

LED 光管照明效果测试研究

李本亮¹ 贾明辉¹ 周光明²

(1. 国家半导体光源产品质量监督检测中心(广东) / 广东省东莞市质量监督检测中心, 广东 东莞 523808;
2. 柯尼卡美能达(中国)投资有限公司, 广东 广州 510620)

摘要: 随着白炽灯退出市场和 LED 产品性能的不断提高, LED 产品开始成为室内照明光源, 相应的 LED 产品的国际和国家标准开始实施, 室内照明设计标准对 LED 产品的性能做了明确的规定, 本文结合最新的国家标准对 LED 产品的照明效果进行了研究, 指出了评价 LED 照明效果的显色性和色温参数的相关问题, 为 LED 照明产品的推广应用及效果评价提供了参考建议。

关键词: LED; 显色指数; 色坐标; 色温; 照度

中图分类号: TM923 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1004-440X.2013.01.0101

Research and Evaluation on Color Properties of White Light LED Tubes

Li Benliang¹ Jia Minghui¹ Zhou Guangming²

(1. National Semiconductor Lighting Products Supervision Inspection Center (Guangdong) / Guangdong Dongguan Quality Supervision Testing Center, DongGuan 523808, China; 2. Konica Minolta (China) Investment Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: With incandescent lamp will be abandoned and the quality of LED products are continuously improved, LED products are being used as indoor light source, related international and national standards for LED products are being implemented, particularly the performance of LED products has been clearly specified in the indoor lighting design standard, hereby this article is purposed to cope with the latest national standard to conduct a research on lighting performance of different LED products, and point out correlative issues of color rendering properties and color temperature in lighting effect evaluation, provides a reference on promotion and application for LED products.

Key words: LED; color rendering index; color coordinates; color temperature; illuminance

1 引言

随着半导体照明示范工程的推广及普及, 大量的 LED 照明产品开始在酒店、会议室、写字楼、博物馆、体育馆等室内及户外场所投入使用。LED 光源拥有丰富的色彩和高能效的特点, 但是, 很多时候人们在 LED 照明产品使用的场所往往会意识到几个问题: 如某些 LED 灯管产品标称的光通量参数虽然不错, 可是实际的光照度无法满足人眼观察所需

达到的要求; 其次, 有些 LED 产品虽然色彩绚丽, 但是人眼对色温的感觉往往与产品标称的不一致, 光源对空间颜色的呈现没有达到建筑设计的基本要求; 还有在一些有高显色要求的场所如珠宝首饰柜、化妆品专柜、商场超市、医院、教室、博物馆、影艺舞台等, 因为 LED 光源的显色性不同而导致物体在光源下失真的情况经常出现。目前, 这类问题已引起了行业对 LED 光源的光色品质研究的重视和探讨。

LED 光源的发光原理和特性比较独特, 以蓝光

基金项目: 东莞市重大科技专项课题《半导体照明产品质量检测与评价体系的研究》资助, 项目编号: 2011215101。

芯片与 YAG 荧光粉混合的白光 LED 为例, 其光谱波峰会在 450nm ~ 500nm 之间发生移动, 产品在混光后的效果不稳定。而且, 不同厂家会因为 LED 照明产品工艺上存在的不足而导致同型号批次的产品在实际的照明效果中出现良莠不齐的现状。由于生产高性能的 LED 照明产品的技术水平要求高, 使得大批性能较低的产品流入市场, 影响了 LED 照明产品的普及和市场接受程度。

针对新出现的 LED 照明产品, 相关的国家标准已经开始制定, 其中最重要的是 GB 50034 - 2013^[1], 由于该标准是建筑设计标准, 已明确要求在建筑照明场合使用色温为 4000K 以下, 显色指数 $R_a > 80$, 高光效的 LED 室内筒灯和 LED 相关产品。本文根据新提出的 LED 照明效果技术标准需求, 对 LED 照明产品进行测试实验, 根据测试结果给出了产品改进的建议, 对 LED 照明产品的使用推广有一定的指导意义。

2 标准的发展

新的国家标准对 LED 室内照明产品的性能做了较为详尽的要求, 明确提出了 LED 照明产品的显色指数及色容差等参数, 对 LED 产品的使用环境等也做了比较详尽的规范。现行的 GB 50034 - 2004 要求在不同照明场合安装使用的 LED 产品均需达到额定的显色指数和色温, 即将出台的 GB 50034 - 2013 在此基础上制定和补充了相关的技术指标。为了深入了解 LED 光源的颜色品质, 我们需要对光源进行现场评估。

3 光源的显色指数及色温

在照明、纺织、印刷等领域, 光源的颜色特性是选择光源时要考虑的一个重要因素。因为在光源照明的条件下, 物体的颜色为人眼感知, 并且人眼感知到的颜色, 不仅与物体本身的特性, 如反射比、透射比、光谱辐射亮度系数等相关, 还与照明光源的颜色特性有很大关系。现在评价光源颜色特性的技术参数主要有光源颜色的三刺激值、色温 (相关色温)、显色性等。其中显色性反映了光源对物体的显色能力的好坏, 定义光源对物体自身颜色的呈现水平。光源的显色性由其光谱所决定。

显色指数是用来表征显色性的数目值。指物体

在被测光源下的颜色与参照光源下物体的颜色符合程度的器量。按 CIE 规定, 普朗克辐射体作为低色温光源的参考标准, 把标准照明体 D 作为高色温光源的参考标准, 并将其显色指数定为 100。还规定了若干检测用的规范颜色样品, 以这些样品在参照光源下和另一色温为 3000K 的规范荧光灯下的色差为标准, 商定规范荧光灯的显色指数为 50。CIE 依据在参照光源和被测光源下颜色样品的色差, 联合上述定量标准, 导出公式。

显色指数由 CIE 规定的 14 种颜色组成, 中国在计算显色指数时又加入了亚洲妇女肤色, 变成 15 种色样, 并分别标记为 R1、R2、R3……R14、R15。特殊显色指数 R_i 可用任何一种颜色样品来计算, 一般显色指数 R_a 用 1 ~ 8 号颜色样品的特殊显色指数计算得到, $R_a = (\sum R_i) / 8 (i = 1, 2, \dots, 8)$ 。因为这 8 种颜色是最常见的颜色, 常用的照明光源只要求参考 R_a 的值。对大多数白光 LED 来说, 由于是混合型光源, 其光谱多为非连续性, 与白炽灯和三基色荧光灯这类有连续光谱的光源相比, 显色能力不容易提高。原因是主流的白光 LED 追求高光效, 会在调光时把红光比例忽略。对非连续光谱光源来说, 代表饱和红色的 R9 对光源的显色性评价有着重要的参考意义。CIE 在光源的显色指数计算方法中规定的 14 种色试样如表 1 所示。

表 1 CIE 显色指数计算方法的 14 种色试样

Table 1 Fourteen samples of calculation for CIE color rendering index

序号	孟塞尔标号	日光下的颜色
1	7.5R 6/4	淡灰红色
2	5Y 6/4	暗灰黄色
3	5GY 6/8	饱和黄绿色
4	2.5G 6/6	中等黄绿色
5	10BG 6/4	淡蓝绿色
6	5PB 6/8	淡蓝色
7	2.5P 6/8	淡紫蓝色
8	10P 6/8	淡红紫色
9	4.5R 4/13	饱和红色
10	5Y 8/10	饱和黄色
11	4.5G 5/8	饱和绿色
12	3PB 3/11	饱和蓝色
13	5YR 8/4	白种人肤色 (淡黄粉色)
14	5GY 4/4	树叶绿

在孟塞尔表色系中, R 代表红色, 饱和红色 R9 是第 9 号颜色样品 (孟塞尔编号为 4.5R 4/13) 对光源真实颜色的复现有很重要的影响。我们在实验

中用分光辐射照度计 CL-500A 对被测光源进行光谱辐射测量得到被测光源的 x 、 y 和 u 、 v 色度坐标。通过测得的被测光源的相对光谱功率分布数据和 1-15 号试样色的光谱辐射因素, 计算被测光源下 1-15 号试验色的色度坐标 x_k, y_k , 然后计算被测光源与参照光源的色差 ΔE_i , 再根据公式 $R_i = 100 - 4.6 \times \Delta E_i$ 计算出被测光源的特殊显色指数。

色温的概念则起源于物体被加热至不同温度时, 它表现出来相对应的不同颜色。颜色与温度之间有联系, 当温度升高时, 物体的辐射会改变导致其颜色发生变化。某类特殊的发光物体当被加热时, 它能以 100% 的效率辐射。人们把这类理想的完全辐射称作黑体辐射, 这种辐射体称为黑体。理想黑体辐射时的颜色根据特定的温度而变化, 色相范围可以在 CIE 色度图上显示为一条曲线, 这条曲线称作黑体辐射轨迹 (或叫普朗克轨迹)。当温度上升时, 颜色会从深红色转为橙色、黄色、白色直至最终略带蓝色的白色。大多数自然光源如太阳光、星光和火焰的色彩温度特性都非常接近普朗克轨迹。当一个完全辐射体处于特定温度下, 某些光源的色彩与它的色彩相对应。对于某些特定的应用, 引入色温的概念对这类光源的区分十分方便 (测量单位为: 开尔文)。如果被测光源和一个黑体类似, 测量结果会非常精确。因此, 这条轨迹在对白色分类时非常有用, 在灯及显示设备制造领域的应用尤为广泛。

当光源的特性与完全辐射体的特征完全吻合时, 色温的概念是适用的。但一般光源发出的光接近但不完全吻合于黑体辐射, 色温概念因此需要被延伸。当要描述一个光源的色温与黑体辐射体的色温接近时, 我们会用相关色温 (CCT) 来衡量。我们在色温曲线上引入等温线, 等温线是一些直线, 它表示被测光源的色温与黑体辐射色温在看起来相似时, 它与黑体辐射曲线之间的同色温点上色差, 通常用 Δ_{uv} 来表示, 最大的色差大小 Δ_{uv} 为 ± 0.02 。

4 LED 光管实验室测试

为了使 LED 光源的色品质评估具体化, 本文进一步以不同厂家生产的白光 LED 灯管进行现场的效果测试实验。针对目前的 LED 应用示范工程中需要涉及到的现场验收情况, 本文实测了 10 种不同的 LED 灯管产品, 分别评估它们在现场的照明效果。在

实验中, 需要对这类 LED 光管的几个方面进行评判:

1) 在 LED 光管安装后, 它是否能满足人眼在照明环境观察所需要到的照度? 2) 光管对物体的颜色真实还原程度如何? 3) 光管对人眼的观察会不会造成眩晕或带来不舒适的色调感觉? 4) 光源对物体照明是否会产生重影等问题? 这些我们都需要通过照度、显色指数、色温、色坐标等基本参数的测量进行评估。

测量工具: 本文采用了柯尼卡美能达的分光辐射照度计 CL-500A 作为测量仪器, 可以读取光源的一般显色指数 R_a 、特殊显色指数 $R_1 \sim R_{15}$ 、色温、照度、色坐标、光谱图线、特征波长、色纯度等参数。这台分光辐射照度计在实验前已通过国家计量院的计量, 在照度和光谱数据方面均达到标准要求。测量数据可在电脑软件 CL-S10w 中分析和判断, 具体的测量功能如图 1~图 4 所示。

测量方法: 选取 10 个不同厂家型号的白光 LED 灯管产品, 灯管均由 LED 封装阵列组成, 正常燃点 30 分钟后, 在距离 LED 光管发光面正下方 2 米处用 CL-500A 测量产品的照明效果参数。

测量环境: 在环境温度为 25°C , 背景照度 $< 0.01\text{lx}$ 的暗房。

测量参数: 照度、色坐标、色温、特征波长、一般显色指数 R_a 、特殊显色指数 R_9

测量数据如表 2 所示: 10 个厂家 LED 光管产品的测试参数结果。



图 1 测量一般显色指数 R_a 和特殊显色指数 $R_1 \sim R_{15}$
Fig. 1 Measure the general color rendering index R_a and the special color rendering index $R_1 \sim R_{15}$

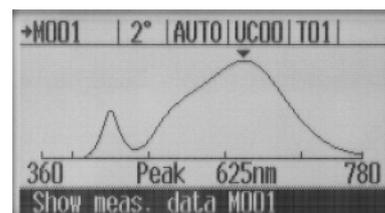


图 2 显示光源的谱线图线和特征波长
Fig. 2 The spectral lines and the characteristic wavelength of the displaying light source

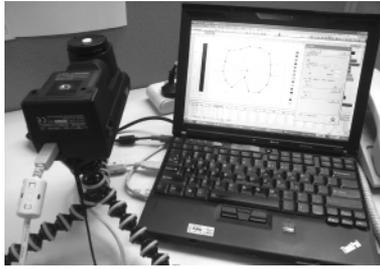


图 3 CL-500A 连接电脑输出显色指数和光谱数据
Fig. 3 The color rendering index and spectral datas outputting by the computer connecting to CL-500A



图 4 用 CL-500A 测量环境光源的照度和色温
Fig. 4 Measure the illuminance and color temperature of ambient light source using CL-500A

表 2 10 个厂家 LED 光管产品的测量数据
Table 2 Testing data for the ten LED light tube samples

厂家编号	Ev	x	y	Tcp	duv	峰值波长/nm	Ra	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
1	92.88	0.3387	0.3523	5256	0.003	453	82	80	89	93	80	80	83	87	66	5
2	104.86	0.3176	0.3441	6188	0.0084	445	81	79	83	88	82	80	78	87	72	10
3	106.79	0.3437	0.3477	5040	-0.0014	451	83	84	86	82	84	83	77	89	80	42
4	99.33	0.3447	0.3495	5005	-0.0009	451	83	84	85	82	84	82	77	89	80	41
5	102.24	0.3140	0.3389	6388	0.0075	448	72	69	75	79	73	70	67	82	61	-31
6	103.33	0.3500	0.3675	4886	0.0059	448	84	81	87	92	84	82	82	90	73	22
7	103.95	0.3346	0.3389	5400	-0.002	454	86	86	94	95	83	85	88	86	71	23
8	100.16	0.3220	0.3472	5973	0.0079	450	73	69	77	81	73	70	68	84	60	-28
9	98.94	0.3851	0.3900	3974	0.0047	586	80	77	88	96	77	77	83	85	60	0
10	104.3	0.3052	0.3315	6922	0.0083	445	80	80	81	79	82	80	74	86	78	26

从表 2 可以看到, 如果按照 GB 50034 - 2013 的要求, 使用 LED 灯具要求 4000K 以下色温, 则 9 家厂家的 LED 产品均不能符合要求。如按一般显色指数 $R_a > 80$ 的要求, 则 8 种型号的 LED 产品符合要求, 2 种型号的 LED 产品不符合要求。针对国家 LED 产品标准中要求的 $R_9 > 0$, 同样 8 种型号的 LED 产品符合要求。其中厂家编号为 5 和厂家编号为 8 的 LED 灯管的 R_9 值为负, 且差值很大, 产品的 R_a 均 < 80 。通过以上显色指数的比较, 直观体现了 R_a 与 R_9 在 LED 光源的颜色复现能力上有必然

的联系, 当 R_9 的值接近或者大于 0 时, 一般 LED 产品的显色指数 R_a 基本上能保持在 80 以上, 可见 LED 产品国家标准提到的 $R_9 > 0$ 是提高产品显色性的一项关键指标, 必须加以重视。我们以厂家编号为 1 款型号和厂家编号为 5 款型号的产品比较为例, 具体如图 5 和图 6 所示。

通过表 2 的 10 个产品的色温可以看出, 目前测试 10 个型号的 LED 光管产品, 只有厂家编号为 9 的产品色温 $< 4000K$, 为 3974K; 其余的有 5 款型号的产品色温位于 4500K ~ 5500K 之间, 3 款型号的产

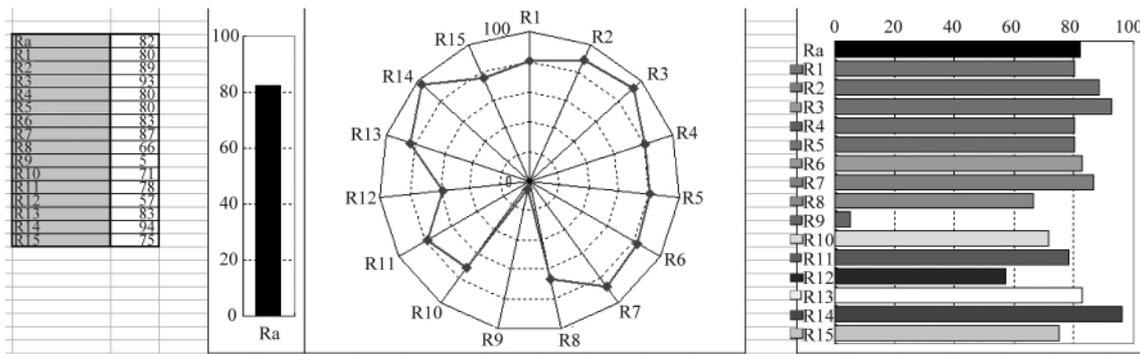


图 5 厂家编号 1: 一般显色指数 $R_a = 82$, $R_9 = 5$

Fig. 5 Sample 1: general color rendering index $R_a = 82$, special color rendering index $R_9 = 5$

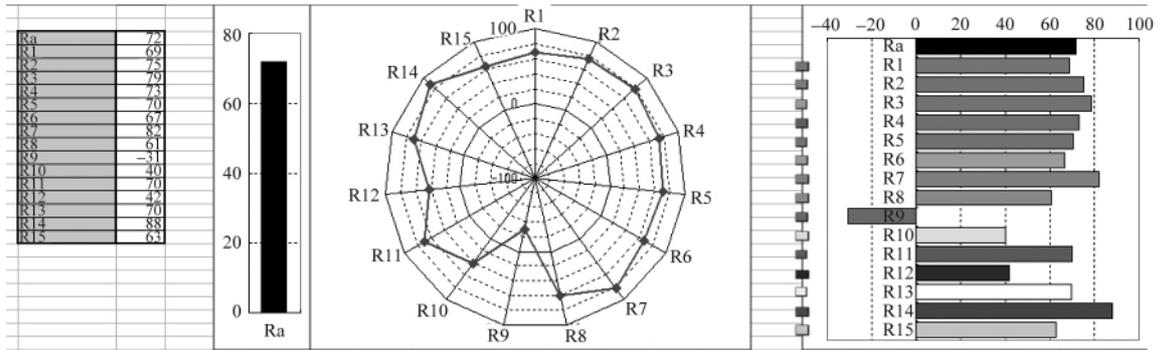


图6 厂家编号5: 一般显色指数 Ra = 72, R9 = -31

Fig. 6 Sample 5: general color rendering index Ra = 72, special color rendering index R9 = -31

品色温位于 5500K ~ 6500K 之间, 1 款型号的产品色温 > 6500K, 为 6922K。按照 GB 50034 - 2004 征求意见稿要求, 室内使用的 LED 照明产品的色温 < 4000K, 通过测试只有 1 家能够符合要求, 而如果按照通常的室内色温 < 6500K 的要求, 则 9 家产品的色温均能符合要求。由于白光 LED 主要以蓝光激发为主, 蓝光成分的增加会使色温增加, 色温越高, 白光 LED 产生的不舒适眩光越强。目前其他国际标准未见对 LED 照明的严格色温要求, 但一般的制备经验表明, 减少白光 LED 混光中的蓝光成分, 保持合适的色温是解决白光 LED 眩光问题的一个重要手段。室内使用的 LED 照明产品的色温 < 4000K 的要求, 其理论和应用合理性还有待进一步研究。

成分进行分析 (见图 7、图 8), 由光谱测量结果可以知道厂家编号为 4 的产品的一般显色指数 Ra 为 83, 特殊显色指数 R9 为 41, 特征波长为 451nm, 同时在 550nm 和 650nm 对应的黄绿光和红光有激发能量的波峰; 厂家编号为 5 的产品的一般显色指数 Ra 为 72, 特殊显色指数 R9 为 31, 特征波长为 448nm, 在黄绿光对应波段 550nm 处有能量集中波峰, 但是在红光谱段明显缺乏。经过两个产品的光谱成分对比, 不难发现厂家为 4 的产品在蓝光、红光、黄绿光的谱段都有一定比例的混合。厂家编号为 5 的产品的的光谱主要来自蓝光和黄绿光过渡的混合, 对红光补偿不足所以会造成产品的一般显色指数偏低。而且实验发现, 对于不连续光谱的光源, 含有 500 nm 和 580 nm 波长附近的光谱对颜色显现

以厂家编号为 4 和厂家编号为 5 的产品的的光谱

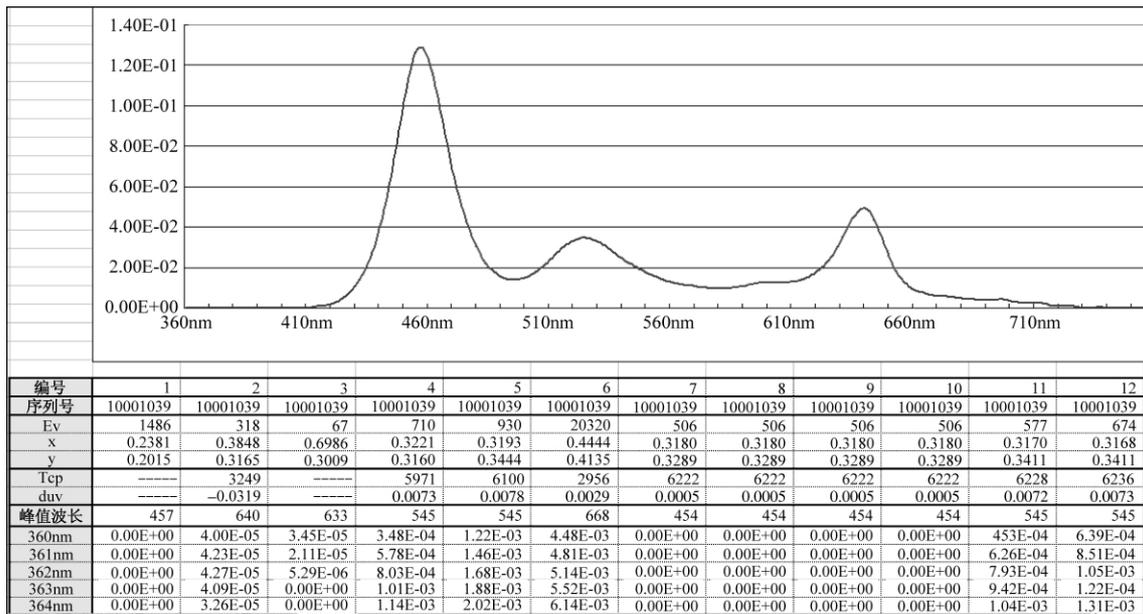


图7 厂家编号为4的LED光管谱线图

Fig. 7 The spectrum of Sample -4 LED white light tube

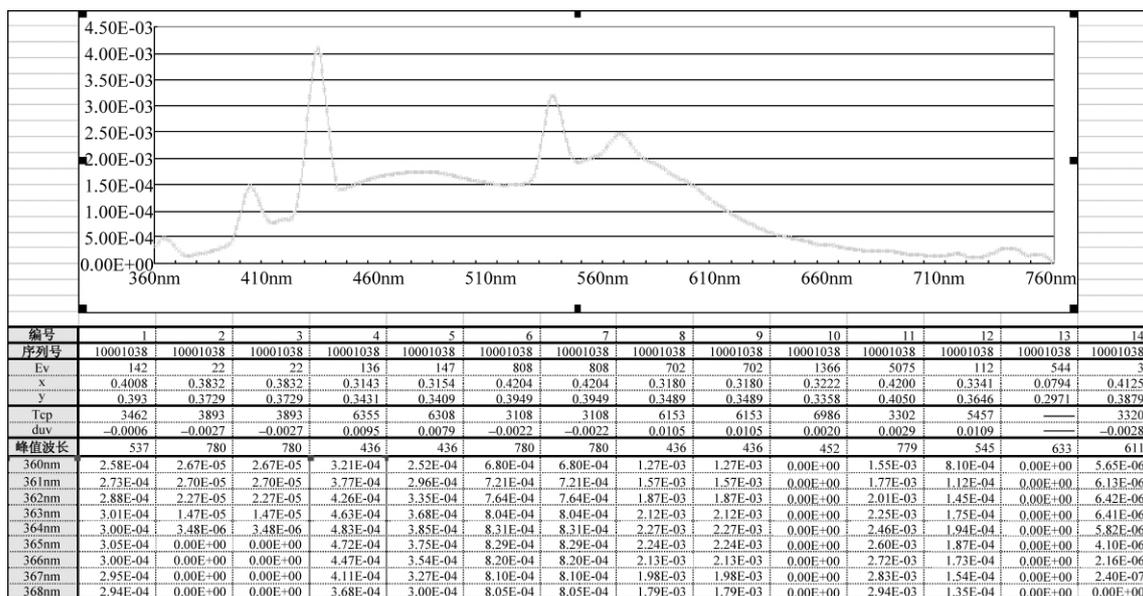


图 8 厂家编号为 5 的 LED 光管谱线图

Fig. 8 The spectrum of Sample -5 LED white light tube

有不利影响, 容易使一些颜色失真。如果在混光中消除 450 nm, 540 nm, 616 nm 的波长功率, 又会导致显色性明显下降。以 450nm 左右的蓝光芯片配备的白光 LED 为例, 尽量提高红光在 650nm 左右的光谱成分并配以峰值波长为 567nm 的黄色荧光粉和一定比例的绿色荧光粉; 或者是保持 450nm 蓝光、540nm 绿光和 616nm 桔红光以适当比例混合对产品整体显色性的提升有很好的帮助。

5 测试结果分析

一般情况下, 国家标准要求室内 LED 照明产品的显色指数 $R_a > 80$, $R_9 > 0$ 。如果白光 LED 灯管的光谱中局部缺乏红色, 只呈现局部蓝光及黄光就会导致特殊显色指数 $R_9 < 0$ 。由于目前白光 LED 通常是使用蓝色 LED 芯片加 YAG 荧光粉混光, 通过蓝色 LED 激发荧光粉产生黄绿光和蓝光来混合形成视觉上的白光。该技术的缺陷在于产品中缺乏红色光谱, 导致显色指数偏低。对色温低于 4000K 的白光 LED 来说, 如果红色荧光粉不足会导致产品的一般显色指数偏低, 不适合用于显色性要求高的场所。在 RGB 三基色中, 红色所对应的白光指标是显色指数, 红光成分越多则显色指数越高; 蓝光对应色温, 蓝光成分越多色温越高。这表明产品在红色荧光粉或者红光不足的情况下, 需要增加红色荧光粉或补偿红光以提高产品

的显色指数。所以, 厂家在追求产品的高光通量同时, 既要考虑高显色性, 又要做到额定色温, 就需要调整好混光的比例和提升荧光材料的激发效率。这也成为白光 LED 所需要克服的技术难点。

提高白光 LED 产品的显色指数主要遵循混色原理, 基本上有如下几种方法: (1) 利用 RGB 芯片来进行混色, 可以显著提高产品显色指数, 但缺点是不易于掌握 RGB 三色的混色份额, 且不利于提高产品的光效, 产品研发成本比较高。(2) 使用蓝色芯片和红、绿、黄三色荧光粉混合制备白光, 通过适当的比例可以制造出显色指数高于 90 的产品。缺点同样比较明显, 由于绿色荧光粉的激发效率不高, 抑制了大部分蓝色光辐射, 导致器件光效降低。(3) 使用蓝色芯片和红、绿、黄三色荧光粉混合制备白光, 通过此种办法制备的器件在显色指数上有显著提高, 但由于荧光粉的衰减问题, 在显色指数维持率上往往达不到技术文件的要求。目前, 大部分厂家的配方仍以蓝色芯片配备黄、红色荧光粉为主, 也会混入一定比例绿色荧光粉提高光通量。大多数产品在黄色荧光粉和红色荧光粉的激发效率上仍需要提升, 才可以制备出高显色和高光效的白光产品。

另外, 即使是两个 LED 灯管测得相同的显色指数, 可是其配方的不同或者在混光工艺上的差异也有可能使人眼产生不舒适的感觉。如何保持显色指 (下转第 59 页)

- investigation of lamps of different SPD. Part 2—Brightness [J]. *Lighting Res. Technol.* 2007, 39 (3): 233 ~ 252.
- [6] Fotios S, Cheal C, Boyce P. Lighting source spectrum, brightness perception and visual performance in pedestrian environments: a review [J]. *Lighting Res. Technol.* 2005, 37 (4): 271 ~ 294.
- [7] Fotios S, Cheal C. Lighting for subsidiary streets: investigation of lamps of different SPD. Part 1—Visual Performance [J]. *Lighting Res. Technol.* 2007, 39 (3): 215 ~ 232.
- [8] Eloholma M, Halonen L, Setälä K. The effects of light spectrum on visual acuity in mesopic lighting levels [C], In *Proceedings: Vision at Low Light Levels*. Palo Alto CA: EPRI, 1999.
- [9] Boyce P R, Bruno L D. An evaluation of high pressure sodium and metal halide light sources for parking lot lighting [J]. *J. Illum. Eng. Soc.*, 1999, 28: 16 ~ 32.
- [10] He Y, Rea MS, Bierman A, Bullough J. Evaluating light source efficacy under mesopic conditions using reaction times [J]. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 1997, 26: 125 ~ 138.
- [11] Boyce PR, Rea MS. Security lighting: effects of illuminance and light source on the capabilities of guards and intruders [J]. *Lighting Res. Technol.*, 1990, 22: 57 ~ 79.
- [12] Rea M, Bullough J, Akashi Y. Several views of metal halide and high pressure sodium lighting for outdoor applications [J]. *Lighting Res. Technol.*, 2009, 41: 297 ~ 320.
- [13] Raynham P, Saksvikrønning T. White light and facial recognition. *The Lighting J.*, 2003, 68: 29 ~ 33.
- [14] Knight C, Van Kemenade J, Devenci Z. Effect of outdoor lighting on perception and appreciation of end-users [Z]. College Station TX, United States: 2007.
- [15] 姚其, 林燕丹, 陈文成. 基于人体功效学评价新型金卤灯在道路上的应用及其与高压钠灯的比较分析 [C]. 海峡两岸第十四届照明科技与营销研讨会, 2007, 92 ~ 103.
- [16] Fotios S, Raynham P. Correspondence: Lighting for pedestrian: Is facial recognition what matters? [J]. *Lighting Res. Technol.*, 2011 (43): 129 ~ 130.
- [17] 刘行仁, 郭光华. 低色温 (3450 ~ 2700K) 白光 LED 的发射光谱和色品质特性 [J]. *照明工程学报*, 2005, 16 (1): 42 ~ 45.
- [18] 刘行仁, 郭光华, 林振宇等. 相关色温 8000 ~ 4000K 的白光 LED 的发射光谱和色品质特性 [J]. *中国照明电器*. 2004 (7): 1 ~ 4.
- [19] International D A. Visibility environment and astronomical issues associated with blue-rich white outdoor lighting [R]. 2010.
- [20] Puolakka M., Cengiz C., Luo W., Halonen L.. Implementation of CIE 191 mesopic photometry—ongoing and future actions [C]. *Proceedings of CIE 2012 ‘Lighting quality and energy efficiency’*, Hangzhou, 2012: 64 ~ 70.

(上接第 53 页)

数和色温协调一致, 在室内照明中不会对入眼造成不自然的感觉, 是 LED 厂家在产品的改良和技术的提升方面都需要考虑的问题。随着 LED 产品在酒店、医院、博物馆、体育馆等场所使用增加, 人们对照明光源的颜色感知越来越敏感, 客观上要求厂家在研发和生产时考虑好 LED 产品的显色性、色温、照度均衡的问题。因为这些因素都将成为决定其产品能否被用作建筑照明光源的重要参考指标。

6 结论

本文结合最新提出的国家标准要求, 对不同厂家的白光 LED 灯管产品的照明效果进行了测试和研究, 测试的结果显示, 为符合最新国家产品标准和

应用标准的要求, 部分厂家的白光 LED 产品的显色性和色温还需要进行设计性调整, 即 LED 照明产品的荧光粉配方或者在混光制备工艺上仍需要改进, 以满足即将颁布的国家标准的最新要求。

参考文献

- [1] 赵建平等. GB 50034 - 2004, 建筑照明设计标准.
- [2] 赵建平等. GB 50034 - 2013, 建筑照明设计标准 (征求意见稿).
- [3] 李自力等. GB24832 - 2009, 普通照明用 LED 模块性能要求.
- [4] 施晓红等. GB**** - 2013, LED 筒灯性能要求.
- [5] 谭力, 刘玉玲, 余飞鸿. 光源显色指数的计算方法研究.
- [6] 柯尼卡美能达. 光的语言.