

文章编号: 1000-7032(2019)10-1254-07

基于 RGB 三基色半导体激光的高功率白激光光源

田景玉^{1,2}, 张 俊^{1*}, 彭航宇¹, 王 威¹, 雷宇鑫², 王立军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于红绿蓝(RGB)三基色直接半导体激光器合成的白激光光源具有转换效率高、显色指数好、输出功率高等优点,是新一代的理想照明光源和显示光源之一。基于RGB三基色半导体激光器件,通过空间合束、波长合束等,三基色光耦合进单光纤,光纤输出合束光功率超过100 W。根据色度学原理进行颜色功率配比,获得了功率达63 W、色温为5 710 K的白光输出,与标准白光 D_{65} 相比色温偏差小于12.2%。在此基础上,调整红色激光输出功率,获得了功率达58.4 W、色温为6 480 K的白光输出,与标准白光 D_{65} 相比色温偏差小于3.08%。基于该光源,通过调整激光功率配比,可实现不同色温的合束激光输出。

关 键 词: RGB; 半导体激光器; 激光合束; 白色激光; 激光显示

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20194010.1254

High Power White Laser Source Based on RGB Diode Laser

TIAN Jing-yu^{1,2}, ZHANG Jun^{1*}, PENG Hang-yu¹, WANG Wei¹, LEI Yu-xin², WANG Li-jun¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Author, E-mail: jzh_ciom@163.com

Abstract: The white laser light source synthesized by red, green and blue(RGB) direct semiconductor laser has the advantages of high conversion efficiency, good color rendering index and high output power. It is one of the new generation ideal lighting source and display source. Based on the RGB three-color diode laser devices, through the space beam combining and wavelength beam combining, the RGB lights are coupling into a single optical fiber, optical fiber output beam power more than 100 W. The power ratio of different colors is carried out according to the colorimetry principle. The white light with a power of 63 W and a color temperature of 5 710 K, which is less than 12.2% compared with the standard white light D_{65} was obtained. On this basis, by adjusting the output power of the red laser, a white light output with a power of 58.4 W and a color temperature of 6 480 K was gotten. Compared with standard white light D_{65} , the deviation of color temperature was less than 3.08%. The light source based on this structure can achieve different display effects by adjusting the laser power ratio.

Key words: RGB; diode laser; beam combining; white laser; laser display

收稿日期: 2019-03-06; 修订日期: 2019-03-26

基金项目: 科技部重点研发计划(2017YFB0404902); 国家自然科学基金(61574141, 61535013); 吉林省科技发展计划(20190302042GX); 装备预研领域基金(61404140107); 中国科学院前沿科学重点项目(QYZDY-SSW-JSC006)资助

Supported by National Key R&D Program of China(2017YFB0404902); National Natural Science Foundation of China(NSFC)(61574141, 61535013); R&D Program of Jilin Province(20190302042GX); Equipment Advanced Research Fund(61404140107); Key Project in Frontier Science of CAS(QYZDY-SSW-JSC006)

1 引言

白激光光源作为一种高效和颜色稳定的固体白色光源,在激光照明和激光显示领域具有广阔的应用前景。与 LED 光源相比,激光光源不存在严重的“效率骤降”^[1-2]问题,可获得非常高的输出功率^[3-4]。同时具备体积小、工作寿命长、性能稳定、显色性好等优点^[5-8],是新一代的理想照明光源^[9-10]和显示光源^[11-16]。

合成白色激光光源主要有以下 3 种方法:(1)红、绿、蓝(RGB)三基色激光混合合成;(2)短波长激光激发 RGB 三原色荧光粉合成;(3)蓝光激光激发黄色荧光粉合成。目前,多数采用第 2 种和第 3 种方法,主要是因为通过激光激发荧光粉合成白光光源的结构简单,工艺容易实现。比如 Abu-Ageel 等使用 405 nm/445 nm 激光激发 RGB 三原色荧光剂获得了无散斑的 RGB 三色光,并通过合束获得白色激光^[17];Led-ru 等采用蓝光激光二极管激发远距离处荧光粉的方法实现了色温为 4 000 K、显色指数接近 95 的白光输出^[18]。罗智田以 450 nm 半导体激光器激发 YAG 黄色荧光粉获得光通量为 139.5 lm、显色指数为 61.2、色温为 7 266 K 的白光输出^[19]。但是这些方法都存在荧光粉产生的斯托克斯损耗,且由于其不是激光直接光源合成,显色性较差。

基于 RGB 三基色激光合成白激光光源直接采用功率高、颜色纯正的激光器件,通过合束方式实现白激光输出,不存在荧光粉产生的斯托克斯损耗,电光转换效率更高,且容易获得高功率、高亮度的白光输出^[20]。更重要的是其继承了激光器单色性稳定的特点,显色指数高,可以真实呈现客观世界中丰富多彩的颜色,覆盖颜色达 90% 以上^[21-24]。颜博霞等采用红绿蓝三基色组成的激光光源进行了颜色配比研究,并由光纤组束,获得了色温略低于理论值 15% 的激光输出^[23],但其绿色光源采用的是固体倍频绿光激光器,受限于这种类型激光器本身的特性,相干性太强,容易产生散斑^[25-27],因而影响照明或显示效果。

本文基于 RGB 三基色半导体激光器件,通过空间合束、波长合束等,三基色光耦合进单光纤,光纤输出合束光功率超过 100 W,根据色度学原理进行颜色功率配比,获得了功率达 63 W、色温

为 5 710 K 的白光输出,与标准白光 D₆₅相比色温偏差小于 12.2%。在此基础上,调整红色激光输出功率,获得了功率为 58.4 W、色温为 6 480 K 的白光输出,与标准白光 D₆₅相比色温偏差小于 3.08%。在本结构中,可以通过调整激光功率配比实现不同的显示效果。

2 实验

2.1 RGB 三基色激光的特性

根据文献[28-34]所述 RGB 激光波长选取方法,采用商用 TO 封装的红、绿、蓝三基色半导体激光单元器件,其功率及效率特性如图 1 所示。图 1(a)为红光激光单元输出特性,在电流为 0.9 A 时,输出功率达到 0.88 W,效率为 43.2%。图 1(b)为绿光激光单元输出特性,在电流为 1.6 A 时,输出功率达到 1.13 W,效率为 14.6%。图 1(c)为蓝光激光单元输出特性,在电流为 1.0 A 时,输出功率达到 1.4 W,效率为 28.0%。

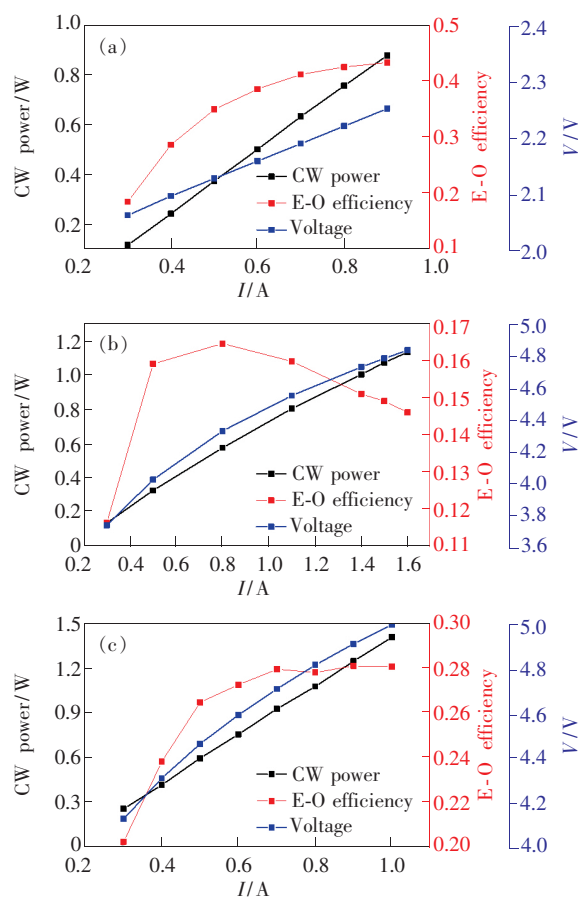


图 1 红(a)、绿(b)、蓝(c)三基色激光单元输出功率效率曲线。

Fig. 1 Output laser power efficiency of red(a), green(b), blue(c) laser beam, respectively.

基于 RGB 三基色激光单元合成白激光光源的结构如图 2 所示。每个激光单元经过准直后,由反射镜进行光路折叠和重排,实现空间合束,将多个激光单元进行空间拼接形成大的光斑,然后通过两次波长合束,将三基色光束合束成单束光,最后通过聚焦镜耦合进 800 $\mu\text{m}/0.22$ NA 光纤。采用被动传导水冷散热,保持热沉温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,采用光功率计 (FL400A-BB-50, Ophir, Israel) 测量输出功率,光谱分析仪 (ANDO

AQ6317, Yokogawa, Japan) 分析出光光谱,色度计 (CL-200A, Konica Minolta, Japan) 测量色温和色坐标。色度测试在光照度小于 1 lx 的暗场环境下进行,由于合束功率过高不能直接照射色度计的探头,在此采用散射光照射的方式进行测试。为了获得高功率的合束激光和好的消散斑效果,红光采用 64 个激光单元合束而成,绿光采用 48 个激光单元合束而成,蓝光采用 64 个激光单元合束而成。

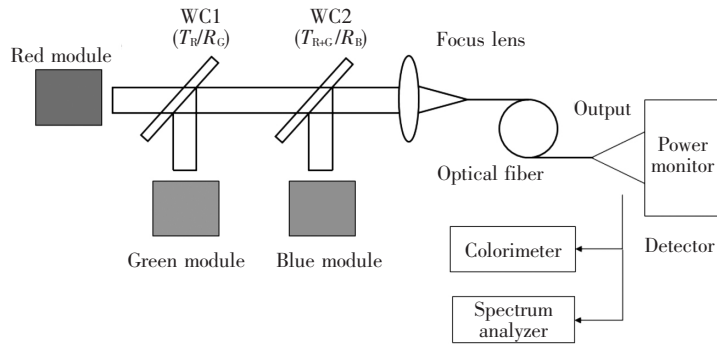


图 2 红绿蓝三基色激光合束结构示意图
Fig. 2 Diagram of beam-combing structure by RGB

2.2 三色激光功率配比选择

根据色度学原理,混合色的亮度和色品坐标可以根据格拉斯曼颜色混合定律和 CIE1931 标准色度系统得到^[23 28 35-36],基于此,可以计算合成颜色所需的各基本色的功率值。

本实验设置目标为获得标准白光光源 D₆₅, 其色温为 6 500 K。由三基色 RGB 激光配成一个单位的标准白光 D₆₅,需满足的条件如公式(1)所示:

$$\begin{cases} X_W = L_R X_R + L_G X_G + L_B X_B \\ Y_W = L_R Y_R + L_G Y_G + L_B Y_B \\ Z_W = L_R Z_R + L_G Z_G + L_B Z_B \end{cases}, \quad (1)$$

其中 X, Y, Z 为三刺激值,满足 $X/(X+Y+Z) = x, Y/(X+Y+Z) = y, Z/(X+Y+Z) = z$, x, y, z 为色坐标; L_R, L_G, L_B 为归一化亮度,满足 $L_R + L_G + L_B = 1$ 。

本实验中,选用的 638 nm 红光 R、516 nm 绿光 G、450 nm 蓝光 B、标准白光 D₆₅ 的色坐标(x, y, z)与视见函数(ν_λ)如表 1 所示。

结合公式(1)可以计算出 RGB 三基色光的亮度比 $L_R:L_G:L_B$,再结合视见函数公式:

$$P_R:P_G:P_B = \frac{L_R}{\nu_{638\text{nm}}}:\frac{L_G}{\nu_{516\text{nm}}}:\frac{L_B}{\nu_{450\text{nm}}}, \quad (2)$$

表 1 RGB 半导体激光及标准白光的色坐标与视见函数
Tab.1 CIE coordinates and visual functions of RGB diode laser and D₆₅ white light

Color	x	y	z	ν_λ
R	0.717 16	0.282 81	0.000 03	0.21
G	0.045 33	0.819 39	0.135 28	0.821
B	0.156 64	0.017 71	0.825 65	0.064 7
W	0.312 8	0.329 2	0.358	—

可计算出 RGB 三基色激光的功率比 $P_R:P_G:P_B = 0.445:0.348:0.197$ 。通过调整激光驱动电流、调节激光功率配比,使 RGB 三基色激光的功率比为 0.445:0.348:0.197,以获得色温为 6 500 K 的白光光源 D₆₅。在实验过程中,对三基色光源分别进行光功率和色温监测,根据监测结果适时调整功率配比,实现高功率白色激光输出。

3 结果与讨论

光纤输出红光激光功率-效率曲线如图 3 所示,在 0.9 A 电流驱动时,激光连续功率为 36.6 W,计算出电光转换效率为 28.202%,采用色度计测得其色坐标为(0.707 1 0.287 5)。

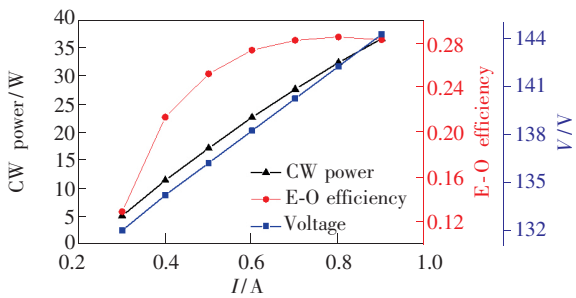


图 3 638 nm 光纤耦合红光激光合束功率-效率曲线
Fig. 3 Output laser power efficiency curve of 638 nm fiber coupled red laser beam

光纤耦合绿光激光功率-效率曲线如图 4 所示,在 1.6 A 电流驱动时,测得激光连续功率为 33.53 W,计算电光转换效率为 9.491%,测得其色坐标为(0.075 9 0.830 4)。

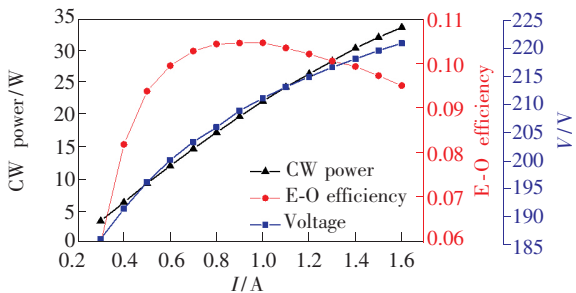


图 4 实测 516 nm 光纤耦合绿光激光合束功率-效率曲线
Fig. 4 Output laser power efficiency curve of 516 nm fiber coupled green laser beam.

光纤耦合蓝光激光功率-效率曲线如图 5 所示,在 1.2 A 电流驱动时,测得激光连续功率为 60.9 W,计算电光转换效率为 21.875%,并测得其色坐标为(0.143 0 0.016 7)。

光纤耦合 RGB 三色激光的输出激光光谱如图 6 所示,3 个主峰对应的波长分别为蓝光 450.2 nm、绿光 516.5 nm、红光 637.8 nm,各自的光谱宽

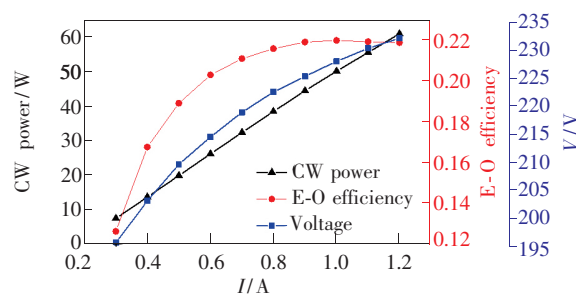


图 5 实测 450 nm 光纤耦合蓝光激光合束功率-效率曲线
Fig. 5 Output laser power efficiency curve of 450 nm fiber coupled blue laser beam

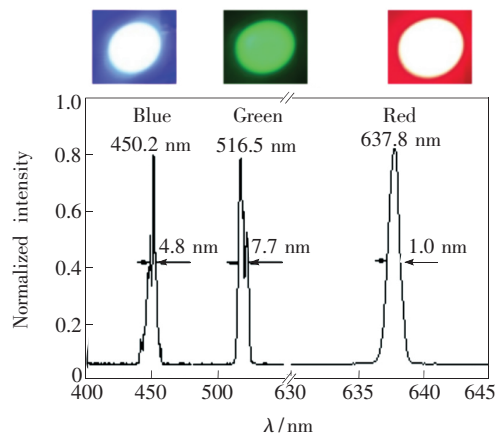


图 6 光纤耦合 RGB 三色激光的输出激光光谱
Fig. 6 Laser spectrum of optical fiber coupling RGB laser

度(FWHM)分别为 4.8、7.7、1.0 nm。说明功率配比依照 RGB 波长进行计算的有效性,且输出光束继承了半导体激光器单色性稳定的特点。

按 $P_R:P_G:P_B=0.477:0.334:0.189$ 进行功率配比,测量光纤耦合 RGB 三基色半导体激光输出光输出功率,实验结果如表 2 所示,与标准白光色温 6 500 K 相比,实验所得色温下降了 8.92%~16%。功率输出最高达 63 W,同时其色温 5 710 K 与标准白光色温相比偏差小于 12.2%。

表 2 按计算功率配比光纤耦合 RGB 半导体激光输出光的特性
Tab. 2 Characteristics of optical fiber coupling RGB laser by the calculated power ratio

$P_{\text{total}}/\text{W}$	P_R/W	P_G/W	P_B/W	T_c/K	x	y
22.61	10.10	7.07	4.00	5 920	0.323 8	0.337 5
42.35	20.20	14.14	8.00	5 447	0.334 3	0.352 0
63.50	30.30	21.21	12.00	5 710	0.341 2	0.339 4

适时调整功率配比,降低红色激光功率,实验结果如表 3 所示,在 $P_R=25.3\text{ W}$ 、 $P_G=21.2\text{ W}$ 、 $P_B=12\text{ W}$ 时,即 $P_R:P_G:P_B=0.432\ 5:0.362\ 4:0.205\ 1$ 时,获得了色温为 6 480 K 的白光输出,接

近标准白光 D_{65} 的色温,结合 RGB 三基色激光各自的合束功率-效率曲线(图 3、图 4、图 5),计算其综合光电转换效率为 14.31%。从表 3 中同样可以看出,在本光纤耦合输出结构中,通过调整单

表 3 降低红色激光功率时光纤耦合 RGB 半导体激光输出光的特性

Tab. 3 Characteristics of optical fiber coupling RGB laser of different P_R

$P_{\text{total}}/\text{W}$	P_R/W	P_G/W	P_B/W	T_c/K	x	y
63.50	30.30	21.21	12.00	5 710	0.341 2	0.339 4
58.4	25.3	21.21	12.00	6 480	0.312 0	0.341 6
56.5	23.4	21.21	12.00	6 933	0.303 0	0.344 0

基色激光的功率可以实获得不同的色温,也就是说,本结构可以通过调整激光功率配比,实现不同的显示效果。

在 $P_R = 25.3 \text{ W}$ 、 $P_G = 21.2 \text{ W}$ 、 $P_B = 12 \text{ W}$ 时,

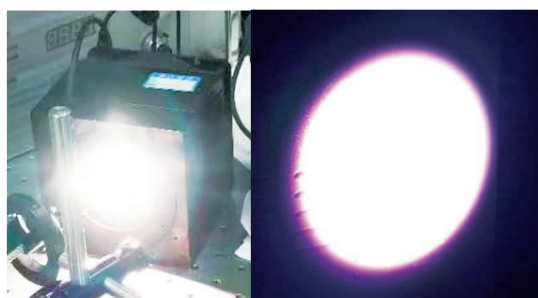


图 7 在 $P_R = 25.3 \text{ W}$ 、 $P_G = 21.2 \text{ W}$ 、 $P_B = 12 \text{ W}$ 时,获得的 6 480 K 白光光斑。

Fig. 7 White light spot at 6 480 K while $P_R = 25.3 \text{ W}$, $P_G = 21.2 \text{ W}$, $P_B = 12 \text{ W}$.

获得的 6 480 K 白光及光斑如图 7 所示,可以看出得到了较为理想的白光输出。

4 结 论

基于 RGB 三基色半导体激光器件,通过空间合束、波长合束等,三基色光耦合进单光纤,光纤输出合束光功率超过 100 W。根据色度学原理进行颜色功率配比,获得了功率达 63 W、色温为 5 710 K 的白光输出,与标准白光 D_{65} 相比色温偏差小于 12.2%。在此基础上,调整红色激光输出功率,获得了功率达 58.4 W、色温为 6 480 K 的白光输出,与标准白光 D_{65} 相比色温偏差小于 3.08%。基于该光源,通过调整激光功率配比,可实现不同色温及色坐标合束激光输出,在激光照明与显示领域具有良好的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] PHILLIPS J M, COLTRIN M E, CRAWFORD M H *et al.*. Research challenges to ultra-efficient inorganic solid-state lighting [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2007, 1(4): 307-333.
- [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]. *J. Disp. Technol.*, 2007, 3(2): 160-175.
- [3] DENAULT K A, CANTORE M, NAKAMURA S *et al.*. Efficient and stable laser-driven white lighting [J]. *AIP Adv.*, 2013, 3(7): 072107-1-6.
- [4] CANTORE M, PFAFF N, FARRELL R M *et al.*. High luminous flux from single crystal phosphor-converted laser-based white lighting system [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(2): A215-A221.
- [5] 孙胜明, 范杰, 徐莉, 等. 锥形半导体激光器研究进展 [J]. 中国光学, 2019, 12(1): 48-58.
SUN S M, FAN J, XU L *et al.*. Progress of tapered semiconductor diode lasers [J]. *Chin. Opt.*, 2019, 12(1): 48-58. (in Chinese)
- [6] 仇伯仓, 胡海, 汪卫敏, 等. 12 W 高功率高可靠性 915 nm 半导体激光器设计与制作 [J]. 中国光学, 2018, 11(4): 590-603.
QIU B C, HU H, WANG W M *et al.*. Design and fabrication of 12 W high power and high reliability 915 nm semiconductor lasers [J]. *Chin. Opt.*, 2018, 11(4): 590-603. (in Chinese)
- [7] 海一娜, 邹永刚, 田锟, 等. 水平腔面发射半导体激光器研究进展 [J]. 中国光学, 2017, 10(2): 194-206.
HAI Y N, ZOU Y G, TIAN K *et al.*. Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers [J]. *Chin. Opt.*, 2017, 10(2): 194-206. (in Chinese)
- [8] 田锟, 邹永刚, 马晓辉, 等. 面发射分布反馈半导体激光器 [J]. 中国光学, 2016, 9(1): 51-64.
TIAN K, ZOU Y G, MA X H *et al.*. Surface emitting distributed feedback semiconductor lasers [J]. *Chin. Opt.*, 2016,

- 9(1): 51-64. (in Chinese)
- [9] 赵爽. 半导体激光白光照明及配光技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
ZHAO S. *Research on Semiconductor Laser White Light Lighting and Light Distribution Technology* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [10] 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.
YANG J J. *Research on The Key Technologies of Semiconductor Laser White Light Sources* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] LI X F, BUDAI J D, LIU F *et al.*. New yellow $\text{Ba}_{0.93}\text{Eu}_{0.07}\text{Al}_2\text{O}_4$ phosphor for warm-white light-emitting diodes through single-emitting-center conversion [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2013 2(1): e50.
- [12] 许祖彦. 大色域显示——新一代显示技术 [J]. 物理, 2010 39(4): 227-231.
XU Z Y. Large colour gamut display—the new generation of display technique [J]. *Physics*, 2010 39(4): 227-231. (in Chinese)
- [13] STREK W, CICHY B, RADOSINSKI L *et al.*. Laser-induced white-light emission from graphene ceramics—opening a band gap in graphene [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2015 4(1): e237.
- [14] 张岳, 郝丽, 柳华, 等. 激光显示的原理与实现 [J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 402-405.
ZHANG Y, HAO L, LIU H *et al.*. Principle and realization of laser display technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 402-405. (in Chinese)
- [15] MAJUMDER A, BROWN R G, EL-GHOROURY H S. Display gamut reshaping for color emulation and balancing [C]. *Proceedings of 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition—Workshops, San Francisco, CA, USA*, 2010.
- [16] 郭自泉, 高玉琳, 吕毅军, 等. 固定相关色温下三基色合成白光 LED 的光谱优化 [J]. 光电子·激光, 2011 22(7): 992-996.
GUO Z Q, GAO Y L, LV Y J *et al.*. Spectrum optimization of tri-color white LEDs at fixed correlated color temperature [J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2011 22(7): 992-996. (in Chinese)
- [17] ABU-AGEEL N, ASLAM D. Laser-driven visible solid-state light source for Etendue-limited applications [J]. *J. Displ. Technol.*, 2014 10(8): 700-703.
- [18] LEDRU G, CATALANO C, DUPUIS P *et al.*. Efficiency and stability of a phosphor-conversion white light source using a blue laser diode [J]. *AIP Adv.*, 2014 4(10): 107134-1-7.
- [19] 罗智田. 基于半导体激光器的汽车前照灯白光光源研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
LUO Z T. *Research of Semiconductor Laser White Light Sources Which Is Used in Car Headlight* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [20] 王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展 [J]. 中国光学, 2015 8(4): 517-534.
WANG L J, PENG H Y, ZHANG J. Advance on high power diode laser coupling [J]. *Chin. Opt.*, 2015 8(4): 517-534. (in Chinese)
- [21] 刘晔. 全固态准相位匹配三基色激光同轴输出技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
LIU Y. *The Study on Construction of a Solid-state RGB Laser* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [22] 姚爱云, 侯玮, 林学春, 等. 全固态三基色激光大屏幕投影显示实验 [J]. 物理, 2004 33(2): 133-136.
YAO A Y, HOU W, LIN X C *et al.*. The projection display experiment in large screen by three primary colors from all solid state laser [J]. *Physics*, 2004 33(2): 133-136. (in Chinese)
- [23] 颜博霞, 王延伟, 示岩, 等. 激光显示光源颜色配比和色温研究 [J]. 中国激光, 2018 45(4): 0401004-1-5.
YAN B X, WANG Y W, QI Y *et al.*. Study of color proportion and color temperature in laser display [J]. *Chin. J. Lasers*, 2018 45(4): 0401004-1-5. (in Chinese)
- [24] 王延伟, 毕勇, 王斌, 等. 大屏幕激光投影与激光电视 [J]. 物理, 2010 39(4): 232-237.
WANG Y W, BI Y, WANG B *et al.*. Large screen laser projection display and laser television [J]. *Physics*, 2010, 39(4): 232-237. (in Chinese)
- [25] 李霞, 刘伟奇, 田志辉, 等. 激光显示中散斑对比度的降低 [J]. 液晶与显示, 2008 23(2): 153-156.

- LI X ,LIU W Q ,TIAN Z H *et al.* . Speckle contrast reduction in laser display [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* ,2008 , 23(2) : 153-156. (in Chinese)
- [26] 韩啸 缪龙 周煌 等. 基于 PPMgOLN 绿光微片激光器的散斑抑制 [J]. *激光与红外* ,2015 45(5) : 483-486.
HAN X ,MIAO L ,ZHOU H *et al.* . Speckle suppression based on PPMgOLN microchip green laser [J]. *Laser Infr.* , 2015 45(5) : 483-486. (in Chinese)
- [27] 李霞 郝丽 刘伟奇 等. 激光显示中散斑减弱研究 [J]. *液晶与显示* ,2007 22(3) : 320-324.
LI X ,HAO L ,LIU W Q *et al.* . Speckle reduction in laser display [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* ,2007 22(3) : 320-324. (in Chinese)
- [28] 梁传样. 激光投影显示光学系统关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 ,2017.
LIANG C Y. *Research on Key Technology of Laser Projection Display Optical System* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics ,Fine Mechanics and Physics ,Chinese Academy of Sciences ,2017. (in Chinese)
- [29] BUCKLEY E. Laser wavelength choices for pico-projector applications [J]. *J. Displ. Technol.* ,2011 7(7) : 402-406.
- [30] WALLHEAD I ,OCAÑA R ,QUINZÁ P. Designing a laser scanning picoprojector. Part 1: characteristics of the optical displaying system and color-management-related issues [J]. *Appl. Opt.* ,2012 51(20) : 4803-4809.
- [31] 颜博霞 毕勇 王栋栋 等. 紧凑高效的 Nd: YVO₄/PPMgLN 腔内倍频 3.8 W 连续绿光激光器 [J]. *中国激光* ,2011 , 38(3) : 0302007-1-4.
YAN B X ,BI Y ,WANG D D *et al.* . Compact and highly efficient 3.8 W intracavity frequency-doubled Nd: YVO₄/PPMgLN green laser [J]. *Chin. J. Lasers* ,2011 38(3) : 0302007-1-4. (in Chinese)
- [32] MITSUYAMA H ,MOTODA T ,NISHIDA T *et al.* . Reliability study on high-power 638 nm broad stripe laser diode [J]. *Opt. Rev.* ,2014 21(1) : 43-47.
- [33] MASUI S ,MIYOSHI T ,YANAMOTO T *et al.* . Blue and green laser diodes for large laser display [C]. *Proceedings of 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim Kyoto Japan* ,2013: SA1_3.
- [34] MASUI S ,MIYOSHI T ,YANAMOTO T *et al.* . 1 W AlInGaN based green laser diodes [C]. *Proceedings of 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim Kyoto Japan* ,2013: WH3_1.
- [35] 徐海松. 颜色信息工程 [M]. 第 2 版. 杭州: 浙江大学出版社 ,2015: 60-73.
XU H S. *Color Information Engineering* [M]. 2nd ed. Hangzhou: Zhejiang University Press ,2015: 60-73. (in Chinese)
- [36] MEYN J P. Colour mixing based on daylight [J]. *Eur. J. Phys.* ,2008 29(5) : 1017-1031.



田景玉(1988-) ,男,辽宁本溪人,博士研究生,助理研究员,2013 年于北京科技大学获得硕士学位,主要从事大功率半导体激光器合束技术与材料连接技术的研究。
E-mail: tianjingyu@ciomp.ac.cn



张俊(1986-) ,男,重庆人,博士,副研究员,2013 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大功率半导体激光器合束技术的研究。
E-mail: jzh_ciomp@163.com