

荧光微区温度场成像的实验报告

郑鹏凯*, †

安徽师范大学 物理系, 安徽 241000

【摘要】 本实验围绕荧光微区温度场成像技术展开, 采用二价钐掺杂四硼酸锶 $\text{SrB}_4\text{O}_7:\text{Sm}^{2+}$ 温敏荧光薄膜作为温度传感介质, 在显微镜光学系统和双通道相机测量平台上, 实现微区表面温度场的非接触成像。首先介绍荧光温度传感的背景与优势, 分析基于荧光强度比的测温原理, 并给出 FIR 与温度之间的指数关系表达式。在此基础上, 通过显微镜热台构建均匀温度场, 在 $120^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 范围内测量不同温度下的 FIR 分布, 获得 FIR-温度标定曲线, 提取有效能级能差 $\Delta E/k \approx 4655.05 \text{ K}$, 计算相对温度灵敏度 S_R 及对应的温度分辨率。结果表明, 在整个定标温区内 S_R 始终优于 $2\% \text{ K}^{-1}$, 最高可达约 $3.01\% \text{ K}^{-1}$, 系统温度分辨率优于数开尔文。随后, 以覆盖荧光薄膜的 PCB 电路板为研究对象, 改变通电电流获取不同工作状态下的温度场分布, 直观揭示电路热点及其空间扩展特征。实验表明, 基于温敏荧光材料和荧光强度比标定的温度场成像方法能够在兼顾空间分辨率、温度灵敏度和时间响应的前提下, 实现微米量级尺度上的二维温度场可视化, 为微纳集成器件热管理与故障诊断提供了一种有效的实验手段。

【关键词】 荧光温度传感, 温敏荧光材料, 温度场成像, 荧光强度比, PCB 电路板

Fluorescence Micro-Region Temperature Field Imaging

Pengkai Zheng,

Department of Physics, Anhui Normal University, Anhui 241000, China

Abstract: This experiment focuses on fluorescence micro-region temperature field imaging. A temperature-sensitive phosphor film of $\text{SrB}_4\text{O}_7:\text{Sm}^{2+}$ is employed as the sensing medium, combined with a microscope-based optical system and a dual-channel camera setup to achieve non-contact surface temperature mapping. The principle of fluorescence thermometry is first introduced, with emphasis on the advantages of using temperature-dependent luminescence and the fluorescence intensity ratio (FIR) method. An exponential relationship between FIR and temperature is established. A uniform temperature field is then generated by a microscope heating stage, and FIR distributions are measured in the range of 120°C to 200°C . From the FIR-temperature calibration curve, an effective energy gap of $\Delta E/k \approx 4655.05 \text{ K}$ is obtained, and the relative temperature sensitivity S_R as well as the corresponding temperature resolution are evaluated. The results show that S_R remains better than $2\% \text{ K}^{-1}$ over the whole calibration range and reaches up to about $3.01\% \text{ K}^{-1}$, while the temperature resolution is within several kelvin. Subsequently, a PCB board coated with the phosphor film is used as a test sample. By varying the driving current, temperature field distributions under different operating conditions are acquired, clearly revealing the hot spots of the circuit and their spatial extension. The experiment demonstrates that fluorescence intensity ratio-based temperature field imaging with a temperature-sensitive phosphor can simultaneously provide high spatial resolution, high temperature sensitivity and fast temporal response, offering an effective experimental tool for thermal management and fault diagnosis of micro- and nano-scale integrated devices.

Key Words: fluorescence thermometry, temperature-sensitive phosphor, temperature field imaging, fluorescence intensity ratio, PCB board

实验时间: 2025-11-7

报告时间: 2025-11-8

† 指导教师

*学号: 23111401194

*E-mail: 23111401194@ahnu.edu.cn

1 引言

随着集成电路、集成光电器件和集成光学芯片等微纳集成器件的尺寸不断缩小、工作频率持续提高,器件内部的局部过热问题日益突出。材料的电导率、折射率等关键参数对温度高度敏感,局部温度异常不仅会导致器件性能急剧退化,严重时还可能造成不可逆损伤。因此,在微米甚至亚微米尺度上获取器件表面温度场的空间分布,对器件结构优化设计、热管理方案制定以及故障诊断具有重要意义。

现有的微纳尺度温度测量方法主要包括微型热电偶、红外热成像、扫描热显微镜以及荧光热成像等。微型热电偶和基于热辐射的红外热像在空间分辨率方面存在先天不足,一般极限分辨率分别约为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10\text{ }\mu\text{m}$; 扫描热显微镜具有很高的空间分辨率,可以达到 50 nm ,但依赖逐点机械扫描,无法实现大视场的实时温度场成像。相比之下,基于发光材料荧光温敏特性的温度场成像方法可有效兼顾空间分辨率、响应时间和温度灵敏度这三个维度的需求,理论上空间分辨率可优于 500 nm ,温度分辨率可优于 0.1 K ,时间分辨率可达毫秒量级,适合用于微区温度场的快速二维成像。

荧光温度传感利用材料荧光温敏特性(如强度、寿命、峰值或带宽等随温度的变化)的温度测量具有多方面的优势。相比有机染料、聚合物和半导体量子点等材料,稀土离子掺杂无机发光体具有化学和光学稳定性好、工作温区宽、能级结构丰富等优点,适合在严苛环境下长期工作。本实验选用二价钐掺杂四硼酸锶 $\text{SrB}_4\text{O}_7:\text{Sm}^{2+}$ 作为温敏荧光层,通过显微镜物镜激发和成像,在双通道相机上同时获取两个光谱波段的荧光强度,利用荧光强度比(fluorescence intensity ratio, FIR)方法进行温度标定和温度场重建。

本实验的目标是:在掌握荧光温度传感基本原理的基础上,理解基于荧光强度比的温度场成像方法,完成 $\text{SrB}_4\text{O}_7:\text{Sm}^{2+}$ 材料的温度定标,评估其温度灵敏度和温度分辨率,并实现 PCB 电路板表面温度场的二维成像,为后续微纳器件热场测量与分析提供实验基础。

2 实验简介

2.1 实验装置与样品

实验采用荧光微区温度场成像实验仪(含配套温度场成像软件)、显微镜热台、直流电源、温敏荧光薄膜、羽毛标本以及覆盖荧光薄膜的 PCB 电路板等。

荧光微区温度场成像系统的光路结构如图1所示。波长为 365 nm 的紫外激发光源以约 45° 入射到二向色镜(长波高透、短波高反),经二向色镜反射后的紫外光由显微镜物镜汇聚并聚焦在样品表面,激发样品表面覆盖的温敏荧光薄膜。荧光由物镜收集后穿过二向色镜,再经分束器分为左右两路:一路前放置 590 nm 短波通滤光片,另一路前放置 650 nm 长波通滤光片,两路后端分别接入高灵敏度黑白相机,用于记录两个光谱波段的荧光强度分布。显微镜物镜可在 $4\times$ 、 $10\times$ 、 $40\times$ 等多种倍率之间切换,以兼顾空间分辨率与视场范围。

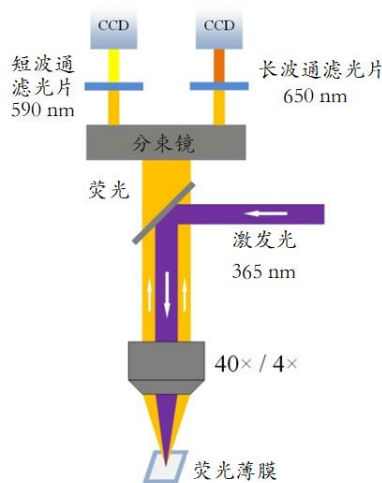


图1 荧光微区温度场成像实验仪光路结构示意图

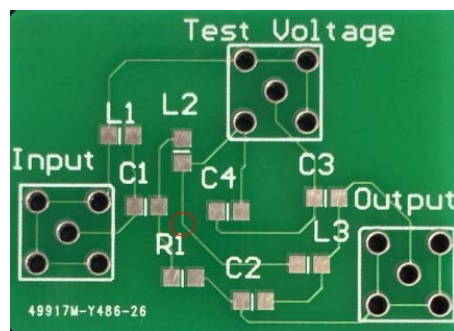


图2 PCB 电路板实物图(红圈为测量区域)

为验证系统对空间非均匀温度场的测量能力, 选取一块覆盖荧光薄膜的 PCB 电路板作为待测样品, 其实物如图2 所示。图中红圈标记区域为实验的实际测量区域, 通过调节物镜与载物台位置, 使该区域落在视场中心并获得清晰成像。

3 实验原理

3.1 荧光温度传感原理与温敏材料

荧光温度传感依赖发光材料的荧光强度、寿命或谱形等对温度的依赖关系。对于 $\text{SrB}_4\text{O}_7:\text{Sm}^{2+}$ 材料, 在 $40^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ 温区的归一化发射光谱如图3 所示。585 nm 附近的宽带发射源于 Sm^{2+} 离子 $5d \rightarrow 4f$ 跃迁, 684 nm 附近的窄带发射源于 Sm^{2+} 离子 $4f$ 组态内 $5D_0 \rightarrow 7F_0$ 跃迁。随着温度升高, 二者的相对强度比发生显著变化。

若记 585 nm 附近宽带发射强度为 I_A , 684 nm 附近窄带发射强度为 I_B , 则在玻尔兹曼分布近似下, 两能级布居数之比随温度变化, 可将荧光强度比 FIR 定义为

$$\text{FIR} = \frac{I_A}{I_B} \propto \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (1)$$

其中 ΔE 为两个发光能级之间的有效能差, k 为玻尔兹曼常数, T 为热力学温度。对式(1) 取对数可得

$$\ln(\text{FIR}) = -\frac{\Delta E}{k} \frac{1}{T} + d, \quad (2)$$

其中 d 为与激发条件、探测效率等相关的常数。通过在已知温度下测量 FIR 并对 $\ln(\text{FIR})-1/T$ 数据进行线性拟合, 即可求得 $\Delta E/k$, 并建立 FIR-温度标定关系。

$\text{SrB}_4\text{O}_7:\text{Sm}^{2+}$ 的激发光谱如图4 所示, 其有效激发波段从紫外延伸至可见, 适合采用 365 nm 紫外 LED 等常规光源作为激发。材料在紫外激发下具有较高量子效率, 吸收能量主要以发光形式释放, 其自身光加热效应较弱, 不会在测温过程中引入显著系统误差。而基于上转换的温度传感荧光材料, 由于上转换发光的量子效率较低, 一般都在 1% 的量级, 且必须用加大功率密度的激光作为激发光源, 普遍存在较强的激光诱导的局域加热效应, 会给温度的测量引入较大的系统误差。我们所采用的 $\text{SrB}_4\text{O}_7:\text{Sm}^{2+}$ 材料采用紫外光作为激发光源, 且发光过程具有较高的量子效率, 可以有效地避免激发光源的热效应对测量引入的系统误差。

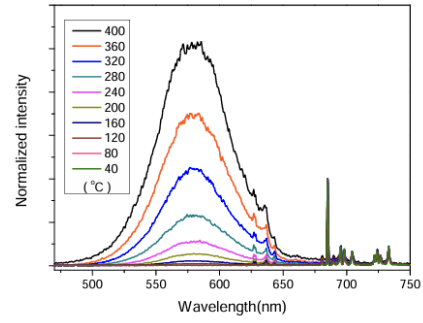


图 3 $\text{SrB}_4\text{O}_7:\text{Sm}^{2+}$ 的变温发射光谱

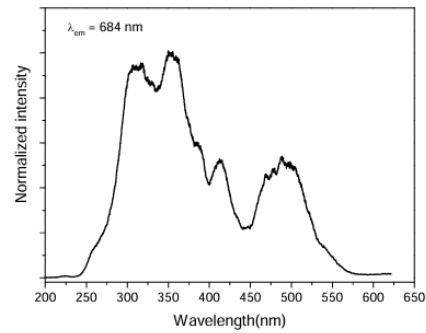


图 4 $\text{SrB}_4\text{O}_7:\text{Sm}^{2+}$ 的激发光谱

4 实验内容

4.1 两路相机的图像校准

为了保证温度重建过程中两路图像在空间上严格对应, 需要对 A、B 两路相机进行几何与亮度校准。具体步骤如下:

(1) 打开温度场成像软件 (桌面图标名称为 TI), 进入“基础设置”→“相机参数设置”界面, 实时观察两路相机画面。

(2) 将图像校准用的标本置于显微镜载物台上, 打开底座照明光源, 调节亮度使图像既不过暗也不过曝。

(3) 通过粗调、微调旋钮调整物镜位置, 使图像清晰度最佳。

(4) 分别调节两路相机的曝光时间、增益以及水平/竖直翻转选项, 使 A、B 两路图像在亮度和位置上尽量一致, 参数确定后保存设置。

(5) 执行“基础设置”→“两路图像校准”功能, 系统自动完成配准。若校准后图像位置仍有明显漂移, 则可更换标本区域并重新调焦, 重复上述步骤直至配准误差可接受。

4.2 温度定标实验方法

温度定标前, 将图像校准标本从显微镜载物台上移除, 换入覆盖温敏荧光薄膜的硅片。硅片置于显微镜热台中心, 整体放在载物台上, 调整载物台使薄膜区域位于物镜正下方, 并开启 365 nm 紫外光源。

在室温下重新检查 B 路相机图像, 通常将曝光时间设置为 20 ms 左右以保证灰度分布适中, 再通过调焦使薄膜边缘等细节清晰成像。调焦完成后, 将视野移至薄膜中心区域, 可适当微调。

在温度定标和后续测量过程中, A、B 两路相机参数需保持不变。一般 B 路曝光时间取 20–50 ms, A 路曝光时间约为 B 路的 5 倍, 增益在 1.75–5 范围内选取合适值。

利用热台温控器设定目标温度, 从 110°C 开始, 每隔 10°C 测量一次 FIR, 直至 250°C。当温度达到设定值并稳定约 5 分钟后, 执行“温度定标”→“FIR 测量”功能, 获取薄膜表面的 FIR 二维分布图, 记录当前温度下 FIR 的平均值和分布宽度。FIR 统计分布数据保存在 Data 目录下的 FIR_Distribution.txt 文件中。

全部温度点测量完成后, 关闭温控器并移除热台。按照式(2)对 $\ln(\text{FIR})$ 与 $-1/T$ 数据进行线性拟合, 斜率给出 $\Delta E/k$, 截距给出常数 d 。将拟合得到的参数输入“温度定标”→“定标参数输入”界面, 完成系统温度标定。

4.3 PCB 电路板温度场成像

在完成定标后, 将覆盖温敏荧光薄膜的 PCB 电路板放置于显微镜载物台上, 调节位置和焦距使测量区域清晰成像。使用直流电源向电路板供电, 将电极与电路相连, 初始电流可设为 2.5 A, 此时通电部分会产生明显发热。

通过观察荧光颜色可初步判断温度分布: 靠近电路的高温区域通常呈黄色或黄白色荧光, 远离电路的低温区域则偏红色。调整“温度场成像”→“单次成像”功能中的温度显示范围(如 120°C ~ 160°C), 在界面中实时查看伪彩色温度场分布, 选择适当视野后保存温度场数据。Temperature_1.txt 文件记录竖直方向三条线(1/4、1/2、3/4 位置)的温度分布, Temperature_2.txt 文件记录水平方向三条线(1/4、1/2、3/4 位置)的温度分布。

在保证荧光信号不过饱和的前提下, 选取 2.5–2.7 A 范围内的三个不同电流, 对应采集三组温度场分布, 用于分析电流变化对 PCB 表面温度场的影响。

5 实验结果与分析

5.1 温度定标曲线与灵敏度

根据定标实验获得的 FIR 数据, 对 $\ln(\text{FIR})$ 与 $-1/T$ 做线性拟合, 得到关系曲线如图7所示。拟合结果表明, 在 110°C ~ 250°C 范围内, 实验数据与式(2)拟合较好, 相关系数接近 1, 说明 FIR–温度关系在该温区内可以视为单指数函数。

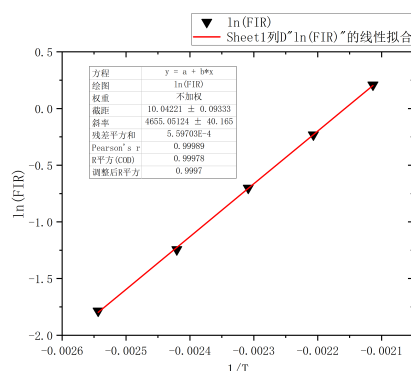


图5 FIR 与温度之间的关系拟合示意图

由拟合斜率提取的有效能级差为

$$\frac{\Delta E}{k} \approx 4655.05 \text{ K},$$

明显高于常见 Er^{3+} 掺杂测温材料中典型的 $\Delta E/k \approx 1000 \text{ K}$ 。由于相对温度灵敏度

$$S_R = \frac{1}{\text{FIR}} \frac{d\text{FIR}}{dT} = \frac{\Delta E}{kT^2}, \quad (3)$$

与 ΔE 成正比, 因此该材料在相同温度下具有更高的温度灵敏度, 有利于提高测温精度。

表1汇总了部分温度点下 FIR 的平均值、标准差、相对温度灵敏度以及由测量不确定度反推出的温度分辨率。其中, 温度分辨率由

$$U_T = \frac{1}{S_R} \frac{U_{\text{FIR}}}{\text{FIR}} \quad (4)$$

估算得到, U_{FIR} 用 FIR 测量结果的标准差代替。

可以看到, 在整个定标温区内, S_R 始终优于 $2\% \text{ K}^{-1}$, 在低温段可达约 $4.1\% \text{ K}^{-1}$ 。对应的温度分辨率普遍在数开尔文量级, 对于微区温度场成像和热点识别已具有较高的实用价值。

表 1 温度定标参数

温度 (°C)	FIR 平均值	标准差	相对灵敏度 (%K ⁻¹)	温度分辨率 (K)
120	0.1677	3.43×10^{-3}	3.01	0.68
140	0.2882	5.27×10^{-3}	2.73	0.67
160	0.4957	8.23×10^{-3}	2.48	0.67
180	0.7930	1.34×10^{-2}	2.27	0.74
200	1.2322	3.14×10^{-2}	2.08	1.22

图6 给出了不同定标温度下 FIR 的统计分布示意图。温度越高时, FIR 分布的宽度有所增加, 主要与荧光信号噪声增大和局部温度微小不均匀性有关, 但整体分布仍集中, 说明系统测量稳定性较好。

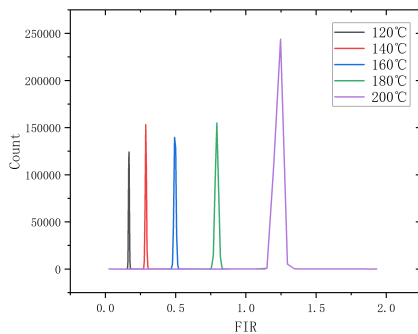


图 6 不同定标温度下 FIR 统计分布示意图

5.2 PCB 温度场分布及误差分析

对不同电流下 PCB 表面温度场的伪彩色图像进行分析, 可以观察到发热电路附近形成明显的高温条带或局部热点区域, 温度沿垂直于电路方向快速下降, 沿电路延伸方向则出现较长的温度梯度尾部。这一分布特征反映了电路几何形状、导线宽度以及基板导热性能等因素对热扩散过程的综合影响。

通过提取 `Temperature_1.txt` 和 `Temperature_2.txt` 中的温度曲线, 可以定量比较不同位置的温度分布和梯度大小。随电流增大, 热点区域的最高温度显著升高, 高温区域的面积也随之扩大。若结合电源功率和电路等效热阻进行估算, 可进一步对实验结果和理论热分析模型进行对比。

误差来源主要包括以下几类:

(1) **系统误差:** 定标过程中热台温度并非绝对均匀, 温控器读数与实际样品表面温度之间存在偏差; 光学系统中滤光片透过率、相机响应曲线等

会引入 FIR 与理论值之间的系统偏移。

(2) **偶然误差:** 相机读出噪声、激发光源强度微小波动、样品表面荧光层厚度不均匀等都会导致像素间 FIR 值的随机散布; 接线接触不良可能造成局部电流密度异常, 引起个别位置温度偏高或偏低。

(3) **数据处理误差:** FIR 计算过程中若未对暗场噪声进行准确扣除, 或在统计平均时未合理剔除明显异常点, 会对拟合结果和灵敏度估计产生影响。

综合来看, 本实验在定标温区内系统误差可以通过与热台读数的对比和多次重复测量加以控制, 而偶然误差在统计意义下可以通过空间平均和重复采样减小。结合表1 给出的标准差和温度分辨率估算, 系统整体测量不确定度在数开尔文量级。

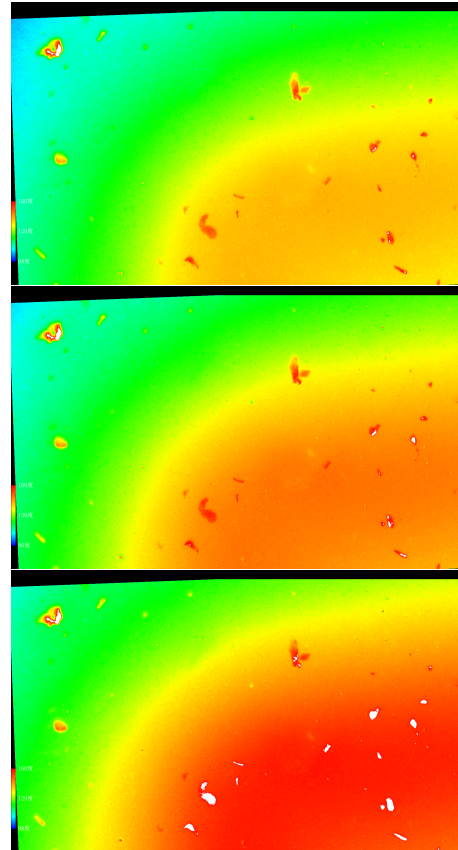


图 7 稳定时 PCB 上的温度分布图, 从上到下的工作电流大小依次为: 2.5、2.6 和 2.7A

6 原始数据

由于原始数据量较大, 实验中部分典型结果以图片形式保存。图8 给出 PCB 电路板温度场数据示意, 用于展示温度场整体结构。

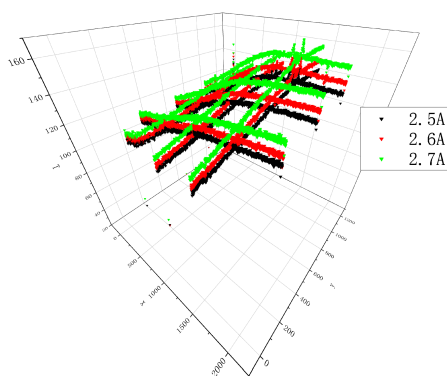


图 8 PCB 电路板温度场数据示意图

7 结论

本实验基于 $\text{SrB}_4\text{O}_7:\text{Sm}^{2+}$ 温敏荧光材料, 搭建了显微荧光温度场成像系统, 完成了从荧光强度比温度定标到 PCB 表面温度场成像的完整实验流程。通过对 FIR-温度关系的测量与拟合, 获得了有效能级差 $\Delta E/k \approx 4655.05 \text{ K}$, 在 $120^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 温度范围内, 相对温度灵敏度始终优于 $2\% \text{ K}^{-1}$, 最高可达约 $3.01\% \text{ K}^{-1}$, 对应的温度分辨率为数开尔文量级, 表明该材料温度响应灵敏、测量精度较高。

在 PCB 电路板温度场成像实验中, 成功获取了不同工作电流下板面温度场的二维分布, 清晰观测到热点位置、温度梯度以及高温区域随电流变化的扩展情况, 验证了荧光温度场成像技术在微区非均匀温度场测量中的有效性。相比传统接触式测温方法, 本方法具备非接触、高空间分辨率和可实时成像等优势, 适合用于微纳集成器件的热管理与故障分析。

从学习角度看, 本实验不仅加深了对荧光温度传感物理机制的理解, 也训练了在复杂光学系统下进行图像配准、数据拟合和不确定度评估的能力。后续工作中, 可考虑引入时间分辨荧光测量, 探索基于荧光寿命的温度成像方案, 并结合更精细的热学模型, 对实验结果进行更为系统的定量分析。

8 思考题

1、在温度定标的过程中, 为什么不测量温度在 100°C 以下的温度区间?

(1) 在较低温度下, 上、下能级之间的热激发不足, FIR 对温度的变化不够敏感, 信号变化量与

系统噪声处于同一量级, 测量不确定度很大;

(2) 热台在接近室温的区间内温场往往不够稳定、均匀, 温控误差和环境温度波动更容易影响定标精度;

(3) 本实验关注的是电子器件工作时的发热区间, 典型工作温度多高于 100°C , 因此在应用相关的温度范围内进行定标即可。

2、系统成像的温度灵敏区间主要由什么决定的? 如果想在其他温度区间进行温度场成像应该如何实现?

(1) 两热耦合能级间的能级差 ΔE 决定了 FIR-T 关系的变化速率, 不同 ΔE 对应不同的最优灵敏温区; 相机、光学系统的动态范围和噪声水平限定了可分辨的最小 FIR 变化量, 从而限定了有效温区。

(2) 若希望在其他温度区间进行温度场成像, 可以: 选用能级差更适合目标温区的荧光材料或其他发光中心; 调整掺杂浓度, 使有用发射谱线在目标温区内具有足够信噪比; 在新的温度区间内重新进行 FIR-温度定标, 建立对应的标定曲线后再进行成像。

3、周围的环境光线是否对测量有影响? 如果有影响应该如何降低或避免?

(1) 周围环境光线会对测量产生影响, 尤其是当环境光在光谱上与荧光发射波段有重叠时, 会引入背景信号, 降低信噪比并造成系统偏差。

(2) 为降低或避免影响, 可以采取以下措施: 在暗室或遮光罩内进行实验, 尽量屏蔽环境散射光; 在探测端加入窄带干涉滤光片, 只允许目标发射波段的光进入相机; 采集暗场图像或背景图像, 在数据处理中做背景扣除; 采用短曝光、同步调制和锁相检测等手段, 提高与激发光同步的荧光信号占比, 进一步抑制环境光干扰。

参考文献

- [1] 崔执凤. 安徽省高校重点课程建设教材近代物理实验 [M]. 芜湖: 安徽师范大学出版社, 2013.