

# 发光二极管测试技术和标准\*

鲍超

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 国际光子学实验室 杭州 310027)

**摘要** 文章从发光二极管的空间能量分布和光谱能量分布两个方面叙述了光和辐射参数测试的原理和方法. 讨论了辐射通量和光通量的基本概念、测量方法及相互之间的关系. 在实际应用中, 发光二极管的发光强度和辐射功率及他们的空间分布是常需要测量的参数. 文章从基于人类视觉特性的色度学原理出发, 讨论了发光二极管的光谱能量分布和重要的色度学参数以及相应的测试标准问题.

**关键词** 发光二极管, 光谱功率(能量)分布, 色度坐标, 色温

## The measurement and calibration of light emitting diodes

BAO Chao

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, International Photonics Laboratory, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract** The principle and technology behind the measurement of the emission parameters of light emitting diodes (LEDs) are described with regard to their spatial and spectral power distribution. The basic concepts, measurement methods and mutual relationship of radiant flux and luminous flux are discussed. In practice, the radiant power and luminous intensity are the most important parameters. The spectral power distribution and main colorimetric parameters are discussed according to the colorimetry based on human vision, with mention also of calibration standards.

**Key words** light emitting diode, spectral power distribution, color coordinate, color temperature

## 1 引言

发光二极管(light emitting diode, LED)是一种能发光的半导体二极管,当注入PN结的少数载流子与多数载流子复合时,就会发出可见光、紫外光和近红外光,是一种直接把电能转化为光和辐射能的发光器件.发光二极管有许多的优点:工作电压低,耗电量少,发光效率高,性能稳定,寿命长,抗冲击,耐振动性强,重量轻,体积小,成本低.近年来,随着超高亮度、蓝光和白光LED的出现,发光二极管的应用得到了非常快速的发展.虽然目前主要应用于数字和文字、交通和航空信号、道路标记等显示系统中,但已经出现替代部分光源的产品.随着白光LED的一些关键问题的突破和成本的降低,LED必将在和传统光源的竞争中胜出,替代照明用白炽灯

和充气灯.随着LED应用的拓展,准确定量地测量LED及其应用产品的各种特性变得越来越重要.

测试LED并非难事,但如何准确测量它的光和辐射参数却引起了各国工业协会和CIE(国际照明委员会)的关注.长期以来,LED测试再现性差,不同测试装置之间的测试结果一致性差.为此CIE专门成立了“TC2-45 LED测量”和“TC2-46 CIE/ISO关于LED强度测量标准”两个技术委员会专门化小组来研究解决相应的问题.CIE TC2-34小组在1997年10月22—25日在维也纳总部召开会议,制定并推荐了CIE 127-1997“Measurement of LEDs”(发光二极管测量),它涉及LED辐射度、光度和色度测量.

发光二极管既是一个半导体二极管,又是一个

\* 2002-12-18收到初稿,2003-03-03修回

光源,作为半导体器件,我们需要测量它的电参数.电参数是衡量一个发光二极管是否能正常工作的最基本的判据,通常包括正向电流和正向电压,反向电压和反向电流.作为一个光源,我们必须测量他们的光和辐射在空间分布的能量参数,测量光和辐射能量的光谱分布参数以及他们在人眼中所引起的心理响应,这是本文论述的主要内容.

## 2 发光二极管能量空间分布参数测试

### 2.1 光通量和辐射通量

测量发光二极管能量空间分布参数涉及光度学和辐射度学两个方面.通常用光功率来表示光源在单位时间内发射的光能量大小,用瓦(W)作为单位.光功率在辐射度学中用术语辐射通量( $\Phi_E$ )表示.发光二极管单位时间内发射的总电磁能量称为LED辐射通量,它通常表示LED单位时间内在整个360°空间发射的能量,但有时也规定在一定角度范围内发射的辐射通量.如果辐射通量随波长而改变,LED在某个波长发射的辐射通量称为单色辐射通量,可以写为 $\Phi_E(\lambda)$ ,单位为W/nm,辐射通量可以表示为

$$\Phi_E = \int \Phi_E(\lambda) d\lambda. \quad (1)$$

辐射通量的概念适用于所有光谱段的光和辐射,对于紫外、可见和近红外发光二极管都适用.在可见光范围内,光源发射的光和辐射将引起人眼的视觉,光源发射的辐射通量中能引起人眼视觉的那部分量称作为光通量( $\Phi_v$ ),单位是流明(lm).人眼对不同波长的单色光有不同的灵敏度,人眼对555nm的单色光最灵敏,在这个波长上,1W辐射通量等于683lm.与辐射通量类似,光通量通常指光源向整个空间在单位时间内发射的能引起人眼视觉的辐射通量.人眼对不同波长单色光的灵敏度已经由国际照明委员会总结为人眼标准光度观测者光谱光效率函数 $V(\lambda)$ ,因此光通量可以写为

$$\Phi_v = 683 \int_{380}^{780} \Phi_E(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

这里 $\Phi_E(\lambda)$ 是光源发射的绝对光谱能量分布,通常采用相对光谱能量分布函数 $S(\lambda)$ 更方便,它们的关系为 $\Phi_E(\lambda) = kS(\lambda)$ , $k$ 为常数.积分限380—780nm是可见光的光谱范围.因此对于光源而言,它发射的光通量和辐射通量有如下关系:

$$\Phi_v = 683 \Phi_E \frac{\int_{380}^{780} S(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} S(\lambda) d\lambda}. \quad (3)$$

图1显示了一个白光LED相对光谱能量分布曲线 $S(\lambda)$ 和CIE1931标准光度观测者光谱光效率函数 $V(\lambda)$ ,以及它们两者的乘积.由图1的曲线可以计算(3)式中的分数部分数值. $S(\lambda) V(\lambda)$ 曲线下的面积与 $S(\lambda)$ 曲线下的面积比为47%,因此该白光LED 1W的辐射通量(光功率)将产生1W × 683 × 0.47 = 323 lm的光通量.

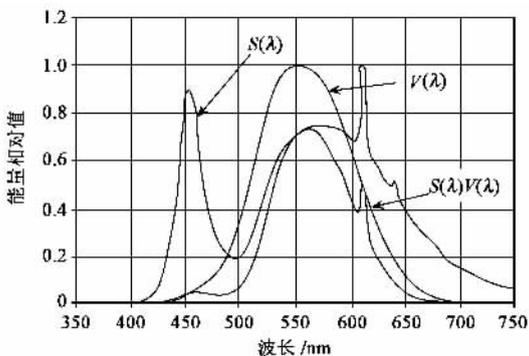


图1 LED的光通量和辐射通量

要准确测量LED的光和辐射通量必须要把所有发射的光辐射能量收集起来,然后用合适的光探测器把他们线性地转换成光电流,再通过定标确定被测量的大小.图2为用积分球测量光通量和辐射通量的原理.被测LED器件发射的光辐射经积分球壁的多次反射,导致产生一个均匀的与光通量(或辐射通量)成比例的光(或辐射)照度,可用一个位于球壁的探测器来测量这个光(或辐射)照度.图中漫射屏挡住光线,不使被测器件的光辐射直接照射到探测器,被测器件和漫射屏开孔的面积和球面积比较应该相对较小,球内壁和漫射屏表面应有均匀的高反射率漫反射镀层(最小0.8).球和探测器组合应该校准,同时要考虑到峰值发射波长和光通量由于功率消耗产生的变化.测量光通量的光探测器应该具有CIE标准光度观测者光谱光效率函数的光谱响应,测量辐射通量的探测器应该具有恒定的光谱响应,或者采用在被测发光二极管光谱响应范围内经过辐射度校准的光探测器.

一旦测量得到发光二极管的辐射通量和光通量,就可以计算器件的辐射效率和发光效率,发光二极管发射的辐射功率 $\Phi_E$ 与器件的电功率(正向电流 $I_F$ 乘以正向电压 $V_F$ )的比值为辐射效率 $\eta_E$ :

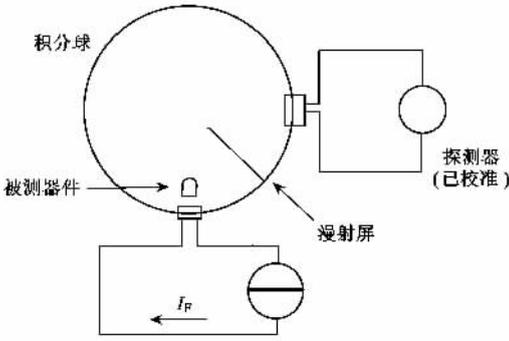


图2 LED 光通量和辐射通量测量原理

$$\eta_E = \Phi_E / (I_F \cdot V_F) \quad (4)$$

同理得到发光效率为

$$\eta_v = \Phi_v / (I_F \cdot V_F) \quad (5)$$

这里  $I_F$  为发光二极管的正向电流,  $V_F$  为正向压降。

### 2.2 发光强度和辐射强度

光源在单位立体角内发射的光(或辐射)通量,可表示为  $I = d\phi/d\Omega$ 。发光(或辐射)强度的概念要求假定辐射源是一个点辐射源,或者它的尺寸和光探测器的面积与离光探测器的距离相比是足够小,在这种情形,光探测器表面的光(或辐射)照度遵循距离平方反比定理,即  $E = I/d^2$ 。这里  $I$  是辐射源的强度,  $d$  是辐射源中心到探测器中心的距离,通常把这种情况称为远场条件。

然而在许多应用中,测量 LED 时所用的距离相对较短,源的相对尺寸太大,或者探测器表面构成的角度太大,这就是所谓的近场条件。此时,光探测器测量的光(或辐射)照度取决于测量条件。

照射在离 LED 一定距离处的光探测器上的通量  $\Phi$  与由探测器构成的立体角  $\Omega$  的比值,即为平均发光强度,此时立体角  $\Omega$  可用探测器的面积  $S$  除以测量距离  $d$  的平方计算得到。

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} = \frac{\Phi}{S/d^2} \quad (6)$$

CIE 推荐标准条件 A 和 B 来测量近场条件下的平均 LED 强度,可以分别用符号  $I_{LED A}$  和  $I_{LED B}$  来表示,用符号  $I_{LED A, e}$  和  $I_{LED A, v}$  分别表示标准条件 A 测量的平均 LED 辐射强度和平均 LED 发光强度。图 3 为 CIE 平均 LED 强度测试原理图。

调整被测 LED 器件,使它的机械轴通过探测器孔径的中心。光度探测器的光谱灵敏度在被测器件发射的光谱波长范围内应该校准到国际照明委员会标准光度观测者光谱曲线,测试辐射参数时应采用无光谱选择性的光探测器。测试系统应该按距离  $d$

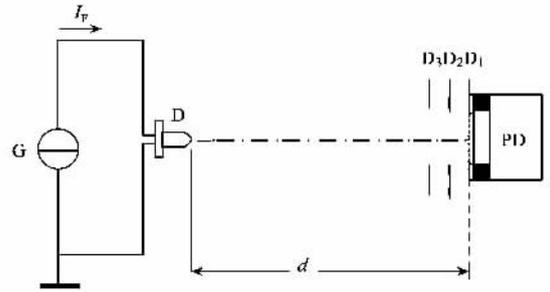


图3 CIE 平均 LED 强度测试原理

[  $D$  为被测 LED 器件;  $G$  为电流源;  $PD$  为包括面积为  $A$  的光阑  $D_1$  的光度探测器;  $D_2, D_3$  为消除杂散光光阑(  $D_2, D_3$  不应限制探测立体角) ;  $d$  为被测 LED 器件与光阑  $D_1$  之间的距离 ]

和光阑  $D_1$  用标准器校正。测量距离  $d$  应按国际照明委员会推荐的标准条件 A 和 B 设置(见表 1)。在这两种条件下,所用的探测器要求有一个面积为  $100\text{mm}^2$ (相应直径为  $11.3\text{mm}$ )的圆入射孔径。对于脉冲测量,电流源应该提供所要求的幅度、宽度和重复率的电流脉冲。探测器上升时间相对于脉冲宽度应该足够小,系统应该是一个峰值测量仪器。

表1 CIE 平均 LED 强度标准测试条件

CIE 推荐	LED 顶端到探测器的距离 $d$	立体角	平面角(全角)
标准条件 A	316mm	0.001sr	2°
标准条件 B	100mm	0.01sr	6.5°

发光强度的空间分布能够恰当地反映出光源能量的空间分布,常用发光(或辐射)强度空间分布图 [ luminous( or radiant) diagram ]来表示(见图 4)。

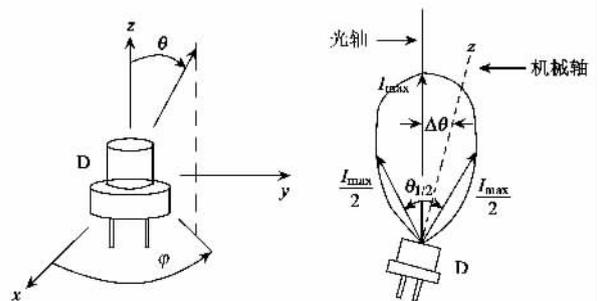


图4 辐射图和相关特性

发光(或辐射)强度空间分布图仅规定一个平面。在发光(或辐射)强度分布图形中,发光(或辐射)强度大于最大强度一半构成的角度为半强度角  $\theta_{1/2}$ ( half - intensity angle)。最大发光(或辐射)强度方向(光轴)与机械轴  $z$  之间的夹角定义为偏差角

$\Delta\alpha$  (misalignment angle). 测量各个角度的发光强度, 将数据按极坐标或直角坐标画出角度和光强关系曲线即为发光(或辐射)强度分布图. 测量时可使被测发光二极管绕顶点旋转, 也可使探测器以  $d$  为半径旋转.

### 3 发光二极管光谱能量分布参数测试

#### 3.1 发光二极管的光谱能量分布

光谱功率(能量)分布(spectral power distribution)  $P(\lambda)$  表示在发光二极管光辐射波长范围内, 各个波长的辐射功率分布情况. 对于可见光 LED 而言, 光谱能量分布既确定了发光的颜色, 也确定了它的光通量. 通常使用相对光谱功率分布更方便, 例如图 1 中的  $S(\lambda)$  即为一种白色 LED 的相对光谱功率分布. 发光二极管的光谱能量分布测量原理如图 5 所示.

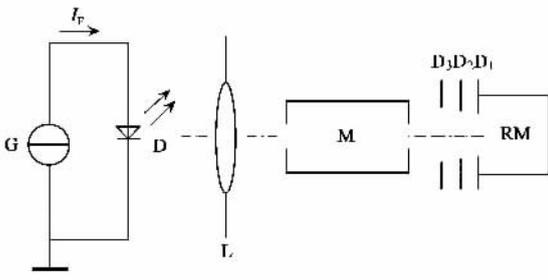


图 5 发光二极管光谱能量分布测量原理

[  $D$  为被测 LED 器件;  $G$  为电流源(直流或脉冲);  $L$  为聚焦透镜系统;  $D_2, D_3$  为消除杂散光光阑;  $M$  为单色仪;  $RM$  为包括光阑  $D_1$  的辐射探测系统 ]

单色仪的波长分辨率和带宽应该使测试有合适的精度. 辐射探测系统的光谱响应应该校准. 为便于测量, 曲线峰值可以用 100% 表示. 如果单色仪的光谱透过率和辐射探测系统的光谱灵敏度不是常数, 记录的测量数据应该修正. 在需要的光谱范围内调整单色仪的波长, 直到辐射测量系统获得最大读数, 相应的波长就是峰值波长  $\lambda_p$ , 然后往  $\lambda_p$  的两边调整单色仪的波长, 使其达到峰值波长读数的一半, 获得相对应的波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 两者之差就是光谱辐射带宽. 按照要求的波长间隔分别测量记录每个波长时的光谱功率数值, 即为光谱功率分布.

#### 3.2 色度坐标

对于可见光, 人们总是以人眼的视觉观测结果来加以评定, 色度学就是以人眼特性为基础对可见光进行颜色度量的科学. 任何一种光源的颜色均可

以用 CIE 于 1931 年建立的一个二维色度空间中的一个点  $(x, y)$  和亮度来表示. 图 6 是 CIE1931XYZ 色度系统的标准色度观测者光谱三刺激值[图 6(a)]和色度图[图 6(b)].

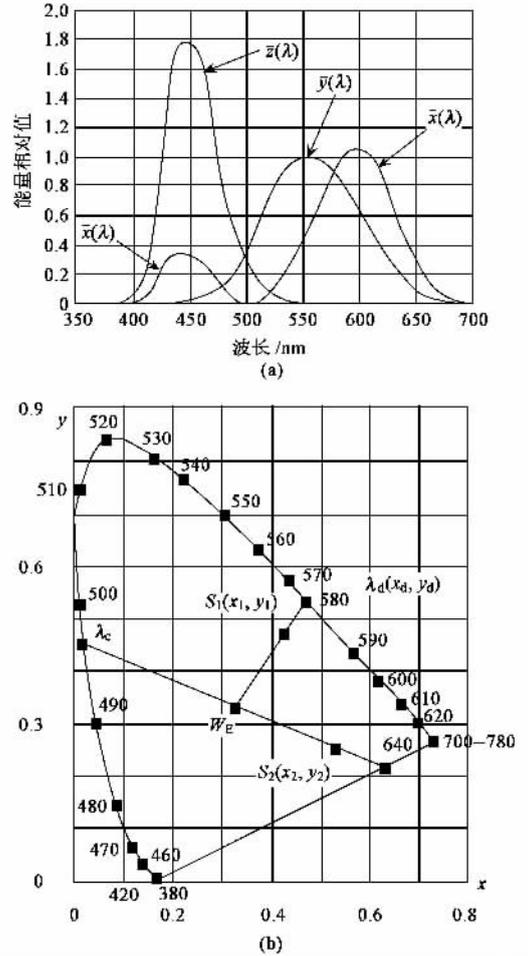


图 6

(a) CIE 1931 XYZ 色度系统标准色度观测者光谱三刺激值;  
(b) CIE1931 XYZ 色度系统的色度图

只要测量得到 LED 的光谱能量分布函数  $P(\lambda)$  就可以计算它的色光的颜色三刺激值和色度坐标.

$$X = K \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda = K \sum_{\lambda=380}^{780} P(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda, \quad (7)$$

$$Y = K \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda = K \sum_{\lambda=380}^{780} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda, \quad (8)$$

$$Z = K \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda = K \sum_{\lambda=380}^{780} P(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda. \quad (9)$$

由于实际上很难用数学表达式来写出  $P(\lambda)$ ,

因此常以求和来近似积分. 这里  $Y$  对于光源来说, 它为光源的亮度. 对于物体色而言,  $K$  称为调整系数, 它是将照明体或光源的  $Y$  值调整为 100 时得出, 即:

$$K = \frac{100}{\sum_{\lambda=380}^{780} P(\lambda) Y(\lambda) \Delta\lambda} \quad (10)$$

色度坐标为

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z &= \frac{Z}{X+Y+Z} \\ x+y+z &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

图 6(b) 的色度图是根据 CIE 1931-XYZ 系统绘制的. 根据颜色混合原理, 颜色可以用三原色(红、绿、蓝)匹配得到, 这里  $X, Y, Z$  为颜色的三刺激值, 它们的数值表示了三原色匹配该颜色时相互之间的比例. 色度图由一平面封闭舌形曲线组成, 横坐标  $x$  相当于红原色比例, 纵坐标  $y$  相当于绿原色比例. 任何颜色在色度图上都占有一个确定的位置(坐标), 舌形曲线的坐标点表示纯单色光的光谱轨迹, 波长从 400—700nm 的连线是光谱上所没有的从紫到红的颜色. 在这条连线和弧线所围成的舌形内, 包括了一切物理上可以实现的颜色. 从色度图上还可以看到两种颜色混合后得到的中间色, 如图 6(b) 中所示,  $W_E$  点( $x_0, y_0$ ) 和点( $x_d, y_d$ ) 相加, 可以得到两点连线表示的各种过渡色.

一个等能光谱的白光是由相同数量的  $X, Y, Z$  组成. 若已获得被测 LED 器件的色度坐标, 就可以采用等能白光 E 光源( $x=0.3333, y=0.3333$ ) 作为参照光源来计算决定颜色的主波长. 计算时根据色度图上连接参照光源色度点与样品颜色色度点的直线的斜率, 查表读出直线与光谱轨迹的交点, 确定主波长. 图 6(b) 中,  $W_E$  为等能白光色度点,  $S_1$  为被测 LED 的色度坐标, 连接  $W_E S_1$  并延长至舌形光谱轨迹线上, 交点处即为被测 LED 的主波长. 在颜色主波长线上, 用参照光源色度点到样品色度点的距离与参照光源色度点到光谱色度点的距离之比来表示样品颜色刺激纯度. 颜色的纯度和人眼观测到的颜色饱和度基本一致.

### 3.3 色温

许多光源, 如白炽灯、荧光灯、充气灯等会产生不同色貌的白光. 光源的光辐射所呈现的颜色与在某一

温度下黑体辐射的颜色相同时, 称黑体的温度为光源的色温度(color temperature)  $T_c$ . 为了求得光源的色温, 需要先求得它的色度坐标, 然后在 CIE1960UCS 色度图上由 ISO 色温线求取色温. 对于相对光谱功率分布偏离黑体相对光谱功率分布较远的光源, 用色度坐标与其最靠近的黑体温度来表示该光源的相关色温(correlated color temperature, CCT), 在色温线上求取相关色温. 图 6 为 CIE1960UCS 均匀色度图, 它是由 CIE1931  $x, y$  色度图经过线性变换得到的. 在 1960UCS 色度空间中, 相关色温的等色温线垂直于普朗克黑体轨迹的切线.

求取相关色温的过程如下: 先按图 5 原理测量 LED 的光谱能量分布, 再按 (7) (8) (9) (10) 和 (11) 式计算色度坐标  $x, y$ , 再按下面的 (12) 式变换成色度坐标  $u, v$ .

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{4x}{-2x+12y+3} \\ v &= \frac{6x}{-2x+12y+3} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

如果色度坐标落在图 7 的等色温线上, 就可以直接求得被测光源的 CCT. 但是如果光源色度坐标落在一对等色温线内, 如图 8 所示, 就需要用作图法来确定 CCT. 首先假定普朗克轨迹是圆弧, 则相邻的等色温线有交点. 可以计算相邻等色温线构成的夹角  $\theta_2$ , 再根据光源色度坐标计算夹角  $\theta_1$ . 从色度学可知, 普朗克轨迹上相邻两点色温的倒数差与相邻两点圆弧构成的角度成比例. 因此, CCT 可由下述公式计算得到:

$$CCT = \left[ \frac{1}{T_i} + \frac{\theta_1}{\theta_2} \left( \frac{1}{T_{i+1}} - \frac{1}{T_i} \right) \right]^{-1} \quad (13)$$

这里  $T_i$  和  $T_{i+1}$  是被测光源色度点两边的等色温线的色温值.

相关色温计算举例: 一个 LED 在 CIE1931XYZ 色度系统中的色度坐标为 (0.2, 0.5), 求它的色温.

解 (1) 由 (12) 式变换到 CIE1960UCS 均匀色度系统中, 得到坐标 ( $u, v$ ) = (0.09302, 0.34884). (2) 查色温表, 得到坐标 ( $u, v$ ) = (0.09302, 0.34884) 两边等色温线有关数据如表 2 所示.

表 2 被测光源色度坐标相邻两等色温线数据

等色温线色温	( $u, v$ ) 坐标	等色温线方程
10 000K	(0.19032, 0.29326)	$v = -0.47888u + 0.38440$
8000K	(0.19462, 0.30141)	$v = -0.58204u + 0.41469$

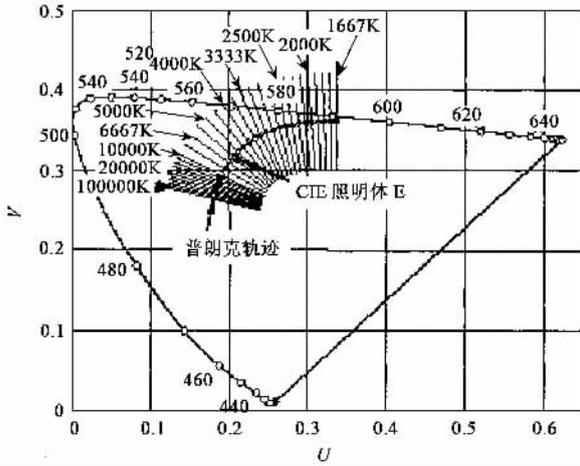


图7 CIE1960 均匀色度图、普朗克轨迹和等色温线

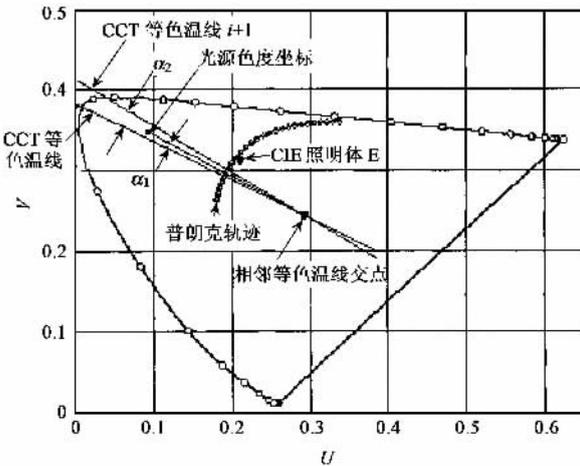


图8 相关色温的计算

(3) 求得相邻两等色温线交点为  $(u, v) = (0.29357, 0.24381)$ , 相邻两等色温线构成的夹角为  $\theta_2 = 4.61229^\circ$ , 求得  $\theta_1 = 2.05113^\circ$ .

(4) 计算:

$$CCT = \left[ \frac{1}{10000} + \frac{2.05113}{4.61229} \left( \frac{1}{8000} - \frac{1}{10000} \right) \right]^{-1} = 8999K.$$

即求得该 LED 的相关色温为 8999K.

#### 4 发光二极管测试标准问题

发光二极管已有近 40 年的历史, 作为普通显示技术中一个工业产品, 它的工艺和检测技术日臻完备. 但是近年来, 随着新型发光材料不断出现, 新器件和新应用层出不穷, 给发光二极管及其应用产品

测试工作带来了新问题.

从历史上看, 发光二极管测试和测试标准可分为两个不同阶段, 在高亮度发光二极管出现之前, LED 被看作是一个仅用于显示的简单光源. 因此, 光度测试的原理和标准被部分地直接引进到生产发光二极管的光电器件行业, 但只测试发光强度、峰值波长、光谱半宽度和光功率等几个常用的参数. 虽然还有些参数列在测试标准中, 却很少使用. 20 世纪 80 年代初, 我国电子工业部制定了几个有用的标准, 如 Sj2353.3-83 半导体发光二极管测试方法, Sj2658-86 半导体红外发光二极管测试方法等. 这些标准对工业和相应的商业活动起到了很好的指导作用. 90 年代初又制定了 GB/T15651-1995 半导体器件分立器件和集成电路: 光电子器件(国家标准). 这个标准把我国的测试工作和国际电工委员会标准联系起来. 这个阶段起草的标准把发光二极管看作是一个点光源, 运用光和辐射的标准测量原理和方法进行, 但在实际测试工作中发现, LED 是一个指向性很强的光源, 它不具有点光源所具有的余弦辐射特性, 常常发现测试结果的准确性较差, 不同仪器测试结果的可比性较差. LED 输出的光和辐射与芯片温度有关的特性, 以及光学设计上的巨大差异, 甚至使得 LED 的测量难于重现. 这些都引起了国际照明委员会和各国工业协会的关注. CIE 127-1997“Measurement of LEDs”(发光二极管测量)出版物把 LED 强度测试确定为平均强度的概念, 并且规定了统一的测试结构和探测器大小, 这样就为 LED 准确测试比对奠定了基础. 虽然 CIE 127-1997“Measurement of LEDs”(发光二极管测量)并非国际标准, 但目前世界上主要企业都已采用, 实际上它是实施准确测试比对的正确途径.

随着发光二极管应用领域拓展, 特别是以发光二极管为核心的新型固体照明的出现, 必然会把照明领域的许多参数和测试方法引入到光电器件行业, 如色度坐标、色温、显色指数等. 同时也会产生新的问题, 从而要跨出光度测量的范围而制定新的标准, 以适合产业化的需要.

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] CIE. Publication CIE127-1997. Measurement of LEDs
- [ 2 ] 鲍超. 国际光电与显示 2002(3):111[ Bao C. International Optoelectronics & Displays 2002(3):111(in Chinese)]