

白光 LED 用荧光陶瓷研究进展

王 刚, 李金凯, 段广彬, 刘宗明

(济南大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250022)

摘要: 综述钇铝石榴石体系荧光陶瓷、多铝酸盐体系荧光陶瓷、氮化物体系荧光陶瓷3类荧光陶瓷材料的发光机理、制备工艺及其应用进展。荧光陶瓷材料具有热力学性能好、机械性能优异、良好的化学稳定性和微观结构可调等优点。现有的LED照明设备多使用树脂封装荧光粉,其热稳定性差,无法在大功率、长时间的应用场景中使用,故此,采用热力学性能好、机械性能优异、具有良好的化学稳定性和微观结构可调等优点的荧光陶瓷材料,取代传统树脂封装荧光粉制备LED照明设备。荧光陶瓷材料当前依然存在制备条件苛刻、工艺复杂和无法实现全色谱发光等问题,不能适用于规模化生产应用,这是接下来业界的主要研究方向。

关键词: 荧光陶瓷; 发光原理; 钇铝石榴石; 铝酸盐; 氮化物

中图分类号:TQ133.3

文献标志码:A

Research progress of fluorescent ceramics for white LEDs

WANG Gang, LI Jinkai, DUAN Guangbin, LIU Zongming

(School of Materials Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: In this paper, the luminescence mechanism, preparation process and application progress of fluorescent ceramics with yttrium aluminum garnet system, aluminate system and nitride system are reviewed. Fluorescent ceramic materials have the advantages of good thermodynamic properties, excellent mechanical properties, good chemical stability and adjustable microstructure. The existing LED lighting equipment mostly uses resin-encapsulated phosphors, which have poor thermal stability and cannot be used in high-power and long-term application scenarios. Therefore, fluorescent ceramic materials with good thermodynamic properties, excellent mechanical properties, good chemical stability and adjustable microstructure are used to replace the traditional resin encapsulated phosphor for the preparation of LED lighting equipment. However, fluorescent ceramic materials still have some problems, such as harsh preparation conditions, complex process and inability to achieve full chromatographic luminescence, which are not suitable for large-scale production and application. This is also the main research direction of the industry in the future.

Keywords: fluorescent ceramics; luminescence principle; yttrium aluminum garnet; aluminate; nitride

自半导体发光二极管(light emitting diodes, LED)问世以来,因其具有低耗能、环境友好、使用寿命长、响应速度快等优势^[1-3],逐步取代了白炽灯、荧光灯、高压气体放电灯等传统照明设备。世界第一只半导体白色发光二极管是于1997年在日亚化学组装成功^[4],LED技术不断获得进步和发展,其发光效率不断改善,使用寿命也渐渐增长,具有广阔的发展前景。

目前,主要有3种方式获得白光LED。第1种是通过蓝光激发黄色荧光粉(YAG:Ce)发出白光^[5];第2种是通过红、绿、蓝3种基色的LED芯片混合获得白光(RGB LEDs)^[6];第3种是通过紫外LED芯片激发三基色调和的荧光粉,发出白光(UV LED + RGB phosphor)^[7]。无论采用哪种方式,目前市场上的产品,大多采用在LED芯片上涂覆荧光粉和有机树脂的方法封装LED灯,这种工艺获得的LED灯

收稿日期:2020-11-20,修回日期:2021-03-09。

基金项目:山东省自然科学基金项目,编号:ZR2020ME045。

第一作者简介:王刚(1996—),男,硕士研究生,研究方向为无机非金属材料。E-mail:mse_wg@163.com。

通信作者简介:刘宗明(1965—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为多相流理论与应用(纳米流体、粉体工程)、热能工程。

E-mail:liuzm@ujn.edu.cn。

耐高温性能差。由于元件在工作过程中产热,会导致有机树脂发生黄化甚至碳化,在长时间或大功率的工作环境下,影响元件的发光性能和使用寿命,因此,设计新型荧光材料组成成为了当前的科研热点。目前已研发出的新型 LED 照明用荧光材料主要有荧光玻璃、荧光薄膜、荧光单晶和荧光陶瓷。其中,荧光陶瓷具有高热稳定性和良好的机械性能,在高温和大功率场景下依然能保持较高的发光强度,且不存在老化问题,故此,在照明领域具有很高的发展潜力^[8-12]。

本文中结合国内外研究现状,分析总结荧光陶瓷的发光原理和荧光陶瓷的体系分类,对荧光陶瓷研究的现存问题进行探讨,并对该领域未来发展作出展望。

1 荧光陶瓷的发光原理

1.1 荧光粉的发光原理

物质产生的发光现象大致有以下 2 种原因:第 1 种是物质因为受热而产生热辐射进而引起发光;第 2 类是物质受到激发后从基态跃迁至激发态而后在回到基态的过程,过程中以发光的形式失去能量。目前,在 LED 照明中普遍应用的稀土荧光粉的发光原理大多属于后者^[13-15]。

荧光陶瓷发光依靠的是基体中掺杂的由稀土元素制备的荧光粉,荧光粉的基质自外部环境中获得能量,获得的能量传递给稀土元素,稀土元素获得能量从基态激发,被激发的稀土元素通过晶格振动或放热的方式失去一部分能量,此时稀土元素达到了一个激发态的、更稳定的发光能级,之后稀土离子回到基态,同时在此过程中产生发光现象^[16-19]。

1.2 光致发光材料的发光原理

发光材料按照激发条件不同,可分为光致发光、电致发光、阴极射线发光、X 射线及高能粒子发光、生物发光和化学发光等几类^[20]。目前,大多数照明用 LED 都是利用光致发光原理制备的,光致发光是物质通过吸收一定能量的光能,经过光吸收、能量传递、和光发射 3 个阶段后产生的发光现象,这当中的初始阶段和最终阶段都是因能级跃迁造成的,这两者都要经过激发态,而中间阶段是因为激发态的运动所导致的。

按照能量转换类型的不同,可以将光致发光材料的发光类型分为斯托克斯(Stokes)发光和反斯托克斯(anti-Stokes)发光,即下转换发光和上转换发光。

1.2.1 上转换发光

上转换发光指的是采用低能量的激发后发射出高能量的光,也就是基于双光子或多光子将长波辐射转换为短波辐射,进而引起发光的过程。稀土离子的能级跃迁具有较高的能级寿命,恰好可以满足上转换发光的条件,因此导致大部分上转换光致发光材料中都含有稀土元素^[21]。同时,上转换发光还可以有效地降低光致电离作用引起的基质材料的衰退,进而延长元件使用寿命,并且上转换发光的输出波长具有一定的可调谐性;此外,上转换发光不需要严格的相位匹配、对激发波长的稳定性要求不高^[22]。目前,上转换发光一般可以归纳为激发态吸收、能量转移和“光子雪崩”过程 3 类^[23-25]。

1.2.2 下转换发光

下转换发光是最常见的一种发光形式,与吸收低能量光子发射高能量光的上转换发光相反,下转换发光指的是发光材料吸收能量较高的光子后,发射出能量较低的光子的过程。当发光中心受到激发达到发光能级时,在返回到基态的过程中会损失一些能量,因此,下转换发光发射的光子的能量低于它吸收的光子的能量。特殊地,当发光材料吸收一个高能量的光子后发射出多于一个的低能量光子的过程,被称为量子裁剪。由于量子裁剪的存在,因此理论上,下转换发光的发光效率会大于 100%^[26-28]。

2 常见荧光陶瓷体系

荧光陶瓷指的是荧光粉经高温烧结后获得致密的陶瓷结构,与荧光粉、荧光玻璃等其他荧光材料相比,荧光陶瓷具有优异的稳定性(包括热稳定性、水稳定性及化学稳定性),此外,荧光陶瓷的还具有出色的机械性能和微观结构可调的优势^[29]。

Xu 等^[30]制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-YAG:Ce}$ 复相荧光陶瓷,在 200 °C 工作时的发光强度仅比室温下的发光强度

降低3%,且拥有高达121 lm/W的流明效率(发光体经激发发射的光通量与激发它所输入的能量总功率的比值)。Ji等^[31]通过向LuAG:Ce中掺入5%~5.5%(质量分数,下同)的氧化镁,制备了高性能的荧光陶瓷板,将其置于85℃、相对湿度为85%的环境中1000 h,依然具有室温下96.6%的发光强度。Tang等^[32]采用真空固相反应制备了MgAl₂O₄-Ce:YAG荧光陶瓷,由于MgAl₂O₄的加入,实现了晶粒尺寸的调控和微观结构的改变。通过调控微观结构,使得荧光陶瓷的流明效率从66 lm/W提升至99 lm/W。目前,普遍采用将荧光陶瓷按照其组分中发光材料的体系进行分类的方法,荧光陶瓷主要可分为钇铝石榴石体系、多铝酸盐体系和氮化物体系3类。

2.1 钇铝石榴石体系

由于钇铝石榴石体系荧光材料具有特殊的光学性能,且易于烧结致密的特性,钇铝石榴石荧光陶瓷材料受到了广大研究人员的青睐,第一支可应用的掺铈钇铝石榴石体系荧光陶瓷封装成的白光LED于2008年组装成功^[33]。烧结致密的钇铝石榴石陶瓷具有优良的机械性能和透过性,其化学稳定性好、热稳定性高,且掺杂稀土元素后制备的荧光陶瓷,与传统荧光粉相比具有更高的吸收系数和折射率,因此,非常适用于制作LED发光中心^[33-36]。石榴石晶体结构如图1所示^[37]。

Wei等^[38]通过控制Ce³⁺离子浓度和荧光陶瓷厚度,制备了结构非常致密的YAG:Ce荧光陶瓷,使用450 nm波长的蓝光激发下,可以获得几乎理想的白色光,在相关色温为4600 K的情况下,获得了超过93 lm/W的流明效率,优于同时期商业荧光粉的流明效率。罗文飞等^[39]通过优化荧光陶瓷封装参数,利用ASAP光学分析软件,研究了陶瓷厚度、荧光粉掺杂浓度、封装位置等因素,对白光LED的光通量(指肉眼可感受到的辐射功率,数值上等于单位时间内指定波段的辐射能量乘以其相对视见率)、色温(指绝对黑体从绝对零度逐渐升温呈现出不同的颜色,某一温度下黑体发出的光的光谱成分称之为该温度下的色温)和色坐标的影响。研究发现,当掺杂浓度一定时,LED发光的光通量随着荧光陶瓷厚度的增加而增加,但是,当厚度超过最佳值时其光通量反而减小。随着荧光陶瓷封装距离的增加,其发射的蓝光和黄光均增加,且黄光增加的速度大于蓝光增加的速度,因此发光偏暖。

掺铈的钇铝石榴石荧光陶瓷可以作为优异的白光光源,但是,使用这种方式装配的LED的发光光谱中红光的成分较少,研究人员会向荧光陶瓷中共掺杂红光发射的离子,以此来提高LED的显色指数,邵秀晨等^[40]通过真空固相烧结法,通过不同浓度Gd³⁺离子掺杂Ce:YAG,使LED发射光谱峰值发生红移,显著提高了样品的显色指数,但是,由于Gd³⁺的影响,Ce³⁺吸收蓝光的能力降低,将蓝光转换为黄光的能力也随之降低,因此,LED的流明效率从81.45 lm/W下降至63.70 lm/W。

除了添加发红光的稀土离子调节显色指数,研究人员还通过添加助溶剂等手段改变陶瓷的微观结构,以此来改善荧光陶瓷的光学性能。Yao等^[41]通过纳米级的原料,同时加入纳米尺寸的MgO和SiO₂,采用真空烧结法制备YAG:Ce透明荧光陶瓷,制备的样品透光率可达80%。在空气中退火后,控制了缺陷,消除了氧空位,使荧光陶瓷的流明效率从106 lm/W提高到223 lm/W,几乎达到了目前有报道最好的白光激光照明效果。虽然退火提高了荧光陶瓷的光通量、流明效率和光转换效率,但是,同时也降低了显色指数和相关色温。

LuAG:Ce作为钇铝石榴石体系陶瓷,同样具有优异的光学性能,同时还拥有更高的热稳定性,是一种应用前景广阔的绿色荧光材料。Ma等^[42]通过带铸法和直接成形法结合真空烧结技术,制备了流明效率高达223.4 lm/W的白光LED,证明LuAG:Ce是一种很有发展前景的发光二极管应用材料。

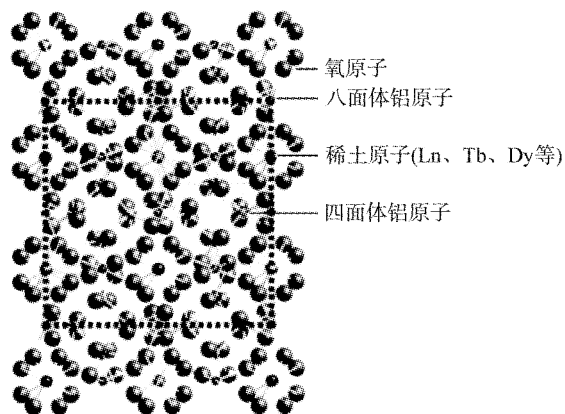


图1 石榴石晶体结构示意图

Fig. 1 The crystal structure of garnet

2.2 多铝酸盐体系

$\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}$ 是一种具有高量子效率和优异的色纯度的蓝色荧光材料,受到研究人员的广泛关注^[43-46]。Cozzan 等^[47]通过微波辅助加热 25 min 制备了 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}$ 荧光粉,又利用放电等离子烧结 (SPS) 30 min 制备了 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}$ 荧光陶瓷,其致密度达到了 SPS 技术的理论最大值 91.5%。Verma 等^[48]利用尿素法合成了 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}, \text{Eu}^{2+}$, 其特征发射峰为 443 nm 波长, 荧光材料显示出强烈的蓝色发光性能, 经过测量得知, 其具有高达 89% 的量子效率。Zhu 等^[49]利用 Si—N 对取代 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}$ 中的 Al—O 对, 使得 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}$ 中的晶格收缩, 改善了 Eu^{2+} 与周围配位环境的相互作用, 其发射波长变长。通过利用 Si—N 对替代 Al—O 对, 改善其内部结构, 最终目的就是为了改善 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}$ 的热稳定性, Zhu 等的样品在空气中 600 °C 热处理 1 h 后, 其发光强度仍为常温下的 98%, 表现出极高的热稳定性。鉴于 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}$ 陶瓷拥有较高的量子效率和极高的热稳定性, 在未来通过改善生产工艺及降低原材料成本, 多铝酸盐体系荧光陶瓷将成为一种组装白光 LED 的优异的蓝光组分而获得应用。

2.3 氮化物体系

氮(氧)化物体系荧光材料是研究人员关注的重点方向, 可以被蓝光或紫外光有效激发, 被认为是一种非常具有发展潜力的荧光材料^[50-51]。Liu 等^[52]采用无压烧结工艺, 制备了高度致密度的 Ce^{3+} 掺杂 MgAlON 透明陶瓷, 制备出的陶瓷样品无色透明, 可见光透过率为 72%~80%, 可以在 330 nm 波长的紫外光的激发下发射 422 nm 波长为中心的蓝光。样品在 200 °C 时表现出热猝灭现象, 在室温下具有 77% 的发光强度。氮化物荧光粉的热扩散系数较低, 不易于烧结致密, 如 Pricha 等^[53]以 $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}$ 为原料, 采用无压烧结法直接烧结获得样品, 烧结后的样品致密度只有 80%, 无法形成致密的荧光陶瓷。若是将高导热性氮化铝 (AlN) 陶瓷作为基底, 再掺入稀土元素烧结致密后, 便可获得致密的荧光陶瓷, Wieg 等^[54]以 AlN 作为 Ce^{3+} 的透明陶瓷基体, 利用电流辅助电压激活技术, 制备了掺铈荧光陶瓷, 在 365 nm 波长的紫外光激发下可以发射白光, 其发光光谱几乎覆盖了整个可见光谱 (400~700 nm), 是一种具有广阔前景的白光 LED 光源。但与其他荧光陶瓷材料的劣势一样, 氮化物荧光陶瓷同样具有制备条件苛刻 (需要高温、高压), 成本相对较高的缺点, 阻碍了氮化物体系荧光陶瓷的产业化应用。

3 现存不足及展望

荧光陶瓷作为一种先进的固体照明材料, 其组成的 LED 具有的良好热稳定性和机械稳定性, 在长时间、大载荷的工作环境中的表现远胜于现有的白光 LED, 在如汽车远光照明等特定应用场合拥有广阔的发展前景, 在未来的 LED 照明乃至更大功率的激光照明 (LD) 都有极高的应用价值, 但是, 目前制约荧光陶瓷规模化应用的主要原因有以下 2 点:

1) 荧光陶瓷的显色指数较低, 无法实现全光谱发光。一种理想的白色发光材料其发射光谱应包含 380~760 nm 内所有可见光区域的波长。而当前的荧光陶瓷材料多采用蓝光激发稀土离子 (如 Ce^{3+} 离子) 发黄光, 二者混合发出白光, 但是, 采用这种方法获得的白光, 缺少红光部分, 其显色指数较低。虽然存在三原色的荧光陶瓷, 但目前尚无能够完美结致密的荧光陶瓷材料。

2) 荧光陶瓷的制备条件苛刻, 无法应用于大规模工业生产。当前制备荧光陶瓷的工艺尚不完善, 大多需要高温高压条件或特殊工艺, 如等离子烧结技术和电流辅助电压激活技术, 无法用于规模化生产, 且生产前期投入过大。

综上所述, 荧光陶瓷作为一种非常具有发展潜力的固体照明材料, 若想要得到大规模应用, 亟需解决无法实现全波段发光和生产工艺困难复杂等问题, 可以通过规模化生产稳定高效、物美价廉的荧光陶瓷照明灯具, 这样必然会引起新一轮照明工具的革命。

参考文献 (References):

- [1] TAGUCHI T. Present status of white LED lighting technologies in Japan[J]. Journal of Light & Visual Environment, 2003, 27(3): 131-139.

- [2]刘荣辉,何华强,黄小卫,等. 白光LED荧光粉研究及应用新进展[J]. 半导体技术, 2012, 37(3): 221–227.
- [3]SHIMIZU Y, SAKANO K, NOGUCHI Y, et al. Light emitting device having a nitride compound semiconductor and a phosphor containing a garnet fluorescent material: US5998925[P]. 1997–07–29.
- [4]SCHUBERT E F, KIM J K. Solid-state light sources getting smart[J]. Science, 2005, 308(5726): 1274–1278.
- [5]LI S X, TANG D M, TIAN Z F, et al. New insights into the microstructure of translucent $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ phosphor ceramics for solid-state laser lighting[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2016, 5(5): 1042–1051.
- [6]郑莉莉,郭自泉,严威,等. 三基色白光LED的司辰节律因子研究[J]. 发光学报, 2016, 37(11): 1384–1389.
- [7]KNEISSL M, SEONG T, HAN J, et al. The emergence and prospects of deep-ultraviolet light-emitting diode technologies[J]. Nature Photonics, 2019, 13(4): 223–244.
- [8]谭淑媛. 几种稀土发光材料的合成及发光性质的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [9]TANG Y R, ZHOU S M, YI X Z, et al. Microstructure optimization of the composite phase ceramic phosphor for white LEDs with excellent luminous efficacy[J]. Optics Letters, 2015, 40(23): 5479–5481.
- [10]鲁景亮. 稀土发光材料研发及应用进展[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(2): 32–37.
- [11]刘荣辉,黄小卫,何华强,等. 稀土发光材料技术和市场现状及展望[J]. 中国稀土学报, 2012, 30(3): 265–272.
- [12]沈雷军,乔鑫,王忠志. 稀土发光材料技术现状及展望[J]. 稀土信息, 2019(4): 10–14.
- [13]白木,子荫. 稀土发光材料的原理与应用[J]. 灯与照明, 2002, 12(18): 48–51.
- [14]QIAO J W, ZHAO J, LIU Q L, et al. Recent advances in solid-state LED phosphors with thermally stable luminescence[J]. Rare Earth, 2019, 37(6): 565–572.
- [15]BIZZARRI C, SPULING E, KNOLL D M, et al. Sustainable metal complexes for organic light-emitting diodes (OLEDs)[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2018, 373(SI): 49–82.
- [16]MOON D G. Encyclopedia of modern optics[M]. Cambridge: Academic Press, 2018: 232–239.
- [17]马俊红. 稀土掺杂四硼酸钇铝荧光粉及透明陶瓷的制备与性能研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [18]PIDLUZHNA A, LVANIUK K, STAKHIRA P, et al. Multi-channel electroluminescence of CdTe/CdS core-shell quantum-dots implemented into a QLED device[J]. Dyes Pigments, 2019, 162: 647–653.
- [19]XUE L, LIU Y, LI F S, et al. Highly flexible light emitting diodes based on a quantum-dots-polymer composite emitting layer[J]. Vacuum, 2019, 163: 282–286.
- [20]徐叙溶. 发光学与发光材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 183–187.
- [21]李金凯. 钆铝石榴石($\text{Gd}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)的晶格稳定化及其新型发光材料[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [22]杨建虎,戴世勋,姜中宏. 稀土离子的上转换发光及研究进展[J]. 物理学进展, 2003, 23(3): 284–299.
- [23]张中太,张俊英. 无化光致发光材料及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 69–71.
- [24]AUZEL F. Upconversion processes in coupled ion systems[J]. Journal of Luminescence, 1990, 45: 341–345.
- [25]WANG F, LIU X G. Recent advances in the chemistry of lanthanide-doped upconversion nanocrystals[J]. Chemical Society Reviews, 2009, 38(4): 976–989.
- [26]WANG L, XIE R J, TAKAYUKI S. Down-conversion nitride materials for solid state lighting: recent advances and perspectives[J]. Chemical Reviews, 2018, 118: 1951–2009.
- [27]MCKITTRICK J, SHEA-ROHWER L E. Down-conversion materials for solid-state lighting[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2014, 97: 1327–1352.
- [28]YOON H C, HEEYEON Y. Highly efficient green Zn–Ag–In–S/Zn–In–S/ZnS QDs by a strong exothermic reaction for down-converted green and tripackage white LEDs[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(4): 1602638.
- [29]刘泽华. 激光照明用 Al_2O_3 基荧光陶瓷的制备及其性能研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [30]XU J, YANG Y, GUO Z Q, et al. Comparative study of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{–YAG:Ce}$ composite ceramic and single crystal YAG:Ce phosphors for high-power laser lighting[J]. Ceramics International, 2020, 46(11): 17923–17928.
- [31]JI E K, SONG Y H, BAK S H, et al. The design of ceramic phosphor plate with functional materials for applications in high power LEDs[J]. Journal of Materials Chemistry, 2015, 3(48): 12390–12393.
- [32]TANG Y R, ZHOU S M, YI X Z, et al. Microstructure optimization of the composite phase ceramic phosphor for white LEDs with excellent luminous efficacy[J]. Optics Letters, 2015, 40(23): 5479–5481.
- [33]MENAEE A A, MOSTAFA A M, AL-ASHKAR E A. Effect of nanostructured metal oxides (CdO , Al_2O_3 , Cu_2O) embedded in PVA via Nd:YAG pulsed laser ablation on their optical and structural properties[J]. Journal of Molecular

- Structure, 2020, 1203: 127374.
- [34] 于尚君, 李金凯, 段广彬, 等. 石榴石型铝酸盐发光材料的研究进展[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2020, 3(3): 197–202.
- [35] ALI H, KHEDR M A. Energy transfer between Ce and smco-doped YAG nanocrystals for white light emitting devices[J]. Results Phys, 2019, 12: 1777–1782.
- [36] 曹秀清. 稀土离子(Dy,Ce)掺杂钇铝石榴石(YAG)晶体的制备及其光学性能研究[D]. 南宁:广西大学, 2017.
- [37] 郑亚玲. 石榴石荧光粉局域结构与发光性能研究[D]. 北京:北京科技大学, 2019.
- [38] WEI N, LU T C, LI F, et al. Transparent Ce:Y₃Al₅O₁₂ ceramic phosphors for white light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letter, 2012, 101(6): 101–104.
- [39] 罗文飞, 张彬, 刘根, 等. Ce:YAG 荧光陶瓷封装白光 LED 的出光特性分析[J]. 光学技术, 2014, 40(3): 277–281.
- [40] 邵秀晨, 周圣明, 唐燕如, 等. Ce:YAG 荧光陶瓷掺杂 Gd 对白光 LED 发光性能的影响[J]. 无机材料学报, 2018, 33(10): 1119–1123.
- [41] YAO Q, HU P, SUN P, et al. YAG:Ce³⁺ transparent ceramic phosphors brighten the next-generation laser-driven lighting[J]. Advanced Materials, 2020, 32(19): 1907888.
- [42] MA C Y, TANG F, CHEN J D, et al. Spectral, energy resolution properties and green-yellow LEDs applications of transparent Lu₃Al₅O₁₂:Ce³⁺ ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(16): 4205–4213.
- [43] ZHANG W, HE D Q, MA G, et al. Low-temperature synthesis of BaMgAl₁₀O₁₇:Eu²⁺ blue phosphors[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2014, 75(2): 163–167.
- [44] HAO V B, TU N, MANH C N, et al. Structural and photoluminescent properties of nanosized BaMgAl₁₀O₁₇:Eu²⁺ blue-emitting phosphors prepared by sol-gel method[J]. Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 2015, 6(3): 035013.
- [45] WANG X, LI J H, SHI P L, et al. High dispersibility and enhanced luminescence properties of BaMgAl₁₀O₁₇:Eu²⁺ phosphors derived from molten salt synthesis[J]. Optical Materials, 2015, 46: 432–437.
- [46] ZHANG J C, ZHOU M J, LIU B T, et al. The thermal stability and photoluminescence degradation of Mn²⁺ in fluorescent lamp used BaMgAl₁₀O₁₇:Eu²⁺, Mn²⁺ phosphor[J]. Applied Ceramic Technology, 2013, 10(4): 638–642.
- [47] COZZAN C, BRADY M J, DEAN O, et al. Monolithic translucent BaMgAl₁₀O₁₇:Eu²⁺ phosphors for laser-driven solid state lighting[J]. AIP Advances, 2016, 6(10): 105005.
- [48] VERMA A, VERMA A, BRAMHE G V, et al. Optical studies of the Ba_{1-x}MgAl₁₀O₁₇:Eu_x phosphors synthesis by combustion route[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 769: 831–842.
- [49] ZHU Q Q, XU X, HAO L Y. Highly stable Si-N-doped BaMgAl₁₀O₁₇:Eu phosphor prepared by EuSi₂O₂N₂ incorporation: structure and luminescence properties[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2018, 29(8): 6428–6433.
- [50] MICHAEL K, SEONG T Y, JUNG H, et al. The emergence and prospects of deep-ultraviolet light-emitting diode technologies[J]. Nature Photonics, 2019, 13(4): 233–244.
- [51] NARUKAWA Y, ICHIKAWA M, SANGA D, et al. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43(35): 354002.
- [52] LIU X, CHEN B, TU B T, et al. Characterization in activators' distribution and photoluminescence properties of Ce³⁺ doped MgAlON transparent fluorescent ceramic[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(11): 2801–2805.
- [53] PRICHA I, ROSSNER W, MOOS R. Pressureless sintering of luminescent CaAlSiN₃:Eu ceramics[J]. Journal of Ceramic Science and Technology, 2015, 6(1): 63–67.
- [54] WIEG A T, PENILLA E H, HARDIN C L, et al. Broadband white light emission from Ce:AlN ceramics: high thermal conductivity down-converters for LED and laser-driven solid state lighting[J]. APL Materials, 2016, 4(12): 126105.