

封面：

分类号_____

密级_____

U D C_____

编号_____

厦 门 大 学

博 士 后 研 究 工 作 报 告

晶元级 LED 荧光粉涂布技术研究

杨力勋

工作完成日期 2015 年 1 月

报告提交日期 2015 年 4 月

厦门大学

2015 年 4 月

题名页

晶元级 LED 荧光粉涂布技术研究

Research on wafer level phosphor coating technology for LED

博 士 后 姓 名 杨力勋

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 2012 年 11 月

研究工作期满时间 2015 年 4 月

厦 门 大 学

年 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 2 年解密后适用本授权书；

电子版在 5 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

摘要

内 容 摘 要

LED（发光二极管）作为基于半导体技术的光源器件，具有传统光源所不及的独特优势。尤其是在 21 世纪，LED 产业迅猛发展，目前产品已经渗透到照明、指示、背光、通信等诸多领域。特别是在互联网浪潮的今天，各种智能产品层出不穷，而 LED 作为半导体光源，它的发展前景更加广阔。

本课题关注与新型的晶元级 LED 封装技术，以垂直结构 LED 芯片为平台，具体探索研究了晶元级 LED 封装技术中的垂直结构白光芯片的工艺方法、产品优势以及产业化。

垂直结构白光芯片工艺流程主要包括光转换材料（荧光粉）在晶元上的涂布、涂布后晶元的色坐标控制、晶元的切割划裂等。本课题针对不同的工艺步骤进行了多种方法的对比评估，同时，着重研究了晶元的色坐标控制方法。经过研究发现：1.不同的涂布方法对于产品的发光均匀性影响明显；2.外延波长及荧光粉量共同影响最终的色坐标产出。

垂直结构白光芯片的优势主要在于：1.单位面积获得的白光亮度远高于传统封装方式，可用于集成化模块；2.发光均匀性高于传统的白光封装产品，有利于下游封装厂提高产品质量；3.稳态测试下的能量转换效率高于传统白光工艺。

在一定的研究数据基础上，依靠公司和学校各方面的支持和帮助，目前已基本建立了垂直结构白光芯片的生产平台。

关键词：LED，发光二极管，晶元，荧光粉，白光，色坐标

英文摘要**Abstract**

The new generation light source LED (light emitting diode) is based on semi-conductor technology and has unique advantages than traditional light source. During the past few years, the LED industry rapidly developed, and LED light source has already been used in general lighting, pilot light, backlight, communication and other fields. Especially in the wave of the Internet today, intelligent products based on semi-conductor technology emerge in endlessly, and LED will as a semiconductor light source, its development enjoys broad prospect.

The research here focus on the new LED package technology. Based on the vertical structure LED chips, the wafer level phosphor coating technology is studied. Since the chips emit white light after the process, the chips are called white chip.

The process of vertical structure white chip is consist of phosphor coating, phosphor controlling and so on. In this research, many different methods are compared and finally the whole process was built and the white chips were successfully manufactured.

Phosphor coating method effect the light emitting uniformity of white chip greatly. The CIE output mainly depends on two factors: the epi wavelength and the phosphor mass on the wafers.

The advantages of the vertical white chip is: 1. The light output in the same area is much higher than traditional white package and can be used in stack multi chip module. 2. White chip has extremely good light emitting uniformity. 3. The efficiency of white chip is higher than traditional package when tested on the substrate with same current and temperature.

Keywords: LED, wafer, phosphor, white light, CIE

目 录

目 次

1 背景介绍	1
1.1 LED 的背景介绍	1
1.1.1 LED 的发展历史	1
1.1.2 LED 的发光原理及优势	2
1.2 LED 芯片元件结构介绍	3
1.3 基于 LED 的白光技术简介	6
1.3.1 使用 LED 获取白光的方法	6
1.3.2 平面荧光粉涂布技术	7
1.4 本文所涉及到的测量仪器及其原理	7
1.5 本文的内容安排	8
2 垂直结构白光芯片工艺研究	9
2.1 电极保护材料的选择及工艺研究	9
2.1.1 光刻胶（光阻）简介	9
2.1.2 液态厚膜负光阻	10
2.1.3 液态厚膜负光阻的去胶工艺研究	13
2.1.4 固态厚膜负光阻	16
2.2 荧光粉在晶元上的涂布工艺	17
2.2.1 涂布材料的选择	17
2.2.2 涂布方式的选择	18
2.3 影响芯片色坐标产出分布的因素研究	25
2.3.1 影响单片色坐标产出分布的因素	25
2.3.2 造成不同片之间色坐标产出差异的因素	28
2.4 小结	29
3 垂直结构白光芯片性能研究	31
3.1 单片 2 寸白光晶元色坐标产出分布	31
3.2 白光芯片与传统点胶的光型比对	31
3.3 瞬态测试下白光芯片与传统点胶的亮度比对	33
3.4 稳态测试下白光芯片与传统点胶的亮度比对	34
3.6 小结	37
4 总结	38
参考文献	博士生期间发表的学 术论文、专著
	39
致谢	41
博士生期间发表的学术论文、专著	149

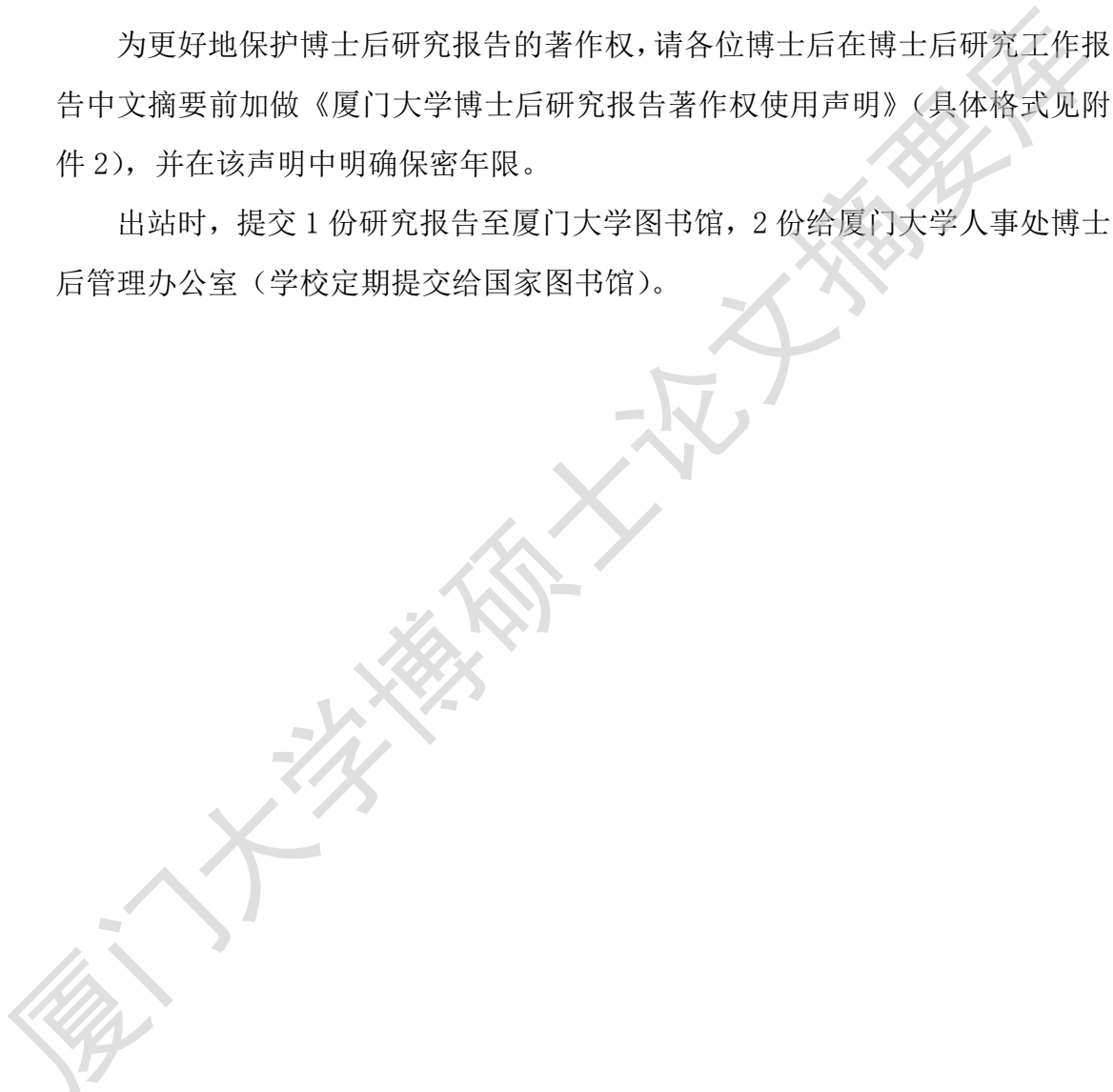
个人简历..... 151
联系地址..... 152

说 明

博士后研究工作报告的排版以全国博士后管理委员会办公室制定的统一格式为准（参见以上排版范例），研究报告封面统一以彩色羊皮卡纸制作，颜色不限，内页用纸为普通 A4 打印纸，单面或双面打印不限，正文字体为宋体小四。

为更好地保护博士后研究报告的著作权，请各位博士后在博士后研究工作报告中文摘要前加做《厦门大学博士后研究报告著作权使用声明》（具体格式见附件 2），并在该声明中明确保密年限。

出站时，提交 1 份研究报告至厦门大学图书馆，2 份给厦门大学人事处博士后管理办公室（学校定期提交给国家图书馆）。



第一章 背景介绍

1.1 LED 的背景介绍

1.1.1 LED 的发展历史

在 21 世纪之前，人类所使用的光源主要包括两种：一是基于黑体辐射原理，在发热的同时发出光辐射，例如火焰、白炽灯等；二是通过将某些气态分子电离，并结合一些光转换材料，转换成人眼可见光，例如荧光灯、节能灯等。前者在发光的过程中产生大量的热，因此光转换效率低，以白炽灯为例，其转换效率一般在 10~15lm/W。后者的光转换效率较高，可以达到 50lm/W 左右，但是由于这种灯具一般需要使用到一些有毒气体，因此对环境有较大的污染。

早在 1907 年，英国科学家 Henry Joseph Round 在碳化硅材料中第一次观察到“电致发光”现象[1]。随后，德国物理学家又在铜掺杂的硫化锌材料中观察到了这一现象。但是受制于亮度和实验条件等各种原因，这些研究都未能获得进一步的成果。直到二十世纪五十至六十年代，砷化镓材料被应用到了发光二极管的研究中，从此，III V 族半导体材料成为研究的主流方向[2][3]。到二十世纪八十年代，通过使用镓铝砷化磷材料，获得了第一代超亮发光二极管[4]。

1986 年，名古屋大学教授赤崎勇和他的学生天野浩先生通过在蓝宝石衬底上生长一层 AlN 缓冲层，首次合成了高质量的氮化镓晶体[5]。到 1989 年，两位通过使用低能电子照射，首次获得了低电阻的 p 型氮化镓，实现了氮化镓 pn 结的青色发光二极管。

1993 年，供职于日本日亚公司的中村修二先生以加热退火的方式，获得了 Mg 掺杂的低电阻 p 型氮化镓，这一创举，奠定了低成本量产化 p 型氮化镓的基础[6]。此外，中村先生还发明了以 GaN（氮化镓）晶体制作蓝色发光元件的双流式 MOCVD 法（Two flow MOCVD）。

由于蓝光 LED 的巨大影响力，在 2014 年，中村修二、天野浩和赤崎勇三位先生共同分享了诺贝尔物理学奖（图 1.1）



图 1.1 2014 年诺贝尔物理学奖得主合影。左起依次为赤崎勇、天野浩、中村修二。

1.1.2 LED 的发光原理及优势

Light emitting diode, 发光二极管, 是一种基于半导体技术的新型光源。如图 1.2 所示, LED 的发光原理是: 在外电场作用下, 电子自 N 型半导体流向 P 型半导体, 在 PN 结的位置, 电子与空穴复合, 在复合的过程中释放出能量, 其中一部分以光的形式发射出来。因为在整个过程中, 电能直接转换为光能, 因此这种发光形式被称作“电致发光”。

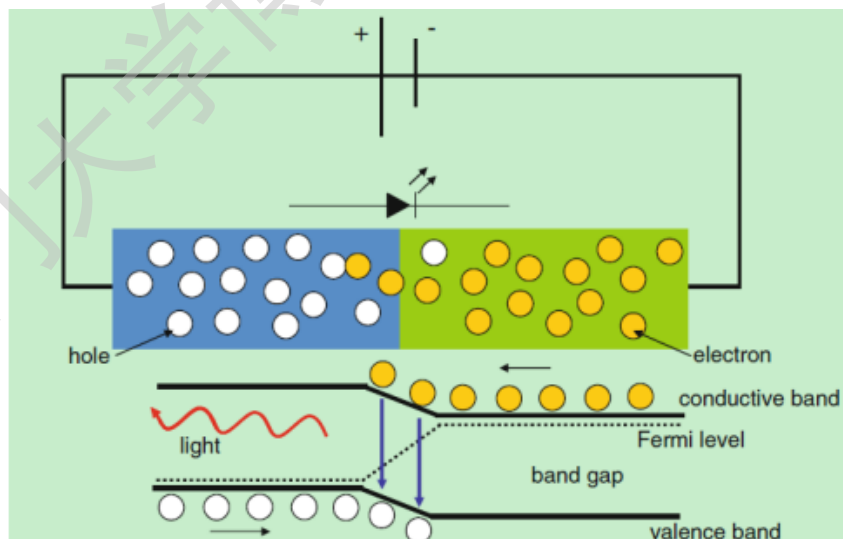


图 1.2 LED 的发光原理

从 LED 的发光原理中可以了解到, 相对于传统光源, LED 直接将电能转化为光能, 因此理论上可以达到 100% 的电光转换效率 (实际上以蓝光 LED 为例, 其转化效率可以达到 50% 以上)。除此之外, LED 还具有以下优势:

1) 光线质量好。通过选择不同的材料,可以获得不同波段且近似于单色光的 LED 光源;

2) 寿命长。由于 LED 所使用的材料具有较为稳定的物理化学性质,在正确的使用条件下,其使用寿命可以达到 5 万小时以上。

3) 使用安全。使用电压一般不超过 5V。

4) 绿色环保。废弃物可回收,几乎没有污染。

5) 控制灵活。可以通过改变电流,组合不同颜色的 LED 以及搭配不同的控制电路达到多样化的光源需求。

6) 光源指向性强。

1.2 LED 芯片元件结构介绍

由于本课题主要以 GaN 基蓝光 LED 为研究平台,因此主要介绍此类 LED 芯片。

LED 芯片主要包括如下几层:

一、衬底材料。衬底材料主要有以下两种作用:

1.生长基板,此类衬底主要为蓝宝石晶体。外延生长于基板之上。

2.结构支撑及导热导热。此类衬底包括 Si, SiC 以及金属合金等等。这种衬底一般是在外延生长完毕后的芯片制程中引入。

二、外延层。以 GaN 基蓝光 LED 为例:由于生长基板蓝宝石晶体与 GaN 之间存在晶格失配,为了消除这种失配造成的晶格缺陷,会在蓝宝石表面先生长一层 u-GaN 缓冲层。在缓冲层上,生长 n-GaN: Si, GaN: In 多量子阱, p-GaN:Mg 等。图 1.3 为一种典型的 LED 外延结构[4- 10]。

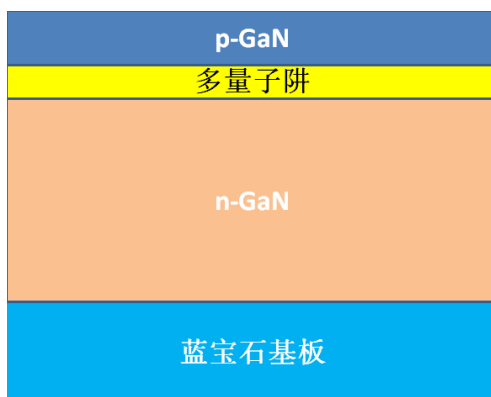


图 1.3 LED 外延结构示意图。

三、电极结构。金属电极分别于 p 型和 n 型 GaN 连接,从而可以将电流导

入 LED 芯片中。由于电极分布位置的不同，LED 芯片可以分为正装（又称为水平式），倒装和垂直三种主要形式，它们分别具有以下特点：

1.典型的正装 LED 的结构示意图如图 1.4 所示，其出光面与外延的生长方向一致。正装 LED 的优点是结构简单，制作工艺成熟，成本较低。但是也存在明显的缺点：1) 电流倾向于通过最短的路径由 p 电极流向 n 电极，因此在点击附近容易发生电流的聚集，并且随着电流密度的增加，这种聚集效应会愈发严重，甚至影响到芯粒的使用寿命。2) 正装 LED 基板为蓝宝石，蓝宝石导热系数很低（约为 $45\text{W/m}\cdot\text{K}$ ）。特别是在大电流密度下，由于散热较差，严重影响了正装 LED 的性能。3) 由于正装 LED 底部拥有一层胶厚的蓝宝石基板（一般在 $100\mu\text{m}$ 以上），因此从蓝宝石的侧壁会有较多的光发出，导致其在某些需要光源指向性较强的应用上会受到限制。尽管有一些不足，正装 LED 是目前最简单也是应用最广泛的 LED 结构[11-15]。

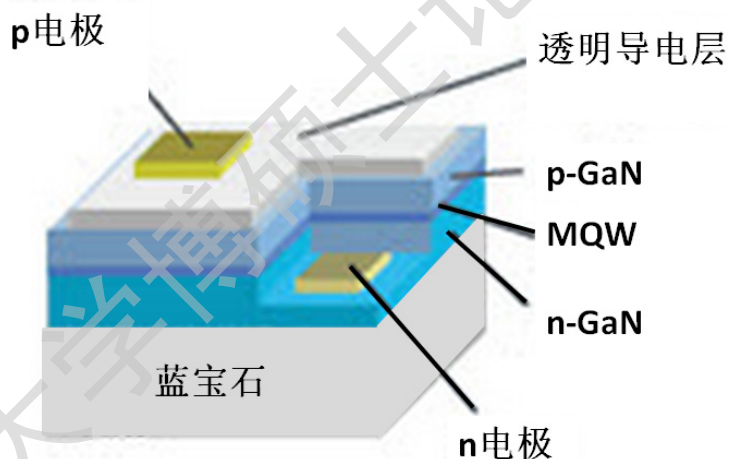


图 1.4 正装 LED 的结构示意图

2.倒装 LED 的结构示意图如图 1.5 所示，其出光面为蓝宝石基板的底部，与外延的生长法相相反。这种结构的主要优点是：1) 蓝宝石的折射率介于空气和外延之间，因此可以提高光提取效率。2) 外延层直接通过导电材料与基座连接，因此热量可以直接通过导热材料向基座扩散。3) 通过优化 n 电极设计（小孔阵列型），可以有效改善电流的聚集效应，提高器件性能。4) 在蓝宝石的表面可以进行一些图形设计来提高取光效率，如图 1.6 所示。由于倒装芯片均有以上优点，它的市场占有率也在稳步提高，但是受制于工艺和成本因素，还需要一定的发展时间。



图 1.5 倒装 LED 的结构示意图

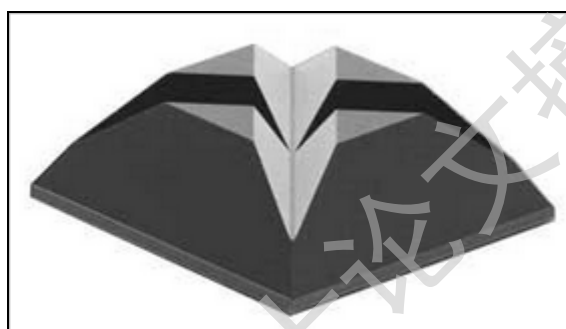


图 1.6 Cree 公司的倒装芯片，其出光面蓝宝石采用图形化设计。

图 1.7 为垂直结构 LED 芯片的结构示意图，其出光面一般为 n-GaN。从图中可以看出：1) p-GaN 整面与金属电极接触，很好的解决了由于 p-GaN 电阻较高导致的电流聚集效应。2) 外延直接与导电基座接触，因此散热问题得到极大的改善。3) 由于蓝宝石衬底被剥离，因此侧向出光面面积大幅缩小，适用于指向性较强的应用场合，例如舞台灯，车前灯，手电筒等等。4) n-GaN 表面可以进行图形设计以提高光取出效率。本课题是以垂直结构芯片为平台进行研究的。

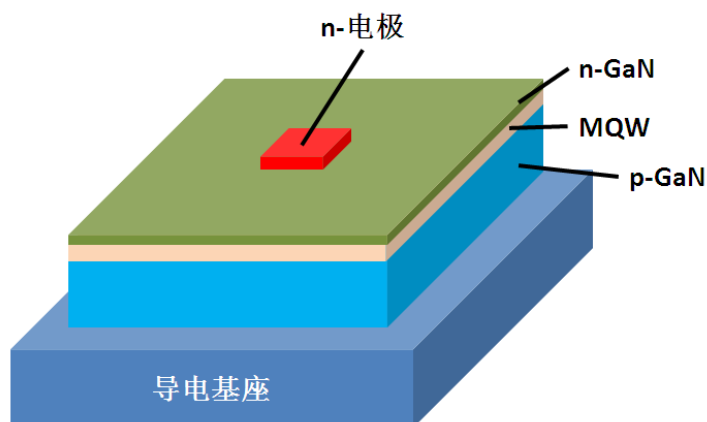


图 1.7 垂直结构 LED 芯片的结构示意图

总的来说，三种 LED 结构各有优点，因此可以满足几乎所有的光源需求。

1.3 基于 LED 的白光技术简介

1.3.1 使用 LED 获取白光的方法

由于 LED 是利用电子在半导体能隙间跃迁释放的能量发光，因此目前的 LED 主流均为单色光（也有可以同时发出多种波长光线的 LED，但目前基本还停留在研究阶段，难以实际应用）。要获取白光，目前主要采用以下两种方式：

1.使用不同波段的 LED 组合，通过混色获得白光，如图 1.8 所示。这种方式的主要缺点在于：1) LED 使用数目较多，成本较高；2) 不同波长的 LED 的工作电压和电流往往不同，这就加重了电路设计的负担；3) 不同波长的 LED 的长期稳定性往往存在差异，导致在使用过程中发生颜色变化。由于存在这些问题，这种技术主要应用在一些特殊需求的场合，如舞台灯，景观照明，户外显示等等。

[16-25]



图 1.8 通过集成不同波长的 LED，将它们发出的光按照一定比例混合，即可获得白光。

2.使用 LED 与光转换材料组合获得白光。当获取了高亮蓝光 LED 后，日亚公司将其与 YAG:Ce^{3+} 荧光粉组合，获得了白光。在后续的发展过程中，为了提高基于 LED 的光源的显色指数，又将红色和绿色荧光粉引入到 LED 光源中。图 1.9 为 GaN 蓝光芯片与不同的荧光粉组合后发出的不同色温白光光谱。

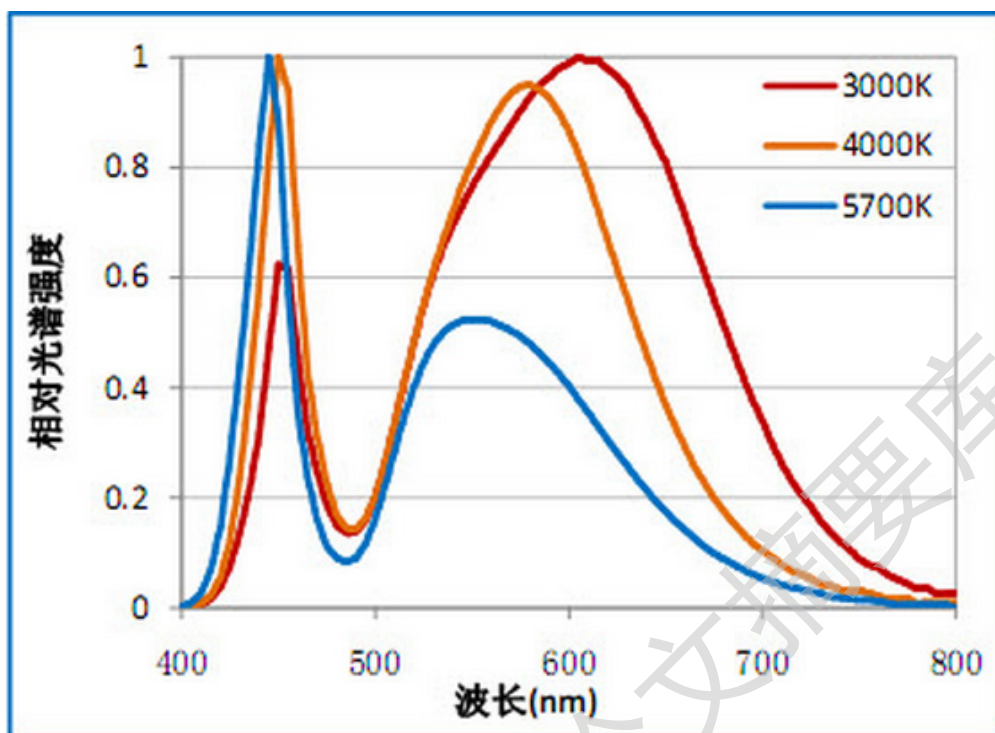


图 1.9 为 GaN 蓝光芯片与不同的荧光粉组合后发出的不同色温白光光谱。

1.3.2 平面荧光粉涂布技术

图 2.0 为传统荧光粉涂布技术与平面荧光粉涂布技术的比对示意图。平面荧光粉涂布技术是将荧光粉非常均匀的涂布在 LED 芯粒表面，从而提高发光性能的技术。本文中研究的晶圆级涂布技术就是视线平面荧光粉涂布的一种方式。

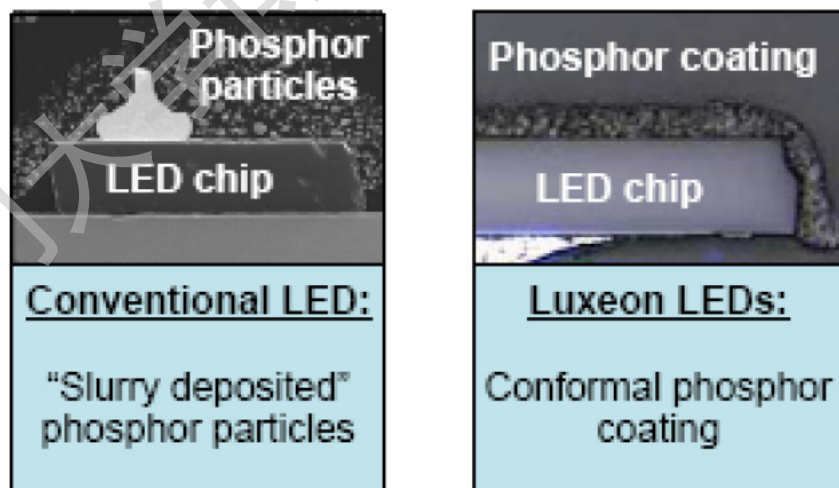


图 2.0 传统荧光粉涂布技术（左图）与平面荧光粉涂布技术（右图）的比对示意图。

1.4 本文所涉及到的测量仪器及其原理

1.4.1 扫描电子显微镜（SEM: Scanning Electron Microscopy）

扫描电子显微镜(SEM)是观察材料表面形貌最常用的仪器设备之一。其成像原理为利用细聚焦电子束冲击样品表面,从而激发出物理信号(如二次电子等等),通过收集相关的物理信号来进行成像。同时,扫描电子显微镜可以配备电子探针能量分散谱仪(EDS),通过收集X射线光子能量来分析样品表面的元素组成及其含量多少。本文中使用的扫描电子显微镜型号为日本Hitachi S-4800II FE-SEM。

1.4.2 IS 瞬态测试机

IS 积分球是一种常用的用来测试LED光学性能的设备,可测试亮度、光谱等数据并可自动换算成其他性能。其工作原理是在积分球的内壁涂布有一层高反射率材料,并通过光学设计,使测试光源发出的光通过反射后可以完全被探测器接收。本文中使用的IS瞬态测试机为Labsphere品牌,其标准溯源至美国国家标准局。

1.4.3 稳态测试机

稳态测试机的工作方式如下:1.将封装体固定于相同的散热基板上;2.使用恒定电流持续给封装体供电,封装体通过散热基板进行散热;3.使用风冷的方式使散热基板的温度保持恒定;4.测试封装体的广电参数。

1.5 本文的内容安排

本文以垂直结构芯片为基础,研究了白光芯片。主要分为以下几部分:第二章对白光芯片的制作工艺探索研究,主要包括:1.荧光粉涂布方式的比较与选择;2.厚膜光阻的黄光工艺研究;3.色坐标的影响因素分析及控制方法;4.厚膜光阻的去胶工艺探索;5.白光芯片晶元的切割工艺研究。第三章分析研究了白光芯片的性能

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts 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.