

1352868



Y1713586

独创性声明

本人声明所提交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

签名： 焦剑昆 日期： 2010 年 5 月 26 日

论文使用授权

本学位论文作者完全了解电子科技大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权电子科技大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后应遵守此规定)

签名： 焦剑昆 导师签名： 焦西波

日期： 2010 年 5 月 26 日



摘要

自从 19 世纪白炽灯出现,人类就没有停止过对照明光源的研究,相继出现了荧光灯、高压放电灯等新的照明光源,照明效果以及光效得到不断提高。20 世纪末,白光发光二极管(LED)问世,与传统光源相比,其安全、高效、环保的性能在这样一个提倡绿色环保的社会里受到格外的关注。

由于 PC(Phosphor converted)白光 LED 的发光效率逐年增加,目前实验室数据已超过 200lm/w,受到了广泛关注。对于 PC-LED,荧光粉层的几何结构、性能决定白光的色温、色均匀性、显色指数等参数,因此荧光粉涂层工艺成为 PC-LED 封装工艺中最重要的一环。点胶工艺是目前工厂中普遍采用的荧光粉涂层工艺,该工艺操作简单,但荧光粉层厚度不均匀,且难以控制,影响了白光 LED 的空间色均匀性。

鉴于点胶工艺的缺陷,提出了一种新的荧光粉涂层工艺,该工艺是将水溶性感光胶的平面涂层技术与荧光粉层悬空结构相结合,得到高效、均匀的白光 LED。本文主要工作和相关结论如下:

1. 通过蒙特卡罗法建立不同封装结构的白光 LED 模型,分析封装材料、荧光粉层厚度、芯片出光角度以及不同封装几何结构对白光 LED 性能的影响,模拟结果显示:悬空荧光粉涂层工艺得到的白光 LED 与点胶工艺相比光效提高 26%;通过模拟荧光粉层厚度均匀的保形平面涂层工艺的白光 LED 光斑,对比不同位置的光斑色坐标,得出结论:即使是厚度均匀的荧光粉层,得到的白光色均匀性依然较差,分析造成该缺陷的原因,同时提出了解决空间色均匀性问题的新方案;
2. 开展基于聚乙烯醇+重铬酸铵的水溶性感光胶的平面涂层工艺的研究,结合自曝光工艺实现荧光粉层厚度与芯片的光强相匹配,使荧光粉层厚度具备自适应的特点,白光光斑在不同空间位置的黄蓝比例保持一致,解决光斑空间色均匀性问题。通过对工艺参数的优化得到理想的荧光粉涂层结构,实现了理想的均匀白光 LED,完成了保形平面涂层和荧光粉悬空涂层的封装工艺;
3. 测试不同封装结构的白光 LED 的光斑均匀性、光谱色度以及光效。测试结果显示:不同封装结构的白光 LED 光效基本相当,而文中提出的

摘要

荧光粉悬空涂层工艺和保形平面涂层工艺封装的白光 LED 空间色均匀性明显优于现有商品。

关键词: 白光 LED, 蒙特卡罗法, 自曝光, 自适应, 聚乙烯醇, 重铬酸铵

ABSTRACT

Since the incandescent light bulb was invented in the late 1800s, human have never given up the research on light sources. In the late 20th century, a new kind of light source named white light-emitting diode (LED) came out. Compared with conventional illumination sources, white LEDs have many outstanding characteristics in terms of longer life, higher brightness, lower power consumption, and less harmfulness. They are expected to have a considerable impact on issues such as energy consumption, environment and even the health of individuals. During several decades of development, luminous efficiency of white LEDs is improving at very fast speed. Especially, phosphor converted white LEDs are becoming more and more attractive for general lighting applications because of the steadily increasing luminous efficiency reported by LED-suppliers. Now white LEDs of Cree Company have broken 200lm/w efficacy barrier.

Highly efficient packaging for power LED is crucial for the development of solid state lighting. Different optical structures with various states of phosphor will greatly influence the packaging performance such as luminous efficiency, quality of white light and color uniformity. Now, traditional process that phosphor-containing silica gel is dropped on the surface of a blue LED chip directly is adopted by most LED package manufacturers, however there are some disadvantages with this method. The primary problem is that the thickness of phosphor layer is uneven, which highly impacts restrain the spatial homogeneity of the white light emitted.

To solve those issues encountered in the traditional process, a new phosphor coating process is put forward in this paper. By combining water-soluble photoresist with Remote phosphor structure, white LEDs which are of high luminous efficiency and good color uniformity are made.

Some interesting conclusions from our work are listed as follows:

1. With the method of Monte Carlo, different package structures of white LED are modeled and the factors that impact on the performance of white LEDs such as packaging materials, phosphor layer, light emitting angles, various packaging

ABSTRACT

technology etc are analyzed. The calculating results show that Remote phosphor module can be of up to 26% better optical efficacy than conventional process module; Because the output of LED light source are of a Lambertian radiation profile , the module with even phosphor layer can not gain uniform white light spot. Only if the thickness of phosphor layer matches with radiation profile of the LED chip, perfect color uniformity will be realized.

2. Based on the conclusions of simulation, a novel phosphor coating method is put forward, which adopts a kind of water-soluble photoresist consisting of polyvinyl alcohol(PVA) and ammonium dichromate(ADC) instead of conventional silicon resin, and self-exposure of LED chip was employed as an optimized self-adaptive exposing way to make the photoresist crosslinking. Eventually, ideal phosphor layer comes into being, which matches the intensity distribution of LED chip. So the ratio of yellow and blue will be keeping consistent at every angle. The light spot of white LED will be more uniform spatially. The problem of color uniformity is solved perfectly. At the same time Conformal coating and Remote phosphor coating are achieved successfully with this newly-developed coating method.
3. Luminous efficiency, color uniformity, spectrum of light output is measured. The measurement revealed that the devices with new phosphor coating process introduced in this paper shows better performances than the ones of traditional process and other Conformal coating processes in the terms of color uniformity, and the luminous efficiency of different package processes are almost equivalent. The Remote phosphor coating white LEDs deliver better homogenized white light. They are ideal way for packaging of white LEDs for general illumination purposes.

Key words: White LED, Monte Carlo, Self-exposure, Self-adaptive, Polyvinyl alcohol, Ammonium dichromate

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
目录.....	V
第一章 绪论.....	1
1.1 LED 概述.....	1
1.2 LED 的发展现状及趋势.....	2
1.2.1 国外 LED 产业技术的发展.....	3
1.2.2 国内 LED 产业技术的发展.....	5
1.3 白光 LED 的市场应用.....	6
1.4 本文的主要工作及创新点.....	7
第二章 白光 LED 的原理及目前存在的问题.....	9
2.1 LED 的发光原理及制造流程.....	9
2.2 白光 LED 的实现方法.....	12
2.3 白光 LED 的封装设计.....	13
2.4 目前白光 LED 存在的问题.....	14
2.5 小结.....	16
第三章 白光 LED 封装工艺的光学模拟.....	17
3.1 蒙特卡罗分析法原理.....	17
3.2 白光 LED 封装结构的蒙特卡罗模拟.....	18
3.2.1 荧光粉层中的光子包输运过程.....	18
3.2.2 确定出射光子包的频率和方向向量.....	19
3.2.3 光子包的随机自由程.....	20
3.2.4 荧光粉的吸收和散射模型.....	21
3.2.5 光子包的反射和折射.....	24
3.2.6 光子包传输终止.....	25
3.2.7 出射白光的性能参数计算.....	25
3.3 光子传输模拟结果分析.....	27
3.3.1 折射率对光效的影响.....	27

目 录

3.3.2 不同封装结构对光通量的影响.....	29
3.3.3 出光角度对色温的影响.....	32
3.3.4 模拟厚度均匀的荧光粉层的白光空间色均匀性.....	33
3.4 小结.....	34
第四章 悬空荧光粉涂层工艺及性能分析.....	36
4.1 白光 LED 的几种荧光粉涂层结构.....	36
4.2 基于水溶性感光胶的悬空荧光粉涂层工艺的引入.....	37
4.3 基于水溶性感光胶的涂层工艺的实现方案.....	38
4.3.1 实验原材料及理论依据.....	39
4.3.2 实验工艺流程.....	41
4.4 封装效果及性能分析.....	43
4.4.1 新工艺封装外观效果.....	43
4.4.2 曝光强度对荧光粉层厚度的影响.....	44
4.4.3 新工艺得到的白光空间色均匀性测试.....	45
4.4.4 不同结构的白光 LED 的光效对比.....	50
4.5 小结.....	51
第五章 结 论.....	52
致 谢.....	55
参考文献.....	56
攻硕期间取得的研究成果.....	59

第一章 绪论

1.1 LED 概述

发光二极管(LED)产生于 20 世纪 60 年代, 由于其发光亮度较低, 20 世纪 80 年代之前, 主要作为指示灯使用, 且只有红、橙、黄、绿等几种。随着科学技术的发展, LED 的亮度有了较大的提高, 且发光波长包括深紫外到红外各个波长^[1]。1994 年, 日本科学家中村修二在 GaN 基片上研制出了第一支蓝光 LED, 1997 年诞生了 InGaN 蓝光芯片+YAG 黄色荧光粉的白光 LED, 使 LED 进入普通照明领域成为可能^[2]。随着发光材料的开发和半导体制作工艺的改进, 在芯片生长工艺中引入了双反射和分布式布拉格反射结构和量子井结构, 并采用了倒装芯片技术和表面粗糙化纹理结构等改进措施, LED 的发光效率不断提升^[2,3,4], 尤其是 2005 年以后, 白光 LED 得到了飞速发展如图 1-1 所示, 2010 年美国 Cree 公司宣布其白光 LED 的发光效率已突破 200lm/w。

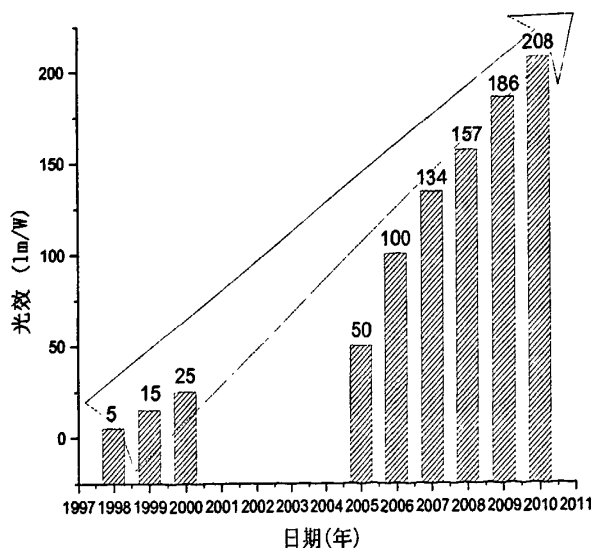


图 1-1.白光 LED 光效的发展

随着白光 LED 技术的不断革新, 基于 LED 新光源的固态照明——半导体照明被人们提出。作为一种节能、绿色环保光源, LED 被称为是继白炽灯、荧光灯

和高压放电灯之后的第四代光源^[5], 甚至有人预见 LED 光源将是人类的最终光源^[6,7]。近几年来, LED 在世界范围内备受关注, 其相关技术也得到了前所未有的发展, LED 照明产品在路灯、景观、汽车、液晶背光源等多个领域得到广泛应用^[2,5]。随着人们对 III-V 族化合物材料的深入研究以及金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 生长技术的日趋成熟, 已经开发出了超高亮大功率 LED, 特别是高亮 GaN 蓝光 LED 的问世, 结合高转换效率的钇铝石榴石荧光粉(YAG: Ce³⁺)制得了双基色白光 LED, 使 LED 快步走向照明领域。目前商用化的白光 LED 已达到 100lm/w, Cree 公司的实验室水平已达到了 208lm/w, 而白光 LED 的光效理论极限在 300lm/w, 因此白光 LED 的光效仍然有很大的提升空间。

表 1-1. 白光 LED 与传统光源的性能对比

技术指标	白光 LED	白炽灯	荧光灯
极限发光效率(lm/w)	300	15-20	100
现有发光效率(lm/w)	208	16	85
光转换效率	60%	5%	25%
寿命(h)	8 万-10 万	1000	10
显色指数	>75	95	75
特点	高效; 寿命长; 低压安全; 耐震; 动冲击响应时间短; 环保	显色性最好; 发光效率低; 寿命短; 不安全; 易碎	发光效率高; 显色性一般; 易碎; 频闪; 汞污染

如表 1-1 数据显示, 白光 LED 与传统光源在性能方面全面占优, 只要 LED 成本降到一定程度将会全面取代传统光源。有资料分析显示, 白光 LED 成本 2002 年为 15.5 美元/兆流明时, 2007 年为 2.18 美元/兆流明时, 2012 年将达到 0.77 美元/兆流明时, 低于荧光等的 1 美元/兆流明时, 到 2020 年 LED 的成本将降至荧光灯的一半以下, 届时将全面取代传统光源, 真正步入家庭照明^[8]。

1.2 LED 的发展现状及趋势

目前, LED 光电产业还是一个新兴产业, 具有高效、节能、环保的特点。世界各国都在政府的大力资助下加快推进 LED 光源取代传统光源的步伐, 美国、日本、欧盟、韩国、中国以及中国台湾都制定了相关发展计划^[1], 尤其是 2009 年 12 月哥本哈根全球气候会议提出了低碳减排, 使 LED 光电产业更加符合能源、

减碳战略。作为 21 世纪最引人瞩目的新技术领域之一，LED 照明涉及到半导体材料、器件结构、光学配光设计、封装工艺、驱动电路、照明效果与视觉匹配等多个技术领域。如今，LED 相关的研发及产业化已成为半导体、光电子、材料、能源等多个行业的一个重要发展方向。各国相继投入大量资金，启动了半导体照明计划，如表 1-2 所示。

表 1-2. 各国家和地区的 LED 照明计划

	日本	美国	欧盟	韩国	中国台湾	中国大陆
项目计划	21 世纪照明计划	下一代照明计划	彩虹计划	GaN 半导体开发计划	白光照明光源计划	国家半导体照明工程
项目阶段	第一阶段: 1998-2003 第二阶段: 2004-	第一阶段: 2002-2011 第二阶段: 2011-2020	第一阶段: 1997-2000	第一阶段: 2004-2008 第二阶段: 2009-2013	第一阶段: 2002 第二阶段: 2009-2013	第一阶段: 2003-2005 第二阶段: 2006-2010
发光效率	120lm/w	2020: 200lm/w		2008: 80lm/w 2013:130lm/w	2005 40lm/w	2010: 100lm/w
投资金额	一期: 6000 万美元/5 年	2003-2011 5000 万美元/年	一期: 300 万 欧元	一期: 2 亿美元/5 年	2004-2005 1200 万美元/年	一期: 1500 万美 元

1.2.1 国外 LED 产业技术的发展

在 LED 外延和芯片制造领域，美国有着非常突出的优势，相关产业的集中度比较高，拥有许多实力雄厚的国际化大公司如 Lumileds、Cree、Gelcore 等，这些公司掌握着 LED 整个产业链的核心技术，代表着世界 LED 的发展水平。同时美国政府也给予 LED 产业研发巨大的支持，在 2002 年美国能源部设立的“国家半导体照明研究计划”被列入“能源法案”，并计划在 2000-2010 年耗资 5 亿美元开展半导体照明技术的研究，主要研究内容是降低 LED 的成本、提升 LED 的转换效率、GaN 材料的固体物理学、相关 MOCVD 工艺、低缺陷密度衬底及 LED 结构优化等。美国能源部还启动了如“下一代照明计划”等其它促进 LED 产业研发

的计划，并投入大量资金推动 LED 产业的快速发展。

日本一直是 LED 产业大国，在 LED 衬底材料、芯片结构与制造、白光 LED 用荧光粉等领域拥有大量的专利技术，尤其是白光 LED 技术方面具有领先优势。LED 相关技术水平与美国不相上下，同样拥有 Nichia、Toyota Gosei 等技术一流的大型 LED 公司，并在这两大公司的带领下形成了具有高技术水平的 LED 产业链。同时，日本政府为保持在 LED 产业上的优势地位，投入了巨额资金发展 LED 产业，早在 1998 年就制订了“21 世纪光计划”，该计划在 5 年内投资 60 亿日元用作白光 LED 的开发，涉及到衬底材料、外延技术、荧光粉制备、芯片和灯具等多个技术领域，重点是高质量外延层生长、大功率芯片制备和白光 LED 用荧光粉的获取。

为缩小在 LED 照明领域与美国和日本之间的差距，欧盟各国也相继提出了 LED 合作研发计划——“彩虹计划”，在其基础上 2004 年 7 月 12 日又启动了“固态照明研究项目”。为提高欧洲光电产业在世界范围内的竞争力，在 2004 年成立了“欧洲光电产业联盟”，通过制订欧洲光电产业技术发展规划、协调欧洲企业的技术开发与合作来提高 LED 产业水平^[2]。目前欧洲一些大公司如 Osram、Philips、Aixtron 等的 LED 芯片在规格和性能上已处于世界先进水平。

韩国的 LED 产业发展较晚，开始仅有三星、LG、AUK（光电子）等少数公司生产 LED，自 2000 年起随着大量使用 GaN 基 LED 作为手机显示屏背光源，加快推动了韩国 LED 产业发展。从 2000 年到 2008 年，韩国政府投入 4.72 亿美元，企业投入 7.36 亿美元，目标是使韩国成为亚洲最大的光电子生产国^[2]。目前从事 LED 芯片制造的除了三星和 LG 外，还有 NiNex、ITSWell 等公司，从事封装的有 Seoul 公司，韩国已形成了完整的 LED 产业链。

目前，LED 产业发展现状依然是日本和美国的技术实力最强，在 LED 新产品和新工艺方面拥有创新优势，德国和韩国发展迅速，在某些相关领域也拥有较先进的技术。随着高亮 LED 尤其是照明用功率型白光 LED 的发展，对 LED 外延和芯片制备技术的要求越来越高，LED 的研发也主要集中在这个方面，而且外延生长和芯片制造技术是最能代表企业或国家 LED 技术产业水平的部分，也是技术含量最高和竞争最激烈的环节。据统计，LED 产业中 70% 的利润来自于芯片，而 LED 封装成本的 70% 也来自于芯片，因此，国外许多 LED 芯片生产商如美国的 Cree 公司、日本的 Nichia、德国的 Osram 公司等都把芯片生长技术作为自己的研发重点。

1.2.2 国内 LED 产业技术的发展

我国 LED 产业起步于 20 世纪 60 年代, 80 年代形成产业^[2], 到 90 年代末期, 白光 LED 问世, 我国同样对其发展高度重视, 然而美国、日本等国已发展成为 LED 技术与产业水平最高的国家, 处于引领产业发展方向的前沿位置, 而且大部分专利技术掌握在 Nichia、Cree、Toyoda Gosei、Lumileds 及 Osram 等少数大公司手中, 对 LED 核心技术保护措施较强, 一定程度上限制了我国 LED 产业发展, 尤其是芯片制造方面。为了在世界 LED 领域占有一席之地, 我国政府于 2003 年制订了 LED 发展计划和相应的政策, 从 2004 年开始科技部批准了大连、厦门、上海、南昌、深圳等五个半导体照明产业基地, 之后在 2007 年和 2008 年相继批准了石家庄、扬州两个半导体照明产业基地, 政府在整个 LED 产业链的研发上给予政策、税收和资金方面的长期支持, 如图 1-2 所示。

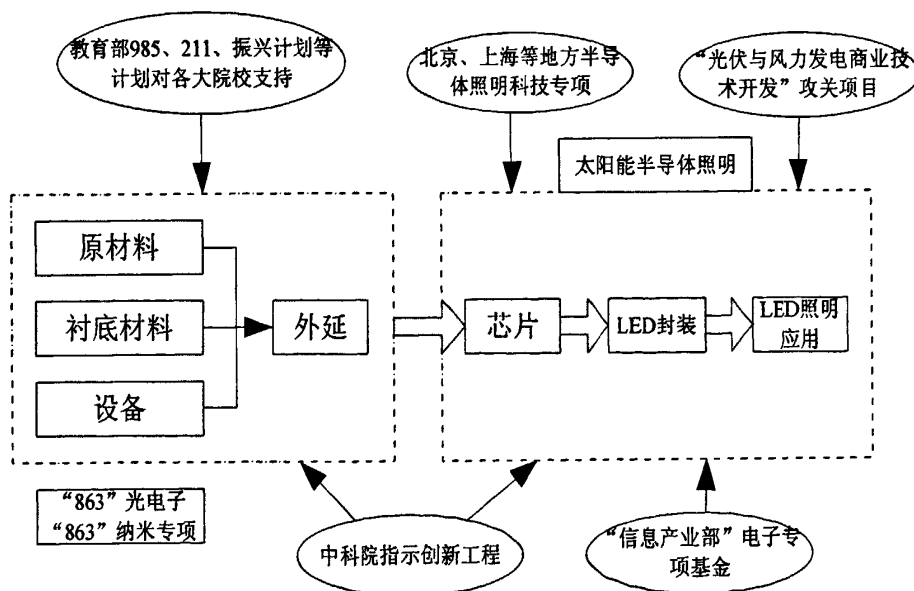


图 1-2. 中国对 LED 产业各环节的大力支持

一直以来, 我国都是 LED 的封装大国, 据统计全球 80% 的 LED 器件封装集中在中国。在中低端 LED 器件封装领域, 中国封装企业的市场占有率较高, 而在高端 LED 器件封装领域, 技术上有待进一步突破。据估算, 中国的封装产能 (含外资在大陆的工厂) 占全世界封装产能的 60%, 并且随着 LED 产业的聚集度在中国增加, 更多资本进入大陆封装产业, 中国的 LED 封装产能将会快速扩张, 在 LED 封装领域取得主导地位。

目前, 我国的功率型 LED 芯片以及一些封装的辅助材料还需要进口, 一定程

度上受到国外的制约,大功率的 LED 封装工艺有待进一步完善,尚不能形成完整的 LED 产业链^[9]。因此,我国必须将主要的技术研发重点放在整个 LED 产业链上,包括:大功率 LED 制备技术;Si 基衬底 GaN 基 LED 材料生长和低成本器件制造技术;提高 LED 发光效率;MOCVD 等外延生长、芯片加工设备及原材料的开发;功率型白光 LED 的封装工艺以及 LED 灯具系统设计和应用集成技术^[2]。

1.3 白光 LED 的市场应用

长期以来,由于 LED 光效低的原因,其应用主要集中在信号指示,数码显示等领域。随着超高亮 LED 的问世,LED 逐渐进入各大照明领域,现已被广泛应用于各种照明设备中,如手机数码相机闪光灯、手电筒、室内外道路和楼梯照明灯等。近几年,国内 LED 应用行业发展速度很快,2008 年我国半导体照明总产值近 700 亿元,其中芯片产值 19 亿元,封装产值 185 亿元,应用产品产值 450 亿元。目前,LED 市场应用主要在以下几个方面^[2,5,14]:

1. 户外大型全彩显示屏

由于大尺寸、广视角、高亮度和色彩丰富等特点,LED 显示屏广泛应用在单色标识和全彩显示方面。随着 LED 技术的不断发展,尤其是高亮蓝光 LED 的出现,LED 全彩显示得以实现后,LED 显示屏以其突出的优势成为大型显示的第一选择。如今,LED 大型全彩显示屏已广泛应用在车站、医院、商场、银行、证券、体育馆、市政广场、演唱会、机场等场所。

2. 液晶显示的背光源

在以手机为主的小尺寸液晶背光源中,LED 已经被广泛应用。目前手机、笔记本电脑市场需求量不断扩大,LED 背光源市场得到了快速发展,尤其是 3G 通信的启动,进一步促进 LED 在小尺寸背光源市场中的应用。随着各国节能环保标准的提出,LED 凭借其绿色环保、寿命长的优势将最终全面取代冷阴极荧光灯作为不同尺寸液晶显示器的背光源。

3. 汽车车灯市场

目前,LED 在汽车应用市场上还处于发展阶段,市场规模相对较小,但由于 LED 功耗低、寿命长、响应速度快等特点,被越来越多的汽车车灯生产厂商所关注。然而,目前 LED 的光效相对较低、且价格较高,LED 主要用在汽车尾灯以及车内照明等方面,进入汽车前照灯市场还需要一定的时间。近几年 LED 技术发展迅速,随着其光效的提升和成本的下降,LED 将逐渐实现从汽车内部、后部到

前部的转移，最终占据整个汽车车灯市场。

4. 景观装饰照明

景观装饰照明包括建筑装饰、室内装饰、旅游景点的装饰等，景观装饰照明对光源的光通量要求比较低，但对色彩变化却比较苛刻。通过电流控制，LED 可实现全彩，其颜色多样化、组合变化多、环保、寿命长、设计灵活性强等特点使其在装饰灯具市场中的发展处于有利地位。从都市的现代化建筑、到自然景观及夜景亮化工程，人们已经将注意力集中在 LED 上了。目前，我国许多城市都在开展“亮化工程”，但仍是传统光源为主。随着绿色照明的大力推广，在政府的大力支持下，LED 在景观照明市场中开始崭露头角，具有很大的发展空间。

6. 家庭照明

普通家庭照明是照明市场最大的一部分。目前，功率型白光 LED 由于光效、成本等因素，其应用局限在局部照明、装饰照明、轮廓照明等方面。要全面进入普通照明市场，除了面临着诸如发光效率较低、散热效果较差、成本过高等问题外，还要面临光学、机械机构与电控等方面的整合以及 LED 照明产品通用标准的制定。从 LED 近几年的迅猛发展来看，LED 走进家庭照明只是时间问题，随着 LED 技术的不断成熟，人类将全面步入绿色照明。

据中国国家半导体照明工程研发及产业联盟提供的数据，2008 年 LED 产品在各主要应用领域销售额分布统计显示：建筑景观是我国 LED 最大的应用领域，占总市场份额的 28%；LED 显示屏与家电显示屏为国内 LED 第 2 大应用领域，占总市场份额的 27%；手机、电脑笔记本等中小尺寸背光源为第 3 大应用领域，占总市场份额的 22%；交通信号灯、汽车灯、特种照明灯等各类应用占有一定市场份额。可见 LED 应用已经向各大领域渗透，而且在不断地扩大，目前 LED 还处于一个发展阶段，随着技术的进步，LED 将全面取代传统光源，实现节能环保的绿色照明。

1.4 本文的主要工作及创新点

照明用的功率型白光 LED，其光效、色温、色均匀性、显色性是产品性能的重要指标。光效提高是 LED 取代其他照明实现节能的关键，目前光效以每年 10—20lm/w 的速度提升，如何从封装的角度提高光效是本文研究的重点之一；同样色均匀性也是一个照明的重要指标，如何通过封装来改善 LED 的空间色均匀性是本文研究的另一个重点；对于 PC-LED 来说，产品的色温一般在 4000K-8000K，

如何通过封装实现对产品色温的精确控制是一个重要的研究课题；而显色性，往往与光效是相互矛盾的，要达到较高的显色性就必须牺牲一定的光效，需要根据产品要求在这两个指标中做出一个平衡。

本文主要研究的是应用性课题，通过建立模型模拟分析不同工艺参数，以及封装结构对白光 LED 性能的影响，分析影响白光空间均匀性的因素，并提出解决方案；开发一种基于水溶性感光胶的荧光粉悬空涂层工艺，提高白光 LED 光效，改善其空间色均匀性，同时实现色温可控的目的，而且便于产业化大规模生产。

第二章 白光 LED 的原理及目前存在的问题

2.1 LED 的发光原理及制造流程

类似于普通二极管，LED 也是由 PN 结构成的，同样具有单向导电性，在正向导通时发光，它是利用半导体 PN 结或类似结构把电能转换成光能的器件^[5]，其发光原理不同与白炽灯、荧光灯、气体放电灯等其他光源，是由电子与空穴复合发光的。大多数的发光二极管以 III-V 族化合物半导体（如 GaAs、GaP 或 GaN 等）材料为衬底，其核心是 PN 结。本征半导体的电阻率很高，通过掺杂可以改变半导体的电阻率，形成 P 型或 N 型半导体，如果在同一半导体中，一半掺入 III 族元素形成 P 型材料，另一半掺入 V 族元素形成 N 型材料，电子由 N 区向 P 区扩散，空穴由 P 区向 N 区扩散，在两半之间的边界上形成了 PN 结，同时产生一个势垒阻止电子和空穴的进一步扩散，达到平衡状态，如图 2-1(a)所示。当 PN 结外加一个正向偏置电压时，PN 结势垒降低，N 区电子向 P 区注入，电子和空穴在 PN 结处相遇复合并将多余的能量以光子的形式释放出来^[10]，如图 2-1(c)所示，这种发光称为注入式发光，出射光子的频率由半导体禁带宽度决定，因此，采用禁带宽度不同的材料制得的 LED，所发的光波长不同。此外，并不是所有的电子空穴复合都能产生光子，一些电子被无辐射复合中心俘获，能量以热的形式散发，这个过程被称为无辐射复合。这一物理过程不利于 LED 的发光，而且过多的热量会导致 LED 器件性能的衰退，甚至损坏，所以减少电子空穴对的无辐射复合是提高 LED 内量子效率的关键。

LED 的制造流程包括上游的晶片外延生长，中游的电极制作、切割和测试分选，以及下游的产品封装，如图 2-2 所示^[8]。目前功率型 GaN 基 LED 的外延生长多采用 MOCVD（金属有机物化学汽相淀积）技术，而芯片的切割和分选通过成熟的设备来完成，功率型 LED 封装在延续了普通 LED 的封装工艺的同时，为提高 LED 散热能力，开发出了陶瓷封装和共晶焊。

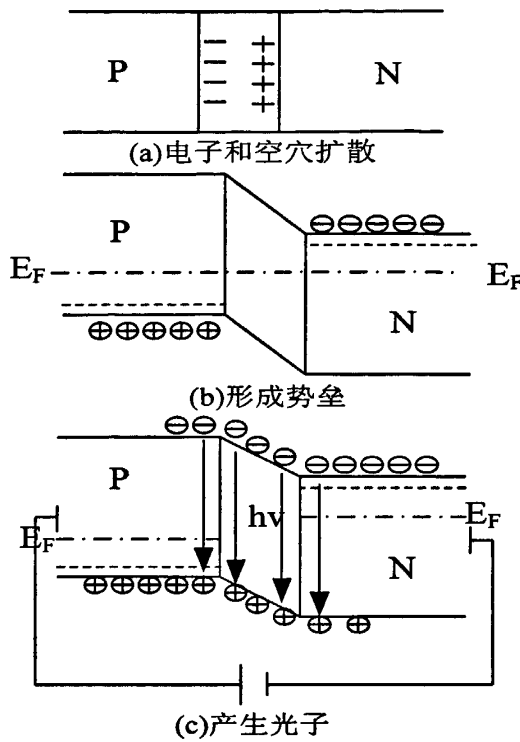


图 2-1.LED 的发光原理

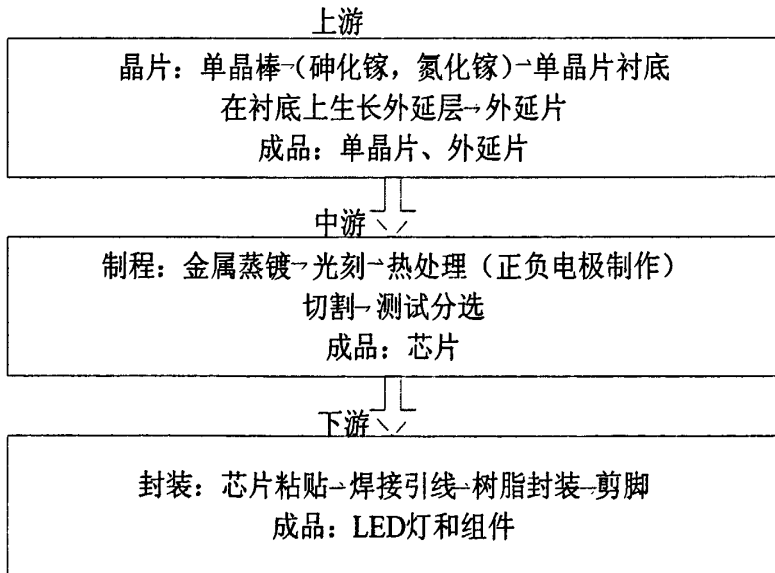


图 2-2.LED 的制造流程

大功率 LED 器件的核心就是 LED 芯片，如何制得高亮、高可靠性的 LED 芯片是人们研究的重点。LED 芯片结构如图 2-3 所示，主要包括外延层和电极，一直以

来,找不到合适的衬底材料来生长 GaN 有源层,蓝光 LED 的发光效率相对较低,近年来,随着发光材料的开发和半导体制作工艺的改进,通过在蓝宝石上生长一层 GaN 的缓冲层,在缓冲层上生长有源层,晶格失配率大大降低,内量子效率得到极大地提升^[11],另外在芯片生长工艺中引入了双反射和分布式布拉格反射结构和量子阱结构,并采用了倒装芯片技术和表面粗糙化纹理结构等改进措施,极大程度上提高了 LED 的光抽取效率。目前 1W 的蓝光 LED 的光功率已达到 643mW^[12]。

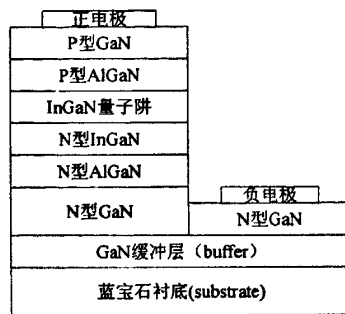


图 2-3.LED 芯片结构图

电极同样是 LED 的一个重要组成部分,影响 LED 的外量子效率^[13]。为减少光损耗,提高光效,电极的设计须满足三个方面的要求:一是尽可能低的接触电阻,目前用于制备电极的材料有 Au-Ge、Au-Zn 和 Au-Ni 等;二是要求电流均匀的分散到芯片截面积上尽可能大的区域。为保证芯片中横向电流均匀分布,有效电流路径必须很短并且尽可能的相等,对于大面积 LED 芯片,单电极是不利于电流扩散的,商用 LED 中广泛采用了梳状交叉、点状阵列以及米字型等电极结构设计,如图 2-4 所示;三是尽可能减少电极对光的遮挡而造成的损耗,在保证电流的均匀性的同时,尽量减少电极的几何面积,目前采用的方案主要是,研发透明电极和采用倒装芯片技术。

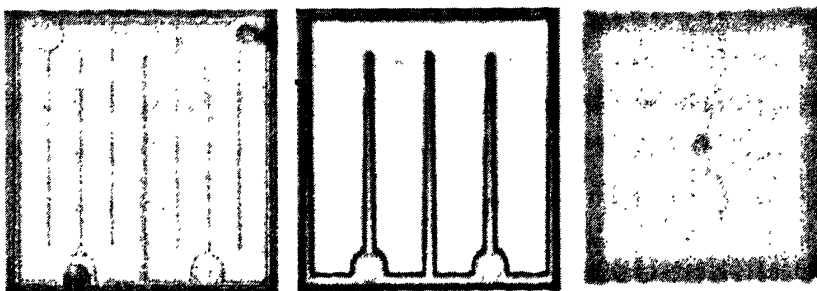


图 2-4.LED 芯片表面电极实物图

2.2 白光 LED 的实现方法

白光 LED 是半导体照明的核心器件，如何实现白光 LED 一直是人们研究的重点。众所周知，白光是由多种单色光混合而成的复合光，如日光可分为红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七种单色光，而显示技术中的白光是由红、绿、蓝三基色组成。由 LED 的发光原理可知，LED 所发出的光为窄带单色光，因此单个 LED 芯片是无法得到白光的。

根据对可见光的研究，人的眼睛所能看到的白光可以由两种或两种以上的单色光混合而成。基于这一原理，有两种方法得到白光 LED：第一种方法是通过荧光粉转换得到白光 LED，被称为 PC-LED(Phosphor Converted LED)；另一种方法是将三基色的 LED 芯片封装在一起，三色组合得到白光，简称 MC-LED(Multi-Chip LED)。具体的实现方案有以下几种^[2,10,14]：

1. 蓝光 LED+黄色荧光粉

这种白光 LED 是利用 LED 发出的蓝光激发涂布在其上方的黄色荧光粉产生黄光，透射过荧光粉层的蓝光与激发出的黄光双色混合得到白光。目前，YAG: Ce³⁺ 荧光粉的发光效率最高且发射带宽较宽，其吸收峰覆盖整个 LED 发射光谱，激发效率较高^[15]，且得到的白光显色性较好，因此被广泛采用。由于该法成本较低，制作工艺相对简单，且荧光粉的制备工艺比较成熟，此类白光 LED 现已商品化。随着蓝光 LED 发光效率的不断提高以及荧光粉合成技术的不断进步，近几年这种形式的白光 LED 的光效得到迅速地提升。

然而上述的白光 LED 还存在两个严重的问题需要解决：

①空间色均匀性问题。目前这种白光 LED 的封装工艺主要采用点胶工艺，虽然操作简单，但由于荧光粉层厚度不均匀，导致在发光区中央部分看起来较白（或偏蓝），而边缘区较黄，且单管间的颜色差异也较大（滴胶量不易控制）。

②这种双基色的白光 LED，由于白光光谱中缺乏红光等其他光谱成分，其显色性较差。

2. 紫外 LED+RGB 荧光粉

这种白光 LED 的原理与日光灯的发光原理类似，其优势就在于 LED 所发出的紫外光不参与配色，而是由三色荧光粉激发产生的光配成白光，因此，配出的白光对紫外 LED 波长与强度的变化不会特别敏感，可通过改变荧光粉的配比获取一定色温的白光。由于三色荧光粉的发光谱线较宽，可覆盖整个可见光区，这种白光 LED 的显色性较好。

然而该方法仍然存在着相当大的技术难度。首先,所用荧光粉转化效率相对较低,而且目前广泛采用的红色、绿色荧光粉多为硫化物,其发光稳定性差,光衰较大,且 Stocks 频移造成的能量损失较大,因此,急需开发新的高效、低光衰的白光 LED 用荧光粉;其次紫外 LED 自身的光功率相对较低,抗紫外的封装材料有待开发;最后高效功率型 UVLED 不易制备且存在紫外线泄露的安全隐患^[16]。

3. RGB 三基色 LED 多芯片集成封装

三基色 LED 直接封装获得白光 LED 的优点是不需要荧光粉,可避免荧光粉转换和 Stocks 频移造成的能量损失^[17],同时可以通过驱动电路控制红、绿、蓝 LED 的发光强度实现全彩。然而 LED 所发出的光多为窄带光谱,合成的白光光谱无法覆盖整个可见光区,因此其显色性较差。而且混色困难,其光斑的空间色均匀性较差。另外 RGB 三色 LED 的半导体材料差异较大,量子效率也不同,光色随电流和温度的变化不一致,衰减寿命也不相同,要保证色彩的稳定性,需要加入反馈电路对三种颜色的 LED 分别进行补偿和调节,这使得其驱动电路复杂,而且导致 10%-15%的能量损失。对于功率型 LED,RGB 三色 LED 封装在一起,热阻约为其它封装形式的 3 倍,散热问题尤为突出,且成本较高,阻碍了这种白光 LED 的商业化和实用化进程。

2.3 白光 LED 的封装设计

LED 产业链主要包括 LED 芯片制造、LED 封装及 LED 应用。作为 LED 产业链中承上启下的 LED 封装产业,在整个产业链中起着重要的作用。在基于 LED 器件的各类应用产品中,LED 应用产品的各项性能很大程度上由 LED 器件的性能决定,而封装工艺对 LED 尤其是白光 LED 的性能影响至关重要。

照明用的白光 LED 对光学性能的要求较高,其封装工艺在保证电气互连的同时,对封装材料、结构提出了更高的光学要求^[5]。在白光 LED 封装工艺中,涉及到多个学科如光学、电学、力学、热学、机械、材料、半导体等。只有对相关学科知识有充分的把握,才能实现最优的封装效果,而不良封装将导致 LED 散热困难、光效降低、色均匀性差、使用寿命短等缺陷。LED 封装需要对光、热、电、结构等性能统一考虑,在封装过程中,材料(散热基板、荧光粉、灌封胶)和封装结构(如热学界面、光学界面)对 LED 光效以及可靠性的影响很大,特别是对于 PC 白光 LED,其封装工艺中的荧光粉涂层工艺是整个封装工艺的关键,荧光粉、灌封胶等封装材料的光学性能以及涂层工艺极大程度上影响了白光 LED 的整

体性能。

LED 封装产业经过 40 多年的发展,出现了多种外形结构的封装形式,这些封装的主要目的就是在保护芯片的同时,控制光的发散角,使光线向预定和期望的方向发射,从而得到特定的光学效果。而功率型白光 LED 的封装设计不同于一般的 LED 封装,除了具备一般 LED 的封装要求外,还需要对荧光粉层的几何结构和空间位置进行设计,同时散热设计也是功率型白光 LED 封装的重点。荧光粉层决定白光的质量,而良好的散热设计是保证 LED 的性能的稳定性的关键,因此在白光 LED 封装设计中,不仅要保证 LED 电气连通和保护芯片,还要重点考虑荧光粉层的位置、几何结构以及散热问题。

目前,白光 LED 的封装的研究重点主要包括:荧光粉涂层、衰减寿命、散热设计、光学匹配、失效率、一致性等^[9]。封装外形主要是贴片式尤其是顶部发光 TOP 型 SMD 型封装结构。同时在封装支架尺寸、封装结构设计、材料选择、光学设计、散热设计等方面不断创新,如采用高透明、高折射率硅树脂代替传统封装材料环氧树脂,提高光的抽取效率;通过调整荧光粉层的位置,防止荧光粉热老化,改善白光质量;采用共晶焊以及陶瓷封装来改善散热问题,提高器件性能的稳定性的稳定性。

2.4 目前白光 LED 存在的问题

目前,白光 LED 的发展非常迅速,各国及相关企业投入了大量的人力物力,业界普遍认为白光 LED 为人类第四代光源,然而,目前 LED 进入普通照明市场实现大规模的半导体照明还有许多问题有待解决。

1. 发光效率偏低而成本较高

虽然目前白光 LED 的发光效率的实验室水平已达到 208lm/w,但商品化的功率型白光 LED 的发光效率仍然在 100lm/w 左右,略高于荧光灯的发光效率,然而价格却是荧光灯的几倍,而且附加驱动电路带来的费用,因此白光 LED 要彻底取代传统光源不仅要提高光效,更重要的是降低成本。就提高光效而言,一方面要求在芯片制造方面不断提高量子效率,另一方面要求 LED 在封装及灯具设计中尽可能的减少光损耗。有资料显示 LED 的极限效率在 300lm/w,就近几年的研究水平来看,LED 的发光效率以每年 20lm/w 的速度提升,高效的白光 LED 将在不久的将来实现,而降低成本是首要解决的问题,价格问题已成为影响其进入照明领域的最大门槛,只有不断改进制造工艺,在技术上不断革新,严格控制生产成本,

实现大规模产业化，把产品价格降至普通用户可接受的范围之内，才能全面实现半导体照明。

2. 散热问题

散热问题是功率型白光 LED 面临的一个重大问题，散热效果的优劣直接关系到器件的可靠性。虽然目前功率型 LED 的光功率已经较高，1w 的蓝光 LED 的光功率超过了 600mw，但仍有部分能量以热的形式散出，如果热量集中在尺寸很小的芯片内部使芯片温度过高将导致 LED 器件老化，缩短使用寿命；LED 的发光波长发生偏移，导致白光色坐标漂移；由于荧光粉层紧贴芯片表面，荧光粉温度升高导致其量子效率降低，同时加速了荧光粉老化。

3. 高效，低光衰荧光粉的开发

荧光粉是光转换法制备白光 LED 的关键材料，它的性能直接影响器件的亮度、色温、色坐标和显色指数等参数。目前掺有稀土元素的荧光粉还不能完全满足白光 LED 的性能要求，荧光粉的发射光谱相对较窄，得到的白光显色性较差，一些荧光粉的转换效率较低，尤其是红色荧光粉，因此开发高性能的荧光粉，是制备高亮、高显色性白光 LED 的关键^[18]。

4. 空间色均匀性和显色性的改善

目前商品化的白光 LED 大多采用蓝光 LED+黄色荧光粉的方式实现白光，其中荧光粉的涂层工艺一般采用点胶工艺，该工艺得到的荧光粉层厚度不均匀，导致白光的空间色均匀性较差，需要开发新的涂层工艺，改善白光 LED 的空间色均匀性。

传统光源如白炽灯和卤钨灯的显色指数都接近 100，色温在 3000K 左右，而 PC-LED 的显色指数约为 75，且难以做到色温低于 3000K 的白光。通常通过在 YAG: Ce³⁺ 荧光粉中掺入少量的红色荧光粉来实现低色温、高显色性的白光 LED，然而红色荧光粉的转换效率较低，Stokes 频移造成的能量损失较大，所以这种方法是牺牲光效为代价的。

5. 白光 LED 照明系统驱动电路的开发

功率型白光 LED 的工作电流很大，1W 的白光 LED 工作电流为 350mA。家庭照明供电电源通常为交流市电，而 LED 需要低电压恒直流驱动，因此需要研发 LED 照明系统的专用驱动芯片。目前已有不少公司推出了他们为照明用的 LED 驱动芯片，而只有高效、稳定的 LED 驱动才能充分发挥 LED 的优势。

在上述几个问题中，最突出的就是散热和价格问题。只有解决了散热问题，提高了器件性能的稳定性，且价位大幅降低到接近普通光源，才能使 LED 真正进

入普通照明。

2.5 小结

发光二极管的结构与一般的二极管相同，都是由 pn 结构成，正向导通时，电子和空穴复合，能量以光子的形式释出，光波长由半导体材料的禁带宽度决定。高抽取效率的 LED 设计主要是 LED 内部结构的设计和 LED 的电极设计。

白光 LED 的封装是制备白光 LED 的一个重要环节，它关系到 LED 的亮度、光衰、失效率、一致性以及整体的光学分布。功率型白光 LED 的封装正处于发展阶段，荧光粉涂层工艺、封装支架尺寸、封装结构设计、材料选择、光学设计、散热设计等有待进一步开发。目前实现白光 LED 的方法主要有光转换法和多芯片组合法，考虑到技术、成本、工艺等方面的因素，光转换法被国内外广大厂商采用。

LED 光电产业作为一个新兴的朝阳产业，必然存在着诸多问题，解决这些问题是实现固态照明的关键。由于 LED 受到世界范围内的极大关注，各国对其研究力度不断加大，许多制约 LED 性能的关键问题已得到解决，相信在人类共同努力下，阻碍 LED 进入通用照明领域的问题将被一一解决。

第三章 白光 LED 封装工艺的光学模拟

3.1 蒙特卡罗分析法原理

蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法是一种基于“随机数”的计算方法。这一方法是在二战期间产生和发展起来的, 他的奠基者是美籍匈牙利人数学家冯伊曼 (J.Von Neumann 1903—1957)^[19]。由于该方法的计算量非常大, 而当时没有电子计算机, 所有的运算只能通过手工来完成, 因此在相当长的时间里 Monte Carlo 方法难于推广。随着 20 世纪 40 年代电子计算机的出现, 特别是大型高速电子计算机的出现, Monte Carlo 方法被重新提起并引起世人重视, 应用日渐广泛。

蒙特卡罗法源于人们对随机抽样事件的理解。以概率统计理论为基础, 依据大数定律, 通过计算机数值模拟来解决一些直接用数学计算难以解决的复杂问题^[19]。对于任何一个函数, 只要在其区间内均匀地选取足够多的样品, 就能得到接近其期望值的结果。随着样品的增多, 其结果无限接近期望值, 当样品无穷多时, 实现事件的重演^[20]。

该方法的基本思想可以这样表述: 对于某一事件, 可以描述成函数 $z=f(x_1, x_2 \dots x_k)$, $x_1, x_2 \dots x_k$ 为事件中的随机变量, 设 $z_1 > 0$, 事件发生, 否则事件不发生。假设所有的随机变量满足均匀分布, 通过计算机的均匀概率发生器在其区间内随机取出一组数据 $x_1, x_2 \dots x_k$, 代入事件函数中得到函数值 z_1 , 做 N 次这样的试验, 得到随机变量 z 的一组样本: $z_1, z_2 \dots z_k$, 若其中有 M 个 $z > 0$, 当 $N \rightarrow \infty$ 时, 根据大数定理该事件发生的概率 $P=M/N$ 。简言之, 通过对事件的大量随机抽样得到事件发生的可能性^[21]。

对于许多现实问题可以抽象为事件的发生与否, 并采用一个或多个函数来描述, 所以蒙特卡罗法为模拟现实世界中的各种现象提供了可能, 但前提是对大量的数据进行模拟, 才会得到接近事实的结果。随着计算机的计算速度的提高, 使获取足够多的数据成为可能, 蒙特卡罗法逐渐被人们认同并在各领域广泛采用。

蒙特卡罗法的核心是对样品的随机采样, 随机模型的构造很大程度上取决于随机数的性质, 通常随机数分为均匀随机数和非均匀随机数。均匀分布的随机数是不存在的, 而计算机给出的随机数是通过一定算法产生的伪随机数, 这些随机数大多是通过数学递推公式得到的, 而大部分事件的模拟需要符合某种分布的非

均匀随机数，这就需要通过均匀随机数获得符合要求的非均匀随机数，即按照函数分布规律的随机数，获取这类随机数的方法有很多，下面介绍两种常用的获取非均匀随机数的方法^[20]：

1.对于概率分布密度函数 $p(x)$ ，累积分布函数 $P(x)$ 的随机序列 X_n 而言，有如下关系式：

$$P(x) = \int_a^x p(t)dt \quad (3-1)$$

其中 a 为 X_n 区间下限，假设 $P(x) \in (0,1)$ 的随机均匀序列，通过求解 $P(x)$ 的逆函数可得到按 $p(x)$ 分布的随机序列 x ：

$$x = p^{-1}(\zeta), \zeta \in (0,1) \quad (3-2)$$

2.对已知的均匀分布的随机序列，按照特定条件采样的方式得到非均匀随机序列。根据随机产生的均匀分布点取值，如果产生的值落在概率密度曲线的下方，则认为产生的点是符合要求的，并将其保留；如果落在概率密度曲线的上方，则认为该点不符合要求，将其剔除。这些被保留下来的点的横坐标就服从了函数分布。可以想象，在 $\text{Max}(p(x))$ 处的值比较大，所以在 x 附近符合要求的点个数要多，相应的远离 x 处的点就少。

3.2 白光 LED 封装结构的蒙特卡罗模拟

3.2.1 荧光粉层中的光子包输运过程

光子在荧光粉层中传输，会遇到边界的反射、折射，胶体及荧光粉颗粒的散射、吸收，荧光粉激发的新光子发射等事件。所有这些事情均可看作是光子在荧光粉层中随机发生的函数，这些函数将决定光的传输方向和频率变化。为了提高蒙特卡罗模拟的效果，采用了一个简单的变量衰减技术^[22]，该技术是将很多性质相同的光子等效为一个光子包同时传输，并设定光子包参数，其中包括光子包的位置 (x, y, z) 、运动矢量 (μ_x, μ_y, μ_z) 和权重 W 。光子包的权重反应光子包中光子的数量，设光子包的初始权重为 1，通过累计出射光子包的权重来获得出射光子数。假设光子包在传输过程中，所有的反射为镜面反射，荧光粉颗粒作为质点处理。光子包与荧光粉颗粒碰撞后，被荧光粉层吸收和散射概率由荧光粉层的吸收、散射系数决定，因此，在对荧光粉层中光子包传输过程中的蒙特卡罗模型包括两个

过程：荧光粉颗粒对光的散射和吸收，光子包被荧光粉散射后，仅改变传播方向，不改变光子包的频率；被荧光粉吸收后的，一定概率发射新光子包，其方向和频率均发生改变。

蒙特卡罗法模拟光子传输主要有以下几个步骤：

1. 确定从芯片发出的光子包的初始条件，即该光子包的出射位置、单位方向向量、频率和权重；

2. 计算光子包的随机自由程，并确定光子包与荧光粉颗粒碰撞后的方向向量、频率和权重；

3. 计算光子包在介质边界发生反射和折射后，光子包的运动方向向量和权重；

4. 判断光子包是否出射到自由空间，记录出射到自由空间的光子包所有参数，并结束对该光子包的跟踪，否则继续跟踪该光子包，直到光子包权重小于某一设定值时，通过轮盘赌来决定该光子包是否消亡，如果消亡则结束对该光子包的跟踪。

5. 循环计算，直到所有的光子包跟踪完毕，记录所有出射到自由空间的光子包参数，并计算白光的性能参数。

3.2.2 确定出射光子包的频率和方向向量

由于光子在芯片表面的任何一个位置均可能出射，且几率均等，所以光子包的出射位置可以通过均匀随机数随机抽样来分配光子包的初始出射位置。实验中的 GaN 蓝光 LED 芯片为 $1 \times 1 \text{mm}^2$ 的面光源，其光强分布应遵循朗伯分布^[23]，即

$$I = I_0 \cos \theta \quad (3-3)$$

I_0 最大光强； I 为与法线方向成 θ 角的光强

因此，光子包的初始发射角并非均匀分布，需要通过非均匀随机数抽样得到其初始发射角。将芯片分为无数微小面积元，每个面积元的出射光强分布均为朗伯分布，可认为每个面积元上光的出射角 θ 的概率密度分布函数为 $p(\theta) = \cos(\theta)/2$ ，累计分布函数为：

$$P(x) = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\alpha} \frac{1}{2} \cos(\theta) d\theta \quad (3-4)$$

求解 $P(x)$ 的逆函数可得到满足 $p(\theta)$ 分布的随机序列 θ ，即

$$\cos \theta = \sqrt{1 - (2 \cdot \xi - 1)^2}, \xi \in (0, 1) \quad (3-5)$$

θ 为光线与法线的夹角。

对于一组光子包，其水平方向的方向向量可通过均匀随机数，随机抽样得到，垂直方向的方向向量则通过公式(3-5)的随机数抽样得到。

GaN 蓝光芯片的光谱半宽较窄（30nm 左右）且峰值两边分布均匀，其光谱分布可采用高斯函数来描述^[24]：

$$E(\lambda) = \frac{B}{\sqrt{\pi} \cdot \sigma / 2} \cdot \exp\left[-2 \frac{(1/\lambda - 1/\lambda_0)^2}{\sigma^2}\right] \quad (3-6)$$

σ 决定光谱半宽， B 决定光谱峰值，通过调整参数值得到与实际发光谱接近的曲线。同样采用上述方法得到符合公式(3-6)的非均匀随机数列，抽样给出该光子包的初始频率。

3.2.3 光子包的随机自由程

确定光子包的初始参数后，光子包将按照初始条件传输，当光子包进入荧光粉层后，一定几率与荧光粉颗粒发生碰撞，并改变光子包的传播路径。将光子包与荧光粉颗粒发生两次碰撞时，光子包传输的距离定义为光子的自由程。由于荧光粉颗粒在荧光粉层中是随机分布的，光子的自由程同样具有随机性，因此光子的随机自由程亦可通过蒙特卡罗法对光子的自由程的几率分布取样来获取。

已知自由程的取值范围 $s \in [0, \infty]$ ，由相互作用系数 μ_i 的定义可以得出，在 $(s', s' + ds')$ 的范围内单位步长上发生相互作用的几率为：

$$\mu_i = \frac{-dP\{s \geq s'\}}{P\{s \geq s'\} ds'} \quad (3-7)$$

通过对 s' 在区间 $(0, s_1)$ 内积分，得到一个指数分布

$$dP\{s \geq s'\} = \exp(-\mu_i s_1) \quad (3-8)$$

所以随即自由程的累积分布函数

$$dP\{s < s'\} = 1 - \exp(-\mu_i s_1) \quad (3-9)$$

将一个均匀分布的随机数 ξ 赋值给该累积分布函数，该等式被重新整理为随

机自由程:

$$s = \frac{-\ln(1-\xi)}{\mu_t}, \xi \in (0,1) \quad (3-10)$$

所以光子包在传输了一个自由程之后的新坐标即为:

$$\begin{cases} x' = x + \mu_x s \\ y' = y + \mu_y s \\ z' = z + \mu_z s \end{cases} \quad (3-11)$$

3.2.4 荧光粉的吸收和散射模型

光子包传输了一个自由程后,与下一个荧光粉颗粒碰撞,一部分被反射和散射,另一部分透射,剩余的部分被吸收后转化为黄光出射。将反射、透射作为散射的一部分^[20],因此光子包只发生吸收和散射,其权重随即发生衰减,同时传输方向随之改变,所以光子包与荧光粉颗粒碰撞后需要对光子包的权重和传输方向重新分配。

1. 碰撞后的光子包权重

光子包与荧光粉碰撞时,将光子包的权重按照一定的比例分为被散射的光子包权重 W_s 和被吸收的光子包权重 W_a ,该比例由荧光粉的吸收系数 $\mu_a(\lambda)$ 和散射系数 $\mu_s(\lambda)$ 决定,被散射的光子包继续在荧光粉层中传输,而被吸收的光子包消亡,同时荧光粉被激发产生新的光子包。

被散射的光子包权重:

$$W_s = W - \frac{\mu_a(\lambda)}{\mu_a(\lambda) + \mu_s(\lambda)} \quad (3-12)$$

光子包被吸收后出射的新光子包的权重

$$W_a = \eta \left(W - \frac{\mu_a(\lambda)}{\mu_a(\lambda) + \mu_s(\lambda)} \right) \quad (3-13)$$

η 为荧光粉的转化效率

2. 光子包的传输方向角

被吸收的光子包激发荧光粉产生新的光子包,该光子包以任意角度随机出射,因此,可采用均匀随机数,随机分配新光子包的传输方向角。

散射后的光子包传输角度发生了变化,需要对偏转角 θ 和方位角 φ 进行统计取样,其中 $\theta \in [0, \pi]$, $\varphi \in [0, 2\pi]$, 偏转角余弦几率分布可由 Henyey 和 Grenstein 首次提出的散射函数来描述^[20]:

$$p(\cos(\theta)) = \frac{1-g^2}{2(1+g^2-2g\cos\theta)^{3/2}} \quad (3-14)$$

式中的 g 为各向异性因子,等于偏转角余弦的平均值,其取值范围在-1 到 1 之间。当值取 0 时,表示均匀散射即偏转角在 0 到 π 范围内均匀取值,当值取-1 时表示极强的后向散射能力,当值取 1 时表示极强的前向散射能力。

以概率方式表示 $\cos\theta$:

$$\cos\theta = \begin{cases} \frac{1}{2g} \{1+g^2 - [\frac{1-g^2}{1-g+2g\xi}]^2\}, g \neq 0 \\ 2\xi - 1, g = 0 \end{cases} \quad (3-15)$$

对于方位角 φ , 在 0 到 2π 的取样公式为:

$$\varphi = 2\pi\xi, \xi \in (0,1) \quad (3-16)$$

通过抽样确定出偏转角 θ 和方位角 φ 后,光子包新的传输方向向量可以通过下面的公式计算^[22]:

$$\begin{aligned} \mu_x' &= \frac{\sin\theta}{\sqrt{1-\mu_z^2}} (\mu_x\mu_z \cos\varphi - \mu_y \sin\varphi) + \mu_x \cos\theta \\ \mu_y' &= \frac{\sin\theta}{\sqrt{1-\mu_z^2}} (\mu_y\mu_z \cos\varphi + \mu_x \sin\varphi) + \mu_y \cos\theta \\ \mu_z' &= -\sin\theta \cos\varphi \sqrt{1-\mu_z^2} + \mu_z \cos\theta \end{aligned} \quad (3-17)$$

当光子垂直出射即 $|\mu_z| > 0.999$ 时,上式简化为:

$$\begin{aligned} \mu_x' &= \sin\theta \cos\varphi \\ \mu_y' &= \sin\theta \sin\varphi \\ \mu_z' &= \pm \cos\theta, \mu_z > 0 \text{取正}; \mu_z < 0 \text{取负} \end{aligned} \quad (3-18)$$

3.光子包的频率变化

光子包与荧光粉碰撞后，被散射的光子包频率不发生改变，被吸收的光子包一定比例激发荧光粉产生新的光子包，YAG:Ce³⁺荧光粉的吸收光谱和发射光谱如图 3-1 所示^[25]，其吸收峰值波长在 460nm 左右，与 GaN 芯片发出的蓝光峰值波长吻合，且吸收波长的带宽完全覆盖了 LED 的发光谱线。该荧光粉受到激发后产生峰值波长在 550nm 左右的黄色光谱，该光谱与 LED 发出的蓝光光谱混合得到白光。

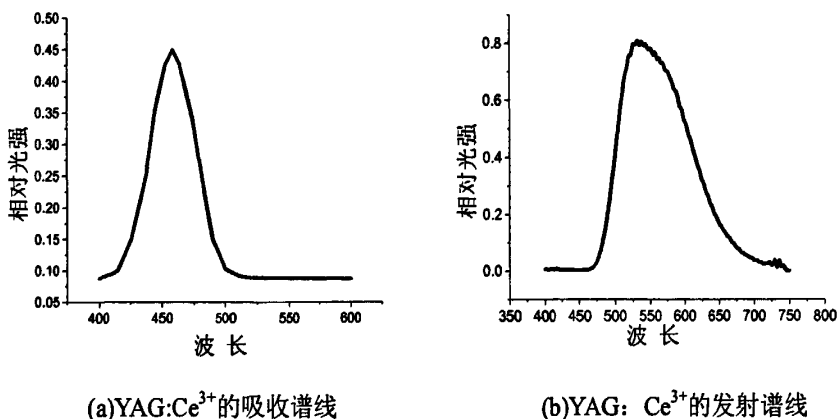


图 3-1.YAG: Ce³⁺的吸收、发射光谱

对于粉末材料，直接确定其吸收散射系数是不可能的^[26]，很多情况我们需要的是吸收系数和散射系数的比值，模拟中假设散射系数与波长无关，最大吸收系数与散射系数的比值为 m 。根据荧光粉的吸收谱线得到一个拟合函数，该函数作为吸收系数的分布曲线，由该函数得到不同波长的吸收系数与散射系数的比值，该比值即为光子包与荧光粉碰撞后，吸收的光子包与散射的光子包比例。被吸收的这部分光子包将转换为不同频率的新光子包出，新光子包的频率由荧光粉的发射谱线决定，根据荧光粉的发射谱线得到一个拟合函数，作为新光子包频率的概率分布曲线，通过上文提到的非均匀随机数的获取方法，新光子包通过随机采样获取其出射频率，程序拟合得到的荧光粉吸收、发射谱线如图 3-2 所示。

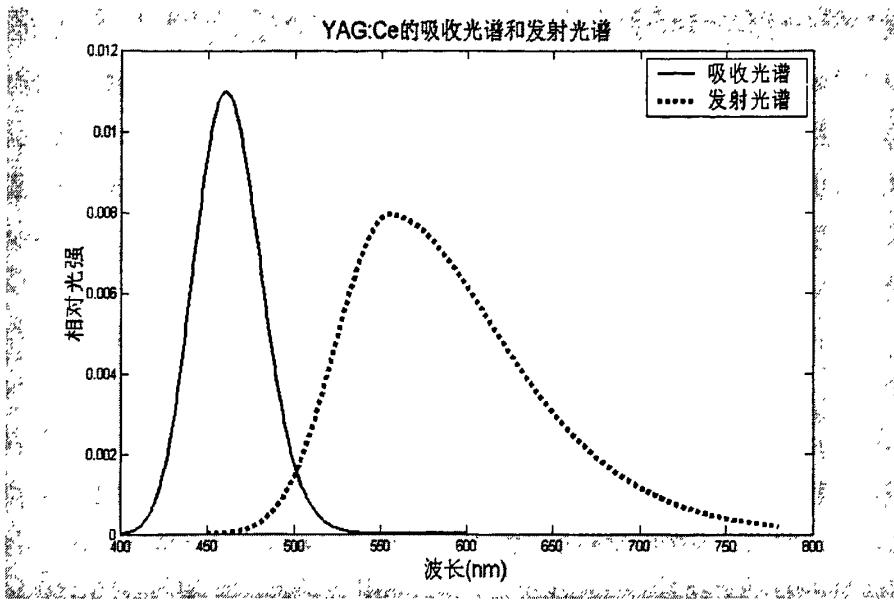


图 3-2.程序模拟出的 YAG: Ce³⁺荧光粉的吸收、发射光谱

3.2.5 光子包的反射和折射

光从一种介质中射入折射率不同的另一种介质中，在介质表面发生镜面反射和折射。根据 Fresnel 反射定律，反射率为：

$$R = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \right)^2 + \left(\frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \right)^2 \right] \quad (3-19)$$

其中 θ_1 和 θ_2 分别为入射角和折射角， n_1 和 n_2 分别为入射介质和折射介质的折射率。

光子包在界面部分发生反射，部分发生透射，光子包按一定比例分为两组新的光子包，被反射的光子包权重：

$$W_r = W * R \quad (3-20)$$

透射的光子包权重：

$$W_t = W * (1 - R) \quad (3-21)$$

同时，经过反射和透射的光子包的传输方向发生了改变，设光子包的初始运动单位向量为 \vec{a} ，介质的法线单位向量 \vec{c} ，反射光的单位向量 \vec{b} ，折射光的单位向量 \vec{t} ，其运动单位向量可通过下式计算得出^[27]：

$$\vec{b} = \vec{a} - 2(\vec{a} \cdot \vec{c}) \times \vec{c} \quad (3-22)$$

$$\vec{t} = \frac{n_1}{n_2} (\vec{a} + (\vec{a} \cdot \vec{c}) \left(\sqrt{1 + \frac{n_2^2 - n_1^2}{(n_1(\vec{a} \cdot \vec{c}))^2}} - 1 \right) \cdot \vec{c}) \quad (3-23)$$

3.2.6 光子包传输终止

在整个模拟过程中，有两种情况会结束对光子的跟踪，一是光子经过多次反射、折射、散射后最终出射到自由空间中，将该光子包的各个参数记录下来，结束对其的跟踪；二是光子包的权重小于某一设定值时，通过俄罗斯轮盘赌的方法^[20]来决定其是否消亡，该光子包将有 $1/m$ 的几率存活，如果未消亡则让它的权重乘以一个数值 m ，此时的权重变为 mW ，继续跟踪该光子包，否则，它的权重就会衰减到零，这样光子就以一种很公正的方式消亡，不存在能量的损耗，同时该光子包的跟踪也就结束了。到此为止，一个光子包的跟踪过程就结束了，随即开始对下一个光子包的跟踪，如此循环往复，直到所有的光子包被跟踪完毕，并记录所有的光子包参数。

3.2.7 出射白光的性能参数计算

白光 LED 的性能参数主要包括：光通量、色坐标、色温、显色指数等，下面通过模拟计算的方法获取这些参数。

1. 光通量的计算

光通量是与人的视见函数有关的物理量整个光谱范围内的光通量为：

$$\Phi = K_{555} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\lambda} V_{\lambda} d\lambda \quad (3-24)$$

其中 $K_{555} = 683 \text{ lm/w}$ ， P_{λ} 为光谱的能量分布， V_{λ} 为光谱的视见函数。

预设芯片出射的光之包数为 N ，权重为 1，累计出射光中波长为 λ 的权重，得到出射光中波长为 λ 的个数 $n(\lambda)$ ，根据公式：

$$P(\lambda) = \frac{n(\lambda) \cdot h \cdot c}{\lambda} \quad (3-25)$$

h 为普朗克常数， c 为光速

得到对应波长的光功率，引入视见函数 V_{λ} ，根据公式 (3-24) 得出整个可见光谱的相对光通量。

2. 色坐标和相对色温的计算

色坐标是 CIE (国际照明委员会) 提出的表色系统。对于不同光源发出的光, 由于光谱功率分布的差异显现出不同的颜色。人们经过混色实验发现, 所有的光都可以由三种单色光按一定比例混合而成, CIE 规定这三种单色光分别为 700.00nm 的红光, 546.1nm 的绿光, 435.8nm 的蓝光并称其为三基色。为了便于计算, 规定了 XYZ 系统, 根据 CIE 1931 色度函数 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, (又称色匹配函数, 适于观察视场角小于 4° 的情况) 及光源相对光谱能量分布 $P(\lambda)$ 可以求出色度坐标 xyz 中光源的三刺激值 X、Y、Z:

$$\begin{aligned} X &= \int E(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda = \sum E(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda \\ Y &= \int E(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda = \sum E(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda \\ Z &= \int E(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda = \sum E(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda \end{aligned} \quad (3-26)$$

光源在 CIE 1931 色度图上的色坐标为:

$$\begin{cases} x = X / (X + Y + Z) \\ y = Y / (X + Y + Z) \\ z = Z / (X + Y + Z) \end{cases} \quad (3-27)$$

色温是光源颜色的一种表示方法, 当光源所发出的光的颜色与黑体在某一温度下的颜色相同时, 这一黑体的温度称为该光源的颜色温度, 简称色温 (CT), 单位为 K。不同温度的黑体的光色变化在色度图上形成一条弧形轨迹, 被称为黑体轨迹。热辐射光源 (如白炽灯、卤钨灯等) 的颜色变化基本上与黑体轨迹相符。而一些其他光源的光色不一定落在黑体轨迹上, 只能采用相关色温来表示, 若光源发出的光与黑体在某一温度下的颜色最接近, 则黑体此时的温度称为该光源的相关色温。

色温高的光源的颜色偏蓝, 称为冷色, 色温低的光源的颜色偏红, 称为暖色, 介于二者之间的光色称为中心色。不同色温的光源给人的感觉不同, 照明设计中, 不同色温光源可以得到不同的照明效果, 因此, 色温是光源的一个重要性能参数, 下面给出了色温的一个计算公式^[28]:

$$\begin{aligned} m &= (x - 0.3320) / (y - 0.1858) \quad x, y \text{ 为色坐标值} \\ T &= -437m^3 + 3601m^2 - 6861m + 5514.31 \end{aligned} \quad (3-28)$$

3.3 光子传输模拟结果分析

3.3.1 折射率对光效的影响

设芯片的折射率为 n_s ，荧光粉层的折射率为 n_p ，如图 3-3 所示，光从芯片内部产生，在界面发生反射和透射，由于是光密介质射入光疏介质，当入射角达到某一值时，将发生全反射，被反射回芯片内部的光经过多次反射后被芯片吸收而造成光损耗，刚好发生全反射的入射角称为临界角 θ_c ，该顶点为 $2\theta_c$ 的锥角称为 LED 的溢出锥角光， θ_c 由 Snell 定律给出^[29,30]：

$$\theta_c(n_p, n_s) = \sin^{-1}\left(\frac{n_p}{n_s}\right) \quad (3-29)$$

所以要增大临界角 θ_c ，提高芯片的光抽取效率，就必须增大荧光粉层的折射，减小芯片表面的折射率。2001 年，美国 Lumileds 公司率先采用了 AlInGaN 基 LED 倒装芯片技术，出光面为蓝宝石衬底，折射率在 1.8 左右，增大了光溢出锥角，避免了电极焊点和引线对光效的影响，改善了电流扩散性和散热性，有效提升了出光效率，外量子效率达 21%。功率转换效率达 20%，最大功率达 400mw，器件的总发光效率比正装结构增加 1.6 倍^[2]。

另外研发出高折射率的透明硅树脂，作为封装材料，极大地增大了光溢出锥角。而光子由荧光粉层中出射到自由空间，同样涉及到光的反射和折射，自由空间的折射率为 1，同样由于全反射的存在，部分光子需在荧光粉层中多次反射、散射后才能出射到自由空间中。为提高光的抽取效率，封装中加入了球形透镜帽，即在荧光粉层的上表面封装一个半径适当的半球形透镜，如图 3-3 所示，这样出光表面与空气的界面为球面，而发光体处于半球形透镜的中心，大部分出射光不发生全反射，大幅度提高了光的抽取效率。

下面模拟图 3-3 所示的平面涂层结构，计算折射率以及透镜帽对光效的影响。模拟假设：芯片的光抽取效率相同，荧光粉层紧贴芯片表面，设 5 万个光子包进入荧光粉层，灌封胶制成的透镜帽折射率 1.41，荧光粉层的折射率 1.53，模拟结果如表 3-1 所示。相同色温条件下，正装芯片加透镜帽的结构出射的光子包数最多，被芯片吸收的光子包数最少，光效最高。说明芯片的折射率大，有利于荧光粉层的光子出射，但这不能说明正装芯片封装后的整体光效优于倒装芯片，原因在于模拟假设中，芯片的光抽取效率相同，而事实上倒装芯片的光抽取效率比

正装芯片大很多^[31]，实际器件测试结果同样为倒装芯片优于正装芯片。模拟结果只能表明芯片表面的折射率越小，越容易吸收荧光粉层中传输的光子。值得注意的是，模拟中认为射入芯片的光子即被芯片吸收，实际上由于芯片内部一般有反射层，所以射入芯片的光子有机会再次出射，但依然存在损耗。

另外增加半球形透镜帽后，光子更容易从荧光粉层中射出，减少了荧光粉对光的多次散射、吸收造成的光损耗，同时也减少了光子被反射回芯片的几率，很大程度上减少了芯片对光的吸收，提高了光效。通过模拟计算可以得出，透镜帽的折射率越高，光的抽取效果越好，当透镜帽的折射率与荧光粉层的折射率相同时，光抽取效果最佳。

由模拟结果可以得出结论：不考虑 LED 芯片的内部结构，从 LED 封装的角度看，荧光粉层的折射率越大，光的抽取效率越高；半球形透镜封装是一种有效封装，很大程度上提高了光的抽取效率。根据公式(3-29)半球形透镜的半径 r 需满足 3-30 式时光子由透镜进入空气时不发生全反射，光的抽取效率最高。

$$r > \frac{a\sqrt{n_c^2 - 1}}{\sqrt{2}}, a \text{ 为芯片边长} \quad (3-30)$$

表 3-1.不同结构的白光 LED 模拟结果

模拟总光子包数 50000	色温	色坐标(x, y)	相对光效	出射光子包数	被芯片吸收的光子包数
正装芯片加透镜帽 (ns=2.42)	5042	(0.345, 0.361)	2.6293	18996	21768
倒装芯片加透镜帽 (ns=1.8)	5088	(0.343,0.357)	2.4346	17698	23058
正装芯片未加透镜帽 (ns=2.42)	5027	(0.345, 0.361)	1.671	12068	28430
倒装芯片未加透镜帽 (ns=1.8)	5013	(0.309,0.358)	1.5644	11343	29142

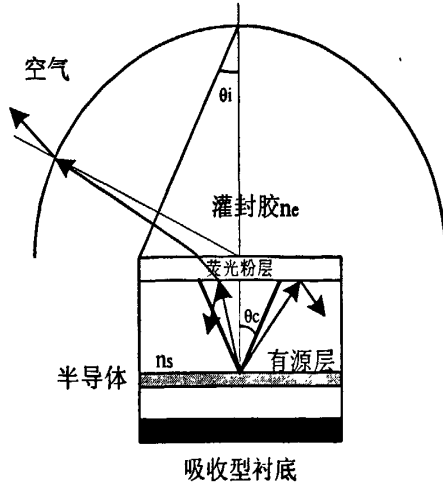


图 3-3.平面涂层封装结构图

3.3.2 不同封装结构对光通量的影响

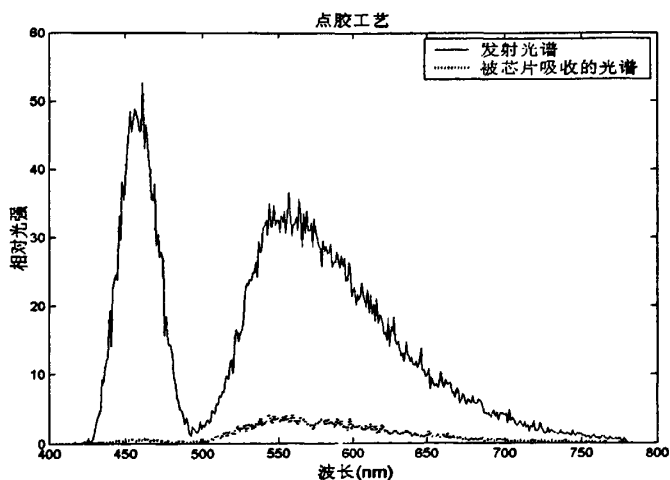
光通量是与人的视觉函数有关的物理量，对于双基色白光 LED，白光的色温很大程度上影响光通量^[32]，因此在相同色温的情况下，光通量才具有可比性。通过调整荧光粉层的厚度等参数，模拟不同荧光粉层结构得到相同色温的白光，计算其光通量，进行光效的比较。下面分别模拟传统的点胶工艺、保形平面涂层工艺和荧光粉悬空涂层工艺三种封装结构，模拟的初始条件：模拟的总光子包数 5 万；芯片折射率为 2.43，封装硅树脂的折射率为 1.53；假设所有的反射为镜面反射，认为反射回芯片的光完全被吸收。

图 3-4 为模拟不同工艺得到 5000K 左右的白光光谱分布图，模拟的结果显示：反射杯的反射率为 1 时，点胶工艺出射光子数是总的蓝光光子数的 57%，而被芯片吸收的光子数占总数的 4.6%；保形平面涂层工艺得到的出射光子数是总的蓝光光子数的 38%，被芯片吸收的光子数占总数的 38%，且大部分为黄色光谱；荧光粉悬空涂层工艺的出射光子数是总的蓝光光子数的 71%，被芯片吸收的光子数仅占总数的 1%。可见芯片对光子的吸收损耗对保形平面涂层工艺的光效影响较大，因此模拟的相对光效明显低于另外两种工艺。

原因在于如图 3-5 所示，点胶工艺和荧光粉悬空涂层工艺的荧光粉层面积比保形平面涂层工艺的荧光粉层面积大的多，且覆盖整个反射杯，大部分反射光会经过反射杯多次反射而进入自由空间，而保形平面涂层工艺得到的荧光粉层面积

与芯片面积一致，反射光全部经过芯片表面反射才有可能进入自由空间，而芯片对光有一定的吸收效果，反射的同时部分光透射到芯片内部被芯片内部结构吸收并产生热量，造成了能量的损耗。另外，光由荧光粉上表面出射时可能发生全反射，而进入芯片是由光疏到光密不发生全反射，所以进入芯片的光子多于出射光子。从模拟结果来看透射到芯片中的光子大部分为黄光，芯片对长波长的光吸收理论上不大^[33]，但可能在芯片内部多次反射后造成一定的损耗，因此透射光完全被吸收的假设与实际情况有所出入，对于保形平面涂层工艺来说，实际的出射光子数要大于模拟结果，即实际光效将大于模拟结果。

由于保形平面涂层工艺中光子有荧光粉层中射出后，大多数光子不经过反射杯反射直接进入自由空间，少部分光子一般经过一次反射后出射到自由空间，所以反射杯的反射率对其影响较小，而另外两种工艺中反射光大部分要通过反射杯多次反射才能出射到自由空间中，因此反射杯的发射率在这两种工艺中显得至关重要，如图 3-6 所示，随着反射杯的反射率下降，这两种工艺制得的白光 LED 光效迅速衰减，且光效衰减幅度相当，因此，反射杯的反射率对这两种工艺的光效影响程度相当。可以得出结论：大量光子是经过反射杯多次反射后出射到自由空间的，反射杯的反射率极大程度的影响出光效率。



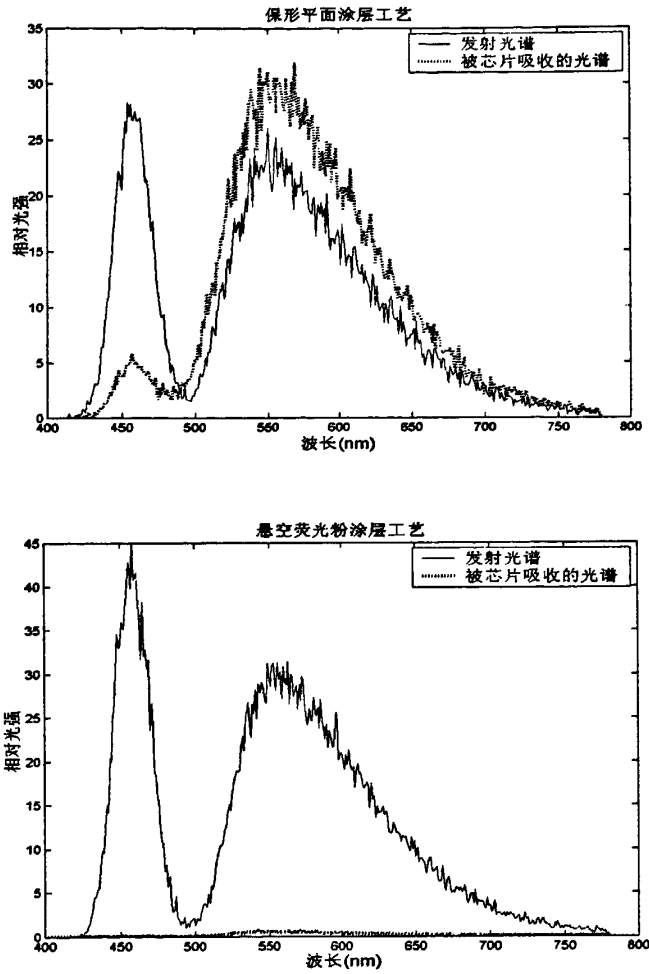


图 3-4.三种涂层工艺的出射光谱模拟图

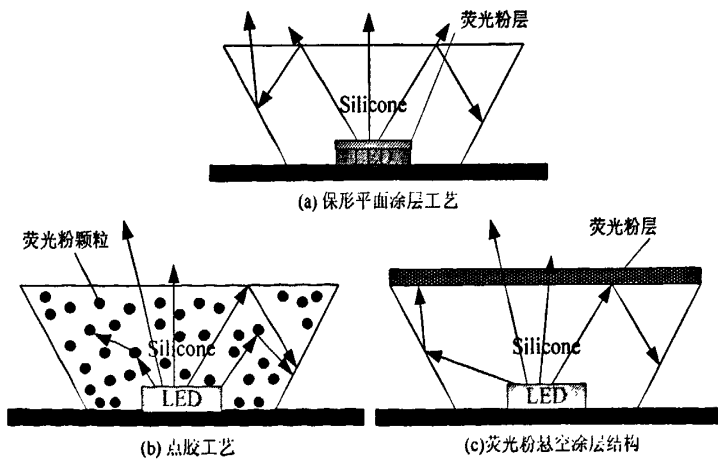


图 3-5.三种工艺模型中光线传输示意图

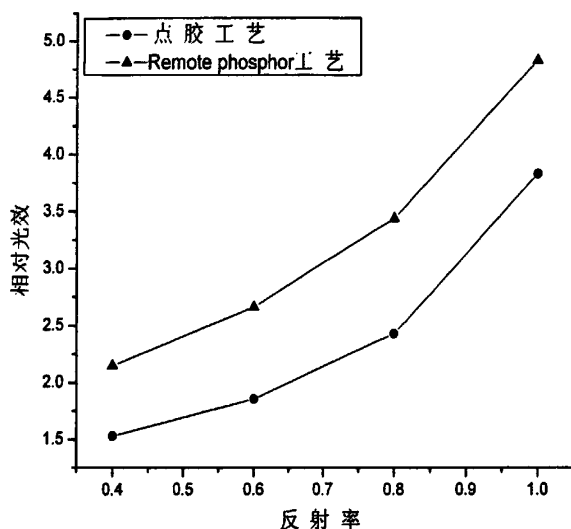


图 3-6.反射杯反射率对光效的影响

虽然理论模拟不能完全反应实际结果，但从侧面反应出芯片的结构和属性对保形平面涂层工艺的影响较大，而反射杯的反射率则对另两种工艺的影响较大。在实际工艺操作中尽量减少这些不利因素，采用合理的封装工艺和封装材料尽可能提高光效。

3.3.3 出光角度对色温的影响

对于厚度均匀的荧光粉层，不同的发射角，在荧光粉层中的传输路径不同，得到的白光的色温也就会有所差异，下面相同的荧光粉厚度情况下，分别对出射光偏转角为 0° ， 30° ， 45° ， 60° ， 90° 时得到的白光色温进行模拟计算。模拟结果如图 3-7 所示，不同角度出射得到的色温差异较大，原因在于，对于相同厚度的荧光粉层，不同角度的出射光在荧光粉层中传输的路径不同。对于垂直出射光，在荧光粉层中的传输路径最短，光子发生吸收、散射的几率较小，因此出射白光中的蓝光透射光居多，相对与垂直入射，斜入射的光在荧光粉层中的传输长度较大，蓝光与荧光粉颗粒碰撞的几率增大，所以更多的蓝光被荧光粉吸收转化为黄光，最终得到的白光中蓝光与黄光的比例减少，色温随之减小。而 LED 作为面光源，并非垂直均匀出射，不同出射角度的光经过荧光粉层后的光的黄蓝比例不一致，导致白光的整体空间色均匀性较差。

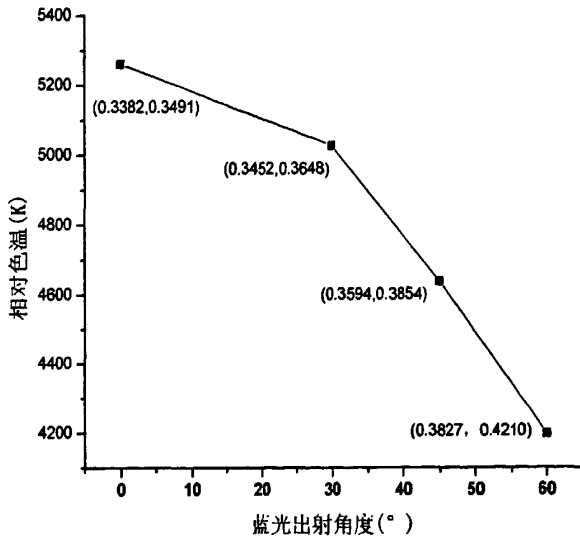


图 3-7.蓝光出射角度与白光色温的关系

3.3.4 模拟厚度均匀的荧光粉层的白光空间色均匀性

出射光斑的空间色均匀性指光源所照射的一定区域面积内，不同位置之间的色坐标差异，模拟荧光粉层厚度一致保形平面涂层结构，分析厚度均匀的荧光粉层对白光空间色均匀性改善程度。模拟参数：100 万个光子包，荧光粉层厚度 $30\mu\text{m}$ ，光斑接收屏距荧光粉层的距离为 5mm 。将接收中心位置作为原点，分成 8 个间距为 1mm 的圆环区间，分别统计、计算这八个区间的色温以及色坐标，色温的变化如图 3-8 所示，中心区域 ($0 < r < 4$) 的色温变化较大，且色温偏高，由于出射白光中黄蓝光强分布不一致，中心区域的蓝光光强较强，导致合成的白光黄蓝比较小，色温偏高，而周围区域 ($r > 4$) 的色温变化较平缓，呈下降趋势，原因在于边缘区域的透射蓝光光强相对较弱，而且由上节模拟结果得出对于厚度均匀的荧光粉层，斜入射有利于黄光转化，所以合成的白光黄蓝比较大，所以色温偏低。色坐标变化趋势如图 3-9 所示，相对于 x 坐标， y 坐标变化较大，其标准偏差为 $\sigma_x = 0.035$ ， $\sigma_y = 0.057$ ，不同区域色坐标的抖动范围较大，色均匀性较差，所以相同的厚度并不能保证色温的均匀性，根据色温变化趋势，荧光粉层的厚度应该为中间厚，边缘相对薄，但芯片表面不同区域的厚薄程度却需要严格控制。

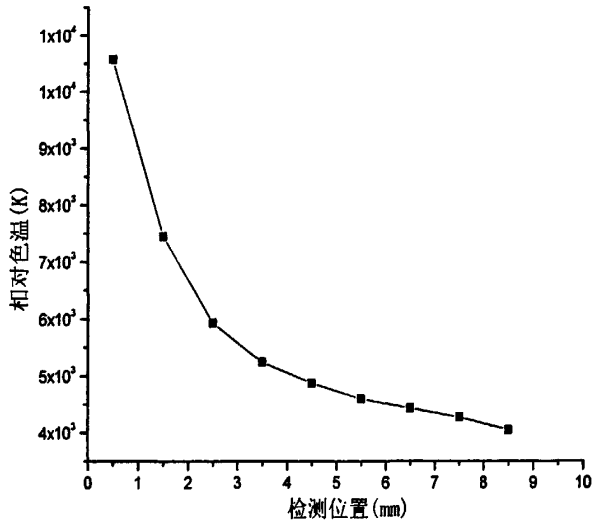


图 3-8.光斑在不同检测位置的色温

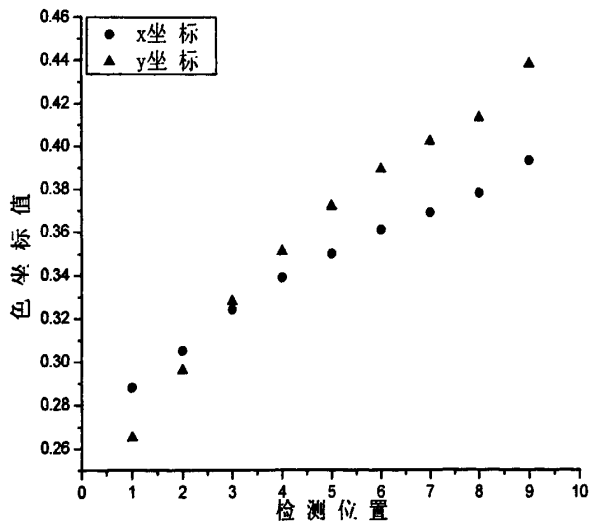


图 3-9.不同检测位置的光斑色坐标

3.4 小结

本章详细介绍了基于蒙特卡罗法的白光 LED 建模,通过模拟计算不同封装结

构的白光 LED 的光学性能,对比不同封装工艺的性能优劣,并得到影响其性能的主要因素;通过对不同出射角的白光色温计算得到结论:相同的荧光粉层,出射角度越大色温越低;芯片对光的吸收损耗是影响保形平面涂层工艺光效的主要因素,而反射杯的反射率是影响点胶工艺和荧光粉悬空涂层工艺光效的主要因素;对出射光斑在不同位置的色温、色坐标比较得出:由于 LED 的光强分布不均匀,即使是厚度均匀的荧光粉层得到的白光空间色均匀性依然较差,要改善其空间色均匀性,必须实现荧光粉层厚度与 LED 光强相匹配。基于这一模拟结果,提出一种新的涂层工艺,实现荧光粉涂层厚度与 LED 光强相匹配,解决了白光 LED 的空间色均匀性问题,具体的工艺实现方案及测试结果在下一章中详细阐述。

第四章 悬空荧光粉涂层工艺及性能分析

4.1 白光 LED 的几种荧光粉涂层结构

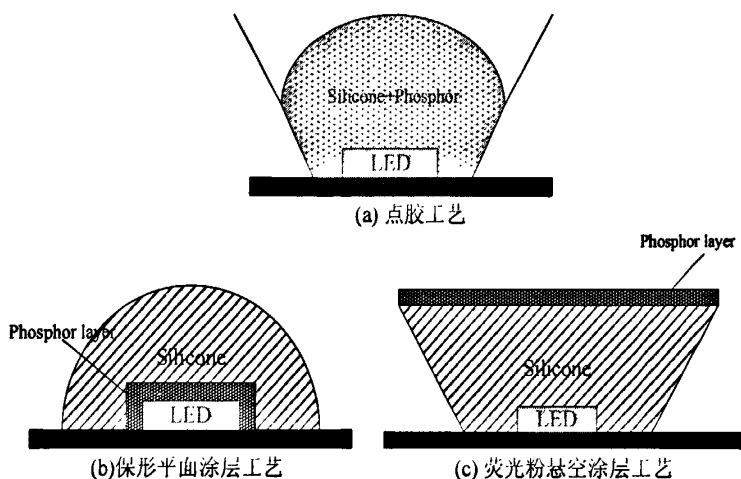


图 4-1.大功率 LED 的三种封装工艺示意图

光转换法是实现白光 LED 的重要途径，即在蓝光 LED 芯片表面涂覆一层黄色荧光粉,该方法操作简单，成本较低，被大多数 LED 封装厂家采用。由于白光 LED 的诸多优势，LED 的封装也得到了广泛关注，提出了多种荧光粉涂层工艺，包括：点胶法、粉浆法、电泳沉积法、沉淀法、静电喷涂法等。

目前，普遍采用传统的点胶工艺，如图 4-1(a)所示，将荧光粉与高折射率硅树脂混合调匀后，采用点胶机在反射杯中滴入适量混合胶体，通过热固化形成荧光粉层。由于这种工艺滴胶量不易控制，荧光粉层厚度不均匀，且荧光粉的沉降使荧光粉层的纵向浓度不均匀导致白光空间色均匀性较差，形成黄圈或色斑。但由于其操作简单，国内工厂普遍采用该法制备功率型白光 LED。

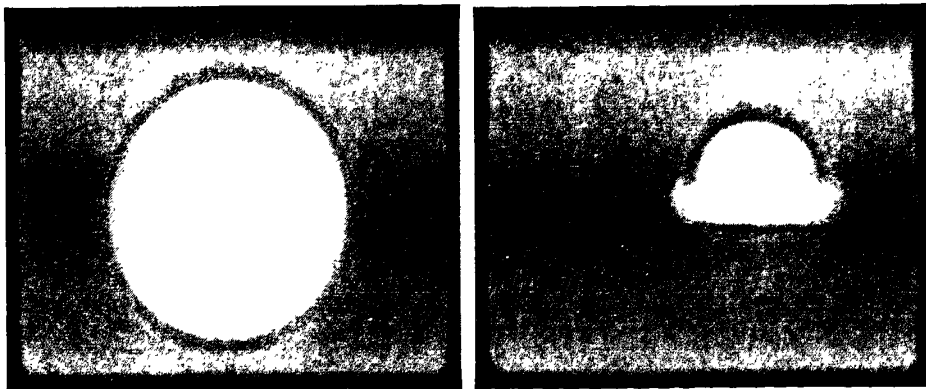
鉴于点胶工艺的诸多缺陷，Lumileds 公司首次提出了平面保形涂层结构 (Conformal coating)如图 4-1(b)所示，该工艺得到的粉层厚度均匀，形状与芯片保持一致，很好的解决了点胶工艺出现的问题，改善了空间色均匀性。但由于荧光粉层紧贴芯片表面，光线经荧光粉散射后部分光子反射回芯片内部被吸收，降低了出光效率，同时大量的反射光使芯片发热，降低了芯片的内量子效率，不利于光的稳定输出，也缩短了芯片的寿命。

随着人们对白光 LED 封装的深入研究,提出了荧光粉悬空涂层结构(Remote phosphor coating)如图 4-1(c)所示,该工艺制得的荧光粉层远离芯片表面,减少了芯片对光的吸收,被荧光粉反射回的光由反射杯再次反射回粉层中,提高了光的利用率,进而提高了出光效率^[34]。

图 4-1 所示的三种结构是目前研究较为广泛的荧光粉涂层结构,具体的工艺实现方案却是多种多样,图 4-1(a)所示的点胶工艺已经成熟且被大多数 LED 封装厂家广泛采用,本文不做过多的介绍。在白光 LED 封装领域,对平面涂层工艺和远距离荧光粉涂层工艺的研究相对较多,本文提出了一种新的粉浆法实现保形平面涂层和远距离荧光粉涂层结构,具体实施方案在下文中详细介绍。

4.2 基于水溶性感光胶的悬空荧光粉涂层工艺的引入

由上一章模拟结果得出,LED 的封装工艺尤其是荧光粉的涂层结构对白光 LED 的性能的影响非常大,从点胶工艺到平面涂层结构再到荧光粉悬空涂层结构,白光 LED 的光效以及色均匀性得到了很大的改善,其中荧光粉悬空涂层工艺,在光效、散热等方面均优于前两种工艺,这一点在诸多文章中得到论证^[34-40]。而且悬空荧光粉涂层结构可以由荧光粉层的几何结构来决定光源发光面的几何形状,实现面光源与其它外形光源的转变,如图 4-2 所示。



(a)悬空荧光粉平面涂层结构

(b)悬空荧光粉球面涂层结构

图 4.2.不同几何结构的荧光粉层 LED 点亮实物图

然而,文献报道的大多数为理论计算,很少涉及到具体的工艺实现方案,尤其是空间色均匀性问题,一直是双基色白光 LED 难以克服的难题,许多文献中的工艺方案都回避了该问题,而重点关注白光光效。为同时解决白光光效和色均匀性问题,本文提出一种新的荧光粉悬空涂层工艺的实现方案——基于水溶性感光

胶的荧光粉悬空涂层工艺。该工艺不仅实现了荧光粉层的悬空结构，减少了 LED 芯片对光的吸收损耗，改善了荧光粉层的散热问题，同时不同位置的荧光粉层厚度具有光强自适应的特点，不仅实现了白光色温可控，而且提高了白光的空间色均匀性。

4.3 基于水溶性感光胶的涂层工艺的实现方案

该工艺是基于粉浆法的平面涂层工艺，采用聚乙烯醇(PVA)+重铬酸铵(ADC)的感光胶体系，其中 PVA 为成膜剂，ADC 为光敏剂，PVA 与 ADC 按一定比例混合得到感光胶后，与荧光粉混合形成粉浆，采用点胶的方法，在 LED 芯片表面形成一层具有感光能力的荧光粉层，通过紫外曝光或自曝光的方式固化得到平面涂层结构。工艺流程如图 4-3 所示，通过 LED 芯片所发出的蓝光对感光粉浆形成的荧光粉层曝光，曝光部分的荧光粉被固化在芯片表面，未曝光的部分通过显影将其切除，得到一定厚度的荧光粉层，而荧光粉层的厚度由曝光时间和曝光光强决定，这样非常容易控制荧光粉层的厚度，只要保证曝光时间和曝光光强一定得到的白光 LED 色温就一致。

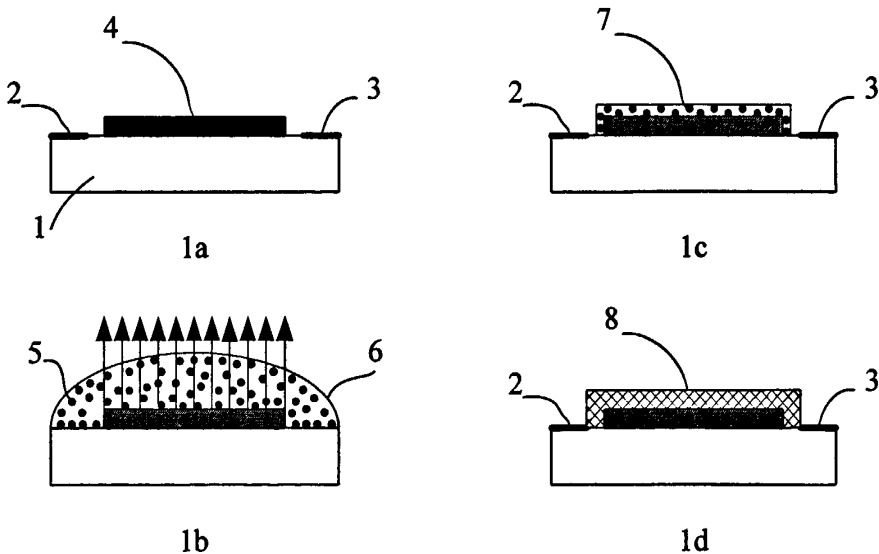


图 4-3.基于自曝光的粉浆法制备荧光粉层示意图

- 1、衬底 2、P 区电极 3、N 区电极 4、LED 芯片 5、荧光粉颗粒
6、感光体系 7、显影后的荧光粉层 8、后固化的荧光粉层。

该工艺与一般的粉浆法的区别在于,自曝光工艺的引入。由于 LED 为面光源,光强分布不均匀,且芯片表面覆有电极,遮挡了光的出射,因此,即使芯片表面的荧光粉层厚度一致也不能保证混合的白光空间色均匀性,这一点在上一章的模拟计算中同样得到了验证。要解决这一问题,唯一的方法就是荧光粉层的厚度与 LED 的光强分布相匹配。基于这一目的,结合光刻原理提出了自曝光工艺。光刻工艺中,光刻胶的厚度由曝光时间和曝光强度决定,因此相同的曝光时间,厚度就由光强来决定。自曝光采用芯片发出的蓝光使荧光粉层感光固化,固化方向由下而上,显影后光强较强的区域(芯片中央)荧光粉层厚度较厚,光强较弱的区域(芯片的边缘)荧光粉厚度较薄,不发光的区域(电极部分)没有荧光粉,实现了荧光粉层厚度与 LED 的光强相匹配,保证了芯片上不同区域上发出的蓝光和黄光的比例一致,很大程度上改善了白光的空间色均匀性。

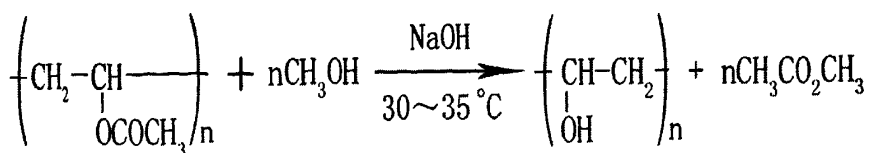
值得注意的是,实现自曝光关键在于感光胶的性能。首先该胶体必须是透明且折射率较高的稳定胶体;其次该胶体的感光波长必须覆盖 LED 芯片的发光波长,满足这两个条件是实现该工艺的前提。

4.3.1 实验原材料及理论依据

上一节中已经提到了该工艺对原材料的要求,实验中我们采用聚乙烯醇、重铬酸铵、紫外固化胶、硅树脂以及一些其他助剂。下面对一些主要原材料及其反应原理进行详细介绍。

1. 聚乙烯醇

聚乙烯醇为白色片状、絮状或粉末状固体,无毒、无味,折射率在 1.49~1.52 之间,热导率在 $0.2\text{w}/(\text{m}\cdot\text{K})$,其水溶液无色透明,需在热水中溶解,水温越高则溶解度越大,但几乎不溶于有机溶剂。通常由聚醋酸乙烯酯醇解得到,其过程^[41]:



醇解度不同的聚乙烯醇,其性质差异很大,醇解度大的 PVA 水溶液粘度较大,成膜后的强度和耐溶剂性提高,但水中溶解性、成膜后伸长率下降。由于 PVA 易成膜,耐光性好而且其膜的机械性能优良,是很好的成膜剂和粘结剂,所以广泛应用在相关领域。从其物化性能上看,非常适合我们的涂层工艺,所以将其作为

我们主要的成膜剂。

2.重铬酸铵

重铬酸铵是橙红色单斜结晶的粉末，易溶于水和乙醇，是一种光敏物质，曝光后能还原为三价铬离子，具有强氧化性，0.4%的 ADC 水溶液的 PH 值为 4.22。在水溶液中，存在 $Cr_2O_7^{2-}$ 、 $HCrO_4^-$ 、 CrO_4^{2-} 三种铬离子，在光硬化反应时，只取决于 $HCrO_4^-$ 的浓度。图 4-4 为 ADC 的吸收谱线^[42]，其吸收峰正好落在 UV 光源（峰值波长约 365nm）的光谱范围内，从而表明该感光体系能够在 UV 光源作用下得到了光固化。在蓝光区域（约 460nm）也有一定的吸收，这正好与蓝光 LED 芯片发射谱的峰值波长一致，即可以用蓝光 LED 芯片自身发光来使其感光。但其吸收峰值并非 460nm，所以 ADC 并不是该工艺的最佳选择，但它仍然可以在蓝光下与 PVA 发生光化学反应，使 PVA 交联。

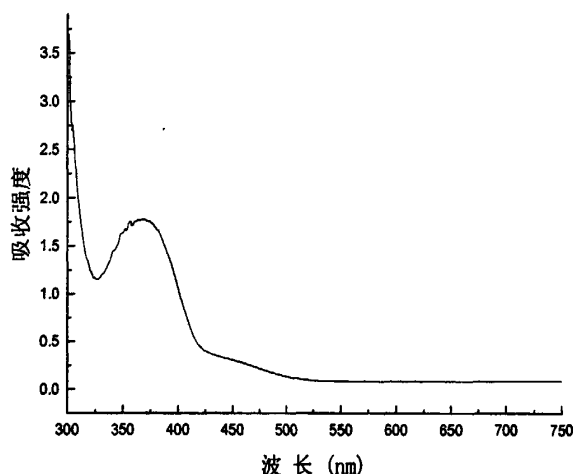
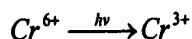


图 4-4. ADC 的吸收谱线

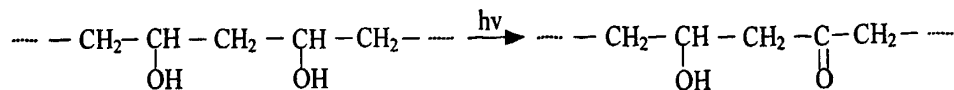
3.紫外固化胶

紫外固化胶一般由预聚物、单体、光引发剂、助剂等组成，通过一定波长的紫外光照射，使液态的树脂高速聚合而成固态，其特点在于固化时间短。用于 LED 的紫外固化胶，要求优良的透明性、耐热性以及较高的折射率。

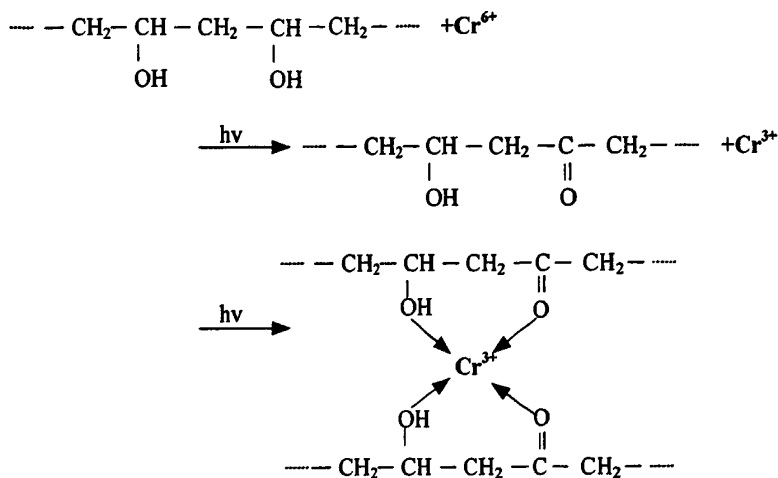
实验中采用的感光胶体系是由 PVA 和 ADC 相混合得到的，其感光原理如下：一般认为，重铬酸盐导致有机胶体光固化的反应分两步进行，首先 ADC 在 UV 光照射下，发生光化学还原反应，反应过程可以如下表示：



在 UV 光照时, PVA 大分子中的部分羟基被六价铬离子氧化成羰基, 反应方程式如下^[43]:



然后, 被还原成三价的铬离子与被氧化的 PVA 大分子交联成不溶于水的立体网状结构。PVA 和 ADC 的光化学反应全过程为^[44]:



4.3.2 实验工艺流程

粉浆法中用到的感光胶是由胶体(乳胶)、感光剂(光敏范围在 460nm 左右)、去离子水和助剂(固化剂、分散剂等)组成。粉浆涂覆在芯片上后, 通过 GaN 蓝光芯片发光使胶体和感光剂发生光化学反应而交联产生不溶于水的聚合物, 在热水中显影, 具有水溶性的胶体和感光剂溶解于水中, 混有荧光粉的聚合物将保持在芯片的发光区上, 自然形成了与芯片形状一致的图案。由于 PVA 与 ADC 组成的感光体系对 460nm 的蓝光有较强的吸收峰, 而 GaN 的蓝光 LED 芯片的波长峰值为 460nm。所以我们采用芯片所发的蓝光使涂层曝光, 而没有采用传统的紫外曝光, 这样既提高了显影后粉层的平面效果, 实现了通过曝光时间来控制粉层厚度, 又省去了掩模板, 简化了工艺流程, 具体操作步骤如下:

1. 配制 PVA 胶

PVA 为白色粉末状颗粒, 需将其配成溶液才能使用, 而高醇解度的 PVA 只溶于热水, 所以必须在热水中搅拌才能溶解, 实验中用到的 PVA 为 10%。称取一定

质量的 PVA 粉末，并加入预先计算好的去离子水，静置 24 小时，使其充分溶胀。将 PVA 和水的混合物置于 90℃ 的恒温水浴中搅拌使其溶解，并在水浴中保持 1 个小时，待其完全溶解后，逐渐冷却至室温，整个搅拌过程需保持溶液中的水分恒定，即保证配制的 PVA 浓度为 10%。

2. 配制感光胶

按照预先计算好的量称取 ADC 结晶颗粒，加入一定比例的去离子水将其溶解。ADC 温室下易溶于水，溶液呈橙红色，本文中采用浓度为 0.1% 的 ADC 溶液，将配好的 ADC 与 PVA 按一定比例混合，形成具有光敏特性的感光胶体。由于感光胶体对光较为敏感，因此，不应放置过长的时间，一般是现用现配。本文采用的感光胶中 PVA 与 ADC 的比例为 2%:0.02%。

3. 配制荧光粉浆

称取一定质量的荧光粉倒入已经配制好的感光胶中搅拌，尽量避光操作，直到胶体与荧光粉充分融合，我们所需要的具有感光特性的荧光粉浆便配制完成。

4 芯片预处理

在芯片表面灌封一层厚度一定的透明胶体，目的是将荧光粉层与芯片隔开，实现荧光粉层的远距离悬空结构。该胶体可以为硅树脂也可以为紫外固化胶，实验中胶体的厚度为 1mm。

5 涂粉并干燥

将步骤 3 的荧光粉浆取适量滴在步骤 4 中处理过的芯片表面上，滴胶量没有固定要求，在常温避光条件下风干。

6. 曝光并显影

将涂过粉的芯片点亮一定时间完成自曝光，并在 80℃ 的水域中显影。这一步是整个工艺的关键部分，曝光的时间和通过 LED 的电流，将决定荧光粉的厚度，适当的电流及曝光时间，才能得到理想的荧光粉层厚度。曝光光强太大，可能瞬间将所涂得荧光粉浆全部曝光，无论曝光时间长短，荧光粉层的厚度都不会变化，且荧光粉层的厚度不均匀；曝光光强太小，LED 非正常工作，光强分布与正常工作时有所差异，得到的荧光粉层厚度与 LED 光强不完全匹配。曝光时间的确定可采用定时持续点亮和脉冲点亮两种方式。显影温度以及显影时间，也决定成膜质量，显影原理是通过感光胶曝光前后水溶性的差异来实现的，显影液的温度适当时，曝光部分与未曝光部分的水溶性差异最大，容易形成曝光图案，而且荧光粉层附着力较好不易脱落；显影时间过长将导致涂层脱落，过短可能显影不完全，导致涂层表面凹凸不平。

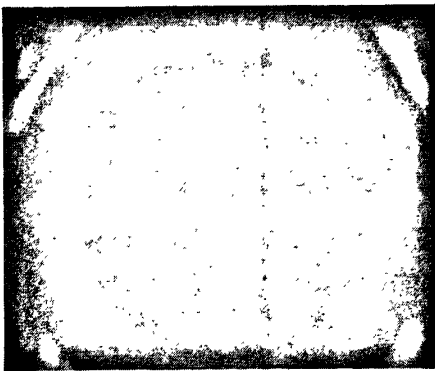
7.后固化

将步骤6的芯片风干或烘干后，置于紫外灯下完成后固化，提高粉层的附着力。

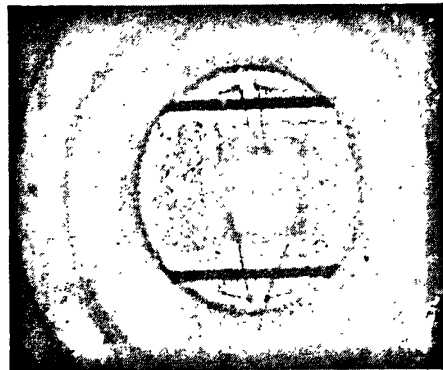
4.4 封装效果及性能分析

4.4.1 新工艺封装外观效果

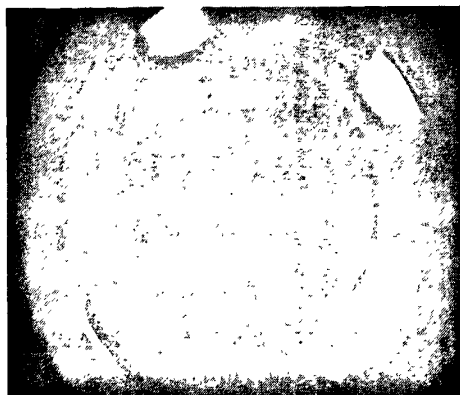
如图4-5所示，实验中采用相同的芯片和支架结构，实现三种不同的封装工艺，图4-5(a)为点胶工艺，从外观上看荧光粉层较细腻，荧光粉均匀的填充在杯碗中，荧光粉层表面有一定的弧度，荧光粉层厚度1mm；图4-5(b)为保形平面涂层，荧光粉层只分布在芯片的表面；图4-5(c)为悬空荧光粉层涂层结构，该结构的荧光粉层被两层透明胶体夹在中间，距离芯片表面1mm的位置。



(a)点胶结构



(b)保形平面涂层



(c) 荧光粉悬空涂层

图4-5.不同荧光粉涂层工艺的白光LED封装实物图

4.4.2 曝光强度对荧光粉层厚度的影响

要实现荧光粉层厚度与光强相匹配,就需要通过光强来决定荧光粉层的厚度,通过实验验证新工艺中曝光光强决定荧光粉层的厚度。对于双基色白光 LED,荧光粉层的厚度决定白光的色温,假设荧光粉层中荧光粉的填充率相同,荧光粉层越厚,转换的黄光成分越多,混合得到的白光色温越低,相反,色温越高。理论上感光胶的厚度可以通过曝光时间和光强来控制,实验中保证相同的曝光时间,和相同浓度的荧光粉浆,测试封装后的白光色温的变化来反映荧光粉层的厚度,每组 2 个样品,实验结果如图 4-6 所示。

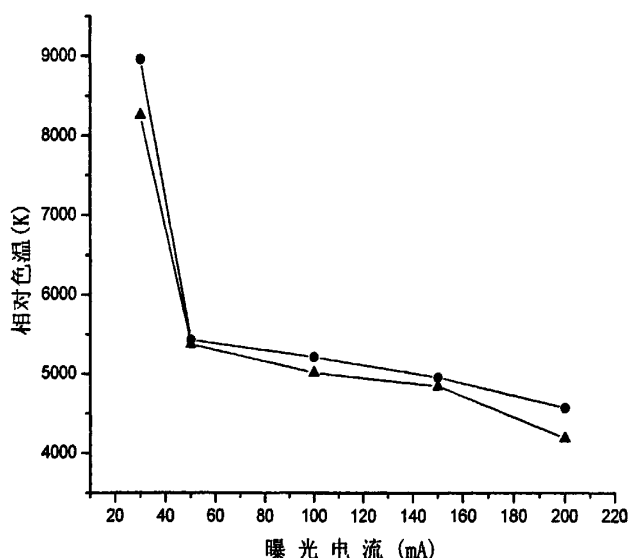


图 4-6.曝光电流与白光相对色温的关系

图 4-7 为悬空涂层结构显影前后的对比图。(a)为未显影的荧光粉层,从外观看,其粉层厚度很厚,荧光粉布满整个杯面;(b),(c),(d)为不同曝光电流曝光后显影得到的荧光粉层,与(a)的区别在于荧光粉层明显变薄,杯碗周围不发光区域的荧光粉被洗掉了。可以观察到不同的曝光电流得到的荧光粉层厚度不同,而且荧光粉层的中心位置的荧光粉层厚度要大于边缘的荧光粉层厚度。

实验中,通过输入电流控制曝光光强,同一曝光强度下制作两个样品,由测试数据得出,电流越大色温越小,即荧光粉厚度越大。由于全过程手动操作,曝光时间难于做到精确控制,另外,不同芯片在相同的工作电流下产生的光强也会

有所差异,所以同一曝光强度的下得到的白光 LED 色温有所差异。由实验数据得到结论:该工艺中荧光粉层的厚度与曝光光强有相同的变化趋势,如果曝光光强的空间分布不均匀则得到的荧光粉层厚度也就不均匀,且厚度随光强的变化而变化,另外该工艺可以通过控制曝光条件来控制产品的整体色温。

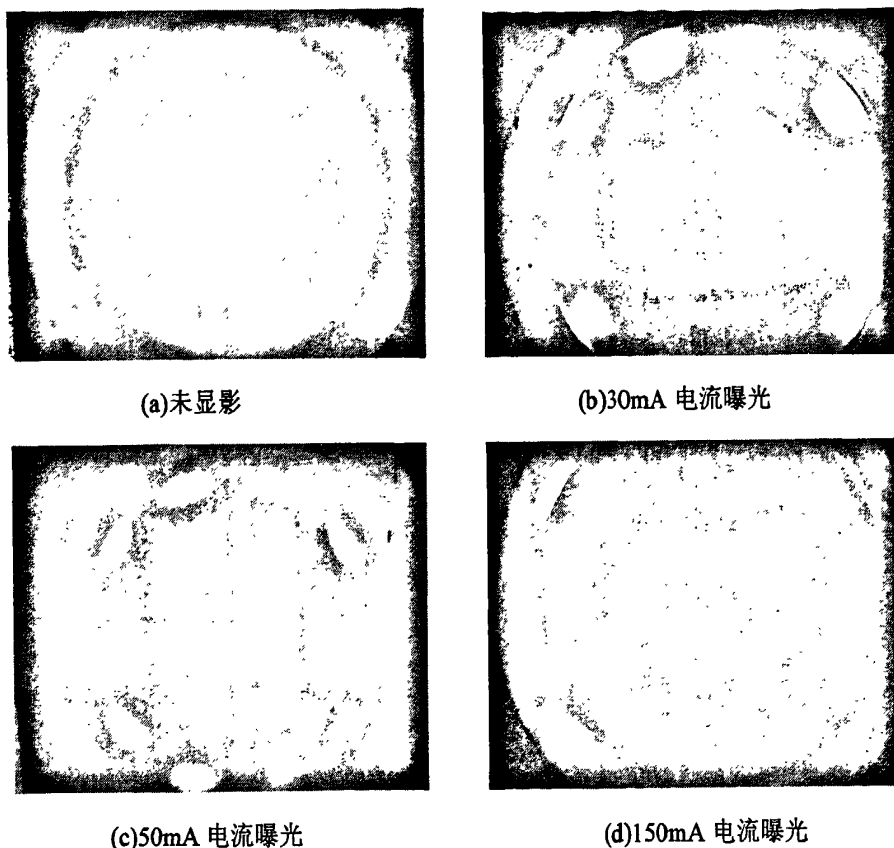


图 4-7.悬空涂层结构的曝光显影前后对比图

4.4.3 新工艺得到的白光空间色均匀性测试

空间色均匀性是 PC-LED 有一个重要指标,照明效果上主要表现为是否出现蓝圈、黄圈以及色斑。这一问题也是很多封装工艺未能解决的,例如,点胶工艺中,由于胶体的表面张力,荧光粉层成拱形,厚度不均匀导致光斑出现蓝圈或黄圈;而一般的平面涂层工艺,虽然保证了荧光粉层的厚度一致,但未考虑芯片发光的不均匀性,而且经过荧光粉层透射的蓝光和荧光粉被激发后出射的黄光的光强分布差异较大,蓝光经过荧光粉层散射后光强分布依然类似于 Lambertian 分布,而荧光粉激发光的光强分布却是一个较为平滑的曲线,类似均匀分布^[45],因此同样会有不同程度的色斑,由上一章中的模拟结果得出,由于 LED 的光强分布不均匀,

无论荧光粉层的厚度均匀与否都很难保证出射白光的色均匀性,要解决这一问题,唯一的方法就是荧光粉层的厚度与LED的光强分布相匹配。从上一节的实验结果已经证明了新工艺中可以通过光强决定荧光粉层的厚度,而LED芯片的光强分布不均匀,采用本文介绍的荧光粉涂层工艺,理论上可以实现荧光粉层的厚度与LED芯片的发光强度相匹配,从而得到空间色均匀性较好的白光LED。

本文通过测试白光LED照射光斑在不同位置的色度坐标的离散性来分析单个LED的空间色度均匀性,测试装置示意图如图4-8所示,屏上两点的距离 $a=b=15\text{cm}$,LED到屏的距离 $c=15\text{cm}$,屏的中心点5正对LED光源。测试九点的色坐标并计算其标准偏差,测试结果如表4-4所示。从九点法测试结果计算得到的标准偏差看,采用自曝光工艺得到的白光LED色坐标变化幅度最小,点胶工艺得到的白光色坐标变化最大,光斑表现为周围明显的黄圈。如图4-9所示屏上中心点5的色坐标与其它8个点相比较,均表现为中心点色坐标值较低而周围较高,说明中心区域的白光黄蓝比例较小。原因在于LED发射的蓝光经过荧光粉层散射后依然保持着类似的朗伯分布,而荧光粉激发产生的黄光则呈现均匀分布,所以白光的黄蓝比例由中心到边缘逐渐增大。而新工艺通过调整不同位置上荧光粉层的厚度,根据蓝光光强对不同区域的白光适当地补偿黄光成分,得到较为均匀的白光。

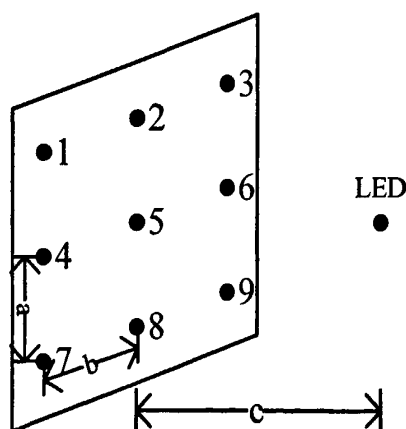


图4-8.九点法示意图

九点法测试数据证实了点胶工艺得到的白光均匀性最差,有明显的黄圈,保形平面涂层工艺,一定程度上改善了色均匀性,但仍然有存在一定程度的黄圈,而基于自曝光的保形平面涂层工艺和荧光粉悬空涂层工艺实现了对荧光粉层厚度的精确调整,解决了白光空间色均匀性问题,得到均匀的照射光斑。

表 4-4. 九点法色度坐标测试结果

测试点的色坐标	自曝光平面涂层工艺	自曝光远距离涂层工艺	市场上点胶工艺产品	市场上平面涂层工艺产品
点 1: x_1, y_1	0.347, 0.360	0.338, 0.357	0.0398, 0.441	0.344, 0.367
点 2: x_2, y_2	0.347, 0.361	0.339, 0.352	0.369, 0.408	0.336, 0.364
点 3: x_3, y_3	0.347, 0.363	0.3369, 0.346	0.371, 0.436	0.349, 0.379
点 4: x_4, y_4	0.345, 0.356	0.341, 0.359	0.354, 0.383	0.336, 0.364
点 5: x_5, y_5	0.338, 0.350	0.338, 0.349	0.347, 0.375	0.321, 0.337
点 6: x_6, y_6	0.346, 0.362	0.335, 0.350	0.354, 0.388	0.339, 0.369
点 7: x_7, y_7	0.342, 0.356	0.332, 0.351	0.362, 0.397	0.343, 0.382
点 8: x_8, y_8	0.346, 0.360	0.341, 0.350	0.356, 0.393	0.339, 0.367
点 9: x_9, y_9	0.346, 0.361	0.339, 0.359	0.337, 0.421	0.345, 0.381
平均值 \bar{x}, \bar{y}	0.345, 0.359	0.338, 0.352	0.362, 0.405	0.339, 0.368
标准差 σ_x, σ_y	0.00304, 0.00408	0.00287, 0.00472	0.01032, 0.02363	0.00812, 0.01392

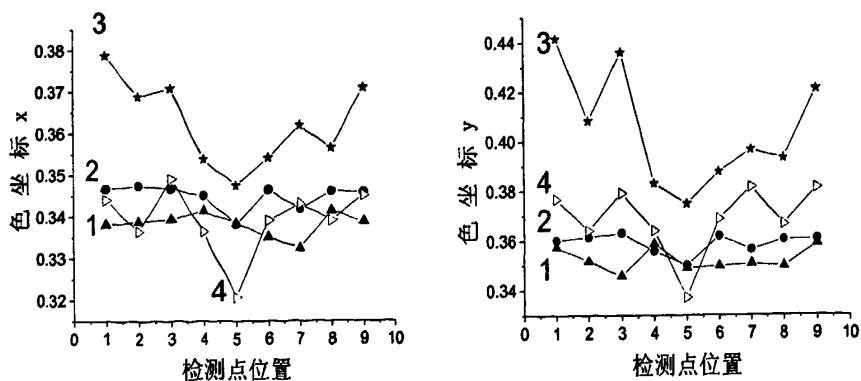


图 4-9. 九点法测试不同位置的色坐标分布图

1. 自曝光保形平面涂层工艺 2. 自曝光荧光粉悬空涂层
3. 点胶商品 4. 保形平面涂层工艺商品

九点法测试数据很好的反映了光斑中心和周围色坐标的变化差异，为了更精确的体现色坐标随离开中心位置的距离而变化的趋势，得到光斑均匀区域的发散

角，在同一水平线上由中心到边缘取等距的 5 个点，测试结果如表 4-5 所示自曝光工艺得到的白光标准偏差比点胶商品和保形平面涂层工艺商品的标准差小一个数量级，光均匀性明显较好。

表 4-5.五点法色坐标测试结果

测试点距发光中心的位置 (cm),色坐标	自曝光平面涂层工艺	自曝光远距离涂层工艺	市场上点胶工艺产品	市场上平面涂层工艺产品
点 1:L=0 x1,y1	0.338 0.350	0.338 0.349	0.347 0.375	0.320 0.337
点 2:L=5 x2,y2	0.341 0.356	0.341 0.352	0.349 0.382	0.324 0.341
点 3:L=10 x3,y3	0.341 0.354	0.34 0.357	0.352 0.382	0.328 0.349
点 4:L=15 x4,y4	0.345 0.356	0.341 0.359	0.354 0.383	0.336 0.364
点 5:L=20 x5,y5	0.344 0.357	0.340 0.367	0.379 0.430	0.346 0.374
平均值 \bar{x} \bar{y}	0.342 0.355	0.340 0.357	0.356 0.390	0.331 0.353
标准差 σ	0.00269 0.00278	0.00117 0.00698	0.01284 0.02225	0.01026 0.01555

五点法测试的色坐标变化如图 4-10 所示，点胶工艺得到的白光色坐标变化随着距离中心位置的增大而增大，前 4 个点内变化较为平缓，色均匀性较好，但位于边缘的第五点色坐标陡增，出现明显的黄斑；自曝光工艺得到的白光在 5 个点的色坐标变化平缓，色均匀性最好；平面涂层工艺的 LED 商品的白光色坐标变化逐渐增大，变化较平滑，整个光斑由白色逐渐变为黄色。认为点胶工艺和未知保形平面涂层工艺的商品均匀照射区域在接收屏的四个点以内，则计算得到其均匀光斑张角为 90° ，而新工艺得到的均匀光斑张角大于 107° 。四种封装工艺的白光 LED 点亮后的光斑效果图如图 4-11 所示，新工艺得到的白光 LED 空间色均匀性明显优于对比的商品。

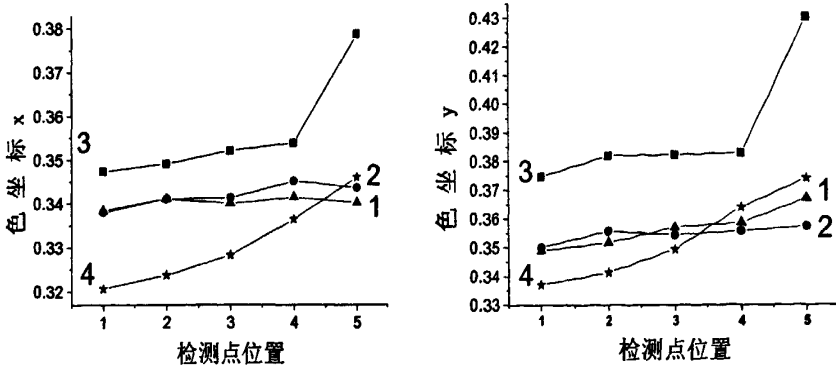
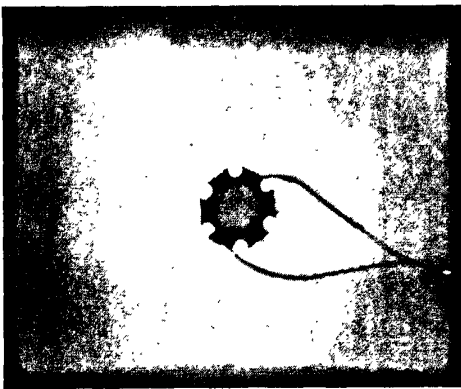
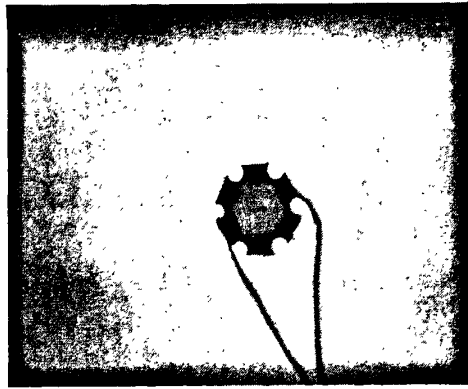


图 4-10.五点法测试不同位置的色坐标分布图

1.自曝光保形平面涂层工艺 2.自曝光荧光粉悬空涂层
3.点胶商品 4.保形平面涂层工艺商品



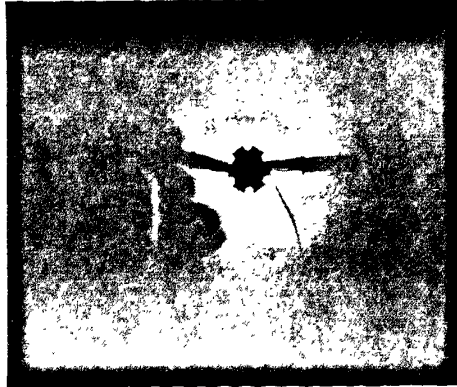
(a) 自曝光保形平面涂层工艺



(b) 自曝光荧光粉悬空涂层



(c) 点胶商品



(d) 保形平面涂层工艺商品

4-11. 不同封装工艺的光斑实物图

4.4.4 不同结构的白光 LED 的光效对比

选用同一批芯片和相同的荧光粉，分别采用点胶工艺、保形平面涂层工艺、荧光粉悬空涂层工艺制备白光 LED。三种工艺中均采用紫外固化胶封装，从光效测试结果来看，对于色温相近的样品，三种工艺得到的白光光效差距不是很大，很难说明不同结构的优劣。由上一章的模拟结果给出：由于保形平面涂层工艺的荧光粉层直接接触芯片，部分出射光被芯片吸收，与点胶工艺相比，光效在一定程度上有所下降，而荧光粉悬空涂层工艺由于反射回芯片的光子较少，光效得到提高。而实际测试结果显示保形平面涂层工艺得到的白光 LED 光效并没有降低，而荧光粉悬空涂层工艺对光效并没有显著提高，模拟结果与实际测试结果不吻合，原因在于芯片对反射光的吸收损耗并没有模拟中的那么大，进入芯片的反射光大部分反射回荧光粉层中再次出射，另外样品的反射杯反射效果较差一定程度上影响了荧光粉悬空涂层工艺对光效的提高。

表 4-6.不同封装工艺的白光 LED 光效测试结果

	样品编号	色温 (K)	色坐标(x,y)	光效(lm/W)
点胶工艺	1	3682	(0.433,0.498)	51.43
	2	4139	(0.388,0.427)	54.47
	3	4190	(0.384,0.422)	53.47
	4	4448	(0.368,0.394)	48.49
保形平面涂层工艺	5	3993	(0.403,0.458)	51.32
	6	4575	(0.363,0.392)	48.01
	7	5992	(0.323,0.323)	52.1
	8	8103	(0.301,0.283)	51.05
	9	11461	(0.287,0.259)	46.76
悬空荧光粉涂层工艺	10	4847	(0.351,0.364)	52.81
	11	4959	(0.347,0.359)	51.73
	12	5873	(0.325,0.325)	51.23
	13	7151	(0.308,0.298)	53.28
	14	7381	(0.306,0.293)	51.78

4.5 小结

本章主要从实验的角度分析不同封装工艺的光效、以及色均匀性等性能参数，重点介绍了一种基于水溶性感光胶的荧光粉悬空涂层工艺，通过对工艺参数的摸索，完成了具体工艺步骤，并通过实验测试数据证实该工艺很大程度上提高了白光 LED 的色均匀性，与商用白光 LED 相比，九点法测试光斑在不同位置的色坐标标准差减小了一个数量级，且实现了荧光粉层厚度可控，而在光效方面与其它工艺相当。

第五章 结论

本文提出了一种基于水溶性感光胶的悬空荧光粉涂层工艺，并采用蒙特卡罗法对不同封装结构建模，对比其性能的优劣，分析工艺中影响光效和色均匀性的因素，并提出解决方案；通过优化工艺参数完成了新的封装工艺，并对不同封装工艺的产品的的光效、色温、色均匀性等性能指标进行了测试、对比。得到以下结论：

- 1) 应用蒙特卡罗分析方法，分别对点胶工艺、保形平面涂层工艺、荧光粉悬空涂层工艺三种工艺结构建立模型，模拟光子在荧光粉层中的传输过程，并计算色温、色坐标、光效等性能参数。模拟结论：荧光粉悬空涂层工艺得到的白光 LED 与点胶工艺相比光效提高 26%；模拟验证了对于厚度一致的荧光粉层，芯片出光角度不同得到的白光色温不同，已知 LED 芯片的光强分布不均匀，所以即使是厚度均匀的荧光粉层得到的白光空间色均匀性依然较差，通过模拟荧光粉层厚度均匀的保形平面涂层工艺的白光 LED 光斑，验证了这一结论。
- 2) 摸索基于水溶性感光胶(PVA+ADC)的平面涂层工艺参数，结合自曝光工艺完成了荧光粉悬空涂层工艺。由于 460nm 可以对上述感光体系曝光，所以采用 LED 芯片发光来实现荧光粉层交联，交联方向由下而上，多余的荧光粉层将通过显影后去除，保留下来的荧光粉层厚度随光强的变化而变化，实验结果显示，曝光的时间和光强将决定荧光粉层的厚度，所以曝光、显影后荧光粉层的厚度随曝光条件的变化而变化，通过调整曝光条件可以任意获取不同色温的白光 LED，同时得到的荧光粉层厚度具有自适应的特点，即在不同位置上的厚度随光强分布的变化而变化，光强较强的区域荧光粉层厚度较厚，光强较弱的区域则荧光粉粉厚度较薄。采用该工艺，无论 LED 发出的光是否经过二次配光，荧光粉层均可实现与光强分布相匹配。众所周知，LED 的光强分布不均匀，对于相同厚度的荧光粉层，得到的白光在不同的空间区域的黄蓝比例不同，导致 PC 白光 LED 空间色均匀性差，而本文介绍的工艺得到的荧光粉涂层具有自适应特点，保证了不同空间位置上的黄蓝比例基本一致，得到空间色均匀性较好的白光

LED。借鉴相关文献中提到的荧光粉悬空涂层结构,采用该工艺将荧光粉层和芯片隔开,同样得到了具有自适应特点的荧光粉层。参考工艺参数:1lm 的感光粉浆中 PVA 比例为 2%, ADC 比例为 0.02%, 荧光粉 180mg, 常温下风干时间 45min, 荧光粉层距离芯片 1mm, 半径为 1.5mm。

- 3) 对封装成品测试其光效、色温、色坐标和光斑均匀性。由测试数据得出结论:基于水溶性感光胶的荧光粉工艺涂层工艺不仅可以透过曝光条件来控制荧光粉层的厚度,从而控制白光色温,而且荧光粉层的厚度随芯片发出的光强变化而变化,实现了荧光粉层厚度与芯片发光光强相匹配,有利于白光色均匀性的改善。通过对新工艺封装成品的白光光斑色均匀性测试,对比点胶工艺的商品和保形平面涂层工艺的商品得到结论:新工艺得到的白光色均匀性明显优于对比的白光 LED 商品,采用九点法测试荧光粉悬空涂层工艺得到的白光光斑色坐标标准偏差(0.00287,0.00472),点胶商品的色坐标标准偏差(0.0103,0.0236),保形平面涂层工艺商品的色坐标标准偏差(0.0812,0.0139)。可见新工艺得到的白斑色度分布均匀,符合优质照明的要求。通过 5 点法测试对比,点胶白光 LED 商品的白光光斑中心区域较均匀,但边缘色温陡然降低,表现为明显的黄圈,保形平面涂层商品的白光光斑色温由中心到边缘逐渐减小,表现为轻微的黄圈,基于自曝光的荧光粉悬空涂层工艺的白光 LED 光斑色温在整个空间区域基本保持一致,表现为均匀的白斑。
- 4) 对比三种工艺的光效,在大多数相关文献中提到荧光粉悬空结构由于减少了芯片对反射光的吸收,光效得到大幅提高与本文的模拟结果类似,然而从测试结果来看荧光粉悬空涂层工艺的光效并没有显著提高,说明模拟中假设的芯片对反射光的吸收并非影响白光光效的决定性因素,即进入芯片的部分光子被二次射出,由模拟结果可知进入芯片的光子波长大多在 550nm 左右,即多数为荧光粉激发产生的光子,理论上芯片对长波长的光子吸收是很小的,而且多数芯片内置各种结构的反射装置,所以芯片对光的吸收损耗有限。另外受到实验样品的限制,反射杯的反射效果不是很理想,一定程度上造成损耗,所以实验中荧光粉悬空涂层工艺对光效的提高效果也就不明显了。

荧光粉悬空涂层工艺在光效和散热方面的优势在许多文献中有所报道,出现

了灯泡结构以及灯管结构等封装外形，并有产品问世，但荧光粉层厚度难于把握，空间色均匀性问题一直未能解决。本文介绍的基于自曝光的荧光粉悬空涂层工艺很好的解决了白光 LED 的空间色均匀性问题，而且该工艺不仅可应用在单颗 LED 封装，而且可以将荧光粉涂覆在如玻璃等基板上通过 LED 阵列对其曝光，使玻璃基板上的粉浆厚度与 LED 阵列的光强分布匹配，将 LED 阵列与该基板封装后得到大面积均匀白光面光源。由于该工艺表现出高的空间色均匀性，非常适用于液晶背光源以及对照明均匀性要求较高的场所。

致 谢

首先要衷心地感谢导师饶海波教授三年来对我在科研、学习和生活上的指导和帮助！整个课题的完成和论文的撰写都是在饶海波教授的悉心指导下完成的，饶老师认真、务实的工作作风、严谨的科学思维和渊博的专业知识让我终生难忘，正是饶老师把他全部的知识和做人的道理倾囊相授，才使我在科研和学术上取得了今天的成就，在将来的人生道路上受益匪浅。

感谢已经毕业的师兄李君飞、侯斌对我工作的帮助。

感谢教研室的何远、胡玥、万远涛、高寒松等师兄弟在各方面给我的帮助和启发。

深深地感谢我的父母对我的养育之恩，是他们这么多年来无私的奉献以及对我的鼓励和支持给了我不断拼搏、进取的动力。

感谢所有在学习和生活中帮助过我的人，衷心祝愿您们健康、幸福！

参考文献

- [1] Yukio Narukawa, Masahiko Sano, Takahiko Sakamoto, et al. Successful fabrication of white light emitting diodes by using extremely high external quantum efficiency blue chips. *phys. stat. sol. (a)* 205, No. 5, 1081 - 1085 (2008)
- [2] 毛兴武, 张艳雯, 周建军, 等. 新一代绿色光源及其应用. 北京: 人民邮电出版社, 2008
- [3] 占美琼, 吴中林, 吴恒莱等. 提高 LED 的外量子效率. *发光与显示*, 2007, 12 (44): 61-67
- [4] 刘一兵. 关于提高高亮度发光二极管发光效率的探讨. *现代显示*, 2007, 81: 39-42
- [5] 杨清德 康娅. LED 及其工程应用. 北京: 人民邮电出版社, 2007
- [6] N.Holonyak, Jr. Is the light emitting diode (LED) an ultimate lamp?. *Am. J. Phys.*, 2000. vol. 68: 864-866
- [7] M. G. Craford, N. Holonyak, Jr., and F. A. Kish, Jr. In pursuit of the ultimate lamp. *Scientific Amer*, 2001: 83 - 88
- [8] 王海军. 半导体照明 LED 行业—节能、环保的第三代照明革命. *中投证券*, 2008:5-22
- [9] 李漫铁. 中国 LED 封装技术与国外的差异. *现代显示*, 2009, 105: 59-62
- [10] 许文翠, 牛萍娟, 付贤松, 等. 无荧光粉转换白光 LED 的研究和进展. *光机电信息*, 2009, 26 (8): 25-29
- [11] 吉群. 提高 LED 亮度的技术途径. *光电技术*, 2005, 46(3):16-19
- [12] Johannes Baur, Frank Baumann, matthias Peter, et al. Status of high efficiency and high power thin GaN-LED development. *Phys. Status Solidi*, 2009, C6, No. S2: S905-S908
- [13] 张俊兵, 林岳明, 柏林, 等. AlGaInP LED 电极形状的优化. *物理学报*, 2008, 57(9): 5881~5886
- [14] 谢平. 功率型白光 LED 的实现及应用. *城市照明*, 2008, 12(3): 35-36
- [15] Hajime Yamamoto. White LED phosphors: the next step. *Proc. of SPIE Vol. 7598* 759808-1-10(2010)
- [16] Sian-Wei Chen, Jung-Chieh Su, Chun-Lin Lu. Phosphors-conversion white light LED with omni-directional reflector. *Proc. of SPIE Vol. 7138*, 71382D-1-8(2008)
- [17] Huiying Wu, Nadarajah Narendran, Yimin Gu, et al. Improving the Performance of Mixed-Color White LED Systems by Using Scattered Photon Extraction Technique. *Proc. of SPIE Vol. 6669* 666905-1-12(2007)

- [18] M. Zachau, D. Becker, D. Berben, et al. Phosphors for Solid State Lighting. Proc. of SPIE, Vol. 6910, 691010:1-8(2008)
- [19] 取双石, 王会娟. Monte Carlo 方法及其应用. 统计教育, 2009, 1: 45-55
- [20] 孙旭. 白光 LED 荧光粉层中的光学设计及测量[硕士学位论文]. 浙江: 浙江大学, 2007
- [21] Nicholas Metropolis, S. Ulam. The Monte Carlo Method. Journal of American statistical Association, 1949, Vol. 44, NO. 247:335-341
- [22] 宋宜昌. 激光与生物组织相互作用的蒙特卡罗研究[硕士学位论文]. 广东: 华南师范大学, 2002
- [23] 屠大维, 吴仍茂, 杨恒亮等. LED 封装光学结构对光强分布的影响. 光学精密工程, 2008, 5 (16): 833-837.
- [24] 傅丹, 荆西平. 蓝色荧光粉光谱特征对 FED 性能影响的色度学模拟计算. 发光学报, 2004, 3 (25): 320-323.
- [25] 饶海波. 石榴石相外延单晶荧光屏的研究[博士学位论文]. 四川: 电子科技大学, 2000:118-138
- [26] 邵红, 周大明(译). 荧光粉涂层光学. 日本创意株式会社技术. 33-38.
- [27] 王平阳, 夏新林, 谈和平. 用蒙特卡罗法数值模拟 CCD 相机的杂光. 中国空间科学技术, 1999, 2: 60-64.
- [28] 大田 登, 色彩工学, 陕西: 西安交通大学出版社, 1998: 102
- [29] Arturas Zukauskas, Michael S. Shur, Remis Gaska. Introduction to solid-state lighting (黄世华). 北京: 化学工业出版社, 2006, 64-67
- [30] Michael R. Krames, Oleg B. Shchekin, Regina Mueller-mach et al. Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting. JOURNAL OF DISPLAY TECHNOLOGY, 2007, VOL.3, NO.2:160-175
- [31] Fei Hu, Ke-Yuan Qian, and Yi Luo. Far-field pattern simulation of flip-chip bonded power light-emitting diodes by a Monte Carlo. APPLIED OPTICS, 2005, Vol. 44, No. 14:2768-27711
- [32] 吴庆, 黄先. 色坐标对白光 LED 光通量的影响. 发光学报, 2007, 5 (28): 736-739
- [33] Ákos Borbély, Stephen G. Johnson. Performance of phosphor-coated light-emitting diode optics in ray-trace simulations. Optical Engineering, 2005, 44(11), 111308:1-4
- [34] Nadarajah Narendran. Improved Performance White LED. Fifth International Conference on Solid State Lighting, Proceedings of SPIE, 5941: 45-50 (2005)
- [35] Jong Kyu KIM, Hong LUO, Eric Fred SCHUBERT, et al. Strongly Enhanced Phosphor Efficiency in GaInN White Light-Emitting Diodes Using Remote Phosphor

- Configuration and Diffuse Reflector Cup. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, Vol. 44, No. 21: 649-651.
- [36] Steven C. Allen and Andrew J. Steckl. A nearly ideal phosphor-converted white light-emitting diode. APPLIED PHYSICS LETTERS 92, 143309 (2008)
- [37] Kyung-Mi Moon, Se-Hwan An, Hyung-Kun Kim, et al. Phosphor concentration and geometry for high power white light emitting diode. Proc. of SPIE, Vol. 76171Y-1-8(2010)
- [38] Jong Kyu Kim, Hong Luo, Eric Fred Schubert, et al. Strongly Enhanced Phosphor Efficiency in GaInN White Light-Emitting Diodes Using Remote Phosphor Configuration and Diffuse Reflector Cup. The Japan Society of Applied Physics, 2005, vol. 44, No. 21: 649-651
- [39] Zongyuan Liu, Sheng Liu, Kai Wang, et al. Optical Analysis of Phosphor's Location for High-Power Light-Emitting Diodes. IEEE TRANSACTIONS ON DEVICE AND MATERIALS RELIABILITY, VOL. 9, NO. 1: 65-72(2009)
- [40] N. Narendran, Y. Gu, J. P. Freyssinier-Nova, and Y. Zhu. Extracting phosphor-scattered photons to improve white LED efficiency. phys. stat. sol. (a) 202, No. 6: 60-62 (2005)
- [41] 周菊兴. 合成树脂与塑料工艺. 北京: 化学工业出版社, 2000
- [42] 李君飞. 功率型白光 LED 内外相结构荧光粉平面涂层研究. 四川: 电子科技大学, 2008: 31.
- [43] 吴若薇. 制版感光材料. 北京: 印刷工业出版社, 1999
- [44] 王永宁, 张思良. 平版晒版原理与工艺. 北京: 测绘出版社, 1993
- [45] Chung-Hao Tien, Chien-Hsiang Hung, Bo-Wen Xiao, et al. Planar Lighting by Blue LEDs Array with Remote Phosphor. Proc. of SPIE, Vol. 761707-1-8(2001)

攻硕期间取得的研究成果

- [1] 俱剑君, 饶海波, 何远等. 内外相粉浆法制备白光 LED. 光电子激光, 2009, 20 (9)
- [2] 何远, 饶海波, 俱剑君等. 功率型白光 LEDs 平面涂层技术的优化. 激光与光电子学进展, 2010, 47 (7) .

