

分类号_____

密级_____

U D C_____

编号_____

厦 门 大 学
博 士 后 研 究 工 作 报 告

金属电极性能研究

Research on properties of PAD

王 锋

工作完成日期 2015年2月—2016年12月

报告提交日期 2016年12月

厦 门 大 学 (福建)

2016年12月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

随着 LED 亮度的不断提升和制程的不断优化, 相同光效下芯片的尺寸越缩越小, 芯片制造成本也不断降低, 市场占有率不断扩大。因此, 对于芯片可靠性的研究及不断改善逐渐成为了 LED 应用所面临的难点之一, 尤其缺乏芯片长期老化失效的分析以及对芯片严苛使用环境下的失效模式的分析。

本论文通过 GaN 基 LEDs 芯片端金属电极 (PAD) 性能的研究, 分析并改善了芯片端长期老化以及在严苛工作环境下的老化可靠性。同时, 在此基础上设计了新的 PAD 降成本结构, 降低了 PAD 端贵金属的耗量。本文的主要结论如下:

(1) 对于 R-PAD 结构 (ST1) 而言, 当通过 Finger 的截面电流密度超过/或接近 $2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 时, 芯粒就有一定的失效几率, 并且, 随着截面电流密度的增大, 芯粒失效的比例增加。芯粒失效主要表现为亮度的衰减以及电压的升高, 主要是由 Al 的电迁移引起, 通常表现为 Finger 的烧伤和/或鼓泡。

(2) R-PAD 结构中的 Ti/Pt 阻挡层改成 3 对作为 ST2 结构, 而将阻挡层改成 (Ni/Pt)², 并将结构中的 Al 换成掺杂少量 Cu 的新 AL 源 (RD2), 相比于 ST2 结构芯粒具有更好的抵抗高温环境的特性, 同时, 金属的抗电迁移能力和 $T_j=150^\circ\text{C}$ 下 LED 芯粒的长期老化可靠性得到了改善。

(3) 在 ST1 结构上沉积一层 5-30Å 的 Ti (RD3) 可以有效增加 PAD 与 PV 的粘附性, 进而抵挡水汽对显示屏 LED 的侵蚀。使芯粒具有更好的抵抗高温高湿负向 Cr 迁移的能力, 在高温高湿负向老化过程中, 其因 Cr 迁移引起的掉电极比例明显低于 ST1, 开始掉电极的时间点也得到了明显加长。

(4) 在原有 ST1 结构中插入了 2 对 Ti/AL 叠层 (RD5-x), 优化了 Ti 的厚度 ($x=0.1, 1, 2 \text{ kÅ}$), 并降低了 Au 的厚度, 发现对于长期老化而言, $\text{RD5-2} > \text{RD5-0.1} \approx \text{ST1} > \text{RD5-1}$, 而对于高温高湿老化而言, $\text{RD5-2} > \text{RD5-0.1} \geq \text{ST1} > \text{RD5-1}$, 对于抵挡过电流冲击能力而言, $\text{RD5-2} \approx \text{RD5-0.1} \geq \text{ST1} > \text{RD5-1}$ 。

关键词: 氮化镓发光二极管、金属电迁移、芯片降成本、显示屏发光二极管、铬迁移、高温稳定性、极限电流密度

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

The size of GaN light-emitting diodes (LED) became smaller and smaller under the same efficiency with the increase of light output power (LOP) and optimization of fabrication procedure of GaN light emitting diodes (LEDs) gradually, which also induced the LED fabrication cost decreased. And thanks to the cost down of LED chips, its market share percentage enlarged a lot. Therefore, research on the reliability of the LED chips and its improvement gradually became one of the challenges for the LED application, especially for the research on the long-term aging failure analysis of LED chips and on aging failure analysis of chips under the harsh environment.

In this thesis, metal electrode (PAD) performance of GaN LEDs chips is investigated. And we have improved the reliability of chips under long-term aging and aging under harsh environment. At the same time, a new PAD was designed for the purpose of cost down by reducing the consumption of gold and platinum. The primary achievement of this work is described as follow:

- (1) LED chips will have a certain failure probability when the cross-section current density of finger over/ or close to $2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ for R-PAD (ST1). And its failure probability will increase with the enlarged cross-section current density. The failure chips mainly appear as the increase of VF and/or the degeneration of LOP, which resulted from the electromigration of Al, with the finger burns and/or bubbling.
- (2) ST2 PAD structure was defined as the barrier layer (Ti/Pt) of ST1 replaced by (Ti/Pt)³, and RD2 structure was designed as the barrier layer of ST1 replaced by (Ni/Pt)² as well as the replacement of Al by alloy AL doped with Cu (<5%). And compared to ST2, the high temperature reliability of chips with RD2 PAD is better. Also, the metal electromigration of PAD and the reliability of chips under long-term aging at $T_j=150^\circ\text{C}$ were improved absolutely.
- (3) The adhesion between PAD and passivation (PV) is improved by adding a Ti layer of 5-30 Å onto the ST1 PAD (RD3), which can against the erosion of H₂O to LED display chips. The migration of Cr during the aging of 85°C, 85% humidity and backward voltage (-5V~-10V) is reduced by RD3 PAD, with the peeling percentage of PAD due to the migration of Cr decreased and the time when PAD peeling appear elongated.

(4) For the purpose of cost down by reducing the thickness of Au, $(\text{Ti}/\text{AL})^2$ were inserted into the ST1 PAD (RD5- x), and the thickness of Ti is optimized ($x=0.1, 1, 2 \text{ k\AA}$). And we got that, RD5-2>RD5-0.1 \approx ST1>RD5-1 for the long-term aging, RD5-2>RD5-0.1 \geq ST1>RD5-1 for 85 °C, 85% humidity long-term aging, and RD5-2 \approx RD5-0.1 \geq ST1>RD5-1 for the overdrive cycling test.

Keywords: Gallium nitride light emitting diodes (GaN LED), Metal migration, Cost down of chips, LED for display, Cr migration, High temperature reliability, Limited current density

目录

第一章 绪论.....	1
1.1 发光二极管的发展.....	1
1.2 国内外 LEDs 芯片厂商.....	2
1.3 国内外 LEDs 芯片研究进展.....	3
1.4 本论文的结构.....	3
第二章 文献综述.....	5
2.1 发光二极管工作原理.....	5
2.2 发光二极管研究进展.....	6
2.2.1 图形化蓝宝石衬底 (PSS).....	6
2.2.2 p 型氮化镓 (p-GaN) 处理.....	9
2.2.3 电流扩散层 (TCL) 优化.....	10
2.2.4 电流阻挡层 (CB) 优化.....	12
2.2.5 金属电极层 (PAD) 优化.....	12
2.2.6 钝化层 (PV) 的优化.....	13
2.2.7 背面反射镜优化.....	14
2.3 可靠性改善的研究进展.....	16
2.3.1 电迁移原理.....	16
2.3.2 影响电迁移的因素.....	17
2.3.3 改善电迁移的途径.....	17
2.4 各种金属的特性.....	18
2.5 存在的问题总结.....	20
第三章 表征方法及原理.....	23
3.1 电学稳定性测试.....	23
3.1.1 结温测试.....	23
3.1.2 长期老化测试.....	24
3.1.3 过电流测试.....	24
3.2 苛刻环境稳定性测试.....	24
3.2.1 高温高湿 (负向) 老化测试.....	24
3.2.2 泡 (盐) 水测试.....	24

3.3 焊线可靠性测试.....	25
3.3.2 焊线正打.....	25
3.3.2 合金线反打 (BSOB).....	26
第四章 PAD 扩展条极限电流密度研究.....	27
4.1 引言.....	27
4.2 实验.....	27
4.3 结果与讨论.....	27
4.4 本章小结.....	35
第五章 PAD 热稳定性及电迁移的改善.....	37
5.1 引言.....	37
5.2 实验过程.....	37
5.3 结果与讨论.....	38
5.3.1 RD1 vs. ST1.....	38
5.3.2 RD2 vs. ST2.....	42
5.4 本章小结.....	45
第六章 LED 显示屏高温高湿可靠性改善.....	47
6.1 引言.....	47
6.2 实验过程.....	48
6.3 结果与讨论.....	49
6.4 本章小结.....	53
第七章 PAD 降成本结构研究.....	55
7.1 引言.....	55
7.2 实验.....	56
7.3 结果与讨论.....	56
7.3.1 RD4 结构 PAD 研究.....	56
7.3.2 RD5-x 结构 PAD 研究.....	59
7.4 本章小结.....	63
第八章 结论与展望.....	65
8.1 本文的主要结论.....	65
8.2 本文的创新点.....	66
8.3 研究展望.....	66
参考文献.....	69

致 谢.....	77
个人简历.....	79
攻读学位期间发表的学术论文与取得的其它研究成果.....	81
博士后期间发表的学术论文与取得的其它研究成果.....	83

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学博硕士论文摘要库

第一章 绪论

随着日本科学家赤崎勇、天野浩和美籍日裔科学家中村修二被授予 2014 年诺贝尔物理学奖，以表彰他们发明的蓝色发光二极管 (Light-emitting diodes, LED) 对全球新型节能光源的卓出贡献，发光二极管再一次激发了众多高校科研工作人员以及产业界的广泛兴趣^[1-3]。美国能源部的最新报告中指出，到 2020 年，发光二极管有望减少照明行业 15% 的能量消耗，而到 2035 年，这一数值将达到 30%--节约 261TWh (太瓦时) 的能量，该价值将超过 260 亿美元^[4]。由此可见，LED 在未来照明行业中将会扮演越来越重要的角色。

1.1 发光二极管的发展

由 H. Round 和 O. V. Losev 于 1907 年和 1927 年发现的无机材料的电致发光现象是发光二极管 (Light-emitting diodes, LED) 发光的基础^[5]，即电流通过碳化硅 (SiC) 晶体发光的现象。在随后的三、四十年间，研究者们研究了硅、锗以及一系列 III-V 族半导体 (如 InGaP、GaAlAs 等) 的电致发光特性，并证明了其发光来源于 p-n 结中的电子和空穴的辐射复合^[6]。在此基础上，一系列不同色系的发光二极管被一一的研制了出来。N. Holonyak 于 1962 年成功研制了第一个 GaAsP 基红光 LED^[7]。在此基础上，G. Craford 成功制备了 GaAsP 基橙光 LEDs，随后又相继发明了 GaAsP 基绿光和黄光 LEDs^[8-10]。正是如此广泛的研究，使得宽光谱范围内发光的 LEDs 很快实现了商业化应用。然而，这些 LEDs 的发光效率依然比较低，其亮度有限，并不适用于普通照明。

真正将 LEDs 带入普通照明，则要归功于 1970 年代发展起来的金属-有机气象外延沉积 (Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy, MOVPE) 等技术，使得生长高质量 GaN 单晶及实现 n 型和 p 型掺杂成为可能。正是借助于 MOVPE 技术的发展，日本科学家 I. Akasaki 与 H. Amano 合作于 1986 年成功合成了高质量的器件级 GaN^[11]。随后，S. Nakamura 发现，在热退火过程之后增加一个后沉积步骤，用于分解 Mg 和 Zn 的复杂体，可轻易实现 GaN 及其三元体系 (InGaN 和 AlGaN) 的 p 型掺杂^[12,13]。同时，该三元体系可通过 Al 和 In 的成分控制实现其能带的调节，这对于提高 LEDs 的发光效率具有非常重要的作用。1994 年，S. Nakamura 课题组通过设计 n 型和 p 型掺杂 AlGaN 之间加入掺 Zn 的 InGaN 活性层的对称双层异质结结构，首次实现了具有 2.7% 外量子效率 (external-quantum efficiency, EQE) 的蓝光 LED，图 1.1 为其结构示意图^[14, 15]。由图 1.1 可以看到，该结构是目前大规模量产的 GaN 基 LEDs 的结构基础。

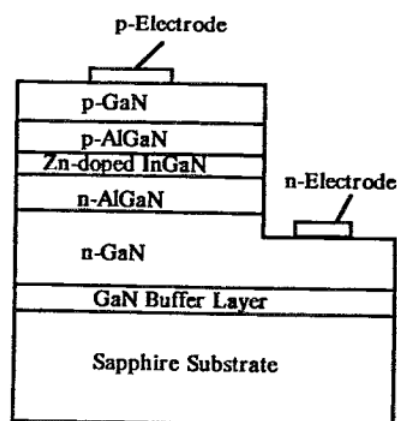


图 1.1^[15] InGaN/AlGaN 双异质结蓝光发光二极管结构。

Fig. 1.1^[15] The structure of InGaN/AlGaN double-heterostructure blue LED.

1.2 国内外 LEDs 芯片厂商

LED 芯片技术是 LED 的主导技术之一，目前全球的 LED 芯片市场格局主要分成三大阵营：国外 LEDs 芯片厂商、中国台湾厂商和中国大陆 LEDs 芯片厂商。国外的 LEDs 芯片厂商主要有日亚化学(Nichia), CREE, Lumileds, 欧司朗(Osram) , 首尔半导体等。中国台湾厂商主要有晶元光电(Epistar, 简称: ES)、新世纪(Genesis Photonics)、亿光(Everlight Electronics)、宏齐(HARVATEK)等。中国大陆厂商主要有三安光电、士兰明芯、华灿光电、晶能光电、乾照光电、晶达光电、山东华光等。

国外 LEDs 芯片厂商以日本 Nichia 公司和美国 CREE 公司为代表，其中 Nichia 公司成立于 1956 年，于 1993 年开发出了世界上第一颗蓝光 LEDs，随后，1995 年又开发出了世界上第一颗纯绿光 LEDs。该公司拥有目前最好的荧光粉技术，蓝光激发黄色荧光粉技术专利，以及蓝宝石衬底外延生产技术。美国 CREE 公司拥有碳化硅 (SiC) 衬底的 GaN 基外延生产技术、芯片级封装技术，以及大功率芯片和封装技术。这些国外 LEDs 芯片厂商也代表了 LEDs 的最高水平，日本 Nichia 公司和美国 CREE 公司所生产的白光 LED 均能达到超过 180lm/W 的光效。

中国大陆 LEDs 芯片厂商则以三安光电为首，公司成立于 2000 年，是目前国内成立最早、规模最大的全色系超高亮度发光二极管外延及芯片产业化生产基地。该公司是国家发改委批准的“国家高技术产业化示范工程”企业、国家科技部认定的“半导体照明工程龙头企业”，承担有国家“863”、“973”计划等多项重大课题，并拥有国家级博士后科研工作站及国家级企业技术中心。

中国台湾 LEDs 芯片厂商以晶元光电为主，该公司成立于 1995 年，目前已

是全球最大的红光 LEDs 厂，以及第四大的蓝光 LEDs 厂，其综合生产能力位居全球第二。

1.3 国内外 LEDs 芯片研究进展

由上可见，国内外公司对 LEDs 芯片的大规模生产与研究进行的如火如荼，其中，各个公司主要的研究重点依然放在提升 LEDs 芯片光效上，通过外延端和芯片端的共同改进优化，实现 LEDs 芯片光效的最大化。同时，各个科研院校等研究机构对 GaN LEDs 芯片的研究也着重在光效的进一步提升。A. Y. Polyakov 等人通过在活性层底下嵌入一层 SiO₂ 纳米颗粒，提升了器件的内量子效率^[16]。Z. Che 等人通过双边球帽形状的 PSS 衬底，实现 GaN flip-chip (FC) LEDs 光抽取效率 5% 以上的提升^[17]。而 D.-J. Seo 等人则是通过双层 ITO 层的优化，实现了电致发光 (EL) 强度 19.7% 的提升^[18]。

随着芯片尺寸的进一步缩小，光效的进一步提升，对芯片可靠性的要求也变得越来越高。然而对芯片可靠性的改进及研究相对较少，尤其是芯片长期老化失效的分析以及对芯片严苛使用环境条件下的失效模式的分析更是凤毛麟角。本论文则主要通过蓝光 GaN 基 LEDs 芯片端金属电极 (PAD) 性能的研究，着重分析并改善了芯片端长期老化失效所出现的问题，以及在较潮湿环境下 (高温高湿老化条件下) 的老化失效分析及改善。同时，在此基础上设计了新的 PAD 结构，在保证各项光电参数特性没有下降以及可靠性没有变差的前提下，降低了 PAD 端贵金属的耗量，实现了芯片端制程成本的有效下降。

1.4 本论文的结构

本文的内容安排和各章节简介如下：

第一章是绪论部分，主要介绍了本研究的背景、目的以及本文的主要内容。本章首先简单介绍了发光二极管 (LEDs) 的发展历史。随后，介绍了国内外对于 LEDs 发展的现状以及着重点，指明了 LEDs 芯片发展的巨大市场化应用。同时，指出了当前国内外大公司以及科研院校等机构对 LEDs 芯片的研究重点，指出随着 LEDs 芯片的发展，所需要进行的研究不足之处。从而引出本文的研究重点，即通过芯片端金属电极 (PAD) 性能的研究提升 LEDs 芯片各项可靠性 (长期老化、高温高湿老化等)。

第二章是文献综述部分，主要介绍了国内外对于 LED 芯片端提升光效的各种途径，回顾了对于芯片端 PSS、CBL、TCL、PAD、PV 以及 DBR 等的优化，

以及近期提升亮度的方法。同时，介绍了芯片端常见的失效模式：金属电迁移的原理及改善途径，但发现对于 LED 芯粒其相关的研究缺乏，进而提出本论文的研究目的：从 PAD 端出发，一方面是研究并改善 LED 芯粒的可靠性，另一方面则是降低成本。

第三章为表征手段及测试方法的介绍，这边主要介绍了 LED 芯粒的电学稳定性测试以及较严苛环境下的稳定性测试，如高温高湿、过电流测试等，此外还介绍了焊线可靠性的相关测试。

第四章为 PAD 扩展条极限电流密度的研究，本章制备了不同扩展条宽度的芯粒，通过研究不同扩展条宽度芯粒在长期老化过程中的失效模式以及比例，确定了对于 R-PAD 结构所能承受的极限截面电流密度。

第五章是 PAD 热稳定性及电迁移的改善，本章主要探讨了(Ni/Pt)结构作为阻挡层取代 Ti/Pt 结构的优势，分别从高温热稳定性和芯片老化过程中发生电迁移现象的严重程度出发进行了对比，对结构的优化实现了高温稳定性和金属电迁移能力的提升。

第六章主要探讨了一种提升显示屏用 LED 抗高温高湿负向电压老化能力的方法，通过增加 PAD 与 PV 之间附着性的方式，实现了芯粒对抗水汽侵蚀能力的提升，进而降低了高温高湿负向电压老化过程中的金属 Cr 迁移的几率。

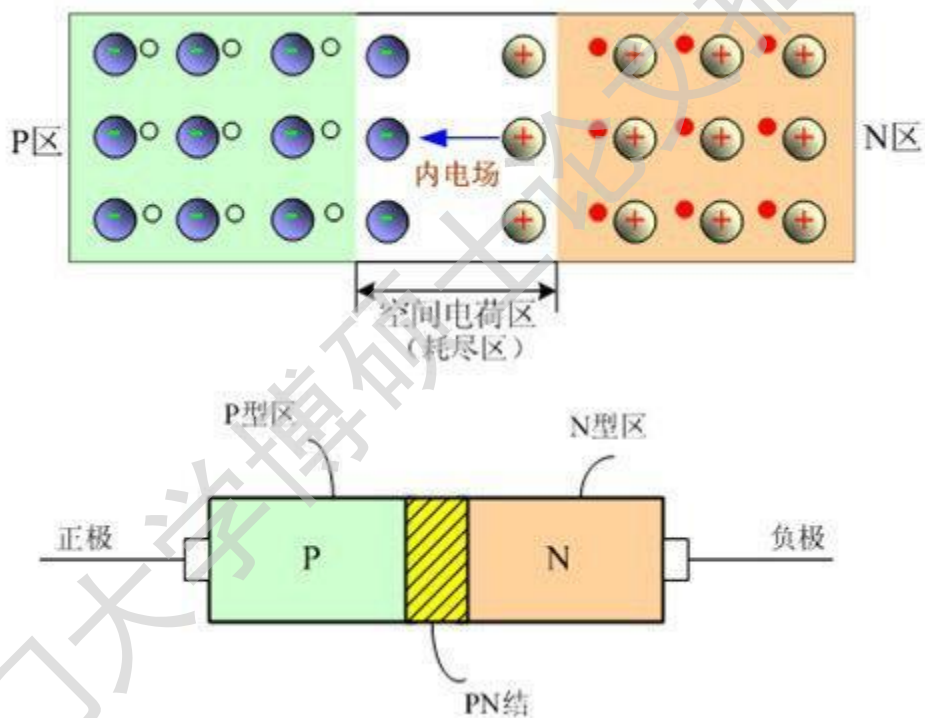
第七章我们通过结构的优化，将 Au 厚度减薄的同时，插入与 Au 电阻率接近的 AL 层，实现了 LED 芯片端成本的有效下降。分析了新结构与原有结构相比可能存在的风险，并对其长期老化特性、高温高湿老化特性以及过电流循环特性等进行了逐一的验证。

第八章为全文的总结以及对相关工作继续开展的展望，总结了本文的实验结果并对该课题可继续研究的工作提出了一些自己的想法。

第二章 文献综述

2.1 发光二极管工作原理

发光二极管是半导体二极管的一种,是一种将电能转化成光能的半导体器件。其与普通半导体二极管一样,由一个pn结组成,具有单向导电性。pn结是指采用不同掺杂工艺,通过扩散作用,将p型半导体与n型半导体制作在同一块半导体基片上,在它们的交界面的形成空间电荷区(p-n junction, pn结)^[19],如图2.1所示。pn结是许多电子原器件(如半导体二极管、双极性二极管等)的物质基础。

图 2.1^[19] pn 结示意图。Fig. 2.1^[19] Diagram of pn junction.

在上述发光二极管两端加上正向电压后, p 区空穴和 n 区电子在电场作用下可以在 pn 结附近数 μm 内发生辐射复合,从而产生自发辐射的荧光。由此可知,发光二极管(LED)的基础正是 pn 结,而提升 LED 的发光效率也正是通过增加有效的电子-空穴对浓度、提升器件的光萃取效率以及提升器件载流子浓度三个方面实现: 外量子效率=内量子效率*光萃取效率*载流子注入效率。

2.2 发光二极管研究进展

我们知道，GaN LEDs 芯片端制程主要由图形化蓝宝石衬底（Patterned Sapphire Substrate, PSS）、电流阻挡层（Current Blocking Layer, CBL）、电流扩散层（Transparent Conduction Layer, TCL）、金属电极层（PAD）、钝化层（Passivation, PV）以及反射镜（Reflector）等组成，其常规的正装 LEDs 芯片端制程如图 2.2 所示^[20]。而当前科研院校以及各个国内外主要的 LEDs 芯片厂商的研究重点依然放在提升 LEDs 发光效率上，我们将分别从以上几个方面简要介绍一下当前提升 LEDs 发光效率的研究进展。

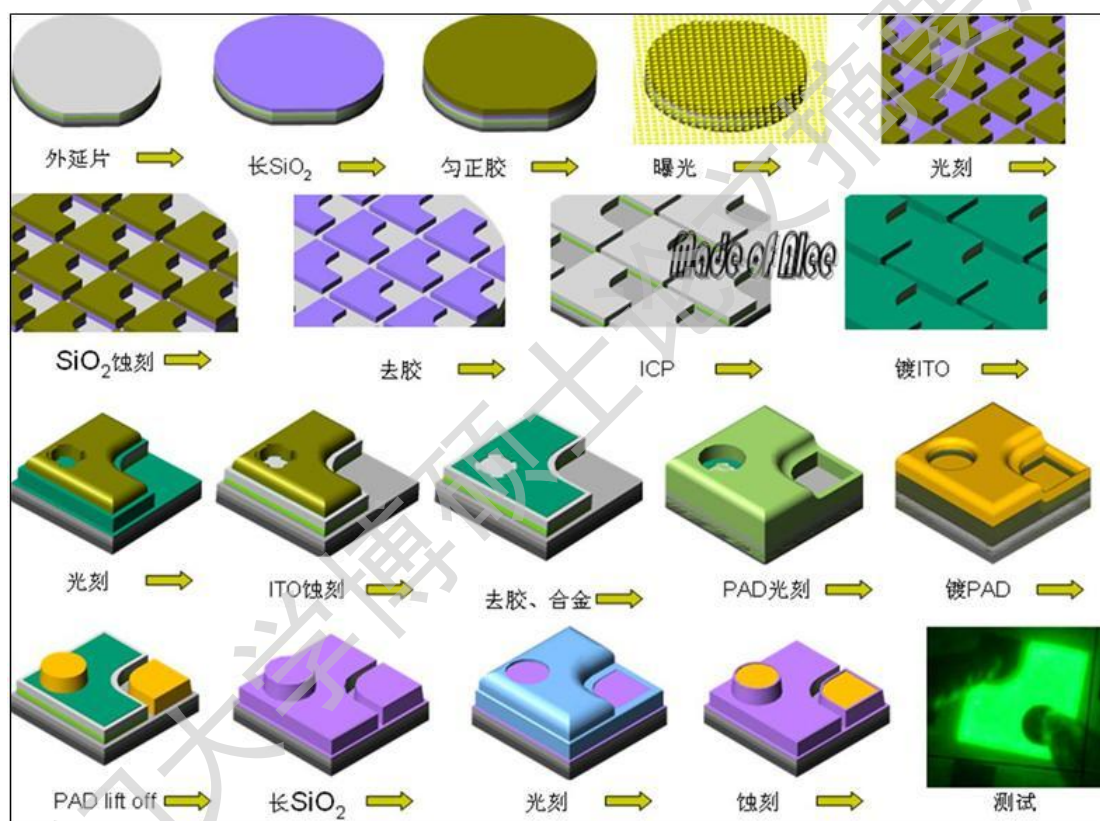


图 2.2^[20] GaN LEDs 芯片端制作流程。

Fig. 2.2^[20] Fabrication process of GaN LEDs.

2.2.1 图形化蓝宝石衬底（PSS）

PSS 衬底可以有效减少 GaN 外延材料的位错密度，进而减少有源区的非辐射复合，提高 LED 的寿命。同时，有源区发出的光可以通过多次散射增加 LED 从蓝宝石衬底出射光的几率，提高光的萃取效率。运用 PSS 衬底制作外延片是业内所公认的方法，也是提升亮度最有效的方法，通常制作的 PSS 衬底可以提升 30%-50% 的亮度^[21-23]。因此，通过图形化的 PSS 衬底提升 LED 芯片亮度也是研究者们所关注的热点之一。

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 for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库