

用光截止法测量 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的横向组分均匀性

王新德 张征明* 陈新禹

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文以相当可靠的黑体辐射公式为基础, 利用 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品本身的光截止特性测量样品的截止波长, 再用 E_g-x 经验公式求出样品的组分 x 。对样品进行二维扫描, 获得了 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品横向组分的面分布。测得的组分均方根偏差与电子探针的测量结果符合得很好。

一、引 言

测量 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料组分的方法有多种, 如密度法^[1]、载流子浓度判别法^[2]、电子探针法^[3]、光吸收法^[4]、电反射光谱法^[5]等等。其中, 密度法和载流子浓度判别法简单实用, 但只能得到整个样品的平均组分 \bar{x} 。其他几种方法虽然能测出样品的组分分布, 但都需要比较高级的仪器和复杂的测量装置。

本文提出的光截止法可在室温下测量各种组分的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 横向组分分布。与其他的测量方法相比, 具有装置简单、灵敏度高、测量速度快等特点。

二、实 验 方 法

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的禁带宽度 E_g 与它的组分 x 有关。当黑体辐射照射到 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品上时, 光子能量小于 E_g 的那部分辐射能透过 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品。只要测量辐射透过样品前、后的能量, 就可求得样品的截止波长 λ_c , 从而计算其组分 x 。这就是光截止法的测量原理。

1. 样品的透光因子及其与组分的关系

我们首先考虑一块理想的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品。当入射光子的能量大于其禁带宽度 E_g 时, 其透过率为零, 小于 E_g 时为 1。若用温度为 T 的黑体照射样品, 透射前后的黑体辐射能量可用普朗克公式算出^[7]。

定义黑体的总辐射通量密度 M_0 与透过样品的辐射通量密度 M_x 之比为该样品的透光

本文 1986 年 1 月 30 日收到。

* 上海科技大学 85 届毕业生。

因子 F ,

$$F(\lambda_0) = \frac{M_{\lambda_0}}{M_0} = \frac{\int_{\lambda_0}^{\infty} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{e^{c_2/\lambda T} - 1}}{\int_0^{\infty} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{e^{c_2/\lambda T} - 1}} \quad (1)$$

引入 F 可使测量结果与黑体辐射的绝对强度无关, 并消除了黑体比辐射率的影响(设比辐射率与波长无关)。

不难理解, 在任一确定的黑体温度下, F 与 λ_0 是一一对应的, 只要测得 F , 就可求得 λ_0 。文献[8]给出了 $F-\lambda_0$ 的两个解析表达式。短截止波长下的解析式为

$$F = 1 + \frac{15}{\pi^4} \left\{ x_0^3 \ln(1 - e^{-x_0}) - 3 \sum_{n=0}^{\infty} e^{-(n+1)x_0} \cdot \left[\frac{2}{(n+1)^4} + \frac{2x_0}{(n+1)^3} + \frac{x_0^2}{(n+1)^2} \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 $x_0 = c_2/T\lambda_0$, 在 $x_0 \gg 1$ 时式(2)收敛很快, 例如, 当 $x_0 \geq 2$ 时, 级数取 7 项即可精确到 $10^{-8} \sim 10^{-10}$ 。长截止波长下的解析表达式为:

$$F = \frac{15}{\pi^4} x_0^3 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n}{n!} \cdot \frac{(x_0)^n}{(n+3)}, \quad (3)$$

式中, B_n 为伯努利多项式, 在 $x_0 \ll 1$ 时式(3)收敛很快, 例如, 当 $x_0 \leq 2$ 时, 取 7 项就可精确到 10^{-8} 。

根据普朗克-爱因斯坦关系, 可由样品的截止波长 λ_0 计算其禁带宽度 E_g :

$$E_g(\text{eV}) = \frac{h \cdot c}{\lambda_0} = \frac{1.24}{\lambda_0(\mu\text{m})} \quad (4)$$

关于 E_g 与组分 x 及样品温度 T_0 的关系有过不少研究报道。我们采用褚君浩等人所给出的 E_g-x 经验公式, 它具有组分及温度适用范围广, 精确度高等特点^[9]:

$$\begin{aligned} E_g(x, T_0) (\text{eV}) &= -0.295 + 1.87x - 0.28x^2 \\ &+ (6.0 - 14x + 3.0x^2) 10^{-4} T_0 \\ &+ 0.35x^4 (0.17 < x < 0.443). \end{aligned} \quad (5)$$

因此, 只要测得样品的 F 值, 就可以计算出 x 值, 或由 x 值计算出 F 值。图 1 给出了根据式(5)、(4)、(2)或(3)画出的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品在各种黑体温度下的 $F-x$ 曲线, 图中 $T_0 = 300\text{K}$ 。

2. 实测透光因子与等效透过率

对于实际的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品, 应考虑透过率的影响。透过样品的辐射通量密度应为:

$$M'_{\lambda_0} = \int_{\lambda_0}^{\infty} m_{\lambda} \cdot T(\lambda) \cdot d\lambda \quad (6)$$

式(6)中, m_{λ} 为某一波长的辐射能量, $T(\lambda)$ 为经多次内反射后的透过率平均值, 其表达式为

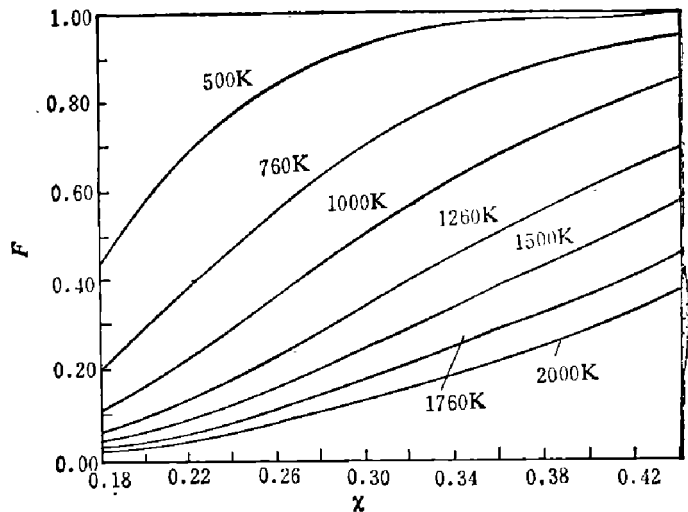


图 1 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品在各种黑体温度下的 $F-x$ 曲线($T_0 = 300\text{K}$)

Fig.1 F vs x for $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ samples ($T_0 = 300\text{K}$) and various temperatures of black body

$$T(\lambda) = \frac{(1-R(\lambda))^2 e^{-\alpha(\lambda)d}}{(1-R(\lambda))^2 e^{-2\alpha(\lambda)d}}, \quad (7)$$

式中, d 为样品厚度, $R(\lambda)$ 和 $\alpha(\lambda)$ 分别为样品的反射率和吸收系数, 均是波长的函数。这样, 透光因子变成如下形式:

$$F' = \frac{M'_{\lambda_c}}{M_0} = \frac{\int_{\lambda_c}^{\infty} m_{\lambda} \cdot T(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} m_{\lambda} \cdot d\lambda}. \quad (8)$$

我们称 F' 为实测透光因子, 相应地称 F 为理想透光因子。

由于 $T(\lambda)$ 很难写出确定的解析式, 因此不能由 F' 直接计算 α 值。为此, 引入等效透过率 T^* :

$$T^* = \frac{F'}{F} = \frac{M'_{\lambda_c}}{M_{\lambda_c}} = \frac{\int_{\lambda_c}^{\infty} m_{\lambda} \cdot T(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_c}^{\infty} m_{\lambda} \cdot d\lambda}. \quad (9)$$

T^* 的引入使得 F' 可用 F 表示, 而 T^* 可以通过测量得到, 这样, 就可以由 F 值求得 α 值。

3. 横向组分均匀性的测量与计算

图 2 是测量装置示意图。由硅碳棒发生的具有全光谱分布特性的辐射, 经光学系统聚焦后, 射到被测 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品上, 透过信号用热释电探测检测。通过对样品的二维扫描, 测得透过信号的面分布。若用矩阵表示, 其形式为

$$[M'_{\lambda_c}] = \begin{pmatrix} (M'_{\lambda_c})_{11} & (M'_{\lambda_c})_{12} & \cdots & (M'_{\lambda_c})_{1j} & \cdots & (M'_{\lambda_c})_{1n} \\ (M'_{\lambda_c})_{21} & (M'_{\lambda_c})_{22} & \cdots & (M'_{\lambda_c})_{2j} & \cdots & (M'_{\lambda_c})_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (M'_{\lambda_c})_{i1} & (M'_{\lambda_c})_{i2} & \cdots & (M'_{\lambda_c})_{ij} & \cdots & (M'_{\lambda_c})_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (M'_{\lambda_c})_{m1} & (M'_{\lambda_c})_{m2} & \cdots & (M'_{\lambda_c})_{mj} & \cdots & (M'_{\lambda_c})_{mn} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

式中, $(M'_{\lambda_c})_{ij}$ 为样品第 i 行、第 j 列点的实测透过辐射通量密度。

移开样品, 测得 M_0 。这样, F' 可写成

$$[F'] = [M'_{\lambda_c}/M_0]. \quad (11)$$

由式(9)可以求得矩阵

$$[F] = [F'/T^*]. \quad (12)$$

若同一块样品的 R 、 α 、 d 相差不大, 那末可以用样品等效透过率的平均值 \bar{T}^* 代替 T^*_{ij} ($i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$), 这对于质量及组分均匀性不十分差的样品来说, 不会引起很大的误差。因此, 式(12)可以写成

$$[F] = [F'/\bar{T}^*]. \quad (13)$$

求 \bar{T}^* 的步骤如下: (1) 用密度法或载流子浓度判别法确定样品的平均组分 \bar{x} ; (2) 计算与 \bar{x} 对应的理想透光因子 \bar{F} ; (3) 求样品实测透光因子 F'_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$) 的平均值

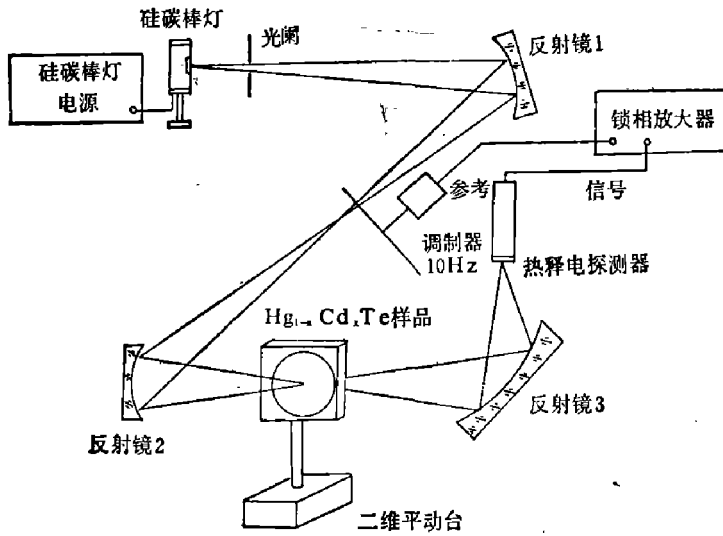


图 2 光截止法测量装置示意图

Fig. 2 Sketch of the measuring equipment for the method of light cut-off

$\bar{F}', \bar{F}' = \sum_{i,j=1}^{m,n} F'_{ij} / m \cdot n$ 。于是, 由式(9)得

$$\bar{T}^* = \bar{F}' / \bar{F}, \quad (14)$$

代入式(13), 得

$$[F] = \left[\frac{F'}{\bar{F}'} \cdot \bar{F} \right] = \left[\frac{M'_{\lambda_0}}{M'_{\lambda_0}} \cdot \bar{F} \right], \quad (15)$$

式中 M'_{λ_0} 、 M'_{λ_0} 和 \bar{F} 都可通过测量及计算求得。最后, 利用 $F-x$ 关系式求得样品组分分布。

三、测量结果

测量了用淬火-固态再结晶和碲溶剂方法制备的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品的组分均匀性, 结果如图 3、4 所示。测量在 300K 进行, 所用硅碳棒灯的峰值波长为 $2.3 \mu\text{m}$, 对应的黑体温度为 1260 K, 扫描光斑约为 $\phi 0.3 \text{ mm}$, 两点间隔为 1 mm。在测量组分均匀性之前, 对样品进行了热处理和霍尔系数等常规测量。样品的平均组分 \bar{x} 用载流子浓度判别法求得。为了获得准确的结果, 样品必须达到表面光洁无损伤、厚薄均匀、厚度适中(通常取 $d = 0.5 \sim 1 \text{ mm}$) 等要求。

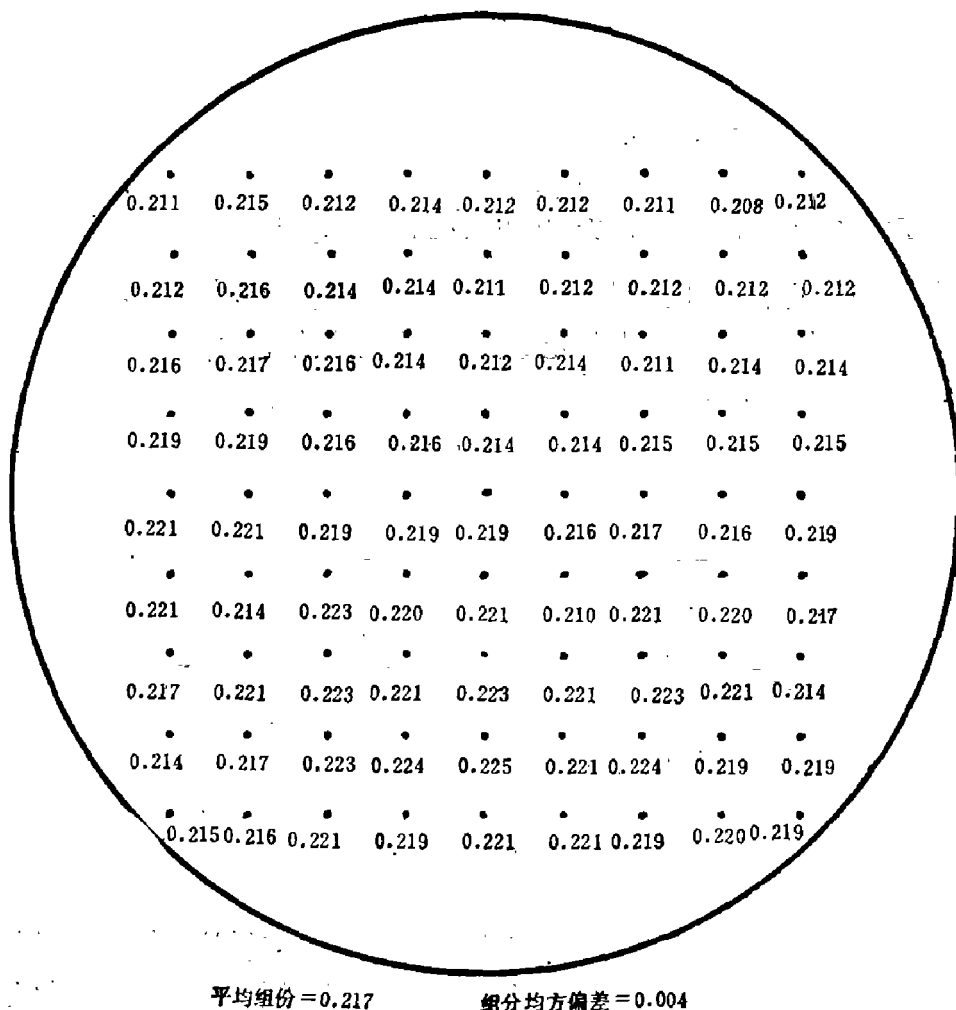


图 3 1# 样品的横向组分分布图

Fig. 3 The transverse distribution of the composition of No.1 sample

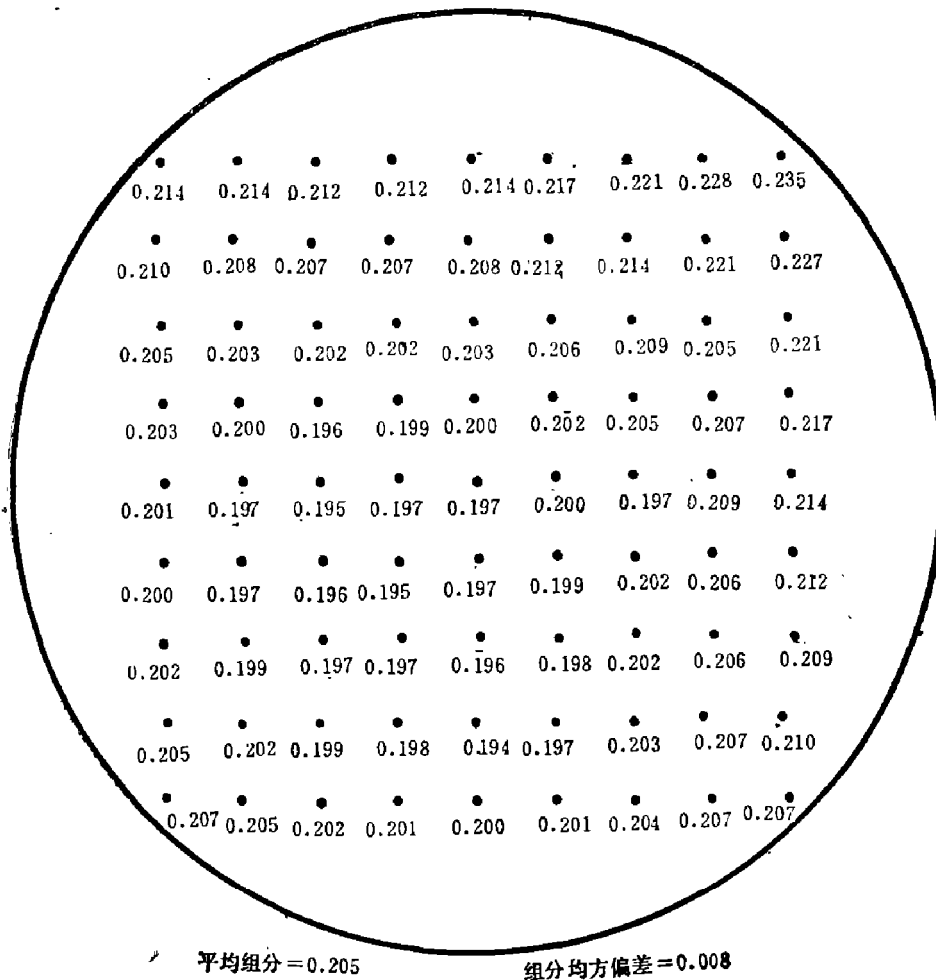


图 4 3* 样品的横向组分分布图

Fig. 4 The transverse distribution of the composition of No.3 sample

表 1 比较了光截止法与电子探针法的测量结果。结果表明,用本方法测得的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 横向组分均方根偏差与用电子探针的测量结果符合得很好。

表 1 两种不同测量方法测得的组分均方根偏差比较

Table 1 Comparison of the rms error of composition by two different measurement methods

| 样品编号 | 光截止法 | 电子探针法 |
|------|------------|-------|
| 1* | 0.004 | 0.004 |
| 2* | 0.004(半片)* | 0.005 |
| 3* | 0.008 | 0.008 |

* 另外半片样品在处理时破裂。

四、讨 论

1. 本方法以相当可靠的黑体辐射公式为基础,直接根据样品对辐射信号的响应进行测量,并以密度法或载流子浓度判别法求得的样品平均组分进行校正,测得的组分均匀性比其他间接测量方法更可靠。由于不必对黑体辐射信号进行分光,本方法还具有下述优点:(1)装置简单;(2)灵敏度高;(3)测量速度快等优点。

2. 用 \bar{T}^* 代替 T_{ij}^* ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$) 引进的误差可用下式估计:

$$\Delta x_{ij} = \frac{dx}{dT^*} \Delta T_{ij}^*, \quad (16)$$

式中, ΔT_{ij}^* 为样品某点等效透过率的误差, Δx_{ij} 为该点因 T_{ij}^* 的变化而引起的组分偏差。由上式可知, 用 \bar{T}^* 代替 T_{ij}^* 就相当于引进了一定的等效透过率偏差, 从而使该点的组分引起 Δx_{ij} 的偏差。测量及计算表明, 对整块样品而言, 只对那些组分偏离平均值较远的点有一些影响, 但对组分的均方偏差影响不大。例如, 对于 1[#] 样品, 偏离组分平均值最大的 $x=0.208$ 这一点的组分变化仅 $\sim 1\%$, 整个样品的组分均方根偏差变化为 0.0007。3[#] 样品的均方根偏差变化为 0.0012。这样的误差, 已在测量的误差范围之内, 因此, 用 \bar{T}^* 代替 T_{ij}^* 引入的误差可以忽略。

3. 为了使各种组分的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 都能获得较高的测量灵敏度 ($\frac{dF}{dx}$), 灯温的选取是很重要的。由图 1 可知, 当灯温太低时, $F-x$ 的线性度很差, 使得各种组分的测量灵敏度相差很大。灯温太高, 测量灵敏度会变差。对于室温下的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (组分为 0.17~0.443) 样品, 适宜的灯温是 1000~1500K。在这一范围内, 不但有较高的测量灵敏度, $F-x$ 的线性度也较好, 有利于提高测量精度。

致谢——本工作曾得到复旦大学戴显熹教授、钱佑华副教授、吴仲樾老师及本所俞振中、童斐明、褚君浩、陈伯良、肖继荣、黄长河、施密青、唐荷珍、林林、马述侃、马继富等同志的指导与帮助, 刘激鸣、沈杰、李挥东等同志提供了大量样品, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] R. K. 威拉德森、A. G. 比尔, 红外探测器, 国防工业出版社, 1973.
- [2] 肖继荣、唐荷珍, 中国科学院上海技术物理研究所 1982 年研究报告, p. 36.
- [3] 陈伯良等, 应用科学学报, 1(1983), 1:63.
- [4] 褚君浩等, 红外研究, 4(1985), 4:255~260.
- [5] Molitani A. et al., *J. Phys. Soc. Jpn.*, 34 (1973), 1:79.
- [6] 褚君浩等, 科学通报, 27(1982), 7:403.
- [7] 朱焕文等, 黑体辐射数据表, 科学出版社, 1984.
- [8] 戴显熹、王新德, 红外研究, 5(1985), 5.

MEASUREMENT OF THE UNIFORMITY OF TRANSVERSE COMPOSITION OF $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ WITH LIGHT-CUT- OFF METHOD

WANG XINDE, ZHANG ZHENGMING*, CHEN XINYU
(*Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

The light-cut-off method based on an exceedingly reliable formula for black-body radiation is presented. The cut-off wavelengths of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ sample are measured by use of the light cut-off characteristics of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, and then the compositions are found through empirical formula of E_g vs x . The transverse composition distribution of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ samples is obtained by use of two-dimensional scan. The measured rms error of the composition is well coincident with the results measured with the method of electric probe.

* Graduated from Shanghai University of Science and Technology in 1985.