

无师自通 系列书

LED照明驱动电路 设计方法与实例

戴志平 谭宏 赖向东 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

无师自通 系列书

LED照明驱动电路 设计方法与实例

戴志平 谭 宏 赖向东 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书简要分析了 LED 技术的发展过程和发展趋势,重点讲解了 LED 驱动电路的设计方法,并列举了 LED 在照明上的应用实例。全书共分 5 章,分别介绍了 LED 的发光原理、LED 直流变换器原理、功率因数校正电路设计及实例、单端反激式 DC/DC 电路设计及实例、LLC 谐振半桥 DC/DC 电路设计及实例,最后列举了十余个典型且完整的 LED 照明驱动电路设计实例供读者参考。读者完全可根据给出的电路原理图和 PCB 版图直接应用,或结合具体的使用条件设计出性价比更佳的产品。

本书题材新颖、内容丰富、通俗易懂、切合实际,将 LED 工作原理、驱动器原理与实际产品紧密结合,具有很强的实用性。本书可供从事 LED 相关设计、应用工作的技术人员参考、阅读。

图书在版编目(CIP)数据

LED 照明驱动电路设计方法与实例/戴志平,谭宏,赖向东编著. —北京:中国电力出版社,2011.7

(无师自通系列书)

ISBN 978-7-5123-1912-7

I. ①L… II. ①戴… ②谭… ③赖… III. ①发光二极管—电路设计 IV. ①TN383.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 141100 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 10 月第一版 2011 年 10 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 7.375 印张 192 千字

印数 0001—3000 册 定价 22.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

近几年，中国的 LED 照明产业取得了前所未有的发展，从大功率 LED 芯片技术的研发突破到 10 亿颗 LED 芯片点亮上海世界博览会的实际应用，从资本热捧到政策给力，产业的繁荣让人欣喜。然而，随着时间的推进，已经投入使用的照明产品不断暴露出一些问题，使我们不得不清醒地认识到，作为新兴的技术和应用，LED 照明在某些领域，特别是在道路照明领域，还存在一些制约未来发展的问題亟待解决。

LED 是一种新型半导体固态冷光源，它是一种能够将电能转化为可见光的光电器件。由于 LED 能耗少、热辐射低、发光效率高，是一种节能、环保、经济、安全的新型照明器件，也被一致公认为是下一代道路照明领域的主要光源。自 2009 年伊始，我国政府加大了对 LED 道路照明的扶持和推广力度，并在 21 个经济较发达城市推行应用试点。截至 2010 年底，全国共新装 LED 路灯超过 35 万盏。然而，各地新安装的 LED 路灯没有使用多久，便普遍在产品质量和照明效果方面出现了诸多问题，比较集中在道路照明的亮度不够，眩光大且刺眼，产品使用一段时间后出现比较严重的光衰，特别是 LED 驱动电源可靠性不高等现象。在很短的时间内出现这么多问题，一定程度上制约了产品应用的进一步扩大，因此，加快技术研究并提高其发光效率成为当今首要问题。大功率 LED 要成为照明业的主体，其中安全、高效的驱动研究是推广应用大功率 LED 的关键。

如何做出高效率、高可靠性、低成本的 LED 驱动电源是业界人士不断努力的方向。目前 LED 照明驱动电源的五大市场需求趋势可归结为：高效率、高可靠性、对调光与非调光广泛的应用兼容性、体积小、无光耦。

要满足应用市场对 LED 照明驱动电源越来越高的要求，对

LED 驱动电源方面的工程师也提出了更高的要求，要求其必须有足够的技术储备。为了满足 LED 驱动电源方面工程技术人员需要，本书主要围绕 LED 照明的驱动电源作了深入的介绍，一方面从理论上叙述了其常用的拓扑结构和原理，另一方面讲解了一些典型电路的设计方法。本书在编写时主要考虑了基础性和实用性，尽量使读者道理明、方法清，设计时用得上。

本书是在与深圳三马集团长期合作中的一些经验积累，大部分的设计都是该企业的具体产品和专利。同时该书也得到了深圳三马集团刘征董事长的极大关心和帮助，许多的电路在该企业的产品中得到验证。本书分别由戴志平、谭宏、赖向东完成了全书各章的撰写，此外，高路、罗菁、程宏宾分别在部分章节的编写、资料的整理和图片方面做了大量具体和细致的工作，赵炎、蒙世城工程师也在设计资料的整理上做了大量的具体工作。

由于水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者和专家给予指正。

编 者

前言

第1章 LED 基础知识	1
1.1 LED 的发展过程及特点	1
1.1.1 LED 的发展历程	1
1.1.2 LED 光源的特点	6
1.2 LED 发光原理	8
1.2.1 LED 基本结构	8
1.2.2 白光 LED 原理	8
1.2.3 高亮度 LED 的发光原理	11
1.3 LED 的参数与特性	12
1.3.1 LED 的参数	12
1.3.2 LED 的特性	15
1.4 LED 驱动技术	17
1.4.1 LED 驱动电源的重要性	17
1.4.2 LED 驱动分类	19
1.4.3 高亮度 LED 的驱动	22
1.4.4 LED 驱动发展	24
第2章 功率因数校正电路设计	28
2.1 单相功率因数校正电路	28
2.1.1 功率因数校正电路	29
2.1.2 功率因数校正电路控制模式	32
2.2 单级功率因数校正电路	36
2.2.1 两级 PFC 技术	36
2.2.2 单级功率因数校正技术	37
2.3 单相 PFC 电路设计实例	51
2.3.1 基于 IR1150s 的 PFC 电路设计	51

2.3.2 基于 1150s 的单级 PFC 电路设计	64
第 3 章 DC/DC 变换电路设计	70
3.1 基本非隔离型变换器	70
3.2 隔离型变换器	75
3.2.1 单端反激式变换器	75
3.2.2 正激式变换器	83
3.3 50W 反激式电源设计	84
3.3.1 UC3842 芯片在单端反激式开关电源中的应用	84
3.3.2 利用 TOPSwitch 制作反激式变换器	90
第 4 章 LLC 型半桥谐振 DC/DC 变换器设计	112
4.1 LLC 型半桥谐振 DC/DC 变换器	112
4.1.1 谐振变换器分类	112
4.1.2 LLC 型半桥谐振式 DC/DC 变换器原理	118
4.2 主电路设计	129
4.2.1 基本参数设计	129
4.2.2 谐振电感设计	131
4.2.3 输出滤波电容设计	133
4.2.4 开关管死区设计和整流二极管选择	134
4.3 基于 L6599 的 LED 驱动电路设计	135
第 5 章 典型 LED 照明驱动电路设计实例	161
5.1 基于 PLC810PG 构成的 150W LED 恒压恒流驱动 电源	161
5.2 基于 L6563 的高功率因数 LED 驱动电源	169
5.3 基于 FAN7530 构成的 LED 驱动器	174
5.4 基于 NCP1014/1028 构成的 LED 驱动器	180
5.5 基于 HV9931 组成单级 PFC 高亮度 LED 驱动器	184
5.6 基于 CL1100 构成的 20W 一次控制高精度 LED 驱动器	190
5.7 基于 SN3350 构成的 40V 集成功率管 LED 驱动器	199
5.8 基于 SMD802 构成的市电供电的大功率恒流 LED	

驱动器	206
5.9 基于 SA7527 构成的 LED 驱动器	213
5.10 基于 LNK605DG 构成 3.67W 的 LED 驱动器	216
5.11 由 FT6610 构成的 PWM 控制方式高效 LED 驱动器	221



第 1 章

LED 基础知识

作为一个发展中的国家，一个在各个方面正在崛起的大国，能源战略显得非常重要。LED 照明的低能耗、长寿命也凸显了它在节能降耗方面的优势。LED 路灯的应用可使其拥有长达 10 万小时的使用寿命，同时具备省电、环保无汞、体积小、响应速度快、耐振、宽温等突出特点，这些都必将成为未来路灯照明的趋势。LED 产品的开发成为关注的热点问题，随着 LED 相关技术的不断成熟，LED 照明灯具方面得到了较好的发展，运用也较为成熟。



1.1 LED 的发展过程及特点

在过去的 100 多年里，作为人类文明象征的照明技术有了飞速的发展。作为照明技术的主体光源经历了三个重要的发展阶段：白炽灯、荧光灯和 HID（High Intensity Discharge）灯。在进入新世纪的时候，大家都在关心：“什么将是 21 世纪的照明新光源”。现在，21 世纪照明新光源是发光二极管 LED（Light Emitting Diode）已成为大家的共识。LED 作为第四代光源，有着极其光明的发展前景。

1.1.1 LED 的发展历程

1907 年，Henry Joseph Round 第一次在一块碳化硅里观察到电致发光现象。由于其发出的黄光太暗，不适合实际应用，而且碳化硅与电致发光不能很好的适应，研究被摒弃了。20 世纪 20 年代末期，Bernhard Gudden 和 Robert Wichard 在德国使用从锌硫化物与铜中提炼的黄磷发光，再一次因发光暗淡而停止。

1936 年，George Destiau 发表了一个关于硫化锌粉末发射光

的报告。随着电流的应用和对其愈加广泛的认识，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 节能灯并于 20 世纪 60 年代面世。据说在早期的试验中，LED 需要放置在液化氮里，更需要进一步的操作与突破 LED 节能灯能高效率的在室温下工作。第一个商用 LED 只能发出不可视的红外光，但其迅速应用于感应与光电领域。

1962 年，GE、Monsanto、IBM 的联合实验室开发出了发红光的磷砷化镓（GaAsP）半导体化合物，从此可见光发光二极管步入商业化发展进程。1965 年，全球第一款商用化发光二极管诞生，它是用锗材料做成的可发出红外光的 LED 节能灯，当时的单价约为 45 美元。其后不久，Monsanto 和惠普公司推出了用 GaAsP 材料制作的商用化红色 LED 节能灯泡。这种 LED 灯的效率约为 0.1lm/W，比一般的 60 ~ 100W 白炽灯的 15lm/W 要低上 100 多倍。1968 年，LED 灯的研发取得了突破性进展，利用氮掺杂工艺使 GaAsP 器件的发光效率达到了 1lm/W，LED 节能灯能够发出红光、橙光和黄色光。

20 世纪 70 年代早期，由于 LED 节能灯器件在家庭与办公设备中的大量应用，LED 节能灯的价格直线下跌。事实上，LED 节能灯在那个时代主打市场是数字与文字显示技术应用领域。到 70 年代中期，磷化镓被使用作为发光光源，随后就发出灰白绿光。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。就在此时，俄国科学家利用金刚砂制造出发黄光的 LED 节能灯，尽管它不如欧洲的 LED 节能灯高效，但它能发出纯绿色的光。

20 世纪 80 年代早期的重大技术突破是开发出了 AlGaAs LED 灯，它能以 10lm/W 的发光效率发出红光。这一技术进步使 LED 灯能够应用于室外信息发布以及汽车高位刹车灯（CHMSL）设备。

20 世纪 90 年代早期，采用铟铝磷化镓生产出了橘红、橙、黄和绿光的 LED 节能灯。第一个有历史意义的蓝光 LED 节能灯也出现在该时期，再一次利用金钢砂早期半导体光源的障碍物。根据当今的技术标准去衡量，它与俄罗斯之前的黄光 LED 灯一样光源暗淡。

20 世纪 90 年代中期，出现了超亮度的氮化镓 LED 节能灯，随即又制造出能产生高强度的绿光和蓝光铟氮镓 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。

20 世纪 90 年代后期，研制出通过蓝光激发 YAG 荧光粉产生白光的 LED 灯，但色泽不均匀、使用寿命短、价格高。随着技术的不断进步，近年来白光 LED 节能灯的发展相当迅速，白光 LED 节能灯的发光效率已经达到 38lm/W ，实验室研究成果可以达到 70lm/W ，大大超过白炽灯，向荧光灯逼近。

今天 LED 节能灯在市场上能看到各种新奇颜色，如浅绿色和粉红色。有科学思想的读者到现在可能会意识到 LED 节能灯的发展经历了一个漫长而曲折的历史过程。事实上，最近开发的 LED 节能灯不仅能发射出纯紫外光而且能发射出真实的黑色紫外光。那么 LED 将来到底能走多远，不得而知，也许某天就能开发出能发 X 射线的 LED。然而，LED 节能灯的发展不单纯是它的颜色还有它的亮度，像计算机一样，遵守摩尔定律的发展。每隔 18 个月，LED 节能灯的亮度就会增加一倍。早期的 LED 只能应用于指示灯、计算器显示屏和数码手表，而现在开始出现在超亮度的领域，将会在接下的一段时间继续下去。

例如，到 2015 年美国所有的交通信号指示灯将被 LED 灯所取代，美国汽车产业也会于十年内停止使用白炽灯而采用 LED 灯（包括汽车前照灯）。大多数的大型户外显示屏也采用成千上万个 LED 以便产生高质量视频效果。不久，LED 节能灯将会照亮我们的家庭、办公室甚至街道。高效、节能的 LED 灯意味着

太阳能充电电池能够通过太阳光为其充电，从而能够把光源带到没有电能的地方。曾经暗淡的发光二极管现在真正预示着 LED 新时代的来临。

2010 年，中国 LED 产业有了很大的发展和进步，不管是在政府对 LED 产业的政策扶持上，还是 LED 技术的进步上，都给人们留下了深刻的印象。为了节约能源，减少温室效应，目前世界各国都把 LED 灯具产业作为新一代的绿色增长产业，重点予以培养，在汽车领域 LED 灯也正在如火如荼的发展。度过 2010 “LED 元年”，LED 汽车灯具得到了更广泛的应用，有业内人士预计到 2015 年，中国 LED 产业规模将达 5000 亿。眼下，随着各地对节能减排的财政投入，LED 汽车灯具推广成为业界公开看好的大蛋糕。

同时，为促进 LED 产业发展，落实国家关于半导体照明节能产业发展的要求，推进“十城万盏”半导体照明试点示范工程，全国各地都加大了对 LED 照明工程的资金投入。

目前白炽灯的淘汰已经不再是将来时，而是进行时，2010 年白炽灯禁用法律已经在阿根廷、澳大利亚、新西兰、法国、意大利和菲律宾生效，不久的将来在英国、芬兰和荷兰、日本和加拿大也将先后生效，2014 年将在美国生效，全球最晚的中国也将在 2017 年生效，这也是为什么 CFL 节能灯市场需求快速上升的一个主要原因，因为 CFL 节能灯是目前白炽灯的一个最佳替代选择，不仅价格最接近白炽灯，而且寿命和节能效果远超白炽灯。一只 13W 的 CFL 节能灯光效就相当于一只 60W 的白炽灯，功耗降低了 $4/5$ ，寿命提高了 8~15 倍。禁用白炽灯将使 LED 照明崛起，LED 灯泡将占有更大的市场份额。LED 固态照明目前被广泛认为是中长期高效能照明的首选方案，其效能可望达到白炽灯的 10 倍。目前 LED 的使用主要在于建筑照明、装饰照明和效果照明，以及交通信号和路灯照明等领域。

随着 LED 照明灯具的逐步发展，在亮化工程辅助照明等公共场合，LED 渐渐替代了一些传统光源产品。2009 年，LED 开

始在发达国家进入主照明普及。在电费较高、使用时间较长的商业应用场所，LED 灯具迅速成为市场的新宠。作为 LED 照明灯具的用途，LED 市场发展分几个阶段。

1. LED 灯具替代接受阶段

这一阶段指的是 LED 灯具在发展初期，主要体现出其光效高（能耗小）、寿命长的特点。因为售价高，所以在这一阶段主要为商业照明市场。客户有一个接受的过程，主要是使用习惯和外观上的过渡与接受。在与传统光源一致的使用情况下，LED 灯体现出的节电、长寿命等特点使得市场容易接受它的相对高价，尤其是在商用场合，各厂商拼的是质量和价格。

2. LED 灯具实用新型阶段

在上一阶段的基础上，市场对 LED 灯具产品有了一定的认可和接受。LED 灯具环保、体积小，可靠性高等特性逐渐凸显出来，由此而开发的一系列完全有别于传统光源应用的产品会大行其道，照明行业会出现更大、更广的发展空间。光源不再是仅起到照明作用，它的多变使得更贴切人们工作中的点点滴滴，各厂商拼的是设计应用优势。

3. LED 灯具智能控制阶段

随着物联网等新技术的发展，LED 作为半导体产业，也将搭上这趟高速列车，发挥出其高可控性特点。从家庭到办公、从道路到隧道、从汽车到步行、从辅助照明到主照明，具备智能控制的 LED 照明灯具系统将给人们带来更高等级的服务。LED 灯具产业也将由做产品，到设计产品，到提供整体解决方案的历程。

近年来，尽管 LED 照明发展迅速，由于缺少相关的技术标准，企业生产的产品规格各有不同，导致全行业产品技术指标参差不齐。目前国际已出台了 LED 照明的相关标准，这将对 LED 照明的发展起到很好的推动作用，对我国蓬勃发展 LED 灯具产业的制造、评价和应用将起到重要的导向作用。

1.1.2 LED 光源的特点

LED 与传统灯的性能对比见表 1-1。

表 1-1 LED 与传统灯的性能对比

电光源	耗电量 /W	工作电压 /V	协调控制	发热量	可靠性	使用寿命 /h
钨丝灯	15 ~ 220	220	高	高	低	3000
节能灯	3 ~ 150	220	不宜调光	低	低	5000
金属卤素灯	100	220	不易	极高	低	3000
霓虹灯	500	较高	高	高	较低	3000
镁氙灯	16W/m	220	较好	较高	较好	6000
荧光灯	4 ~ 100	220	不易	较高	低	5000 ~ 8000
冷阴极	15W/m	需逆变	较好	较好	较低	10 000
LED 灯	极低	很低	多种形式	极低	极高	100 000

由表 1-1 分析可知，相对于其他目前比较普及的电光源来说，LED 有如下优点。

(1) 节能。固体冷光源光效高，并且采用低电压、低电流启动，耗电少，可节能 85%，符合国家节约能源的重大战略。

(2) 寿命长。普通白炽灯的寿命约为 1000h，荧光灯、金属卤化物灯的寿命不会超过 1 万 h，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 10 万 h。

(3) 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。由于 LED 采用电致发光的原理，没有有害金属汞的污染问题，废物可以回收。而且 LED 是一种冷光源，辐射主要集中在可见光区，几乎不产生热量，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。

(4) 安全。LED 使用低压电源，比较适用于公共场合。

(5) 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，因此能够经受得住振动、冲击而不致引起损坏。

(6) 适用性强。体积小、质量小，可平面封装，每个单元 LED 小片是 3 ~ 5 mm 的正方形，因此可以封装成各种形状的器件，适合于易变的环境。

(7) 响应时间短。白炽灯的响应时间为毫秒级，而 LED 的响应时间为纳秒级，因此可以高频操作。

(8) 易于控制管理。LED 可以集中控制，也易于分散控制或对点进行调节控制，还可以通过控制 LED 的电流调光，通过不同光色组合调色，达到多种动态变化效果。

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。

综上所述，LED 是一种符合绿色照明要求的光源。所谓“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。

正是由于这些优点，使得 LED 在仪器仪表显示、室内外显示广告牌、小尺寸 LCD 及手机背光源、交通信号灯、装饰灯、景观照明等领域的应用日益广泛，尤其是高亮度白光二极管更被视为“绿色照明光源”的明日之星。随着发光效率的提高和成本的降低，特别是由于世界产油地区的局势动荡，全球能源短缺忧虑再度升高及欧盟已明令从 2007 年开始禁用含汞制品的背景下，高亮度 LED 在照明市场的前景更受到全球瞩目。按固体发光物理学原理，LED 的发光效率能接近 100%，因此，LED 作为照明光源必将成为继白炽灯、荧光灯、高强度气体放电灯之后的第四代光源。

目前高亮度 LED 正处于发展阶段，其发光效率也在不断提高，但还需要解决一些技术上的问题才能真正使 LED 在照明领

域得到普及。

(1) 功率低。市面上的单体 LED 功率一般在 5W 以下，还没有出现更大功率的 LED，这是目前 LED 难以成为照明首选的最大瓶颈。

(2) 需要严格控制温度。LED 是一种半导体材料，与普通二极管一样具有 PN 结，由于高亮二极管的功率相对较大，所以与功率半导体器件相同，需要考虑散热问题，结温过高会直接影响 LED 的寿命，并且会增大 LED 的光衰，情况严重的会将 LED 烧坏。

(3) 价格高。除了功率低，价格是 LED 难以成为主要光源的重要因素，虽然 LED 目前被大多数人认识，也被多数人看好，但其高昂的价格难以被消费者接受，目前单体黄色 LED 大约 0.6 元/个，绿色和蓝色单体 LED 大约为 1.8 元/个，白色 LED 的价格达到了 2.2 ~ 5.5 元/个。如果将十几个单体 LED 组合，其成本将大大增加。如果把一个 LED 安装在草坪灯里，其单价就相当于一般草坪灯的几倍。LED 要成为未来照明的主流光源，就一定要朝着高光通量方向发展，成本才可能降低，市场才可能突破。

1.2 LED 发光原理

1.2.1 LED 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 1-1 中示出了 LED 的结构图，并在图 1-2 中给出了 LED 芯片的基本结构示意图。

1.2.2 白光 LED 原理

1. LED 发光机理

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

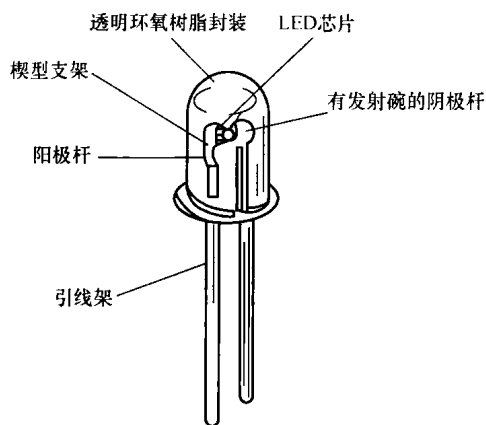


图 1-1 LED 结构图

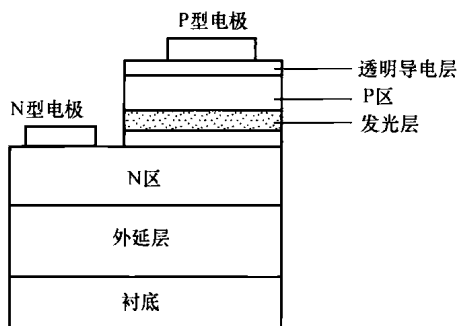


图 1-2 LED 芯片的基本结构

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。LED 的发光原理如图 1-3 所示。

电子和空穴复合可分为两类：① 伴随光辐射的复合；② 不伴随光辐射的复合。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