

分类号

密级

U D C

编号

厦门大学

博士后研究工作报告

倒装 LED 芯片工艺关键技术研究

臧雅姝

工作完成日期 2016.12

报告提交日期 2016.12

厦门大学

2016 年 12 月

倒装 LED 芯片工艺关键技术研究

Development of Chip Technology for Reliable Flip-chip LEDs

博士后姓名 臧雅姝

流动站（一级学科）名称 物理学

专业（二级学科）名称 凝聚态物理

研究工作起始时间 2015 年 2 月

研究工作期满时间 2017 年 2 月

厦门大学

2016 年 12 月

# 厦门大学博士后研究工作报告

## 著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用博士后研究工作报告的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交该报告的纸质版和电子版，有权将该报告用于非赢利目的的少量复制并允许该报告进入学校图书馆被查阅，有权将该报告的内容编入有关数据库进行检索，有权将博士后研究工作报告的标题和摘要汇编出版。保密的博士后研究工作报告在解密后适用本规定。

本研究报告属于： 1、保密（ ）， 2、不保密（ ）

纸本在年解密后适用本授权书；

电子版在 年解密后适用本授权书。

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 厦门大学博士后工作报告

---

## 摘要

基于发光二极管(LED)的固态照明(solid-state lighting)技术有着诸多产业优势,比如制备成本低,使用寿命长,转换效率高等,因而被广泛地应用于生活与生产的各个领域。同时,芯片工艺的成熟也使得 LED 器件的外量子效率及其光提取效率呈现大幅度的提升,为高性能的 GaN 基 LED 器件的制备与研究奠定了基础。然而,常规水平结构的 LED 器件受散热及电流扩展的瓶颈影响,其中大功率固态照明的应用上受到极大的限制。随着当前大功率 LED 器件需求的不断提升,科研工作者把研究目标转向倒装 LED 器件的开发。倒装式芯片通过将二极管结构倒置,一方面,蓝宝石出光面朝上可有效提升出光效率,另一方面,电极结构朝下可直接封装在导热性能较好的基板上,可有效提升二极管内部的散热速率,所以更适用于交通信号灯、显示屏背光源等大电流、大功率型 LED 元件。本研究针对倒装结构 LED 芯片的开发为研究重点,致力于芯片制程的关键技术研究,包括三种倒装 LED 芯片制程的构建,以及芯片制程中存在异常点的分析与解决。同时,还研究了 p-GaN 接触电极的优化、反射层的设计等因素对 LED 芯片电压以及发光强度的影响。此外,为了提高倒装 LED 芯片的产品市场竞争力,我们还对低成本电极结构的开发做出了相应的探索研究。具体来说,主要研究内容如下:

首先,开发了三种不同倒装 LED 芯片的制程工艺,并且研究和分析了影响三种不同倒装 LED 芯片光电性能的关键因素,并提出相应的改善方案,最终实现了倒装 LED 芯片光电特性以及器件稳定性的显著提升。在该部分研究中,我们以三种不同制程的 LED 芯片工艺作为对比,系统地分析了 p-GaN 欧姆接触电极结构以及反射层结构的调整对芯片电压和亮度等性能改善的影响。

其次,针对上述三种倒装结构 LED 芯片光电特性以及可靠性的分析为基础,提出不同的失效性理论和解决方案,进一步提升器件性能和稳定性。该部分内容主要是以芯片老化测试及失效性分析为基础,对前面 LED 芯片制程优化结果给出反馈信号,并提出有效的解决方案;重点以接触界面改善和工艺流程调整为途径,解决器件良率、老化光衰等关键生产质量问题,综合提升器件性能和芯片工艺稳定性。目前, DBR-base

---

# 厦 门 大 学 博 士 后 工 作 报 告

---

---

倒装 LED 与 AIO-base 倒装 LED 制程已均导入三安倒装芯片量产中，并且完全取代了前期的 Ag-base 倒装 LED 产品。公司也会进一步扩大倒装 LED 芯片的生产，因此对器件光电性能以及稳定性的提升有待进一步的改善。

再次，我们还进行了深紫外 LED 倒装芯片的工艺开发。该部分中，针对深紫外 LED 的常见工艺难点，重点优化了 p-GaN 与 n-AlGaIn 欧姆接触的关键条件，包括电极材料的选择、熔合条件以及对接触前预处理的优化等，最终实现了理想的 p、n 电极的有效欧姆接触，器件性能方面获得了与目前业界紫外 LED 芯片相当的电压以及亮度水平。以此为基础，还研究了当前深紫外 LED 芯片难以克服的光衰问题，通过失效模型的分析及工艺调整，以及外延同事的配合调整，老化光衰问题获得了明显的改善。

最后，为了提升倒装 LED 芯片的市场上竞争力，研究还开发了低成本得电极结构，通过优化芯片制程工艺，电极接触和器件性能均获得了显著的提升，在器件稳定性方面也获得了较好的表现。

通过上述工作的研究，我们不仅实现了倒装 LED 芯片光电性能与可靠性的显著提升，在整体 LED 芯片工艺的制备与开发方面也积累了宝贵的经验，对于后续高性能 LED 芯片的开发、制备及产业化均具有重要的借鉴意义。

关键词：发光二极管，倒装结构，Ag 电极，DBR 反射层，深紫外 LED，Sn 电极

## Abstract

In recent years, light emitting diodes (LED) based solid-state lighting technology has been developed intensively and widely used in our daily life due to its attractive device performance, such as low fabrication cost, long service life and high conversion efficiency. As the chip technology continually developed, the external quantum efficiency (EQE), light extraction efficiency and final device performance for the LEDs has been significantly improved, resulting a further improvement in the device performance. However, with the increase in demand of high-power LED devices, the regular structure of LEDs (lateral LEDs) encountered their bottleneck due to the limited thermal conductivity and current spreading.

By inverting the LED structure and packaged on the heat-sink with emitting from the substrate side, the flip-chip LEDs demonstrate superior advantages in light extraction, current spreading and heat dissipation, which show the great potential application in high-power lighting devices, e.g. traffic light and display backlight. And this kind of new type of LED devices also have gained much attentions in recent researches.

In this work, we focused on the research and development of reliable fabrication process about the flip-chip LEDs, including of the process technology, failure analysis and performance improvement for three typical device structures. Moreover, the ohmic contact on p-GaN, light reflective layer, and low-cost electrode materials also have been optimized by considering their influence on the devices' performance and cost, with considering the improvement of our product's competitiveness. In detail, the fundamental investigations and researches have been carried out as following:

Firstly, three different typical structures of flip-chip LEDs have been developed. With comparing the device performance for the three kind of LEDs, the influence of different p-GaN ohmic contact and reflecting layer on the devices' opening voltage have been discussed in detail, as well as the output power. By considering these issues, both efficiency and stability have been obviously improved.

The second part of this report, the failure analysis for the three different typical



# 厦 门 大 学 博 士 后 工 作 报 告

---

---

structures of flip-chip LEDs has been taken out. By analyzing and discussing these results, the actual physical aging mechanisms and modes for the devices were proposed with additional improvement measures. By optimizing the chip processes and introducing of new surface treatment, a much reliable fabrication process was established.

Additionally, deep-UV (DUV) LED in a flip-chip structure also has been developed. In this part, the key fabrication processes, such as the ohmic contact on p-GaN or n-AlGaN layer, the suitable electrode materials and the fusing conditions, have been deeply investigated, resulting a satisfied device DUV-LED performance. By optimizing the ohmic contact and epitaxy technology (collaborate with colleagues), the light failure issue also has been studied and solved to a certain degree.

Finally, a much low-cost contact electrode for flip-chip LEDs has been developed, which exhibited a well-performed optoelectrical properties and device stability.

Key words: LED; Flip-Chip; Ag based LED; DBR; Deep-UV; Sn Bump

# 厦 门 大 学 博 士 后 工 作 报 告

---

---

## 目 录

摘要 .....	I
Abstract.....	III
<b>1 绪论 .....</b>	<b>2</b>
1.1 LED 芯片简介.....	3
1.2 常用的 LED 芯片结构 .....	5
1.3 UVC LED 芯片简介 .....	8
1.4 主要研究内容和章节安排 .....	10
<b>2 倒装 LED 芯片结构研究.....</b>	<b>13</b>
2.1 Ag-Base 倒装 LED 芯片结构研究.....	14
2.2 DBR base 倒装 LED 芯片结构设计 .....	17
2.3 AIO 倒装 LED 结构设计及讨论.....	24
2.4 AIO 结构 LED 与 DBR base LED 的性能比较 .....	29
2.4 本章总结 .....	36
<b>3 深紫外倒装 LED 芯片结构研究.....</b>	<b>37</b>
3.1 深紫外 LED 芯片 p、n 电极的欧姆接触优化 .....	37
3.2 深紫外 LED 芯片光电特性表征 .....	42
3.3 深紫外 LED 芯片可靠性表征 .....	49
3.4 本章总结 .....	59

# 厦 门 大 学 博 士 后 工 作 报 告

---

---

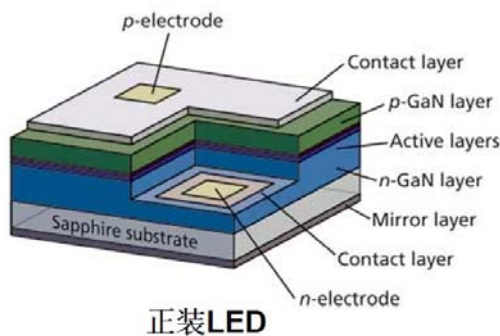
4 工作总结与展望 .....	60
参考文献 .....	62
致谢 .....	67
博士期间发表的学术论文 .....	68
博士后期间发表的学术论文 .....	69
个人简历 .....	70
联系地址 .....	71

## 1 绪论

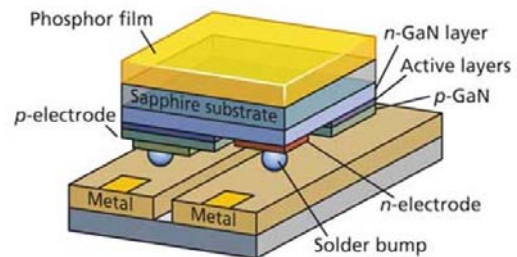
固态照明（Solid—State Lighting, SSL）是一种全新的照明技术，利用半导体芯片作为发光单元，直接将电能转换为光能。固态照明具有节能、环保、寿命长、免维护、易控制等优点而被广泛应用于信号指示灯、汽车大灯、LCD 背光、道路照明、室内照明、商业照明等领域。与白炽灯的钨丝发光和节能灯的三基色粉发光不同，半导体发光二极管（LED）采用半导体材料的电子-空穴复合发光，光电转换效率较高，是一种绿色高效的固态照明技术<sup>[1]</sup>。目前，LED 芯片的外延生长技术、芯片工艺技术以及芯片封装技术日趋成熟，芯片市场的开拓也已经很全面化，LED 器件工艺关键技术的开发促使着芯片功率和效率在不断的提升。然而，随着 LED 芯片应用在高端市场的开拓，对大功率、高可靠性器件需求的不断提升，常规水平结构的 LED 芯片由于受电流扩展及散热的限制，一般难以实现较大的功率，科研工作者更加关注于适合于大功率器件的倒装 LED 芯片结构以及垂直芯片结构的研究<sup>[2]</sup>。尤其是倒装 LED 芯片，由于同时具备较高的器件性能和稳定性以及低成本的优势而备受关注，如图 1.1 所示<sup>[3]</sup>。



→ 中/大功率的LED芯片需求提升



正装LED



倒装LED

# 厦 门 大 学 博 士 后 工 作 报 告

---

图 1.1 大功率 LED 器件的应用领域，以及正装与倒装 LED 芯片结构示意图<sup>[3]</sup>

倒装 LED 是将二极管结构倒置，从蓝宝石一侧出射光，而电极一侧可固定在散热更好的基板上<sup>[4]</sup>。目前，业内对倒装 LED 芯片的开发均已全面的展开，并已取得了突破性的进展<sup>[5]</sup>，为了使生产企业在 LED 行业竞争的潮流中站稳脚跟，继续开发和完善倒装 LED 芯片的制备工艺，从而提升 LED 芯片的转换效率，已经势在必行。目前，倒装 LED 芯片结构的制备仍然存在若干亟待解决的问题，包括接触电阻的改善、出光效率的提升以及器件稳定性的改善等<sup>[6-8]</sup>。在本工作中，主要针对当前倒装 LED 芯片技术的关键问题展开研究，重要开发了三种 p-GaN 接触电极与电流扩展层的器件结构，创新性地对透明导电层表面进行了改善处理，提升了器件的光电性能以及稳定性；并进一步将倒装芯片工艺应用在深紫外 LED 器件的开发中，获得了较好的效果，通过优化芯片制程，实现了电压与亮度的显著提升。

## 1.1 LED 芯片简介

### 1.1.1 LED 产业介绍

近年来，随着全球能源危机以及环境污染问题的日益严重，耗能高且具有污染性的光源逐渐被淘汰，节约型绿色光源受到广泛重视。其中固态照明（Solid-state lighting, SSL）作为新一代照明技术，是一种通过将电能直接转换为光能的绿色光源，包括发光二极管（Light Emitting Diode, LED）、有机发光二极管（Polymer Light Emitting Diodes, PLED）等<sup>[9]</sup>。以氮化物半导体材料为基础的发光二极管（LED），由于其具有转换效率高、节能、环保、寿命长、体积小等优势，而被广泛用于室内外照明，舞台灯，LCD 背光源，信号指示灯，汽车灯等领域，是一种即将逐渐取代传统的照明技术而成为当前重点推广的绿色照明技术，对于全球能源日趋紧张的当今意义重大。源于此，半导体照明技术受到世界各国及产业界的广泛关注，并推出一系列发展规划扶持本国半导体照明产业的发展。我国从 2003 年紧急启动国家半导体照明工作以来，LED 产业迎来了迅猛的发展。从 2014 年前瞻产业研究院发布的《2014-2018 年中国 LED 照明产业市场前景与投资战略规划分析报告》显示，2014

# 厦 门 大 学 博 士 后 工 作 报 告

年全球 LED 照明产值将达到 350-400 亿美元，未来五年国内 LED 将处于高速增长期，未来五年产值总计将超过 1 万亿元<sup>[10]</sup>。目前，国内 LED 照明的普及率才 20-30%，未来五年 LED 照明的增长率可能超过 80%，产值将保持 25%以上的年复合增长率。三安光电作为龙头企业具有很大的技术优势和规模效应，虽然产品价格仍将小幅下降，但盈利能力随着开工率和良率提高将开始逐步回升。

## 1.1.2 LED 芯片工作原理

LED 芯片的基本结构由半导体 P-N 结组成。与普通二极管一样，LED 也具有单向导通特性。当 LED 芯片处于正向偏置状态时，电子由 N 型掺杂区域注入 P 型掺杂的区域，空穴由 P 型掺杂的区域注入 N 型掺杂区域，电子和空穴在结区复合产生光子。图 1.2 为 LED 芯片的发光原理示意图。

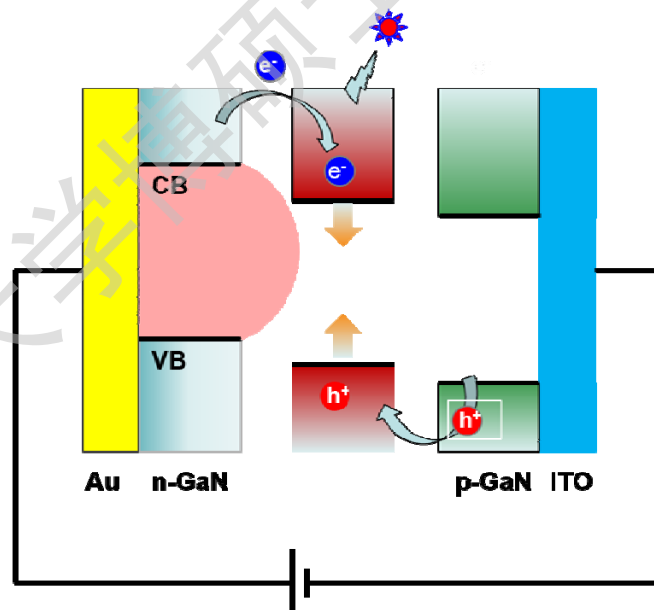


图 1.2 GaN 基半导体材料发光二极管工作原理示意图

由于发光二极管是直接将电能转化为光能，在光电转换效率方面具有极高的优势，内量子转换效率一般可达到 90%以上。目前，针对 LED 芯片的转化效率提升技术主要表现在以下几个方面：1. 内量子效率的提升：将 P-N 结的结构由同质结转

# 厦门大学博士后工作报告

变为异质结及双异质结可以增强电子-空穴在结区的辐射复合效率，从而提高 LED 的内量子效率；并进一步改进外延技术，提升外延晶体质量，抑制非辐射复合发光，也是有效的提升内量子效率的关键。2. 光提取效率的提升：通过芯片结构的设计提升 LED 的出光效率。3. 注入效率提升：通过 p、n 电极的接触改善以及电流扩展的均匀性提升可有效提升 LED 的注入效率。上述这些因素决定着 LED 器件性能的优劣，是 LED 芯片外延及芯片制备过程中需重点考虑的方面。

## 1.2 常用的 LED 芯片结构

目前常采用的 LED 芯片结构主要有三种，分别为正装结构、垂直结构和倒装结构，如图 1.3 所示：

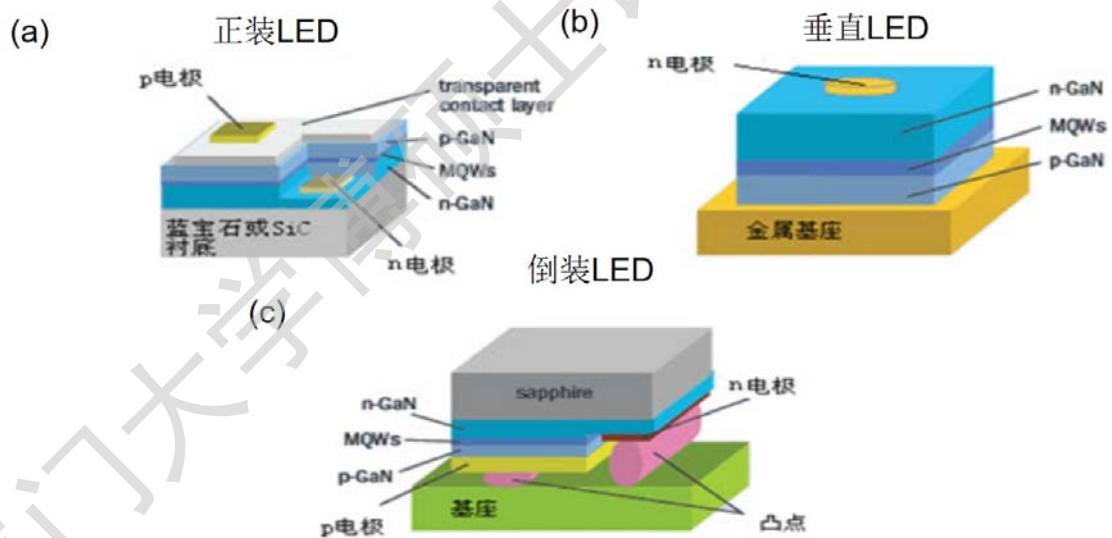


图 1.3 (a) 正装 LED 芯片结构示意图，(b)垂直 LED 芯片结构示意图，以及(c)倒装 LED 芯片结构示意图

- **水平芯片结构：**

水平结构芯片（正装 LED 芯片）是 GaN 基 LED 基本结构，其特点为：LED 芯片的正、负电极都位于外延结构的同一侧，此结构被称之为水平结构 LED 芯片，如图 1.3(a)所示。水平结构的 LED 正装芯片是最早出现的芯片结构，也是小

# 厦 门 大 学 博 士 后 工 作 报 告

---

功率芯片中普遍使用的芯片结构，工艺技术也相对较为成熟，但该结构中由于 p、n 电极位于 LED 芯片的同一侧，容易出现电流拥挤现象（电流扩展不均匀），而且热阻较高、导热性能差，不利于在中、大功率 LED 器件中应用。水平结构 LED 芯片的制造过程中，只需在 p-GaN 外延层的表面蒸镀欧姆接触金属制作 p 型电极，采用感应耦合等离子（Inductive Coupled Plasma, ICP）蚀刻掉部分 p-GaN 和多量子阱 MQW 直至暴露出 n-GaN 材料，然后在 n-GaN 上制作 n 型电极。因此，水平 LED 芯片具有工艺简单，制造成本低的特点，仍是当前主要应用的 LED 芯片结构。

- **垂直芯片结构：**

垂直芯片结构是由美国 Cree 公司所发展和采用的，以 SiC 衬底制造垂直电极结构的 GaN 基 LED 的芯片结构，通过 n 型 GaN 面出光，p、n 电极位于芯片的两面。该结构可有效解决芯片的散热和挡光的问题，且垂直的电极结构特点更有利于载流子的注入，提高载流子的复合效率。但是 SiC 衬底非常昂贵，而且加工也更加困难，因此导致在 SiC 衬底上制造的 LED 芯片价格较贵。为了克服这一难点，目前，学术界和工业界主要采用晶圆键合技术和激光剥离技术相结合的制备工艺将 GaN 外延片从蓝宝石衬底转移到具有良好电、热导特性的衬底材料上（如 Si、CuW、ZnO 等衬底），器件电极上下垂直分布，从而彻底解决了正装、LED 芯片中因为电极平面分布、电流侧向注入导致的诸如散热、电流分布不均匀、可靠性等一系列问题。垂直结构 LED 芯片示意图如图 1.3(b)所示。尽管如此，由于该类型芯片在制程中，采用晶片键合、激光剥离、表面粗化等较为繁琐的工艺技术，极大的增加了制程的成本与制程复杂度。因此，垂直结构 LED 的芯片在实际生产及应用中受到较大的限制。

- **倒装芯片结构**

为了克服水平结构 LED 芯片的缺点及垂直 LED 芯片制备工艺复杂的确定，研究人员将倒装技术应用于 LED 芯片的制造工艺中，如图 1.3(c)所示。倒装技术就是将水平结构 LED 芯片进行倒置，p 型电极采用具有高反射率的金属薄膜，从而使光



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库