

# 半导体照明用有机无机纳米复合 封装胶材料研究进展

何相磊, 蒲 源, 王 丹, 陈建峰

(北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

**摘 要:** 基于发光二极管(LED)的半导体照明, 具有高效、节能、环保、安全等特点, 是实现节能减排的有效途径, 代表了照明器件的发展方向。封装材料是半导体照明器件的关键支撑材料, 它不仅需要隔绝水氧以保护芯片, 还需要同时具有高透光性及高折射率以提高发光二极管照明器件的光提取效率。将高折射率无机纳米粒子与有机树脂基材复合, 从而提高发光二极管器件的光提取效率, 进而强化照明器件的节能增效应用, 是当前发光二极管照明器件研发领域关注的重点。介绍了有机无机复合材料在发光二极管封装材料中的应用, 重点综述了近年来高折射率有机无机纳米复合封装材料的研究进展, 并结合本课题组的工作基础, 展望了高折射率封装材料存在的问题和未来的发展方向。

**关键词:** 电子材料; 复合材料; 界面; 高折射率; 光学杂化材料; LED 封装材料

**中图分类号:** TB33; TN312<sup>+</sup>.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2019)10-1017-06

## Progress in Organic-Inorganic Nanocomposite Encapsulants for Semiconductor Lighting

HE Xianglei, PU Yuan, WANG Dan, CHEN Jianfeng

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Semiconductor lighting based light-emitting diode (LED), with its remarkable features of high efficiency, energy conservation, environmental protection, and safety, is an effective choice to achieve energy-saving and emission reduction, which represents the development direction of lighting devices. The encapsulation material is a key supporting material for the semiconductor lighting device, not only needs to isolate water and oxygen to protect the chip but also needs to have high light transmittance and high refractive index to improve the light extraction efficiency of the LED lighting device. The high refractive index inorganic nanoparticles are combined with the organic resin to improve the light extraction efficiency of the LED device, thereby enhancing the energy-saving effect of the semiconductor lighting device. The above-mentioned solution is the focus of current research and development of LED lighting devices. This paper introduces the application of organic-inorganic nanocomposites in LED encapsulation materials and focuses on the research progress of high refractive index organic-inorganic composite packaging materials in recent years. At the same time, combined with the work basis of our group, the problems of high refractive index encapsulation materials are analyzed and the future development direction of the encapsulation industry is prospected.

**Key words:** electronic materials; composite; interface; high refractive index; optical hybrid material; LED encapsulation materials

## 1 前 言

半导体照明又称固态照明<sup>[1, 2]</sup>, 通常是指采用发光二

极管(LED)作为光源的照明技术<sup>[3]</sup>。与使用传统电灯泡或日光灯等光源的照明技术相比, 半导体照明具有耗电量少、寿命长、色彩丰富等特点, 是照明领域的一场技术革命<sup>[4]</sup>。自 1990 年代日本科学家中村修二发明蓝色 LED 并实现商品化以来<sup>[5, 6]</sup>, 基于蓝光 LED 光源与荧光粉配合形成白光照明的技术不断取得突破, 半导体照明技术应用日益扩展<sup>[7, 8]</sup>。特别是近年来, 随着 LED 发光效率的提升、综合成本的逐步降低以及政府大力推广的节能政策, 我国 LED 通用照明行业迎来超快速发展期<sup>[9]</sup>。根据国家发展和改革委员会于 2017 年发布的《半导体照明产业“十三五”发

收稿日期: 2019-04-12 修回日期: 2019-05-13

基金项目: 国家重点研发计划“战略性先进电子材料”重点专项  
(2017YFB0404300)

第一作者: 何相磊, 男, 1993 年生, 博士研究生

通讯作者: 王 丹, 男, 1988 年生, 副教授, 硕士生导师,

Email: wangdan@mail.buct.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201904013

展规划》<sup>[10]</sup>, 到 2020 年, 我国半导体照明全产业链的产值(包括材料、器件和应用)将达到 10 000 亿元人民币, LED 照明产品销售额占整个照明电器行业销售总额的比例将达到 70%。此外, 伴随着 LED 照明技术在屏幕显示、植物照明、汽车用灯等应用领域的不断拓展, LED 照明未来将具有巨大的市场发展潜力<sup>[11-15]</sup>。

典型的 LED 照明器件结构如图 1 所示, 主要包括芯片(chip)、荧光粉(phosphor)、芯片封装胶(LED chip encapsulants)、光学封装透镜(optical encapsulants lens)、反射环(reflector)、导热材料(thermal material)、模具粘接(die attach)等<sup>[16]</sup>。封装胶材料是 LED 照明器件的关键支撑材料, 直接决定了 LED 器件的性能。理想的封装胶材料需要具有良好的水氧阻隔功能, 以防止芯片长期在空气中暴露或机械损伤而失效; 同时还需要具有良好的光透过性与高折射率, 从而保证 LED 照明器件具有较高的光提取效率<sup>[17]</sup>。目前商品化的 GaN 芯片折射率为 2.45<sup>[18, 19]</sup>, 而传统的环氧树脂和有机硅等封装胶材料折射率为 1.4~1.6, 因此芯片发出的光射到封装胶与芯片的界面时, 若入射角增大到某临界角, 则会发生全反射现象。根据全反射临界角计算公式, 芯片与封装胶的折射率差值越大, 全反射临界角越小, 即芯片发出的光产生全反射的概率越高, 从而导致出光率低。发生全反射的光被芯片吸收, 会转化为热能, 从而导致器件温度升高, 造成荧光粉材料性能下降及封装胶老化, 影响器件整体的稳定性和寿命。因此, 使用高折射率的封装胶材料可显著提高 LED 照明器件的光提取效率和使用寿命。

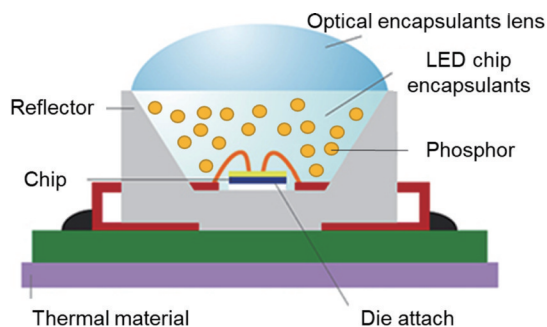


图 1 典型 LED 照明器件结构示意图<sup>[16]</sup>

Fig. 1 Structure diagram of typical LED lighting device<sup>[16]</sup>

近年来, 通过高折射率无机纳米粒子与有机树脂的复合, 制备高透明、耐紫外、高折射率的封装材料, 从而强化半导体照明器件的节能增效应用, 成为半导体照明器件研发领域关注的重点<sup>[20-22]</sup>。在过去的 10 多年间, 纳米复合 LED 封装胶材料的研究进展迅速, 特别是 2014~2018 年, 相关研究论文发表数量增速显著(图 2)。本文介绍了半导体照明器件封装材料的发展现状及趋势, 回顾了近年来有

机无机纳米复合封装材料研究进展, 总结了相关研究中涉及的关键科学问题, 即如何实现功能性无机纳米粒子的宏量可控制备以及无机纳米粒子在有机树脂中均匀分散, 从而实现高透明、耐紫外、高折射率封装胶材料产品的可控制备。进一步结合作者课题组的工作基础, 展望了高折射率封装材料存在的问题和未来的发展方向。

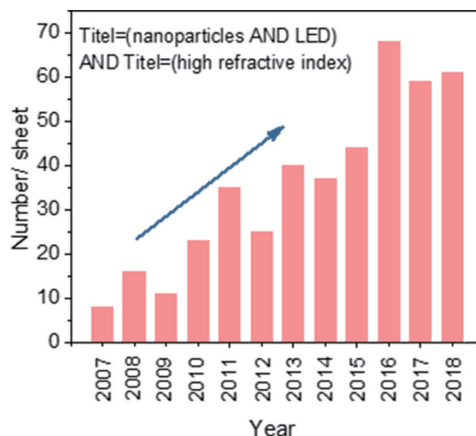


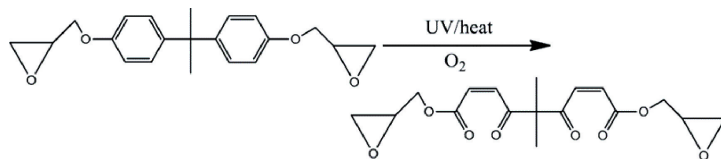
图 2 2007~2018 年纳米复合 LED 封装胶材料应用相关的研究论文发表情况(数据来源: Web of science)

Fig. 2 Numbers of the research papers published of nanocomposite LED encapsulation materials related to the application from 2007 to 2018 (data sources: web of science)

## 2 LED 封装胶材料

封装胶是 LED 器件的“保护伞”, 一般需要具备以下特性: 高折射率( $>1.5$ )、高透明度( $>95\%$ , 450 nm 处, 厚度 1 mm)、耐黄变、低应力、高耐湿以及可加工性(粘度、流动性、稳定性)<sup>[23]</sup>, 同时固化之后需具有较高的硬度以及耐紫外性能。目前 LED 照明器件封装胶材料主要有环氧树脂和有机硅两种类型<sup>[24]</sup>。环氧树脂具有电绝缘性优良、透明性好、与基材粘接力强、配方灵活以及成本较低等特点, 曾被广泛应用于小功率 LED 器件的封装<sup>[25]</sup>。但是随着第三代半导体芯片的迅速发展, 其所具有的宽禁带、高热导率、强击穿场等特点, 对 LED 封装材料提出了更高的要求。此外, 由于环氧树脂分子结构中存在可以吸收紫外线的芳香环, 在吸收紫外线或受热时很容易被氧化产生羰基而形成发色基团使树脂变色(图 3), 进而导致环氧树脂在近紫外波长范围内的透光率下降, 对器件寿命和稳定性造成不良影响<sup>[23, 24]</sup>。

有机硅树脂则被认为是一种可以在大功率 LED 器件中取代环氧树脂的理想封装材料<sup>[26]</sup>。有机硅树脂结构以 Si—O—Si 键为主链, 侧链连有不同功能性的有机基团。由于 Si—O 键具有很高的键能(443.7 kJ/mol)和离子化倾向(51%)<sup>[23]</sup>, 不同的功能基团又可以赋予不同的性能(图 4), 因此可以通过调节有机硅树脂甲基和苯基官能团

图 3 环氧树脂黄变的机理反应<sup>[23]</sup>Fig. 3 Reaction mechanism diagram of yellowing of epoxy resin<sup>[23]</sup>

的比例来调节封装胶材料的折射率, 从而实现树脂折射率的可调谐<sup>[16, 23]</sup>。有机硅树脂的耐老化性能和耐紫外辐射性能较环氧树脂均有明显提升, 同时还具有较好的透光率<sup>[27-30]</sup>。有机硅树脂还具有较好的耐冲击性和耐热性, 尤其是可以在 LED 器件封装过程中耐受回流焊的高温冲击(高达 260 ℃)<sup>[22, 31-35]</sup>。但是在有机硅树脂中引入的苯基, 在空气中长时间加热时易产生氧化降解而变黄。此外, 在高苯基负载量下, 苯基侧链可诱导结晶, 造成散射增强, 从而降低封装胶层的透明度<sup>[16, 20, 22, 36]</sup>。第三代半导体对封装材料的耐湿、耐紫外、导热、出光效率、寿命等性能提出了更高的要求, 而单一的有机聚合物封装材料难以满足应用需求。因此, 有机无机复合材料的设计和研发成为研究重点<sup>[37]</sup>。

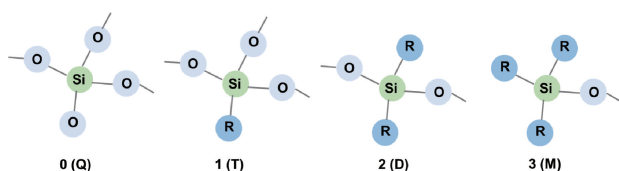


图 4 有机硅结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of organic silicon structure

### 3 有机无机纳米复合封装胶材料

目前有机无机复合封装胶材料的设计和研发, 主要围绕 3 个方面开展: 有机树脂基质改性, 无机填料的组成、维度和功能的调控, 两组分间相容和复配性能的优化, 这些方面均取得了一定的进展。特别是纳米技术的快速发展<sup>[38]</sup>, 为有效改善有机无机复合材料内组分间的界面结合、适配性和相容性提供了新途径, 有望实现材料和制品的高性能和低成本<sup>[39-43]</sup>。在环氧树脂基有机无机纳米复合封装材料研究方面, 日本山形大学的 Enomoto 等<sup>[44]</sup>利用 3,4-环氧环己基甲基 3,4-环氧环己基甲酸酯、双酚 A 二缩水甘油醚以及 1,3,5-三缩水甘油-S-三嗪酮 3 种环氧树脂单体分别对水相体系中含羟基的纳米氧化锆颗粒进行表面改性相转移, 进一步聚合固化后制备的有机无机纳米复合材料在 594 nm 波长处折射率分别达到 1.667, 1.765 和 1.693, 该复合材料同时具有较高的可见光透明性, 在 LED 封装器件应用中具有良好的应用前景。美国伦斯勒理

工学院 Tao 等<sup>[45]</sup>使用苯甲醇作为配位溶剂, 通过无水溶剂法合成高度结晶的单分散氧化锆纳米颗粒, 随后采用 3-(2,3-环氧丙氧)丙基三甲氧基硅烷为配体修饰合成氧化锆颗粒, 所制得的纳米氧化锆颗粒能够较好地分散在商品化的环氧树脂封装树脂中。固化后厚度为 1 mm 的氧化锆/环氧树脂纳米复合膜材料, 在无机纳米颗粒固含量高达 50% (质量分数) 时, 仍能保持 90% 以上的可见光透过率, 折射率由纯环氧树脂的 1.51 提高到 1.65, 相应的红光 LED 器件的光提取效率增加 13.2%。已有的研究表明, 有机无机纳米复合材料工程放大的关键问题是如何实现功能性无机纳米粒子的宏量可控制备及其在有机树脂中的单分散, 进而实现高透明、耐紫外、高折射率封装胶材料产品的可控制备。作者团队采用内循环超重力旋转填充床反应器强化氧化锆纳米颗粒“成核—结晶—生长”过程的混合传质, 制备了高分散水相纳米氧化锆颗粒, 进一步结合表面主动设计与改性—萃取—相转移分离技术, 获得了在甲苯、乙酸乙酯、四氢呋喃体系中分散性能良好的高固含量纳米氧化锆透明分散体(图 5), 其可与脂肪族环氧树脂材料通过溶液共混法制备纳米复合材料, 提高环氧树脂封装层折射率。经蓝光 LED 器件验证, 采用氧化锆/环氧树脂复合材料封装的器件比纯商品化环氧树脂封装器件的出光率高 10%<sup>[46]</sup>。

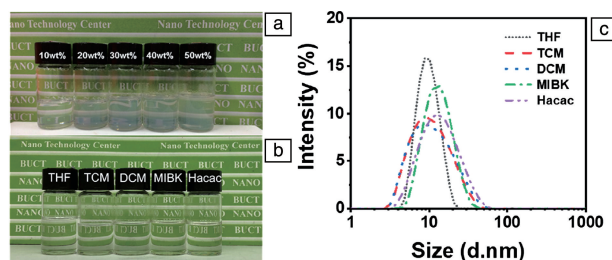


图 5 不同固含量(质量分数, 下同)的甲苯相纳米氧化锆分散体的实物照片(a), 固含量为 5% 的氧化锆纳米分散体在不同有机溶剂中的分散情况实物照片(b), 通过动态光散射法测试的图 5b 中不同有机溶剂中的纳米氧化锆水合粒径(c)<sup>[46]</sup>

Fig. 5 Photograph of toluene containing zirconia nanoparticles with different solid content (a), photograph of various kinds of organic solvents containing zirconia nanoparticles with solid content of 5 wt% (b), hydrodynamic diameters of the zirconia nanoparticles in fig. 5b measured by dynamic light scattering (c)<sup>[46]</sup>



在有机硅树脂基纳米复合封装材料研究方面, Chung 等<sup>[17]</sup>利用丁酸和  $\gamma$ -甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷两种改性剂修饰纳米氧化锆粒子, 得到了可以在乙酸乙酯体系中分散良好的透明纳米氧化锆分散体。将该纳米氧化锆分散体与  $\gamma$ -甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷、二苯基二羟基硅烷、二甲氧基二甲基硅烷和三苯基羟基硅烷在氢氧化钡为催化剂形成的低聚硅胶中混合, 再加入过氧化苯甲酰为光引发剂, 直接形成了透明的高折射率氧化锆/有机硅复合材料。该复合材料在氧化锆添加量为 51.7% (质量分数) 时折射率可达 1.624, 并具有良好的透明度和热稳定性。韩国科学技术院 Kim 等<sup>[47]</sup>报道了一种锆-苯基硅氧杂化材料 (图 6), 在低聚硅胶合成过程中加入正丙醇锆, 使其与硅胶网络形成  $\text{Zr}-\text{O}-\text{Si}$  的结构,

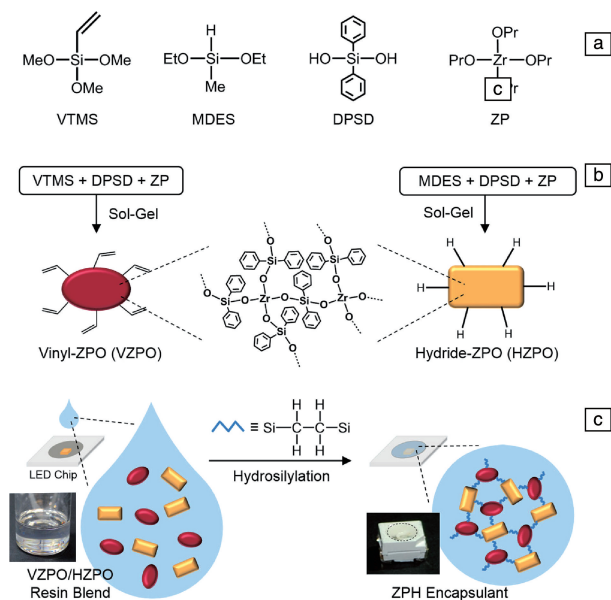


图 6 用于 LED 封装的锆-苯基硅氧杂化材料的制备示意图<sup>[47]</sup>: (a) 用于合成 VZPO 和 HZPO 树脂的前体原料的化学结构式; (b) 合成 VZPO 和 HZPO 树脂的制备示意图, VZPO 树脂含有乙烯基团, HZPO 树脂含有氢化物基团, 同时它们都是含有  $\text{Zr}-\text{O}-\text{Si}$  结构的多功能低聚硅胶; (c) VZPO/HZPO 树脂固化后形成锆-苯基硅氧杂化物封装, 左边的插图混合后的 VZPO/HZPO 树脂, 右边的插图使用锆-苯基硅氧杂化物封装的 LED 芯片

Fig. 6 Schematic diagram of preparation of zirconium-phenyl siloxane (ZPH) hybrid used in LED package<sup>[47]</sup>: (a) chemical structures of the precursors used for synthesizing VZPO and HZPO resin; (b) schematic illustration of the synthesis of VZPO and HZPO resin, VZPO and HZPO are multifunctional oligosiloxanes containing  $\text{Zr}-\text{O}-\text{Si}$  heterometallic phase that are functionalized with vinyl and hydride groups, respectively; (c) hydrosilylation-derived curing of VZPO/HZPO resin blend to fabricate the ZPH hybrid encapsulant, inset photographs are the VZPO/HZPO resin blend (left) and the ZPH-encapsulated LED chip (right)

从而获得了高折射率 ( $n=1.58$ ) 复合材料。该复合硅胶材料与商用的道康宁 (OE-6630) 高折射率树脂相比, 具有高的光学透明度 (在 450 nm 处为 88%) 和高的热稳定性 (在 180 °C 高温下可保持 1008 h 不变黄)。

Lin 等<sup>[35]</sup>研究了氧化锆/硅树脂复合物的界面粘附性对 LED 器件可靠性的影响。该团队通过溶胶-凝胶反应制备了具有官能团的表面改性氧化锆纳米颗粒, 其可以与硅树脂反应, 所制备的质量分数为 5% 的氧化锆/硅氧烷复合物在 633 nm 下的折射率为 1.569, 透光率为 98.9%。此外, 通过将改性氧化锆引入有机硅树脂中, 还可以使材料热膨胀系数大大降低。当使用氧化锆/硅树脂混合物作为封装材料时, LED 的光通量比使用纯硅树脂的光通量高 10.1%。尤为重要的是, 由于氧化锆/硅树脂复合物在纳米颗粒和基质之间的强界面粘附性, 在该研究中测试的所有 LED 器件中, 使用氧化锆/硅树脂封装的 LED 器件在热冲击下具有最佳性能。重庆大学 Huang 等<sup>[48]</sup>通过直接引入钛酸酯偶联剂改性的方法获得了改性后的氧化钛纳米颗粒, 进而利用溶剂共混法获得了高分散的氧化钛/有机硅复合物, 与纯有机硅树脂相比, 复合材料光透过率仅下降 2%, 但折射率由 1.42 提高至 1.60, 并且具有较高的热稳定性。Liu 等<sup>[49]</sup>利用氧化钛纳米粒子制备了一种氧化钛/有机硅复合材料, 发现金红石相氧化钛比锐钛矿相氧化钛能更有效增加纳米复合材料的折射率。在质量分数为 5% 的氧化钛负载量下, 折射率在波长为 589 nm 处可达 1.62, 相比于纯有机硅树脂的 1.54 有较大提升。

## 4 结 语

随着可持续发展的观念深入人心, 绿色节能的照明光源革命已成必然。随着半导体照明技术的发展, 其应用范围已涵盖通用照明、景观装饰、交通信号显示、道路照明等产品领域, 相关产业具有巨大的市场空间, 并将带来显著的社会和经济效益。随着第三代半导体芯片性能的提升及半导体照明器件应用领域的不断拓展, 对封装材料的耐湿、耐紫外、导热、出光效率、寿命等综合性能提出了更高的要求。作为目前市场上主流封装材料的环氧树脂和有机硅, 都存在单一有机基材难以克服的缺点。有机无机纳米复合的封装材料是 LED 封装材料的发展方向, 目前面临的挑战在于如何低成本大规模地制备与有机基材分散良好的纳米分散体。此外, 有机无机纳米复合封装材料在提升总体材料的折射率上已经取得较好的进展, 但是可加工性、粘度、流动性、稳定性等综合性能评价的报道较少。可以预见, 通过有机基质改性技术、无机纳米颗粒可控制备和分散技术、有机-无

机界面作用机制研究,有望解决第三代半导体照明器件封装材料的耐候、导热、光学性能平衡设计等关键科学问题,获得系列新型高品质封装材料,满足产业发展对先进材料和技术的需求。第三代半导体用配套封装材料研究的发展,不仅会扩大 LED 照明器件在家庭照明、景观照明、摄影棚和背光源等传统应用领域的推广,更有可能加速半导体照明在大功率、高亮度的户外照明、海运照明、投影仪等新兴领域中的渗透率。更高亮度、更高显色指数的照明将带来革命性的体验,是未来社会发展的风向标,市场前景可期。

## 参考文献 References

- [1] 吴玲. 半导体照明中国梦[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.  
WU L. Chinese Dream of Semiconductor Lighting[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [2] 韩俊义, 段庆文. 中国材料进展[J], 2011, 30(3): 36-46.  
HAN J Y, DUAN Q W. Materials China[J], 2011, 30(3): 36-46.
- [3] PATEL P. MRS Bulletin[J], 2011, 36(9): 678-680.
- [4] MEREDITH P, ARMIN A. Nature[J], 2018, 562(7726): 197-198.
- [5] OKAMOTO K, NIKI I, SHVARTSER A, *et al.* Nature Materials[J], 2004, 3(9): 601-605.
- [6] NAKAMURA S, MUKAI T, SENO H. Applied Physics Letters[J], 1994, 64(13): 1687-1689.
- [7] 邢志刚, 贾海强, 王文新, 等. 中国材料进展[J], 2009, 28(8): 16-19.  
XING Z G, JIA H Q, WANG W X, *et al.* Materials China[J], 2009, 28(8): 16-19.
- [8] 童敏, 邵嘉平. 照明工程学报[J], 2017, 28(04): 130-133.  
TONG M, SHAO J P. China Illuminating Engineering Journal[J], 2017, 28(04): 130-133.
- [9] 吴玲. 照明工程学报[J], 2017, 28(01): 5-6.  
WU L. China Illuminating Engineering Journal[J], 2017, 28(01): 5-6.
- [10] 中华人民共和国发展和改革委员会. 半导体照明产业“十三五”发展规划[EB/OL]. (2017-07-10) [2019-01-21].  
National Development and Reform Commission. Semiconductor Lighting Industry “13th Five-Year” Development Plan[EB/OL]. (2017-07-10) [2019-01-21].
- [11] SCHUBERT E F, KIM J K. Science[J], 2005, 308(5726): 1274-1278.
- [12] PUST P, SCHMIDT P J, SCHNICK W. Nature[J], 2015, 525(7578): 454-458.
- [13] CAO Y, WANG N N, TIAN H, *et al.* Nature[J], 2018, 562(7726): 249-253.
- [14] LIN K B, XING J, QUAN L N, *et al.* Nature[J], 2018, 562(7726): 245-248.
- [15] DENBAARS S P, FEEZELL D, KELCHNER K, *et al.* Acta Materialia[J], 2013, 61(3): 945-951.
- [16] Shin-Etsu Chemical Co. Ltd. LED Structure and Use[EB/OL]. (2019-01-21) [2019-01-21]. <https://www.silicone.jp/products/usage/led/index.shtml>.
- [17] CHUNG P T, CHIOU S H, TSENG C Y, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2016, 8(15): 9986-9993.
- [18] KIM J K, GESSMANN T, LUO H, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2004, 84(22): 4508-4510.
- [19] YU R, JIN S, CEN S, *et al.* IEEE Photonics Technology Letters[J], 2010, 22(23): 1765-1767.
- [20] BAE J Y, JANG J, BAE B S. Journal of Sol-Gel Science and Technology[J], 2017, 82(1): 253-260.
- [21] KIM Y H, LIM Y W, LEE D, *et al.* Journal of Materials Chemistry C[J], 2016, 4(46): 10791-10796.
- [22] KIM J S, YANG S, BAE B S. Chemistry of Materials[J], 2010, 22(11): 3549-3555.
- [23] ZHAN X B, ZHANG J Y, WANG X L, *et al.* Procedia Engineering[J], 2012, 27: 687-692.
- [24] LEI I A, LAI D F, DON T M, *et al.* Materials Chemistry and Physics[J], 2014, 144(1/2): 41-48.
- [25] JIN F L, LI X. Journal of Industrial and Engineering Chemistry[J], 2015, 29: 1-11.
- [26] ZHAN X B, LIU H J, ZHANG J Y, *et al.* Industrial & Engineering Chemistry Research[J], 2014, 53(11): 4254-4262.
- [27] ZHAN X B, CAI X Q, ZHANG J Y. RSC Advances[J], 2018, 8(23): 12517-12525.
- [28] LI Y, LIAN Q S, LIN Z R, *et al.* Journal of Materials Chemistry A[J], 2017, 5(33): 17549-17562.
- [29] ZHAN X B, ZHANG J Y, CHENG J, *et al.* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry[J], 2014, 117(2): 875-883.
- [30] 李美江, 侯新瑞, 吴化军. 中国材料进展[J], 2018, 37(3): 191-196.  
LI M J, HOU X R, WU H J. Materials China[J], 2018, 37(3): 191-196.
- [31] JIN J, YANG S, BAE B S. Polymer Chemistry[J], 2011, 2(1): 168-174.
- [32] KIM J S, YANG S, BAE B S. Journal of Sol-Gel Science and Technology[J], 2010, 53(2): 434-440.
- [33] JIN J, YANG S, BAE B S. Journal of Sol-Gel Science and Technology[J], 2012, 61(2): 321-327.
- [34] KIM H, BAE J Y, KIM Y H, *et al.* Journal of Applied Polymer Science[J], 2014, 131(6).
- [35] LIN Y T, LI Y H, LEI I A, *et al.* Materials Chemistry and Physics[J], 2018, 206: 136-143.
- [36] MOSLEY D W, KHANARIAN G, CONNER D M, *et al.* Journal of Applied Polymer Science[J], 2014, 131(3): 39824.
- [37] LU C L, YANG B. Journal of Materials Chemistry[J], 2009, 19(19): 2884-2901.
- [38] 彭卿, 李亚栋. 中国科学(B辑: 化学)[J], 2009, 39(10): 1028-1052.  
PENG Q, LI Y D. Science in China Series B: Chemistry[J], 2009, 39(10): 1028-1052.
- [39] 曾晓飞, 王琦安, 王洁欣, 等. 中国科学: 化学[J], 2013, 43

- (06): 629–640.  
 ZENG X F, WANG Q A, WANG J X, *et al.* SCIENTIA SINICA: Chimica[J], 2013, 43(06): 629–640.
- [40] BALAZS A C, EMRICK T, RUSSELL T P. Science[J], 2006, 314 (5802): 1107–1110.
- [41] MACKAY M E, TUTEJA A, DUXBURY P M, *et al.* Science[J], 2006, 311(5768): 1740–1743.
- [42] ALTHUES H, HENLE J, KASKEL S. Chemical Society Reviews[J], 2007, 36(9): 1454–1465.
- [43] 初广文, 邹海魁, 曾晓飞, 等. 北京化工大学学报(自然科学版)[J], 2018, 45(05): 33–39.  
 CHU G W, ZOU H K, ZENG X F, *et al.* Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science Edition)[J], 2018, 45(05): 33–39.
- [44] ENOMOTO K, KIKUCHI M, NARUMI A, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2018, 10(16): 13985–13998.
- [45] TAO P, LI Y, SIEGEL R W, *et al.* Journal of Applied Polymer Science[J], 2013, 130(5): 3785–3793.
- [46] HE X L, WANG Z, PU Y, *et al.* Chemical Engineering Science[J], 2019, 195: 1–10.
- [47] KIM Y H, BAE J Y, JIN J, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces [J], 2014, 6(5): 3115–3121.
- [48] HUANG P, SHI H Q, XIAO H M, *et al.* Scientific Reports[J], 2017, 7: 5951.
- [49] LIU Y, LIN Z Y, ZHAO X Y. IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology[J], 2014, 4(7): 1125–1130.
- (本文为本刊约稿, 编辑 费蒙飞 张雨明)

## 2020 年材料领域国际学术会议信息

会议名称	时间	地点
TTANIUM ASIA 2020	2 月 9~10 日	Singapore
TMS 2020——149th Annual Meeting & Exhibition	2 月 23~27 日	San Diego, California, USA
International Conference on Materials Science & Nanotechnology (Future Materials 2020)	2 月 26~28 日	Lisbon, Portugal
2020 MRS Spring Meeting	4 月 13~17 日	Phoenix, Arizona, USA
29th International Conference on Metallurgy and Materials (Metal 2020)	5 月 20~22 日	Brno, Czech Republic
The 11th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts (MOL-TEN 2020)	5 月 25~29 日	Seoul, South Korea
International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-8)	5 月 31~6 月 4 日	San Diego, California, USA
Technological Innovations in Metals Engineering (TIME 2020)	6 月 2~4 日	Youngstown, Ohio, USA
10th International Conference on High Performance and Optimum Design of Structures and Materials (HPSM/OPTI 2020)	6 月 3~5 日	Prague, Czech Republic
Congress on Safety in Engineering and Industry 2020	6 月 21~24 日	Philadelphia, Pennsylvania, USA
62th Electronic Materials Conference (EMC)	6 月 24~26 日	Columbus, Ohio, USA
5th International Congress on 3D Materials Science (3DMS 2020)	6 月 28~7 月 1 日	Washington, USA
8th International Conference on Solid-Solid Phase Transformations in Inorganic Materials (PTM2020)	6 月 29~7 月 3 日	Xi'an, China
10th American Conference on Neutron Scattering (ACNS 2020)	7 月 12~16 日	Boulder, Colorado, USA
13th International Conference on the Technology of Plasticity	7 月 26~31 日	Columbus, Ohio, USA
17th IUMRS-ICEM	8 月 30~9 月 3 日	Iguassu Falls, Brazil
18th International Conference on Metal Forming (Metal Forming 2020)	9 月 13~16 日	Krakow, Poland
14th International Symposium on Superalloys (Superalloys 2020)	9 月 13~17 日	Seven Springs, Pennsylvania, USA
International Conference of Young Researchers on Advanced Materials (ICYRAM 2020)	9 月 18~20 日	Warsaw, Poland
IFAM2020	9 月 24~26 日	Beijing, China
Materials Science & Technology 2020 Technical Meeting and Exhibition (MS&T20)	10 月 4~8 日	Pittsburgh, Pennsylvania, USA
2020 MRS Fall Meeting	11 月 29~12 月 4 日	Boston, Massachusetts, USA

(本刊通讯员 朱宏康整理 zhuhongkang@163.com)