

半导体照明技术技能人才培养系列丛书·本科

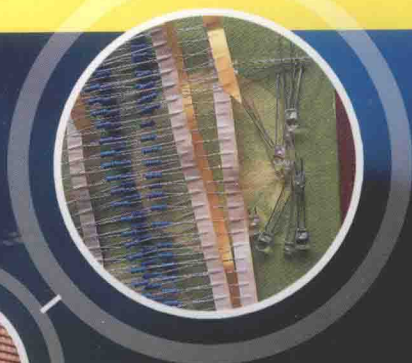
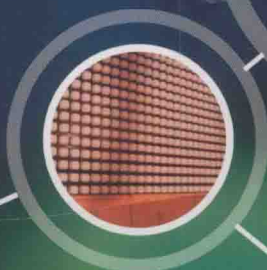
LED器件 与工艺技术


人力资源和社会保障部职业技能鉴定中心
国家半导体照明工程研发及产业联盟

指导编写
组织编写

郭伟玲 主编

钱可元 王军喜 副主编



 中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

半导体照明技术技能人才培养系列丛书·本科

LED 器件与工艺技术

主 编 郭伟玲

副主编 钱可元 王军喜

参 编 李建军 张 伟 张 宁
汪延明 王新建 高 伟

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

为满足培养面向半导体照明上游产业外延、芯片研发和工程应用型人才的需要,本书以 LED 外延和芯片技术为重点,结合 LED 外延结构设计方法,贴近 LED 芯片结构的的制造工艺技术,给出了完整的 LED 从外延生长、芯片制备和封装技术的知识体系。

全书包括三个部分。第一部分是外延技术,包括 LED 材料外延生长技术原理和设备、半导体材料检测技术、蓝绿光 LED 外延结构设计及制备、黄红光 LED 外延结构设计及制备。第二部分是芯片技术,包括 LED 芯片结构及制备工艺、蓝绿光 LED 芯片高光提取技术、红黄光 LED 芯片结构设计及制备工艺,从 LED 芯片制备基本工艺技术到整体工艺流程,以及先进的高光效结构设计,涵盖了 GaN 和 AlGaInP 两个材料系的芯片结构特性及制备过程,介绍了高压 LED 结构及制备技术。第三部分是 LED 封装技术,从封装的目的、光学设计和热学设计方面对封装技术进行了介绍。

本书题材新颖,论述深入浅出,注重理论与实践相结合,可作为本科院校相关专业本科高年级学生和研究生教材和参考书,也可作为外延和芯片企业工艺操人员的培训参考资料,也可供有关工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

LED 器件与工艺技术 / 郭伟玲主编. — 北京: 电子工业出版社, 2015.9

ISBN 978-7-121-26748-2

I. ①L… II. ①郭… III. ①发光二极管—生产工艺—高等学校—教材 IV. ①TN383.059.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 488750 号



策划编辑: 竺南直

责任编辑: 陈晓莉

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 15.5 字数: 400 千字

版 次: 2015 年 9 月第 1 版

印 次: 2015 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 39.50 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

丛书前言

半导体照明（LED）是全球公认和竞相发展的最具市场前景的战略新兴产业之一，在照明领域已确立了主导地位，对我国推动节能减排、调整产业结构具有重大意义。半导体照明产业是一个学科跨度大、技术和应用更新快的行业。“十三五”期间，我国半导体照明产业人力资源需求总量将随着产业的高速增长而大幅增加。作为新兴的产业，与其他发达国家相比，我国半导体照明产业在研发能力、生产管理水平及人才培养等方面仍存在较大差距。

“十八大”强调，要造就规模宏大、素质优良的人才队伍，进入人才强国和人力资源强国行列。人才是产业发展的第一推动力，人力资源的质量与水平是一个产业综合实力与竞争力的体现。院校是人才培养的源头，大力推行校企合作、工学结合、顶岗实习的人才培养模式，创新职业教育人才培养体制，根据产业需求优化专业结构，促进职业教育与产业的开放衔接，加强行业指导能力，发挥行业在建立健全行业人才需求预测机制、行业人才规格标准和行业职业教育专业设置改革机制等方面的指导作用，构建半导体照明产业现代职业教育体系是半导体照明产业人才培养的重中之重。

国家半导体照明工程研发及产业联盟（以下简称“联盟”）6年来一直在积极探索开展多种形式行业人力资源开发工作，服务产业的发展。在人才培养方面，联盟承担了人社部 CETTIC 职业培训项目（LED 系列）组织管理工作。在人才培养方面，联盟与相关院校、行业协会、企业共建了 15 个人才培养基地，帮助院校构建半导体照明专业人才培养方案，在人社部的指导与支持下出版了《半导体照明产业技能人才开发指南》；在人才输送方面，联盟组织半导体照明行业专场招聘会，积极推进校企合作“订单人才培养”项目；在人才评价、鉴定方面，联盟在人社部、科技部的指导下，组织开展半导体照明行业专业技术人员岗位能力认证工作，规范，提升行业从业人员能力、素质。2013 年 7 月，联盟成立了人力资源工作委员会，委员会将整合产业、院校、专家资源，助力产业人才发展。

高质量的教材是人才培养的重要保障。鉴于联盟现有的人才工作基础及目前院校半导体照明专业人才培养滞后于产业发展的现状，在人社部及教育部等部门的指导下，2013 年联盟牵头组织半导体照明领域的专家、学者以及企业界的技术人才共同编写《半导体照明技

术技能人才培养系列丛书》（以下简称《丛书》），旨在提升院校人才培养质量，提升行业从业人员及拟从事该行业人员的能力与素质，致力于推进我国半导体照明产业的发展。

《丛书》按照半导体照明知识结构体系，根据半导体照明技术工艺特点，采用项目式体例编写。《丛书》分为中职、高职、本科部分，共 12 册。中职系列以半导体照明关键岗位工艺操作为主，高职系列侧重于半导体照明关键岗位技术知识与操作工艺并重，本科系列以半导体器件、集成电路的工作原理、制作工艺技术及照明应用技术为主，满足半导体照明相关中、高职院校人才培养及企业生产一线技术人员及初学者学习、充电的需要及适用于大学本科。同时，也可作为微电子相关专业学生的教科书。

《半导体照明技术技能人才培养系列丛书》

中职系列

《LED 封装与测试技术》	雷利宁 主编
《LED 应用技术》	杜志忠 主编
《LED 智能照明控制应用》	王 巍 主编
《LED 灯具设计与组装》	林燕丹 主编

高职系列

《LED 驱动与智能控制》	孟治国 主编
《LED 封装技术》	梁 伟 主编
《电气照明技术》	王海波 主编
《LED 测试技术》	姚善良 主编
《LED 照明设计》	林燕丹 主编

本科系列

《半导体照明概论》	柴广跃 主编
《LED 器件与工艺技术》	郭伟玲 主编
《LED 照明应用技术》	文尚胜 主编

《丛书》中各分册分别由主编统稿，由方志烈、周春生、李小红等专家进行了审稿。《丛书》的编写得到了有关专家的大力支持和帮助，在此一并感谢。

国际半导体照明联盟 秘书长
国家半导体照明工程研发及产业联盟 秘书长 吴玲

半导体照明是目前已知最高光效的人工光源。它是用第三代宽禁带半导体材料制作的光源和显示器件，具有耗电少、寿命长、无汞污染、色彩丰富、可调控性强等特点，不仅可以替代白炽灯、荧光灯在照明领域的应用，还可广泛应用于显示、指示、背光、交通、医疗、通讯、农业等领域。

国家半导体照明工程自 2003 年启动以来，经历了从无到有，从小、弱、散、乱到联合发展的历程。“十二五”期间半导体照明产业作为我国重点发展的战略性新兴产业重点领域之一，已经形成了较为完整的产业链，产业规模从 90 亿元跃升至 2576 亿元，年均增长接近 40%，企业超过 5000 家，从业人员 100 多万；拥有了自主知识产权的 Si 衬底 LED 外延芯片生产技术，掌握了具有国际领先水平的深紫外 LED 器件核心技术，更重要的是在大规模应用方面走到了世界前列，我国已成为全球半导体照明产业发展中心之一。预计 2020 年半导体照明应用市场占有率将达到 70%，我国产业规模将达到 10000 亿元。

“国以才立，政以才治，业以才兴”。“十八大”强调，要造就规模宏大、素质优良的人才队伍，进入人才强国和人力资源强国行列。人才是产业发展的关键要素之一，半导体照明产业是一个学科跨度大、技术和应用更新快的行业。“十三五”期间，我国半导体照明产业人力资源需求总量将随着产业的高速成长而大幅增加，能否形成以人才发展推动产业发展、以产业发展带动人才发展的良好格局将直接决定我国半导体照明产业的持续发展。依托国家重大人才培养计划，重大科研和重大工程项目、重点学科和重点科研基地培养具有创新精神的科技领军人才，积极推进创新团队建设，培养出一大批德才兼备、国际一流的学者和产业科技创新领军人才。积极引进海外高层次人才，吸引出国留学人员回国创业。统筹各类创新人才发展，完善人才激励制度，深入实施重大人才工程和政策，培养造就世界水平的科学家、科技领军人才、卓越工程师和高水平创新团队，加强科研生产一线高层次专业技术人才和高技能人才培养等工作。构建半导体照明产业现代职业教育体系、培养培养半导体照明产业急需的技能型人才就显得尤为重要。

“工欲善其事，必先利其器”，高质量的教材是培养高质量人才的基本保证，也是构建半导体照明产业现代职业教育体系的重要组成部分。国家半导体照明工程研发及产业联盟在半导体照明产业人才发展方面做了很多工作。我很欣喜地看到，联盟在现有工作基础上，在人社部及教育部等部门的指导下，积极牵头组织半导体照明领域的专家、学者以及企业的技术人才共同编写了《半导体照明技术技能人才培养培训系列丛书》（以下简称《丛书》），希望《丛书》能够得到读者的厚爱。

《丛书》是适时代所需，顺时势所趋。在此感谢各位主编及编写团队为提升半导体照明产业人才培养工作倾力尽心的付出，相信通过我们共同的努力，半导体照明产业的明天会更美好。

曹健林

中华人民共和国科学技术部

序二

近年来，在积极参与国际产业分工和国际竞争的背景下，我国半导体照明产业步入了一个大发展的新时期。作为战略性新兴产业，半导体照明产业的发展，对于我国转变经济发展方式、提升传统产业质量、促进节能减排、实现社会经济可持续和促进就业发展起着越来越重要的作用。

人才蔚起，国运方兴。党的十八大报告指出，要加快确立人才优先发展战略布局，造就规模宏大、素质优良的人才队伍，推动我国由人才大国迈向人才强国。作为新兴的职业领域，半导体照明产业技术创新驱动性强、国际化程度高、资本知识密集等特点决定了人才资源是产业发展的关键资源之一。

没有一流的人才，就没有一流的产品，也不会有一流的企业，更谈不上有一流的产业。半导体照明产业要想体现行业竞争优势，提升并保持产业、企业竞争力，就必须以人才工作为先导，积极做好人才开发工作。

今年5月，国务院下发了《关于加快发展现代职业教育的决定》，《决定》指出，行业组织要履行好发布行业人才需求、推进校企合作、参与指导教育教学、开展质量评价等职责，建立行业人力资源需求预测和就业状况定期发布制度，对行业组织在人才培养中的地位 and 作用进行了明确。2012年以来，国家半导体照明工程研发及产业联盟充分发挥行业影响力和组织优势、专家优势，积极参加人力资源和社会保障部部级课题《我国技能储备机制的建立与运作研究》的研究工作，与人社部职业技能鉴定中心联合组成课题组对半导体照明产业的技能人才需求规模、需求规格做了详细的研究，提出了半导体照明研发设计类人才专业能力体系、半导体照明产品应用制造类人才职业技能体系，组织出版了《半导体照明产业技能人才开发指南》，为针对性开展半导体照明产业人才培养工作打下了坚实的基础。同时，《半导体照明行业专项职业能力考核规范》的提出，为产业技能人才的培养评价提出了有先导性、针对性的实践框架，初步解决了对技能人才能力评价标准缺乏的现实问题。

在上述工作基础上，国家半导体照明工程研发及产业联盟组织行业专家、学者，龙头企业负责人共同编写《半导体照明技术技能人才培养培训系列丛书》（以下简称《丛书》）。

系列教材以课题研究为理论支撑，贯彻产教融合、校企合作的要求，立足现实、兼顾发展，协调推进产业人力资源开发与技术进步，是专业设置与产业需求对接、课程内容与职业标准对接、教学过程与生产过程对接的有益尝试，可作为中职、高职、应用型本科专业教学教材，也可作为行业职业培训教材。

我相信《丛书》的出版发行，将有力促进我国半导体照明产业产、学、研的紧密互动，为院校人才培养和企业在职人员培训提供有力的支撑，进一步加快产业技能型人才培养步伐。同时，也为以高层次创新型人才、急需紧缺专门人才为重点，完善半导体照明产业人才发展与培养模式提供有益探索。

中国就业培训技术指导中心
人力资源和社会保障部职业技能鉴定中心

副主任 艾一平
副主任

2014年8月10日

前 言

作为我国七大战略性新兴产业，半导体照明是一个学科跨度大、技术和应用更新快的行业，优势是能提升传统产业、促进节能减排、转变经济发展方式。当前，行业人才需求量大，人才紧缺的问题日益凸显，现有工作人员还面临技术更新、掌握新工艺的压力。

为保障人才的培养、考核、规范，建立对应的专项能力培养基础、考核机制、考核规范，国家半导体照明工程研发及产业联盟组织龙头企业、行业专家、职业教育和培训工作者进行了企业调查和任务分析，建立了半导体照明专业人员岗位能力素质模型，发布了针对专业工程师的《半导体照明工程师专业能力规范》和针对技能人才的《半导体照明行业专项职业能力考核规范》，并启动了《半导体照明技术技能人才培养系列丛书》出版计划。

随着半导体照明技术的迅猛发展、上游 LED 外延和芯片大型企业的不断涌现，外延和芯片研发和工程应用型人才的需求量不断增大，LED 器件与工艺技术在半导体照明教材中占有越来越重要的位置。本书在充分调查行业需要、人才培养规范，结合产业发展趋势，总结近年 LED 技术发展成果，围绕 LED 材料外延生长技术和检测技术、GaN 和 AlGaInP LED 外延结构设计和生长技术，LED 芯片结构设计和制备工艺技术，LED 封装技术，内容既有基础理论和实际应用，又有最新技术。

本书包括三部分。第一部分是外延技术，包括 LED 材料外延和检测技术、蓝绿光 LED 外延结构设计与制备、黄红光 LED 外延结构设计与制备，从外延和检测设备到 LED 外延结构及外延生长技术进行了全面介绍。第二部分是芯片技术，包括 LED 芯片结构及制备工艺、蓝绿光 LED 芯片高光提取技术、红黄光 LED 芯片结构与制备工艺，从 LED 芯片制备基本工艺技术到整体工艺流程，以及先进的高光效结构，涵盖了 GaN 和 AlGaInP 两个材料系的芯片结构特性及制备过程，介绍了高压 LED 结构及制备技术。第三部分是 LED 封装技术，从封装的目的、光学设计和热学设计方面对封装技术进行了介绍。

本书第 1 章 1.1~1.4 节由张伟博士编著。1.5 节由王军喜研究员编著；主要介绍 LED 材料外延与检测技术，内容包括 LED 材料结构、LED 外延生长、MOCVD 设备、MOCVD 源材料，以及 III 族氮化物异质材料晶体质量与电学性质测试分析的部分手段与方法，如高分辨 x 射线衍射、光致发光谱、原子力显微镜、透射电镜、电压-电容以及霍尔测试。

本书第 2 章由张宁博士编著。主要介绍蓝绿光 LED 外延结构设计与材料生长，III 族氮化物蓝绿光 LED 的基本物理性质、能带结构设计与材料优化生长，主要包括氮化物材料的

晶体结构、极化效应、异质结的能带结构以及载流子输运等物理基础，重点讲述了蓝绿光 LED 的多量子阱与电子阻挡层能带结构的设计与 p 型材料的优化生长。

第 3 章李建军教授编著。主要介绍红黄光 LED 外延结构设计与材料生长，内容包括 AlGaInP LED 基本结构、外延材料选取、外延生长技术，以及共振腔 LED 结构设计及外延技术。

第 4 章 4.1~4.4 节由王新建博士编著，4.5 节由郭伟玲教授编著。介绍 LED 芯片结构及制备工艺，包括芯片制造基础工艺，如蒸镀、光刻、刻蚀、研磨抛光等；正装和倒装结构 LED 芯片设计及制备工艺；垂直结构 LED 芯片设计及制备工艺；高压 LED 设计及制备工艺。

第 5 章由汪延明博士编著。主要介绍蓝绿光 LED 芯片高光提取技术，内容包括电流阻挡层、隐形切割、侧腐蚀、粗化、反射电极、表面纹理化、分布布拉格反射镜及图形蓝宝石衬底。

第 6 章由郭伟玲教授和高伟博士编著。主要介绍红黄光 LED 芯片结构与制备工艺，内容包括正装、倒装 AlGaInP LED 芯片结构及制备工艺、电极结构及电流扩展技术、GaAs 基 LED 高光提取技术、转移衬底器件的反射镜、高亮度和大功率 AlGaInP LED 技术。

第 7 章由钱可元教授编著。主要介绍 LED 封装技术，内容包括 LED 器件封装的主要功能、LED 器件封装的光学设计及 LED 器件封装的热学设计。

本书将 LED 外延和芯片结构设计与制备工艺技术有机结合，力求使读者能够较快掌握和熟悉 LED 的设计规律和制备技巧，并应用到实际研发和生长中，具有广泛的适用性。

本书能够顺利出版，感谢国家半导体照明工程研发及产业联盟和半导体照明、LED 相关网站和企业的大力支持。本书可作为高等院校相关专业高年级学生和研究生的教材和参考书，作为专业技能人才培养的资料，也可供有关 LED 企业工程技术人员参考。

此外，对第三代半导体材料 GaN 材料的外延技术和芯片制备工艺的介绍，可供 GaN 电力电子器件工程技术人员参考。

限于作者水平有限，难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。本书配有电子课件，欢迎选用本书的读者索取。

作 者
2014 年 5 月

目 录

第 1 章 LED 材料外延与检测技术	1
1.1 LED 外延基础知识	1
1.1.1 LED 的外延结构	1
1.1.2 LED 的外延生长基本知识	2
1.2 MOCVD 技术基本背景	4
1.2.1 MOCVD 技术的背景知识	4
1.2.2 MOCVD 外延生长中的基本机制和原理	5
1.3 MOCVD 设备简介	9
1.3.1 原材料气源供应系统	9
1.3.2 MOCVD 反应室分系统	12
1.3.3 MOCVD 设备的其他功能子系统	16
1.4 MOCVD 源材料	19
1.4.1 金属有机化合物源 (MO 源)	19
1.4.2 气体源 (氢化物、载气)	22
1.4.3 衬底	24
1.5 氮化物 LED 材料的检测技术	27
1.5.1 高分辨 X 射线检测技术	27
1.5.2 光致发光测试技术	31
1.5.3 霍尔测试技术	34
1.5.4 电容电压测试技术	36
1.5.5 AFM 和 TEM 检测技术	38
参考文献	42
第 2 章 蓝绿光 LED 外延结构设计与制备	46
2.1 氮化物半导体材料的性质	46
2.1.1 氮化物材料的基本性质	46
2.1.2 氮化物材料中的极化电场	49

2.2	氮化物 LED 的能带结构	52
2.2.1	pn 结的能带结构	52
2.2.2	量子阱能带结构	57
2.3	氮化物 LED 多量子阱的设计及生长	61
2.3.1	极化电场对量子阱能带的影响	62
2.3.2	量子垒设计及其对载流子运输的影响	62
2.3.3	量子阱设计及其对载流子分布的影响	64
2.3.4	多量子阱界面的优化生长	66
2.4	氮化物 LED 电子阻挡层及 p 型层的设计	68
2.4.1	电子阻挡层的电子限制作用	68
2.4.2	电子阻挡层对空穴注入的影响	70
2.4.3	p-GaN 层的优化生长	72
	参考文献	73
第 3 章	红黄光 LED 外延生长技术	75
3.1	红光 LED 材料及 LED 基本结构	75
3.1.1	LED 外延材料选取的原则	75
3.1.2	红光 LED 外延材料——AlGaInP 的性质	76
3.1.3	红光 LED 基本外延结构	78
3.2	红光 LED 的材料外延	79
3.2.1	红光 LED 材料外延的工艺设计	79
3.2.2	有源区材料的外延	82
3.2.3	限制层材料的外延	84
3.2.4	窗口层材料的外延	86
3.3	共振腔 LED 结构与外延	88
3.3.1	共振腔 LED 结构及设计	88
3.3.2	650nm 共振腔 LED 外延	91
3.3.3	650nm 共振腔 LED 芯片工艺	93
	参考文献	94
第 4 章	LED 芯片结构及制备工艺	96
4.1	芯片制造基础工艺	96
4.1.1	蒸镀工艺	96
4.1.2	光刻工艺	98
4.1.3	刻蚀工艺	103
4.1.4	沉积工艺	104
4.1.5	退火工艺	105
4.1.6	研磨抛光工艺	106
4.1.7	点测工艺	109

4.1.8	检验工艺	111
4.2	蓝绿光 LED 芯片结构及制备工艺	114
4.2.1	正装结构设计及制备工艺	114
4.2.2	倒装结构芯片及制备工艺	120
4.3	垂直结构设计及制备工艺	123
4.3.1	垂直结构芯片的优势	124
4.3.2	垂直结构芯片的制备工艺	125
4.4	高压 LED 芯片设计及制备工艺	126
4.4.1	高压 LED 芯片的优点	127
4.4.2	GaN 基高压 LED 结构设计	129
4.4.3	GaN 基高压 LED 制备工艺	132
	参考文献	133
第 5 章	蓝绿光 LED 高光提取技术	136
5.1	电流阻挡层 (Current Blocking Layer, CBL)	137
5.2	隐形切割 (Stealth Dicing, SD)	139
5.3	粗化 (Rough)	142
5.4	反射电极 (Reflected Pad)	147
5.5	侧腐蚀 (Sidewall Etching, SWE)	151
5.6	表面纹理化 (Surface Texture)	157
5.6.1	在 LED 外延层上直接引入纹理化图形	157
5.6.2	在透明导电层上引入纹理化图形	161
5.6.3	在传统透明导电层上引入其他透明导电层	162
5.7	分布布拉格反射镜 (Distribution Bragg Reflector)	163
5.8	图形蓝宝石衬底 (Pattern Sapphire Substrate, PSS)	168
	参考文献	172
第 6 章	黄红光 LED 芯片结构与制备工艺	178
6.1	红、黄色 LED 基本结构和制备工艺流程	179
6.1.1	正装 AlGaInP LED 芯片结构及制备工艺	179
6.1.2	倒装芯片结构及工艺流程	181
6.2	红、黄光 LED 电极结构及电流扩展技术	184
6.2.1	芯片电极形状变化	184
6.2.2	电流扩展层技术及透明电极	185
6.2.3	电流阻挡层	188
6.3	GaAs 基 LED 高光提取技术	189
6.3.1	透明光学窗口层技术	189
6.3.2	倒梯形等外形结构	190
6.3.3	表面粗化	191

6.3.4 光子晶体 LED	194
6.4 转移衬底器件的反射镜	194
6.4.1 金属反射镜结构	195
6.4.2 全方向反射镜结构 (ODR)	197
6.5 高亮度和大功率 AlGaInP LED 技术	200
参考文献	202
第 7 章 LED 封装基础知识	207
7.1 LED 器件封装的主要功能	208
7.1.1 光电器件封装的机电连接与保护特性	208
7.1.2 发光器件的光谱转换与实现	209
7.2 LED 器件封装的光学设计	210
7.2.1 LED 器件的光提取效率	210
7.2.2 LED 封装后的光学特性	212
7.2.3 荧光粉光学特性的计算与分析	217
7.3 LED 器件封装的热学设计	224
7.3.1 LED 的热特性	224
7.3.2 LED 封装的热阻模型	226
7.3.3 热场分布的计算机辅助分析	229
参考文献	232

第 1 章

LED 材料外延与检测技术

LED，即半导体发光二极管（Light Emitting Diode），其发光的物理本质是对半导体 pn 结通电后，电势驱动半导体材料中的电子与空穴复合而生成光子，从而实现半导体发光。不论是氮化物系列的蓝绿光 LED，还是 AlGaInP 系列的红黄光 LED，目前其大规模生产均主要采用 MOCVD 设备与技术。可以说，MOCVD 设备与外延生长技术是 LED 的基础和核心，是 LED 电学特性和光学特性的主要决定因素。

本章前 4 节主要从 MOCVD 技术原理、设备设计、硬件配置、源材料特性和实际生产使用等角度，结合 LED 材料的外延生长工艺流程和特点进行基础性知识介绍。1.5 节用专门篇幅详细介绍了 LED 外延材料几种主要的检测方法，包括高分辨 X 射线检测技术、光致发光测试技术（Photoluminescence）、霍尔（Hall）测试技术、电容电压（C-V）测试技术、原子力显微技术（AFM）和透射电镜（TEM）检测技术。这些检测技术考察的重点是 LED 外延材料表面形貌、晶体质量、材料结构、电学性能及发光特性等。

1.1 LED 外延基础知识

1.1.1 LED 的外延结构

LED 与日常生活中白炽灯通过电致发热再把热转变为光不同，LED 直接把电能转变为光能，提高了电能的利用效率，同时也更为安全可靠。值得一提的是，p 型半导体与 n 型半导体形成的 pn 结结构，既可以像 LED 一样把电变为光，也可以把光变为电，如太阳能电池。

实际的 LED 具有复杂的多层结构（如图 1-1 所示），不仅有 pn 结，pn 结之间还有多量

子阱结构。引入多量子阱，一方面可帮助“限制并俘获”电子与空穴，从而提高 LED 的集群复合效率，增强发光效率；另一方面，量子阱是进行能带调制而决定发光波长的关键结构，改变量子阱外延结构中阱和垒的成分、厚度等，能调控发光的波长。以蓝绿光 LED 为例，其典型的量子阱是以 GaN 为垒及以 InGaN 为量子阱的 GaN/InGaN 周期多层结构，当量子阱的周期和厚度相同时，阱中 In 组分越高，其能带就越窄，发光波长越长；而当 In 组分相同时，在一定范围内量子阱越厚，发光波长也会越长。此外，LED 的外延结构中还包括 AlGaIn、超晶格等更细致的结构设计，来改善 LED 的漏电电流 (I_r)、反向电压 (V_r)、发光效率和抗静电 (ESD) 能力等综合的电学和光学性能。



图 1-1 LED 多层结构示意图

1.1.2 LED 的外延生长基本知识

顾名思义，外延 (Epitaxy) 技术是指在具有一定结晶取向的原有晶体 (一般称为衬底) 上向“外”延伸出并按一定晶体学方向生长薄膜的方法，这个延续生长出的晶体层被称为外延层。在晶格匹配的衬底上，利用金属有机物为源材料进行的化学气相外延生长，根据其英文全称 Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy，一般简化为 MOVPE。基于外延原始意义，它也涵盖材料生长中在已有材料 (或衬底) 上的覆盖生长 (overgrowth) 成膜现象。

不论是氮化物系列的蓝绿光 LED，还是 AlGaInP 系列的红黄光 LED，目前其大规模生产工艺主要采用 MOCVD 设备与技术，其中文名称是“金属有机物化学气相沉积”，顾名思义，就是利用金属有机物为源材料进行的化学气相沉积技术。用 MOCVD 进行 LED 材料外延的基本生长原理是：氢气或惰性气体 (氮气、或氩气) 作为载气把含有 III 族元素的金属有机物 (MO) 源和含有 V 族元素的非金属氢化物 (NH_3 , AsH_3 , 或 PH_3) 携带到