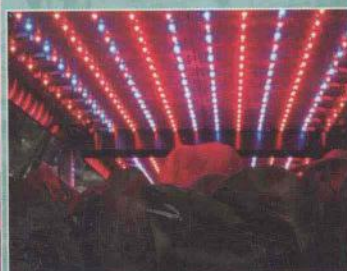
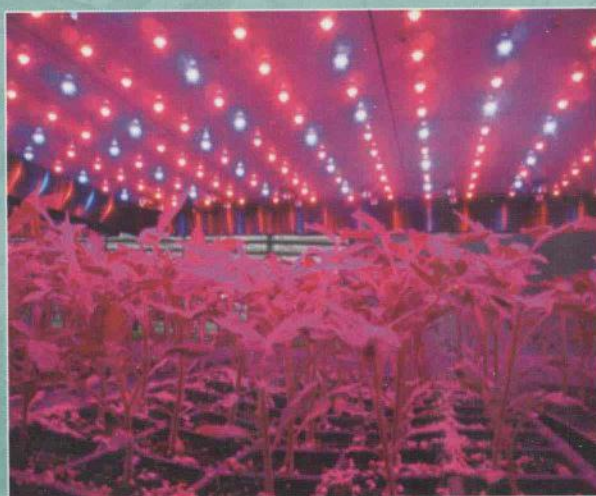


LED光源及其设施园艺应用

Light-Emitting Diodes(LEDs) and Their Applications in Protected Horticulture as Light Sources

◎ 刘文科 杨其长 魏灵玲 著

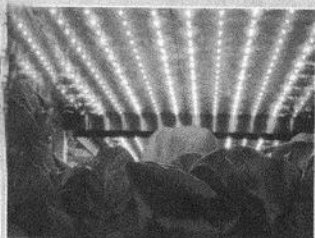
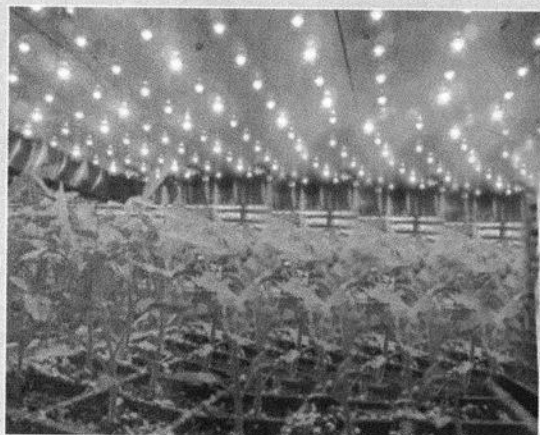


中国农业科学技术出版社

LED光源及其设施园艺应用

Light-Emitting Diodes(LEDs) and Their Applications in Protected Horticulture as Light Sources

◎ 刘文科 杨其长 魏灵玲 著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

LED 光源及其设施园艺应用 / 刘文科, 杨其长, 魏灵玲著.
—北京: 中国农业科学技术出版社, 2012. 11
ISBN 978 - 7 - 5116 - 1100 - 0

I. ①L… II. ①刘…②杨…③魏… III. ①发光二极管 - 照明 - 应用 - 设施农业 - 园艺 - 研究 IV. ①S62②TN383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 244420 号

- 责任编辑 张孝安
责任校对 贾晓红 郭苗苗
- 出版者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081
- 电 话 (010) 82109708 (编辑室) (010) 82109702 (发行部)
(010) 82109709 (读者服务部)
- 传 真 (010) 82109708
- 网 址 <http://www.castp.cn>
- 经 销 者 新华书店北京发行所
- 印 刷 者 北京科信印刷有限公司
- 开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
- 印 张 12.625 彩插 8
- 字 数 230 千字
- 版 次 2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷
- 定 价 50.00 元

版权所有·翻印必究

前言

发光二极管 (Light-emitting Diode, LED) 发明于 1961 年, 它是一种固态的半导体器件, 可以直接将电能转化为光能。LED 作为新一代半导体固态冷光源, 其研制集电学 (电子光学、光电子学)、材料学 (半导体发光材料、封装材料) 和光学等多学科于一体。LED 具有结构简单、重量轻、体积小、抗震、安全等特点, 以及高光效、低能耗、冷光源、寿命长、响应快、环保性高等光电优势, 近年来随着价格的不断下降, 它逐渐被广泛应用于照明、信号指示、背光等领域。LED 被公认为是 21 世纪最具发展前景的一种电光源, 在不久的将来必定取代传统白炽灯和荧光灯, 成为通用照明和特殊照明的主流器件。现今, LED 在非视觉照明 (农作物栽培光源、通讯和医疗等) 领域的应用逐渐扩大, 受到国内外业界人士的关注, 呈快速发展态势。

随着世界人口的不断增长、物质需求不断增加, 而资源却不断减少, 环境不断恶化, 为解决全球资源与环境问题, 设施农业越来越受到人们的推崇, 得到了前所未有的发展和应用。我国设施园艺产业发展迅速, 到 2011 年年底设施面积已达到 350 万 hm^2 以上, 人工补光设施栽培面积也有 2 000 hm^2 左右。光作为环境信号和光合作用能量的唯一来源, 是设施植物生长发育和产量品质形成的必需环境要素。自然界中, 太阳光照随地理纬度、季节和天气状况的不同而变化, 高纬度地区以及其他大多数地区 (如我国南方地区) 冬春季节因连阴天、雨、雪、雾天气, 以及大气污染和浮尘等因素的影响, 光照时间不够、光照强

度不足和光质欠缺现象严重，制约着设施园艺作物的生长发育和优质高效生产。在我国，普遍存在的高纬度地区光照时间不足、低纬度地区因阴雨天气导致弱光寡照等现象导致日光温室、塑料大棚等设施内光环境（光强、光质和光周期）不能满足设施作物的生长发育与产量品质形成的需求，限制了设施园艺生产潜力。此外，人工光栽培（植物组织培养、植物种苗繁育、植物工厂蔬菜生产等）规模正逐年增加。很显然，人工光调控在设施园艺优质、高产、生态、安全生产中具有不可或缺的作用。只有根据设施植物的光生物学需求，设置人工光环境及管理策略，进行动态智能化管理，才能让设施园艺彻底摆脱自然条件的制约，实现人为调控。同时，传统人工光源（如荧光灯和高压钠灯灯）光谱能量分布固定，无法调控，仅能控制光强和光周期，光合有效辐射比例小，无效热辐射较多，光效低，耗能高，造成设施园艺生产能耗居高不下，亟待解决。

LED光源在光电特性、结构特点上决定了它是设施园艺人工光源的最理想的替代电光源，可作为唯一光源或补光光源满足设施园艺作物光合有效辐射的光谱组合配置需求，最大程度地增加生物光效，实现设施园艺生产的大幅节能。LED固态照明的应用是过去几十年来设施园艺照明的最大进步之一，其广泛应用具有里程碑式的意义。随着LED技术的发展和制造成本的下降，LED光源在现代设施园艺生产实践中的应用将越来越受到世界各国政府、学者、LED生产企业和设施园艺生产者的广泛关注。当前，在节能减排和设施园艺优质高产目标的推动下，LED光源在设施园艺中的应用技术及其光生物学基础研究已成为世界学术界关注的热点。美国、日本、荷兰、中国、韩国、立陶宛等国家已对LED光源设施园艺应用技术开展了广泛的研究工作，取得了重大进展。中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所是国内最早从事LED光源设施园艺应用领域研究的单位之一，开展了近十年的研究工作。在“十二五”国家“863计划”项目（2011AA03A114）和“十二五”国家科技支撑项目（2011BAE01B00）的资助下，本书作者通过对课题组近十年研究的结果进行了总结和梳理，并尽可能地收集国际上近几十年的研究成果，力求本书能反映世界和国内LED光源及其在设施园艺中应用的最新研究进展，为业界人士提供参考，推动我国LED光源在设施园艺中应用的基础研究与技术创新研究。

《LED光源及其设施园艺应用》以设施园艺学、蔬菜学、植物生理学、植物营养学和LED半导体照明等多学科交叉和有机结合为特点，首次系统展示了几十年来LED在设施园艺中应用发展与现状，光质生物学和LED光源设施园艺应

用技术与装备的研究全貌，阐述了应用潜力、存在问题及发展前景。全书共八章，即第一章 LED 的结构、发光原理与发展历程；第二章 LED 光源的光电特性与光谱特征；第三章 LED 光源在设施园艺中应用的基础；第四章 LED 光质调控对园艺作物生长发育的调控；第五章 LED 光质对园艺产品营养品质的调控；第六章 LED 光强与光周期对设施园艺作物生长发育及产量品质的调控；第七章设施园艺用 LED 照明系统；第八章设施园艺 LED 光源的研发现状与前景。本书适于大专院校农业生物环境工程、设施园艺科学与工程、植物营养学、园艺学等专业的本科生、研究生和教师以及广大农业科技工作者参考阅读。本书编写过程中得到了周晚来、刘义飞、田野、赵姣姣等人的协助，在此表示感谢。由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者提出宝贵意见和建议，以便再版时改进完善。

刘文科

2012 年 8 月 18 日于北京

目 录

第一章 LED 的结构、发光原理与发展历程	(1)
1.1 LED 的定义	(1)
1.2 LED 的结构	(3)
1.3 LED 的发光原理	(5)
1.4 LED 的分类	(6)
1.5 LED 的发展历程	(7)
1.6 LED 与半导体照明	(12)
第二章 LED 光源的光电特性与光谱特征	(13)
2.1 LED 光源	(13)
2.2 LED 光源的光学特性	(14)
2.3 LED 光源的电学特性	(15)
2.4 LED 光源的热特性	(15)
2.5 LED 光源的光谱特征	(15)
2.6 LED 光源的优点	(16)
2.7 LED 光源与传统光源的光谱区别	(19)
2.8 影响 LED 光源性能与应用的因素	(20)
2.9 LED 光源的农业应用	(21)
第三章 LED 光源在设施园艺中应用的基础	(24)
3.1 LED 光源在设施园艺中的应用领域	(25)
3.2 LED 光源设施园艺应用的生物学基础	(35)
3.3 光质对园艺作物生长发育的影响机理	(39)
第四章 LED 光质对园艺作物生长发育的调控	(47)
4.1 LED 光质对园艺作物生长发育的影响	(51)
4.2 UV-LED 对园艺作物生长发育的影响	(72)
4.3 LED 光质对园艺作物生长发育调控作用	(73)

4.4	LED 光质对园艺作物生长发育调控的影响因素	(76)
4.5	LED 光源对园艺作物生长发育调节的复杂性	(77)
第五章	LED 光质对园艺产品营养品质的调控	(79)
5.1	LED 光质对蔬菜营养品质的影响	(83)
5.2	LED 光质对药用植物药用成分含量的影响	(95)
5.3	UV-LED 对蔬菜营养品质的影响	(96)
5.4	LED 光质对叶菜外观品质的影响	(99)
5.5	LED 光质对园艺作物营养品质调控作用的影响因素	(100)
5.6	LED 光源对园艺作物营养品质调控的复杂性	(100)
第六章	LED 光强与光周期对园艺作物生长发育及产量品质的调控	(102)
6.1	LED 光强对园艺作物生长发育的影响	(102)
6.2	LED 光强对园艺作物产量与品质的影响	(104)
6.3	LED 光周期对园艺作物生长发育的影响	(108)
6.4	LED 光周期对园艺作物产量与品质的影响	(111)
第七章	LED 照明系统与设施园艺应用	(125)
7.1	设施园艺用 LED 灯种类	(126)
7.2	设施园艺用 LED 灯的研发现状	(128)
7.3	LED 光源智能控制系统	(137)
7.4	LED 光源散热系统	(140)
第八章	设施园艺 LED 光源的研发现状与前景	(145)
8.1	设施园艺 LED 光源研发现状	(145)
8.2	LED 光源在设施园艺中的应用问题与对策	(149)
8.3	LED 光源设施园艺应用的前景	(151)
8.4	设施园艺用 LED 光源的研发展望	(156)
	主要参考文献	(159)

第一章 LED 的结构、发光原理 与发展历程

发光二极管 (Light-emitting Diode, LED) 是一种固态 (Solid-state) 半导体器件, 是新一代照明光源。本章系统概述了 LED 作为固态的半导体器件, 其定义、结构、发光原理、分类, 以及世界与中国 LED 的研发历程, LED 与半导体照明发展与应用现状。

发光二极管 (Light-emitting Diode, LED) 是一种固态 (Solid-state) 半导体器件, 是新一代照明光源, 它可以直接将电能转化为光能, 发明于 1961 年。作为新一代半导体固态电光源, LED 是继白炽灯、荧光灯、高气压放电灯 (High Intensity Discharge, HID) 等之后的第四代光源, 在 21 世纪照明中发挥重要作用。LED 集电学 (电子光学、光电子学)、材料学 (半导体发光材料、封装材料) 和光学等多学科于一体。LED 具有结构简单、重量轻、体积小、抗震性好、安全性高等属性特点, 以及光效高、窄波谱、光质纯、低能耗、冷光源、寿命长、响应快、使用方便和环保性高等光电优势, 备受人们的青睐。近年来, 随着半导体技术的发展和 LED 制造成本的不断下降, LED 逐渐被广泛应用于照明、信号指示、背光、通讯、医疗和农业等领域。LED 被公认为是 21 世纪最具有发展前景的一种电光源, 必将在不久的未来取代传统白炽灯和荧光灯, 成为通用照明和特殊照明的主流器件。

1.1 LED 的定义

LED 是一种固态的半导体器件, 它是利用半导体 PN 结或类似结构直接将电

能转化为光能的器件。LED 作为新一代半导体固态冷光源，集电学（电子光学、光电子学）、材料学（半导体发光材料、封装材料）和光学等多学科于一体。一般而言，光源是指自身能发光的物体，现有的光源主要有两类，即天然光源和人造光源。天然光指太阳光，人造光源主要包括电光源，以及油灯和蜡烛。电光源是当前绝对主流的照明和非视觉照明光源。电光源分为热辐射光源（如白炽灯）、气体放电发光光源、光致发光和电致发光光源 4 种，LED 属于电致发光光源。LED 是第四代照明光源，与以前的光源相比具有无可比拟的优点。图 1-1 给出了典型电光源的种类。表 1-1 给出几种典型电光源的属性参数。

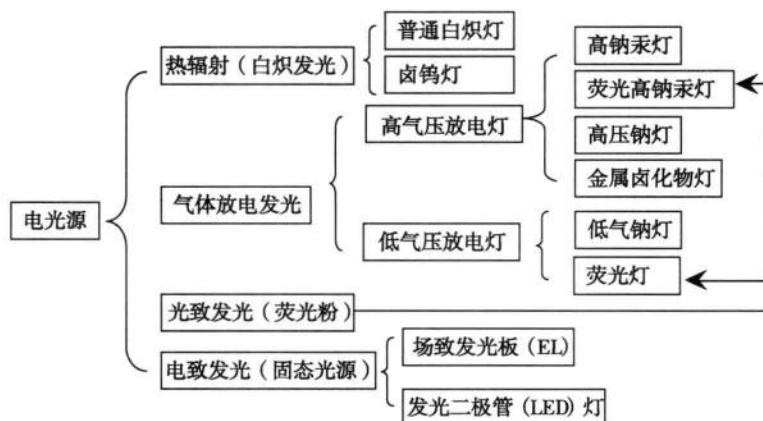


图 1-1 有代表性的电光源

LED 具有多种光电优势和特性，主要包括结构简单、重量轻、体积小、抗震性好、安全性高等的特性，以及高光效、光质丰富、光质纯、窄光谱、低能耗、冷光源、点光源、寿命长、响应快、环保性高等光电优势（Williams 和 Hall, 1978）。近年来，随着半导体技术的发展和 LED 制造成本的不断下降，LED 逐渐被广泛应用于照明、信号指示、背光等领域。更为重要的是，LED 在非视觉照明，如通讯、医疗和设施农作物培育等领域的应用正逐渐扩大，呈现出快速发展的态势。因此，LED 被公认为是 21 世纪最具有发展前景的一种电光源，在不久的将来必取代传统白炽灯和荧光灯，成为通用照明和特殊照明的主流器件。同时，LED 可作为农用光源，在设施农业节能减排、优质高产方面有着重要的应用潜力和前景。

与各种电光源照明一样，除 LED 核心部件外，LED 照明的实现需要配属的照明电器附件和灯具。照明电器附件是指与电光源连接在一起配套工作的部件

(或装置)。譬如,电感镇流器、辉光启动器及电子镇流器等是荧光灯的电气部件,而 HID 灯的附件除了镇流器外,还包含能产生 3~5kV 高压的触发器启动装置(或电路)。灯具是一种产生、控制和分配光的器件。它是由下列部件组成的完整的照明单元:一个或几个灯,设计用来分配光的光学部件,固定灯并提供电气连接的电气部件(如灯座、镇流器灯),用于支撑和安装的机械部件。光源和灯具是照明设备的重要组成部分,光源是照明设备的发光部分,灯具是光源的载体即照明设备的外壳。

表 1-1 几种电光源的属性参数

光源类型	功率范围 (W)	光视效能 (lm/W)	寿命 (h)	电压影响 光通量	环境影响 光通量
白炽灯	10~1 000	8~22	1 000	大	小
卤钨灯	500~2 000	14~20	8 000	大	小
T5 灯-865	5	60	11 000	较大	大
T8 灯-765	18	55	9 500	较大	大
金卤灯	70~1 500	71~110	8 000	较大	较小
高压钠灯	50~400	66~117	8 000	—	较小
低压钠灯	—	100~200	12 000	大	较小
LED	≥1W	60~120	100 000	较小	较小

1.2 LED 的结构

通常,LED 的结构形式主要有直插式 LED (DIP LED)、表面贴装式 LED (SMD LED)、食人鱼 LED (Piranha LED)、铝基板式 LED 和集成化 LED (Integrated LED)。

直插式 LED:直插式 LED 是典型的 LED 结构,主要由 LED 芯片、反射杯(或反光碗)、引线架、引脚、金线和环氧树脂帽组成(图 1-2)。反射杯的引线为阴极、另外一根引线为阳极。环氧树脂帽封住 LED 芯片,一方面可以保护芯片,另一方面有透镜聚光作用。LED 芯片是 LED 器件的核心,其结构自上而下由 P 型电极(阳极)、P 型层、发光层、N 型层、衬底和 N 型电极(阴极)组成(图 1-3)。芯片两端为金属电极,底部为衬底材料,当中是由 P 型层和 N

型层构成的PN结。发光层被夹在P型层和N型层中间，是发光的核心区域。在芯片工作时，P型层和N型层分别提供发光所需的空穴和电子，它们被注入到发光层发生复合而产生光。

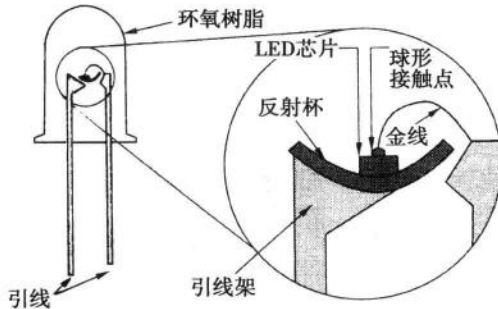


图 1-2 直插式 LED 的基本结构

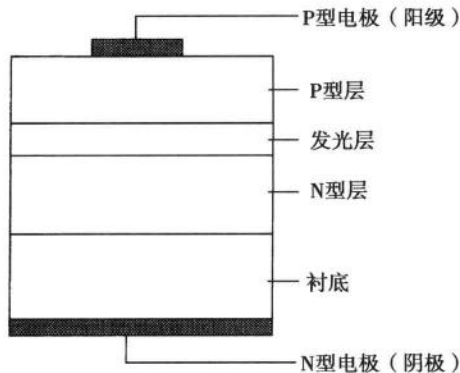


图 1-3 LED 芯片的结构

表面贴装式 LED：从引脚式封装向表面贴装式转变是 LED 技术发展的方向。早期型号为 AOT-23，随后发展为带有透镜的高亮度的 SLM-125 系列。表面贴装式 LED 解决了亮度、视角、平整度、可靠性、一致性问题，其采用轻的 PCB 板和反射层材料，在显示反射层填充环氧树脂少，且去除了较重的碳钢材料引脚，缩小了尺寸，降低了重量。

食人鱼 LED：食人鱼 LED 采用一种正方形透明树脂封装，它有四个引脚，比直插式多了两个引脚。食人鱼 LED 散热性比一般的 LED 好，工作电流可达 40mA，LED 光源的亮度较高。

铝基板式 LED：铝基板式 LED 是为了提高 LED 散热效率，在 PCB 基板上贴附一片金属板（如铝基板），以提高大功率 LED 的散热性能。

LED 芯片是 LED 器件的核心。芯片制作是项复杂的工作，其技术是 21 世纪的高新技术之一。通常小功率 LED 工作时的正向电压为 1.5 ~ 3.0V，工作电流为 5 ~ 20mA。而白光 LED 的正向电压范围为 3.0 ~ 4.2V，大功率白光 LED 的工作电流达 750mA 乃至 1A。

1.3 LED 的发光原理

LED 是利用半导体 PN 结或类似结构把电能转换成光能的器件。发光二极管是由 III-IV 族化合物，如 GaAs（砷化镓）、GaP（磷化镓）、GaAsP（磷砷化镓）等半导体材料做衬底制成的，其核心是 PN 结。因此，它具有一般 PN 结的 IN 特性，即正向导通，反向截止、击穿特性。在正向电压下，电子由 N 区注入 P 区，空穴由 P 区注入 N 区，从而出现不平衡状态。这些注入的电子与空穴在 PN 结处相遇发生复合，将多余的能量以光的形式释放出来，从而观察到 PN 结发光，也称作注入式发光，光子的能量由带间隙决定，如图 1-4 所示。此外，一些电子被无辐射中心俘获，能量以热能形式散发，这个过程被称为无辐射过程。

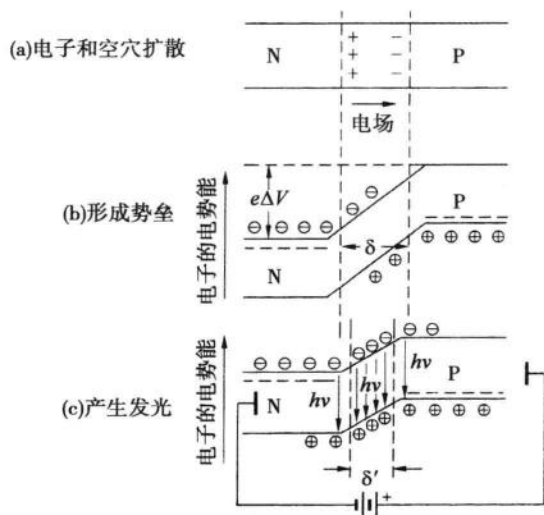


图 1-4 LED 的工作原理

假设发光是在P区中发生的,那么注入的电子与价带空穴直接复合而发光,或者先被发光中心捕获后,再与空穴复合发光。除了这种发光复合外,还有些电子被非发光中心(这个中心介于导带、价带中间附近)捕获,而后再与空穴复合,每次释放的能量不大,不能形成可见光。发光的复合量相对于非发光复合量的比例越大,光量子效率越高。由于复合是在少子扩散区内发光的,所以光仅在靠近PN结面数 μm 以内产生。理论和实践证明,光的峰值波长 λ 与发光区域的半导体材料禁带宽度 E_g 有关,即 $\lambda \approx 1240/E_g$ (nm)式中 E_g 的单位为电子伏特(eV)。若能产生可见光(紫光至红光),半导体材料的 E_g 应在3.26~1.63eV之间。

LED因其材料不同,其中电子和空穴所占的能级也有所不同。能级高低差影响电子和空穴复合后光子的能量,从而产生不同波长的光,即不同颜色的光。此外,通常PN结的禁带宽度决定了LED的发光波长,一般禁带宽度越大,辐射出的能量越大,对应的光子波长就越长,反之就越短,因此材料不同的半导体晶体就会发出不同颜色、不同发光强度的光。为了提高LED的发光效率,应尽量减少产生无辐射复合中心的晶格缺陷和杂质浓度,减少无辐射复合过程。

1.4 LED 的分类

LED具有多种分类方法,概括起来有以下9种。

第一,按发出的光是否可见分类,可分为可见光LED和不可见光LED两种类型。

第二,按发光颜色分类,可分为红光、黄光、橙光、绿光、蓝光、紫光、白光、橙光及黄绿光等。由于白光是红绿蓝外的第四色,是一种复合色,严格讲白光不属于彩色LED。如果LED封装中包括2种以上颜色的LED芯片则可发出2种以上的颜色的光。

第三,按亮度分类,可分成普通亮度LED(发光强度小于10mcd)、高亮度LED(发光强度小于10~100mcd)和超高亮度LED(发光强度大于100mcd)三类。

第四,按功率来分类,可分为小功率LED、功率LED和W级功率LED。小功率LED的输入功率为几十毫瓦,功率LED的输入功率小于1W,而W级功率LED指输入功率大于1W的LED,也叫做照明级LED。

第五,按封装结构分类,可分为引脚式封装和表面贴装两类。

第六,按分装材料分类,可分为全环氧包封、金属底座环氧包封、陶瓷底座环氧包封和玻璃封装等几类。

第七,按发光强度角分布图可分为高指向型、标准型和散射型三类。

第八,按出光面特征分类,可分为圆灯、方灯、矩形灯、面发光管、侧向管及表面安装用微型管等。

第九,按照应用领域来分,可分为视觉照明 LED 和非视觉照明 LED。另外,LED 还可以按照芯片材料和芯片数量来分类。

1.5 LED 的发展历程

1.5.1 世界 LED 发展历程

1907 年英国人 Round H. J. 第一次在一块碳化硅里观察到电致发光现象 (Electroluminescence), 但所发出的黄光太暗, 不适合实际应用。20 世纪 20 年代后期 Gudden B. 和 Wid R. 在德国使用从锌硫化物与铜中提炼的黄磷发光, 但再一次因发光暗淡而停止。1936 年, George Destiau 出版了一个关于硫化锌粉末发射光的报告。随着电流的广泛认识和应用, 最终出现了“电致发光”这个术语。20 世纪 50 年代, 英国科学家在电致发光的实验中使用半导体砷化镓发明了第一个具有现代意义的 LED, 并于 60 年代面世。第一个红外 LED 在 1961 年申请了专利, 第一个实用性可见光谱 LED 专利在 1962 年被授权。在早期的试验中, LED 需要放置在液化氮里, 更需要进一步的操作与突破以便能高效率的在室温下工作。第一个商用 LED 仅仅只能发出不可视的红外光, 但迅速应用于感应与光电领域。60 年代末, 在砷化镓基体上使用磷化物发明了第一个可见的红光 LED。磷化镓的运用使得 LED 更高效、发出的红光更亮, 甚至产生出橙色的光。总之, LED 最早出现在 20 世纪 20 年代后期, 但直到 20 世纪 60 年代才出现实用型红光 LED (Zheludev, 2007)。

到 20 世纪 70 年代中期, 磷化镓被用作发光光源, 可发出灰白绿光。LED 采用双层磷化镓芯片 (一个红色, 另一个是绿色) 能够发出黄色光。同时, 前苏联科学家利用金刚砂制造出发出黄光的 LED, 但它不如欧洲的 LED 高效, 到 70 年代末, 它已能发出纯绿色的光。80 年代 LED 技术得以快速发展, 到 80 年代早期到中期对砷化镓磷化铝的使用使得第一代高亮度的 LED 的诞生, 先是红色, 接着就是黄色, 最后为绿色。到 20 世纪 90 年代早期, 采用铟铝磷化镓生产

出了高亮度的橘红、橙、黄和绿光的 LED (Bvourget, 2008)。第一个有历史意义的实用型蓝光 LED 出现在 1993 年 (Nakamura *et al.*, 1996)。

到 20 世纪 90 年代中期, 出现了超高亮度的氮化镓 LED, 随即又制造出能产生高强度绿光和蓝光的铟氮镓 LED。超亮度蓝光芯片是白光 LED 的核心, 在这个发光芯片上抹上荧光磷, 然后荧光磷通过吸收来自芯片上的蓝色光源再转化为白光。就是利用这种技术制造出任何可见颜色的光, 如浅绿色和粉红色。LED 的发展经历了一个漫长而曲折的历史过程。最近, 开发的 LED 不仅能发射出纯紫外光而且能发射出真实的“黑色”紫外光。早期的 LED 只能应用于指示灯、早期的计算器显示屏和数码手表, 现在逐步被应用到超高亮度的领域。

LED 发展史中的关键技术突破总结如下: 1907 年, 在碳化硅里观察到电致发光现象; 1954 年, 开始制作 GaP 单晶并对其性能进行研究; 1955 年, 观测到 GaP 发光现象; 1962 年, 观测到 GaAs 的 PN 结发光现象, 发出 GaAs 系红外 (870 ~ 980nm) LED; 1962 年, 开发出 GaAsP 系红光 LED; 1963 年, 开发出 GaP 系红光 LED, 观测到 A-SiC 二极管的蓝光强波峰; 1965 年, 在 GaP 中引入了 N 等电子发光中心; 1966 年, GaAs 系红外 LED 的外部量子效率达 6%; 1969 年, SiC 系蓝光 LED 的电光转换效率达 0.005%, GaP 系红光 LED 的外部量子效率达 7.2%; 1972 年, 开发出 GaAsP 系黄光 LED 的外部量子效率达 0.2%, GaP: ZnO 系红光 LED 的外部量子效率达 15%; 1977 年, GaAsP 系红光 LED 的外部量子效率达 0.1%; 1981 年, 确认 GaN 系的蓝色发光; 1985 年, 开发出四元结晶 AlGaInP 系橙色 LED; 1986 年, 开发出 GaN 系 AlN 低温堆积缓冲层技术; 1992 年, GaN 系的蓝色 PN 同质结二极管的外部量子效率达 1%; 1994 年, PN 结型 GaInN/AlGaN 异质结高亮度蓝光 LED (1 CD 级); 1995 年, GaInN 双异质结蓝光 LED 的外部量子效率达 10%, 开发出 GaInN 系绿光 LED; 1997 年, 开发出使用荧光粉的白光 LED, 光效达 5lm/W; 2001 年, 开发出了 AlGaInP 系: 采用附着在透明衬底上的加工工艺; 2002 年, 采用蓝光 + 激发黄色荧光粉产生的白光 LED 的性能提高, 光效达 62lm/W; 2004 年, 采用蓝光 + 激发黄色荧光粉产生的白光 LED 的性能提高, 光效达 80lm/W; 2009 年, 研发出多面发光体 LED 灯泡, 实现 360 度全方位照明。

目前, 全球主要 LED 厂商包括日亚化学 (Nichia) 公司、丰田合成公司 (ToyodaGosei) 公司、Cree 公司、GelCore 公司和 Lumileds 公司等, 如表 1-2 所示。表 1-3 给出了 LED 产品外形及主要封装结构。全球 LED 产业呈梯形分布或金字塔形分布, 美国、欧洲、日本位居金字塔的最顶端, 在技术、产值方面

领先于其他国家和地区，其产值占全球的60%~65%。中国台湾和韩国居金字塔中间，技术略次于第一级，主要是产能较大，但是产品附加值略低，产值比例占全球30%~35%。处于低端的是中国大陆、马来西亚等地，主要产品和技術都较低端，产能和产值都较低，占全球的3%~6%，但是其上升速度较快。综上所述，美国、日本、德国虽然产值高，但是处在逐渐下降的趋势；台湾、韩国居中，仍在上升；中国大陆和马来西亚等地区虽然产值较低，但是发展势头十足，处于迅速上升膨胀阶段。

在LED产业各国专利分布方面。在LED产业方面，美国能源部专门制定了美国“半导体照明国家研究项目”，计划用10年时间、耗资5亿美元开发半导体照明技术，主要目的是为了使美国在未来照明光源市场竞争中，领先于日本、欧洲及韩国等竞争者。计划的时间节点与要实现的光效目标分别是：2002年20lm/W，2007年75lm/W，2012年150lm/W。可以认为，目前其已经提前实现目标。从美国USPTO专利数据库中，检索得到与LED相关的授权专利约34000件，其中，从1990~2008年授权的专利约25000件。从专利的增长数量来看，可见美国的LED产业正处于高速发展时期。美国LED专利的申请人主要是各类型企业以及研究机构，包括大型企业和众多的中小企业；申请方向主要集中于LED芯片和照明方面，尤其是技术含量高的外延片制造技术和LED芯片制造技术方面。美国LED专利的外国申请人主要是日本、中国台湾、德国、韩国，外国专利的申请主体是规模较大的LED制造企业，中国大陆在美国的LED专利数量较少。

表1-2 全球主要LED企业分布

主要LED生产国及地区	主要LED企业在产业链上的分布		
	上游	中游	下游
中国台湾	国联、晶电、璨圆、华上、元坤、广镓		光宝、亿光、佰鸿、宏齐、东贝、华兴、光鼎、恒嘉
	全新、信越、连威、连亚	光磊、鼎元、汉光	
日本	Nichia、Rohm		
	Toyoda Gosei	Citizen、Stanley、Toshiba	
韩国	Samsung、LG		
欧洲	Osram		
美国	Cree Lighting、Gelcore、Lumileds		Agilent