

文章编号:1002-2082(2019)05-0763-11

激光白光光源及其光学系统解析

康健, 张乐, 单迎双, 陈浩

(江苏师范大学 物理与电子工程学院 江苏省先进激光材料与器件重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:为进一步推广激光白光光源在汽车大灯、投影、背光显示等领域的应用,对激光白光光源的合成方式进行了介绍,从泵浦源、光转换材料、光学系统3个方面详细解析了激光照明系统的关键组成要素。通过理论分析,计算出了激光照明系统中最高理论光光转换效率为498 lm/W。然而,受困于技术和工艺难题,目前激光照明系统的最终效率仅约为17%。随后,在对适用于高亮度激光照明系统的光转换材料进行总结后,创新性地利用一种棒形(长度>10 mm)YAG陶瓷(Ce<0.1 at%)来匹配高流明密度蓝光;并从光学设计的角度,提出一种光转换材料的“透镜型”结构来综合提升光效。最后,结合专利分布情况,对激光照明系统在激光显示、可见光通信等领域的前景与应用进行了展望。

关键词:激光白光光源;激光照明;光转换材料;光学系统;汽车大灯

中图分类号:TN24;O432.1;O432.3

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201940.0501008

Laser white light source of its optical system analysis

KANG Jian, ZHANG Le, SHAN Yingshuang, CHEN Hao

(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, Jiangsu Normal University School of Physics and Electronic Engineering, Xuzhou 221116, China)

Abstract: To further promote the application of laser white light source in the fields of automobile headlights, projection and backlight, the synthesis methods of laser white light source were introduced. Besides, its key components were detailedly analyzed from three aspects: pump source, light conversion material and optical system. Through the theoretical analysis, the highest theoretical value of light conversion efficiency in the laser illumination system was 498 lm/W. However, some technical and process problems resulted in that its final efficiency was only 17%. Then, a rod-shaped (length > 10 mm) YAG ceramic (Ce < 0.1 at %) was innovatively proposed to accommodate the high lumen blue light based the summary of the light-conversion materials for high-lumen-density laser lighting system. In addition, from the viewpoint of optical design, a new lens type structure of light-conversion materials was employed to totally enhance the efficiency. Finally, after considering the distribution of related patents, the prospects and applications of laser lighting system were forecasted in the fields of laser display, visible-light communication and so on.

收稿日期:2019-02-01; **修回日期:**2019-04-24

基金项目:国家自然科学基金(61775088, 51402133, 61603160);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD);江苏省重点研发计划(产业前瞻与共性关键技术)(BE2018062);江苏省研究生科研与实践创新项目(KYCX18_2096, KYCX18_2097, KYCX18_2098, KYCX18_2099);徐州市科技创新专项资金项目(KC16GZ014, KC16HQ236, KC16HQ237)

作者简介:康健(1994—),男,硕士研究生,主要从事激光白光光源光学系统设计。E-mail: 1070358873@qq.com

通信作者:张乐(1988—),男,博士,教授,主要从事荧光陶瓷和透明陶瓷研究。E-mail: njutzl@163.com

导师简介:陈浩(1976—),男,博士,教授,主要从事白光LED/激光照明技术及其产业化应用研究。E-mail: Chenhao@jsnu.edu.cn

Key words: laser white light source; laser lighting; light-conversion materials; optical system; automobile headlight

引言

固态照明是以半导体元件作为光源的一种全新的照明技术,具有节能、环保、寿命长、免维护、易控制等特点^[1]。发光二极管(light emitting diode, LED)照明技术发展了数十年,目前在通用照明、显示及背光领域已经具有广泛应用^[2]。然而,在需要高流明密度照明场所,如汽车、高铁、海上灯塔、投影等,该系统只能通过增加LED数量的形式来获得更高亮度。这必然导致LED排列过密,照明设计成本过高,失去节能效果。2014年,“LED蓝光之父”中村修二教授在诺贝尔获奖典礼上,公开表示:“未来10年,激光照明(laser lighting)将彻底取代LED照明”。随后,以激光为基础的照明光源逐渐进入业界视野。2016年,中村修二激光照明实验室在深圳的揭牌,预示着激光照明技术将在我国率先取得突破^[3-5]。

激光一般应用在工业、医疗、商业、科研、信息和军事等领域。然而,“蓝光LED之父”在诺贝尔获奖典礼上的倒戈,使人们坚信:相比于LED照明,激光照明具有更广阔的发展空间。这主要是激光照明系统方向性更好(光穿透能力更强),亮度更高(光传输距离更远),发散角更低(光耦合能力更高)等优势;此外,结合更加灵活的光学设计,可使获得的白光光源不仅应用于远程照明领域,而且也适用于通用照明场所。

近年来,国内外科研人员对激光照明技术开展了深入研究,并从光转换材料的性能提升、二次光路的优化设计、器件封装结构的改进等方面使白光照明品质获得了很大提升;随着激光照明技术发展日趋完善,其产业化前景非常明朗。然而,我国相关技术发展起步较晚,仅有某些院校和研究机构,如厦门大学、中山大学等掌握单一、有限的核心技术,仍存在大量技术壁垒和工艺难题急需突破。因此,有必要对激光白光光源及其光学系统进行详细解析。首先借鉴LED照明系统方案介绍了激光照明的原理,并从泵浦源、光转换材料、光学结构设计等方面深度剖析了激光照明系统的关键组成部分;然后,重点介绍了激光照明推广应用所亟待解决的关键问题;最后结合激光照

明的专利分布,深入探讨了激光照明在激光显示、可见光通信等领域的发展前景。

1 激光照明的原理

激光照明,即以激光器为光源的照明形式,包括多色激光器直接混合的方案和技术较为成熟的荧光转换方案。多色激光混合的方式虽然可获得高显指、高色域、高亮度的白光光源,但结构复杂,电路要求控制高,产生的LD白光实际上是激光,对人眼的损伤很大;同时,器件安装过程中的稍许偏差极有可能导致高能量激光泄漏,存在很大的安全隐患。因此,激光白光光源主要采用荧光转换的方式实现高亮度照明:即采用光束整形器件将激光器发出的蓝光集中于荧光粉上某个微小点区域;荧光粉吸收一部分蓝光并将其转换成黄光,剩下的蓝光和黄光混合,形成白光;同时,使用光学透镜及反光罩对此白光进行精细调控以实现更好的照明效果^[6-7],如图1中提供了基于此方案的宝马激光大灯示意与实物图。在LED照明中,荧光粉直接涂覆LED芯片上,极易受LED芯片温度的影响而发光猝灭;且在光转换过程中产生的大部分热量只能通过芯片进行传递,热量管理方案受限。从图1(b)中可以清晰地看出,为避免上述问题出现,高流明密度激光照明系统采用“远程激发”方案,即激光器与荧光粉分离的技术方案。此方案能够有效克服LD芯片吸光及散热方面的缺点,有效降低芯片和荧光粉的工作温度,从而显著提高光源光效和使用寿命。

因此,一般激光照明白光光源主要包括3部分:激光器、光转换材料和光学系统。

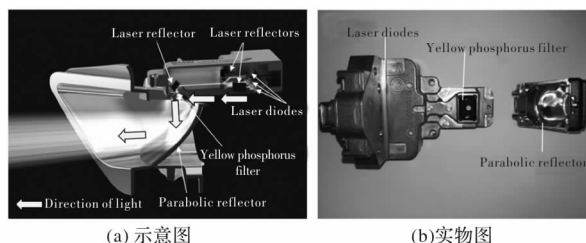


图1 宝马激光大灯

Fig. 1 BMW laser headlight

1.1 激光器

激光照明技术与LED照明技术均属于固态照明技术,主要差异为产生白光的泵浦源不同,激光照明使用蓝色激光二极管(laser diode, LD)作为泵浦源。稳定与高效是照明系统泵浦源的首要条件。LED存在的突出问题是其芯片超出一定电流范围后,电光功率转换开始急剧下降 (efficiency droop)^[8]。这主要是因为电流增大后,LED芯片内部俄歇复合增加,同时伴随着载流子泄露,导致内部效率下降^[9],从而整个LED器件输出功率下降,光源光通量减少。因此,只有在较低的驱动功率密度下,LED芯片才能保持较高的转换效率。例如最新450 nm InGaN LED系统,当输入电流密度达到10 A/cm²时,外部量子效率仅为10%,仅为低电流密度驱动效率的60%^[10],如图2(a)所示。即在保证发光稳定性的前提下,提高LED的数量是增加照明器件亮度的唯一方案。然而,目前市面上的高亮度、高效率LED照明器件都是几十到几百个LED芯片组成,器件集成非常复杂。这也是中村修二多次表态,未来激光照明取代LED照明的重要原因。

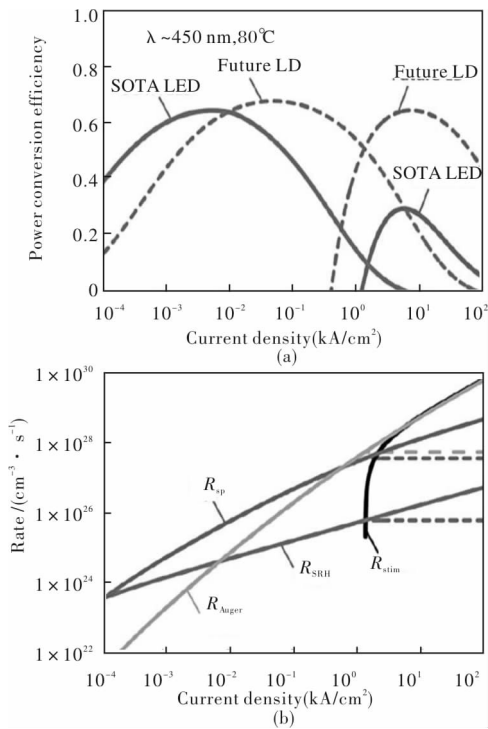


图2 (a) LED和LD的转换效率; (b) LD芯片内部俄歇复合(Rauger)随输入功率密度的变化
Fig. 2 Conversion efficiency of LED and LD(a) and Auger recombination(Rauger) in LD chip versus input power density(b)

激光二极管,又称半导体激光器,在超过阈值电流后,内部俄歇复合截止;在高电流密度下工作仍有较高的转换效率^[11-12],必将超过现有LED的转换效率,如图2(a)、(b)所示。这保证了激光照明光源的高效性及显色稳定性^[13]。半导体激光器与其他激光器相比,其亮度更高、效率更高、体积更小;尤其是基于氮化物的激光二极管,尺寸小、亮度高、可见光谱宽、响应速度快,作为最有效的高功率泵浦源,最近几年受到广泛关注^[14]。

同时,光学器件发散角越大,光学设计难度越高,普通蓝色激光二极管输出为高斯光束,发散角较小,约为8°×40°(水平×竖直方向),具有更高的设计灵活性。因此,具有更小发散角的LD,更容易通过透镜耦合成更小的光斑,随后激发光转换材料,最终获得高流明密度白光光源;同时,LD发出的蓝光可以耦合进光纤并进行远距离传输,使照明系统的设计更加丰富。LED与LD的其他参数对比如表1所示。

表1 LED与LD的主要性能参数对比

Table 1 Comparison of main performance parameters of LEDs and LDs

	LED	LD
发光原理	自发辐射	受激辐射
最大功率密度 (W·mm ⁻²)	5	102~103
响应速度	取决于固有自发 辐射寿命	取决于受激 辐射寿命
发光效率/%	70~90	20~30
单价/元	1~10	50~200
耦合光纤难易程度	难	简单

目前,单颗激光二极管连续输出(continuous wave, CW)的最高功率为5 W(Nichia, nubm08),如图3(a),它是由3个通过金线连接激光二极管芯片组成。图3(b)为目前商用的宝马激光大灯LD模组,由3个4 W半导体激光器组成,其电光转换效率约为30%,整体系统效率可达到80 lm/W。该LD模组激发光转换材料后,光通量可达3 200 lm(12 W)。对比商业有售LED大灯,如图3(c)、(d),当输入电功率为35 W时,才可获得2 000 lm的光输出,效率仅为55 lm/W;若继续提高电源功率,光源光通量维持不变,表明LED芯片组功率已经开始下降,“efficiency droop”现象凸显。

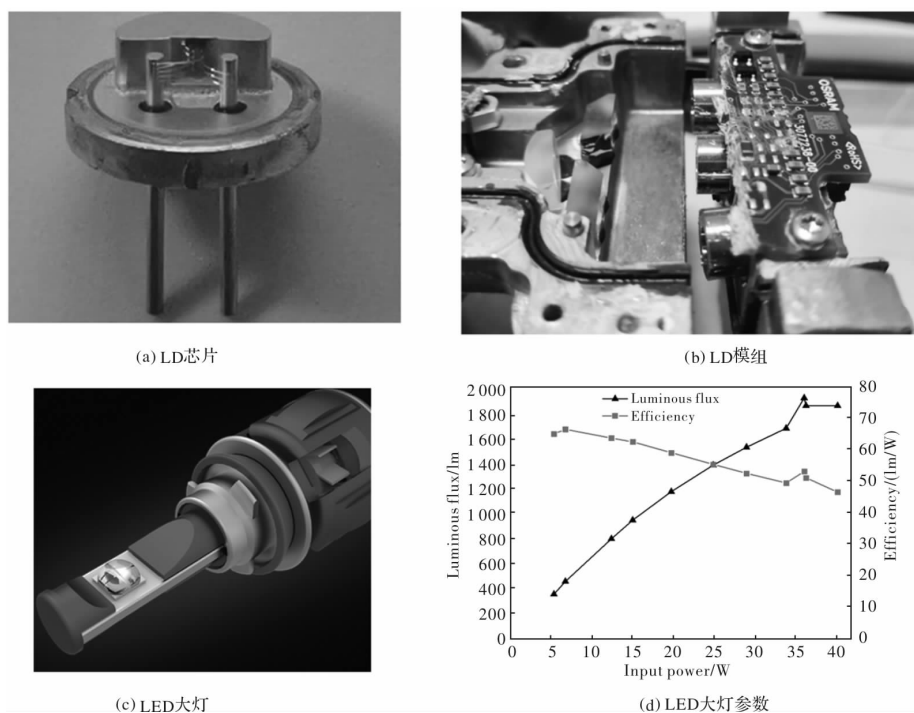


图3 LED与LD装置

Fig. 3 Devices of LED and LD

1.2 光转换材料

在LED照明与激光照明系统中,广泛使用光转换材料为YAG($Y_3Al_5O_{12}$)荧光粉体材料,如Ce:YAG荧光粉。荧光粉的光转换原理为光致发光,即铈离子(Ce^{3+})作为发光中心,吸收光子能量后,通过能级之间的跃迁实现发光:低能级4f层电子吸收蓝光(460 nm)波长跃迁到5d高能级激发态,再辐射返回基态时,发射出光子(530 nm),其发射光谱如图4(a)。在绝对零度下($\sim 5K$), Ce^{3+} 离子的理论发射光谱如图4(b)所示。假设 Ce^{3+} 离子完全吸收1.0 W蓝光,并充分进行荧光转换,输出1.0 W黄绿光;根据光谱的相对强度分布得出各个波段下的光谱功率密度并结合视见函数,有公式:

$$\phi_{\text{phos}} = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \int_{465 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} S(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中: λ 为波长; $S(\lambda)$ 为光谱功率密度; $V(\lambda)$ 为视见函数。计算可得,理论光通量 $\phi_{\text{phos}} = 498 \text{ lm}$,即光光转换效率为498 lm/W。温度升高,Ce:YAG荧光粉的发射光谱变宽^[15],绿光区(555 nm附近)含量相对减少,光通量降低,光光转换效率下降。这主要是由于温度较低时, Ce^{3+} 处于低能级(5d)平衡位置附近;温度增加, Ce^{3+} 热运动加强,弛豫概

率增加,吸收和释放的光子能量产生差异,部分光子能量降低,发射波长红移。

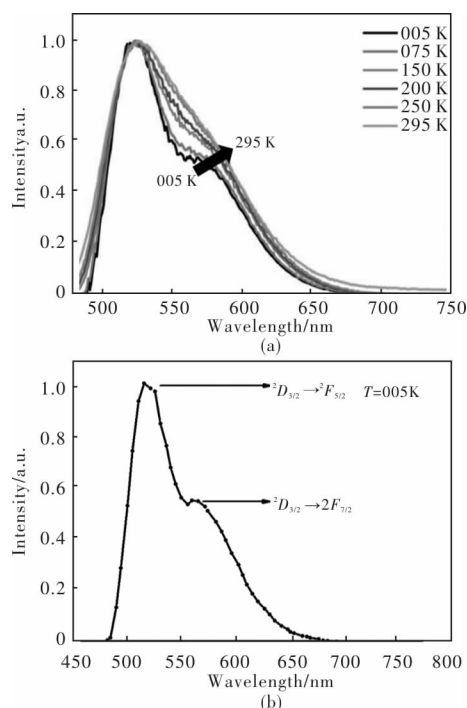


图4 Ce:YAG荧光粉在5K~295 K(a)及5 K(b)下的发光光谱

Fig. 4 Luminescence spectra of Ce:YAG phosphors at 5K~295 K(a) and 5 K(b)

其他荧光材料如氮化物、钙钛矿荧光粉体系具有荧光寿命短、光转换能力高、热稳定性强等特

点,同样适用于高功率照明系统。因此,在现有激光照明系统中,如宝马激光大灯,均采用荧光粉体为光转换材料,如图5所示。然而,随着输入激光能量增强,光转化材料单位面积内产生的热量累积;在更高功率密度的蓝光激发下($>0.2\text{ W/mm}^2$),继续使用荧光粉材料会带来众多难以克服的弊端(见3.1部分)。

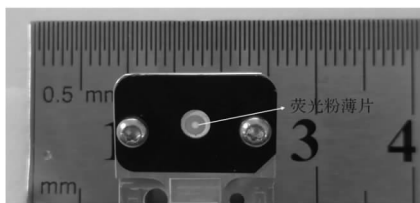


图5 激光大灯中使用的光转换材料(直径8 mm)

Fig. 5 Light conversion materials for laser headlights (8 mm in diameter)

近年来,国内外企业、高校、研究机构都在不断探索可承受更高辐射功率密度的光转化材料。目前,可应用于高流明密度激光照明的光转换材料种类及性能如图6所示^[16]。综合各种光学、热学性能和批量化生产的难易程度,具有高热导率和强热抗性的荧光陶瓷是最具发展前景的光转换材料。尤其是Ce:YAG陶瓷,其可承受 19 W/mm^2 的蓝光辐照而不发生辐照淬灭^[17];如果可以进一步解决其散热问题,理论上可以达到更高的辐射淬灭密度^[18]。

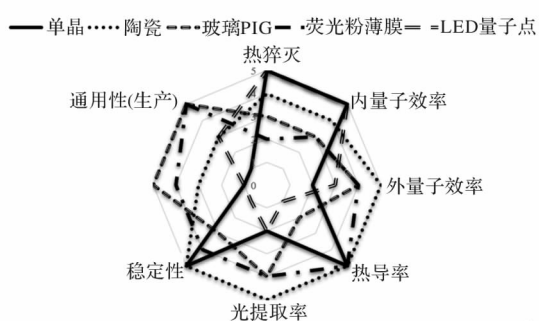


图6 高流明密度激光照明光转换材料性能对比

Fig. 6 Performance comparison of light conversion materials for high-lumen-density laser lighting

据报道,在激光照明系统中,使用荧光陶瓷材料作为光转换材料最高可获得2 000 lm的白光输出^[19]。相比其他光转换材料,如单晶、荧光粉薄膜,荧光陶瓷突出的优点可设计性:如在其内部可自主引入第二相提高光提取率和热导率,进而提高照明系统的光学效率^[19-20];还可以实现高离子

浓度掺杂,形状、尺寸设计非常灵活。目前,在激光照明系统中,使用YAG荧光陶瓷作为光转换材料一般有2种方案:一种是使用高浓度掺杂($\text{Ce} > 1.0\text{ at}\%$)的薄片状(厚度 $<1.0\text{ mm}$)陶瓷,如激光手电筒中应用的荧光陶瓷片(如图7);另一种方案是使用低浓度掺杂($\text{Ce} < 0.1\text{ at}\%$)的棒形(长度 $>10\text{ mm}$)陶瓷,如YAG圆棒形陶瓷。在不改变粒子密度的情况下,可充分吸收高功率密度的蓝光,避免激光泄露(低浓度掺杂的圆棒相当于大大增加Ce:YAG材料的厚度)。相比第一种方案,第二种方案的优势在于:1)不存在浓度猝灭现象;2)温度猝灭效应较弱:单位面积内,陶瓷内部发光离子含量低,对蓝光吸收能力不强,光转换产生热量少,因此器件温度上升较慢,进而对发光性能影响减弱;3)散热性能优异:圆棒状结构相比片状结构,散热面积大,与外部散热装置匹配度更高;4)输出光发散角低:从较小的端面进行泵浦,从较小的端面白光输出,可获得低发散、高亮度白光光源,非常适合应用在汽车大灯或者投影显示等领域,并有利于提高发光亮度 and 使用寿命。

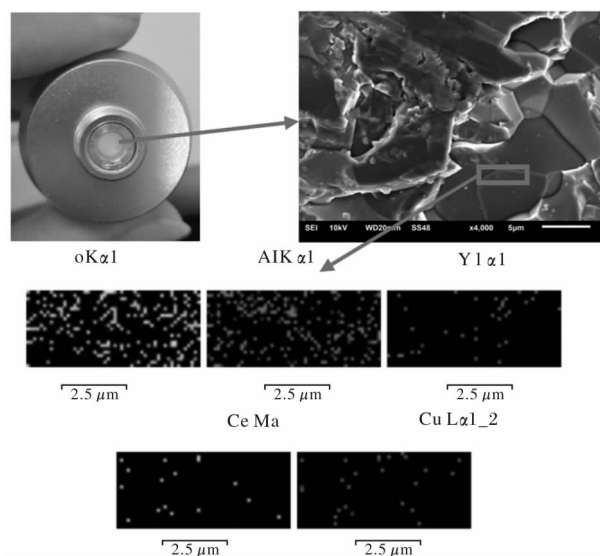


图7 激光手电筒中的荧光陶瓷片成分测试分析

Fig. 7 Composition testing analysis of phosphor ceramic plate for laser flashlight

1.3 光学系统

蓝光LED芯片上涂覆黄色荧光粉得到白光是目前业界中应用最广的方法^[21]。此种方案获得的光源光学扩展量较大,光输出呈朗伯分布。光学扩展量定义为

$$Etendue = n^2 \iint \cos(\theta) dA dW \quad (2)$$

式中 θ 是面元的 dA 法线与立体角 dW 中心轴之间的夹角。

对于照明光源,光学扩展量越低,器件越小,越易集成^[22]。光学扩展量可以简单地认为光源发散区域和发散光束立体角的乘积。在不考虑能量损失的前提下,光束经过光学系统后,光学扩展量守恒。在激光照明领域,泵浦源具有穿透能力强、发散角小、易整形等特点,更易获得低光学扩展量的光源。例如使用 Ce:LuAG(Lu₃Al₅O₁₂) 透明陶瓷板,当 LD 的辐射通量密度为 2.15 W/mm² 时,绿光光源的光学扩展量为 6.1 mm²,仅为 LED 光源的 1/5^[23]。因此,激光照明系统不仅可以采用涂覆荧光粉的方案,来实现大角度的照明面积,更适合远程激发方案,来获得低光学扩展量白光光源。远程方案带来的最大优势就是高效热量管理;同时,荧光粉转换模块尺寸可以做的非常小(直径约为 0.8 mm),如图 5,也利于获得低光学扩展量的白光光源。

如前文所述,为了获得高流明密度的白光光源,需要将 LD 芯片聚焦成微小光斑,再激发光转换材料。因此,LD 芯片发射光斑需要配合一系列透镜组合,将发散角较大的高斯光束聚焦为相对较小的光斑(<1 mm)。商用 LD 有两种封装模式:一种 T0 封装的 LD,即对激光二极管进行空间耦合,随后输出为发散角较小的平行光束,如图 8(a);另一种为光纤耦合输出的 LD(220 μ m, NA=0.22),输出为发散角较大的圆形光斑,如图 8(b, c)。第二种光输出形式的 LD,其光束可通过光纤进行远距离传输,再激发光转换材料,可有效避免激光器产生热量,进而降低对光输出影响。但为了获得低光学扩展量光源,仍需对输出光斑进行整形。空间耦合输出和光纤耦合输出的 LD,均需要不同透镜来达到对光斑进行精准控制的目的。其能量损失一般在 5%~10%。也可以通过使用一般的单自由曲面透镜,避免能量的过多损耗,但这将不利于优化光束质量。因此,可以通过准直和聚焦透镜,获得高流明密度的蓝光光束。

根据图 8(c)搭建如图 9 所示光路。其中,LD 输出波长为 450 nm,最大输出功率 4 W;L1 为准直镜($f_1=10$ mm);L2 为聚焦镜($f_2=20$ mm); $d_1=10$ mm, $d_2=40$ mm。光束经过 L1 后,测得其光斑直径 $D=10$ mm。因此,在此系统中

$$\omega' = \lambda f / \pi \omega \quad (3)$$

式中: ω_1 为激光入射到透镜表面光斑半径; λ 为激光波长。通过计算,可获得最小的聚光斑半径 $\omega'=0.572$ μ m。但由于 L_2 存在像差,无法避免光衍射,因此导致实际激光光斑半径远远大于 0.572 μ m。调整 d_3 的位置可使光斑半径稳定在 0.25 mm,此时激光器输出的最大功率密度为 20.37 W/mm²。

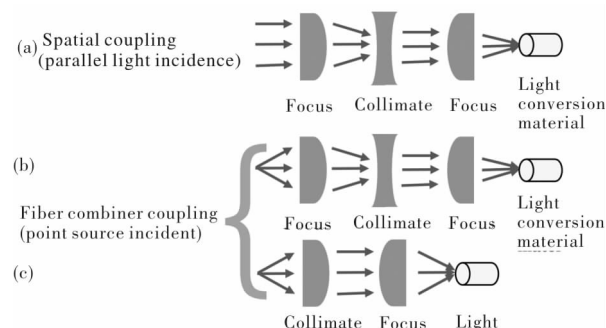


图 8 对 LD 的光斑大小控制方式,采用:(a)透镜组(针对空间耦合输出形式);(b)透镜组(针对光纤耦合输出形式)以及 (c)会聚透镜组(针对光纤耦合输出形式)

Fig. 8 Control modes of spot size for LD: (a) lens group for spatial coupled; (b) lens group for fiber coupled and (c) converging lens group for fiber coupled

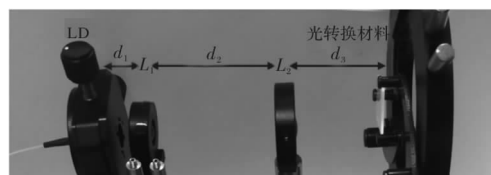


图 9 LD“远程激发”荧光材料整体系统光路设计图

Fig. 9 Optical design of system constructed by LD and light-conversion material in remote excitation model

在实现白光输出的混光设计形式上,主要有透射式、反射式(全反射式)和漫射式。其中,在透射式方案中,只有部分光线能通过自由曲面进行收集,见图 10(a);由于荧光均匀发射,部分荧光也会射向泵浦源方向,导致透射式系统光学效率较低。但由于透射式装置简单方便,应用灵活;大部分光线可控,尺寸较小,因此被广泛使用在 LED 照明和激光照明领域。

图 10 (b)为反射式光学系统的设计示意图。在该模式中,大角度光线能经过反光碗内表面反射后射出,把宽光束转化为更为实用的窄光束,光提取率较高;但其突出问题是,由于光转换材料位置难确定,其发射光角度不可控,在实际照明应用中一般通过改变反射器形状或额外增加固定装置

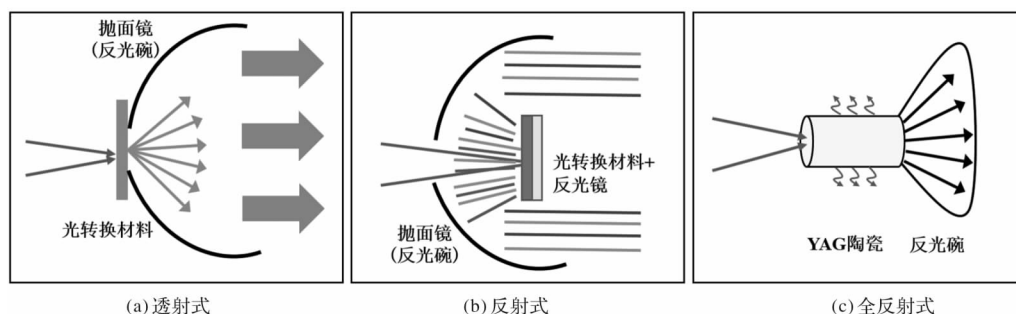


图 10 激光照明系统主要光学设计形式

Fig. 10 Main optical design style of laser illumination system

等方式来解决,提升了光学系统的复杂性^[24]。另外一种较为简单的反射模式是利用荧光陶瓷“全内反射”的性质来实现。即经荧光转换之后,产生的大部分荧光由于陶瓷与空气折射率的界面差异而被束缚在陶瓷内部,只能沿着水平方向传输到反光碗,如图 10(c)。此时,大部分光线只能通过较小的陶瓷端面射出,但这反而有利于获得低光学扩展量、高亮度的白光光源。

此外,漫反射式光学设计形式,作为 LED 照明系统中最常见的模式,在 LED 直接照射荧光粉之后,蓝光和黄光混合不均匀,“黄区”和“白区”的分光现象明显,如图 11(a)。若在照明系统中使用漫反射透光罩,使黄光和蓝光投射在粗糙表面上,光束向各个方向反射,进行二次混光,使“黄区”消失,如图 11(b)。这种光学设计形式虽然扩大了发光面积,匀化了色品空间分布,但不利于获得高照明密度的激光照明光源,仅适用于一般照明场所。

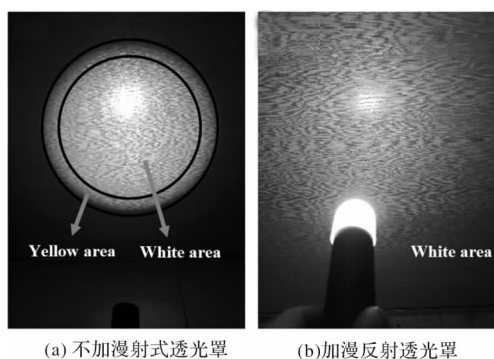


图 11 漫反射设计对白光均匀性的影响

Fig. 11 Effect of diffuse-reflection design on homogeneity of white light

通常,激光照明光学系统中采用镀膜方案来提高光源的光学效率,如镀增透膜层、高反膜层等^[24]。在此,我们提出一种光学设计和光转换陶瓷制作工艺融合的技术方案,见图 12,该结构将

“透明荧光陶瓷”材料外观设计融合光学设计,利用材料的制备工艺优势,加工成“透镜”结构更直接地实现高效率、高亮度的白光输出。在该方案中,LD 激发荧光陶瓷之后,剩余蓝光和产生黄光分别通过透镜整形,混合形成平行白光输出。此方案最大的优势在于省去了系统光路设计透镜系统,降低了光路损失和光学复杂性,提高了系统整体光学效率。

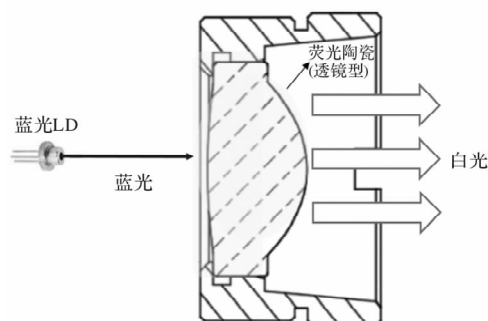


图 12 “透镜型”透明荧光陶瓷器件在蓝光 LD 激发下的照明模型

Fig. 12 Illumination model of lens type transparent phosphor ceramic device under blue LD excitation

2 激光照明系统关键问题

色度调节是激光照明系统首要实现的关键问题^[25],目前主要通过调控光转换材料的种类、发光离子掺杂浓度、光转换材料的实际厚度,来调控白光的色温和显色指数等照明参数。对高亮度激光白光光源,多采用多颗 LD 共同汇聚成一个 μm 级光斑激发光转换材料来获得高亮度白光输出,其蓝光辐照功率密度大于 $5\text{ W}/\text{mm}^2$,甚至超过 $100\text{ W}/\text{mm}^2$ ^[26]。

然而,相比 LED 照明面光源激发的光转换材料($<5\text{ W}/\text{mm}^2$),高流明密度激发下,激光照明系

统在单位面积内产生的热量更多,温度上升更快,发光强度下降更明显。显然,热效应问题是激光照明系统中困扰光转换材料、泵浦源正常工作另一个重要的问题。热量产生(效率下降)的路径与来源如图13所示。

1) LD电光转换损失:目前LD电光转换效率约为20%~30%,其他能量都转换为热能。

2) 光转换材料斯托克斯损失:发光离子吸收能量从基态跃迁到激发态后,内转换和振动弛豫到激发态的最低能级产生无辐射跃迁,发光光子能量降低,光谱向长波方向移动。

3) 光转换材料温度猝灭的“恶性循环效应”:蓝光能量密度过高,光转换材料内部产生热量较快,温度急速上升,导致其量子效率(光转换效率)会急剧下降,当温度超过一定阈值后(约300℃)将下降至30%;这意味着产生的更多热量,反过来引起器件温度继续升高,进而带来永久性破坏。例如,采用荧光粉作为光转换材料时,超过0.2 W/mm²的蓝光激发下,温度瞬间由198℃升高到549℃,远超荧光粉正常运行温度(<200℃),发光严重猝灭并伴随碳化现象^[27]。因此,额外的外部散热装置对保障系统的正常运行尤其重要。

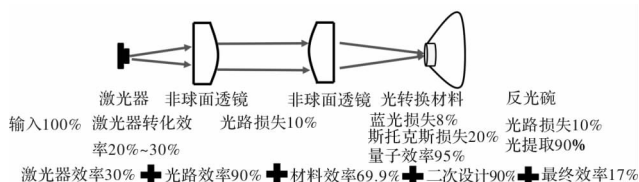


图13 激光照明系统的能量损失路径

Fig. 13 Energy loss path of laser illumination system

事实上,从图13中可以看出,受限于光路效率、光转换材料效率及光路设计等因素,导致目前激光照明系统最终效率仅为17%,特别是激光器电光效率仅为30%,大大限制了系统效率的提升。同时,70%的能量损失使在荧光粉方案中,通过传统芯片背面散热的方式不再适用。“远程激发”荧光粉技术将是激光照明系统中的主流方案,该方案有效避免了激光器过多热量造成荧光粉运行温度上升而导致的转换效率下降。同时,荧光粉转换层要“薄而小”,并紧贴金属热沉,将热量快速传递到高热导率材料中,从而降低自身运行温度,避免碳化。目前,为实现有效散热,使LD和光转换材料都在额定温度下工作,相应的散热装置体积较大、结构较为复杂,典型如图14激光手电筒和激

光大灯的散热装置。另一种有效避免碳化现象的方式是使用高速旋转的荧光粉轮,荧光粉不同区域轮流激发,动态发光,间接增大了光转换材料的发光面积。这种方式虽然可以避免荧光粉热聚焦温度太高导致发光猝灭和碳化现象的产生,但旋转过程会引起一定的色度漂移,仍然不是最有效的解决方案。



图14 激光手电筒

Fig. 14 Laser flashlight

在新型散热机理与装置上,激光照明系统可以通过先进的半导体温控技术,实现完美的温度控制^[28]。如图15中在以荧光陶瓷为光转换材料时,器件工作时将陶瓷片的检测温度反馈给控制系统,根据温度差异变化调节半导体制冷片的功率,进而控制其冷端温度,使系统始终在设定的温度下工作,保证系统发光稳定性,并延长产品寿命。而半导体制冷片热端的热量则可通过风冷、水冷等散热方式进行有效热量管理。

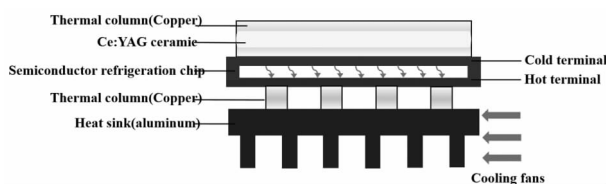


图15 一种能精确调控光转换材料温度的装置

Fig. 15 Device for accurately controlling temperature of light conversion materials

除以上技术瓶颈外,激光白光光源的发展和运用同样受困于器件成本。目前,单个激光二极管的价格平均50元,荧光陶瓷片的价格为100元/cm²，“LD+荧光陶瓷”结构的激光照明装置成本能达到上千元。尽管使用荧光粉可以大幅降低光转换材料的成本,但散热系统复杂度增加,器件失效的可能性增大。目前,激光照明系统局限在一些高端应用领域,如汽车及高铁大灯、投影仪、航标灯等。然而,对比来看,由于激光照明器件可以获得上万流明的白光,其综合成本反而较低。例如,75 W的LD模组获得的上万流明的高亮度白

光,即使售价高达 5 000 元,每流明的价格仅为 0.5 元。同时,随着激光照明及配套技术的不断迭代更新,激光照明系统的成本预期将大幅度下降,以 LED 的发展为例,10 年前每个 LED 灯泡(5 W)售价为 60 元,现在不到 5 元。因此,我们坚信,随着激光照明技术在更多领域的推广应用,在激光照明系统实现量产后,激光照明器件将以极高的性价比进入人们的日常生活。

3 应用市场

知识或智力资源的占有、配置、生产和运用已成为国民经济发展的依托,知识产权的重要性已日益凸现。从专利的角度来分析某个产业应用市场和发展状况是一种重要的评估手段。近年来,在激光照明典型应用的照明、光学、摄影、电通信等领域,相关技术专利如雨后春笋,数量迅速增加,各个企业、高校、研究机构都在激光照明领域进行专利布局,见图 16。然而,在光学和照明类专利中,大部分都集中在基于光学设计的激光照明系统,其使用的光转换材料大多为荧光粉。而为了实现更高流明密度的白光光源,光转换玻璃、单晶,特别是荧光陶瓷也必将陆续被纳入专利保护范围^[29-30]。

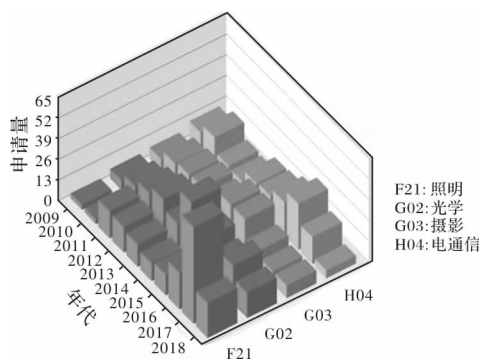


图 16 激光照明相关专利在不同技术领域的发展趋势

Fig. 16 Development trends of patents for laser lighting in different technology fields

激光照明系统目前已经应用到高端汽车大灯和投影显示领域。在最新的宝马、奥迪汽车中,优先考虑的大灯即为激光大灯:激光白光光源可以照射更远的距离,提高夜晚行车安全;可结合智能控制,自由度更高;光转换材料和激光器可单独制冷,降低发光过程中产生的热量对电机等其他部件的影响。作为高亮度投影背光源,激光白光光源将是新一代高亮度的投影显示行业的首选,如

图 17(a)所示。远程激发旋转的荧光粉轮获得的白光光源,通过先进的分光 and 滤光技术,可获得红、绿、蓝三色光源,并作为 3 LCD 投影光源,如图 17(b);控制激光二极管的数量($2 \times 3 \times 4$)和功率来达到获得上万流明的白光。另外,在可见光通信^[31]、园艺照明^[32]等领域也有相关报道,发展前景非常广阔。如果可以进一步推广,其影响和带动的产业将达到万亿级规模。

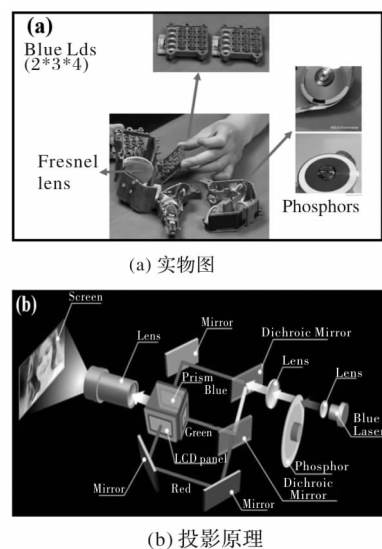


图 17 激光投影仪

Fig. 17 Laser projector

4 结论

激光照明技术作为世界级、颠覆性的新一代照明技术,必将引起照明技术的变革。文中从激光器、光转换材料、光学设计等方面深入解析了激光照明系统的实现原理,需解决的关键问题,并结合专利布局,分析了其在不同技术领域的应用前景。随着激光器电光转换效率的逐步提升和散热装置与光路设计的优化,其困扰发展的热效应问题必将迎刃而解;更重要的是,新型光转换材料将为激光照明关键问题的解决及其实际应用提供坚实的材料基础。实际上,在国家政策引导与业界努力下,激光照明技术在我国已经取得了巨大进步,我国在去年(2018 年)已经可以独立批量生产高性能 GaN 基蓝光 LD;新型的光转换材料,如单晶、荧光玻璃、荧光透明陶瓷等,国内研究人员不断提升其发光和热性能,近期均实现了技术突破,并有望实现量产化,尤其是透明陶瓷材料,以其远高于树脂和玻璃的高热导率和明显区别于单晶的

组分与结构可设计性,必将引领激光照明技术的发展。最终,笔者相信,通过国内企业、高校、科研机构等业界同仁的共同努力,结合国内超强的产业配套优势,我国必将能成为激光照明技术的领跑者。

参考文献:

- [1] GEE J M, TSAO J Y. Prospects for LED lighting[J]. *Nature Photonics*, 2004, 3(4):180-182.
- [2] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(1):100-107.
- [3] LI Desheng, SHI Wei, LIU Xuanfu, et al. Progress of research for laser driven white light and analysis of its key technologies[J]. *Laser Journal*, 2015, 36(7):1-4.
李德胜, 史伟, 刘选福, 等. 激光白光的研究进展及关键技术分析[J]. *激光杂志*, 2015, 36(7):1-4.
- [4] ZHOU Lei, XIANG Weidong, YUAN Rongrong, et al. Latest progress and research status of laser illumination[J]. *China Light & Lighting*, 2017(9):28-32.
周磊, 向卫东, 袁荣荣, 等. 激光照明研究现状及最新进展[J]. *中国照明电器*, 2017(9):28-32.
- [5] YU Bin, ZHOU Shibin. Brisk and energy saving laser lighting: Introduction of laser-lighting[J]. *China Light & Lighting*, 2017(7): 36-39.
喻彬, 周世斌. 亮眼、节能的激光灯: 激光照明技术简介[J]. *中国照明电器*, 2017(7): 36-39.
- [6] ZHAO Shuang, WU Xiaojie, ZOU Yonggang, et al. Design of phosphor-converted white light illumination system simulated by semiconductor laser[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(1):140-145.
赵爽, 吴肖杰, 邹永刚, 等. 半导体激光激发荧光粉转换白光照明系统设计[J]. *应用光学*, 2018, 39(1):140-145.
- [7] LIN Wenshuo, SHI Mengjing, BAI Ying, et al. Bi-directional secondary light distribution design for energy-saving headlights based on LED lighting energy and weak light collection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(6):908-915.
林文硕, 石梦镜, 白莹, 等. 基于LED照明与弱光收集的节能车灯双向二次配光设计[J]. *应用光学*, 2018, 39(6):908-915.
- [8] WIERER J J JR, TSAO J Y. Advantages of III-nitride laser diodes in solid-state lighting[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2015, 212(5): 980-985.
- [9] WANG L, LU C, LU J, et al. Influence of carrier screening and band filling effects on efficiency droop of InGaN light emitting diodes[J]. *Optics Express*, 2011, 19(15):14182-14187.
- [10] CHO J, SCHUBERT E F, KIM J K. Efficiency droop in light-emitting diodes: Challenges and countermeasures[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(3):408-421.
- [11] WIERER J J, TSAO J Y, SIZOV D S. Comparison between blue lasers and light-emitting diodes for future solid-state lighting[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(6):963-993.
- [12] TSAO J Y, CRAWFORD M H, COLTRIN M E, et al. Toward smart and ultra-efficient solid-state lighting[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(9): 809-836.
- [13] YANG Jingjing. Research on the key technologies of semiconductor laser white light sources[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2015.
杨晶晶. 半导体激光白光照明关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2015.
- [14] YANG J, LIU Z, XUE B, et al. Research on phosphor-conversion laser-based white light used as optical source of VLC and illumination[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, 49(4): 173.
- [15] BACHMANN V, RONDA C, MEIJERINK A. Temperature quenching of yellow Ce³⁺ luminescence in YAG: Ce[J]. *Chemistry of Materials*, 2009, 21(10): 2077-2084.
- [16] LI S X, WANG L, HIROSAKI N, et al. Color conversion materials for high-brightness laser-driven solid-state lighting[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(12): 2-29.
- [17] SONG Y H, JI E K, JEONG B W, et al. High power laser-driven ceramic phosphor plate for outstanding efficient white light conversion in application of automotive lighting[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 31206-31206.
- [18] JIN Yashuo, GUO Xiangchao, CAO Dunhua, et al. Luminescence properties of Ce: YAG single crystals and ceramics under laser excitation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017(10):89-96.
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(10): 89-96.

- [19] SONG Y H, JI E K, JEONG B W, et al. Design of laser-driven high-efficiency $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$ ceramic converter for automotive lighting: Fabrication, luminous emittance, and tunable color space [J]. *Dyes & Pigments*, 2017, 139:688-692.
- [20] LI S X, ZHU Q Q, TANG D M, et al. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-YAG}:\text{Ce}$ composite phosphor ceramic: a thermally robust and efficient color converter for solid state laser lighting[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(37):8648-8654.
- [21] CHI Nan. LED visible light communication technologies [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
迟楠. LED 可见光通信[M]. 北京:清华大学出版社, 2013.
- [22] MIKE Wood, SHI Duan. Etendue[J]. *Entertainment Technology*, 2012(4):6-8.
迈克伍德, 施端. 解析光学扩展量[J]. 演艺科技, 2012, 2012(4):6-8.
- [23] LI K, SHI Y, JIA F Q, et al. Low etendue yellow-green solid-state light generation by laser-pumped $\text{LuAG}:\text{Ce}$ ceramic[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(10):939-942.
- [24] HUANG Fan, LONG Tao, ZOU Chen, et al. Wavelength conversion device, illumination device and laser illumination lamp; China, CN201710433889[P]. 2017-6-9.
黄帆, 龙涛, 邹诚, 等. 一种波长转换装置, 发光装置及激光照明灯: 中国, CN201710433889[P]. 2017-6-9.
- [25] ARJOCA S, VÍLLORA E G, INOMATA D, et al. Temperature dependence of $\text{Ce}:\text{YAG}$ single-crystal phosphors for high-brightness white LEDs/LDs[J]. *Materials Research Express*, 2015, 2(5):055503.
- [26] ZHU Ning. Requirements identification on phosphor materials to laser illumination systems[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2018(3):58-61.
朱宁. 白光激光照明对荧光材料的要求[J]. 照明工程学报, 2018(3):58-61.
- [27] MA Y P, LAN W, XIE B, et al. An optical-thermal model for laser-excited remote phosphor with thermal quenching[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 116:694-702.
- [28] LI Jinwei. Safe, energy-saving and environmentally friendly automotive laser lighting[J]. *Auto Industry Research*, 2017(2):52-55.
李进卫. 安全节能环保的汽车激光照明[J]. 汽车工业研究, 2017(2):52-55.
- [29] LI Huili, HU Song, ZHOU Jixin, et al. Ceramic material composited with fluorescent ceramic and sapphire and its preparation method thereof; China, CN201810214408[P]. 2018-3-15.
李会利, 胡松, 周际新, 等. 一种荧光陶瓷与蓝宝石复合陶瓷材料及其制备方法: 中国, CN201810214408[P]. 2018-3-15.
- [30] HAN Jie, SHEN Guoye. A lighting unit using mixed light source; China, CN201810296540[P]. 2018-3-30.
韩杰, 沈国野. 一种采用混合光源的照明单元: 中国, CN201810296540[P]. 2018-3-30.
- [31] HUANG Y F, CHI Y C, KAO H Y, et al. Blue laser diode based free-space optical data transmission elevated to 18 gbps over 16m[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7:10478.
- [32] OOI A, WONG A, NG T K, et al. Growth and development of *Arabidopsis thaliana* under single-wavelength red and blue laser light[J]. *Scientific Report*, 2016, 6:33885.