



新兴产业和高新技术现状与前景研究丛书

总主编 金 碚 李京文

LED照明产业 现状与发展前景

李鹏飞 邓江年 编著

LED ZHAOMING CHANYE
XIANZHUANG YU FAZHAN QIANJING



SPM

南方出版传媒
广东经济出版社



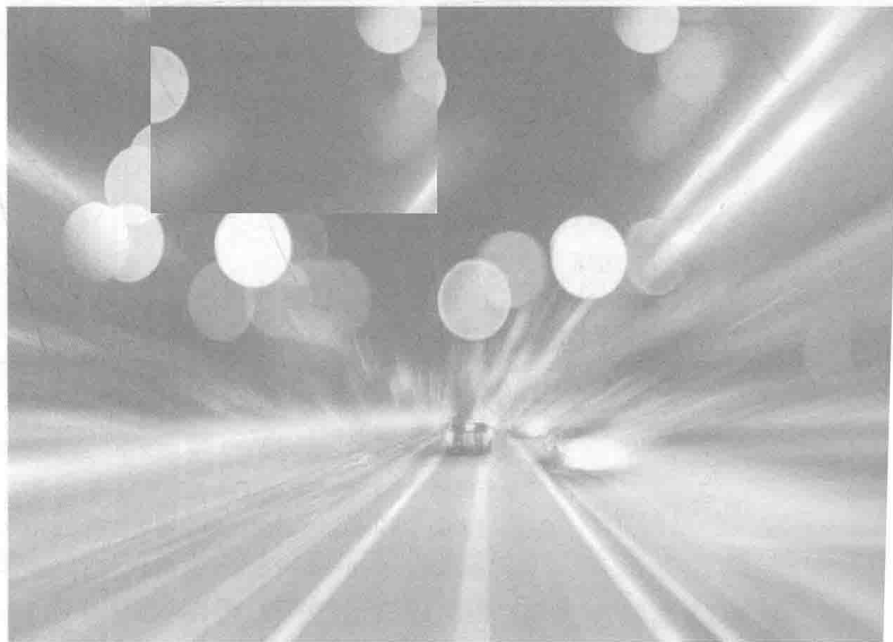
新兴产业和高新技术现状与前景研究丛书

总主编 金 碚 李京文

LED照明产业 现状与发展前景

李鹏飞 邓江年 编著

LED ZHAOMING CHANYE
XIANZHUANG YU FAZHAN QIANJING



SPM

南方出版传媒

广东经济出版社

· 广州 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

LED 照明产业现状与发展前景 / 李鹏飞, 邓江年编著. —广州: 广东经济出版社, 2015. 5

(新兴产业和高新技术现状与前景研究丛书)

ISBN 978 - 7 - 5454 - 3998 - 4

I. ①L… II. ①李… ②邓… III. ①发光二极管 - 电子工业 - 经济发展 - 研究 - 中国 IV. ①F426. 63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 099819 号

出版 发行	广东经济出版社 (广州市环市东路水荫路 11 号 11 ~ 12 楼)
经销	全国新华书店
印刷	中山市国彩印刷有限公司 (中山市坦洲镇彩虹路 3 号第一层)
开本	730 毫米 × 1020 毫米 1/16
印张	10.5
字数	177 000 字
版次	2015 年 5 月第 1 版
印次	2015 年 5 月第 1 次
书号	ISBN 978 - 7 - 5454 - 3998 - 4
定价	27.00 元

如发现印装质量问题, 影响阅读, 请与承印厂联系调换。

发行部地址: 广州市环市东路水荫路 11 号 11 楼

电话: (020) 38306055 37601950 邮政编码: 510075

邮购地址: 广州市环市东路水荫路 11 号 11 楼

电话: (020) 37601980 邮政编码: 510075

营销网址: <http://www.gebook.com>

广东经济出版社常年法律顾问: 何剑桥律师

· 版权所有 翻印必究 ·

“新兴产业和高新技术现状与前景研究”丛书编委会

- 总 主 编：**金 碚 中国社会科学院工业经济研究所原所长、
学部委员
- 李京文 北京工业大学经济与管理学院名誉院长、
中国社会科学院学部委员、中国工程院院士
- 副 主 编：**向晓梅 广东省社会科学院产业经济研究所所长、
研究员
- 阎秋生 广东工业大学研究生处处长、教授
- 编 委：**
- 张其仔 中国社会科学院工业经济研究所研究员
- 赵 英 中国社会科学院工业经济研究所工业发展
研究室主任、研究员
- 刘戒骄 中国社会科学院工业经济研究所产业组织
研究室主任、研究员
- 李 钢 中国社会科学院工业经济研究所副研究员
- 朱 彤 中国社会科学院工业经济研究所能源经济
研究室主任、副研究员
- 白 玫 中国社会科学院工业经济研究所副研究员
- 王燕梅 中国社会科学院工业经济研究所副研究员
- 陈晓东 中国社会科学院工业经济研究所副研究员
- 李鹏飞 中国社会科学院工业经济研究所资源与环境
研究室副主任、副研究员

- 原 磊 中国社会科学院工业经济研究所工业运行研究室主任、副研究员
- 陈 志 中国科学技术发展战略研究院副研究员
- 史岸冰 华中科技大学基础医学院教授
- 吴伟萍 广东省社会科学院产业经济研究所副所长、研究员
- 燕雨林 广东省社会科学院产业经济研究所研究员
- 张栓虎 广东省社会科学院产业经济研究所副研究员
- 邓江年 广东省社会科学院产业经济研究所副研究员
- 杨 娟 广东省社会科学院产业经济研究所副研究员
- 柴国荣 兰州大学管理学院教授
- 梅 霆 西北工业大学理学院教授
- 刘贵杰 中国海洋大学工程学院机电工程系主任、教授
- 杨 光 北京航空航天大学机械工程及自动化学院工业设计系副教授
- 迟远英 北京工业大学经济与管理学院教授
- 王 江 北京工业大学经济与管理学院副教授
- 张大坤 天津工业大学计算机科学系教授
- 朱郑州 北京大学软件与微电子学院副教授
- 杨 军 西北民族大学现代教育技术学院副教授
- 赵肃清 广东工业大学轻工化工学院教授
- 袁清珂 广东工业大学机电工程学院副院长、教授
- 黄 金 广东工业大学材料与能源学院副院长、教授
- 莫松平 广东工业大学材料与能源学院副教授
- 王长宏 广东工业大学材料与能源学院副教授

总序

人类数百万年的进化过程，主要依赖于自然条件和自然物质，直到五六千年之前，由人类所创造的物质产品和物质财富都非常有限。即使进入近数千年的“文明史”阶段，由于除了采掘和狩猎之外人类尚缺少创造物质产品和物质财富的手段，后来即使产生了以种植和驯养为主要方式的农业生产活动，但由于缺乏有效的技术手段，人类基本上没有将“无用”物质转变为“有用”物质的能力，而只能向自然界获取天然的对人类“有用”之物来维持低水平的生存。而在缺乏科学技术的条件下，自然界中对于人类“有用”的物质是非常稀少的。因此，据史学家们估算，直到人类进入工业化时代之前，几千年来全球年人均经济增长率最多只有0.05%。只有到了18世纪从英国开始发生的工业革命，人类发展才如同插上了翅膀。此后，全球的人均产出（收入）增长率比工业化之前高10多倍，其中进入工业化进程的国家和地区，经济增长和人均收入增长速度数十倍于工业化之前的数千年。人类今天所拥有的除自然物质之外的物质财富几乎都是在这200多年的时期中创造的。这一时期的最大特点就是：以持续不断的技术创新和技术革命，尤其是数十年至近百年发生一次的“产业革命”的方式推动经济社会的发展。^① 新产业和新技术层出不穷，人类发展获得了强大的创造能力。

^① 产业革命也称工业革命，一般认为18世纪中叶（70年代）在英国产生了第一次工业革命，逐步扩散到西欧其他国家，其技术代表是蒸汽机的运用。此后对世界所发生的工业革命的分期有多种观点。一般认为，19世纪中叶在欧美等国发生第二次工业革命，其技术代表是内燃机和电力的广泛运用。第二次世界大战结束后的20世纪50年代，发生了第三次工业革命，其技术代表是核技术、计算机、电子信息技术的广泛运用。21世纪以来，世界正在发生又一次新工业革命（也有人称之为“第三次工业革命”，而将上述第二、第三次工业革命归之为第二次工业革命），其技术代表是新能源和互联网的广泛运用。也有人提出，世界正在发生的新工业革命将以制造业的智能化尤其是机器人和生命科学为代表。

当前，世界又一次处于新兴产业崛起和新技术将发生突破性变革的历史时期，国外称之为“新工业革命”或“第三次工业革命”“第四次工业革命”，而中国称之为“新型工业化”“产业转型升级”或者“发展方式转变”。其基本含义都是：在新的科学发现和技术发明的基础上，一批新兴产业的出现和新技术的广泛运用，根本性地改变着整个社会的面貌，改变着人类的生活方式。正如美国作者彼得·戴曼迪斯和史蒂芬·科特勒所说：“人类正在进入一个急剧的转折期，从现在开始，科学技术将会极大地提高生活在这个星球上的每个男人、女人与儿童的基本生活水平。在一代人的时间里，我们将有能力为普通民众提供各种各样的商品和服务，在过去只能提供给极少数富人享用的那些商品和服务，任何一个需要得到它们、渴望得到它们的人，都将能够享用它们。让每个人都生活在富足当中，这个目标实际上几乎已经触手可及了。”“划时代的技术进步，如计算机系统、网络与传感器、人工智能、机器人技术、生物技术、生物信息学、3D 打印技术、纳米技术、人机对接技术、生物医学工程，使生活于今天的绝大多数人能够体验和享受过去只有富人才有机会拥有的生活。”^①

在世界新产业革命的大背景下，中国也正处于产业发展演化过程中的转折和突变时期。反过来说，必须进行产业转型或“新产业革命”才能适应新的形势和环境，实现绿色化、精致化、高端化、信息化和服务化的产业转型升级任务。这不仅需要大力培育和发展新兴产业，更要实现高新技术在包括传统产业在内的各类产业中的普遍运用。

我们也要清醒地认识到，20 世纪 80 年代以来，中国经济取得了令世界震惊的巨大成就，但是并没有改变仍然属于发展中国家的现实。发展新兴产业和实现产业技术的更大提升并非轻而易举的事情，不可能一蹴而就，而必须拥有长期艰苦努力的决心和意志。中国社会科学院工业经济研究所的一项研究表明：中国工业的主体部分仍处于国际竞争力较弱的水平。这项研究把中国工业制成品按技术含量低、中、高的次序排列，发现国际竞争力大致呈 U 形分布，即两头相对较高，而在统计上分类为“中技术”的行业，例如化工、材料、机械、电子、精密仪器、交通设备等，国际竞争力显著较低，而这类产业恰恰是工业的主体和决定工业技术整体素质的关键基础部门。如果这类产业竞争力不

^① 【美】彼得·戴曼迪斯，史蒂芬·科特勒，富足：改变人类未来的 4 大力量，杭州：浙江大学出版社，2014。

强，技术水平较低，那么“低技术”和“高技术”产业就缺乏坚实的基础。即使从发达国家引入高技术产业的某些环节，也是浅层性和“漂浮性”的，难以长久扎根，而且会在技术上长期受制于人。

中国社会科学院工业经济研究所专家的另一项研究还表明：中国工业的大多数行业均没有站上世界产业技术制高点。而且，要达到这样的制高点，中国工业还有很长的路要走。即使是一些国际竞争力较强、性价比较高、市场占有率很大的中国产品，其核心元器件、控制技术、关键材料等均须依赖国外。从总体上看，中国工业品的精致化、尖端化、可靠性、稳定性等技术性能同国际先进水平仍有较大差距。有些工业品在发达国家已属“传统产业”，而对于中国来说还是需要大力发展的“新兴产业”，许多重要产品同先进工业国家还有几十年的技术差距，例如数控机床、高端设备、化工材料、飞机制造、造船等，中国尽管已形成相当大的生产规模，而且时有重大技术进步，但是，离世界的产业技术制高点还有非常大的距离。

产业技术进步不仅仅是科技能力和投入资源的问题，攀登产业技术制高点需要专注、耐心、执着、踏实的工业精神，这样的工业精神不是一朝一夕可以形成的。目前，中国企业普遍缺乏攀登产业技术制高点的耐心和意志，往往是急于“做大”和追求短期利益。许多制造业企业过早走向投资化方向，稍有成就的企业家都转而成为赚快钱的“投资家”，大多进入地产业或将“圈地”作为经营策略，一些企业股票上市后企业家急于兑现股份，无意在实业上长期坚持做到极致。在这样的心态下，中国产业综合素质的提高和形成自主技术创新的能力必然面临很大的障碍。这也正是中国产业综合素质不高的突出表现之一。我们不得不承认，中国大多数地区都还没有形成深厚的现代工业文明的社会文化基础，产业技术的进步缺乏持续的支撑力量和社会环境，中国离发达工业国的标准还有相当大的差距。因此，培育新兴产业、发展先进技术是摆在中国产业界以至整个国家面前的艰巨任务，可以说这是一个世纪性的挑战。如果不能真正夯实实体经济的坚实基础，不能实现新技术的产业化和产业的高技术化，不能让追求技术制高点的实业精神融入产业文化和企业愿景，中国就难以成为真正强大的国家。

实体产业是科技进步的物质实现形式，产业技术和产业组织形态随着科技进步而不断演化。从手工生产，到机械化、自动化，现在正向信息化和智能化方向发展。产业组织形态则在从集中控制、科层分权，向分布式、网络化和去中心化方向发展。产业发展的历史体现为以蒸汽机为标志的第一次工业革命、

以电力和自动化为标志的第二次工业革命，到以计算机和互联网为标志的第三次工业革命，再到以人工智能和生命科学为标志的新工业革命（也有人称之为“第四次工业革命”）的不断演进。产业发展是人类知识进步并成功运用于生产性创造的过程。因此，新兴产业的发展实质上是新的科学发现和技术发明以及新科技知识的学习、传播和广泛普及的过程。了解和学习新兴产业和高新技术的知识，不仅是产业界的事情，而且是整个国家全体人民的事情，因为，新兴产业和新技术正在并将进一步深刻地影响每个人的工作、生活和社会交往。因此，编写和出版一套关于新兴产业和新产业技术的知识性丛书是一件非常有意义的工作。正因为这样，我们的这套丛书被列入了2014年的国家出版工程。

我们希望，这套丛书能够有助于读者了解和关注新兴产业发展和高新产业技术进步的现状和前景。当然，新兴产业是正在成长中的产业，其未来发展的技术路线具有很大的不确定性，关于新兴产业的新技术知识也必然具有不完备性，所以，本套丛书所提供的不可能是成熟的知识体系，而只能是形成中的知识体系，更确切地说是有待进一步检验的知识体系，反映了在新产业和新技术的探索上现阶段所能达到的认识水平。特别是，丛书的作者大多数不是技术专家，而是产业经济的观察者和研究者，他们对于专业技术知识的把握和表述未必严谨和准确。我们希望给读者以一定的启发和激励，无论是“砖”还是“玉”，都可以裨益于广大读者。如果我们所编写的这套丛书能够引起更多年轻人对发展新兴产业和新技术的兴趣，进而立志投身于中国的实业发展和推动产业革命，那更是超出我们期望的幸事了！

金 碚

2014年10月1日

目 录

第一章 LED 照明产业基础知识	001
一、什么是 LED	001
二、LED 的主要应用领域	008
三、LED 照明产品的市场特征与趋势	011
四、LED 照明产业链	012
五、LED 照明产业关键技术	017
第二章 全球 LED 照明产业的发展情况	020
一、全球 LED 照明产业发展现状	020
二、全球 LED 产业发展趋势	030
三、主要国家（地区）的做法与经验	032
第三章 我国 LED 照明产业发展情况	040
一、我国 LED 照明产业的发展现状	040
二、我国 LED 照明产业发展存在的主要问题	054
三、我国 LED 照明产业发展走向	055
四、“十二五”我国 LED 照明产业发展重点	057
第四章 我国重点地区 LED 照明产业发展现状、趋势和思路	059
一、广东省 LED 照明产业发展现状、趋势和思路	059

- 二、福建省 LED 照明产业发展现状、趋势和思路..... 072
- 三、河北省 LED 照明产业发展现状、趋势和思路..... 077
- 四、江西省 LED 照明产业发展现状、趋势和思路..... 080
- 第五章 我国 LED 照明产业的重点企业和项目..... 084
 - 一、重点企业简介 084
 - 二、“十二五”期间重点项目 144
- 第六章 推进 LED 照明产业发展的相关政策..... 147
 - 一、国家相关政策 147
 - 二、重点省份相关政策 150
 - 三、重点地市相关政策 153

第一章 LED 照明产业基础知识

一、什么是 LED

1. LED 的技术起源

LED 是发光二极管 (Light Emitting Diode) 的英文缩写, 它是一种固态的半导体器件, 可以直接把电转化为光。1907 年, 英国马可尼公司 (Marconi) 的研究人员亨利·约瑟夫·罗德 (Henry Joseph Round) 在研究真空管时, 发现对碳化硅两端加压能观察发光现象。但由于其发出的黄光太暗, 不适合实际应用, 并且很难使碳化硅与电致发光很好地适应, 研究随之被摒弃。1924 年, 苏联的奥莱格·洛赛夫 (Oleg Losev) 发现了二极管上加电压时发光的现象, 通过晶体管的发明, 并对半导体进行研究时发现了 P 型半导体和 N 型半导体之间的发光现象。^①

随着电子学和光学研究水平的提高, 科学家在研究半导体发光现象时发现通过优化半导体材料和结晶结构可以发出很强的能量。这推进了半导体材料和制作结晶的研究。此后, 电子学和光学理论研究结果表明, 在合适的结晶结构和材料中, 电子可以直接发射出特定波长的光。1961 年, 美国德州仪器公司 (Texas Instruments) 的一个研究小组利用砷化镓 (GaAs) 半导体发明了可以发出红外线光的二极管。1962 年, 美国通用电气公司 (GE) 的工程师小尼克·霍伦亚克 (Nick Holonyak Jr.) 发明了可以发出红色可视光的二极管。1965 年, 红外发光 LED 商业化, 此后不久磷砷化镓 (GaAsP) 红色 LED 实现规模化生产, 主要用于替代试验设备中显示装置的小灯泡。20 世纪 70 年代早期, 出现

^① [日] 安藤幸司,《轻松图解 LED: 发光二极管的基础与应用》, 郭文兰等译, 机械工业出版社 2012 年版。

了磷化镓 (GaP) 绿色 LED 和碳化硅 (SiC) 黄色 LED, 新材料的引入提高了 LED 的发光效率, 并将 LED 发光光谱扩展到了橙光、黄光和绿光。

2. 为什么是蓝色 LED 的发明者荣获诺贝尔物理学奖

尽管红色 LED 和绿色 LED 从 20 世纪 60 年代末和 70 年代初就开始应用于机器仪器的显示光源, 但由于光的三原色包含红、绿、蓝, 蓝色光源的缺失, 令照明的白色光源始终无法创建。原因在于, 红色 LED 和绿色 LED 的显色指数都很低, 两者混合之后形成的光源很难还原阳光下物体本来的颜色。此外, 由于红色 LED 和绿色 LED 的禁带宽度太小, 导致其发光效率低下, 耗电量很大。即使不考虑光源的显色性能, 与传统照明方式相比, 红色 LED 和绿色 LED 在发光效率上也并没有任何优势。因此, 无论是在科学界还是工业界, 如何造出蓝色 LED 都成了攻关的焦点。

1973 年, 当时在松下电器公司东京研究所的赤崎勇最早开展蓝色 LED 的研究。后来, 赤崎勇和天野浩在名古屋大学合作进行了蓝色 LED 的基础性研发, 并于 1989 年首次在实验室成功研发出蓝色 LED。1993 年, 当时任职于日亚化学工业公司的中村修二, 以其实用化研究让该公司成功研制出首个明亮蓝色的氮化镓 (GaN) LED。在此基础上, 日亚化学用氮化铟镓 (InGaN) 半导体制造出了超高亮的紫外、蓝色和绿色 LED, 用磷化铝铟镓 (AlGaInP) 半导体制备出超高亮的红色和黄色 LED, 并首次实现了白色 LED 照明产品的规模化生产, 从而引发了照明技术革新。

由于蓝色 LED 既能与红色 LED 和绿色 LED 混光产生多色光谱 (白光), 也能在波长继续变短后利用荧光灯发光原理, 激发灯珠内壁的荧光粉发出白光, 而且后一种发光方式成本更低, 效率更高。与传统照明方式相比, LED 照明产品光效高, 驱动电路简单, 没有汞污染, 没有频闪, 无须预热, 可调性好, 寿命超长。因此, 可以说蓝色 LED 的发明是照明技术发生革命性变化的前提和基础。

此外, 蓝色 LED 还引发了显示技术革命。尽管与荧光屏显示器 (CRT) 相比, 液晶显示器 (LCD) 在显示效果上已有重大改进。但 LCD 显示背光光源是冷阴极荧光灯, 能耗高而且整个 LCD 显示器比较厚重。蓝色 LED 技术成熟后, 可以用 LED 实现各色显示, 以其为背光源, LCD 可以做得很薄而且能耗低, 图像效果好。因此, 蓝光 LED 的发明在液晶显示方面也有着巨大意义。没有这项技术, 液晶电视的屏幕不会这么薄, 手机、平板、可穿戴设备等也可能更笨重

更耗电。

正是由于蓝色 LED 在照明和显示领域具有无可替代的重要性，赤崎勇、天野浩和中村修二才凭借其在发现蓝色 LED 方面做出的巨大贡献，荣获 2014 年诺贝尔物理学奖。

知识链接

照明白光的形成方式

用于照明的白光有三种形成方式：一是蓝色 LED + 绿色 LED + 红色 LED；二是蓝色 LED + 黄色荧光粉；三是紫外 LED (UVLED) + 红、绿、蓝三种荧光粉。

在前两种形成白光的方式中，蓝色 LED 都是不可或缺的要素。在第三种形成方式中，尽管不需要直接用到蓝色 LED，但紫外 LED 是以蓝色 LED 为基础发展而来的。在高效氮化镓 (GaN) 和氮化镓镓 (InGaN) 蓝色 LED 被发明后，研究者发现在氮化镓中掺入金属铝 (Al) 得到的氮化镓铝 (AlGaN) 可以产生波长更短的紫外光。因此，如果不能制备出高效的蓝色 LED，彻底改变人类的照明工具——白光 LED 就无法实现。

3. LED 的结构及发光原理

LED 主要由 PN 结芯片、电极和光学系统组成。其中，核心部分是由 P 型半导体和 N 型半导体组成的芯片。在 P 型半导体和 N 型半导体之间有一个 PN 结，具有正向导通、反向截止等特性。当 PN 结施加正向电压，P 区中的多数载流子（空穴）与 N 区中的多数载流子（电子）复合时，就会以辐射光子的形式将多余的能量转化为光能，直接发出红、黄、蓝、绿、青、橙、紫、白色的光。光的强弱与电流大小有关，电流越大，发光亮度越高。

LED 的基本结构是一块电致发光的半导体材料，置于一个有引线的架子上，然后四周用环氧树脂密封，起到保护内部芯线的作用。LED 结构的示意图如图 1-1 所示：支架起到导电和支撑的作用；银胶用来固定芯片和导电；芯片是 LED 的主要组成材料，是发光的半导体材料；金线用于连接芯片焊垫与支架，并使其能够导通；环氧树脂的作用是保护 LED 的内部结构，使 LED 灯成

形，同时可稍微改变灯的发光颜色、亮度及角度。^①

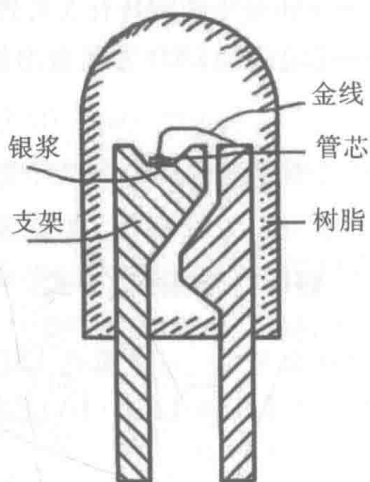


图 1-1 LED 的基本结构示意图

知识链接

什么是 PN 结

制作半导体器件时最主要的材料是硅（Si）和锗（Ge）。高纯度的硅和锗单晶体不是半导体，而是一点电流都不能通过的绝缘体。它们的晶体结构是牢固连接在一起的共价键，自由电子无法流动，因此就不能形成电流。但是，只要在这些晶体结构中掺入杂质，形成缺陷结构，电流就能通过空穴流过。

P 型半导体由单晶硅通过特殊工艺掺入少量的三价元素（如镓、硼、铟）组成，会在半导体内部形成带正电的空穴。N 型半导体由单晶硅通过特殊工艺掺入少量的五价元素（如砷、磷、锑）组成，会在半导体内部形成带正电的自由电子。

PN 结就是将容易释放出电子的 P 层和容易吸入电子的 N 层在原子水平上结合而成的，这是半导体的基本构造。采用不同的掺杂工艺，将 P 型半导体与 N 型半导体制作在同一块硅片上，在它们的交界面就形成空间电荷区，这个电荷区称为 PN 结。制造这样的半导体的单晶硅基板的纯度要达到 99.999999999%（11 个 9）以上。

^① 周志敏、纪爱华，《漫步 LED 世界》，国防工业出版社 2012 年版。

4. LED 的特点

(1) 节能。LED 的发光机理不是利用加热发光, 它可以将输入电能有效地转换为光能, 其发光效率可达 80% ~ 90%, 大约是白炽灯的 8 倍, 节能效果极其显著。当然, 消耗电能少并不意味着完全不发热, 因为器件本身会发热, 所以发光二极管的器件也需要进行散热。

(2) 环保。LED 在生产过程中不需要添加汞等重金属, 不需要充气, 也不需要玻璃外壳。它的抗冲击性好, 抗震性强, 不易破碎, 便于运输, 与其他光源相比显得更加环保。

(3) 长寿。由于 LED 不是靠加热发光, 不需要使用像灯丝那样的消耗品, 也不用把气体密封在电灯里, 而且发光二极管的结构坚固, 只要按额定功率使用, 其寿命可达 5 万 ~ 10 万小时。此外, 由于 LED 是半导体器件, 即使频繁地开关也不会影响其使用寿命。

(4) 节材。既不需要灯丝, 又不需要做成真空管状, 可以说是半导体发光器件的一大特点。因此, LED 的体积可以做得非常小。这就便于布置和设计, 而且能够更好地实现夜景照明中“只见灯光、不见光源”的效果。

(5) 快速。发光二极管的电流响应性好, 可以闪亮发光 (短时间发光)。一般的 LED $10\ \mu\text{s}$ (微秒, 即十万分之一秒) 就可以发光。在 1 秒钟内, 可以点亮 100000 次。LED 的这种特点应用在相机等电子器材的闪光光源上能产生很好的效果。

(6) 单一。构成半导体器件的原子结构发出的能量决定了 LED 只发出特定波长的光, 这是它区别于其他光源的一大特点。具体而言, 禁带宽度对二极管的发光波长起着决定性作用。在晶体管和集成电路领域最主要的材料——硅 (Si) 的禁带宽度为 0.6 ~ 0.7V, 只能发出远红外光; 研究人员开发出了禁带宽度达到 1.4V 的砷化镓 (GaAs) 之后, 才能发出近红外光。直到禁带宽度达到 3.5V 的氮化镓 (GaN) 被成功开发出来之后, 才可以做出能够发出蓝色光的 LED。白光 LED 是把黄色的荧光材料涂在蓝色的发光二极管上, 由蓝色和黄色的混合发光形成近似白光的效果。

(7) 低电压。LED 在 1.5 ~ 1.6V 极其简单的电源下就可以发光, 即使用干电池也能发光。其中红色发光二极管用 1.5V 的干电池就可以发光, 而蓝色/白色发光二极管需要 3.5V 的电压才能发光。

(8) 点光源。受工艺技术的限制, 发光二极管的发光面不能做得太大, 即

即使是发光面积大的也不过 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 而已。所以, LED 一般用于点光源照射的场所。用在交通信号灯上的大功率发光二极管是把多个发光二极管拼在一起使用的。由于 LED 为点光源, 利用透镜和反射镜可以构成各种所需光源。

(9) 不适合用于大功率输出。由于工艺上的原因, 一个发光二极管最大只能做到 5W 左右。需要制造比这个更高功率的发光器件时, 一般要配置多个 LED。

(10) 不适合用于大范围发光。由于单个 LED 的功率小, 所以一般不适合用于在体育场离地面 100m 以上的照射, 以及工厂里 20m 以内大作业面积范围的照明等情况。目前看来, 室内电灯、汽车前照灯已经是 LED 大范围照明的应用上限了。

5. LED 的光学性能指标

(1) 色温。将一标准黑体加热, 温度升高到一定程度时其颜色开始由深红→浅红→橙黄→白→蓝逐渐改变, 当某光源与黑体的颜色相同时, 就将黑体当时的绝对温度称为该光源的色温, 并以绝对温度 K 来表示。光源色温不同, 光色也不同。色温在 3000K 以下有温暖的感觉; 色温在 $3000\text{K} \sim 5000\text{K}$ 为中间色温, 有爽快的感觉; 色温在 5000K 以上有冷的感觉。

(2) 发光强度。发光强度 (I , Intensity) 是衡量光源到底有多“亮”的指标, 它是光功率和会聚能力的一个共同的描述。发光强度越大, 光源看起来就越亮, 在相同条件下被该光源照射后的物体也就越亮。发光强度的单位是坎德拉 (cd)。 1cd 表明 1 光源发出频率为 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 的单色辐射, 且在给定方向上的辐射强度为 $(1/683)\text{W/sr}$ 。由于早期的 LED 发出的光都比较暗, 因此用 mcd 作为发光强度指标 ($1000\text{mcd} = 1\text{cd}$)。虽然现在 LED 光源的亮度提高了, 但还是沿用原来的做法。

(3) 光通量。光源发射到单位面积内的光密度称为发光通量 (F , Flux), 它是衡量光源发光总量大小的指标。光通量的单位是流明 (lm)。 1lm 就是 1cd 的光源发射单位立体角 (球面度) 时的光量。对于人眼来说最敏感的 555nm 的黄绿光, $1\text{W} = 683\text{lm}$ 。也就是说, 1W 的功率全部转换成波长为 555nm 的光, 其光通量就是 683lm 。

(4) 光照度。表示光源发出的光的亮度的指标为光照度 (E , Illuminance)。它的单位是勒克斯 (lx)。 1 流明的光通量均匀分布在 1m^2 的表面上所产生的光照度就是 1 勒克斯。由于光照度是接受光的量的衡量指标, 所以即使