

LED

制造技术与应用



■ 陈元灯 编著

■ 李元密 审校



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

TM923.05/1

2007

LED 制造技术与应用

陈元灯 编著
李元密 审校

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

序

1907年，人类就发现了将半导体材料通电后可以发光，不过真正商用的LED出现在20世纪60年代。当时的LED由化合物半导体材料GaAsP制成，可以发出红光。在20世纪60~70年代，LED的发光效率非常低，而且不能激发非常重要的基色光——蓝光。在此阶段，LED主要应用于各种昂贵的设备中作为信号指示灯使用。

进入20世纪90年代，随着氮化物LED的发明，LED的发光效率有了质的飞跃，而很难实现的蓝光LED，也在1992年由日本著名的LED企业日亚化学公司成功制造。这样，整个可见光频谱的单色LED都已生产出来，可用于各种需要单色光的应用场合。

影响LED产业发展最重大的转变是高亮度白光LED的发明。自1977年白光LED出现后，专家对白光LED进入普通照明领域的可能性进行了研究。作为光源，LED的优势体现在三个方面：节能、环保和长寿命。LED不依靠灯丝发热来发光，能量转化效率非常高，理论上只需要白炽灯10%的耗能；与荧光灯相比，LED也只需要荧光灯50%的耗能。

中国绿色照明工程促进项目办公室做过一个专项调查，我国照明用电每年在3000亿度以上，如果使用LED取代全部白炽灯或部分取代荧光灯，那么每年将节省1/3的照明用电，约1000亿度，相当于一个总投资超过2000亿元的三峡工程全年的发电量。这对能源十分紧张的我国来说，无疑具有十分重要的战略意义。同样，美国能源部也有一个类似的

预测，到 2010 年美国一半的白炽灯如果由 LED 取代，仅节约的电费就达到 350 亿美元。在使用寿命方面，LED 采用固体封装，结构牢固，寿命可达数万小时，是荧光灯寿命的 10 倍和白炽灯寿命的 100 倍。而且，使用 LED 替代荧光灯，可避免荧光灯管破裂而溢出汞所造成的二次污染。

正是在这种情况下，美国、日本、韩国都制定了相应的国家半导体照明计划。日本于 1998 年在世界率先开展“21 世纪照明”计划，旨在通过使用寿命长、更薄、更轻的 GaN 高效蓝光和紫外 LED 技术，使得照明能量效率提高到传统荧光灯的两倍，从而减少 CO₂ 的排放，并在 2006 年完成用 LED 替代 50% 的传统照明灯具。整个计划的财政预算为 60 亿日元，1998~2002 年耗资 50 亿日元的第一期目标已经完成。现在，日本正在实施第二期计划，预计到 2010 年 LED 的发光效率将达到 120 lm/W。

美国 2000 年制定的“下一代照明计划”(NGLP)已被列入国家能源法案，并计划从 2000~2010 年投资 5 亿美元。美国半导体照明计划将要取得的成绩包括减少 2.58 亿吨碳污染物的排出，少建 133 座新的电站。预计到 2010 年，55% 的白炽灯和荧光灯将被半导体发光器件取代；到 2025 年，固态照明光源的使用将使照明用电减少一半，累计节约财政开支 1150 亿美元，从而形成一个年产值超过 500 亿美元的半导体照明产业，带来数以百万计的工作机会。

2003 年 6 月，我国科技部牵头成立跨部门、跨地区、跨行业的“国家半导体照明工程协调领导小组”，提出了我国实施半导体照明工程的总体方针。确定从协调领导小组成立之日起，到 2005 年底前的这段时间，为半导体照明工程项目的紧急启动期，并在“十五”攻关计划中紧急启动半导体照明产业关键技术等重大项目。在此期间要结合制定国家中长期

科技发展规划和第十一个科技五年计划，研究提出中国半导体照明产业发展的总体战略和实施方案。从 2006 年的“十一五”开始，我国已把半导体照明工程作为一个重大工程来推行。

目前国际上普遍认为，光电子技术是 21 世纪的尖端科技。如果将 21 世纪具有代表意义的主导产业排序：第一是光电子产业；第二是信息通信产业；第三是健康和福利产业。而 LED 正是光电子产业中最重要的光电子材料和组件，是整个光电子产业的基础。

在目前最活跃的光电子产业中，光通信向超大容量、高速度和全光网方向发展，超大容量的全光网络将成为主要的发展趋势；光显示向真彩色、高分辨率、高清晰度、大屏幕和平面化方向发展；光存储将更多地采用新技术和新材料，并开发出新一代的高密度、高速光存储技术和系统；光输出和输入产品向多功能、高速化、低成本方向发展；光器件的发展趋势是小型化、高可靠性、多功能、模块化和集成化；激光技术向全固体化、超短波长、微加工和高可靠性等方向发展，激光技术与其他学科的融合及应用领域不断扩大。光子计算与光信息处理产业、全光电子通信产业、光子集成器件产业、聚合物光纤光缆产业、聚合物光电器件产业和光子传感器产业等，无不是以 LED 为代表的光电子材料和组件为基础的。

本书从 LED 芯片的制作、LED 器件封装及作者了解和亲身体验到使用 LED 器件时必须注意的技术问题等角度，对 LED 的基本概念和相关工艺技术进行了介绍；同时还列举了 LED 在各行业、各部门中的应用。作者本着“抛砖引玉”目的，希望今后会有更多、更好关于 LED 方面的书籍与广大读者见面，并希望 LED 方面的专家多编写这方面的著作，从而

为 21 世纪的光电子产业输送更多的人才。

本书作者从事 LED 器件制造工作近 20 年，具有一定的实践经验，但因时间短促、水平有限，书中可能有许多错误之处，敬请专家学者给予指教。

厦门大学电子工程系教授

李元密

目 录

| | |
|------------------------------|------|
| 第 1 章 认识 LED | (1) |
| 1.1 LED 的基本概念 | (2) |
| 1.1.1 LED 的基本结构与发光原理 | (3) |
| 1.1.2 LED 的特点 | (5) |
| 1.2 LED 芯片制造的工艺流程 | (6) |
| 1.2.1 LED 衬底材料的选用 | (8) |
| 1.2.2 制作 LED 外延片 | (13) |
| 1.2.3 LED 对外延片的技术要求 | (17) |
| 1.2.4 制作 LED 的 pn 结电极 | (19) |
| 1.3 LED 芯片的类型 | (22) |
| 1.3.1 根据 LED 的发光颜色进行分类 | (23) |
| 1.3.2 根据 LED 芯片的功率进行分类 | (25) |
| 1.4 LED 芯片的发展趋势 | (26) |
| 第 2 章 LED 封装 | (28) |
| 2.1 引脚式封装 | (29) |
| 2.1.1 工艺流程及选用设备 | (30) |
| 2.1.2 管理机制和生产环境 | (32) |
| 2.1.3 一次光学设计 | (35) |
| 2.2 平面发光器件的封装 | (39) |
| 2.2.1 数码管制作 | (40) |
| 2.2.2 常见的数码管 | (42) |
| 2.2.3 单色和双色点阵 | (46) |
| 2.3 SMD 的封装 | (48) |

| | | |
|--------------|----------------------|-------------|
| 2.3.1 | SMD 封装的工艺 | (48) |
| 2.3.2 | 测试 LED 与选择 PCB | (48) |
| 2.4 | 食人鱼 LED 的封装 | (50) |
| 2.4.1 | 食人鱼 LED 的封装工艺 | (51) |
| 2.4.2 | 食人鱼 LED 的应用 | (52) |
| 2.5 | 大功率 LED 的封装 | (53) |
| 2.5.1 | L 型电极的大功率 LED 芯片的封装 | (54) |
| 2.5.2 | V 型电极的大功率 LED 芯片的封装 | (55) |
| 2.5.3 | V 型电极的 LED 芯片倒装封装 | (56) |
| 2.5.4 | 集成 LED 的封装 | (58) |
| 2.5.5 | 大功率 LED 封装的注意事项 | (60) |
| 2.6 | 本章小结 | (63) |
| 第 3 章 | 白光 LED 的制作 | (64) |
| 3.1 | 制作白光 LED | (65) |
| 3.1.1 | 制作白光 LED 的几种方法 | (65) |
| 3.1.2 | 涂覆 YAG 荧光粉的工艺流程和制作方法 | (66) |
| 3.1.3 | 大功率白光 LED 的制作 | (72) |
| 3.2 | 白光 LED 的可靠性及使用寿命 | (75) |
| 3.2.1 | 影响白光 LED 寿命的主要因素 | (76) |
| 3.2.2 | 工艺流程对白光 LED 寿命的影响 | (76) |
| 3.2.3 | 引起白光 LED 快速衰减的主要原因 | (78) |
| 3.3 | 荧光粉 | (82) |
| 3.3.1 | YAG 荧光粉 | (82) |
| 3.3.2 | RGB 荧光粉 | (83) |
| 3.3.3 | 各种荧光粉的应用与发展 | (84) |
| 3.4 | RGB 三基色合成白光的制作 | (85) |
| 3.4.1 | 基本原理 | (85) |





| | | |
|--------------|------------------------------|--------------|
| 3.4.2 | 注意事项 | (86) |
| 3.5 | 本章小结 | (89) |
| 第 4 章 | LED 的技术指标和测量方法 | (90) |
| 4.1 | LED 的电学指标 | (91) |
| 4.1.1 | LED 的电流—电压特性图 | (91) |
| 4.1.2 | LED 的电学指标 | (92) |
| 4.1.3 | LED 的极限参数 | (93) |
| 4.1.4 | LED 的其他电学参数 | (94) |
| 4.2 | LED 的光学指标 | (94) |
| 4.2.1 | 光的颜色的三种表示法 | (94) |
| 4.2.2 | 与光辐射强度有关的指标 | (100) |
| 4.3 | 电—光转换效率 | (104) |
| 4.3.1 | 辐射过程的能量损失 | (105) |
| 4.3.2 | 封装时的能量损失 | (105) |
| 4.3.3 | 激发过程的能量损失 | (106) |
| 4.4 | LED 的热学指标 | (106) |
| 4.4.1 | 热阻 R_{th} | (106) |
| 4.4.2 | LED 的储存环境温度与工作温度 | (109) |
| 4.4.3 | 其他相关指标 | (109) |
| 4.5 | 本章小结 | (111) |
| 第 5 章 | 与 LED 应用有关的技术问题 | (112) |
| 5.1 | LED 的驱动方式 | (113) |
| 5.1.1 | LED 的恒定电流源驱动 | (113) |
| 5.1.2 | LED 的恒定电压源驱动 | (115) |
| 5.1.3 | 综合控制驱动 | (116) |
| 5.2 | LED 的太阳能驱动 | (118) |

| | | |
|--------------|-------------------------|--------------|
| 5.2.1 | 太阳能电池 | (120) |
| 5.2.2 | 太阳能电池供电 | (120) |
| 5.3 | LED 的散热技术 | (121) |
| 5.3.1 | LED 的散热问题 | (121) |
| 5.3.2 | LED 的散热技术 | (122) |
| 5.4 | LED 的二次光学设计 | (124) |
| 5.4.1 | LED 光学设计的基本光学元件 | (125) |
| 5.4.2 | LED 系统的光学设计 | (129) |
| 5.5 | LED 的防静电控制 | (131) |
| 5.5.1 | 静电的概念 | (131) |
| 5.5.2 | 静电的产生 | (131) |
| 5.5.3 | 带电电位与体电阻率 | (133) |
| 5.5.4 | 生产环境 | (134) |
| 5.5.5 | 器件失效的原因 | (135) |
| 5.5.6 | 防静电措施 | (136) |
| 5.6 | 合理选用 LED 器件 | (139) |
| 5.7 | 本章小结 | (141) |
| 第 6 章 | LED 的应用 | (143) |
| 6.1 | 大功率 LED 在路灯照明中的应用 | (144) |
| 6.1.1 | 城市路灯照明 | (144) |
| 6.1.2 | 太阳能照明 | (145) |
| 6.1.3 | 风光互补功率 LED 智能化路灯 | (145) |
| 6.2 | LED 显示屏 | (148) |
| 6.2.1 | LED 显示屏的大量应用 | (148) |
| 6.2.2 | LED 显示屏的制造技术 | (150) |
| 6.3 | LED 应用于汽车照明 | (152) |
| 6.3.1 | 车用 LED 的特点 | (152) |

| | | |
|-------|----------------------------|-------|
| 6.3.2 | 车用 LED 的供电电源 | (153) |
| 6.3.3 | 车用 LED 实例 | (153) |
| 6.4 | LED 在交通信号灯方面的应用 | (155) |
| 6.4.1 | LED 交通信号灯的器件设计 | (156) |
| 6.4.2 | LED 交通信号灯的技术标准 | (157) |
| 6.4.3 | 用做铁路信号灯的 LED | (158) |
| 6.5 | LED 用做背光源 | (158) |
| 6.5.1 | 背光源 | (159) |
| 6.5.2 | 背光源的技术指标 | (159) |
| 6.5.3 | 未来发展 | (160) |
| 6.6 | LED 在城市亮化工程和夜景工程中的应用 | (161) |
| 6.6.1 | 城市亮化工程的关键问题 | (161) |
| 6.6.2 | 城市亮化工程中的各种照明 | (162) |
| 6.6.3 | LED 用于城市景观工程的优势 | (166) |
| 6.7 | LED 大量应用于玩具领域 | (167) |
| 6.8 | LED 大量应用于仪器仪表 | (168) |
| 6.9 | LED 用于特种照明 | (169) |
| 6.10 | LED 与家庭照明 | (173) |
| 6.11 | 本章小结 | (174) |
| 附录 A | 提高 LED 芯片出光效率的几种方法 | (176) |
| 附录 B | LED 光柱的种类及制作要求 | (184) |
| 附录 C | 使用红色荧光粉研制高效低光衰 LED | (189) |
| 附录 D | 根据 LED 的使用要求来确定技术指标 | (192) |
| 附录 E | 重视 LED 测试方法和标准的研究 | (195) |
| 附录 F | 在 LED 光电测量中应注意的几个问题 | (197) |
| 参考文献 | | (199) |

第 1 章

认识 LED

-  LED 的基本概念
-  LED 芯片制造的工艺流程
-  LED 芯片的类型
-  LED 芯片的发展趋势



20 世纪中叶出现在市场上的第一批 LED 产品，经过 50 多年的发展历程，在技术上已经取得了长足的进步。现在，LED 的发光效率已达到 70 lm/W （流明/瓦特），其光强已达烛光级，辐射光的颜色形成了包含白光的多元化色彩，并且寿命可达到数万小时。特别是在最近几年，LED 的产品质量提高了近 10 倍，而制造成本已下降到早期的十分之一。这种趋势还在进一步的发展之中，从而使 LED 成为信息光电子新兴产业中极具影响力的新产品。

下面，请读者跟随本书的讲解，逐步走入 LED 的世界，了解与掌握 LED 的相关概念和最新技术。

1.1 LED 的基本概念

LED 是发光二极管（Light Emitting Diode）的简称。顾名思义，发光二极管是一种可以将电能转化为光能的电子器件并具有二极管的特性。LED 是一种半导体二极管，与普通半导体二极管一样有两个电极（正极和负极）。LED 在工作时需外加电源，外加的电能也是由这两个正、负电极加入到半导体二极管内。LED 在内部结构上有和半导体二极管相似的 p 区和 n 区，p 区和 n 区相交的界面形成 pn 结。LED 与普通半导体二极管一样是一种允许电流单向导通的器件（如图 1.1 所示）。LED 的电流大小是由加在二极管两端的电压大小来控制的。根据加在二极管两端的电压大小，利用通过 LED 的电流最终使 pn 结发光。

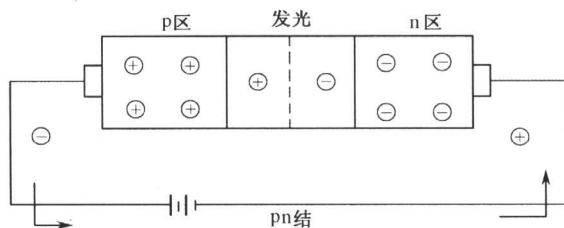


图 1.1 LED 的 pn 结

1.1.1 LED 的基本结构与发光原理

► 基本结构

LED 器件的制造目的是为了得到光，所以它的结构与普通半导体二极管并不一样。我们在图 1.2 中示例了 LED 的结构图，并在图 1.3 中给出了 LED 芯片的基本结构示意图。

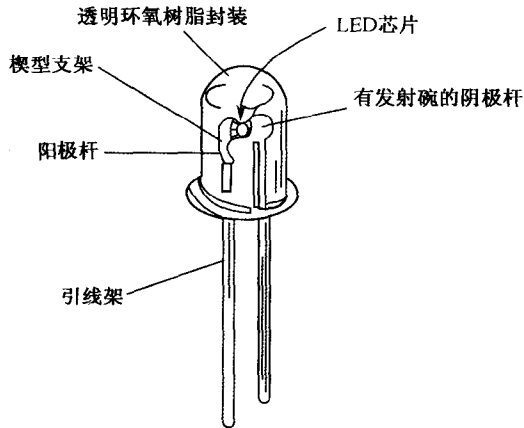


图 1.2 LED 的结构图

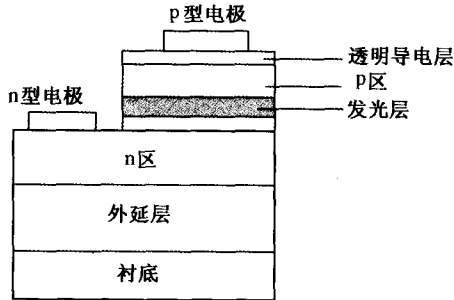


图 1.3 LED 芯片的基本结构

► 发光原理

那么 LED 是怎么发光的呢？大家知道 p 区带有过量的正电荷（通常称为空穴），n 区带有过量的负电荷（通常称为电子），当正向导通的电压加在这个半导体材料的 pn 结上时，电子就会从 n 区向 p 区移动。在 p 区和 n 区的交界处电子和空穴发生复合，复合过程中能量就会以光的形式从 LED 中发射出来，请参见图 1.4。

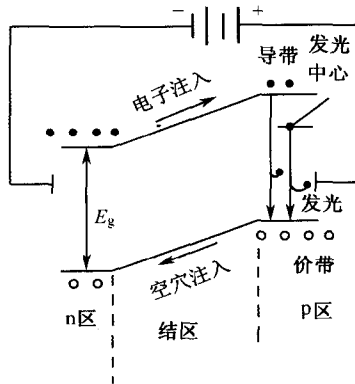


图 1.4 LED 的发光原理

电子和空穴复合可分为二类：一是伴随光的辐射的复合；还有一类是不伴随光的辐射的复合。前者是由于空穴和电子的复合以光（含紫外光、红外光）的形式辐射能量，这是发光的主要机理，也是发光器件所追求的。而后者复合不伴随光的辐射，这对固体发光器件来说是有害的（因为以热的方式辐射而使器件的温度升高）。所以对于固体发光器件来说，就是要研究如何增强带有光的辐射形式的复合。因此，研究 LED 芯片原理及应用的目的，就是在半导体 pn 结处流过正向电流时，能以较高的能量转换效率来辐射出 200~1550 nm 波长范围的可见光谱（包括紫外、红外），从而做成实用的发光器件。

▶ LED 发光的颜色

根据不同的结构和材料，LED 发出的颜色也是不同的。LED 发光的颜色由组成的半导体材料决定，通常是采用两种有细微差异的材料构成 n 区和 p 区。n 区和 p 区的交界处形成的 pn 结组成发光层。p 区和 n 区必须有两个电极作为输入接触电极，同时不同颜色的 LED 都有衬底，衬底的材料也有所不同。为了能使衬底与 p 区很好地结合，必须采用某种材料作为它们两层之间良好结合的缓冲层。这样就完整地组成了 LED 的基本结构(参见图 1.2 的 LED 的基本结构)。

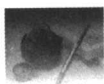
目前，照明领域使用的 LED 有两大类，一类是磷化铝、磷化镓和磷化铟的合金 (AlGaInP 或 AlInGaP)，可以做成红色、橙色和黄色的 LED；另一类是氮化铟和氮化镓的合金 (InGaN)，可以做成绿色、蓝色和白色的 LED。

1.1.2 LED 的特点

LED 是通过 pn 结实现电光转换的，其特点为

- **节能。**LED 的能耗较小，随着技术的进步，它将成为一种新型的节能照明光源。目前白光 LED 的出光效率已经达到 70 lm/W，超过了普通白炽灯的水平。如果按现在的 LED 技术发展速度预测，到了 2015 年，白光 LED 的出光效率有可能达到 150~200 lm/W，远远超过了现在所有照明光源的出光效率。
- **结构牢固。**LED 是用环氧树脂封装的固态光源，其结构中没有玻璃泡、灯丝等易损坏的部件。LED 是一种全固体结构，因此能够经受得住震动、冲击而不致引起损坏。
- **寿命长。**普通白炽灯的寿命约为一千小时，荧光灯、金

LED



属卤化物灯的寿命不会超过一万小时，而 LED 目前的使用寿命可长达数万小时。根据研究其使用寿命可达到十万小时。

- **环保。**现在广泛使用的荧光灯、汞灯等光源中都含有危害人体健康的汞，这些光源的生产过程和废弃的灯管都会对环境造成污染。LED 则没有这些问题，其发光颜色纯正，不含有紫外和红外的辐射，它是一种“清洁”的光源。

除此之外，LED 作为照明用光源还有一些重要的优点。例如，发光体接近点光源，便于灯具设计；发光响应时间快，是交通信号灯的最好光源；易于做成薄型灯具，节省安装空间；等等。

综上所述，LED 是一种符合绿色照明要求的光源。所谓的“绿色照明”的概念就是指通过科学的照明设计，采用效率高、寿命长、安全和性能稳定的照明电器产品，可以提高人们工作、学习、生活的条件与质量，从而创造一个高效、舒适、安全、经济、有益的环境。

1.2 LED 芯片制造的工艺流程^[1]

LED 的制造工艺与半导体器件的制造工艺有很多相同之处。因此，除了个别设备之外，多数半导体设备经过适当的改造后，均可用于 LED 产品的制造。图 1.5 给出了制造 LED 芯片的工艺流程及相应工艺所需的设备。

LED 制作工艺流程分为两大部分。首先在衬底上制作氮化镓（GaN）基的外延片，这个过程主要是在金属有机物化学气相沉积（Metalorganic Chemical Vapor Deposition, MOCVD）外延炉中完成的。准备好制作 GaN 基外延片所需的材料源和各种高纯的气