

# 激光激发 Ce:YAG 单晶与陶瓷的发光性能

靳亚硕<sup>1,2</sup>, 郭向朝<sup>1</sup>, 曹顿华<sup>3</sup>, 章汉梁<sup>4</sup>, 张国栋<sup>1,2</sup>, 李海兵<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光单元研发中心, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>昆山开威电子有限公司, 江苏 苏州 215345;

<sup>4</sup>上海铁路局杭州北车辆段, 浙江 杭州 311100

**摘要** 制备了不同 Ce<sup>3+</sup> 掺杂浓度(摩尔分数)的钇铝石榴石(YAG)单晶和陶瓷,并对激光激发 Ce:YAG 单晶和陶瓷的光通量、光电转换效率、显色指数及色温进行了研究。在电流为 2.6 A 的激光激发下,Ce<sup>3+</sup> 掺杂浓度为 0.3% 的陶瓷的光通量最高,为 617.2 lm;Ce<sup>3+</sup> 掺杂浓度为 0.5% 的单晶的显色指数较高,为 62,色温为 5841 K。在功率为 2.61 W、材料中心功率密度达 10.8 W·mm<sup>-2</sup> 的激光激发下,Ce:YAG 单晶和陶瓷的光转换均未达到饱和,对应的光-光转换效率均约为 240 lm·W<sup>-1</sup>。实验结果表明,在高功率密度激光激发下,陶瓷和单晶均适用于产生高亮度白光。

**关键词** 材料; 荧光材料; 光通量; 高功率密度激光; 转换效率

中图分类号 TN27

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1003001

## Luminescence Properties of Ce:YAG Single Crystals and Ceramics Under Laser Excitation

Jin Yashuo<sup>1,2</sup>, Guo Xiangchao<sup>1</sup>, Cao Dunhua<sup>3</sup>, Zhang Hanliang<sup>4</sup>,  
Zhang Guodong<sup>1,2</sup>, Li Haibing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research and Development Center for High Power Laser Components, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Kunshan Kaiwei Electronic Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215345, China;

<sup>4</sup>Hangzhou North Car Depot, Shanghai Railway Bureau, Hangzhou, Zhejiang 311100, China

**Abstract** Yttrium aluminium garnet (YAG) single crystals and ceramics with different Ce<sup>3+</sup>-doping concentrations (mole fraction) are prepared. The luminous flux, photoelectric conversion efficiency, color rendering index, and color temperature of Ce:YAG single crystals and ceramics under laser excitation are also analyzed. Under the excitation of the laser with a current of 2.6 A, the luminous flux of ceramics with a Ce<sup>3+</sup>-doping concentration of 0.3% is the highest at 617.2 lm. The single crystals with a Ce<sup>3+</sup>-doping concentration of 0.5% have a high color rendering index of 62 and a color temperature of 5841 K. Under the excitation of the laser with a power of 2.61 W and a power density of 10.8 W·mm<sup>-2</sup> at the material center, the optical conversions of Ce:YAG single crystals and ceramics are both unsaturated and the corresponding optical-to-optical conversion efficiencies are both about 240 lm·W<sup>-1</sup>. The experimental results show that the ceramics and single crystals are suited to produce high brightness white light under high power density laser excitation.

**Key words** materials; fluorescent materials; luminous flux; high power density laser; conversion efficiency

**OCIS codes** 160.3380; 160.2750; 140.3615; 300.6280; 300.1030

收稿日期: 2017-05-04; 收到修改稿日期: 2017-05-24

作者简介: 靳亚硕(1991—),男,硕士研究生,主要从事高功率密度白光光源方面的研究。E-mail: j203205923@163.com

导师简介: 李海兵(1975—),男,博士,研究员,主要从事发光材料及特种光源方面的研究。

E-mail: lhb184@sina.com(通信联系人)

## 1 引 言

目前,白光发光二极管(LED)主要通过蓝光 LED 芯片配合硅胶混合荧光粉实现<sup>[1]</sup>,利用该种方式封装的白光 LED 由于具有寿命长、易封装、光电转换效率高的特点,被广泛应用于路灯、工厂照明、家用照明、汽车灯、液晶背光灯等方面<sup>[2-6]</sup>。随着蓝光 LED 单颗芯片功率的提高,LED 模块的整体功率不断得到提高,进一步扩大了 LED 在高功率照明领域的应用<sup>[7-8]</sup>。

虽然蓝光 LED 芯片配合荧光粉具有诸多优势,但是随着蓝光 LED 芯片功率的不断提高,其发热和散热问题日趋严重。白光 LED 主要采取硅胶混合荧光粉的封装形式,硅胶和荧光粉覆盖其四周,不利于散热<sup>[9]</sup>,当 LED 芯片本身发热量很大,热聚集温度超过硅胶或者芯片的最高耐受温度时,器件失效,这在一定程度上限制了其在更高功率场合的应用。相对于硅胶混合荧光粉,Ce:YAG 的陶瓷和单晶具有更高的熔点(高达 1950 °C)和更高的散热系数,因此更适用于高功率密度小区域面积的光激发。另外,对于高功率密度小区域面积的光激发,激光二极管(LD)相对于 LED 更具优势,一是因为 LD 输出光为激光,光学扩展量很小,便于光会聚到小面积区域,输出高流明密度的白光,而 LED 芯片出射光的光束扩散角大,光学扩展量大<sup>[7]</sup>,很难实现万流明数量级的高亮度光输出;二是因为高功率密度的光输出下,LED 芯片的转换效率会下降<sup>[10-13]</sup>,而 LD 则可以输出功率密度达  $5 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$  的光<sup>[14]</sup>。随着 LD 技术的发展,LD 光电转换效率有望得到不断提高<sup>[15-16]</sup>。

国内外对蓝光 LD 远程激发 Ce:YAG 的陶瓷和单晶的研究已有相关报道。Cantore 等<sup>[17-18]</sup>对有关 LD 和近紫外 LD 激发荧光粉混合硅胶及 Ce:YAG 单晶进行了研究。Daniels 等<sup>[19-20]</sup>对激光激发陶瓷进行了相关研究,数值模拟了 Ce:YAG 陶瓷在高功率密度激发下的温度分布,发现荧光粉混合硅胶的方式不适合此种激发方式。Lee 等<sup>[21]</sup>使用光学设计软件,对 LD 激发荧光材料的表面粗糙度进行了模拟表征。但是,关于激光激发不同浓度 Ce:YAG 陶瓷和单晶的光电性能及材料可承受的激光光功率密度的研究鲜有报道。本文选取了不同  $\text{Ce}^{3+}$  掺杂浓度(摩尔分数,全文同)的单晶和陶瓷,采用高功率密度激光激发陶瓷和单晶,使用积分球从光通量、光电转换效率、显色指数、色温和光-光转换效率等方面进行了研究。

## 2 实 验

### 2.1 样品制备

实验采用提拉法生长单晶,以高纯度的  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (质量分数为 99.99%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (质量分数为 99.99%)、 $\text{CeO}_2$  (质量分数为 99.99%) 粉末为原料,按  $(\text{Ce}_x\text{Y}_{1-x})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (Ce 所占的摩尔分数  $x=0.5, 1, 1.5\%$ , 分别标记为 Cry1、Cry2、Cry3) 的化学计量比称量配料,然后将配料置于混料机中充分混合并压制成块状。将料块放入坩埚中预烧,预烧温度为 1373 K,随后将预烧的料块置于晶体炉中生长并控制好实验参数(晶体转速为  $10\sim 15 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 生长速率为  $1.2\sim 1.5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ),最后制得不同  $\text{Ce}^{3+}$  掺杂浓度的单晶。实验用的陶瓷采用固相法制得,同样按  $(\text{Ce}_x\text{Y}_{1-x})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (Ce 所占的摩尔分数  $x=0.1, 0.3, 0.5\%$ , 分别标记为 Cer1、Cer2、Cer3) 的化学计量比进行配比。以无水乙醇为球磨介质,正硅酸乙酯为烧结助剂,混合粉料经过球磨、干燥、过筛、干压、冷等静压等处理。1273 K 预烧后采用 2053 K 真空烧结 10 h,最后于 1723 K 空气中退火 10 h,制得不同掺杂浓度的陶瓷。根据实验测试要求,对 Ce:YAG 单晶和陶瓷进行切割加工处理,其中进行吸收谱、荧光激发谱和发射谱测试的样品,其两面均作抛光处理,大小为  $10 \text{ mm}\times 10 \text{ mm}$ ,厚度为 0.35 mm。激光远程激发用的样品两面均不作抛光处理,大小为  $5 \text{ mm}\times 5 \text{ mm}$ ,厚度分别为 1 mm 和 1.5 mm,图 1 所示为不同  $\text{Ce}^{3+}$  掺杂浓度的单晶和陶瓷样品(厚度为 1 mm)。

### 2.2 分析表征

使用 X 射线衍射仪(XRD)对  $\text{Ce}^{3+}$  摩尔分数为 0.5% 的 Ce:YAG 单晶粉末和 Ce:YAG 陶瓷片进行物相分析。采用美国 Perkin Elmer 公司的 Lambda950 紫外-可见吸收光谱仪测试 Ce:YAG 单晶和陶瓷的吸收光谱。使用日本分光株式会社的 FP6500 荧光分光光度计测试二者的荧光激发谱和发射谱。实验用的蓝光 LD 采购于日本日亚公司,理论光功率为 3.5 W,典型中心波长为 455 nm。为了满足测试要求,在激光器前端安装了聚焦透镜,以保证激光聚焦于晶片中心。为了消除透镜和激光自身发热对激光输出功率的影响,实验对

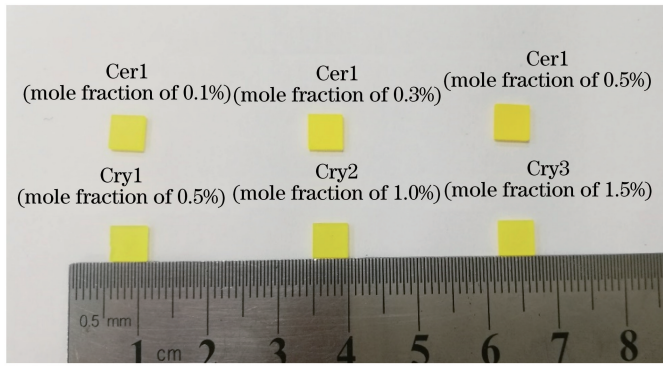


图 1 不同  $Ce^{3+}$  掺杂浓度的陶瓷和单晶样品(厚度为 1 mm)

Fig. 1 Ceramic and single crystal samples of with different doping concentrations of  $Ce^{3+}$  ( thickness is 1 mm)

激光输出功率进行了测定。采用杭州远方光电信息股份有限公司生产的直径  $D=1.5\text{ m}$  的 YF1000 积分球测试系统对激光激发的单晶片和陶瓷片进行测试,由此得出光通量、光电及光-光转换效率、显色指数和色温等参数,实验中  $Ce:YAG$  单晶片和陶瓷片被固定在积分球中央。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 XRD 图谱分析

在低浓度的  $Ce^{3+}$  掺杂下,掺杂并不改变晶相结构<sup>[22]</sup>。实验测试了样品 Cry1 单晶粉末和 Cer3 陶瓷的 XRD 图谱,如图 2(a)、(b)所示。通过 XRD 分析,图 2(a)、(b)中的相关衍射峰强度与 JCPDS 标准卡相吻合,表明 Cry1 和 Cer3 样品的晶相为 YAG 相。因此,低浓度  $Ce^{3+}$  的掺杂并不改变 YAG 的晶相结构。

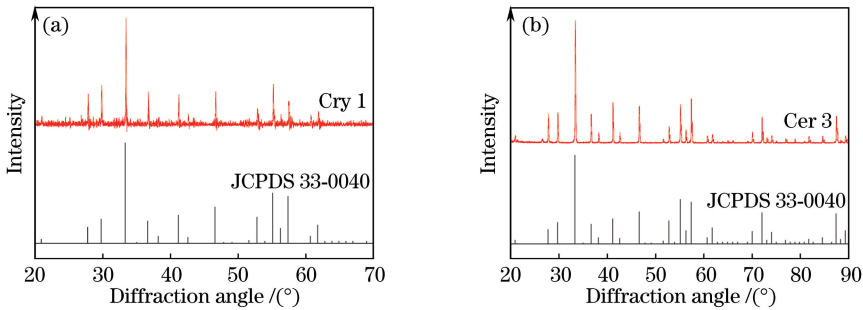


图 2 当  $Ce^{3+}$  摩尔分数为 0.5% 时,  $Ce:YAG$  (a) 单晶粉末和 (b) 陶瓷片的 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of  $Ce:YAG$  (a) single crystal powder and (b) ceramic chip when mole fraction of  $Ce^{3+}$  is 0.5%

#### 3.2 紫外-可见吸收光谱及荧光的激发和发射光谱

图 3 所示为不同  $Ce^{3+}$  掺杂浓度下测定的陶瓷和单晶的紫外-可见吸收光谱。从图 3 中看出,所有测试样品均在中心波长 340 nm 和 460 nm 附近出现强烈的吸收,对应于  $Ce^{3+}$  从  $4f \rightarrow 5d$  能级的跃迁<sup>[23]</sup>。而实验着重关注吸收峰在 460 nm 附近的跃迁,这表明当利用中心波长为 460 nm 或者附近波长的激光激发时,上述荧光材料可以很好地吸收该波段的激光。从图 3 中还可以看出,随着  $Ce^{3+}$  掺杂浓度的不断提高,陶瓷和单晶的吸收率也不断增大,且陶瓷较单晶吸收光的能力更强。这是由于晶体的生长过程缓慢,  $Ce^{3+}$  在 YAG 晶体中的分凝系数比较小,通常在 0.1 左右,而陶瓷样品在制备过程中生长速度较快,容易进入格位,因此对于同样配比浓度的样品,晶体中的  $Ce^{3+}$  浓度会明显小于陶瓷样品的,吸收系数也相应比较低。

为了反映荧光材料吸收光后的能级跃迁状态,实验测试了单晶和陶瓷的荧光激发和发射光谱,如图 4 所示。由于只是考察光谱的形状和峰位,因此对单晶和陶瓷的  $Ce^{3+}$  掺杂浓度未作约束。在波长  $\lambda_{ex}=445\text{ nm}$  光的激发下,陶瓷和单晶均在 530 nm 附近有较宽的发射谱,对应于  $Ce^{3+}$  从  $5d \rightarrow 4f$  能级的跃迁<sup>[24-25]</sup>。选取  $\lambda_{em}=530\text{ nm}$  为检测波长,得到陶瓷和单晶的激发谱,分别是以 341 nm 和 460 nm 为中心波长的激发光

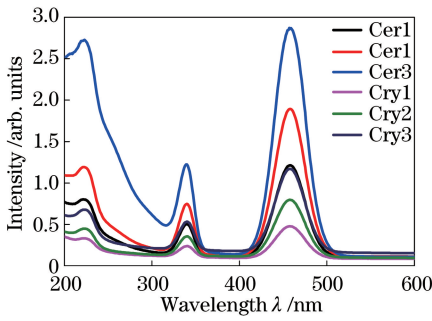


图 3 不同 Ce<sup>3+</sup> 掺杂浓度下的陶瓷和单晶的吸收光谱  
Fig. 3 Absorption spectra of ceramic and single crystal under different Ce<sup>3+</sup> doping concentrations

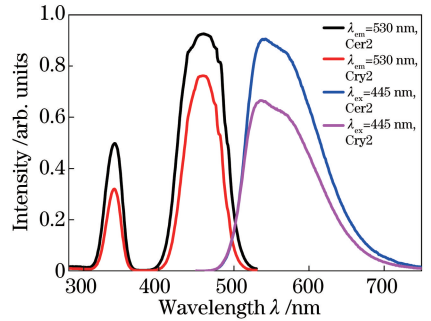


图 4 样品 Cer2 和 Cry2 的荧光激发光谱和发射光谱  
Fig. 4 Fluorescence excitation and emission spectra of Cer2 and Cry2 samples

带,二者分别对应于<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>→5d 和<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>→5d 能级的跃迁<sup>[26]</sup>。另外,Ce:YAG 单晶和陶瓷的5d→4f 跃迁易受晶体场的影响,而从图 4 中可以看出,无论是单晶还是陶瓷,二者的发射谱和吸收谱的形状和峰位均相似,说明 Ce<sup>3+</sup> 在单晶和陶瓷中的晶体场是一样的。图 4 也佐证了 XRD 测试结果。

### 3.3 激光激发下的单晶晶体和陶瓷的光电参数

#### 3.3.1 激光激发样品的光通量和光电效率分析

图 5 所示为激光输出功率与注入电流的关系,可以看出,当注入电流小于阈值电流时,光功率基本为零。当注入电流超过阈值电流且小于 1 A 时,激光输出功率和注入电流近似呈线性变化;而当注入电流继续增大时,光功率不再呈线性变化,这是由于激光源本身发热多,而散热装置未能及时散热,导致激光的光功率下降<sup>[17]</sup>。实验测得的最大光功率为 2.61 W。

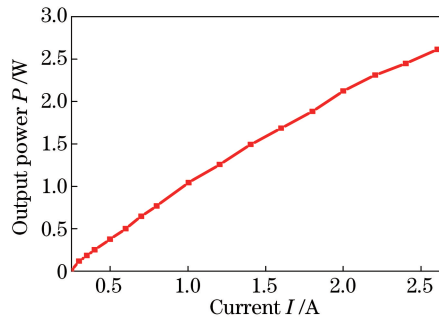


图 5 激光输出功率与注入电流的关系  
Fig. 5 Laser output power versus injected current

图 6(a)、(b)所示分别为 1 mm 厚陶瓷和单晶在激光激发下的光通量和光电效率与电流的关系。从图 6 可以看出,随着激光注入电流的增大,光通量不断增大,且与电流近似呈线性变化。这是因为当注入电流增

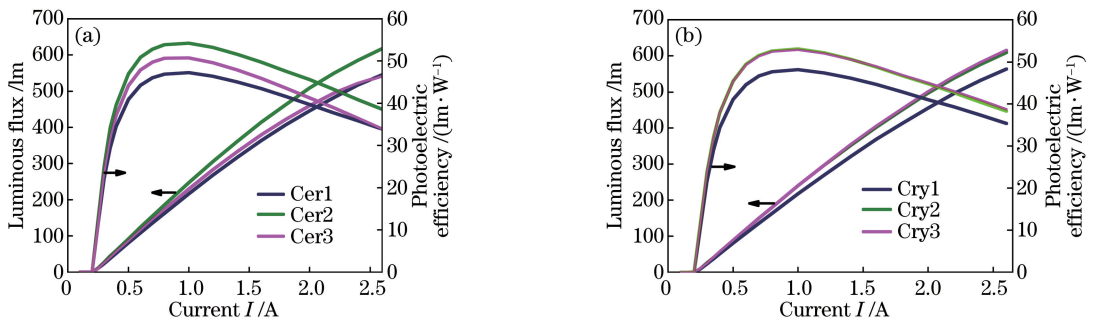


图 6 (a)陶瓷和(b)单晶在激光激发下的光通量和光电效率与电流的关系

Fig. 6 Luminous flux and photoelectric efficiency of (a) ceramic and (b) single crystal under laser excitation versus current

大时,蓝光的输出功率增加,表现为进入 Ce:YAG 陶瓷和单晶的蓝光增多,进而蓝光激发荧光体转换为黄绿光的光量增加,因此整体的光通量增加。但是,光电效率却呈现先增加后降低的趋势,这是因为当注入电流增大时,驱动电压也在增大,且激光源本身产生的热量也增大,光通量的增加值小于电功率的增加值,最终导致光电效率的缓慢下降<sup>[17]</sup>。图 6 中曲线拐点出现在注入电流为 1 A 时,此时 Cer2(Ce 摩尔分数为 0.3%)陶瓷的光电效率最高,为 54.24 lm·W<sup>-1</sup>,其次为 Cry2(Ce 摩尔分数为 1%)单晶,光电效率为 53.11 lm·W<sup>-1</sup>,二者相差仅为 2.1%。同时对比图 6(a)、(b)发现,当注入电流为 2.6 A 时,效果最好的是 Cer2(Ce 摩尔分数为 0.3%)陶瓷,对应的最大光通量 617.23 lm,其次是 Cry3(Ce 摩尔分数为 1.5%)单晶,对应的最大光通量为 615.40 lm,二者相差仅为 0.29%。另外,从图 6(a)中还发现,当陶瓷的 Ce<sup>3+</sup> 掺杂浓度继续增加时,陶瓷的光电转换效率反而下降,初步分析可能是 Ce<sup>3+</sup> 掺杂浓度过高,导致陶瓷内 Ce<sup>3+</sup> 在吸收蓝光从 5d→4f 跃迁时产生了更多的自吸收和非辐射跃迁。

厚度分别为 1 mm 和 1.5 mm 的样品在电流 I=2.6 A 的激光激发下的光通量见表 1,可以看出,当样品厚度增加时,陶瓷 Cer1 的光通量变大,但是 Cer2 和 Cer3 的光通量均变小。对于 Ce:YAG 陶瓷和单晶,提高 Ce<sup>3+</sup> 掺杂浓度和增加材料厚度实际上都是增加 Ce<sup>3+</sup> 的数量。当 Ce<sup>3+</sup> 数量增加时,材料吸收蓝光的能力提高,进而黄绿光增多,如 Cer1;但是,当 Ce<sup>3+</sup> 浓度足够大时,再增加厚度反而增加了光在材料中的吸收损耗和光程,对出光光通量产生不利影响,如 Cer2;当 Ce<sup>3+</sup> 掺杂浓度过高时,可能会出现浓度猝灭,如 Cer3。在实际应用中,为了提高单晶和陶瓷的散热能力,材料的一面可能会与金属板贴合,如果厚度过厚,反而不利于散热。另外,为了得到白光,需要留存一定比例的蓝光,因此实验选用 1 mm 厚的样品作进一步分析。

表 1 样品在激光激发下的光通量

Table 1 Luminous flux of samples under laser excitation

Thickness /mm	Luminous flux /lm				
	Cer1	Cer2	Cer3	Cry1	Cry3
1	545.6	617.2	542.4	563.8	615.4
1.5	620.1	575.3	505.7	657.1	681.82

### 3.3.2 激光激发的单晶和陶瓷的光-光转换效率

在不考虑荧光材料热猝灭的前提下,以单晶为例,理论上单位时间内激光激发的单晶的饱和蓝光光功率为

$$P = \frac{n_2 \times n_1}{n_0}, \quad (1)$$

式中  $n_1$  为每秒内每个 Ce<sup>3+</sup> 被蓝光激发的光子数; $n_2$  为单位体积内单晶的 Ce<sup>3+</sup> 数量; $n_0$  为单位时间内每瓦激光所含的光子数,其表达式为

$$n_0 = \frac{1}{E} = \frac{\lambda}{hc}, \quad (2)$$

式中  $E$  为单光子能量, $h$  为普朗克常数, $\lambda$  为激光波长, $c$  为光速。由于 Ce<sup>3+</sup> 衰减(半衰期)时间  $T=65$  ns,10 个周期(650 ns)后 Ce<sup>3+</sup> 基本衰减完毕,因此平均每个 Ce<sup>3+</sup> 每秒可以被蓝光激发的光子数为

$$n_1 = \frac{1}{6.5 \times 10^{-9}}. \quad (3)$$

对于 Ce<sup>3+</sup> 掺杂摩尔分数为 1% 的单晶,由分凝系数可以估计,掺杂进的 Ce<sup>3+</sup> 摩尔分数约 0.1%<sup>[27]</sup>,由此计算出体积为  $V_0=1$  mm<sup>3</sup> 的单晶所包含的 Ce<sup>3+</sup> 数  $n_2$ 。采用 445 nm 的激光激发,每平方米内单晶的饱和蓝光功率理论值为  $1.56 \times 10^3$  W,故理论上单晶和陶瓷可以承受高功率密度的激光激发。

激光激发 1 mm 厚 Cer2(Ce<sup>3+</sup> 摩尔分数为 0.3%)陶瓷和 Cry3(Ce<sup>3+</sup> 摩尔分数为 1.5%)单晶的光-光转换效率  $\eta_1$  和  $\eta_2$  见表 2,可以看出,陶瓷和单晶的光-光转换效率均约为 240 lm·W<sup>-1</sup>,且基本不随电流的增加而变化。这说明对 1 mm 厚的测试样品,无论是单晶还是陶瓷,在 2.61 W 的光功率下都没有达到饱和,二者仍可承受更高功率密度的激光激发。

同时,由于激光打到晶片的光近似呈高斯分布,如图 7 中插图所示,光斑近似为直径为 0.8 mm 的圆,中心点的功率密度近似为平均功率密度的 2 倍,即 10.8 W·mm<sup>-2</sup>,远小于  $1.56 \times 10^3$  W,说明在光功率密度为 10.8 W·mm<sup>-2</sup> 的激光激发下,1 mm 厚的荧光材料未达到饱和,且未出现温度猝灭。为了对比分析,实验采

表 2 激光激发下的陶瓷( $Ce^{3+}$  摩尔分数为 0.3%)和单晶( $Ce^{3+}$  摩尔分数为 1.5%)的光-光转换效率

Table 2 Optical-to-optical conversion efficiencies of ceramic with  $Ce^{3+}$  mole fraction of 0.3% and single crystal with  $Ce^{3+}$  mole fraction of 1.5% under laser excitation

$I / A$	0.6	0.7	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6
$\eta_1 / (lm \cdot W^{-1})$	247.7	239.3	241.7	237.0	243.1	241.8	245.6	245.4	239.8	237.9	239.2	236.2
$\eta_2 / (lm \cdot W^{-1})$	239.1	231.9	234.4	230.0	236.3	235.8	240.0	240.6	235.7	234.9	237.7	235.5

用相同功率密度的激光激发固定的荧光粉混合硅胶,其表面出现了发黑的现象。这是由于单位面积的发热量过大且硅胶散热性能差,热聚集温度过高使得硅胶黑化。因此,在实际应用中,都是采用荧光粉色轮这一装置来保证散热<sup>[28]</sup>。实验中单晶和陶瓷完全不受影响,与荧光粉混合硅胶相比,采用单晶和陶瓷可以省去色轮,散热能力更强,且可以进一步提高激光功率密度。实际中可使用 LD 阵列来提高激光的功率<sup>[29]</sup>,通过光学设计<sup>[30]</sup>可以使整个光面的光功率密度达到  $10.8 W \cdot mm^{-2}$ ,根据光-光转换效率计算出的光通量高达 2592 lm,完全可以实现小面积范围内输出光通量高达上万流明的白光,满足实际需求。

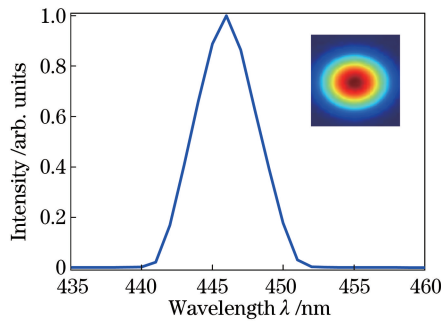


图 7 激光光谱图和光强分布图

Fig. 7 Laser spectrum and intensity distribution

### 3.3.3 显色指数和色温

图 8 所示为 1 mm 厚陶瓷和单晶在激光激发下的显色指数与电流的关系图,可以看出,显色指数最高的是  $Ce^{3+}$  掺杂浓度为 0.5% 的单晶,为 62。另外,单晶的显色指数普遍高于陶瓷的,但是对比白光 LED,其显色指数较低,原因有二:一是  $Ce:AYG$  的陶瓷和单晶将蓝光转换为黄绿光时,本来就缺少红光<sup>[31]</sup>,但可以通过引入其他掺杂元素来提高显色指数<sup>[32-33]</sup>;二是由于激发源为激光,蓝光呈现窄峰的特点,不利于与转换的黄绿光混色,从而导致显色指数较低。图 9 所示为 1 mm 厚陶瓷和单晶在激光激发下的色温与电流的关系图,可以看出,陶瓷的色温普遍低于单晶的,说明陶瓷中蓝光被吸收的较多;转换的黄绿光和剩余蓝光混合时,陶瓷因剩余的蓝光较少,呈现的色温偏低,而单晶中剩余的蓝光较多,混光后偏蓝,色温偏高。

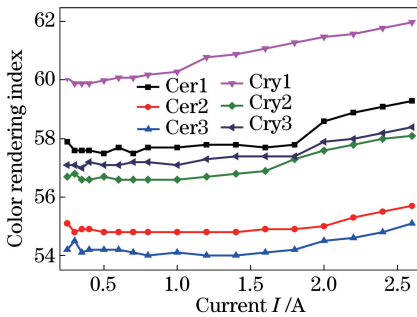


图 8 1 mm 厚的陶瓷和单晶在激光激发下的显色指数与电流的关系

Fig. 8 Color rendering index versus current for ceramic and single crystal with 1 mm thickness under laser excitation

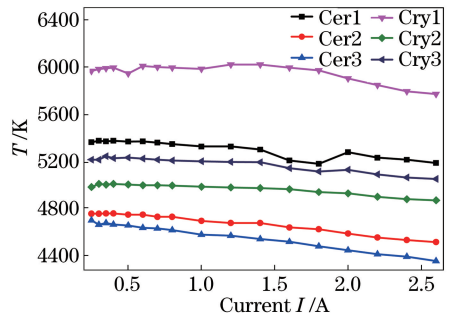


图 9 1 mm 厚的陶瓷和单晶在激光激发下的色温与电流的关系

Fig. 9 Color temperature versus current for ceramic and single crystal with 1 mm thickness under laser excitation

## 4 结 论

实验制备了  $\text{Ce}^{3+}$  掺杂摩尔分数分别为 0.5%、1.0% 和 1.5% 的  $\text{Ce}:\text{YAG}$  单晶与  $\text{Ce}^{3+}$  掺杂摩尔分数分别为 0.1%、0.3% 和 0.5% 的  $\text{Ce}:\text{YAG}$  陶瓷。通过分析吸收光谱发现,随着  $\text{Ce}^{3+}$  掺杂浓度的升高, $\text{Ce}:\text{YAG}$  单晶和陶瓷的吸收强度均逐渐增强,且陶瓷的吸收强度高于单晶的。采用电流为 2.6 A 的激光激发 1 mm 厚的  $\text{Ce}:\text{YAG}$  单晶和陶瓷样品, $\text{Ce}^{3+}$  掺杂摩尔分数为 0.3% 的陶瓷的光通量最高,为 617.2 lm; $\text{Ce}^{3+}$  掺杂摩尔分数为 0.5% 的单晶的显色指数最高,为 62,色温为 5841 K。对于 1 mm 厚的  $\text{Ce}^{3+}$  掺杂的单晶和陶瓷,即使在中心功率密度为  $10.8 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$  的激光激发下,二者仍未达到饱和,说明陶瓷和单晶均可作为高功率密度激光激发的高亮度荧光材料。接下来的工作将对高功率密度激光激发下的单晶和陶瓷材料的表面温度分布作进一步研究。研究结果为陶瓷和单晶等荧光材料在激光车大灯、激光投影仪、高铁照明系统及三维立体投影显示领域的广泛应用提供了一定的参考。

## 参 考 文 献

- [1] Schlotter P, Schmidt R, Schneider J. Luminescence conversion of blue light emitting diodes[J]. Applied Physics A, 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] Pan Y X, Wu M M, Su Q. Tailored photoluminescence of  $\text{YAG}:\text{Ce}$  phosphor through various methods[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2004, 65(5): 845-850.
- [4] Schubert E F, Kim J K. Solid-state light sources getting smart[J]. Science, 2005, 308(5726): 1274-1278.
- [5] Ye S, Xiao F, Pan Y X, *et al.* Phosphors in phosphor-converted white light-emitting diodes: Recent advances in materials, techniques and properties[J]. Materials Science & Engineering, 2010, 71(1): 1-34.
- [6] Nikia I, Narukawa Y, Morita D, *et al.* White LEDs for solid state lighting[C]. SPIE, 2004, 5187: 1-9.
- [7] Ma Jianshe, He Liyun, Su Ping, *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.
- [8] Chen Yuhang, Han Xue, Li Shourong, *et al.* Application of LED light source to micro-projection system[J]. OME Information, 2009, 26(9): 18-22.  
陈宇航, 韩雪, 李守荣, 等. LED 光源在微投影系统上的应用[J]. 光机电信息, 2009, 26(9): 18-22.
- [9] George A F, Alwalsawy S, Wright J T, *et al.* Laser-driven phosphor-converted white light source for solid-state illumination[J]. Applied Optics, 2016, 55(8): 1899-1905.
- [10] Shen Y C, Mueller G O, Watanabe S, *et al.* Auger recombination in InGaN measured by photoluminescence[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(14): 141101.
- [11] Crawford M H. LEDs for solid-state lighting: Performance challenges and recent advances[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(4): 1028-1040.
- [12] Ryu H Y, Shin D S, Shim J I. Analysis of efficiency droop in nitride light-emitting diodes by the reduced effective volume of InGaN active material[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(13): 131109.
- [13] Kioupakis E, Rinke P, Delaney K T, *et al.* Indirect auger recombination as a cause of efficiency droop in nitride light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(16): 161107.
- [14] Wierer J J, Tsao J Y, Sizov D S. The potential of III-nitride laser diodes for solid-state lighting[J]. Physica Status Solidi C, 2014, 11(3/4): 674-688.
- [15] Kozaki T, Nagahama S I, Mukai T. Recent progress of high-power GaN-based laser diodes[C]. SPIE, 2007, 6485: 648503.
- [16] Nakamura S, Senoh M, Nagahama S, *et al.* InGaN-based multi-quantum-well-structure laser diodes[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1996, 35(1): L74-L76.
- [17] Cantore M, Pfaff N, Farrell R M, *et al.* High luminous flux from single crystal phosphor-converted laser-based white lighting system[J]. Optics Express, 2016, 24(2): A215-A221.
- [18] Denault K A, Cantore M, Nakamura S J, *et al.* Efficient and stable laser-driven white lighting[J]. AIP Advances, 2013, 3(7): 072107.
- [19] Daniels M, Mehl O, Hartwig U. Laser-activated remote phosphor light engine for projection applications[C]. SPIE,

- 2015, 9578: 95780N.
- [20] Lenef A, Kelso J, Tchoul M, *et al.* Laser-activated remote phosphor conversion with ceramic phosphors[C]. SPIE, 2014, 9190: 91900C.
- [21] Lee D H, Joo J Y, Lee S K. Modeling of reflection-type laser-driven white lighting considering phosphor particles and surface topography[J]. Optics Express, 2015, 23(15): 18872-18887.
- [22] Hua Wei. Preparation and characteristics of newly developed rare earth Re, Ce-doped:YAG (Re=Pr, Sm, Eu, Gd) single crystal phosphors for white-LED[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2011.  
华伟. 白光 LED 用 Re,Ce:YAG (Re=Pr, Sm, Eu, Gd) 单晶荧光材料的制备及其光学性能的研究[D]. 温州: 温州大学, 2011.
- [23] Du Y, Shao C Y, Dong Y J, *et al.* Electroluminescent properties of WLEDs with the structures of Ce:YAG single crystal/blue chip and SrSiN:Eu /Ce:YAG single crystal/blue chip[J]. Journal of Display Technology, 2016, 12(4): 323-327.
- [24] Blasse G, Bril A. Investigation of some Ce<sup>3+</sup>-activated phosphors[J]. Journal of Chemical Physics, 1967, 47(12): 5139-5145.
- [25] Jacobs R R, Krupke W F, Weber M J. Measurement of excited-state absorption loss for Ce<sup>3+</sup> in Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> and implications for tunable 5d→4f rare-earth lasers[J]. Applied Physics Letters, 1978, 33(5): 410-412.
- [26] Wuister S F, Donega C M, Meijerink A. Efficient energy transfer between nanocrystalline YAG:Ce and TRITC[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2004, 6(8): 1633-1636.
- [27] Zhao Guangjun, Zeng Xionghui, Xu Jun, *et al.* Study on 76 mm Ce:YAG scintillation single crystal grown by temperature gradient technique[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2003, 32(4): 320-323.  
赵广军, 曾雄辉, 徐军, 等. 温梯法生长 76 mm Ce:YAG 闪烁晶体的研究[J]. 人工晶体学报, 2003, 32(4): 320-323.
- [28] Gruetter Jeff. Power saving high brightness LEDs demand high performance LED drivers[J]. Electronic Engineering & Product World, 2010, 4: 22-24.  
Gruetter Jeff. 省电、高亮度 LED 需要高性能 LED 驱动器[J]. 电子产品世界, 2010, 4: 22-24.
- [29] Yang Fan, Wang Haixia, Leng Fuhai. Laser diode array and its application technology development trend analysis[J]. Research Articles, 2009, 4(3): 1-16.  
杨帆, 王海霞, 冷伏海. 激光二极管阵列及其应用技术发展态势分析[J]. 科学观察, 2009, 4(3): 1-16.
- [30] Kong Yuanyuan. A survey of beam shaping of the high power laser diode bar[J]. Electronics Technology, 2006(1): 56-59.  
孔媛媛. 大功率激光二极管阵列光束整形技术综述[J]. 电子科技, 2006(1): 56-59.
- [31] Hussain T, Zhong L B, Danesh M, *et al.* Enabling low amounts of YAG:Ce<sup>3+</sup> to convert blue into white light with plasmonic Au nanoparticles[J]. Nanoscale, 2015, 7(23): 10350-10356.
- [32] Shi H L, Zhu C, Huang J Q, *et al.* Luminescence properties of YAG:Ce, Gd phosphors synthesized under vacuum condition and their white LED performances[J]. Optical Materials Express, 2014, 4(4): 649-655.
- [33] Hu C, Shi Y, Feng X Q, *et al.* YAG:Ce/(Gd, Y)AG:Ce dual-layered composite structure ceramic phosphors designed for bright white light-emitting diodes with various CCT[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18243-18255.