

ICCD 双色热图像温度场检测系统的波长选择

张华 廖宝剑[√] 潘际奎

(清华大学机械工程系, 北京, 100084)

055/2

A **摘要** 综合考虑了 ICCD 双色热图像温度场检测系统所涉及的辐射源辐射特性、滤光片透过率及接收 ICCD 光谱响应特性等因素, 提出了系统工作波长的理想选择。

关键词 双色测温, ICCD, 温度场, 波长选择。

引言

双色测温是常见的测温方法, 在常用的双色测温系统中, 接收器件一般都是具有高信噪比、高稳定性的单元器件^[1,2]。作为新型的敏感元件, ICCD 已在许多领域中得到了广泛应用, 如用 ICCD 来获取双色热图像, 然后通过计算机图像系统进行灰度比值处理, 可望得到目标局部区域的温度场分布, 这在金属轧制、磨削加工、焊接等热过程中具有重要的意义。本文介绍了 ICCD 双色热图像温度场检测系统的组成, 着重讨论了采用 ICCD 作为双色接收器件进行测温时双色波长的选择问题, 为双色 ICCD 热图像进行温度场检测提供了理论基础。

1 双色 ICCD 热图像温度场检测系统

采用 ICCD 作为辐射接收器件的测温系统主要由辐射目标、光学成像器件、双色调制盘、ICCD 以及计算机图像处理子系统组成。系统的工作过程是: 目标物体的热辐射经过光学成像器件并由双色调制盘调制在 ICCD 上交替形成双色热图像, 使用计算机图像处理子系统进行灰度比值处理得到目标物体的温度场分布。双色热图像的质量主要由目标物体的辐射特性、滤光片的透过率特性以及 ICCD 的光谱响应特性等决定。系统检测的实时性由双色调制盘和计算机图像处理子系统等决定。

普朗克定律描述了物体的热辐射特性, 温度为 $T(K)$ 的物体光谱辐射度为

$$M[\lambda, \epsilon(\lambda), T] = \epsilon(\lambda) \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}), \quad (1)$$

式(1)中 $\epsilon(\lambda)$ 为与辐射波长 λ 有关的物体发射率, c_1, c_2 分别为第一、二辐射常数, 其中 $\epsilon(\lambda) = 1$ 对应于黑体辐射。

双色测温的波长选择是通过滤光片实现的, 一般采用干涉滤光片, 其透过率函数为

* 国家自然科学基金和国家教委博士点基金资助项目
本文 1996 年 1 月 19 日收到, 修改稿 1996 年 6 月 6 日收到

$$\gamma_i(\lambda) = I_i \left[1 + \sin^2\left(\frac{\pi k \lambda}{\lambda}\right) \sin^{-2}\left(\frac{\pi k \lambda}{\lambda - \delta\lambda/2}\right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

式(2)中 $i=1,2$ 为 2 个滤光片, I_i 为峰值透过率, λ 为中心波长, $\delta\lambda$ 为带宽, k 为干涉级次, 其中 $\delta\lambda$ 由 λ 和 k 等决定^[3], 这些参数除 k 外均在干涉滤光片设计和制作后测试确定。

干涉滤光片制作性能好坏对双色测温至关重要, 滤光片透过率形状对测温精度影响很大^[4], 由式(2)得到的 2 个滤光片透过率曲线如图 1 所示, 它们的中心波长分别为 0.78 μm 、0.92 μm , 带宽都为 0.01 μm , 峰值透过率分别为 80.5%、73%。

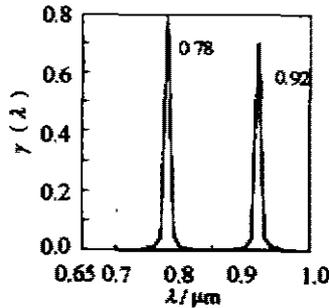


图 1 滤光片透过率曲线
Fig. 1 Transmission curve of filters

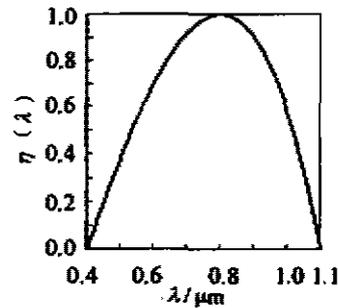


图 2 ICCD 光谱响应曲线
Fig. 2 Spectral response curve of ICCD

以独特的自扫描方式成像的面阵 ICCD 为形象而直观地检测温度场提供了理想的传感手段, 不同材料、电极结构的 ICCD 具有不同的光谱响应, 采用 Si 衬底典型 ICCD 光谱响应曲线如图 2 所示, 使用多项式拟合得出相对光谱响应拟合函数为

$$\eta(\lambda) = \sum_{j=1}^n a_j \cdot \lambda^j, \quad (3)$$

式(3)中 n 为拟合选取的典型数据, a_j 为多项式拟合系数。

目标物体辐射源经过包括双色调制盘在内的光学成像系统成像在 ICCD 光敏面上, 然后经过 ICCD 光电转换而得到双色视频信号为

$$Q_i(T) = \int_{\lambda_1 - \delta\lambda_i/2}^{\lambda_1 + \delta\lambda_i/2} c \cdot \tau \cdot M[\lambda, \varepsilon(\lambda), T] \cdot \gamma_i(\lambda) \cdot \eta(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

式(4)中 $i=1,2$, λ_1, λ_2 分别为 2 个干涉滤波片的峰值波长, $\delta\lambda_1, \delta\lambda_2$ 分别为它们的带宽, c 为与光学成像系统有关的常数(目标距离、光圈等), τ 为 ICCD 的曝光时间。

$Q_i(T)$ 信号经过计算图像系统 A/D 转换之后成为图像灰度信号 $N_i(T)$, 则双色热图像灰度值之比为

$$R(T) = \frac{N_{\lambda_1}(T)}{N_{\lambda_2}(T)} \approx \frac{Q_{\lambda_1}(T)}{Q_{\lambda_2}(T)} = \frac{\int_{\lambda_1 - \delta\lambda_1/2}^{\lambda_1 + \delta\lambda_1/2} M[\lambda, \varepsilon(\lambda), T] \cdot \gamma_1(\lambda) \cdot \eta(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_2 - \delta\lambda_2/2}^{\lambda_2 + \delta\lambda_2/2} M[\lambda, \varepsilon(\lambda), T] \cdot \gamma_2(\lambda) \cdot \eta(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

由式(5)可以看出与光学成像系统有关的常数 c 已经消除,因此受成像系统制约的双色热图像的共同因素影响较小,近似等号表示 ICCD 及图像 A/D 转换过程中存在噪声的影响。

考虑到 $\epsilon(\lambda)$ 为 λ 的慢变函数,如果 $\epsilon(\lambda_1) \approx \epsilon(\lambda_2)$, 或者 $\epsilon(\lambda_1)/\epsilon(\lambda_2) \approx$ 常数,选择较小的 $\delta\lambda_1, \delta\lambda_2$ 时,则式(5)中 $M[\lambda, \epsilon(\lambda), T]$ 的 $\epsilon(\lambda)$ 可以提出积分号外面,这样得到 $R(T)$ 与发射率无关或者最多影响其大小而不影响与 T 的变化关系. 在 2 个波长 λ_1, λ_2 接近时,对于许多金属,这种近似是可以接受的,因此双色测温基本上能消除物体发射率带来的测温误差. 以下讨论认为 $\epsilon(\lambda_1) \approx \epsilon(\lambda_2)$.

2 双色中心波长及带宽的选择与讨论

文献[4]指出仅考虑物体辐射特性时,只要 $\lambda_1 \pm \delta\lambda_1$ 与 $\lambda_2 \pm \delta\lambda_2$ 之间不相互完全包含,则 $R(T)$ 与 T 存在唯一的对应关系,这为双色测温法的有效性提供了一定的理论基础。

对于双色测温系统,双色比值影响是主要的性能指标,它定义了比值 $R(T)$ 与温度 T 的关系. 在测温范围内要求 $R(T)$ 与 T 之间具有良好的线性而且比较陡,即 $R(T)$ 对 T 的灵敏度 $\partial R(T)/\partial T$ 较大,这样测温分度均匀、灵敏度较高. 同时考虑 ICCD 的光谱响应范围及其动态工作范围. 以下分别以系统的响应、系统响应灵敏度以及相对灵敏度讨论系统对双色波长及其带宽选择的要求。

2.1 双色比值响应 $R(T)$

从式(5)可以看出,假设 $\epsilon(\lambda_1) \approx \epsilon(\lambda_2)$, 2 个滤光片峰值透过率之比保持为常数,在 ICCD 的光谱响应给定的条件下,系统响应 R 仅与双色中心波长 λ_1, λ_2 及带宽 $\delta\lambda_1, \delta\lambda_2$ 相关. 因此在一定温度范围(T_1-T_2)内,不同 $\lambda_1, \lambda_2, \delta\lambda_1, \delta\lambda_2$ 的参数,利用数值计算方法的梯形积分可以计算系统响应 $R(T)$ 与 T 不同的依赖关系(见图 3). 图 3 中的计算条件为:温度场温度范围为 800~2200K, 2 个滤光片峰值透过率之比保持为 80.5/63, 干涉级次为 1, ICCD 的光谱响应拟合多项式(3 阶)系数分别为 -1.220, 1.110, 7.639, -6.944.

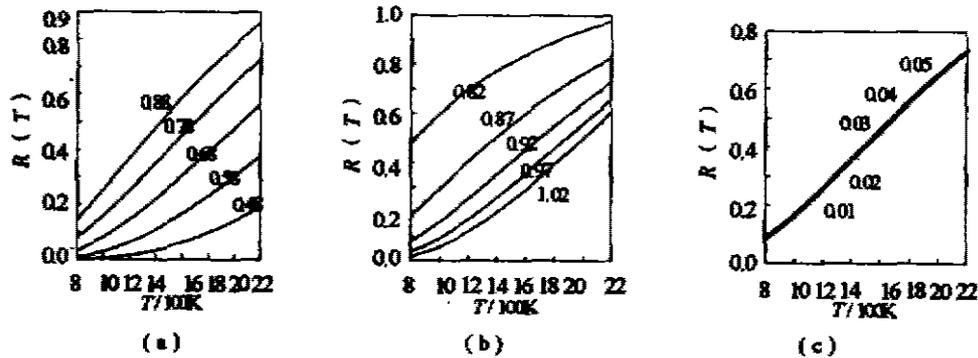


图 3 $R(T)-T$ 的关系曲线

(a) λ_1 的选择($\lambda_2 - \lambda_1 = 0.14 \mu\text{m}$, $\delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = 0.01 \mu\text{m}$) (b) λ_2 的选择($\lambda_1 = 0.78 \mu\text{m}$, $\delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = 0.01 \mu\text{m}$) (c) $\delta\lambda_1, \delta\lambda_2$ 的选择($\lambda_1 = 0.78 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.92 \mu\text{m}$)

Fig. 3 Curve of $R(T)-T$

(a) The choice of λ_1

(b) The choice of λ_2

(c) The choice of $\delta\lambda_1, \delta\lambda_2$

从图 3(a) 可以看出,保持 $\lambda_1, \lambda_2 = 0.14 \mu\text{m}$, $\delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = 0.01 \mu\text{m}$. 考虑 ICCD 光谱响应在 0.4~1.1 μm 之间, λ_1 作如下变化: 0.48, 0.58, 0.68, 0.78, 0.88 (μm), 当 λ_1 较上时,在低温

段, $R(T)$ 与 T 的线性较差, 当 λ_1 较大时, $R(T)$ 在高温段趋于饱和, 在 1000~2000K 内 λ_1 宜选择 $0.78\mu\text{m}$ 左右. 在图 3(b) 中, $\lambda_1 = 0.78\mu\text{m}$, $\delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = 0.01\mu\text{m}$, 改变 λ_2 (即 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$) 值: $0.82, 0.87, 0.92, 0.97, 1.02(\mu\text{m})$, 当 $\Delta\lambda$ 较大时, 在低温段, $R(T)$ 响应特性较差, 当 $\Delta\lambda$ 较小时, $R(T)$ 则在高温段趋于饱和, 在 1000~2000K 内 λ_2 宜选择 $0.92\mu\text{m}$ 左右. 保持 $\lambda_1 = 0.78\mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.92\mu\text{m}$, 选择不同 $\delta\lambda_1, \delta\lambda_2$ 值: $0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05(\mu\text{m})$, 得到图 3(c) 的 $R(T)$ - T 关系曲线, 随着 $\delta\lambda_1, \delta\lambda_2$ 的增大, $R(T)$ 只是略有变大, 对 $R(T)$ - T 的关系影响不大, 但 $\delta\lambda_1, \delta\lambda_2$ 对 ICCD 接收辐照度有影响, 过大将导致 ICCD 趋于饱和状态而无法正常工作, 过小接收信号比较弱而受 ICCD 噪声影响比较大. $\delta\lambda_1, \delta\lambda_2$ 应与 ICCD 的光圈大小、曝光时间长短、目标物体视场角一并考虑, 选取 $\delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = 0.01 \sim 0.02\mu\text{m}$, 使 ICCD 工作在动态范围之内.

2.2 双色比值灵敏度 $S(T)$

双色双值灵敏度 $S(T)$ 定义为 $R(T)$ 的导数, 它表示系统响应特性的线性度及灵敏性, 由式(5)并考虑到在讨论的条件下有 $\frac{c_2}{\lambda T} \gg 1$, 可以得出 $S(T)$ 为

$$S(T) = \frac{\partial R(T)}{\partial T} \approx \frac{\int_{\lambda_1 - \delta\lambda_1/2}^{\lambda_1 + \delta\lambda_1/2} k\tau \frac{c_2}{\lambda T^2} M[\lambda, \epsilon(\lambda), T] \gamma_1(\lambda) \cdot \eta(\lambda) d\lambda}{Q_{\lambda_2}(T)} - \frac{Q_{\lambda_1}(T)}{Q_{\lambda_2}^2(T)}, \quad (6)$$

$$Q_{\lambda_1}(T) = \int_{\lambda_2 - \delta\lambda_2/2}^{\lambda_2 + \delta\lambda_2/2} k\tau \frac{c_2}{\lambda T^2} M[\lambda, \epsilon(\lambda), T] \cdot \gamma_2(\lambda) \cdot \eta(\lambda) d\lambda$$

在与图 3 相同的计算条件下, 对式(6)进行数值计算, 得到如图 4 所示的 $S(T) \sim T$ 关系曲线. 对于 λ_1 的选择在图 4(a) 中 $\lambda_2 - \lambda_1 = 0.14\mu\text{m}$, $\delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = 0.01\mu\text{m}$, 在低温段, 当 λ_1 较小 ($0.48\mu\text{m}, 0.58\mu\text{m}$) 时, 灵敏度 $S(T)$ 较低, 当 λ_1 较大 ($0.68, 0.78, 0.88$) 时, 灵敏度 $S(T)$ 较高, 而在高温段则相反; 当 λ_1 较小时, 灵敏度 $S(T)$ 较高, 当 λ_1 较大时, 灵敏度 $S(T)$ 较低, 在 1000~2000K 温度范围内 λ_1 宜选择 $0.78\mu\text{m}$ 左右, 这时系统比值响应具有较大且较均匀的灵敏度 $S(T)$. 在图 4(b) 中, $\lambda_1 = 0.78\mu\text{m}$, $\delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = 0.01\mu\text{m}$, 随着 λ_2 ($\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$) 增大: $0.82, 0.87, 0.92, 0.97, 1.02(\mu\text{m})$, 系统响应从对低温灵敏逐渐变成对高温灵敏, 而当 $\lambda_2 = 0.92\mu\text{m}$ 时, 在 1000~2000K 温度范围内系统具有较大且较均匀的灵敏度. 从图 4(c) 中可以看出, $\lambda_1 = 0.78\mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.92\mu\text{m}$, 随 $\delta\lambda_1, \delta\lambda_2$ 值 ($0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05\mu\text{m}$) 增大, 在低温段灵敏度上升, 而在高温段灵敏度下降, 但整个对灵敏度的影响是不大的.

2.3 双色比值相对灵敏度 $S_r(T)$

相对灵敏度是测温系统的重要性能参数, 同样由式(5)并考虑到在讨论的条件下有 $\frac{c_2}{\lambda T} \gg 1$, 可以得到相对灵敏度 $S_r(T)$ 为

$$S_r(T) = \frac{T \partial R(T)}{R(T) \partial T} = \frac{c_2}{T} \left\{ \frac{\int_{\lambda_1 - \delta\lambda_1/2}^{\lambda_1 + \delta\lambda_1/2} \frac{1}{\lambda} M[\lambda, \epsilon(\lambda), T] \gamma_2(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda}{Q_{\lambda_1}(T)} \right\}$$

$$Q_{\lambda_2}(T) = \int_{\lambda_2 - \delta\lambda_2/2}^{\lambda_2 + \delta\lambda_2/2} \frac{1}{\lambda} M[\lambda, \epsilon(\lambda), T] \gamma_2(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

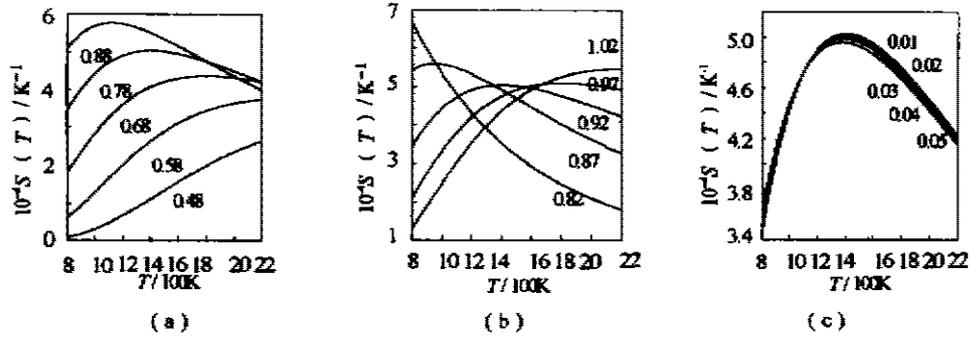


图 4 S(T)-T 的关系曲线

(a) λ_1 的选择 ($\lambda_2 - \lambda_1 = 0.14 \mu\text{m}, \delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = 0.02 \mu\text{m}$) (b) λ_2 的选择 ($\lambda_1 = 0.78 \mu\text{m}, \delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = 0.01 \mu\text{m}$) (c) $\delta\lambda_1, \delta\lambda_2$ 的选择 ($\lambda_1 = 0.78 \mu\text{m}, \lambda_2 = 0.92 \mu\text{m}$)

Fig. 4 Curve of S(T)-T

(a) The choice of λ_1 (b) The choice of λ_2 (c) The choice of $\delta\lambda_1, \delta\lambda_2$

由式(7)进行数值积分计算得到不同 $\lambda_1, \lambda_2, \delta\lambda_1, \delta\lambda_2$ 时相对灵敏度 $S(T)$ 与温度 T 的关系曲线, 如图 5 所示. 在图 5(a)中, $\lambda_2 - \lambda_1 = 0.14 \mu\text{m}, \delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = 0.01 \mu\text{m}$, 相对灵敏度 $S_r(T)$ 随 λ_1 的增大(0.48、0.58、0.68、0.78、0.88 μm) 而下降. 在图 5(b)中, $\lambda_1 = 0.78 \mu\text{m}, \delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = 0.01 \mu\text{m}$, 相对灵敏度 $S_r(T)$ 随 λ_2 的增大(0.82、0.87、0.92、0.97、1.02 μm) 而上升. 在图 5(c)中, $\lambda_1 = 0.78 \mu\text{m}, \lambda_2 = 0.92 \mu\text{m}, \lambda_1, \lambda_2$ 的增大(0.01、0.02、0.03、0.04、0.05 μm), 相对灵敏度 $S_r(T)$ 只是略有下降.

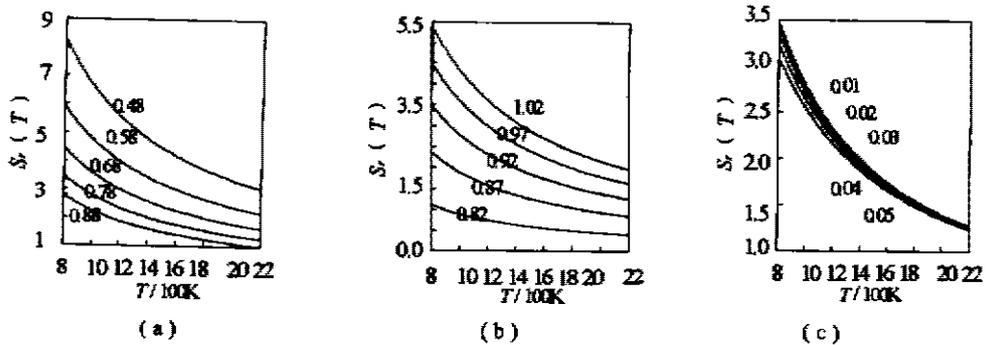


图 5 $S_r(T)$ -T 的关系曲线

(a) λ_1 的选择 ($\lambda_2 - \lambda_1 = 0.14 \mu\text{m}, \delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = 0.02 \mu\text{m}$) (b) λ_2 的选择 ($\lambda_1 = 0.78 \mu\text{m}, \delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = 0.01 \mu\text{m}$) (c) $\delta\lambda_1, \delta\lambda_2$ 的选择 ($\lambda_1 = 0.78 \mu\text{m}, \lambda_2 = 0.92 \mu\text{m}$)

Fig. 5 Curve of $S_r(T)$ -T

(a) The choice of λ_1 (b) The choice of λ_2 (c) The choice of $\delta\lambda_1, \delta\lambda_2$

3 结语

在综合考虑了 ICCD 双色热图像温度场检测系统目标物体辐射特性、滤光片传输特性

以及 ICCD 光谱响应特性之后,通过计算机计算不同双色波长及带宽下的系统响应曲线 $R(T)-T$ 、灵敏度 $S(T)-T$ 、相对灵敏度 $S_r(T)-T$,得出选择 $\lambda_1=0.78\mu\text{m}$ 、 $\lambda_2=0.92\mu\text{m}$ 、 $\delta\lambda_1=\delta\lambda_2=0.01\sim 0.02\mu\text{m}$,测温在 $1000\sim 2000\text{K}$ 范围内,系统具有较好的线性响应、较高且较均匀的灵敏度,以及相对灵敏度大于 1.5,从而为 ICCD 双色热图像温度场检测提供了理论依据。

参考文献

- 1 杨经国,等. 计量学报,1991,12(4):275~279
- 2 张友山. 红外与毫米波学报,1993,12(4):324~328
- 3 Francon M. *Filtres optiques*. Masson. 徐森禄译,光学滤光片,北京:科学出版社,1986,38
- 4 Bedord R E, Reung M C. *High temperature-High pressures*,1983,15(2):119~130
- 5 Fehribach J D, Johnson R B. *Optical Engineering*,1989,28(12):1255~1259

THE CHOICE OF WAVELENGTH IN TEMPERATURE FIELD MEASUREMENT BY ICCD TWO-COLOR THERMAL IMAGES*

Zhang Hua, Liao Baojian Pan Jiluan

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The radiative property of the radiative source, the transmission of the filter and the spectral response of ICCD were considered systematically for the temperature field measurement system by means of two-color thermal images. The ideal choice of the working wavelength of the system was proposed.

Key words two-color measurement for temperature, ICCD, temperature field, choice of wavelength.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China and Doctoral Foundation of State Education Committee of China