



半导体科学与技术丛书

# III族氮化物发光 二极管技术及其应用

李晋闽 王军喜 刘 喆 著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

半导体科学与技术丛书

# Ⅲ 族氮化物发光二极管技术 及其应用

李晋闽 王军喜 刘 喆 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书以作者及其研究团队多年的研究成果为基础,详细介绍了Ⅲ族氮化物发光二极管(LED)的材料外延、芯片制作、器件封装和系统应用,内容集学术性与实用性为一体。全书共12章,内容包括:Ⅲ族氮化物LED的基本原理、材料性质及外延生长理论,InGaN/GaN多量子阱材料及蓝、绿光LED,AlGaIn/GaN多量子阱材料及紫外LED,Ⅲ族氮化物LED量子效率提升技术、关键制备工艺、封装技术,可靠性分析,LED的应用,以及当前氮化物LED的一些研究前沿和热点。

本书可供从事氮化物发光材料及半导体照明领域相关的科研人员、研究生与企业研发人员等阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

Ⅲ族氮化物发光二极管技术及其应用/李晋闽,王军喜,刘喆著. —北京:科学出版社,2016.3

(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-047264-9

I. ①族… II. ①李…②王…③刘… III. ①氮化物-发光二极管-照明技术-研究 IV. ①TN383

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第025480号

责任编辑:钱俊周涵/责任校对:韩杨

责任印制:肖兴/封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京利丰雅高长城印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:17 1/2

字数:336 000

定价:148.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《半导体科学与技术丛书》编委会

名誉顾问:王守武 汤定元 王守觉

顾问:(按姓氏拼音排序)

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 陈良惠 | 陈星弼 | 雷啸霖 | 李志坚 | 梁骏吾 | 沈学础 |
| 王 圩 | 王启明 | 王阳元 | 王占国 | 吴德馨 | 郑厚植 |
| 郑有炘 |     |     |     |     |     |

主 编:夏建白

副主 编:陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委:(按姓氏拼音排序)

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 陈弘毅 | 陈诺夫 | 陈治明 | 杜国同 | 方祖捷 | 封松林 |
| 黄庆安 | 黄永箴 | 江风益 | 李国华 | 李晋闽 | 李树深 |
| 刘忠立 | 鲁华祥 | 马骁宇 | 钱 鹤 | 任晓敏 | 邵志标 |
| 申德振 | 沈光地 | 石 寅 | 王国宏 | 王建农 | 吴晓光 |
| 杨 辉 | 杨富华 | 余金中 | 俞育德 | 曾一平 | 张 荣 |
| 张国义 | 赵元富 | 祝宁华 |     |     |     |

## 《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用,它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新,并在许多技术领域引起了革命性变革和进步,从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动本世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后,在国际上对中国禁运封锁的条件下,我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下,自力更生,艰苦奋斗,从无到有,在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果,为我国半导体科学技术事业的发展,为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前,在改革开放的大好形势下,我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统,正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我们国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果,发展我国的半导体事业,使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域,包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作,总结自己的研究经验,吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来,为他们提供一套有用的参考书或教材,使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究,为发展我国的半导体事业做出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展,力求覆盖较广阔的前沿领域,展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题,而不求面面俱到。在写作风格上,希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点,深入浅出,图文并茂,文献丰富,突出物理内容,避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会,将他们的累累硕果奉献给广大读者,又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005 年 3 月 16 日



## 前 言

1993 年第一只高亮度 GaN 基蓝光发光二极管(light-emitting diode, LED)诞生,开启了白光 LED 的新时代——半导体照明时代。半导体照明起源于 20 世纪后半叶,进入新世纪之后得到普遍应用,后来技术不断突破;光电子产业半导体照明是本世纪初兴起的一个新兴产业,目前技术发展日新月异,是国际高科技领域竞争的焦点之一。

作者在美国做高级访问学者期间,在一次“光博会”上看到了 LED 的雏形,留下了深刻印象。作为从事半导体研究工作的专业人员,作者意识到,半导体本身是个长寿命的器件,如果没有人为的损坏几乎是半永久型的,要是用半导体作照明灯,基本上可以达到灯永久用不坏的目的。在 2003 年年初,作者组织相关人员做了研究发展计划,向各级领导汇报了基于Ⅲ族氮化物 LED 的半导体照明技术在未来科学技术发展过程中的深远意义,提出半导体照明是半导体科学技术发展围绕在信息领域未来发展过程中应引起国家高度关注的领域。科技部于 2003 年 6 月 17 日召开全国视频会议,标志着国家半导体照明工程正式启动。2006 年初中国科学院根据国家发展战略和本院的综合优势,正式批复依托作者所在的中国科学院半导体研究所成立中国科学院半导体照明研发中心。

在“十一五”期间,国家高技术研究发展计划(863 计划)开展“半导体照明工程”项目,安排经费 3.5 亿元,对半导体照明核心技术的突破和产业化关键技术的攻关等进行了全产业链部署,并明确了“十一五”的战略目标。通过自主创新,突破白光照明部分核心专利,解决半导体照明市场急需的产业化关键技术,建立完善的技术创新体系与特色产业集群,完善半导体照明产业链,形成我国具有国际竞争力的半导体照明新兴产业。2008~2010 年的北京奥运会、上海世界博览会、广州亚运会等 LED 应用工程,让大众感知、体验了未来照明的魅力,是照明工程运用的巨大成功。

基于Ⅲ族氮化物 LED 的半导体照明之所以能够迅速取得今日的重大进展,得益于几十年来对以氮化镓为代表的宽禁带半导体材料的重要基础问题研究的突破。通过低温缓冲层消除应力和对 P 型掺杂机理的认识,提高了材料的质量和发光的量子效率,实现了从材料到器件的跃变;通过第一原理计算对掺杂机理的深入认识,掺杂浓度提高了两个数量级,这些基础研究的重大突破应用到器件上,使产品性能提升了一倍,实现了特种照明的实用化。半导体照明很有特点,在科学问题还没有完全解决的同时,它在市场上已有了大量的应用,简单的说就是半导体照明市场的驱动力太强,不像其他新兴产业完全是靠技术来推动的。可是当

应用到一定阶段,如果科学问题还未得到解决,后面的发展就会很困难。因此要加强基础科学方面的研究,否则产业发展就是“无源之水,无本之木”。

本书以作者及其研究团队十多年的研究成果为基础,结合国际上最前沿的研究进展和动态,从Ⅲ族氮化物发光二极管的材料外延、芯片制作、器件封装和系统应用等方面详细介绍了Ⅲ族氮化物 LED 的基本原理、材料性质(第 2~3 章);外延生长理论,InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 多量子阱材料及蓝、绿光 LED,AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 多量子阱材料及紫外 LED(第 4~6 章);Ⅲ族氮化物 LED 量子效率提升技术、关键制备工艺、封装技术及可靠性分析,LED 的应用及前沿等(第 7~12 章)内容。

本书是我们多年基于氮化物 LED 的总结,由于水平有限,难免有不足之处,望同仁不吝赐教!借此机会,感谢王占国院士、周炳琨院士、甘子钊院士、郑有炘院士、陈良惠院士、夏建白院士等众多科学家长期的指导;感谢国家科技部 973 计划、863 计划和支撑计划的支持,中国科学院半导体照明研发中心同志们的成果丰富了本书内容,在此一并表示感谢。希望本书可以对 LED 领域的相关科技工作者在学术参考和研究领域发展趋势方面有所帮助,敬请广大读者提出意见和建议。

李晋闽

2015 年 9 月

# 目 录

《半导体科学与技术丛书》出版说明

前言

|       |                                 |    |
|-------|---------------------------------|----|
| 第 1 章 | 绪论 .....                        | 1  |
|       | 参考文献 .....                      | 4  |
| 第 2 章 | LED 的基本原理 .....                 | 6  |
| 2.1   | LED 发光原理 .....                  | 6  |
| 2.2   | 辐射复合与非辐射复合 .....                | 10 |
| 2.3   | LED 的光学特性与电学特性 .....            | 11 |
| 2.4   | 白光 LED 原理 .....                 | 16 |
|       | 参考文献 .....                      | 18 |
| 第 3 章 | Ⅲ族氮化物 LED 材料的性质与测试 .....        | 19 |
| 3.1   | Ⅲ族氮化物的晶体结构和能带结构 .....           | 19 |
| 3.2   | Ⅲ族氮化物材料的极化效应 .....              | 22 |
| 3.3   | Ⅲ族氮化物 LED 材料的掺杂 .....           | 24 |
| 3.4   | Ⅲ族氮化物材料性质测试分析 .....             | 26 |
|       | 参考文献 .....                      | 32 |
| 第 4 章 | Ⅲ族氮化物 LED 材料的外延生长 .....         | 33 |
| 4.1   | 外延生长基本模式 .....                  | 33 |
| 4.2   | Ⅲ族氮化物 LED 外延生长的衬底 .....         | 35 |
| 4.3   | Ⅲ族氮化物 LED 外延技术 .....            | 37 |
| 4.4   | MOCVD 生长氮化物材料的两步生长法 .....       | 45 |
| 4.5   | Ⅲ族氮化物材料外延层生长条件对材料质量的影响 .....    | 49 |
| 4.6   | SiC 衬底上高质量 GaN 的外延技术 .....      | 58 |
|       | 参考文献 .....                      | 64 |
| 第 5 章 | InGaN/GaN 多量子阱材料及蓝、绿光 LED ..... | 66 |
| 5.1   | InGaN 材料体系简介 .....              | 66 |
| 5.2   | InGaN/GaN 多量子阱材料中的极化效应 .....    | 67 |
| 5.3   | 量子限制斯塔克效应 .....                 | 72 |
| 5.4   | InGaN/GaN 多量子阱中的载流子局域化 .....    | 74 |
| 5.5   | 绿光 LED 及非极性、半极性 LED .....       | 76 |



|                                                    |            |
|----------------------------------------------------|------------|
| 参考文献 .....                                         | 81         |
| <b>第 6 章 AlGa<sub>N</sub> 基多量子阱材料及紫外 LED .....</b> | <b>84</b>  |
| 6.1 AlGa <sub>N</sub> 材料体系简介 .....                 | 85         |
| 6.2 AlGa <sub>N</sub> 材料的光学特性和电学特性 .....           | 86         |
| 6.3 AlGa <sub>N</sub> 材料外延生长和掺杂技术 .....            | 88         |
| 6.4 紫外 LED 的结构设计及制备 .....                          | 93         |
| 参考文献 .....                                         | 98         |
| <b>第 7 章 Ⅲ族氮化物 LED 量子效率提升技术 .....</b>              | <b>101</b> |
| 7.1 LED 的三种结构 .....                                | 101        |
| 7.2 内部量子效率提升技术 .....                               | 104        |
| 7.3 光取出效率提升技术 .....                                | 114        |
| 7.4 电流注入效率提升技术 .....                               | 128        |
| 7.5 Droop 效应 .....                                 | 137        |
| 参考文献 .....                                         | 142        |
| <b>第 8 章 Ⅲ族氮化物 LED 的关键制备工艺 .....</b>               | <b>144</b> |
| 8.1 Ⅲ族氮化物 LED 制备工艺流程 .....                         | 144        |
| 8.2 光刻工艺 .....                                     | 145        |
| 8.3 刻蚀工艺 .....                                     | 149        |
| 8.4 蒸发和溅射 .....                                    | 152        |
| 8.5 欧姆接触 .....                                     | 153        |
| 8.6 倒装结构 LED 的关键工艺 .....                           | 158        |
| 8.7 垂直结构 LED 的关键工艺 .....                           | 160        |
| 8.8 交流/高压 LED 的关键工艺 .....                          | 166        |
| 参考文献 .....                                         | 171        |
| <b>第 9 章 Ⅲ族氮化物 LED 的封装 .....</b>                   | <b>173</b> |
| 9.1 Ⅲ族氮化物 LED 封装材料 .....                           | 173        |
| 9.2 Ⅲ族氮化物 LED 封装工艺 .....                           | 177        |
| 9.3 LED 封装技术 .....                                 | 180        |
| 9.4 封装及系统散热技术 .....                                | 185        |
| 9.5 封装形式的发展趋势 .....                                | 187        |
| 参考文献 .....                                         | 187        |
| <b>第 10 章 Ⅲ族氮化物 LED 器件的可靠性分析 .....</b>             | <b>189</b> |
| 10.1 失效模式和失效分析 .....                               | 189        |
| 10.2 LED 老化测试和老化机制 .....                           | 198        |
| 10.3 LED 系统可靠性 .....                               | 202        |

---

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 参考文献 .....                       | 209        |
| <b>第 11 章 LED 的应用 .....</b>      | <b>211</b> |
| 11.1 新型光环境技术 .....               | 211        |
| 11.2 可见光通信应用系统 .....             | 214        |
| 11.3 LED 显示 .....                | 217        |
| 11.4 植物照明应用 .....                | 223        |
| 11.5 医疗应用 .....                  | 229        |
| 参考文献 .....                       | 230        |
| <b>第 12 章 新型氮化物 LED 技术 .....</b> | <b>232</b> |
| 12.1 GaN 基纳米柱 LED .....          | 232        |
| 12.2 量子点 LED .....               | 243        |
| 12.3 表面等离激元增强 GaN 基 LED .....    | 247        |
| 12.4 GaN 基偏振光 LED .....          | 254        |
| 参考文献 .....                       | 261        |
| <b>索引 .....</b>                  | <b>263</b> |

# 第 1 章 绪 论

自古以来,照明光源的历史就与人类文明的发展息息相关。照明光源不仅是人类文明的见证,更是人类文明不断发展和进步的原动力。1879 年,Thomas Edison发明了白炽灯,使人类进入了电气照明时代,改变了人类社会的生产和生活方式。从此之后,照明光源飞速发展,荧光灯和高压钠灯等相继出现,充当着重要的照明工具,如图 1.1 所示。然而,白炽灯发光效率低,荧光灯含汞等有害物质,高压钠灯显色性差,这些光源的致命弱点预示着它们终将不能满足日益发展的人类文明对于节能环保的高度需求。在人们致力于研究开发新光源的同时,半导体技术的发展带领人们进入了信息时代,人们对于半导体材料的研究与应用也越来越关注,发光二极管(light-emitting diode, LED)便在此背景下应运而生。1962 年,Nick Holonyak Jr. 使用 GaAsP 为发光材料,发明了第一颗 p-n 结红光 LED<sup>[1]</sup>。在随后大约四十年中,GaP(550nm,绿色)、GaAsP(650nm,橙色和黄色)、GaAlAs(680nm,红色)、AlInGaP(590~620nm,黄-橙黄色)等多种材料体系的 LED 相继推出,不过发光波长均长期局限于红色和黄绿色,难以实现更短波长的蓝光 LED<sup>[2]</sup>。直到 20 世纪 90 年代左右,日本名古屋大学的赤崎勇(Isamu Akasaki)和天野浩(Hiroshi Amano),以及日本日亚公司的中村修二(Shuji Nakamura)通过不断努力成功解决了高质量 GaN 薄膜的生长与 p 型掺杂问题,才实现了商业化的高效率氮化物蓝光 LED。GaN 基蓝光 LED 的发明被誉为“爱迪生之后的第二次照明革命”。他们三人也因为“发明的高效蓝色发光二极管(LED)带来了明亮而节能的白色光源”而获得了 2014 年度诺贝尔物理学奖<sup>[3]</sup>。

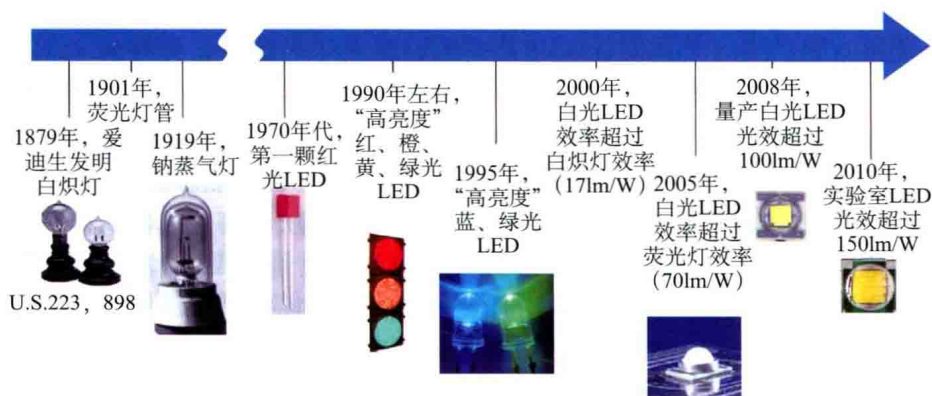


图 1.1 人类照明史上的里程碑事件

Ⅲ族氮化物半导体包括氮化铝(AlN)、氮化铟(InN)、氮化镓(GaN)及其合金,属于全组分直接带隙半导体,辐射复合动量守恒,辐射跃迁效率高,其带隙能量涵盖了从近红外到深紫外的宽光谱范围,是目前实现高效率发光二极管的理想材料,也是宽禁带半导体中最具吸引力的材料<sup>[4]</sup>。然而,在生产实际中,发光二极管的发光效率会受到材料、器件、封装等多种环节和技术的影响,如图 1.2 所示,这一系列的问题引起了世界各国众多科技工作者的广泛关注,成为科学研究的热点领域。

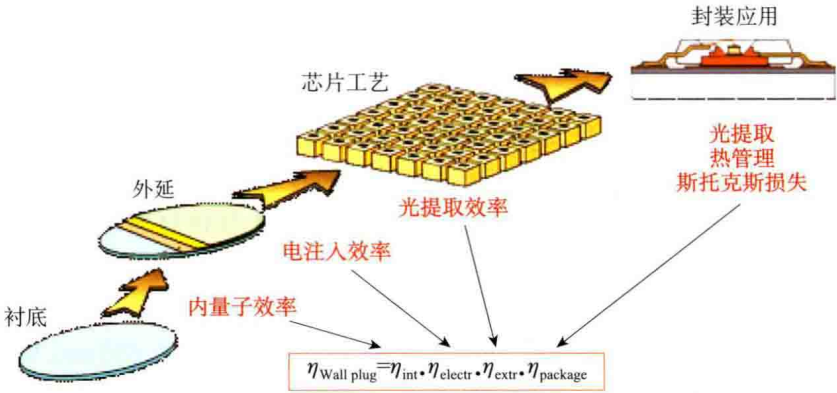


图 1.2 发光二极管的制作流程与 LED 的效率

衬底材料是Ⅲ族氮化物外延膜生长的基础,也是构成 LED 器件的主要组成部分,对 LED 器件的制备及性能具有重要影响。以 GaN 衬底为例,GaN 同质衬底是生长 GaN 外延层最为理想的衬底,其最大优势在于衬底与外延层晶格匹配,可以最大限度地消除由晶格失配导致的晶体缺陷,并且 GaN 衬底可以提高垂直方向的电导率和热导率,从而极大地提升 GaN 基 LED 的性能。但是,GaN 熔点很高(2800℃),平衡蒸气压很大(4.5GPa),制备 GaN 体单晶极为困难<sup>[5]</sup>。虽然一些研究机构通过氢化物气相外延(HVPE)、氨热(ammonothermal)法和低压助溶剂(solution growth at lower pressure)法等制备出了晶体质量较好的 GaN 体单晶,不过,其生长成本较高且尺寸较小,难以满足市场的需要<sup>[6]</sup>。因此,目前普遍采用的主要是异质外延。常用的衬底有蓝宝石( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ )、碳化硅(6H-SiC)和硅(Si)等。不过,异质外延技术有其固有的缺点,如晶格失配、热膨胀失配以及化学互溶性差等,这些问题导致外延材料中存在高位错密度、马赛克晶体结构、双轴应力和外延片的翘曲等,从而影响了外延材料的晶体质量和 LED 器件的性能<sup>[7]</sup>。为了提高异质外延材料的晶体质量,通常会采取一些特殊的方法和手段。例如,侧向外延生长(epitaxial lateral overgrowth, ELOG)、缓冲层或插入层、图形化衬底以及在非极性和半极性面外延生长等<sup>[8,9]</sup>。

Ⅲ族氮化物材料的外延方法主要有金属有机化合物气相外延(MOCVD)、氢



化物气相外延(HVPE)和分子束外延(MBE)等。由于 HVPE 生长速率过快,无法用于生长量子阱和超晶格等低维结构,而 MBE 则生长速率过慢且设备价格高昂,综合成本和效率的考量,商业上更多地采用 MOCVD 技术在蓝宝石衬底上沿  $c$  轴方向异质外延 LED 结构。沿  $c$  轴方向生长的纤锌矿氮化物半导体由于不具有中心对称性,加上氮化物材料与衬底、氮化物异质结构间的晶格不匹配,使得其晶体内部产生自发极化和压电极化,极化效应在界面累积电荷形成内建电场,改变晶体的能带结构,这种现象在 InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 和 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 量子阱中更为明显,即所谓的量子限制斯塔克效应(quantum confined Stark effect, QCSE)<sup>[10]</sup>。内建电场造成导带和价带带边倾斜,使得量子阱中电子和空穴的波函数空间分离,减少了载流子波函数的空间重叠,从而降低了辐射复合几率,LED 的发光效率因而降低。为了有效降低极化电场和量子限制斯塔克效应对 LED 发光效率的影响,就需要控制并降低晶体内的总应变变量,常用的方法有在特定晶面(如非极性面或半极性面)的异质衬底上外延、优化量子阱结构、制作微纳图形衬底以及纳米柱结构 LED 等<sup>[9,11]</sup>。此外,为了使 p 型 Ga<sub>N</sub> 中的空穴更有效地注入到量子阱区域,通常还会采取一些电子阻挡层、应变补偿技术、渐变生长技术等。这些手段都能有效提高 LED 的内量子效率<sup>[12]</sup>。

LED 的芯片主要有正装、倒装和垂直结构三种工艺技术路线。芯片工艺对于提高 LED 器件的电注入效率和光提取效率有着重要影响。要想提高 LED 的电注入效率,获得低工作电压器件,必须解决电极材料与 Ga<sub>N</sub> 材料的欧姆接触问题。由于目前的生长技术无法得到高空穴浓度的 p 型 Ga<sub>N</sub>,且其功函数较大,没有与之相当的金属材料,所以 p 型 Ga<sub>N</sub> 的欧姆接触制作一直是个难点<sup>[13]</sup>。为了兼顾低比接触电阻率和高光学透过率,科研人员采用透明导电氧化物薄膜、金属纳米线、石墨烯等作为欧姆接触层<sup>[14]</sup>。此外,为了进一步提高 LED 的电注入效率,解决电流聚集效应,通常还会采用一些电流扩散层、电流阻挡层等技术。芯片工艺除了能改善器件的电注入效率,也能有效提高其光提取效率。由于 Ga<sub>N</sub> 材料(折射率为 2.5)与空气(折射率为 1)间的折射率相差较大,有源区发出的光会因为全反射临界角过小(只有 23.5°)而无法从界面出射,导致光提取效率很低(只有 4%),不能出射的光将在介质材料中反复传播直到光能全部被耗散成热能,对器件的性能也有不利的影响<sup>[15]</sup>。鉴于此,一系列的技术被纷纷采用,如图形衬底、表面粗化、反射镜技术、光子晶体、纳米柱结构和表面等离子体激元等<sup>[16,17]</sup>。

LED 封装工艺直接影响器件的可靠性。氮化物 LED 器件由于本身的特殊性,其可靠性问题主要包括:衬底、材料以及化合物半导体的异质外延生长;Ga<sub>N</sub> 的 p 型掺杂及掺杂元素的钝化;电极金属化及欧姆接触;器件储存与工作工程中电流、温度以及静电等因素。大量的研究表明,对于 LED 光源器件,由封装失效而引起的光源失效远大于芯片失效<sup>[18]</sup>。封装工艺是 LED 制作过程中不可忽视的



重要环节。良好的封装技术可以保护 LED 芯片,提高其机械性能及寿命;加强散热,降低 LED 芯片结温,提高 LED 光电热性能;优化光学设计,提高 LED 的发光效率。封装不理想则会导致 LED 器件光损失严重、发光效率低、光色不均匀、使用寿命短等诸多问题。从封装技术来看,LED 封装先后经历了引脚式(Lamp LED)、表面组装式(SMT LED)、板上芯片直装式(COB)、系统封装式(SiP)等发展阶段,现在正朝着芯片尺度晶圆级封装、IC 封装等形式发展。不过,无论哪种封装技术,都必须考虑到热管理、封装材料、光学设计、静电防护等诸多因素对 LED 的光电性能、发光效率和寿命的影响<sup>[19]</sup>。

2014 年诺贝尔奖委员会在声明中说:“白炽灯点亮了 20 世纪,21 世纪将由 LED 灯点亮。”短短的二十余年,Ⅲ 族氮化物 LED 技术不仅在照明、背光、显示等领域广泛应用,引领着现代照明技术的进步,也在逐步改变着人们的生活方式,向着生物、农业、医疗、保健、航空、航天和通信等“超越照明”的领域发展,为社会进步和经济繁荣发挥着重要作用<sup>[20]</sup>。不过,随着 LED 应用领域的不断扩展,新应用领域的不断出现,也会涌现出很多与通信、控制、传感、信息处理、电子、软件、光学等多领域技术交叉的新的基础科学问题,亟需去解决。

我国在Ⅲ族氮化物发光二极管技术方面的研究始于 20 世纪 90 年代末期,尤其是从 2003 年我国启动“半导体照明工程”以后,开展了一系列基础性、前瞻性、战略性的科学技术研究,在 MOCVD 装备制造、外延材料生长、芯片制造工艺、封装集成技术各环节均取得了具有国际影响的原创性工作。我们研发的白光 LED 在 350mA 的工作电流下,发光效率从 2004 年的 20lm/W 提高到 2014 年的 160lm/W。LED 的发展也为我国的节能减排和经济建设贡献着巨大力量。随着基础研究和工程应用的深入,Ⅲ族氮化物发光二极管技术必将进一步推动我国第三代半导体技术和产业的发展。

### 参 考 文 献

- [1] Holonyak N, Bevacqua S F. Applied Physics Letters, 1962, 1: 82-83
- [2] Craford M G, Dupuis R D, Feng M, et al. 50th Anniversary of the Light-Emitting Diode (LED): An Ultimate Lamp. Proceedings of the IEEE, 2013, 101: 2154-2157
- [3] Normile D. Science, 2014, 346: 149-150
- [4] Ponce F A, Bour D P. Nature, 1997, 386: 351-359
- [5] Paskova T, Hanser D A, Evans K R. Proceedings of the IEEE, 2010, 98: 1324-1338
- [6] Sardar K, Rao C N R. Advanced Materials, 2004, 16: 425
- [7] Nakamura S. Science, 1998, 281: 956-961
- [8] Masui H, Nakamura S, DenBaars S P, et al. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, 57: 88-100
- [9] Jang J, Woo S, Min D, et al. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2015, 15: 1895-1906

- 
- [10] Crawford M H. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15: 1028-1040
- [11] Yeh T W, Lin Y T, Stewart L S, et al. Nano Letters, 2012, 12: 3257-3262
- [12] Park J H, Kim D Y, Hwang S, et al. Applied Physics Letters, 2013, 103
- [13] Song J O, Ha J S, Seong T Y. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, 57: 42-59
- [14] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, et al. Nature Photonics, 2010, 4: 611-622
- [15] Wierer J J, David A, Megens M M. Nature Photonics, 2009, 3: 163-169
- [16] Kwon M K, Kim J Y, Kim B H, et al. Advanced Materials, 2008, 20: 1253
- [17] Zhmakin A I. Physics Reports-Review Section of Physics Letters, 2011, 498: 189-241
- [18] Ueda O. Japanese Journal of Applied Physics, 2010, 49
- [19] Chang M-H, Das D, Varde P V, et al. Microelectronics Reliability, 2012, 52: 762-782
- [20] Schubert E F, Kim J K. Science, 2005, 308: 1274-1278

## 第 2 章 LED 的基本原理

LED 是一种半导体光电子器件。因为 LED 具有效率高、寿命长、不易破损、反应速度快、可靠性高等传统光源不及的优点<sup>[1]</sup>, 所以它备受青睐。其基本结构为 p-n 结, 基本原理是在正向偏压下, 半导体中的电子和空穴产生复合而发射光子。为了制备高效的 LED, 必须尽可能地增加半导体内电子和空穴的辐射复合概率, 减少其非辐射复合概率。由于 LED 的发光机理与传统的白炽灯等光源完全不同, 所以也有着不一样的光学和电学特性。鉴于 LED 独特的光学和电学特性, 可以利用单色光 LED 混色或者结合荧光粉实现白光 LED。

本章以 p-n 结为理论模型, 主要介绍 LED 的基本原理, 辐射复合与非辐射复合, LED 的光学特性和电学特性, 以及白光 LED 的实现方法。

### 2.1 LED 发光原理

#### 2.1.1 照明光源的历史与原理

照明光源的历史与人类的文明一样久远。人类的照明史先后经历了火光照明、白炽灯照明、荧光灯照明和高强度气体放电灯照明四大阶段<sup>[2]</sup>, 如图 2.1 所示。其中, 人们使用火光照明的时间最长, 先后使用了火把、油灯和蜡烛等作为照明工具, 但这些光源发光效率低, 亮度较暗, 物质燃烧不完全, 容易产生烟雾。1879 年爱迪生发明了用碳做灯丝的白炽灯, 从此人类进入了电气照明时代。白炽灯是靠电流通过灯丝产生的热效应来发光的。任何物体被加热到 525℃ 以上都会发出可见光。然而, 白炽灯的发光效率仍然很低, 因为绝大部分电能都转成热能白白浪费掉。与白炽灯发光原理不同, 荧光灯是一种气体放电灯, 灯管内充有氙气和少量的汞, 内壁的荧光粉涂层可以把紫外线转变为可见光。在荧光灯的发光过程中, 热量的产生很少, 它发出的光是一种冷光, 这就使得荧光灯的发光效率大大提高。但是荧光灯存在电磁污染、易碎等问题, 而且废弃物存在汞污染。与此同时, 人们还研制了高强度气体放电灯, 至今一直用于工业和街道照明。它的内部充满汞蒸气、高压钠或各种蒸气的混合气体, 工作时, 电流通过高压蒸气, 使之电离激发, 形成放电管中电子、原子和离子间的碰撞而发光。但这种光源存在成本高、维护困难、耗电高、电磁辐射危害以及显色性差等缺点。

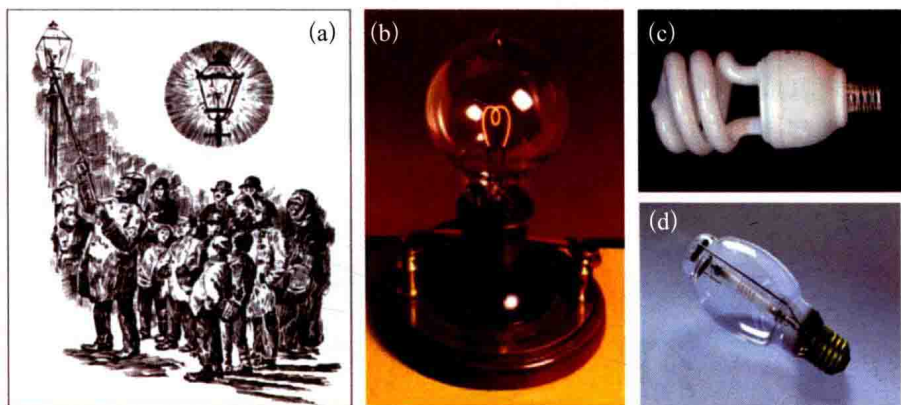


图 2.1 煤油灯(a);白炽灯(b);荧光灯(c);高压钠灯(d)

在人们致力于新光源研究开发的同时,半导体技术的发展带领人们进入了信息时代,同时人们对半导体材料的研究和应用也越来越关注,LED 便在此背景下应运而生。

LED的发展与材料的进步息息相关,从 1962 年红光 LED 的问世,到 1994 年蓝绿光 LED 的商业化,材料的进步极大地推动了 LED 的发展<sup>[3]</sup>。虽然制作 LED 的材料各异,有间接带隙半导体,也有直接带隙半导体;对应的光谱范围也不同,有红光、绿光、蓝光等,如图 2.2 所示,但是综观 LED 的发展历程,其基本结构并没有改变,都是 p-n 结<sup>[4]</sup>。



图 2.2 五颜六色各式各样的 LED

### 2.1.2 p-n 结与 LED 发光原理

LED 与传统光源的发光原理不同。LED 发光是因为器件或者材料中的电子激发跃迁而产生的光辐射(紫外线、可见光或红外线),它排除了纯属材料温度所致的任何辐射(白炽现象)。