



普通高校“十二五”规划教材

江月松 编著

光电技术实验



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高校“十二五”规划教材

光电技术实验

江月松 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

“光电技术”教材分课堂讲授部分《光电技术》和实验操作指导部分《光电技术实验》。本书是实验操作指导部分,内容由48个实验组成,分别归属为辐射度量的测量、光电探测器、光电弱信号探测、光学调制器原理及信号解调方法、成像器件与系统的性能测试及信号处理方法、激光器的参数测量及其应用、光电技术设计性与综合应用实验七大部分。

本书适合于光电信息工程、电子信息工程、应用物理、自动控制、计量测试技术与仪器、光电检测、光学遥感、测绘工程等专业高年级本科生和研究生使用,也可作为光电信息技术领域的科研人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光电技术实验 / 江月松编著. -- 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012. 10

ISBN 978 - 7 - 5124 - 0959 - 0

I. ①光… II. ①江… III. ①光电技术—实验 IV.

①TN2-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 223613 号

版权所有,侵权必究。

光电技术实验

江月松 编著

责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本: 787×960 1/16 印张: 20.5 字数: 459 千字

2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷 印数: 2 000 册

ISBN 978 - 7 - 5124 - 0959 - 0 定价: 39.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

“光电技术”教材分课堂讲授部分《光电技术》与实验操作指导部分《光电技术实验》。这套教材是作者在从事教学工作 20 多年的基础上,总结了其先后编著的全国电子信息类专业“九五”规划教材《光电技术与实验》(北京理工大学出版社, 2000 年)和北京市精品教材《光电信息技术基础》(北京航空航天大学出版社, 2005 年)的经验和教学实验研究经验的基础上,结合当前本科-研究生一体化教学要求、国际光电技术的发展趋势和创新型人才培养需求编著而成的。

本套教材以培养学生创新能力为宗旨,适应本科-研究生一体化教学要求,在体系上体现了“行为主义→认知主义→建构主义”的现代教育理念。实验操作指导内容紧密配合课堂讲授内容为本教材的重要特色。在内容安排上,不同类型高校、研究单位以及工程单位等,可以结合自身的具体情况选择使用;在加强理论基础内容时,注重介绍实用技术对理论的灵活应用,既反映了经典的理论与技术,也尽可能系统地介绍目前正在被广泛应用以及正在研发的技术内容。

作者编著的《光电技术与实验》自 2000 年出版后,被许多高校作为光电技术、应用物理、自动控制以及测试仪器等专业的教材,在出版后的 10 余年的时间里,重印多次,其中许多实验项目也被一些公司开发成为教学仪器,取得了良好的教学效果和社会效益。

《光电技术实验》内容紧密配合课堂讲授的《光电技术》内容。第一部分内容——辐射度量的测量紧密结合《光电技术》中第 1 章的辐射理论和第 2 章的半导体光电子学基础;本书的第二部分到第六部分的实验项目内容分别是光电探测器、光电弱信号探测、光学调制器原理及信号解调方法、成像器件与系统的性能测试及信号处理方法、激光器的参数测量及其应用,紧密结合《光电技术》的第 3 章至第 9 章的光辐射源、光探测器、光伏器件、晶体光学基础与光调制、光电成像器件、光学信息存储和光电信息显示内容;本书的第七部分的光电技术设计性与综合应用实验紧密结合《光电技术》中的第 10 章光电探测方式与探测系统内容。

本书中的全部实验项目内容由江月松执笔,需要说明如下几点:



1. 按照本教材教学体系需求,选编了一些其他相关实验教材中的实验项目,在书后给出了有关参考书目,在此对这些教材的作者表示深深的感谢!

2. 在选编的实验项目中,有的根据我们的教学实践作了一些修改;有的实验项目是我们从科研成果中转化而来的,如“激光表面等离子体共振测量薄膜光学特性”、“光声光谱实验”等实验项目均为在国内光电技术教材和物理类教材中首次出现。

3. 本书列出的实验项目绝大多数是以分立元器件作为搭建实验装置的基础,很少采用目前不少教学仪器公司生产的一体化式的“集成”实验箱装置。作者认为:一体化式的实验箱虽然便于教师教学和节省实验操作时间,但不利于培养学生对客观事物内在关系结构的认识,不利于学生灵活应用知识和创新实践能力的培养。

4. 本书的出版得到了北京航空航天大学精品课程建设的支持,作者在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免有错误与不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2012年4月

于北京航空航天大学电子信息工程学院

目 录

第一部分 辐射度量的测量	1
实验 1 辐射体光谱能量分布的测量	1
实验 2 法向全发射率的测量	6
实验 3 法向光谱发射率的测量	16
实验 4 绝对反射比的测量	23
实验 5 辐射温度、亮度温度和有色温度的测量	29
第二部分 光电探测器	40
实验 6 光电探测器光谱响应度的测量	40
实验 7 光电探测器响应时间的测量	44
实验 8 光电探测器探测度的测量	49
实验 9 雪崩光电二极管	53
实验 10 光电倍增管的静态和时间特性的测量	59
实验 11 光电池的偏置与基本特性的测量	67
实验 12 光电探测器输出信号的信噪比匹配	76
第三部分 光电弱信号探测	82
实验 13 低噪声放大器	82
实验 14 有源滤波器	88
实验 15 锁相环及其应用	93
实验 16 微弱信号的锁定接收法	106
实验 17 取样积分原理	111
实验 18 光电信号的积累检测	116
实验 19 随机共振实验——用噪声检测弱信号	123
实验 20 光子计数	132
第四部分 光学调制器原理及信号解调方法	142
实验 21 光学调制盘	142
实验 22 光栅莫尔条纹测长原理	148



实验 23	光电轴角编码器	154
实验 24	声光调制器	160
实验 25	电光调制——激光通信的应用	168
实验 26	光外差原理	177
第五部分 成像器件与系统的性能测试及信号处理方法		184
实验 27	CCD 转移效率的测定	184
实验 28	CCD 相机的空间分辨率和最大作用距离的测定	188
实验 29	行扫描装置扫描参数的测定	193
实验 30	光电信号的采样和保持	198
实验 31	摄像机信号的应用原理	203
实验 32	线阵 CCD 成像传感器的原理与应用	214
实验 33	二维光强分布的立体显示	224
实验 34	图像的数据采集	227
第六部分 激光器的参数测量及其应用		232
实验 35	He-Ne 激光器的增益系数测量	232
实验 36	He-Ne 激光器的模式分析	238
实验 37	迈克尔逊干涉仪和马赫-曾德干涉仪	242
实验 38	光纤全息照相	246
实验 39	全息高密度信息存储	250
实验 40	白光散斑摄影测量方法	253
第七部分 光电技术设计性与综合应用实验		260
实验 41	光电报警系统设计	260
实验 42	尼柯夫盘扫描成像	265
实验 43	金属(钨)电子逸出功的测定	273
实验 44	光电定向	279
实验 45	激光多普勒测速	293
实验 46	莫尔三维测量	300
实验 47	激光表面等离子体共振测量薄膜光学特性	307
实验 48	光声光谱实验	314
参考文献		319

第一部分 辐射度量的测量

这部分所安排的实验从辐射度量学中一些基本的和常见的辐射量出发,通过实验加深对这些辐射量物理意义及其相互关系的理解。在实验中所用到的一些测量仪器也是光电技术类专业学生应当学会使用的。同时,通过实验还可以观察到一些物质的基本辐射特性,获得有关的感性认识,更重要的是通过实验掌握测量这些基本辐射量的主要方法。而了解和掌握这些方法又是进一步学习光电技术及其在实际中的应用所必需的。

实验 1 辐射体光谱能量分布的测量

物体的光谱辐射出射度(辐出度)是物体的温度、辐射波长以及该物体的发射率的函数。辐射源的光谱辐亮度(或光谱辐出度、光谱辐射强度)与波长的关系,称为辐射源的光谱能量分布。从光谱能量分布可以知道辐射源的辐射波长范围、某一波段的辐射通量值以及这一波段的能量占全波长积分辐射通量的百分比等。所以,辐射源光谱能量分布的测量,对于光电技术的科学实践和工程设计有着十分重要的意义。本实验利用光电法测量辐射源的相对光谱能量分布和绝对光谱能量分布。

一、实验目的

- ① 加深对辐射源光谱能量分布概念的理解;
- ② 掌握辐射源相对辐射亮度和绝对辐射亮度的概念、测量原理和基本测量方法。

二、实验原理

1. 辐射源的相对辐亮度的测量

辐射源的光谱能量分布,一般以光谱辐亮度为纵坐标,以波长为横坐标作图来表示。在大多数光谱测量中,往往并不知道光谱辐亮度的绝对值,而只要知道它们的相对值(即以峰值波长的光谱辐亮度为 1,其他波长的光谱辐亮度与其相比的百分数)就可以了。光谱辐亮度的相对值与波长的关系,就是辐射源的相对光谱能量分布。这种相对光谱能量分布关系曲线比较直观,在实际工程应用中被广泛采用。

测量辐射源的相对光谱能量分布,可以与标准源相比较。测量中常用单色仪作为分光器,并用钨带灯(标准温度灯)作为光谱辐射标准源。测量装置原理如图 1-1 所示。

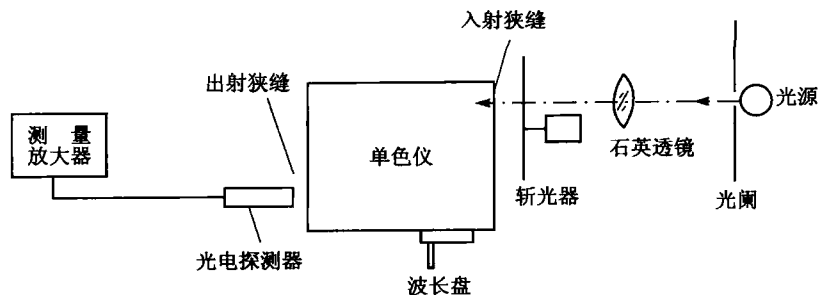


图 1-1 光电法测量相对光谱能量分布

根据热辐射定律,钨的光谱辐亮度 $L_w(\lambda, T)$ 与黑体的光谱辐亮度 $L_b(\lambda, T)$ 之间有下列关系:

$$L_w(\lambda, T) = \epsilon_w(\lambda, T) L_b(\lambda, T) \quad (1-1)$$

式中, $\epsilon_w(\lambda, T)$ 为钨的光谱发射率。表 1-1 列出了常用温度下钨的光谱发射率;表 1-2 列出了与此对应的温度下黑体的绝对光谱辐亮度。

表 1-1 钨的光谱发射率 $\epsilon_w(\lambda \cdot T)$

$\epsilon_w(\lambda, T)$ $\lambda/\mu\text{m}$ \ T/K	1 400	1 600	1 800	2 000	2 200	2 400	2 600	2 800
0.4	0.485	0.481	0.477	0.474	0.471	0.467	0.464	0.461
0.5	0.473	0.469	0.465	0.462	0.458	0.456	0.451	0.448
0.6	0.458	0.455	0.452	0.448	0.445	0.441	0.437	0.434
0.7	0.448	0.444	0.440	0.436	0.431	0.427	0.423	0.419
0.8	0.437	0.431	0.425	0.419	0.415	0.409	0.404	0.402
0.9	0.419	0.413	0.407	0.401	0.396	0.391	0.387	0.383
1.0	0.395	0.390	0.385	0.381	0.378	0.373	0.370	0.367
1.1	0.368	0.366	0.364	0.361	0.359	0.356	0.354	0.352
1.2	0.346	0.345	0.344	0.343	0.342	0.329	0.328	0.328
1.3	0.322	0.322	0.323	0.323	0.324	0.324	0.324	0.325
1.4	0.298	0.300	0.302	0.305	0.306	0.310	0.311	0.313
1.5	0.275	0.279	0.282	0.288	0.291	0.296	0.299	0.302
1.6	0.259	0.263	0.267	0.273	0.278	0.284	0.288	0.292
1.8	0.227	0.234	0.241	0.247	0.254	0.262	0.268	0.275
2.0	0.202	0.210	0.218	0.227	0.235	0.243	0.251	0.259
2.2	0.180	0.190	0.200	0.209	0.218	0.228	0.236	0.244
2.4	0.170	0.175	0.182	0.197	0.205	0.215	0.224	0.234
2.6	0.150	0.164	0.174	0.185	0.194	0.205	0.214	0.224



表 1-2 黑体的绝对光谱辐射亮度 $L_b(\lambda, T)$

T/K $L_b(\lambda, T)/$ $[W \cdot (sr \cdot m^2)^{-1}]$ $\lambda/\mu m$	1 400	1 600	1 800	2 000	2 200	2 400	2 600	2 800
0.4	0.808×10^5	0.200×10^7	0.244×10^8	0.180×10^9	0.922×10^9	0.360×10^{10}	0.114×10^{11}	0.307×10^{11}
0.5	0.451×10^7	0.589×10^8	0.435×10^9	0.215×10^{10}	0.795×10^{10}	0.237×10^{11}	0.595×10^{11}	0.131×10^{12}
0.6	0.558×10^8	0.474×10^9	0.251×10^{10}	0.951×10^{10}	0.238×10^{11}	0.701×10^{11}	0.151×10^{12}	0.292×10^{12}
0.7	0.298×10^9	0.187×10^{10}	0.778×10^{10}	0.244×10^{11}	0.621×10^{11}	0.135×10^{12}	0.261×10^{12}	0.460×10^{12}
0.8	0.958×10^9	0.477×10^{10}	0.166×10^{11}	0.452×10^{11}	0.102×10^{12}	0.202×10^{12}	0.361×10^{12}	0.591×10^{12}
0.9	0.222×10^{10}	0.923×10^{10}	0.280×10^{11}	0.681×10^{11}	0.141×10^{12}	0.258×10^{12}	0.432×10^{12}	0.671×10^{12}
1.0	0.410×10^{10}	0.148×10^{11}	0.402×10^{11}	0.895×10^{11}	0.172×10^{12}	0.297×10^{12}	0.472×10^{12}	0.703×10^{12}
1.1	0.648×10^{10}	0.208×10^{11}	0.517×10^{11}	0.107×10^{12}	0.194×10^{12}	0.319×10^{12}	0.486×10^{12}	0.699×10^{12}
1.2	0.913×10^{10}	0.267×10^{11}	0.613×10^{11}	0.120×10^{12}	0.207×10^{12}	0.326×10^{12}	0.480×10^{12}	0.670×10^{12}
1.3	0.118×10^{11}	0.318×10^{11}	0.687×10^{11}	0.127×10^{12}	0.211×10^{12}	0.322×10^{12}	0.461×10^{12}	0.628×10^{12}
1.4	0.144×10^{11}	0.360×10^{11}	0.736×10^{11}	0.131×10^{12}	0.209×10^{12}	0.310×10^{12}	0.434×10^{12}	0.579×10^{12}
1.5	0.166×10^{11}	0.392×10^{11}	0.764×10^{11}	0.131×10^{12}	0.203×10^{12}	0.294×10^{12}	0.402×10^{12}	0.527×10^{12}
1.6	0.185×10^{11}	0.413×10^{11}	0.774×10^{11}	0.128×10^{12}	0.194×10^{12}	0.274×10^{12}	0.369×10^{12}	0.477×10^{12}
1.8	0.210×10^{11}	0.429×10^{11}	0.752×10^{11}	0.118×10^{12}	0.171×10^{12}	0.234×10^{12}	0.305×10^{12}	0.385×10^{12}
2.0	0.220×10^{11}	0.420×10^{11}	0.697×10^{11}	0.105×10^{12}	0.147×10^{12}	0.196×10^{12}	0.250×10^{12}	0.309×10^{12}
2.2	0.218×10^{11}	0.394×10^{11}	0.627×10^{11}	0.913×10^{11}	0.125×10^{12}	0.162×10^{12}	0.203×10^{12}	0.248×10^{12}
2.4	0.210×10^{11}	0.361×10^{11}	0.555×10^{11}	0.786×10^{11}	0.105×10^{12}	0.134×10^{12}	0.166×10^{12}	0.199×10^{12}
2.6	0.196×10^{11}	0.326×10^{11}	0.486×10^{11}	0.672×10^{11}	0.882×10^{11}	0.111×10^{12}	0.135×10^{12}	0.161×10^{12}



当辐射源为标准光源时,对于不同的波长,光电探测器输出的光电压(或光电流)信号为

$$V_s(\lambda) = L_w(\lambda)\tau(\lambda)R(\lambda)\Delta\lambda \quad (1-2)$$

式中, $L_w(\lambda)$ 为标准光源的光谱辐亮度; $\tau(\lambda)$ 为光学系统(单色仪和透镜)的透射比; $R(\lambda)$ 为光电探测器的光谱响应度; $\Delta\lambda$ 为波长是 λ 时单色仪出射光的波长范围。

用待测辐射源代替标准光源,在单色仪出、入射狭缝不变的情况下,对于各个波长的光电压信号为

$$V_x(\lambda) \propto L_x(\lambda)\tau(\lambda)R(\lambda)\Delta\lambda \quad (1-3)$$

式中, $L_x(\lambda)$ 为待测辐射源的光谱辐亮度。

由式(1-2)和式(1-3)两式相除可得

$$L_x(\lambda) = k \frac{V_x(\lambda)}{V_s(\lambda)} L_w(\lambda) \quad (1-4)$$

式中, $V_x(\lambda)$ 和 $V_s(\lambda)$ 可由测量电表读出; $L_w(\lambda)$ 根据式(1-1)查表即可算出; k 是与波长无关的比例系数。在测量相对光谱辐亮度时,一般可以令 $k=1$, 因此可以算出待测辐射源的相对光谱辐亮度。

2. 辐射源的绝对辐亮度的测量

在计算辐射源的相对光谱辐亮度时,曾令比例系数 $k=1$,但在测量绝对光谱辐亮度时, k 就不能取 1 了,而需要考虑标准光源和待测辐射源的辐射面积及它们对单色仪入射狭缝所张立体角的影响。测量绝对光谱辐亮度的装置如图 1-2 所示。

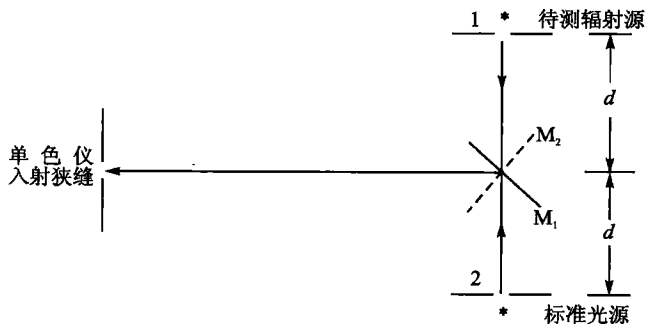


图 1-2 光电法测量绝对光谱能量分布

将标准光源与待测辐射源置于单色仪光轴两侧的对称位置处,它们的辐射面积分别由光阑 1、2 的透光面积 A_1 、 A_2 所限制,它们对轴线的距离都为 d 。反射镜到 M_1 位置时,测量标准光源;转到 M_2 位置时,测量待测辐射源。在单色仪出、入射狭缝不变的情况下,光电探测器输出的光电压信号为

$$V_{s0}(\lambda) = A_1 \Omega_1 L_w(\lambda)\tau(\lambda)R(\lambda)\Delta\lambda \quad (1-5)$$

$$V_{x0}(\lambda) = A_2 \Omega_2 L_{x0}(\lambda)\tau(\lambda)R(\lambda)\Delta\lambda \quad (1-6)$$



式(1-5)和式(1-6)相除可得

$$L_{x_0}(\lambda) = \frac{A_1}{A_2} \frac{V_{x_0}(\lambda)}{V_{s_0}(\lambda)} L_w(\lambda) \quad (1-7)$$

式(1-7)是在 A_1 、 A_2 相差不多时,认为立体角 $\Omega_1 = \Omega_2$ 而得出的。由于式中的 A_1 、 A_2 可以测量出来, $V_{x_0}(\lambda)$ 、 $V_{s_0}(\lambda)$ 可由电表读出, $L_w(\lambda)$ 可查表后由式(1-1)算出,因此,可以通过式(1-7)得到待测辐射源的绝对光谱辐亮度。

三、主要实验仪器

- ① 单色仪 1 台;
- ② 钨带灯(标准温度灯) 1 台;
- ③ 待测辐射源;
- ④ 光电探测器(或温差电堆) 1 只;
- ⑤ 测量放大器(或电流计) 1 台;
- ⑥ 微型电机和斩光器 1 套;
- ⑦ 石英透镜、反射镜 1 件;
- ⑧ 隐丝式光学高温计 1 套;
- ⑨ 可调光阑 2 台。

四、实验内容

1. 仪器调整

按图 1-1 将仪器排放好,并连接好线路。应当注意的是,光电探测器一定要与单色仪的出射狭缝紧密接触,以免杂散光照射到探测器上。单色仪的入射和出射狭缝都固定在某一相同宽度,测量放大器的增益也应固定。

用高温计精确测量待测辐射源和标准光源的温度,调节供给两光源的电功率(电流或电压值),使两光源的温度相等。

再将标准光源限制在单色仪入射准直管光轴的延长线上,调节光源与入射狭缝的距离,并将单色仪的出、入射狭缝调节到适当的宽度,使得从出射狭缝处得到最小的波长范围,又保证光源辐射功率足够大,并使电压表(或电流计)偏转满刻度或接近满刻度。

2. 辐射测量

① 整个系统调节好后,先用标准光源测量单色仪在各个波长处所对应的输出信号 $V_s(\lambda)$ 的值。

② 用待测辐射源取代标准光源,测出 $V_x(\lambda)$ 。

③ 按照图 1-2 将标准光源与待测光源置于单色仪光轴对称处,测出光阑 1、2 的透射面



积 A_1 和 A_2 , 重复上述步骤, 测出 $V_{\infty}(\lambda)$ 和 $V_{\text{so}}(\lambda)$ 的值。

3. 数据处理

- ① 根据式(1-1)、式(1-4)和式(1-7), 算出相对光谱辐亮度和绝对光谱辐亮度值。
- ② 画出 $L_x(\lambda)-\lambda$ 曲线和 $L_{\text{so}}(\lambda)-\lambda$ 曲线。
- ③ 进行误差分析。

五、思考题

1. 若测得物体的绝对光谱辐亮度后, 能否得出物体的光谱发射率和光谱辐出度? 为什么?
2. 在测量辐射源的绝对光谱能量分布时, 为什么要将标准光源与待测辐射源置于单色仪光轴对称位置处?
3. 为什么要保持待测辐射源和标准光源有相同的温度? 否则会产生什么影响?

实验 2 法向全发射率的测量

自然界中几乎所有的物质, 无论固体、液体或气体, 只要其温度在绝对零度以上, 都能向外辐射电磁波。为了衡量物体辐射本领的大小, 人们定义了发射率这个概念。发射率表征了物体热辐射本领与黑体辐射本领接近的程度, 它是广泛应用于天文观测、大气探测、对地观测遥感、工业、农业、显微学、太阳能研究、资源调查以及国防等领域的一个十分重要的参数。由于不同的应用需求和各类条件的限制, 发射率测量方法有多种。本实验列出辐射计法中的三种方法, 有关学校可根据自身的条件, 选择其中的一种或几种方法进行实验。

方法一

一、实验目的

- ① 熟悉红外波段的光在测量中涉及的仪器和装置, 掌握辐射计法测量全发射率的原理和方法;
- ② 深刻认识全发射率是材料基本辐射特性的表征, 是研究物质热物性的重要参数。

二、实验原理

实际物体的热辐射功率与相同条件下黑体的辐射功率之比称为发射率。

定义中所说的“相同条件”, 除温度外还包括几何条件和光谱条件。几何条件相同, 即指发射辐射的面积、测量辐射功率的立体角大小以及方向相同; 光谱条件相同, 即指所取辐射功率的光谱范围相同(对于全发射率, 理论上应取整个电磁波波长范围)。由于以上条件的限制, 全



发射率又可分为半球全发射率、方向全发射率以及法向全发射率,相应地还有一个对应的光谱发射率。

本实验仅就法向全发射率的测量做详细说明。

如果被测材料与黑体同在相对于表面的某 (θ, φ) 方向上一个很小的立体角 $d\Omega$ (或单位立体角) 内测量比较, 则称之为方向发射率。

关于某 (θ, φ) 方向, 是指三维空间内, θ 为天顶角, φ 为方位角的方向。在实际物体辐射时, 除特殊表面 (如纤维材料、纺织物品、有取向的晶体或沟槽表面) 的方向发射率随方位角 φ 变化外, 大多数物体的辐射与方位角 φ 无关, 只和天顶角 θ 有关。所以通常方向发射率可简化为天顶角 θ 的函数。

根据以上分析, 可用下式表达方向发射率:

$$\epsilon(\theta, T) = \frac{L(\theta, T)}{L_b(\theta, T)} \quad (2-1)$$

式中, T 是辐射体表面的热力学温度。如果测量时, 被测材料和黑体都在表面法线上 ($\theta=0$) 取一很小的立体角 $d\Omega$, 并在 $0 \sim \infty$ 的波长范围内测量其全辐射亮度, 则法向全发射率 $\epsilon_n(T)$ 定义如下:

$$\epsilon_n(T) = \epsilon(0, T) = \frac{L(0, T)}{L_b(0, T)} = \frac{L(T)}{L_b(T)} \quad (2-2)$$

式中, $L(T)$ 和 $L_b(T)$ 分别表示温度为 T 的实际物体和黑体在法线方向的辐亮度。

我们日常接触的大量实际材料, 大部分都接近朗伯辐射体。由朗伯余弦定律可知, 朗伯辐射体的辐亮度与方向无关, 从而得出朗伯辐射体的全发射率也与方向无关, 并且都等于相应的法向全发射率。所以在一般情况下, 测出材料的法向全发射率就能基本上反映材料的辐射特性。有时在谈到法向全发射率 $\epsilon_n(T)$ 时, 就简称发射率, 并省掉表示法向的下标 n 。

三、实验仪器与装置

本实验采用的主要仪器包括黑体炉、控温仪、样品炉、热电偶测温计、调制盘、直流调速电机、光阑、冰瓶、热探测器、稳压电源、毫伏表等。测量系统原理图示于图 2-1 中。

做实验前, 要弄清控温仪的控温原理与方法, 以及热探测器使用时的响应波长范围和必须加的偏置电压, 而且调制盘的调制频率必须稳定在某一固定值。为了提高控温精度和稳定调制频率, 所使用的直流稳压电源都必须通过交流稳压电源接入电网; 用热电偶测量黑体炉和样品炉温度时, 其冷端都插入冰瓶, 以稳定参考点。

四、实验内容

测量一个预先给定温度 (例如 500 K) 的材料的法向全发射率。

依据前述原理, 测量方法是: 通过控温仪将黑体炉和样品炉表面温度都控制在预先给定

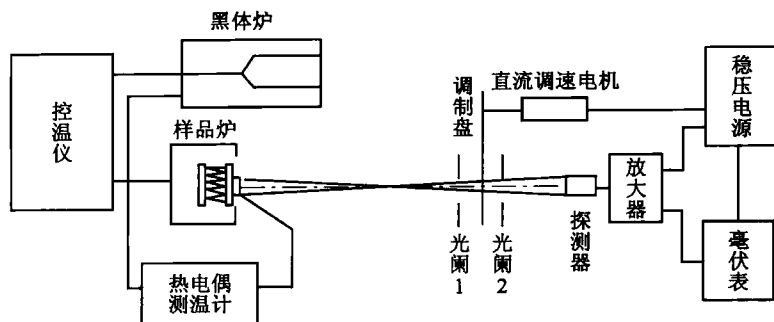


图 2-1 法向全发射率测量装置原理图

的温度上。将探测器垂直对准样品材料的辐射面,通过探测器和毫伏表读出由辐射能转换而得的电压信号;然后将黑体炉放在与样品炉相同的位置,用同样的方法再测一个电压信号。将这两个值进行比较,即可得出法向全发射率 $\epsilon_n(T)$ 。

设黑体炉的辐射面在其垂直法向的辐亮度为 $L_{b\Delta\lambda}$,调制器的辐亮度为 $L_{c\Delta\lambda}$,光阑 1 与环境杂散辐亮度为 $L_{w\Delta\lambda}$ 。当黑体放入光路后,探测器在其窗口材料允许的通带内接收辐射功率。热探测器的理论响应波长是无限的,实际响应波长取决于窗口材料的透射波段。对于 ZnS 材料,其透射波段为 $0.4 \sim 15 \mu\text{m}$ 。符号中的下标 $\Delta\lambda$ 即代表窗口材料决定的响应波长。经前置放大器放大后的电压信号为

$$V_{b\Delta\lambda} = k(L_{b\Delta\lambda} + L_{w\Delta\lambda} - L_{c\Delta\lambda})A\Omega\tau_{\Delta\lambda}\Delta\lambda \quad (2-3)$$

式中, k 为放大器的转换系数; Ω 为探测器对目标所张的立体角; A 为样品或黑体的被测表面积; $\tau_{\Delta\lambda}$ 为大气透过率 τ_1 与窗口材料透过率 τ_2 之积,即 $\tau_{\Delta\lambda} = \tau_1 \tau_2$ (若使用滤光片,则应再乘以滤光片的透过率); $\Delta\lambda$ 为透射波长范围。

移开黑体炉,同样将样品放入测量光路,探测器垂直接收辐射的功率,经放大器放大后输出电压信号为

$$V_{s\Delta\lambda} = k(L_{s\Delta\lambda} + L_{w\Delta\lambda} - L_{c\Delta\lambda})A\Omega\tau_{\Delta\lambda}\Delta\lambda \quad (2-4)$$

式中, $L_{s\Delta\lambda}$ 为样品炉的辐亮度。

如果将黑体炉和样品炉都移出测量光路,此时只剩下光阑 1 和环境杂散辐射与调制器的差分放大信号 $V_{w\Delta\lambda}$, 为

$$V_{w\Delta\lambda} = k(L_{w\Delta\lambda} - L_{c\Delta\lambda})A\Omega\tau_{\Delta\lambda}\Delta\lambda \quad (2-5)$$

将式(2-5)代入式(2-3)和式(2-4)得

$$kL_{b\Delta\lambda}A\Omega\tau_{\Delta\lambda}\Delta\lambda = V_{b\Delta\lambda} - V_{w\Delta\lambda} \quad (2-6)$$

$$kL_{s\Delta\lambda}A\Omega\tau_{\Delta\lambda}\Delta\lambda = V_{s\Delta\lambda} - V_{w\Delta\lambda} \quad (2-7)$$

然后用式(2-7)除以式(2-6),并对 λ 在 $\Delta\lambda$ 范围内积分(假定被测样品是灰体。因辐射能主要位于 $\Delta\lambda$ 之内,可以用 $0 \sim \infty$ 积分近似代替 $\Delta\lambda$ 积分),则得



$$\epsilon_n(T) = \frac{L_s(T)}{L_b(T)} = \frac{V_s - V_w}{V_b - V_w} \quad (2-8)$$

又因为

$$\epsilon_n(T) = \epsilon(T) = \frac{M(T)}{M_b(T)} = \frac{\epsilon(T)\sigma T^4}{\epsilon_b(T)\sigma T_b^4} \quad (2-9)$$

合并上两式得

$$\epsilon_n(T) = \epsilon(T) = \frac{V_s - V_w}{V_b - V_w} \frac{T_b^4}{T^4} \epsilon_b(T) \quad (2-10)$$

由式(2-10)可知,若控制 $T = T_b$,则有

$$\epsilon_n(T) = \frac{V_s - V_w}{V_b - V_w} \epsilon_b(T) \quad (2-11)$$

做实验时,通过控温仪给定一个控制温度(例如 500 K),让黑体炉和样品炉控制在同一温度。待温度稳定后,让探测器处于工作状态,使黑体炉在测量光路中,通过毫伏表读得一个电压值 V_b 。然后,用一块较厚的纸板放置在黑体炉口前,挡住光路。这时,毫伏表显示出电压值 V_w 。接着把黑体炉移出光路,将样品炉放在相同位置,重复测量,得出样品 1 的电压值 V_{s1} 。

一种材料测完后,用石棉手套旋下样品,再换上新的样品。待温度稳定后,又可测出样品 2 的 V_s 和 V_w 。这样就可以测出不同材料在这一温度的辐射能量,通过式(2-11)计算,便可得出所测材料在该温度下的法向全发射率。将记录和计算结果填入表 2-1 中,做出实验报告。

用与上面同样的方法,只要改变控温值,即可作出材料法向全发射率随温度变化的曲线。由于改变控温值需要较长的稳定时间,教师可根据实验课时的安排决定取舍。

表 2-1 实验记录及结果

材 料	控 温		V_b/mV	V_w/mV	V_s/mV	ϵ_n
	设定电压值/mV	对应温度/℃				
45# 钢						
铜						
铝						
红外涂料						

五、注意事项

① 在接入探测器时,必须注意不能接错电源的正负极,并保证电压稳定在额定值。

② 为了精确控制调制盘频率,在调制盘处配有数字频率计,在测量过程中应时刻监视,使频率稳定在某一固定值。



③ 在测量过程中应保持环境温度、湿度稳定,尽量避免人员走动,以免影响测量结果的精度。

六、思考题

在测量过程中,如果所测的 V_s 、 V_w 、 T 、 T_b 、 ϵ_b 等均有一定误差,试对此测量方法进行误差分析,得出误差分析的解析式,并由解析式进行分析。通过分析指出减小测量误差的途径。

方法二

本方法是用红外热像仪测量材料的全发射率。由于所用定标对象不同,又分为直接测量法和比较法两种。

一、实验目的

通过本实验使学生了解热像仪的基本结构,学会正确使用红外热像仪,掌握用红外热像仪测量材料全发射率的原理和方法。

二、实验原理

红外热像仪是利用红外热成像原理制成的光电转换仪器,它将人眼看不见的红外图像转换成可见光图像,并可以用来测量物体表面温度场的分布。待测样品上各个像点经光学系统和光机扫描逐点依次成像于红外探测器的光敏面上。由于红外探测器和扫描器的作用,使空间变化的红外辐射信号变成按时间变化的电信号,然后经过信号处理,使其变成串行的图像信号,显示器再将串行的图像信号变成可见光图像。操作人员可根据热像仪荧光屏上图像的亮度来区分温度的高低。较亮的部分表示温度较高,较暗的部分表示温度较低。

1. 直接测量法

直接测量法是把待测样品的辐射与相同温度下假想黑体的辐射相比较。

热像仪接收并检测到的红外辐射数值大小在仪表上可以显示出来,该数值称为热值,用符号 I 表示。热值与热像仪的光子探测器所接收到的量子数 $\phi(T)$ 之间呈线性关系,即

$$I = A\phi(T) \quad (2-12)$$

式中, A 是由实验确定的仪器常数。

由温度为 T 的黑体在热像仪上所产生的热值为

$$I_b = A\phi_0(T) \quad (2-13)$$

由温度为 T 、全发射率为 $\epsilon(T)$ 的样品在热像仪上所产生的热值为

$$I_s = A\phi'_0(T) = A\epsilon(T)\phi_0(T) \quad (2-14)$$

将式(2-13)与式(2-14)比较,就得到样品的全发射率为