

## 基于积分球的蓝光LED荧光粉测试系统

肖 华, 吕毅军, 高玉琳, 朱丽虹, 陈国龙, 陈 忠

(厦门大学电子科学系, 福建省半导体照明工程技术研究中心, 福建 厦门 361005)

**摘 要:** 为尽可能反映荧光粉在实际工作条件下的发光性质, 准确测量荧光粉的发光性能, 提出了一种基于积分球的荧光粉发光性能测试系统。该系统采用蓝光LED作为激发光源, 配置有TEC控温系统对光源有效实施控温, 可提供持续稳定的激发荧光粉发光。采用出光筒控制光源方向和积分球收集光线, 能有效防止能量损失, 提高测试的精确性。通过实验得到了不同强度蓝光激发下的荧光粉光谱功率分布以及发光效能、量子效率、光转换效率等参数的变化规律。随着驱动电流的增大, 由于蓝光芯片内量子限制斯塔克效应, 从而导致蓝光峰值波长出现小幅度的蓝移。三种效率在小电流下基本呈线性下降趋势, 且在大电流下趋于平缓。实验结果表明, 该系统及方法可以有效地评价实际LED芯片工作状态下的荧光粉发光性能。

**关键词:** 白光LED; 荧光粉; 发光效能; 量子效率; 光转换效率

中图分类号: TN312<sup>·</sup>8; O433.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-04-0021-05

## Testing System of Phosphor Excited by Blue LED Based on Integral Sphere

XIAO Hua, LU Yi-jun, GAO Yu-lin, ZHU Li-hong, CHEN Guo-long, CHEN Zhong

(Department of Electronic Science, Xiamen University, Fujian Province Engineering Technology Research Center for Semi-conductor Lighting, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** A testing system for phosphor luminous characteristics based on integral sphere is proposed so as to show luminous characteristics of phosphor at actual operation circumstances and measure its luminous characteristics accurately. Blue LED is used as an excited source in the system. TEC temperature control system is used to control the temperature of the source effectively. And continuous and stable excited light is provided to excite phosphor illuminating. Energy loss is prevented effectively and testing accuracy is enhanced for the direction of source controlled by a light tube and light ray collected by integral sphere. Based on experiments, spectrum power distributions of phosphor excited by blue light with difference light strength and variation rules of parameters such as luminous efficiency, quantum efficiency and light conversion efficiency are got. With the increasing of driving current, a small blue shift appears in blue light peak wavelength for quantum confined Stark effect in blue light chip. Three kinds of efficiency almost show linear decline trend at low current and then approach to constant at high current. Experimental results show that luminous characteristics of phosphor on real LED chip at operation state can be evaluated effectively by the system and method.

**Key words:** white light LED; phosphor; luminous efficiency; quantum efficiency; light conversion efficiency

近年来, 气候的急剧变化已经成为整个社会面临的严峻问题, 因此, 世界各个领域都对环保和节能提出

了更高的要求。在照明行业中, LED成为各界关注的焦点<sup>[1-2]</sup>。白光LED灯具有诸如尺寸小、安全、寿命长

收稿日期: 2013-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(11104230); 福建省重点科技项目(2011H6025, 2012H0039)

作者简介: 肖华(1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事半导体光电检测及特性方面的研究。

以及无水银等节能环保的优点,所以有望取代传统白炽灯以及荧光灯成为新一代节能照明光源<sup>[3]</sup>。

目前主要有三种技术途径来实现白光LED:一是通过红、绿、蓝(RGB)三基色LED芯片混光获得白光,二是通过紫外芯片激发三基色荧光粉实现白光,三是通过蓝光芯片激发黄光荧光粉实现白光<sup>[4-5]</sup>。综合技术、工艺等因素,第三种技术不仅在白光LED封装技术上占据主导地位,并已实现产业化。1996年,日本日亚化学公司率先利用蓝光GaN管芯激发YAG:Ce<sup>3+</sup>黄色荧光粉,研发出了白光LED<sup>[6]</sup>,其原理是荧光粉受蓝光激发后产生黄光,蓝光和黄光相互混合后被人眼接收,产生白光的效果<sup>[7]</sup>。如今,蓝光LED芯片和荧光粉制备白光LED的技术在照明领域备受关注,并广泛应用于装饰、建筑、汽车以及医用光源等方面<sup>[8]</sup>。

## 1 LED荧光粉测量原理

荧光粉一般可用相对亮度来评价其发光效率的高低,但这种方法需要标准荧光粉作参考,而标准荧光粉的制备、存储及稳定性都有很高的要求;而且相对亮度只是比较两种色温、光谱功率分布相近的荧光粉才有意义,当两种荧光粉的色温明显不同时,相对亮度还不能真正反应荧光粉发光性能的优劣<sup>[9]</sup>。因此在LED荧光粉的效率评价中,引入光转换效率、发光效能及量子效率三个指标。

荧光粉的光转换效率 $\eta_E$ ,指荧光粉在一定波长的入射光激发下,发射光的能量 $\varphi_{e\text{发射}}$ (或光功率)与激发光的能量 $\varphi_{e\text{激发}}$ (或光功率)之比,即

$$\eta_E = \frac{\varphi_{e\text{发射}}}{\varphi_{e\text{激发}}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{em}(\lambda_{em}) d\lambda_{em}}{\int_{\lambda_1'}^{\lambda_2'} \varphi_{ex}(\lambda_{ex}) d\lambda_{ex}} \quad (1)$$

荧光粉的发光效能 $\eta_L$ ,描述的是光辐射通量经过“人眼”以后可以产生多少相应光通量的刺激。用发射光的光通量 $\Phi_V$ (lm)与激发光功率 $\Phi_E$ (W)之比来表示,其量纲单位为lm/W,记为 $\eta_L$

$$\eta_L = \frac{\Phi_V}{\Phi_E} = \frac{683 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{em}(\lambda_{em}) \cdot V(\lambda_{em}) d\lambda_{em}}{\int_{\lambda_1'}^{\lambda_2'} \varphi_{ex}(\lambda_{ex}) d\lambda_{ex}} \quad (2)$$

荧光粉的外量子效率 $\eta_Q$ 指荧光粉在入射光激发下,发射光的光子数 $N_{\text{发射}}$ 与激发光的光子数 $N_{\text{激发}}$ 之比,即

$$\eta_Q = \frac{N_{\text{发射}}}{N_{\text{激发}}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{em}(\lambda_{em}) / (\frac{hc}{\lambda_{em}}) d\lambda_{em}}{\int_{\lambda_1'}^{\lambda_2'} \varphi_{ex}(\lambda_{ex}) / (\frac{hc}{\lambda_{ex}}) d\lambda_{ex}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda_{em} \varphi_{em}(\lambda_{em}) d\lambda_{em}}{\int_{\lambda_1'}^{\lambda_2'} \lambda_{ex} \varphi_{ex}(\lambda_{ex}) d\lambda_{ex}} \quad (3)$$

式(1)~式(3)中, $\lambda_{ex}$ 为激发光波长; $\lambda_{em}$ 为发射光波长; $\varphi_{em}(\lambda_{em})$ 为荧光粉的发射光谱功率分布; $\varphi_{ex}(\lambda_{ex})$ 为激发光谱功率分布; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 是发射光谱范围, $\lambda_1' \sim \lambda_2'$ 是入射光谱范围<sup>[13]</sup>。

## 2 LED荧光粉测试方法

目前,荧光粉测试装置、系统多种多样,但是测试方法都不尽完善。很多研究小组利用不同的方法对荧光粉的发光性能进行了测试。李亮等<sup>[4]</sup>利用LED光色电参数综合测试仪测量了不同浓度的LED荧光粉随着驱动电流增加,其结温以及显色指数的变化情况;陈国龙等<sup>[9]</sup>用PE-5荧光粉激发装置,实现了蓝光激发下黄色YAG荧光粉的色品坐标、相对亮度、量子效率等参数的测量;郭伟玲等<sup>[10]</sup>用浙大三色的LED光电热测试系统对不同比例配置下的荧光粉实施了显色指数、流明效率以及色温等的测量,并讨论了不同配比的荧光粉测试的光学特性以及变温特性;何锦华等<sup>[11]</sup>为研制高显色LED,以蓝光LED芯片作为激发光源,通过封装实验,采用杭州远方PMS50型LED光谱分析系统研究了对于特定的荧光粉,蓝光芯片波段和白光LED色温对显色指数的影响,确定了两种荧光粉优化的组合方案。

荧光粉的发光性能测试中,装置的合理性在很大程度上影响测量的准确性、可靠性。近年来,多个研究小组提出了多种分析测试荧光粉发光性能的新颖方法。付伟等<sup>[12]</sup>利用光学软件仿真的方法分析了积分球涂层特性、不同测量方法对荧光粉荧光外量子效率测量准确性的影响,提出了基于内置标准散射片于积分球中的准确测定LED荧光粉荧光外量子效率的方法;王亿等<sup>[13]</sup>提出了一种双分光式荧光粉测量系统,测量了荧光粉在单色波长激发下的量子效率,通过与蓝光LED芯片光谱加权积分,得到了蓝光LED芯片激发的白光LED光谱、光度及色度性能参数;Liu Zongyuan等<sup>[14]</sup>为准确获得YAG荧光粉的光学特性,采用一种由两个直径为150mm的积分球和杭州远方PMS-50分光光度计组成双积分球系统对YAG荧光粉进行测量,用米氏散射理论和蒙特卡洛

光线追踪方法进行计算,可准确得到YAG荧光粉的光学特性。尽管荧光粉发光性能的测试方法和装置多种多样,但是有些仪器操作过于复杂,价格昂贵,无法在实验室和生产线上广泛使用,有些更是受到实际封装技术的限制,其测量方法的精确性及稳定性有待提高。目前市场上也出现了一些采用LED作为激发光源的荧光粉测量系统,但是其激发光源通过反射镜入射到积分球内,增大了杂散光对测量的影响而引起的误差,且不能实现测量激发源在不同电流下激发荧光粉的发光效能,使荧光粉性能研究受到限制。从荧光粉的光谱特性看,激发光源种类不同,荧光粉的发光性能也不同。而荧光粉的发光性能在很大程度上影响LED的产品质量,因此,控制激发光源的稳定性,提高激发光源与荧光粉的匹配性,提高实验装置的可适用性对正确衡量荧光粉的发光性能具有重要意义。目前LED荧光粉发光性能的测量中,通常利用氙灯产生白光通过滤光片或者通过单色仪获取蓝光的方法获得激发光源,激发荧光粉发光,获得荧光粉的光谱特性。这种方法本身光线较弱,光能损失严重,且光谱为窄带光谱,与实际应用中的LED激发光谱差别较大。另一方面,大多数荧光粉测试方法没有考虑到LED光源的结温升高对荧光粉激发效率的影响。随着驱动电流的增大,器件温度升高,很容易造成激发的蓝光波段光谱峰值波长向短波长方向漂移,这会造成蓝光峰值波长与荧光粉的激发波长主峰失配,降低蓝光转换为黄光的效率,从而导致测量结果的不准确。

### 3 LED 荧光粉测试系统

基于上述考虑,提出了一套适用性好的荧光粉性能测试系统。系统采用峰值波长为460 nm的蓝光LED作为激发光源,配置有TEC控温系统对光源有效实施控温,提供持续稳定的激发光源。利用出光筒控制激发光源入射方向,能有效防止能量损失,采用积分球对光线进行收集,提高了测试的精确性,方便准确地测量分析荧光粉在实际工作条件下的发光效能、光转换效率、量子效率等重要性能指标。同时,系统可以通过灵活更换LED激发光源,实现不同荧光粉对不同激发光源的要求,具有良好的扩展性能。

#### 3.1 系统构成

测试系统如图1所示。系统分为ISP150积分球、IS Spectro320光谱仪两部分。荧光粉为YAG:Ce<sup>3+</sup>,激

发光源为波长460 nm的1 W大功率蓝光LED光源,实验通过恒流源调节蓝光LED在100~500 mA等不同驱动电流下工作,并通过TEC控温热沉控制LED管壳温度保持在25℃。

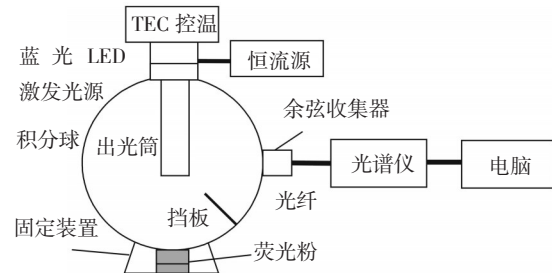


图1 荧光粉光谱测试系统

#### 3.2 测试步骤

测试系统对荧光粉的发光性能测试步骤如下:

首先是激发光源光谱测量:将标准白板固定在夹具上,开启蓝光LED激发光源,光源发出的光线经过出光筒垂直入射到白板位置经积分球内均匀反射,光线由余弦探测器接收后,经过Spectro320光谱仪分析与处理得到蓝光LED激发光谱功率分布。

其次是荧光粉发射光谱测量:图1中标准白板用荧光粉代替,蓝光LED激发光源发出的光线经过出光筒垂直入射到荧光粉层经积分球内均匀反射,光线由余弦探测器接收后,经过Spectro320光谱仪分析与处理得到荧光粉发射光谱相对功率分布。

最后将所得的混合后的白光的相对光谱功率分布与与激发光源的相对光谱功率分布进行比较,扣除掉白光相对光谱功率分布中的蓝光光谱部分,即可得到荧光粉在不同电流蓝光激发下所得的相对光谱功率分布,进而按照公式(1)~(3)计算荧光粉的发光效能、量子效率、光转换效率等参数。

#### 3.3 特点

该系统的测试方法与普通的荧光粉性能测试方法相比有如下特点:①利用积分球全封闭的特性可以避免光能的浪费以及光不均匀性对实验结果的影响,能够极大地提升光谱仪获取光的能力;②出光筒可以很好地控制LED灯的照射方向,有效提高光能利用率,防止光线直接进入探头造成测量结果的不精确乃至仪器的损坏;③测量方法可靠,操作简单,误差较小;④采用控温蓝光LED做光源,出光稳定,



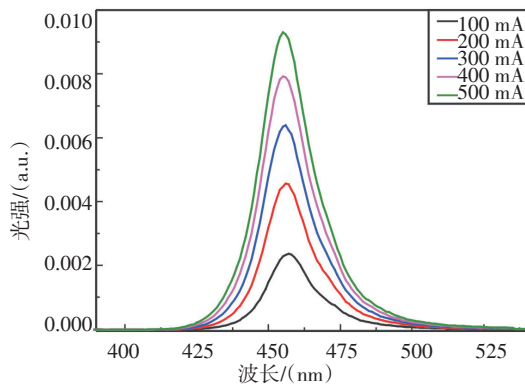
与实际工作条件一致;⑤可以得到不同驱动电流下的荧光粉发光性能以及光谱功率分布。

### 4 实验结果与分析

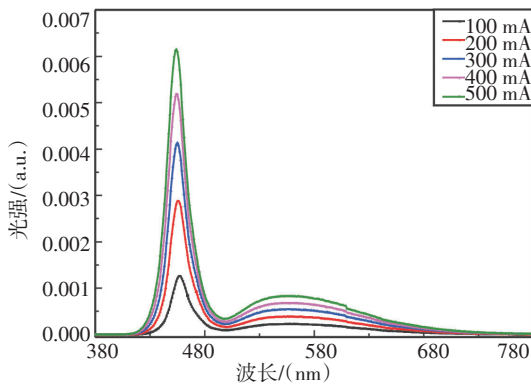
#### 4.1 不同驱动电流下的激发光谱

图 2a 为 100 mA、200 mA、300 mA、400 mA、500 mA 等不同输入电流下的蓝光 LED 光谱分布曲线。可以看出,随着电流的均匀增加,蓝光波峰的峰值在小电流下呈比例地增大,且增大的幅度在大电流下趋于平缓,在 TEC 装置控温下,蓝光峰值波长产生的漂移幅度较小,移动范围在 457.2 nm 到 455.2 nm 之间。造成蓝光 LED 峰值波长蓝移的主要原因,是由于 InGaN/GaN 多量子阱区强烈的极化效应,包括压电极化和自发极化,从而引起的芯片内量子限制斯塔克效应使致 InGaN 的禁带宽度增大,使 LED 峰值波长向短波方向移动<sup>[15]</sup>。

图 2b 为荧光粉分别在相应输入电流下,受蓝光 LED 激发后得到的白光光谱分布曲线。其光谱由两



(a)不同电流下的蓝光光谱分布



(b)不同电流下的白光光谱分布

图 2 不同电流下蓝光和白光的光谱分布

部分组成,其中蓝光峰为蓝光 LED 发射的光谱,而黄光部分为经蓝光激发后的荧光粉的发射光谱。白光光谱中,蓝光和黄光两个发光峰有部分重叠,随着输入电流的不断增大,蓝光和黄光重叠部分也逐渐增大。黄光峰较小且在电流增加的情况下不断增大,峰值的大小跟不同荧光粉品种的发光性质有关。

计算荧光粉光转化效率、发光效能和外量子效率时需要考虑扣除激发光源剩下的蓝光部分的影响,图 3 为扣除蓝光部分后的荧光粉的光谱分布。可以看出,随着电流的增大,黄光部分的峰值波长存在小量的漂移,但是幅度很小,可以忽略不计。其原因可能与荧光粉距离 LED 激发光源较远,没有有效实施对荧光粉的控温有关。

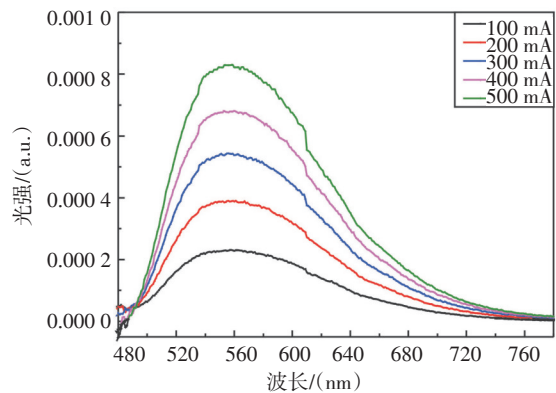
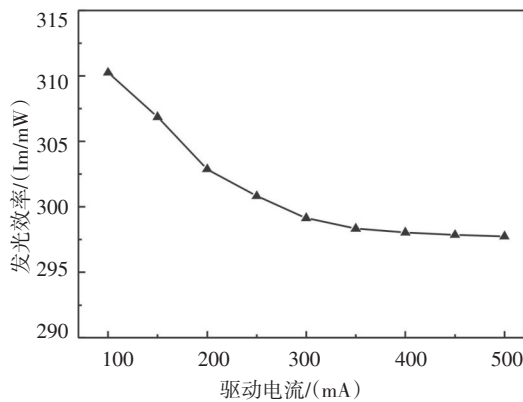


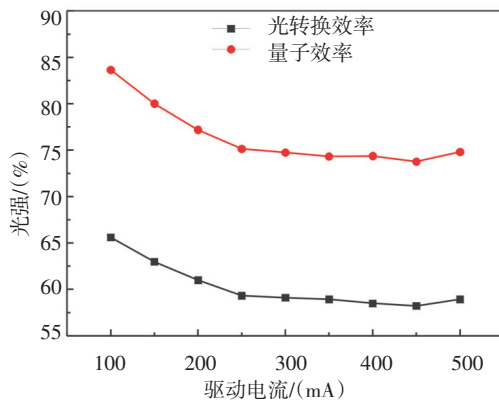
图 3 不同电流下黄光部分的光谱分布

#### 4.2 不同电流下的发光效能、外量子效率和光转换效率

图 4 为荧光粉在不同电流的蓝光激发下的发光效能、光转换效率和量子效率的变化情况。从图 4 可看出,在不同电流下,发光效能、光转换效率和量子效率的变化趋势大致是一致的,三者总体上都随驱动电流的增加先呈线性下降趋势,且在大电流下趋于平缓。另一方面,由于蓝光的峰值波长出现了偏移,激发光源波长的变化对荧光粉的激发效率也会有所影响。各方面的综合影响使得在大电流下,量子效率和光转换效率的值都有所下降。这说明,在实际应用中,可以根据输出功率的要求,适当调节电流以达到 LED 芯片和荧光粉的较佳组合。对于紫外激发的 RGB 荧光粉,系统可以通过灵活更换 LED 激发光源,实现不同荧光粉对不同激发光源的要求,测试方法保持不变,具有良好的扩展性能。



(a)发光效能变化曲线



(b)光转换效率和量子效率的变化曲线

图4 荧光粉在不同电流下的蓝光激发下的发光效能、光转换效率和量子效率

## 5 结论

白光LED作为新一代的半导体照明器件,荧光粉的发光特性是影响其性能的重要因素。针对荧光粉的发光性能测试,提出了一套简单实用的测量系统及方法。用积分球收集光线避免了光能的浪费以及光不均匀性的影响,采用TEC控温装置对蓝光LED激发光源实施控温,获得持续稳定的激发光,用出光筒控制LED灯的照射方向,减小光能损耗,避免杂散光对探测器的影响。通过LED恒流源调节,得到了不同驱动电流下的蓝光LED激发下荧光光谱及荧光粉的发光效能、量子效率、光转换效率随电流的变化情况。实验结果表明,该测量系统和分析方法可以很好地表征LED荧光粉的发光特性,通过电流调节,荧光粉可以和LED芯片达到较佳输出组合。同时,系统具有良好的扩展性能,通过灵活更换LED激发光源,易于实现紫外激发的RGB荧光粉等不同荧光粉对不同激发光源的要求。但是,系统不足之处在于荧光粉与光源相距甚远,其工作温度与实际

情况有一定差距,这点会在日后的工作中改进。

## 参考文献

- [1] 金骥,余桂英,林敏. 基于非成像光学的LED高收光率的抛物反射器研究[J]. 中国激光, 2010,37(3):680-684.
- [2] Sedat Nizamoglu, Gulis Zengin, Hilmi Volkan Demir. Color-converting combinations of nanocrystal emitters for warm-white light generation with high color rendering index [J]. Appl. Phys. Lett., 2008,92(3):031102-1-031102-3.
- [3] Naoki Kimura, Ken Sakuma, Syunichiro Hirafune, et al. Extrahigh color rendering white light-emitting diode lamps using oxynitride and nitride phosphors excited by blue light-emitting diode[J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 90 (5): 051109-1-051109-3.
- [4] 李亮,金尚忠,岑松原,等. 荧光粉浓度和电流强度对白光LED特性的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2012,49: 032301-1-032301-6.
- [5] 李盼来,杨志平,王志军,等. 用于白光LED的Sr<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup>材料制备及发光特性研究[J]. 科学通报, 2007,52 (13):1495-1498.
- [6] S Nakamura, G Fasol. The Blue Laser Diode[M]. Berlin: Springer Press, 1996:1-24.
- [7] YANG Chih-Chieh, LIN Chih-Min, CHEN Yi-Jung, et al. Highly stable three-band white light from an In-GaN-based blue light-emitting diode chip precoated with (oxy) nitride green/red phosphors[J]. Appl. Phys. Lett., 2007,90(12):123503-1-123503-3.
- [8] Pranciškus Vitta, Paulius Pobedinskas, Artūras Žukauskas. Phosphor thermometry in white light-emitting diodes [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19 (6): 399-401.
- [9] 陈国龙,薛浩,张纪红,等. 基于Spectro320e光谱仪的白光LED荧光粉性能测试[J]. 现代显示, 2012,135:29-33.
- [10] 郭伟玲,崔德胜,崔碧峰,等. 荧光粉比例对白光LED特性的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31 (10): 2680-2683.
- [11] 何锦华,梁超,符义兵. 荧光粉在高显色白光LED中的应用技术研究[J]. 中国照明电器, 2009,2:11-13,33.
- [12] 付伟,钱可元,罗毅,等. 白光LED荧光粉荧光外量子效率的准确测量[J]. 半导体光电, 2011,32(5):640-645.
- [13] WANG Yi, MOU Tong-sheng, LI Li. Characterization and measurement of white LED phosphors[J]. Opto-electronic Engineering, 2010,37(9):127-132.
- [14] LIU Zong-yuan, LIU Sheng, WANG Kai, et al. Measurement and numerical studies of optical properties of YAG:Ce phosphor for white light-emitting diode packaging[J]. Applied Optics, 2010,49(2):247-257.
- [15] 吴国庆,郭伟玲,朱彦旭,等. 驱动电流对大功率白光LED荧光粉转换效率的影响[J]. 光电子·激光, 2012, 23 (10):1869-1875.