

中国半导体照明发展综述

李晋闽^{1,2,3*}, 刘志强^{1,2,3}, 魏同波^{1,2,3}, 闫建昌^{1,2,3}, 伊晓燕^{1,2,3}, 王军喜^{1,2,3}¹中国科学院半导体研究所照明研发中心, 北京 100083; ²中国科学院大学, 北京 100049;³北京第三代半导体材料与应用工程技术研究中心, 北京 100083

摘要 半导体照明是 21 世纪初兴起的产业,也是我国第三代半导体材料成功产业化的第一个突破口,技术发展日新月异,是国际高科技领域竞争的焦点之一。目前,我国半导体照明产业已经形成了完整的产业链,功率白光 LED、硅基 LED 和全光谱 LED 等核心技术同步国际,紫外 LED、可见光通讯、农业光照和光医疗等创新应用走在世界前列。介绍了我国在半导体照明方面的研究进展,回顾了相关产业的发展情况,并对未来进行了展望。

关键词 材料; 半导体照明; 发光二极管; 氮化物; 深紫外 LED

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0116002

Development Summary of Semiconductor Lighting in China

Li Jinmin^{1,2,3*}, Liu Zhiqiang^{1,2,3}, Wei Tongbo^{1,2,3}, Yan Jianchang^{1,2,3},
Yi Xiaoyan^{1,2,3}, Wang Junxi^{1,2,3}¹ *Research and Development Center for Semiconductor Lighting, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;*² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*³ *Beijing Engineering Research Center for the 3rd Generation Semiconductor Materials and Application, Beijing 100083, China*

Abstract Semiconductor lighting is a new industry emerging at the beginning of the 21st century, and is also the first breakthrough for the successful industrialization of the third generation of semiconductor materials in China. The technology development is changing day by day, and it is one of the focal points of international high-tech competition. At present, China's semiconductor lighting industry has formed a complete industrial chain. The core technologies of power white LED, silicon LED, full spectrum LED and others are synchronized with the international markets. Innovative applications such as UV LED, visible light communications, agricultural lighting and photo-medical treatment are leading the world. Here, the research progress of semiconductor lighting in China is introduced, the development history of its related industry is reviewed, and its future is prospected.

Key words materials; semiconductor lighting; light emitting diode; nitrides; deep UV LED

OCIS codes 160.2100; 160.4236; 180.5655; 230.0250

1 我国半导体照明产业的发展历程回顾

1994 年,设立了“GaN 基材料和蓝绿光器件研究”课题,该课题由中国科学院半导体研究所和北京大学承担,拉开了我国对氮化物半导体材料和电子器件的研究。

2003 年 6 月,成立了国家半导体照明工程协调领导小组,同年 10 月启动了“半导体照明工程”攻关项目,安排专项经费 3500 万元,以解决特殊照明市场的产业化关键技术问题。

2001—2005 年,中国科学院半导体研究所研制出了 $3 \times 2''$ 的金属有机化合物化学气相沉淀

收稿日期: 2020-09-09; 修回日期: 2020-10-21; 录用日期: 2020-11-02

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0403300, 2017YFB0403302)、国家自然科学基金(61974140, 61604140)

* E-mail: jmli@semi.ac.cn

(MOCVD)设备样机,中国电子科技集团公司第四十八研究所、青岛杰生光电公司和西安电子科技大学也分别研制出了单片、 $3\times 2''$ 和 $6\times 2''$ 的氮化物 MOCVD 设备。

2006 年 8 月,设立“半导体照明工程”重大项目,安排经费 3.5 亿元,对半导体照明核心技术的突破和产业化关键技术的攻关等进行了全产业链部署。

2006—2010 年,中国科学院半导体研究所研制出了 $7\times 2''$ 外延片的 MOCVD 设备样机,随后又成功开发了 48 片生产型 MOCVD 样机。

2008 年,北京奥运会开幕式及场馆采用了 LED 景观照明和全彩显示屏等产品,仅水立方的 LED 景观照明,与荧光灯相比,全年可节电 74.5×10^4 kW·h,节能超过 70%。

2009 年,半导体照明被列为新材料领域六大重点专项之一,“十城万盏”半导体照明应用工程试点示范工作启动。

2010 年,上海世博园区内使用 10.5 亿颗 LED 芯片,场馆室内照明光源约 80%采用 LED;人民大会堂舞台排灯半导体照明改造取得成功,改造后色温不变,照度提升了 40%,灯具外壳温度降低了 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,节能 80%。这些规模化系统集成技术的实施推动了我国半导体照明产品的集成创新与应用,标志着我国在功能性照明系统集成应用方面居于世界前列。

2013 年,制定了半导体照明科技发展“十二五”专项规划,目标是实现基础研究、前沿技术、应用技术及产业化示范重点技术的突破。

2003—2013 年,自主开发出适于氮化物生长的氢化物气相外延(HVPE)设备,采用激光剥离和自分离技术获得了高质量的 2 inch(1 inch=2.54 cm)自支撑 GaN 衬底,打破了国外设备垄断的局面。

我国功率型白光 LED 芯片封装后的光效超过 200 lm/W,硅衬底功率型 LED 芯片封装后的光效达到 170 lm/W,均处于国际先进水平。

我国目前已经打通了半导体照明的技术链,形成了较为完整的产业链,开创了 LED 技术创新与产业融合发展的良好局面,极大提升了产业的国际影响力和竞争力,具体措施如下。

1) 注重创新,破除瓶颈。国家半导体照明工程自启动以来,通过重大专项引领技术进步,不断突破关键和核心技术,逐渐建立了完整的产业技术创新链。

2) 推行示范,促进集成。多项半导体照明重大示范工程的成功实施,体现了半导体照明的高效性和环保性,向世界展示了我国在半导体照明技术方

面的创新能力与推行节能减排工作的决心。如:“十城万盏”试点示范工作成效显著,截至 2012 年底,37 个试点城市已实施示范工程超过 2700 项,应用 LED 灯具超过 700 万盏,年节电超过 20×10^8 kW·h。

3) 建立基地,谋求产业。全国已建立 14 个产业化基地,初步形成了四大半导体照明产业聚集区域,每一区域都有比较完整的产业链,产业集聚效应较为突出。基地的建设不仅促进了关键技术的转移转化和产业化辐射,更重要的是推动了地方经济的发展,为半导体照明产业规模的扩大奠定了基础。据国家半导体照明工程研发及产业联盟(CSA)统计,2019 年我国半导体照明产业规模 7548 亿元,其中上游材料芯片 201 亿元,中游器件封装 959 亿元,下游集成应用 6388 亿元,我国已成为全球 LED 产品重要的生产和出口基地。

4) 注重战略,培育人才。以联盟为依托推进标准制定,成立了联盟标准化委员会(CSAS),建立了半导体照明联合创新国家重点实验室,实践企业为主体的协同创新模式;通过重大项目的实施,培育和引进学科带头人、创新团队和科技创业人才。

5) 新的管理,新的模式。在国家半导体照明工程实施初期,联盟作为第三方机构承担了项目管理的任务,并建立了专家组咨询、办公室协商和领域办决策的工作机制。

6) 扩大合作,聚合资源。2010 年,组建了国际半导体照明联盟(ISA)。此外,积极开展国际合作。如:与肯尼亚共同成立“中肯半导体照明技术中心”,与荷兰开展“中荷半导体照明产学研创新合作论坛”等。

2 半导体照明基础技术的发展及产业现状

2.1 GaN 基 LED 基础技术的发展及研究现状

GaN 材料的研究可以追溯到 20 世纪 30 年代,但直到 20 世纪末研究者解决了 GaN 材料外延质量问题以及 p-GaN 的掺杂问题后,GaN 材料的应用才出现曙光。GaN 基 LED 开始迅猛发展,同时 GaN 材料及其器件成为研究的热点。此后,国内外针对 GaN 基 LED 的材料生长和器件制作等展开了大量研究。

2.1.1 GaN 基 LED 材料及器件发展

作为短波长 LED 的优质候选材料,GaN 很早就受到关注。20 世纪 70 年代,Pankove 等^[1]在 GaN 基 LED 上取得了一些研究进展,但 LED 发光效率过于低下。同一时期,研究者采用分子束外延

(MBE)GaN 基 LED, 获得了当时最高的电光转换效率 0.12%, 但离实用要求相距甚远^[2]。摆在人们眼前的问题也显而易见: GaN 的质量低下, 在与衬底的交界面处有大量位错和缺陷; 更为重要的是, GaN 的 p 型掺杂难以实现。

GaN 基 LED 的发展受到材料生长的限制, 停滞不前。直到 1986 年, Amano 等^[3]通过引入低温 AlN 插入层, 第一次在蓝宝石衬底上获得了高质量的 GaN 外延薄膜, 随后 Amano 等^[4]对 p 型掺杂的 GaN 样品进行了低能电子辐射处理, 获得了 p 型 GaN。1991 年, Nakamura^[5]提出了两步式 MOCVD 生长法。同年, 他在 Amano 工作的基础上, 引入了 GaN 低温缓冲层^[6]。最为重要的是, 1992 年, Nakamura 等^[7-8]发现, 只要采用简单的热退火处理, 就能获得 p 型 GaN, 同时证明了 Mg-H 络合物是影响 Mg 杂质电离效率的因素。这些研究成果对 GaN 材料和器件的发展具有重要意义。

解决了 GaN 材料生长的两大难题后, GaN 基 LED 的研究迅速发展。1992 年, Nakamura 等^[9]在获得的高质量 GaN 薄膜上外延生长了 InGaN 薄膜, 通过改变 In 组分, 实现了 InGaN/GaN 基 LED 发光波长可调。1994 年, Nakamura 等^[10]实现了第一支 450 nm 高亮度蓝光 InGaN/GaN 基双异质结 LED。1996 年, 第一支 417 nm 的紫外激光器二极管也应运而生^[11]。1996 年, 第一款商用白光 LED 面世, 当时其平均发光效率为 5 lm/W, 最佳发光效率为 12 lm/W^[12]。2004 年, 在小电流 (<1 mA) 下工作的 LED 的发光效率突破了 100 lm/W^[13]。两年后, LED 的发光效率不仅在小电流密度 (1.98 A/cm²) 下高达 174 lm/W, 在 Droop 区间内 (19.8 A/cm²) 也高达 138 lm/W^[14], 这标志着 GaN 基 LED 光源对传统光源的全面超越。2010 年, GaN 基 LED 市场火爆, 当时报道的 LED 的发光效率基本处在 150 ~ 200 lm/W 区间内。2014 年, 美国 Cree 公司报道 350 mA 注入电流下 GaN 基白光 LED 的发光效率达到了 303 lm/W, 这是迄今为止报道的白光 LED 的最高纪录。

为了提升蓝光 LED 的发光效率, 各研究机构和公司从 GaN 的晶体质量、内量子效率、空穴注入效率、新型衬底及电极等各个方向开展了大量的工作。对于 GaN 外延材料的高位错密度问题, 基于图形衬底和图形掩模的横向外延过生长 (ELO) 是最为有效的位错阻断方法, ELO 技术使得位错密度减少到 10^7 cm^{-2} 成为可能。2000 年, Vennéguès 等^[15]提

出了典型的两步 ELO (2S-ELO) 方法, 将整个薄膜表面的缺陷密度减少到 $2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$, 但是存在生长时间长、合并厚度大和位错分布集中等问题。同时大量其他方法也逐渐出现, 如 2003 年 Kawaguchi 等^[16]提出的空架桥 ELO 方法以及 2016 年 Xiao 等^[17]提出的部分接触式 ELO 方法等。总体来看, 异质衬底上基于 ELO 的 GaN 薄膜仍然存在生长时间长、合并厚度大 (>10 μm)、位错分布不均匀和应力大等问题, 并且位错密度仍有进一步降低的空间。

在提高芯片的提取效率方面, 光子晶体、粗化微纳表面及纳米柱等是重要的研究对象。2009 年, 研究者利用光子晶体和导波模式的耦合增强了出光效率, 其未封装的 LED 的光提取效率可以达到 73%。2011 年, 研究者报道了纳米柱的出光效率高达 79%。利用表面等离子激元提升外量子效率也是一个研究的热点。Okamoto 等^[18]实现了 InGaN 量子阱结构器件光致发光强度 14 倍的增强。随后, Kwon 等^[19]将银纳米结构镶嵌到发光层的背面, 实现了 InGaN 基电致发光器件光抽取效率 32.2% 的增强。Yao 等^[20]也通过银纳米颗粒实现了 GaN LED 外量子效率 22% 的提升。

在封装方面, 对光效有重要影响的是 LED 的光提取能力和散热能力。由于半导体、介质以及胶体材料的折射率差异, 界面上存在全反射和菲涅耳反射等。封装材料、基板、反射器和 Au 丝等对光均有一定的吸收。此外, 转换以及光谱匹配也具有一定的优化空间。散热能力影响着 LED 的光效性能及可靠性。随着器件结温的增加, LED 的效率和寿命呈指数下降。散热与芯片的结构和排布、封装材料的导热系数、热通道的设计及封装工艺相关。同时出光及散热结构还存在一定的矛盾, 需要针对不同的应用选择折中方案。在美国 Lumileds 公司发布的产品目录中, 几乎所有的 LED 都是使用陶瓷基板贴片器件 (SMD) 或芯片级封装 (CSP)。其中, Luxeon TX 在 700 mA 工作电流下, 封装热阻为 3 °C/W, CSP 产品 Luxeon Flip chip white 10 在 350 mA 下的封装热阻为 2 °C/W。氧化铝陶瓷基板是目前使用较为广泛的基板, 其热导率为 20 W/(m·K), 利用其进行封装也会带来热阻的下降。AlN 陶瓷基板因为更高的热导率 [170 W/(m·K)], 目前已经成为研究热点, 2014 年美国 Cree 公司强调了 AlN 陶瓷基板对 LED 大注入工作的作用。由于其工艺尚未成熟且价格昂贵, 该技术未得到广泛应用。Lumileds 还推出了封装体集光率 (Elendue) 的概念, 更

小的集光率意味着更紧凑的光源系统及更少的生产成本和使用成本。当然,集光率还和 LED 外延芯片结构相关,在封装尺寸上,CSP 结构无疑是和这个封装理念契合的。相关研究发现,在这种紧凑的结构中,荧光粉的效率衰减可能是较大的问题,用含 Al 配方取代掺 Cs 的配方,将实现更高的热稳定性以及更小的效率衰减。荧光陶瓷也是解决荧光粉效率衰减的可行方案,国外研究机构对此的研究逐渐增多。

2.1.2 中国 GaN 基 LED 技术的突破

以 LED 为核心器件的半导体照明产业是全球最具前景的高技术产业之一。随着各国开始淘汰白炽灯并限用含汞节能灯,LED 照明市场呈现爆发式增长。但此前的关键技术和市场被欧美日垄断,芯片严重依赖进口。我国在 2003 年首次提出发展半导体照明计划,国内科研单位及企业响应国家政策,大力发展 GaN 基 LED,针对照明产品面临的电光转换效率低以及长期工作可靠性差等难题,着力研究材料生长、器件制备以及封装测试等,整个生产链不断取得突破性发展。2012 年以后,在国家政策的大力支持下,多家单位开展了半导体照明的相关研究,在生长设备、材料外延、器件工艺和封装技术等方面都取得了核心技术的突破。

生长设备是解决氮化物材料外延的关键。20 世纪 80 年代中期,中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所、中国科学院半导体研究所分别研制出用于制备不同化合物半导体材料的 MOCVD 设备,促进了我国化合物半导体材料研究的发展,但是设备结构简单,性能尚不完善。进入 21 世纪,随着氮化物材料的兴起,我国开始 MOCVD 设备的自主研发。中国电子科技集团公司第四十八研究所、中国科学院半导体研究所分别研制了 $6 \times 2''$ 和 $3 \times 2''$ 的 MOCVD 小型多片设备,之后青岛杰生光电子公司和西安电子科技大学也研制出小型多片 MOCVD 设备。从 2010 年到 2012 年,在短短两年多时间内,国内先后有近 20 家企业,依托不同的技术来源,加入到开发 MOCVD 设备的队伍中来。

在材料方面,我国开发出一系列具有自主知识产权的材料体系,包括各种图形化或各种尺寸的衬底、半极性或非极性氮化镓化合物等。开展了大量蓝宝石图形衬底设计加工实验研究,发展了多种基础性和关键性的图形衬底技术,主要有纳米

图形、无定型图形、湿法台面形和湿法金字塔形等。2013 年,国内以图形蓝宝石为衬底的 GaN 基 LED 研究取得了突破性进展,功率型白光 LED 封装后的效率超过 150 lm/W ,产业化的芯片封装后的效率超过 130 lm/W 。

在高驱动电流下工作时 LED“量子效率下降”的问题(简称为“LED Droop”问题)是一个国际性难题。我国各科研院所均加强了对 LED Droop 问题的研究。由于极化效应可能导致 LED Droop 问题,南京大学和西安电子科技大学等单位研究了半极性和非极性材料的外延技术,发展了湿法刻蚀图形 r 面蓝宝石衬底技术,该技术已应用于非极性 GaN 生长。另外,南京大学、华南理工大学和中山大学等致力于研究 LED 能带工程,通过设计不同结构的有源层或电子阻挡层(如特殊结构量子阱、超晶格阻挡层和极化匹配 AlInGaN 电子阻挡层等),获得了最优化的能带,促进了载流子注入,从而实现高光效 LED。

为了满足大功率 LED 的要求,国内已经开发出具有自主知识产权的一系列器件工艺技术。其中,创新型的双透明电极条形结构突破了 n-GaN/ITO 欧姆接触关键工艺技术的限制,增加了侧面出光面积,有效提高了光提取效率。在垂直 LED 结构制作中,中国科学院半导体研究所针对激光剥离衬底问题,采用厚膜光敏树脂掩蔽等技术手段,实现了无损伤垂直结构的芯片深槽隔离;采用 Au-Au 低温键合技术,实现了低应力 GaN 外延片与转移衬底的高强度键合,剥离成品率近 100%。研究者通过低温氧化铟锡(ITO)电子束蒸发及退火技术,解决了垂直结构 LED 与 ITO 制备工艺不兼容难题,LED 输出光功率提高了 20% 以上。我国最终研发出了一套具有自主知识产权、适合产业化的垂直结构工艺流程,器件性能优越。

基于蓝宝石衬底的 GaN LED 具有发光效率低和散热特性差等缺点,针对该问题,中国科学院半导体研究所着力解决光提取效率低、衬底导热性差、异质外延失配度大和 p 型掺杂离化率低等难题,取得了外延芯片的核心技术突破,发明了国际首创蓝光谱、全向复合光学膜结构及制备技术。研究者研制了国际首创的金属复合衬底,实现了极低热阻 LED 芯片结构。提出了微纳图形衬底二次成核外延技术和极化诱导 3D 空穴气 p 型掺杂技术,外延材料晶体的质量达到国际同期最好水平,产品已广泛应用于国家重要工程中,如国家奥林匹克体育场、上海世博会、广州亚运会主会场和京沪高铁等,节能效果显

著。该成果推动了我国半导体照明产业的发展,获得了 2014 年国家技术发明二等奖。

由于巨大的晶格失配和热失配以及衬底不透明, GaN 外延膜易龟裂,晶体质量差,出光效率低,因此难以在硅衬底上制备 GaN 基 LED。南昌大学技术团队经过多次实验,克服了材料生长和芯片制造过程中的巨大张应力,在国际上率先研制出高效硅衬底蓝光 LED 外延材料和高出光效率高可靠性单面出光蓝光 LED 芯片,并推出了 30 多种产品,实现了产业化,产品在国内外通用照明和特种照明中得到了推广应用。

硅衬底高光效 GaN 基蓝色发光二极管的诞生使中国成为世界上继日美之后第三个掌握蓝光 LED 技术的国家。“中国芯”与日美技术形成全球三足鼎力之势,打破了日本蓝宝石衬底和美国碳化硅衬底长期垄断国际 LED 照明核心技术的局面,获得了 2015 年国家技术发明一等奖。

核心技术的不断突破促进了我国半导体照明产业的蓬勃发展。但半导体照明的产业化仍面临光效

低、寿命短和无标准三大问题。以中国科学院半导体所为代表的国内产学研技术团队从半导体照明芯片、封装、模组与应用等方面开展技术攻关,开发了自主可控的高光效长寿命半导体照明成套技术,关键技术指标处于国际领先水平。项目成果实现了全链条产业化,形成年产外延芯片 1000 万片、封装器件 1200 亿只、光源模组 5000 万套的生产规模,外延芯片份额超过美、日、欧总和,列全球首位。

项目成果在人民大会堂、广深高速和索契冬奥会等重大工程中得到规模化应用,产品出口至多个国家和地区,打破了国际垄断的局面,且经济效益与节能减排效果显著。

国内外核心技术指标的对比如表 1 所示,可以看出,我国在关键技术指标方面处于国际领先水平。该技术有力推动了我国半导体照明战略性新兴产业的发展,实现了中国照明产业的转型升级和照明产品的更新换代,成果获得了 2019 年国家科学技术进步奖一等奖。LED 芯片的市场份额(数据来源:中国光学光电子行业协会)如图 1 所示。

表 1 2019 年国内外核心技术指标的对比

Table 1 Comparison of domestic and foreign core technical indicators in 2019

Core indicator	Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences	Foreign status	Domestic and foreign institutions	Domestic level
p-GaN resistivity	0.136 Ω·cm	0.19–0.82 Ω·cm	UND, GIT, UNC and PKU	Higher
Chip quantum efficiency maintenance rate	84.7% @100 A/cm ²	<83.3%	Lumileds and UCSB	Higher
Chip luminous efficiency	252 lm/W @5 A/cm ²	202–249 lm/W	Lumileds, Samsung, Nichia, Jing Yuan and Hua Can	Equal
Thermal resistance of watt-level devices	1.89 K/W	2.77–9.7 K/W	Samsung, Siliconware and XMU	Higher
Device luminous flux maintenance rate	98.29% @85 °C for 6000 h	98%	CREE and Lumileds	Equal
Lens transmittance	99.25%	<94%	LED Link and LEDiL	Higher

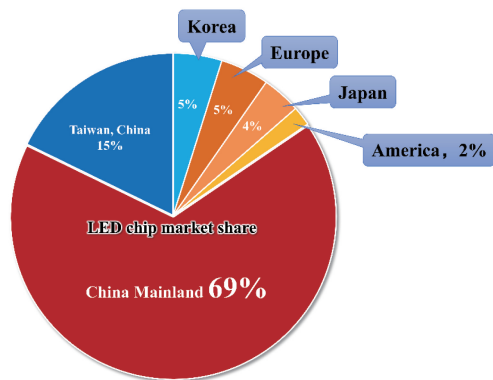


图 1 LED 芯片的市场份额
Fig. 1 LED chip's market share

2.2 LED 灯具产业的发展现状

自从 LED 产品进入市场以来,其市场认可度逐年增加,这凸显了其在消费者中的受欢迎程度。本节从当前 LED 产品的性能水平等方面介绍了固态照明全球市场现状并展望了未来发展趋势。

2.2.1 LED 灯具性能

基于 LED 的室内和室外照明产品的发光效率得到持续提高,已经超过了白炽灯、卤素灯、荧光灯和高强度放电光源的发光效率。效率的持续提高使得 LED 逐渐拓展到所有的照明应用中。图 2 为 LED 照明产品的平均发光效率的演变图。在 2010 年至 2018 年期间,上市 LED 照明产品的平均发光效率

已经从 51 lm/W 增加到 102 lm/W,翻了一番。截至 2017 年年底,在 LED 照明数据库共 67700 余种产品中,效率大于 177 lm/W 的产品约有 50 种,其中最高发光效率达到 210 lm/W。2018 年的平均效率达到了 102 lm/W。

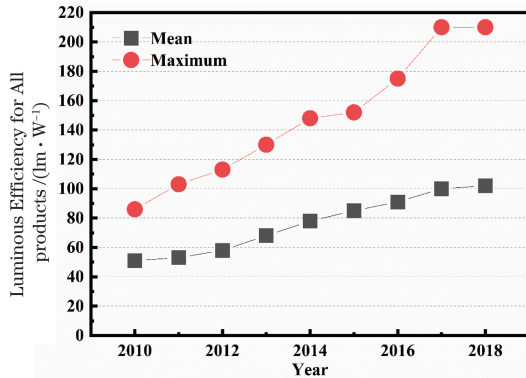


图 2 上市 LED 灯的平均发光效率^[21]

Fig. 2 Average luminous efficiency of listed LED lights^[21]

LED 灯具的白光效率损失主要来自前端的电源和电子驱动、机械和热管理结构以及后端的光扩散。不同的照明应用在灯具设计和系统效率方面有不同的考虑。表 2 列出了三种具有代表性的室内照明系统和室外照明系统的效率,其中灯具效率是将 25 °C 温度下的封装效率乘以灯具整体效率得到的。

室内照明通常使用中功率组件,在低电流密度 (<35 A/cm²) 下工作,以保持高效率 and 较低的工作温度并提高工作寿命。户外照明通常采用高功率的

表 2 室内照明系统和室外照明系统效率的当前状况和未来目标^[21]

Table 2 Current status and future goals of indoor and outdoor lighting system's efficiency^[21]

Efficiency	2019		Goal in 2035
	Indoor	Outdoor	
LED package efficiency / (lm·W ⁻¹)	200	175	249
Thermal efficiency / %	93	90	95
Driver efficiency / %	88	92	95
Optical efficiency / %	92	87	95
Overall luminaire efficiency / %	75	72	86
Luminaire efficiency / (lm·W ⁻¹)	150	126	214

封装来满足光分布的要求(较小的光源尺寸),同时采用较多的内置热和光来封装架构以提高可靠性。灯具的每个子系统都有改进性能的空间,这些子系统必须达到 95% 的效率才能满足 2035 年效率预测的目标。为了实现这些目标,需要对各种技术进行更多的研发,包括 LED 芯片源效率、光传输效率和驱动效率等。

LED 照明产品发光效率的提高影响了其他性能指标。如图 3 所示,光谱质量、光分布、光强度和系统可靠性等与发光效率同等重要。在不同照明应用中,LED 照明产品之间会存在性能差异。例如,窄聚光灯与大面积光源相比,LED 光源的集光率有限,其他方面性能受到限制。性能和成本之间的

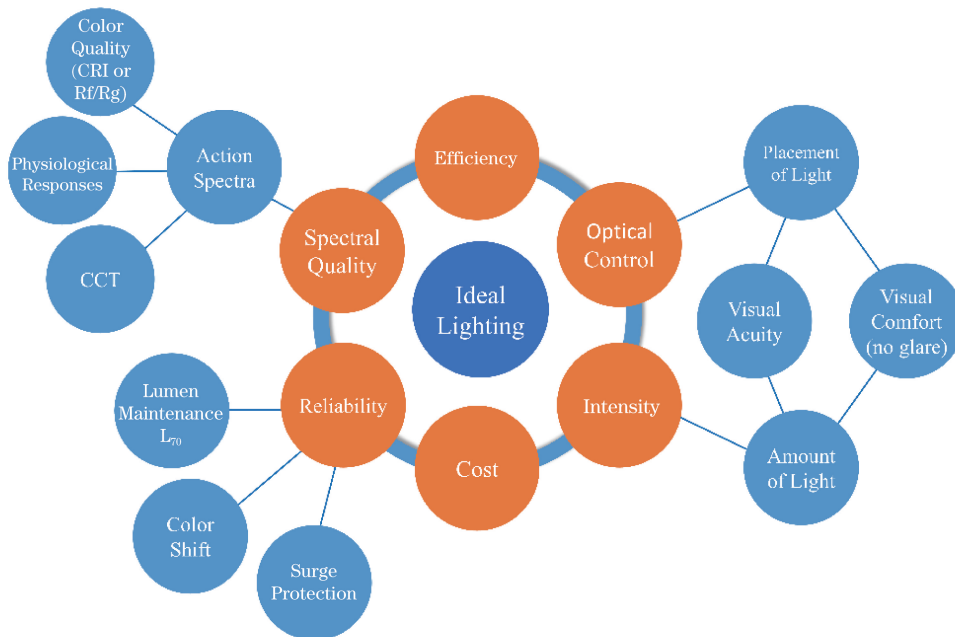


图 3 理想照明方案的关键属性示意图^[21]

Fig. 3 Schematic of key attributes of ideal lighting solution^[21]

权衡也是灯具设计的重要考虑因素。例如,成本较低的照明设备趋向于使用简单的 LED 封装,这些 LED 封装使用较高的电流进行驱动,以实现该应用所需的流明输出。但是高驱动电流会导致 LED 芯片效率的下降,并且封装中的温度高,易出现流明衰减和色偏,从而影响器件的可靠性和寿命。

关于 LED 灯具系统可靠性和寿命的测试标准,不仅需要考虑到光源的光损失,还需要考虑驱动电路等子系统故障机制。美国能源部成立了 LED 系统可靠性联盟,主要工作是从封装、色度和灯具的可靠性等方面分析系统的寿命,其中封装的使用寿命通常定义为光通量输出下降到起始值的 70% 时的时长。2008 年,美国照明工程学会 (IES) 发布了 IES LM-80,这是一种测量固态光源、阵列并对模块流明进行维护的方法,即对样品的管腔输出和色度进行测量,至少每 1000 h 采集一次数据,持续时间至少为 6000 h。目前,业界通常使用色坐标偏移量来表征色偏移,虽然没有官方标准,但是不同的认证都有明确的要求。比如,产品要获得能源之星标签,则 10 个样本中必须有 9 个样本的色偏移量在操作的前 6000 h 内小于 0.007。当封装后的 LED 集成到灯具上时,需要考虑附加因素,比如极端温度、湿度、化学侵害和电压电流波动对驱动电路以及封装材料的损害,所以关于灯具的寿命测试需要进一步建立模型,完善检测标准。

2.2.2 白光 LED 合成及封装技术

在过去的 15 年里,白光封装 LED 的发光效率已经从 25 lm/W 左右提高到 200 lm/W 以上。同时,封装 LED 的成本降低,LED 照明产品在成本上可以与传统照明产品竞争,并且耗电更低。效率的提高和成本的降低使得 LED 有足够的空间来改善照明产品的色彩性能和光分布,实现精确控制。表 3 给出了适用于照明应用的不同封装形式下的 LED 的过去、现在和未来预测的发光效率,其中 PC-LED 为荧光粉转换 LED,CM-LED 为混原色 LED。对于具有合理显色质量的无光电转换损耗的白光光源,理论最大白光效率为 414 lm/W。实际封装的固态照明的发光效率可以不断地接近该值。

PC-LED 封装结构是目前主流的白光光源结构,该结构使用蓝色 LED 激发具有黄绿色和红色波长的荧光粉来产生白光,具有工艺简单(只需要单个的 LED 芯片)及温度鲁棒性和颜色稳定性三大优点。

表 3 不同封装结构下 LED 的过去、现在和未来预测的发光效率^[21]

Table 3 Historical, current and future luminous efficiencies of LEDs with different package structures^[21]

Type	unit: lm·W ⁻¹				
	2019	2022	2025	2035	2050
PC-LED (cool white)	184	232	241	249	250
PC-LED (warm white)	168	223	237	249	250
CM-LED	114	158	196	288	325

CM-LED 封装结构是通过混合几种单色 LED 来产生白光。CM-LED 有多种可能结构,如三原色红绿蓝(RGB)、四原色红绿蓝黄(RGBY),甚至还有五原色红绿蓝黄青(RGBYC),其效率预期在 2050 年可以达到 330 lm/W。然而,目前 CM-LED 结构的效率很低,约为 110 lm/W,是理论效率 414 lm/W 的 26%。但是 CM-LED 架构的性能在未来有潜力超越 PC-LED 结构,也是未来 LED 封装发展的主要趋势。

白光 LED 的封装技术基本是从集成电路芯片封装技术发展而来的,不仅要保护芯片、引出电极,还要同时兼顾散热和光提取等性能。目前市面上常见的封装结构超过了 100 多种,但是大的分类包含以下几种:引脚式封装、表面贴装式封装、功率型封装和板上芯片封装。

引脚式封装采用引线架作各种封装结构的引脚,是最先投入市场应用的封装结构,技术成熟度较高,一般适用于小功率 LED,驱动电流较小,所以适用范围有限,不能满足一些发光强度需求较高的场合。表面贴装式封装主要通过焊接贴片的方式来封装芯片,相比引脚式封装,有效缩短了传热路径,提高了集成密度,从引脚式封装结构发展到表面贴装式封装结构也是整个电子行业发展的趋势。功率型封装是伴随大功率 LED 的出现而发展起来的,通过增加芯片的面积来提高输入功率,并通过改善芯片封装方法和提高固定设备的集成度,使 LED 芯片结点与周围环境间的热阻降到 10 K/W 以下。板上芯片封装是将裸芯片粘附在互连基板上,然后进行引线键合实现电气连接的封装结构,相对传统的表面贴片式封装,效率更高,成本更低,而且散热性能更好。

2.2.3 超越照明

半导体照明除了在通用照明领域得到大规模的应用,在农业、工业、医疗健康和信息等领域也发挥

着重大的作用。半导体照明逐渐向超越照明发展。

可调照明可以被用户动态地调节。固态照明具有光谱控制和颜色可调性,这是其他的照明产品所不能提供的。近年来,可调谐白光 LED 灯得到广泛使用。可调谐系统通常结合暖白光 LED(色温通常在 2700 K 左右)和冷白光 LED(色温通常在 6000 K 左右)来提供一个照明系统。通过调整两个 LED 颜色(或三原色)的电流,可以调整整个灯具色温。开发白色和彩色可调谐灯具产品时需要考虑流明输出、功效、颜色质量和功耗。然而,增加调色的能力会增加系统的复杂性,进而增加灯具的成本。可调谐 LED 是超越照明发展的必然趋势。

可见光通信技术是随着白光 LED 照明技术的发展而兴起的无线光通信技术,可以利用 LED 响应时间快等特点实现绿色环保的数据传送功能。将 LED 灯具与光通信系统进行一体化集成,可以使室内实现无所不在的通信,并且不增加射频带宽负担。该技术在传输距离不是很远的场合中得到了广泛的应用,其未来市场规模可与目前照明市场及家用通信市场规模相比拟。因此,基于半导体照明光源的短距离光通信技术将迎来巨大的发展机遇。

LED 照明系统可近距离照射植物,通过调控光质和发光强度,可以为不同植物定制个性化的生态环境,并提高空间利用率和单位面积栽培量,具有节能高效、发热低且可调整光量等优势。近年来,LED 已经成功用于人工补光、植物组培及遗传育种等,在植物工厂以及太空农业等领域中已得到广泛应用,并正在向农业与生物产业等领域拓展。随着 LED 性能的不断改进、价格的逐渐下降以及各类特定波长产品的开发,LED 在农业与生物领域的应用范围将会更加广阔。

LED 在医疗和健康领域也具有广泛应用。使用大功率白光 LED 替代传统的卤钨灯作为手术无影灯照明光源,增加了人体血液与其他组织的色差,医生可以获得更加清晰的视觉,为手术的成功提供了更好的保障。同时,无红外、紫外辐射,可有效避免手术创面失水和感染。LED 医疗照明也逐渐应用于其他局部检查照明工具中,如口腔灯、内窥镜灯等,更贴近自然阳光的全光谱照明灯具也是 LED 新的应用领域。

基于应用要求,利用在通用照明领域已经发展较为完善的全产业链,通过关键技术的研发,突破现有技术的限制,显著地改变照明概念和生产生活方式是超越照明未来的发展趋势。

2.2.4 LED 灯具成本

随着塑料封装材料和芯片级封装(CSP)方法的出现,固态照明价格迅速下降。LED 价格的大幅下跌与中功率 LED 封装结构有关。这种封装结构最初是为背光显示而开发的,后来被用于一般照明。2019 年,效率高达 220 lm/W(冷白)和 200 lm/W(暖白)的中功率 LED 封装结构投入生产。预计未来高功率封装价格将会下跌,中功率封装价格可能会保持更稳定的价格。

典型的大功率和中功率 LED 灯具的成本占比如图 4 所示,其中大功率 LED 是封装在陶瓷基板(3.5 mm×3.5 mm)上的 2 mm² LED 芯片,并带有一个模塑硅胶透镜,中功率 LED 是封装在 3030 塑料封装底座(3 mm×3 mm)上的两个 0.5 mm² LED 芯片。可以看出,LED 芯片设计(包括外延、晶圆加工和单晶化)成本是最大的成本因素,占成本的一半以上。封装成本和荧光粉成本的相对贡献是中功率和大功率封装成本的主要区别。大功率封装结构使用昂贵的陶瓷基片和半球形透镜,中功率封装结构中的荧光粉成本占比较大。随着产量的增加,大功率 LED 封装结构的成本持续下降。芯片的设计也发生了变化,随着制造工艺成本的降低,封装和荧光粉的成本占比将持续上升。

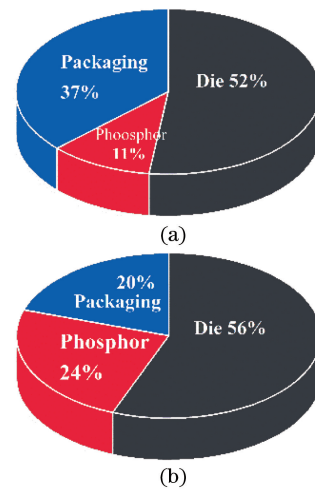


图 4 典型的 LED 灯具的成本占比^[21]。

(a) 大功率 LED; (b) 中功率 LED

Fig. 4 Cost ratios of typical LED lamps^[21].

(a) High-power LEDs; (b) mid-power LED

芯片直接贴装(COB)LED 用于高流明输出的小型光源或极高流明密度的应用场景。COB 技术通常使用大量的小模具,将其安装在印刷电路板或陶瓷基板上,然后覆盖上混合硅树脂。COB LED 经常用于筒灯、定向照明和高/低海湾照明。对于 COB

LED, 组装成本最多, 而 LED 模组成本为其次。

虽然 LED 灯具的价格已大幅下降, 但仍有下降的空间。比如: 通过优化封装结构和简化设计, 提高外延和晶片制造的产量, 进行芯片级和晶元级封装, 消除电流密度 droop 效应等, 可降低高效 LED 的成本。

在半导体照明的发展历史上, 可以看到两个关键的时间节点。首先, 2008 年, 半导体照明的成本降低到白炽灯以下, 逐渐成为大众化的照明方式; 其次, 2013 年, 半导体照明的成本低于荧光灯和高强度放电灯, 半导体照明成为最经济的照明方式。未来的半导体照明将更加注重在空间和光谱上对光进行调控, 根据人类或植物的需求调整光谱, 逐渐发展为成熟的超越照明和智能照明。

2.3 国内外 LED 标准化工作进展

由于半导体照明产品的色光性能特殊, 传统照明的标准和检测方法不能完全适用, 因此国内外都非常重视半导体照明的标准和检测工作。国际上国际照明委员会(CIE)、国际电工委员会(IEC)以及一些发达国家都纷纷着手制定标准, 我国也极为重视半导体照明的标准制定工作, 已通过各科技项目深入研究了半导体照明产品的特性及其检测技术, 为相关标准的制定奠定了基础。

2.3.1 国际及国外先进国家的 LED 标准化工作

CIE 是国际照明领域最权威的学术组织, 也是国际标准化委员会的成员之一, 侧重基础方法的研究。2010 年, CIE 对 LED 光辐射测量的标准化工作进行了初步部署和规划, 同时将 LED 产品分为小功率 LED、大功率 LED、LED 模块、LED 灯具和有机发光二极管(OLED), 分别由对应的技术委员会负责。CIE 针对 LED 发表了一系列研究报告, 其中包含多项光辐射测量标准。IEC 较为侧重产品的电气特性和安全性, 对产品性能也较为关注, 陆续出台了一系列相关标准, 包括 LED 的分类等。美国和日本针对 LED 的标准化工作也在持续进行。美国非常重视半导体照明产业的发展, 特别强调 LED 的标准化工作, 北美照明学会、美国国家标准组织、美国电气制造商协会、美国能源部、美国环保署和固态照明科技联盟等多个机构共同制定了多项国际著名的技术规范 and 标准。日本则比较重视白光 LED 的标准化工作, 成立的白光 LED 测试研究委员会专门研究照明用白光 LED 的测试方法和标准, 并联合日本照明学会、日本照明委员会、日本照明器具工业会和日本全球工业会共同制定了“照明用白光 LED 测光方法通则”等一系列有关白光 LED 的标准。

2.3.2 我国的标准化工作

我国在大力发展半导体照明产业的同时, 也十分重视标准的制定工作。目前, 国内的半导体照明标准化组织主要有国家半导体照明工程研发及产业联盟(CSA)、全国照明电器标准化技术委员会(SAC/TC224)、全国稀土标准化技术委员会(SAC/TC229)以及工业和信息化部半导体照明技术标准工作组。CSA 在 LED 照明产业发展早期, 率先制定了一系列技术规范; SAC/TC224 主要负责照明相关的标准化工作, 包括及时追踪半导体照明技术的进展和产品质量, 发布了一系列半导体照明相关标准; SAC/TC229 主要负责制定 LED 荧光粉的标准, 包括总的产品标准和系列实验方法标准。工业和信息化部半导体照明技术标准工作组着重于器件和材料的标准化工作, 已发布了多项部级标准。

3 紫外 LED 的发展现状及展望

3.1 深紫外 LED 的应用领域及技术发展

20 世纪 80 年代末, 关于氮化镓材料的相关技术取得了重大突破, 坎德拉级蓝色发光二极管(LEDs)^[10, 21-23]得到实际应用。不久之后, 氮化镓基白光发光二极管的制造初具规模。如今白光发光二极管已经成为最高效的人造光源。然而, 到目前为止, III 族氮化物材料的发射光谱只有小部分被利用。通过氮化镓和氮化铝材料的合金化, 氮化镓基发光二极管的发射可以被调整到整个紫外光谱范围(210~400 nm)。

深紫外 LED 的外延结构主要包括衬底、AlN 基层、AlGaN 过渡层、n 型掺杂 AlGaN 层、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N$ 多量子阱结构发光有源区、p 型掺杂层和电极接触层等。芯片制作工艺与传统蓝光 LED 相似, 首先 ICP 刻蚀出 n 型台面, 制作 n 型电极并退火, 再制作 p 型电极和 SiO_2 钝化层, 接着进行电极的加厚并以芯片为单位进行划裂, 最后得到分立的深紫外 LED 芯片。虽然蓝光 LED 的发展已经相当成熟, 但是紫外(UV)LED 还处于发展阶段, 其中光提取效率低下和电流注入效率低是 UV LED 面临的主要问题。光提取效率低下主要是 p-GaN 对紫外光的强吸收造成深紫外 LED 正面发出的光被大量吸收, 因此深紫外 LED 一般采用倒装结构, 也有少量垂直结构的报道。另外, 平面蓝宝石衬底不能有效地降低内部全反射, 且蓝宝石衬底比较坚硬, 造成光提取困难。在 AlGaN 基 UV LED 中, 随着 Al 组分的增加和波长的减小, 横磁(TM)模极化增

加,横电(TE)模极化减少,这是光提取效率低的又一个重要因素。对于 AlGaIn 基光电器件,较低且不对称的电子和空穴浓度导致注入到有源区的电子泄露到 p 型区,空穴注入效率降低,量子阱中有效复合发光减少,p 型区的长波寄生复合发光增加, n 型和 p 型区的电流出现扩展差,产生电流拥堵效应和热量的积累,最终降低了器件的发光效率和可靠性。深紫外 LED 的封装大体沿用了白光 LED 的封装技术,但是受应用环境(高温、高湿等)的影响,有机封装材料在紫外辐射下易老化和黄化,深紫外 LED 的封装又具有其特殊性。目前,国内外主要使用半球形透镜、氟树脂聚合物及微透镜阵列结构等来提高出光效率,使用玻璃、陶瓷和金属等无机材料来封装深紫外 LED 以提高可靠性。由于深紫外 LED 的封装技术起步较晚,目前对深紫外 LED 的封装材料、结构和工艺还缺乏系统性的研究。

目前,AlGaIn 材料质量和 p 型掺杂是困扰紫外 LED 的核心问题,尽管已有研究小组展示了基于高质量 AlN 同质衬底的高性能深紫外 LED 器件,但是考虑到未来相当长时间内 AlN 同质衬底的高昂价格,蓝宝石基紫外 LED 仍然将占据主流地位。而一旦紫外 LED 的 p 型掺杂技术获得突破,紫外 LED 的量子效率将大大提高,应用市场进而会获得飞跃式的增长。

从 2020 年开始,限定汞使用和排放的国际“水俣条约”正式生效,传统汞灯被限制生产和使用。氮化物半导体紫外 LED 与传统的汞灯相比,无汞、无臭氧,环保健康,能瞬间启动和关闭,使用寿命长,在尺寸、重量和能耗等方面优势突出,使用安全、方便,因此紫外 LED 被视为代替汞灯的绝佳选择。

紫外 C 波段(UVC,200~280 nm)的深紫外光可以高效杀灭绝大部分病毒和细菌。使用强度大于 0.09 mW/cm² 的紫外线照射冠状病毒 30 min,可以杀灭 SARS 病毒。新型冠状病毒对紫外线敏感,紫外光源在抗击新型冠状病毒中倍受关注,并发挥了重要的作用。将紫外 LED 光源应用于高铁、地铁、机场和会议室等公共环境中,可以有效防御各种病毒的传播,为公共卫生安全提供更好的保障。

此外,紫外 LED 小巧便携、易于设计,可以与空调、冰箱、洗衣机、空气净化器、饮水机等各种家电产品集成,在家居生活中随时随地杀灭细菌和病毒,为人们提供更加清洁安全的生活环境。

紫外 B 波段(UVB,280~320 nm)的紫外线在治疗皮肤病和骨质疏松症等方面效果突出。随着我国老龄化人口的日益增多,UVB 波段的紫外线在预防和治疗骨质疏松症方面的产业价值就高达千亿元。

基于紫外 LED 可以实现非视距的保密通信,这一功能使得紫外 LED 具有军民两用的特点,美日等国在先进紫外 LED 材料和器件领域对我国防备极严。

因此,氮化物半导体紫外光源具有巨大的产业价值和战略价值,应充分布局,并大力支持相关装备、核心材料、芯片器件及各领域应用等全链条的技术研发。

值得注意的是,波长小于 365 nm 的 LED 器件的内量子效率(EQE)的大幅下降标志着紫外发光二极管技术从基于镉镓氮转变为基于铝镓氮。如图 5 所示,从事紫外发光二极管研究的中国科研机构主要包括中国科学院半导体所和北京大学等,国外科研机构包括 Crystal IS 和 SETi 等。

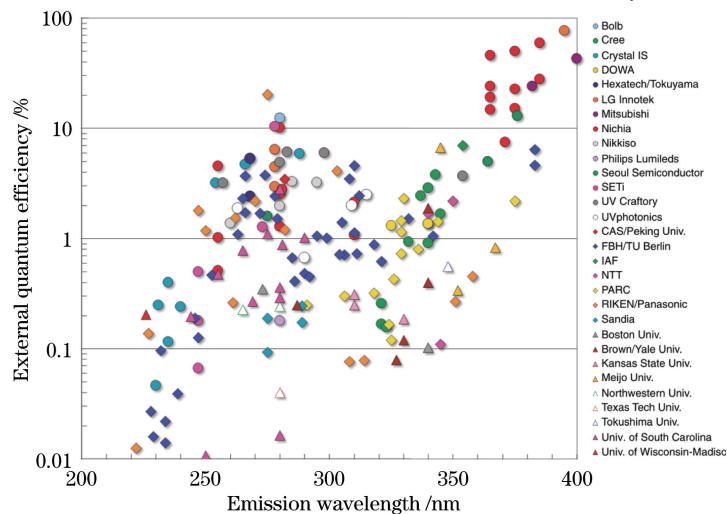


图 5 紫外光源主要研发机构及技术水平^[24]

Fig. 5 Main research and development institutions and technical levels of UV light sources^[24]

实现长寿命、高效率和高功率的深紫外(DUV)发光二极管依然面临着许多挑战,每一个关键指标的提升都依赖于一系列技术突破,回顾可见波发光二极管的快速发展,我们有理由对实现高效率和高功率的深紫外光源持乐观态度。

3.2 石墨烯缓冲层深紫外 LED

目前,AlGaIn 基 LED 的外延生长主要是在蓝宝石衬底上进行的,由于蓝宝石衬底尺寸受限、电导热传导性能差且与外延材料存在晶格失配和热失配等,基于蓝宝石衬底的深紫外器件工艺存在生产效率难以提高、外延材料位错密度高、器件散热性差及垂直结构器件难以构筑等问题,这对于深紫外器件发光效率的提升和制造成本的降低是极大的障碍。发展新型衬底和外延技术,突破大电流下的散热瓶颈,实现高质量、低成本的氮化物外延生长,成为未来深紫外 LED 发展的关键。

近年来,二维材料如石墨烯等作为缓冲层被应用于(准)范德瓦耳斯外延生长氮化物中。石墨烯表面无悬挂键,可有效减弱外延层与衬底的相互作用,一方面可以缓解晶格失配和热失配带来的高应力与高密度位错^[25-26],另一方面也为器件的机械剥离与转移提供了新的思路。同时,三族金属在石墨烯上具有较低的迁移势垒,能降低外延层位错密度,缩短成膜时间。石墨烯材料具有超快的载流子迁移率、超高的热导率和良好的透光性,石墨烯外延衬底同时兼具电极以及散热功能,为构筑高功率垂直深紫外器件提供了良好的条件。2010 年,Chung 等^[27]首次在石墨烯蓝宝石衬底上生长了氮化物 LED,正式拉开了石墨烯生长氮化物的序幕。

然而,当前石墨烯上生长的氮化物薄膜质量与传统单晶衬底仍有较大差距。2012 年,Choi 等^[28]采用一步法在蓝宝石/石墨烯衬底上进行 GaN 外延生长,研究发现 GaN 与蓝宝石之间的浸润度会因为石墨烯的加入而发生改变,随着石墨烯层数的增加,所生长的 GaN 的光学特性得到改善。2014 年,Kim 等^[29]利用 SiC 梯度表面生长出具有均匀台阶的石墨烯,通过改变台阶高度来增加成核,获得了高质量 GaN 单晶薄膜。2015 年,Al Balushi 等^[30]系统研究了石墨烯表面对 GaN 和 AlN 成核层的影响,发现石墨烯表面台阶有利于氮化物成核生长。Chae 等^[31]对石墨烯等离子处理后,在铺有石墨烯的 SiO₂/Si 和蓝宝石衬底上均生长了无黄光带的高质量 GaN,拉曼光谱显示应力得到有效释放。

2018 年,中国科学院半导体所的李晋闽团队与

北京大学刘忠范课题组合作,研究发现,石墨烯可以调节 AlN 的成核密度,大幅度提高 AlN 的生长速度,降低融合边界的位错密度并显著改善外延层中的应力^[32]。随后,他们利用石墨烯增加了 Al 的迁移速率,使纳米图形衬底上的 AlN 合并高度从 3 μm 降低到 1 μm 以内,大幅度提高了生长效率。为了实现氮化物在缺乏悬挂键的二维材料上的有效吸附成核^[33],两个团队利用氮气等离子体处理了石墨烯表面,实现了二维材料上的高质量薄膜生长^[34],AlN 外延层的半峰全宽(FWHM)从 698.6°(无石墨烯)降低到了 315.5°(有石墨烯);在无石墨烯情况下,AlN 生长中的螺位错和刃位错的密度分别为 $1.06 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 和 $6.29 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$,而在等离子体处理过的石墨烯中,螺位错和刃位错的密度分别降低到 $2.67 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 和 $2.45 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$;AlN 外延层的应力从 0.49 GPa(无石墨烯)降低到 0.11 GPa(有石墨烯);相比无石墨烯情况,基于石墨烯的器件的电致发光(EL)强度提高了两个数量级;在相同的输入电压下,基于石墨烯的器件展示出更低的电流和更高的开启电压。同时,石墨烯层间易于滑动的特性为制备可转移的薄膜 LED 器件提供了可能。可转移的薄膜 LED 器件可以转移至任意衬底,比如高导电率、高导热率的金属衬底以及柔性塑料衬底等,且衬底可重复利用。针对深紫外器件散热技术难题,石墨烯同样提供了新的解决方案,有望利用石墨烯材料的高导热特性实现高性能深紫外发光器件。

石墨烯基新型缓冲层已经成为第三代半导体的核心材料,有望通过石墨烯实现高质量氮化物的外延生长、高效率深紫外 LED 的构筑及柔性器件的无损转移等。突破石墨烯基 DUV-LED 的技术瓶颈,解决石墨烯与第三代半导体结合所需的关键技术,有助于深紫外固态光源市场的发展。

4 结束语

半导体照明产业的蓬勃发展带来了百年传统照明产业转型的重要契机。自从 LED 产品投放市场以来,其市场占有率逐年上升。经过多年的发展,基于氮化物材料的半导体照明技术已经进入了快速有序的发展阶段,部分关键技术日趋成熟。与传统照明技术相比,LED 的电光转换效率较高,并且具有与传统灯具接近的外形尺寸、光分布以及光输出水平,已完全具备替代传统灯具的条件。同时,其节能环保的优良性能也日益受到消费者的青睐。根据美

国能源部固态照明报告预测,到 2035 年,LED 的市场普及率将达到 84%,是 2017 年市场普及率的 4.42 倍。继续采用当前的固态照明发展路线,到 2035 年,每年将节省 4.8 库德(1 库德相当于 24 亿吨石油)。随着照明控件的普及和 LED 功效的提高,节能总量有望进一步上升。固态照明的优良性能已带来相当可观的节能效果,但 LED 领域仍有进一步改善的空间,在成本、人性化和智能化等方面还有很多技术问题需要解决。

在基础技术研究方面,随着半导体照明机理研究的深化,新的概念和理论层出不穷,基于氮化物的 LED 结构正在向微纳结构方向发展,纳米图形衬底、等离子体激元、纳米线结构、壳层结构以及自旋 LED 等正在成为研究热点。基于二维材料的氮化物外延为优化器件性能、拓展外延衬底选择及降低外延成本提供了新的可能。在应用技术方面,LED 器件的小型化和高度集成化使得半导体照明在白光通讯、智能信息网络、新型建筑、无线互联网及智能探测等领域中的应用成为可能。

此外,LED 基于蓝光技术向长波长绿光、黄光和红光方向的发展将开拓其在生物、医疗、保健、航空航天和通讯等领域中的应用,其向短波长紫外方向的发展将有助于开发高效节能、环境友好、智能化的紫外光源及其应用领域。AlN 和 AlGaIn 材料的外延技术已取得巨大进步,材料质量和掺杂水平也获得了显著提升,深紫外照明领域不断取得突破。随着新型高效量子结构及光提取技术的出现,基于氮化物的深紫外 LED 的外量子效率不断提升。但是,深紫外 LED 的发光效率依然存在很大的提升空间。通过材料外延质量的提升以及芯片器件制备新技术的应用,深紫外 LED 的外量子效率有望提升到 30%以上,器件寿命将超过 10^4 h。深紫外 LED 将会在消毒净化、无创光疗、光固化及环境监测等众多应用领域中获得广泛的应用。

总而言之,半导体照明对于节约能源和保护环境具有深远意义,有利于优化照明产业结构和推动相关应用领域的发展。我国要在战略上充分重视半导体照明产业,发挥社会主义体制的优势,凭借科学明晰的行业布局和长远准确的发展战略,继续发展半导体照明产业,进而在世界高科技领域占领高地。

参 考 文 献

- [1] Pankove J I, Miller E A, Berkeyheiser J E. Electroluminescence in GaN[M]//Luminescence of crystals, molecules, and solutions. Boston, MA: Springer, 1973: 426-430.
- [2] Nakamura S J, Senoh M, Iwasa N, et al. High brightness InGaN blue, green and yellow light-emitting diodes with quantum well structures[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1995, 34(7A): L797-L799.
- [3] Amano H, Sawaki N, Akasaki I, et al. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer[J]. Applied Physics Letters, 1986, 48(5): 353-355.
- [4] Amano H, Kito M, Hiramatsu K, et al. P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI)[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1989, 28(12): L2112-L2114.
- [5] Nakamura S. *In situ* monitoring of GaN growth using interference effects[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1991, 30(8): 1620-1627.
- [6] Nakamura S. GaN growth using GaN buffer layer[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1991, 30(10A): L1705-L1707.
- [7] Nakamura S, Mukai T, Senoh M, et al. Thermal annealing effects on P-type Mg-doped GaN films[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1992, 31(2B): L139-L142.
- [8] Nakamura S, Iwasa N, Senoh M, et al. Hole compensation mechanism of p-type GaN films[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1992, 31(5A): 1258-1266.
- [9] Nakamura S, Mukai T. High-quality InGaN films grown on GaN films[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1992, 31(10B): L1457-L1459.
- [10] Nakamura S, Mukai T, Senoh M. Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(13): 1687-1689.
- [11] Nakamura S, Senoh M, Nagahama S I, et al. InGaN-based multi-quantum-well-structure laser diodes[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1996, 35(1B): L74-L76.
- [12] Cho J, Park J H, Kim J K, et al. White light-emitting diodes: history, progress, and future[J]. Laser & Photonics Reviews, 2017, 11(2): 1600147.
- [13] Narukawa Y. White-light LEDs[J]. Optics and Photonics News, 2004, 15(4): 24-29.
- [14] Narukawa Y, Narita J, Sakamoto T, et al. Ultra-high efficiency white light emitting diodes[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(41): L1084-L1086.
- [15] Vennéguès P, Beaumont B, Bousquet V, et al. Re-

- duction mechanisms for defect densities in GaN using one- or two-step epitaxial lateral overgrowth methods [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 87(9): 4175-4181.
- [16] Kawaguchi Y, Sugahara G, Mochida A, et al. Low-dislocation density AlGaIn layer by air-bridged lateral epitaxial growth[J]. *Physica Status Solidi (c)*, 2003, 0(7): 2107-2110.
- [17] Xiao M, Zhang J, Duan X, et al. A partly-contacted epitaxial lateral overgrowth method applied to GaN material[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23842.
- [18] Okamoto K, Niki I, Shvarts A, et al. Surface-plasmon-enhanced light emitters based on InGaIn quantum wells[J]. *Nature Materials*, 2004, 3(9): 601-605.
- [19] Kwon M K, Kim J Y, Kim B H, et al. Surface-plasmon-enhanced light-emitting diodes[J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(7): 1253-1257.
- [20] Yao Y C, Hwang J M, Yang Z P, et al. Enhanced external quantum efficiency in GaN-based vertical-type light-emitting diodes by localized surface plasmons[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22659.
- [21] Pattison M, Hansen M, Bardsley N, et al. 2019 lighting R&D opportunities [EB/OL]. (2020-01-15) [2020-08-10]. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/01/f70/ssl-rd-opportunities2-jan2020.pdf>.
- [22] Akasaki I, Amano H, Hiramatsu K, et al. High efficiency blue LED utilizing GaN film with AlN buffer layer by MOVPE [C]//Gallium arsenide and related compounds 1987, September 28–October 1, 1987, Heraklion, Crete. [S.l.: s.n.], 1987.
- [23] Amano H, Akasaki I. GaN blue and ultraviolet light emitting devices[J]. *Solid State Physics*, 1990, 25(6): 399-405.
- [24] Kneissl M, Rass J. III-nitride ultraviolet emitters [M]. Cham: Springer, 2016.
- [25] Jin J, Cuong T V, Han M, et al. Significant reduction of AlN wafer bowing grown on sapphire substrate with patterned graphene oxide[J]. *Materials Letters*, 2015, 160: 496-499.
- [26] Qi L, Xu Y, Li Z Y, et al. Stress analysis of transferable crack-free gallium nitride microrods grown on graphene/SiC substrate[J]. *Materials Letters*, 2016, 185: 315-318.
- [27] Chung K, Lee C H, Yi G C. Transferable GaN layers grown on ZnO-coated graphene layers for optoelectronic devices[J]. *Science*, 2010, 330(6004): 655-657.
- [28] Choi J K, Huh J H, Kim S D, et al. One-step graphene coating of heteroepitaxial GaN films[J]. *Nanotechnology*, 2012, 23(43): 435603.
- [29] Kim J, Lee M, Shim H J, et al. Stretchable silicon nanoribbon electronics for skin prosthesis[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5747.
- [30] Al Balushi Z Y, Miyagi T, Lin Y C, et al. The impact of graphene properties on GaN and AlN nucleation[J]. *Surface Science*, 2015, 634: 81-88.
- [31] Chae S J, Kim Y H, Seo T H, et al. Direct growth of etch pit-free GaN crystals on few-layer graphene [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(2): 1343-1349.
- [32] Qi Y, Wang Y, Pang Z, et al. Fast growth of strain-free AlN on graphene-buffered sapphire[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2018, 140(38): 11935-11941.
- [33] Chang H L, Chen Z L, Li W J, et al. Graphene-assisted quasi-van der Waals epitaxy of AlN film for ultraviolet light emitting diodes on nano-patterned sapphire substrate[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(9): 091107.
- [34] Chen Z L, Liu Z Q, Wei T B, et al. Improved epitaxy of AlN film for deep-ultraviolet light-emitting diodes enabled by graphene[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(23): 1807345.