

文章编号:1005-4642(2021)04-0011-06



低温热辐射实验设计及教学方法

鹿 博,薛玉琪,何振辉

(中山大学 物理与天文学院,广东 珠海 519082)

摘 要:随着低温热辐射(红外辐射)应用的发展和普及,作为(可见光区)高温热辐射教学实验的补充,有必要将热辐射教学实验拓展到低温区。重新设计了热辐射教学实验及其实验系统,该系统包括直立导轨、热辐射单元、安装在导轨上的热辐射传感器和数字多用表及程控电源等通用仪器。在教学中引入热电堆型热辐射传感器,向学生呈现出从辐射源的热辐射到探测器热吸收后信号输出的完整物理过程,学生可以更好地理解实验原理和实验方案,同时缩短了实验时间。

关键词:低温热辐射;面辐射;热辐射传感器;热电堆;模块化

中图分类号:O432.1

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.04.002

物体向外辐射连续的电磁波的现象称为热辐射。物体在向外辐射电磁波的同时,还会吸收来自外部的电磁辐射,它所辐射或吸收的能量与其温度、表面积、黑度等因素有关。热辐射是 19 世纪发展起来的研究领域,其中的“紫外灾难”^[1]是孕育近代物理诞生的 2 朵“乌云”之一,作为量子论的关键性实验,它敲开了量子力学的大门,带来了人们认识世界观念的重大突破。与该实验相关的威廉·维恩、马克斯·普朗克分别获得了 1911 年和 1918 年的诺贝尔物理奖。热辐射涉及到能量转换与传递、光谱学、量子力学等学科与技术领域,它在遥感^[2]、热成像^[3]、航天^[4]等领域有着广泛的、不可替代的应用。很多学校开设了热辐射实验,实验多集中在高温(可见光及近红外)辐射区^[5-7]。商用的教学实验设备主要有 PASCO EX-5528A, Hilton H112, 天津拓普 WHS-1, 等等,这些产品过于集成而且输出没有校正,不利于学生学习实验原理。有高校采用自主设计的热辐射实验平台^[8]。然而,一方面教学中会质疑热辐射定律在低温区是否适用或能否被验证;另一方面,经历过“非典”及“新冠”疫情后,热辐射传感器在低温(低于 100 °C, 中-远红外段)辐射测量中的应用

已很广泛,再考虑到低温热辐射是航天器的唯一散热方式,因此很有必要将热辐射实验内容扩展到低温区域,使学生更充分认识热辐射的物理本质及其在科学技术发展中的作用。本文从实验方案设计、教学方法等方面探讨如何开展低温热辐射实验教学。

1 实验技术方案

低温热辐射实验教学面临以下挑战:

1) 以点辐射近似为前提分析结果对于低温辐射存在较大的误差;

2) 在验证热辐射定律时,低温辐射直接测量值只能做到辐射强度与绝对温度的 4 次方成呈线性关系,但拟合直线不经过原点(0 K, 0 V),不符合斯特藩-玻尔兹曼定律^[9];

3) 应用于辐射强度测量的红外辐射传感器的结构和原理介绍较少或不透彻,导致学生对热辐射及其测量的原理和过程认识不清晰、不完整。

除了要解决上述低温热辐射实验问题外,实验设计还考虑了以下因素:

4) 如何合理分配和控制实验用时,并兼顾测量数据的精准度;

收稿日期:2021-03-15

作者简介:鹿 博(1982-),男,山东菏泽人,中山大学物理与天文学院副研究员,博士,主要从事冷原子物理与精密测量研究。E-mail:lubo3@mail.sysu.edu.cn

薛玉琪(1987-),女,吉林松原人,中山大学物理与天文学院助理实验师,硕士,主要辅助热学实验的教学和实验室的建设与管理工作。E-mail:xueyuqi@mail.sysu.edu.cn

通讯作者:何振辉(1963-),男,广东顺德人,中山大学物理与天文学院教授,博士,主要从事物理实验教学工作和空间科学实验研究。E-mail:stshzh@mail.sysu.edu.cn



5)能否使用通用仪器完成实验测量. 模块化的实验设计是目前提倡的实验教学方式,通过实验仪器的模块化和可视化将实验原理及实验过程从“黑箱”中剥离,清晰具体地展现在学生面前.

1.1 热辐射测量装置

按模块化的设计思路,热辐射实验系统由 1 台订制的竖直导轨热辐射测量装置、2 台通用数字多用表、1 台通用可编程直流电源以及 1 台安装了 LabVIEW 软件和自编控温程序的计算机组成,热辐射实验装置实物图如图 1 所示.

1)热辐射体单元安装在热辐射装置导轨的上方,辐射面向下,以减少空气对流引起的能量损失,消除被误烫伤隐患;

2)热辐射传感器安装在导轨上,可上下移动,调节与辐射面的距离;

3)热辐射体最高温度为 393.0 K,辐射源是直径 5 cm 的圆面;

4)采用竖直导轨提升了实验台的空间使用率,测量距离为 0~500.0 mm,可扩展;

5)控温时间可调;

6)可编程电源最大输出为 30 V/2 A.



图 1 热辐射实验装置实物图

1.1.1 辐射体单元

为应对挑战 1),提高辐射接收强度,辐射体采用面辐射源.辐射体(图 2)单元由材料为金属铝的辐射体、陶瓷加热片(安装在辐射体内表面上并与金属铝有良好热接触)、PT1000 温度传感器以及分别连接加热片和温度传感器的电连接器组成.为降低加热功耗,提高实验的安全性,对辐射体单元辐射面以外的部分做隔热处理,隔热层面向辐射传感器(图 3)的面贴有铝箔,以减少作为

本底的隔热层温度变化对热辐射测量的影响.辐射单元采用 3 种不同的辐射面(光滑面、粗糙面、黑色面),图 2(a)所示为黑色面,以便整体更换辐射单元,省去等待高温辐射体降温的时间,较好地满足设计因素 4)的要求.

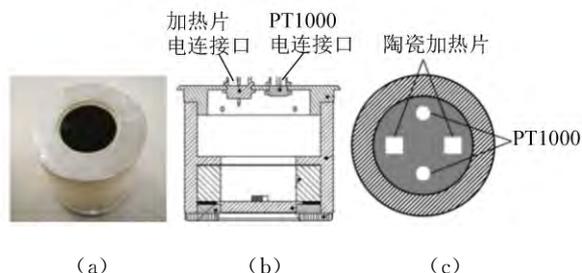


图 2 辐射体单元实物照片、结构图及辐射体内表面

实验设计要求辐射体温度可升高至 393 K.通过控制陶瓷加热片的功率实现辐射体的温度改变,加热片的功率由程控电源提供,实验人员通过控温程序使计算机输出指令控制程控电源.通过增加过温断电保护功能,保障实验人员和设备的安全.

1.1.2 热辐射传感器

为应对挑战 3),解剖所选的热辐射传感器,使学生对热辐射传感器的工作原理^[10]有更直观、更具体的理解,有助于学生自发地地理顺实验测量的物理过程,为实验的建模分析做准备.

实验采用热电堆型热辐射传感器^[11],包括不带透镜[Smartec SMTIR9902,实物照如图 3(a)所示]和带透镜(Smartec SMTIR9902SIL)2 种.热辐射传感器由辐射接收面和热电堆[图 3(b)]、传感器外壳、滤镜、透镜(SMTIR9902SIL 的辐射接收角为 7.27°)、信号输出端构成.热电堆由 N 对温差电偶丝串联组成,温差电偶丝一端(热端)与传感器接收面热连接,另一端(冷端)与传感器外壳热连接.当接收面受到热辐射时,吸收热能温度升高,从而使温差电偶两端形成温度差产生热电势 ΔU ,其输出电压信号(V_s)为 N 个温差电偶丝的热电势总和,即约为单对温差电偶输出的电压信号乘以温差电偶丝的数量($V_s \approx N\Delta U$);辐射强度越大,温差电偶两端的温差越大,输出电压越高.当达到平衡时,热电堆热端从热辐射中吸收的热量等于它从热端传到冷端的热量,根据固体热传导^[12],这一热量正比于温差电偶冷热端的温差,从而正比于热电堆输出的电压 V_s .因此,

原则上热辐射传感器的输出信号正比于从辐射方向进入的辐射强度或者能流密度($\dot{Q} = \dot{q}A = \kappa\Delta T \propto V_s$, 其中, \dot{q} 为传感器接收面的热流密度, A 为传感器接收面的面积, κ 为热偶堆丝的总热导率, $\Delta T = T_D - T_S$, T_D 和 T_S 分别为传感器接收面热端和冷端的温度)。从热辐射传感器的工作原理(图 4, 其中辐射面半径 $R = 25$ mm, 辐射距离 d 范围是 $0 \sim 500$ mm, $\tan \alpha = R/d$ 。注:该示意图中的辐射面及传感器的尺寸比例非实物比例)可知,对相同的热辐射强度,热辐射传感器的输出信号与环境温度(外壳温度)有关:一方面环境温度的变化会导致输出信号的变化;另一方面,热电系数与温度有关,输出信号与环境温度也有关。

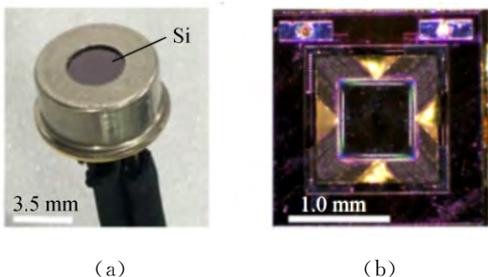


图 3 热辐射传感器实物照片及显微放大的内部结构

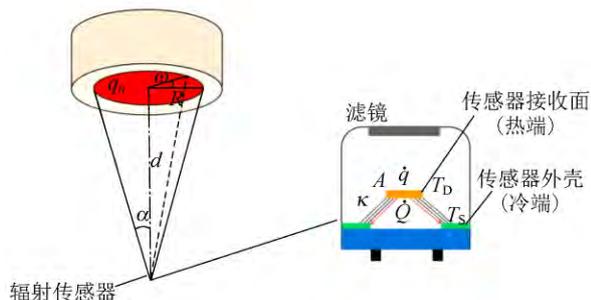


图 4 以 SMTIR9902 为例的热辐射测量原理示意图

该传感器使用芯片工艺制造,热辐射接收面重量极轻,因而热容量极小,响应时间达到 ms 量级,为热辐射测量的准确性和精确性提供了保障,同时节省了测量时间。

1.2 通用仪器

采用通用测量仪器构建实验系统,一方面可让学生更清晰地理解系统的结构和实验物理过程的逻辑关系,并且培养学生的实验操作能力;另一方面,除能够提供仪器面板的手动操作外,带通信接口的通用仪器使通过遥控遥测完成实验成为可能。本实验使用了学生在电学实验中已经学习过

的 2 台多用表 RIGOL DM3058E 和 1 台可编程直流电源 RIGOL DP831,其中 1 台多用表测量贴在辐射体内表面的热敏电阻 PT1000(用于温度采集)的阻值,1 台多用表测量辐射传感器的输出电压。实验中还提供了手持热辐射成像仪(FLUCK Ti100),测量辐射面的温度,并与接触式的热敏电阻 PT1000 所测温度进行对比,学生更深刻地理解影响表面发射率的因素,及表面发射率对辐射强度的影响。

1.3 基于 LabVIEW 软件的实验编程管理

基于 LabVIEW 的控温实验程序包括辐射体温度、辐射传感器和可编程直流电源 3 部分。实验利用数字多用表测量辐射体铂电阻温度传感器的电阻,实时反馈辐射体温度。用 PID 算法计算并自动设置可编程直流电源参量,控制加热功率进而控制辐射体温度,使其温度波动小于 0.1 K。

辐射体温度测量部分:程序会根据数字多用表测得的 PT1000 电阻换算出温度值。“辐射器设定温度”可以根据实验方案设置控温目标温度,“辐射器温度”为实测的温度值。

辐射传感器部分给出的“辐射传感器电压(V)”为数字多用表实测的传感器输出电压。

可编程直流电源部分:通过对 DP831 电源进行控制,进而控制辐射体的加热功率。实际输出的电压、电流和功率,以及辐射器的控温过程可通过如图 5 所示的波形图表实时显示。此外,该程序可实时显示和保存辐射器实测温度、可编程直流电源输出功率和辐射传感器输出电压 3 个参量的数据。

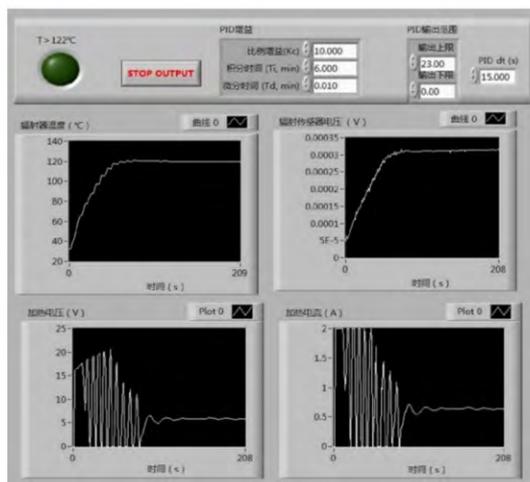


图 5 LabVIEW 控温程序局部示意图

实验通过 LabVIEW 自编程序,利用非 NI 仪器的接口和驱动程序,使数据测量、数据记录与实验控制实现自动化和信息化,未来可以实现远程操作。

2 教学方法及效果

2.1 知识结构

热辐射测量基础实验的内容主要包括:

- 1) 测量辐射体的温度对辐射强度的影响;
- 2) 测量物体在不同辐射距离的辐射强度,并分析辐射强度和距离之间的关系;
- 3) 测量不同物体表面(光滑表面、粗糙面、黑面)的发射系数。

不同于点辐射源,辐射传感器面向辐射面的有效接收角(α)会随其与辐射面的距离(d)而变化(如图 4 所示),则传感器接收的辐射强度(Q)与辐射面的面辐射功率密度(辐射度) q_a 和有效接收角 α 存在以下关系:

$$Q = \frac{q_a}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\omega \int_0^\alpha \sin\theta \cos\theta d\theta = \frac{q_a}{2} \sin^2\alpha, \quad (1)$$

其中, θ 为传感器与辐射面上任一点连线与辐射圆面轴线的夹角。可见,对于圆面辐射源,热辐射强度与测量点的有效接收角的正弦平方成正比;仅当距离足够远(α 足够小)时,传感器探测的辐射强度才与距离平方成反比:

$$Q \approx \frac{q_a \alpha^2}{2} \approx \frac{q_a R^2}{2d^2} \propto \frac{1}{d^2}. \quad (2)$$

当传感器本身的接收角小于它所在测量位置的接收角 α 时(比如传感器靠近辐射面或传感器自带透镜),其探测的辐射强度近似为定值(饱和)。通过观测传感器输出信号随传感器与辐射面距离缩短而饱和的现象,学生可以深入理解辐射(非接触式)测温计的工作原理、结构及正确使用方法。另一方面,热辐射测量是典型的多因素影响的物理过程,实验时需要固定其他因素来探索某一因素的影响;固定传感器的接收角使在近距离时,所探测到的辐射强度对传感器与辐射面的距离不敏感,使非接触测温的应用成为可能。SMTIR9902SIL 为此而生,也让学生理解为何有的传感器要带透镜。

仪器操作方面的教学采用新旧知识结合,利用学生已经掌握的温度传感器知识(包括热敏电阻温度传感器和温差电偶)和通用仪器操作方法,

结合全新设计的热辐射测量装置,完成热辐射测量实验。将学生已经熟悉的 LabVIEW 界面操作和 PID 闭环控温相结合,进一步实现热辐射测量过程涉及的仪器程控和数据自动化采集。期望学生可以自主地运用学过的知识解决新问题,培养学生的科研能力。

新增热辐射传感器的结构和测量原理相关知识,包括红外透射、聚焦和热电堆。强调基础知识和基本理论的重要性,有助于学生理解热辐射测量的物理过程,理解实验内容中的逻辑关系,形成合理的数据分析和讨论,提出与热辐射测量实验全过程有关的问题并设计方案验证或解决问题。

2.2 拓展内容

热辐射测量实验的可拓展性主要体现在课程的设计性实验阶段,包括 2 方面:一是针对验证性实验部分的误差分析,设计实验方案,提高热辐射测量的精准度;二是进一步拓展热辐射测量的应用。由学生提出的、有代表性的设计性实验的内容有:

- 1) 如何有效、完整地扣除本底对热辐射测量的影响,使实验结果更接近理论值,验证斯特藩-玻尔兹曼定律。分析多种影响因素,设计扣除本底的实验方案,并加以实施。
- 2) 表面温度非接触测量的实践,设计人脸温度测量,并对测量结果进行校正。
- 3) 基于 LabVIEW 控温程序实现匀速升温 and 匀速降温,连续测量辐射强度随温度的变化。
- 4) 测量不同物体的防辐射能力。在热辐射实验装置的基础上,设计防辐射实验方案,对比不同材料的防辐射性能。

2.3 学生实验范例

从实验预习、实验操作、数据记录、数据分析和讨论及实验结论来考察学生的学习效果,除数据分析和讨论方面存在个体间的差距,在其他方面学生都可达标甚至超预期完成。以下选取有代表性的实验数据和结果进行介绍。

2.3.1 测量物体在不同辐射距离的辐射强度

图 6 所示取自 2017 级王雨同学的实验数据。在辐射面温度(363.0 K)相同情况下,带透镜传感器测量的辐射强度与根据式(2)计算的辐射强度理论值非常接近。不带透镜的传感器接收角较大,在距离范围内未受限制,测得辐射强度与辐射面距离平方呈反比,拟合直线为: $V_s = (7.59 \pm$

$0.01)/d^2$, 相关系数 $r^2=0.9997$. 带透镜传感器的辐射距离受辐射传感器的辐射接收角 (7.27°) 限制, 对于半径 $R=25\text{ mm}$ 的辐射面, 当辐射距离 $d < R/\tan 7.27^\circ \approx 196\text{ mm}$ 时, 传感器输出信号随距离的变化很小 (见图 6), 这里并非辐射强度与距离无关. 利用带透镜传感器的此特性可实现人脸测温.

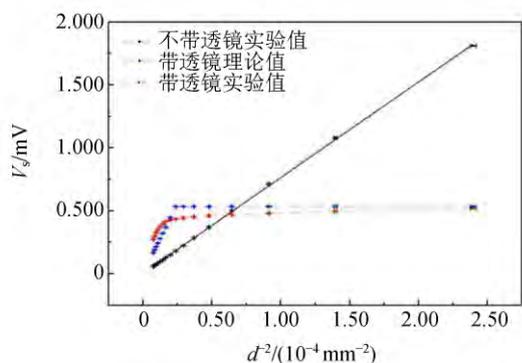


图 6 辐射距离对辐射强度的影响

2.3.2 测量物体的辐射面温度对物体辐射强度的影响

仍以 2017 级王雨同学实验报告中的相关数据 (图 7) 和分析结果为例进行阐述. 实验结果表明, 辐射强度与辐射面温度的 4 次方的拟合直线为: $V_s = (5.080 \pm 0.025) \times 10^{-11} T^4 - (0.4107 \pm 0.0038)$, 相关系数 $r^2=0.9998$, 辐射强度与辐射面绝对温度的 4 次方符合线性关系, 但是拟合直线不过坐标原点, 是否意味着低温区热辐射测量不符合斯特藩-玻尔兹曼定律? 利用实验拟合直线反推, 当辐射强度即输出电压为 0 mV, 辐射面温度为 $(299.9 \pm 1.1)\text{ K}$, 当时的实验室环境温度约为 300.0 K . 根据辐射传感器热电堆的测量原理, 输出信号与相对于冷端温度的温差成正比,

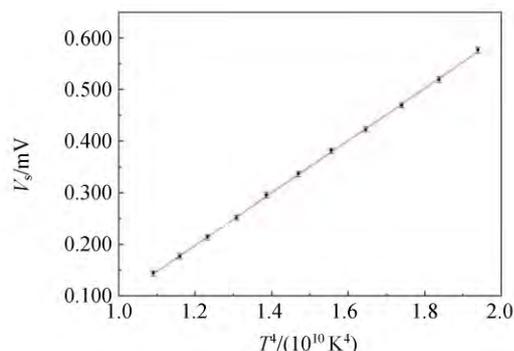


图 7 不带透镜传感器测量辐射强度 (辐射距离 125 mm)

实验中冷端温度为环境温度, 若将冷端的环境温度换成 0 K , 实验结果恰好验证了低温区辐射符合斯特藩-玻尔兹曼定律. 此例可见基于塞贝克效应 (温差电偶)^[10] 的热辐射传感器原理对实验结果分析的重要性.

2.4 教学效果

2016 年以来, 开设热辐射测量实验 4 年, 共有 4 个年级 431 名学生完成该实验的学习, 其中 108 人选择了该实验的开放性设计内容.

学生通过应用学习过的通用仪器和软件完成热辐射测量实验及设计性实验, 对之前学过知识的复习与扩展, 强化通用仪器的使用和熟悉程控软件的界面操作, 降低了实验的操作难度. 传达给学生学以致用的理念, 培养学生利用已有知识解决问题的思维习惯. 学生将时间分配到实验原理学习、实验数据记录和数据分析及讨论的过程中, 有利于学生获得清晰完整的知识结构.

课程调查问卷中学生的反馈意见主要集中在以下 2 方面:

1) 实验装置方面, 学生普遍认为实验装置的模块化和可视化有助于对实验原理和实验方法的掌握; 所使用的实验仪器是以往学习过的通用仪器, 降低了实验操作的难度.

2) 针对热辐射设计实验方面, 学生希望通过多次实验来修正实验设计方案, 认为实验设计的时间不够充裕.

热辐射测量及设计性实验对学生来讲有一定的难度, 希望以此来激发学生的学习兴趣 and 求知欲. 在完成热辐射测量实验之后, 接续开展相关的设计性实验, 有助于学生对热辐射原理的理解. 学生通过对实验装置、测量方法等进行改进, 参与实验设计的全过程, 有助于学生将热辐射的原理应用于解决实际问题, 例如人脸测温仪的设计等. 学生在参与实验的全过程中, 实验观察能力、动手能力、数据处理以及分析能力等都获得了较大的提升.

3 结束语

为开展低温热辐射实验教学, 设计了基于面辐射源的热辐射测量实验教学方案, 改进了热辐射测量装置, 并通过剖析热电堆型热辐射传感器内部结构, 阐明其工作原理, 从而明晰了热辐射测量物理过程, 使多参量测量及其误差分析成为可

能。基于对实验所用的热辐射传感器的理解,将实验结果还原回斯特藩-玻尔兹曼定律——辐射强度与辐射面绝对温度的 4 次方成正比。在教学中结合设计性实验的开展,取得了良好的教学效果。今后进一步拓展实验内容,补充辐射源温度低于传感器(环境)温度的情况,会有利于学生更好地理解航天器辐射散热的工作原理。

致谢:感谢杭州大华仪器制造有限公司在热辐射测量装置研制上的支持。

参考文献:

- [1] Kroemer H, Kittel C. Thermal physics [M]. 2 ed. New York: W. H. Freeman Company, 1980: 89-97.
- [2] 金亚秋. 电磁散射和热辐射的遥感理论[M]. 北京:科学出版社,1993:18-19.
- [3] 曹彦鹏,许宝杯,何泽威,等. 红外热成像信号处理技术的研究进展[J]. 振动、测试与诊断,2018,38(2):219-227.
- [4] Yin X B, Yang R G, Tan G, et al. Terrestrial radiative cooling: using the cold universe as a renewable and sustainable energy source [J]. Science, 2020, 370(6518):786-791.
- [5] 马洪良,王春涛,张义邴,等. 热辐射实验演示仪及热辐射规律探究[J]. 物理实验,2014,34(2):43-44.
- [6] 李伟斌,熊永红. 热辐射基础实验[J]. 物理实验,2003,23(1):9-12,17.
- [7] 路峻岭,汪荣宝. 热辐射演示实验的再改进[J]. 物理实验,2005,25(9):40-41,44.
- [8] 贾斐霖,高丽丽,刘晓,等. 热辐射研究综合实验平台的设计[J]. 大学物理,2012,31(9):57-60.
- [9] 葛绍岩,那鸿悦. 热辐射性质及其测量[M]. 北京:科学出版社,1989:15-20.
- [10] Alexander G, Arndt M, Gerlach G. Seebeck's effect in micromachined thermopiles for infrared detection: a review [J]. Estonian Journal of Engineering, 2007,13(4):338-353.
- [11] Smartec B V. Infrared sensors [EB/OL]. [2021-03-15]. <https://www.smartec-sensors.com/cms/pages/products/infrared-sensors.php>.
- [12] 杨强生,浦保荣. 高等传热学[M]. 上海:上海交通大学出版社,1996:1-80.

Design and teaching method of an infrared radiation experiment

LU Bo, XUE Yu-qi, HE Zhen-hui

(School of Physics and Astronomy, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: With the development and popularization of the application of low-temperature thermal radiation (infrared radiation), it is necessary to expand the corresponding teaching experiment which focuses on the measurement of radiation from high-temperature (at visible light region) to low-temperature radiation (at infrared region) ranges. The thermal radiation teaching experiment and its experimental system were redesigned, which was composed of a vertical guide rail, a radiation unit, a thermopile radiation sensor on the track, and general-purpose instruments. The structure and the working principle of the thermal-radiation sensor were introduced, so that the complete process of the thermal radiation, from the radiator to the output signal of the sensor, was presented to students for better understanding of the radiation physics. In the experiment, the students replaced the radiation units instead of cooling them down, so it took less time and let students have a better understanding of the experimental principle and scheme.

Key words: infrared radiation; surface radiation; thermal radiation sensor; thermopile; modularization

[责任编辑:任德香]