

基于 Ce : YAG 荧光晶体的高流明密度光源

潘富林^{1,2}, 曹顿华³, 郭向朝¹, 李海兵^{1*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光单元技术实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

³南京光宝光电科技有限公司, 江苏 南京 210038

摘要 大功率 LED 照明的需求越来越大,但随着蓝光 LED 芯片功率的不断上升,散热和光衰减等问题也愈发显现出来。为探索大功率 LED 特种照明,基于阵列蓝光 LED 激发 Ce : YAG 荧光晶体,采用创新的结构装置,在小面积端面输出高流明密度的光。研究影响 LED 出光的因素、不同掺杂浓度(物质的量浓度)晶棒对于蓝光的吸收、大功率 LED 激发不同 Ce 离子掺杂浓度晶棒的出光效果、晶棒端面处理情况对于出光的影响等。结果表明,利用氮化铝制成的基板满足大功率 LED 的散热需求,掺杂浓度为 0.8% 的晶棒出光光通量更高,对晶棒端面进行处理可大幅提升出光光通量。实验装置可输出 6000 lm 以上的光通量,流明密度高达 1640 lm/mm²,可应用于中高亮度照明设备中。

关键词 材料; 大功率 LED; 荧光晶体; 高流明密度; 光通量

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.211601

High-Lumen-Density Light Source Based on Ce : YAG Fluorescent Crystal

Pan Fulin^{1,2}, Cao Dunhua³, Guo Xiangchao¹, Li Haibing^{1*}

¹ *Technology Laboratory of High Power Laser Components, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China;*

² *Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

³ *Nanjing Crylink Photonics Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210038, China*

Abstract The demand for high-power light-emitting diode (LED) lighting shows an increasing trend; however, with the increasing power of blue LED chips, problems such as heat dissipation and light attenuation are increasing as well. To explore high-power LED special lighting, an array-based blue LED is used to excite Ce : YAG fluorescent crystal using an innovative structural device to output high-lumen-density light on small-area end-faces. Many factors affect LED light emission, such as the absorption of blue light by crystal rods with different doping concentrations, the differing light-emitting effects of high-powered LED excitation for crystal rods with different Ce-ion-doping concentrations, and the influence of end-face treatment of crystal rods upon the light output. The result shows that a substrate made by aluminum nitride satisfies the heat-dissipation requirement of a high-powered LED; the use of crystal rod with a doping concentration of 0.8% and the end-face treatment of the crystal rod can greatly increase luminous flux. The experimental device can output more than 6000 lm of light flux with a lumen density up to 1640 lm/mm², which can be applied to medium- and high-brightness lighting equipments.

Key words materials; high-power light-emitting diode; fluorescent crystal; high lumen density; luminous flux

OCIS codes 160.4670; 230.3670; 250.5230

1 引言

目前市场上的白光发光二极管(LED)主要是通过蓝光 LED 芯片激发硅胶混合荧光粉来获取白光^[1]。随着芯片设计、封装工艺等技术的不断进步,LED在照明、汽车前照灯等方面有了更广泛的应用^[2]。

据世界前沿技术发展报告的报道,高亮度 LED 的产业规模已是全球 LED 产业的主导,引领全球 LED 产业的高速发展^[3]。然而,单颗 LED 的亮度有限,通常的做法是用多颗大功率 LED 阵列来实现高亮度发光^[4-5]。由于存在光学扩展量的限制,一个高效的高密度光源无法通过单纯扩大 LED 出光面积的形式进行聚光,因此,出光面越小,光密度越高,对后续的光学设计越有利^[6]。以欧司朗的 SOLERIQ E 45 系列产品为例,该系列为阵列 LED,出光光通量可达 4500 lm,发光半径约为 13.7 mm。由于发光面积大,流明密度仅为 7.6 lm/mm²。阵列 LED 芯片的出射光束扩散角大,光学扩展量较大,其几何形状不利于收集和传输^[7],很大程度上限制了高亮度 LED 的使用场景。而投影、车灯等高亮度照明场景中,需要出光面积小且光通量大的光源。以投影应用为例,目前市场上商用投影仪的光源主要为氙灯,出光光通量约为 5000 lm,但流明密度只有约 17 lm/mm²,且存在体积大、功耗大的缺点。高端激光投影仪出光光通量约为 6000~10000 lm,但是安全性得不到保障且成本高,因此利用便宜成熟的 LED 开发一款高流明密度光源有非常大的意义。

高流明密度光源需要采用大功率蓝光 LED 来实现,蓝光 LED 配合荧光粉具有诸多优势,但随着蓝光 LED 芯片功率的不断上升,也带来日趋严重的散热和光强度衰减问题^[8-9]。为适应不断发展的光功率的要求,肖华等^[10]、陈华等^[11]和周青超等^[12]研究了远程荧光,研究表明远程荧光白光 LED 的光转换效率等参数优于传统白光 LED,同时荧光粉与芯片温度也有所降低。为进一步提升实用范围,贺龙飞等^[13]、倪屹等^[14]、李杨^[15]研究了荧光陶瓷的应用,陆神洲等^[16]、黄朝红等^[17]和王鑫等^[18]研究了荧光晶体的应用,研究发现荧光陶瓷和单晶都是可用于白光 LED 的新型荧光材料。而 YAG 由于单晶透过率高、热导率高、物化性能稳定、生长工艺成熟^[19],更适合作为荧光转换材料。

实验采用大功率蓝光 LED 芯片和 Ce : YAG

荧光晶体,利用类光纤全反射原理,设计一款输出光通量达到 6000 lm、发光面积仅为 1.5 mm × 2.6 mm、流明密度高达 1500 lm/mm² 的光源。该立体结构 LED 发光光源与传统平面结构 LED 光源、现有主流以氙灯为投影的光源相比,流明密度提升大、成本低、使用安全、出光光通量高、发光面积小,可以满足微投等诸多中高亮度照明场景,具有广泛的应用价值。

2 基本原理与设计方案

2.1 技术原理

高流明密度光源的基本设计思路是利用阵列蓝光 LED 激发荧光晶体,采用类光纤的全内反射原理,将光束缚在晶棒内部传输,最终从右侧小端面输出。原理如图 1 所示。

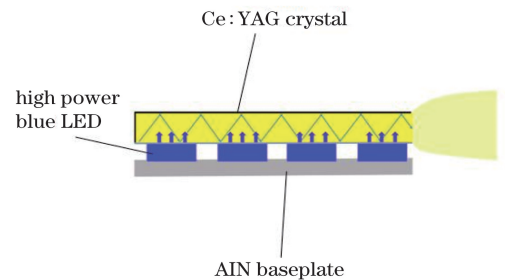


图 1 高流明密度光源原理图

Fig. 1 Principle of high-lumen-density light source

将 Ce : YAG 荧光晶体抛光后,用大功率蓝光 LED 芯片激发,蓝光进入荧光晶体后发生荧光转换,转换荧光向各个方向发射。荧光晶体的折射率为 1.83,大于空气折射率,所以转换荧光会在晶体-空气界面产生全内反射效应,全反射角约为 33°。全反射光会在晶体内部,一直向晶棒两端面传播,在其中一个端面处添加高反射介质,光就会向另一端面传播。全反射角以外的光会溢出晶棒,为提高光的利用率,可在晶棒外部添加高反射介质,溢出光重新反射回来,继续向目标端面传播。

目标端面是晶棒-空气界面,同样会产生全反射效应。为破坏这种全内反射效应,需进行端面处理。常见的手段是将端面打磨粗糙,但这样会导致出射光散乱。另外通过在端面添加折射率介于晶棒与空气之间的高透明低吸收介质,减少内反射效应,提高光输出。该光源装置可打破半导体光源流明密度依靠芯片电流密度的影响,实现高流明密度。

2.2 设计方案

为实现高流明密度光输出,足够的蓝光光通量和高转换率、低吸收的 Ce : YAG 荧光晶体是高流

明密度光源的前提,创新的机械机构和散热设计是高流明密度光源的保障,具体设计方案如下:

1) 蓝光 LED 芯片

为保证输出光通量,采用 4.8 W 的高质量大功率蓝光 LED 芯片,其型号为 S-55ABFSD,尺寸为 $1.4\text{ mm} \times 1.4\text{ mm}$,厚度为 0.15 mm ,主波长为 455 nm ,最大结温为 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 。其中输入额定功率为 4.8 W,若散热好,输入功率可超过该值。芯片为倒装芯片,以便减少光损失,提高出光功率和热性能^[20]。采用 COB 封装,直接焊接在基板上,操作简单,散热效果好。单块基板焊接芯片数量为 22 颗,实验时采用 2 块基板,共 44 颗芯片。

2) 基板

基板的主要作用为芯片的物理支撑、电路连接和散热通道等,现阶段常用的基板材料主要包括树脂、硅、金属及金属化合物、陶瓷和复合材料等,其中氮化铝(AlN)陶瓷基板综合性能最佳,非常适合作为大功率 LED 的封装基板^[21-23]。本文采用的方案是高热导率 AlN 陶瓷基板,除去芯片焊盘部位,其他部分涂覆高反射率白油,白油的尺寸为 $50\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 0.635\text{ mm}$,热导率为 $278\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

3) 荧光晶体

将传统荧光粉的有效成分 Ce:YAG 制备成不同掺杂浓度(物质的量浓度,全文同)的晶体,分别为 0.5%、0.8% 和 2.5%,然后切割抛光成所需尺寸,抛光后的晶体尺寸为 $40\text{ mm} \times 2.6\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$,折射率为 1.83,热导率为 $13\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

4) 机械结构

机械结构一方面提供固定支撑,另一方面提供散热途径。根据基板尺寸和晶棒尺寸,设计一套专属结构,材料选用高热导率的铜,以保障散热效果。

根据光通量要求及蓝光 LED 的功率参数,本文特别设计双面大功率蓝光 LED 芯片激发 Ce:YAG 荧光晶体,将 1)~4) 部分组装后,装置如图 2 所示。

3 实验与结果分析

3.1 蓝光 LED 芯片热仿真及性能测试

散热是影响大功率 LED 快速发展的关键。如果热量不及时散出,LED 芯片的结温会不断上升,发光效率不断降低,并且影响使用寿命。实验进行了芯片热仿真、温度测试及相关性能测试。

设计 3 组方案测量单块基板作为对比。第 1 组,基板与热沉空隙间均匀涂覆高热导率的导热硅脂 $[\lambda = 11\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$;第 2 组在第 1 组的基础上,

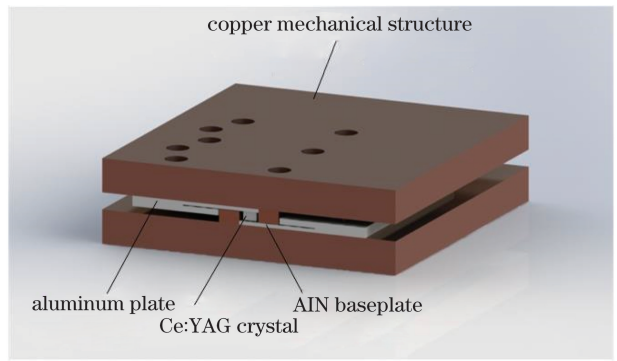


图 2 高流明密度光源实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for high-lumen-density light source

在热沉的另一面添加多层翅片风扇散热器;第 3 组将第 2 组中的导热硅脂更换成高热导率的液态金属 $[\lambda = 128\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 。由于液态金属对于铝合金有腐蚀作用,未采用铝合金作为机械件。实验用 FloTHERM 仿真软件模拟不同热功率下的基板温度,并且用热电偶测温仪(鑫思特 HT-9815)测试对应电功率下的基板温度。

根据实物及相应参数建立仿真模型,如图 3 所示。

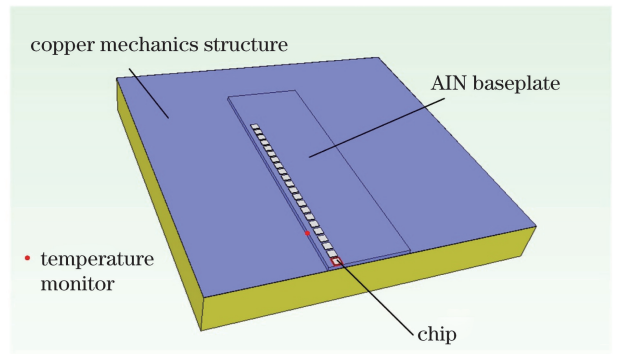


图 3 FloTHERM 仿真模型

Fig. 3 Simulation model of FloTHERM

将软件仿真温度数据与实验测量温度数据绘于图 4。由图 4 可知,实际温度与模拟温度存在一定误差,3 组实验平均误差分别为 4.5%、6.2% 及 8.7%。对比仿真模拟温度与实际温度曲线走势发现:温度较低时,温度差别小;温度较高时,实际温度高于模拟温度;温度再升高,实际温度与模拟温度出现交叉。引起误差的原因主要有:低温时,积分球内部热量聚集少,积分球环境影响小,误差较小;较高温度时,积分器是密闭空间,导致热量无法散去,因此温度整体是测试温度比模拟温度稍高;填充传导热量的导热硅脂和液态金属,它们是膏状物,涂抹时难免会有不均匀、留有空隙等情况,但是当温度升到

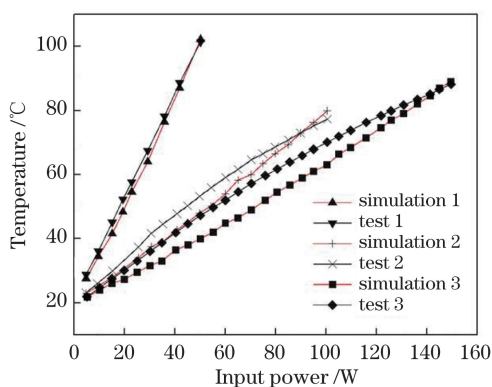


图4 仿真温度与实验温度随输入功率的变化

Fig. 4 Simulated and experimentally measured temperatures as functions of input power

一定程度时,它们中的液体成分流动性会增强,空隙被填充后,散热效果会增强,因此温度会随输入功率的加大继续升高,曲线斜率有下降趋势。总体来说,软件模拟温度与实际温度相差不大,模型仿真的建立颇有参考价值。

同时,第1组和第2组相比,利用热沉和风扇,可将芯片与基板的温度迅速降下来;第2组和第3组相比,利用高热导率的导热材料,在相同的输入功率下,可以降低芯片与基板的温度,可知散热方案要结合热沉、风扇和高热导率材料。

将蓝光芯片按照第3组散热方案进行测试,观察芯片的出光效果,如图5所示。实验用积分球(PMS-50增强型紫外-可见-近红外光谱分析系统,积分球直径为1.5 m,杭州远方光电信息股份有限公司)测量光通量和光功率,装置固定在积分球中心处。

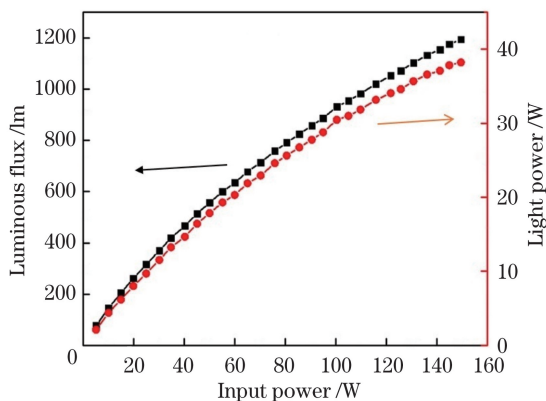


图5 光通量随输入功率变化

Fig. 5 Luminous flux as a function of input power

由图5可知,随着输入功率的提高,蓝光芯片的输出光通量与光功率不断提高。方形曲线斜率表示芯片的光效,曲线斜率趋势向下,表明光效下降,其原因主要是输入功率的提高,使得芯片温度上升。单块

LED芯片基板输入功率的安全功率可超150 W,蓝光功率接近40 W,电光转换效率约为26.7%。

实际上,由于风扇散热器对于光吸收的影响,光通量与光功率的数值偏小,电光转换效率较实际值偏低,该影响主要为多层翅片风扇散热器对光吸收的影响。

3.2 Ce:YAG晶棒测试

利用提拉法制备不同浓度的晶棒,分别为0.5%、0.8%和2.5%,经切割抛光后得到所需尺寸规格。实验用Perkin Elmer Lambda 950分光光度计分别对1.5 mm厚度晶棒的透射谱进行测试。

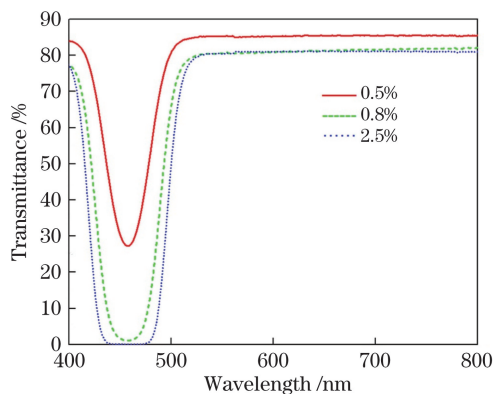


图6 不同Ce离子掺杂浓度晶棒的透射谱

Fig. 6 Transmission spectra of crystal rods with different Ce-ion-doping concentrations

由图6可知,Ce:YAG晶棒在455 nm波长下蓝光的吸收效果非常显著。同时,随着Ce离子掺杂浓度的提高,晶棒在455 nm波长范围附近的蓝光透过率逐渐降低,吸收更好。当掺杂浓度为2.5%,晶棒厚度为1.5 mm时,透过率接近0。

3.3 端面出光效果分析

将2块基板总计44颗蓝光LED芯片对立,激发荧光晶体,进行实验测试。在电功率为36 W条件下,测试蓝光激发晶体后的端面出光光通量,如表1所示。

由表1可知,在小功率输入下,0.8%浓度晶棒的出光光通量最高,2.5%浓度的晶棒其次,0.5%浓度的晶棒最低。初步分析原因为,2.5%的Ce离子掺杂浓度已属偏高,容易导致发光淬灭,降低发光效率。

将端面未经过处理的2.5%浓度的晶棒置于装置中,在大功率双风扇稳态条件下,测试输出光通量的情况。实验发现输出光迅速变红并急速衰减,综合分析是因为Ce离子掺杂浓度过高,产生发光淬灭,容易造成基质结构的畸变,使其难以为发光离子提供合适的晶体场环境。因此大功率条件下,晶体吸收的光无法有效转换成光能,更多贡献在晶格振

表1 小功率下不同Ce离子掺杂浓度晶棒的出光效果
Table 1 Luminous effects of crystal rods with different Ce-ion-doping concentrations at low power

Concentration of crystal rod /%	Luminous flux /lm	Average value /lm
0.50	901.0	901.4
	900.7	
	902.6	
0.80	1176.1	1176.2
	1178.7	
	1173.9	
2.50	1166.5	1166.2
	1167.3	
	1164.9	

动中,变成热量损耗。

将端面未经过处理的0.8%浓度的晶棒置于装置中,在大功率双风扇稳态条件下,测试输出光通量的情况。输入功率分别为101.3 W、220.9 W、274.2 W时,测得光通量为2307.9 lm、4034.8 lm、4589.8 lm。实验对比测试了添加LED高透明硅胶的晶棒出光效果,在274.2 W大功率输入条件下测得出光光通量为5534.4 lm,与无硅胶头的晶棒相比,增长了20.58%。

最后排除风扇散热器的影响,实验发现风扇对于光的吸收非常明显,无风扇散热器时的光通量比使用双风扇散热器时的光通量增加了17.11%。经修正后,0.8%浓度带硅胶的晶棒在274.2 W大功率输入条件下,出光光通量可达约6400 lm,此时的流明密度超过1640 lm/mm²。

4 结 论

对高流明密度光源的关键技术进行研究,创新性地提出一种出光的装置结构。利用大功率蓝光LED激发荧光晶体,根据全内反射机制实现小端面出光。实验测试结果表明AlN陶瓷基板和散热设计效果良好,LED可超额定功率安全工作;0.8%浓度的Ce:YAG晶棒搭配LED出光光通量更高;利用耐高温高透明硅胶进行端面处理,光通量可提升超过20%。利用44颗LED芯片双面激发0.8%浓度的Ce:YAG荧光晶体,在274.2 W输入功率条件下,可在1.5 mm×2.6 mm端面得到超过6400 lm的光输出,流明密度高达1640 lm/mm²,较现有LED光源流明密度提升2个数量级,具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

[1] Schlotter P, Schmidt R, Schneider J. Luminescence

conversion of blue light emitting diodes[J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 1997, 64(4): 417-418.

[2] Krames M R, Shchekin O B, Mueller-Mach R, et al. Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting[J]. Journal of Display Technology, 2007, 3(2): 160-175.

[3] General office of the ministry of science and technology//International institute of technology and economics, development research center of the state council. World advanced technology development report 2010[M]. Beijing: Science Press, 2011: 109-110.

科学技术部办公厅//国务院发展研究中心国际技术经济研究所. 世界前沿技术发展报告2010[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 109-110.

[4] Hua H, Mao X L, Tan J H, et al. Dynamic illumination design method based on LED array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 102202.

花卉,毛祥龙,谭家海,等. 基于LED阵列的动态照明设计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 102202.

[5] Zhang H, Wu M Y, Ma Y F, et al. Symmetrical analysis of uniform illumination design for rectangular arrayed light emitting diode sources[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 102205.

张航,吴梦荧,马宇飞,等. 矩形阵列LED均匀配光的对称性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 102205.

[6] Ma J S, He L Y, Su P, et al. Introduction of LED light source to micro-projector system[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2012, 23(6): 111-113.

马建设,贺丽云,苏萍,等. 新型投影机高效光源——LED[J]. 照明工程学报, 2012, 23(6): 111-113.

[7] Cao D H, Liang Y S, Li S Z, et al. The structure and preparation method of high density LED light source: 201610615452. X[P]. 2016-11-09.

曹顿华,梁月山,李抒智,等. 高密度LED光源结构及其制备方法: 201610615452. X[P]. 2016-11-09.

[8] Jin Y S, Guo X C, Cao D H, et al. Luminescence properties of Ce:YAG single crystals and ceramics under laser excitation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1003001.

靳亚硕,郭向朝,曹顿华,等. 激光激发Ce:YAG单晶与陶瓷的发光性能[J]. 中国激光, 2017, 44

- (10): 1003001.
- [9] Yin L Q, Weng F, Song P, *et al.* Thermal interact effects of LED chip with YAG phosphor layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0323002.
殷录桥, 翁菲, 宋朋, 等. LED 芯片与 YAG 荧光粉的相互热作用 [J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0323002.
- [10] Xiao H, Lü Y J, Xu Y X, *et al.* The difference of luminous performance between traditional phosphor packaging LED and remote phosphor LED [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(1): 66-72.
肖华, 吕毅军, 徐云鑫, 等. 传统白光 LED 与远程荧光粉白光 LED 的发光性能比较 [J]. *发光学报*, 2014, 35(1): 66-72.
- [11] Chen H, Zhou X L, Tang W, *et al.* Thermal design of high power remote phosphor white LED package [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(1): 97-102.
陈华, 周兴林, 汤文, 等. 大功率远程荧光粉型白光 LED 散热封装设计 [J]. *发光学报*, 2017, 38(1): 97-102.
- [12] Zhou Q C, Bai Z L, Lu L, *et al.* Remote phosphor technology for white LED applications: advances and prospects [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2015, 8(3): 313-328.
周青超, 柏泽龙, 鲁路, 等. 白光 LED 远程荧光粉技术研究进展与展望 [J]. *中国光学*, 2015, 8(3): 313-328.
- [13] He L F, Fan G H, Lei M Y, *et al.* Preparation and optical properties of $MgAl_2O_4/Ce:YAG$ transparent ceramics [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 32(5): 1175-1179.
贺龙飞, 范广涵, 雷牧云, 等. $MgAl_2O_4/Ce:YAG$ 透明陶瓷的制备及光学性能 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 32(5): 1175-1179.
- [14] Ni Y, Wang K, Zhou S M, *et al.* Preparation and research of Ce, Pr : YAG fluorescent transparent ceramics applied to white LED [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0206005.
倪屹, 王凯, 周圣明, 等. 可用于白光 LED 的 Ce, Pr : YAG 荧光透明陶瓷的制备及研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0206005.
- [15] Li Y. Study on photoluminescence properties of color conversion glass ceramics for white light-emitting diodes [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2018: 43-50.
李杨. 白光 LED 用荧光玻璃陶瓷的发光性能研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 43-50.
- [16] Lu S Z, Yang Q H, Xu F, *et al.* Investigation of white light emitting diode based on Ce : YAG single crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0323001.
陆神洲, 杨秋红, 徐峰, 等. 基于 Ce : YAG 单晶的白光发光二极管性能研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0323001.
- [17] Huang Z H, Zhang Q L, Zhou D F, *et al.* Excitation and luminescence properties of $Ce^{3+}:YAG$ single crystalline scintillator [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2003, 32(4): 295-299.
黄朝红, 张庆礼, 周东方, 等. $Ce^{3+}:YAG$ 单晶闪烁体的激发和发光特性 [J]. *人工晶体学报*, 2003, 32(4): 295-299.
- [18] Wang X, Zhao G J, Chen J Y. Emission spectrum and energy transfer in Cr and Ce Co-doped $Y_3Al_5O_{12}$ single crystal for white LED [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(10): 101601.
王鑫, 赵广军, 陈建玉. 白光 LED 用 Ce, Cr 共掺 $Y_3Al_5O_{12}$ 单晶发射光谱和能量转移研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(10): 101601.
- [19] Zhao B Y, Liang X J, Chen Z P, *et al.* Studies on optical properties and Ce concentration of Ce : YAG single crystal for WLEDs [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2014, 35(2): 230-236.
赵斌宇, 梁晓娟, 陈兆平, 等. 白光 LED 用 Ce : YAG 单晶的光学性能与掺杂浓度分析 [J]. *高等学校化学学报*, 2014, 35(2): 230-236.
- [20] Chen Y D, Chen Y. LED manufacturing technology and application [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2009: 54.
陈元灯, 陈宇. LED 制造技术与应用 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2009: 54.
- [21] Zhang P F. Preparation and properties of AlN ceramic substrate for high-power LED [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016: 7-11.
张鹏飞. 大功率 LED 用 AlN 金属化陶瓷基板的制备及性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016: 7-11.
- [22] Sheppard L M. Aluminum nitride: a versatile but challenging material [J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 1990, 69(11): 1801-1812.
- [23] Wodson T L. AlN stes up, take the heat and delivers [J]. *Electronic Packaging and Production*, 1995, 35(7): 26.