超敏, 刘建胜, 郑铮, 等. THz 滤波器[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(1): 43—49.
- 14 Zhou Shuquan. The Infrared Radiation Measuring Basis[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1991. 19—50.
- 周书铨. 红外辐射测量基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1991. 19—50.