

电子工程实用技术丛书

LED 照明工程 实用技术

驱动电路设计 · PCB设计 · 可靠性设计

● 周志敏 纪爱华 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子工程实用技术丛书

LED 照明工程实用技术

驱动电路设计 · PCB 设计 · 可靠性设计

周志敏 纪爱华 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书结合国内外LED照明技术的应用及发展,以LED照明工程实用技术为核心内容,全面系统地阐述了LED照明工程的最新应用技术。全书分为LED驱动电路设计、LED驱动电路PCB设计、LED驱动电路可靠性设计三部分,系统地阐述了LED驱动电路设计要点、开关电源驱动LED电路设计要点、LED驱动电路PCB设计要点、LED驱动电路PCB热设计、LED驱动电路浪涌抑制技术、LED驱动电路热管理、LED灯具热设计等内容。本书题材新颖实用,内容丰富,深入浅出,文字通俗,具有很高的实用价值。

本书可供电信、信息、航天、汽车、国防及家电等领域从事LED照明开发、设计和应用的工程技术人员和高等院校及职业技术学校的师生阅读参考,也可作为LED照明设计和应用培训的基础教材,供学员和教员阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

LED照明工程实用技术:驱动电路设计·PCB设计·可靠性设计/周志敏,纪爱华编著. —北京:电子工业出版社,2016.1

(电子工程实用技术丛书)

ISBN 978-7-121-27797-9

I. ①L… II. ①周… ②纪… III. ①发光二极管—照明设计 IV. ①TN383.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第297696号

策划编辑:富 军

责任编辑:韩玉宏

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

开 本:787×1092 1/16 印张:17.25 字数:441.6千字

版 次:2016年1月第1版

印 次:2016年1月第1次印刷

印 数:3000册 定价:48.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888

前 言

LED 是一种可将电能转变为光能的半导体发光器件，属于固态光源。LED 的优点很多，不仅寿命长、耗能低，而且控制极为方便，属于典型的绿色照明光源。LED 技术的不断创新和发展，使得 LED 在照明领域得以推广应用。LED 作为一种新型的照明光源，其应用前景举世瞩目，被誉为 21 世纪最有价值的光源，这必将引起照明领域一场新的革命。自从 LED 出现，无论是发光原理还是功能等方面都具有其他传统光源无法比拟的优势，因此 LED 照明已成为 21 世纪照明领域的一种趋势。

LED 照明技术的发展已引起国内外光源界的普遍关注，现已成为具有较好发展前景和影响力的一项高新技术产业。LED 产品的开发、研制、生产已成为发展前景十分广阔的朝阳产业。目前，随着 LED 照明技术的广泛应用及潜在的市场开发，LED 照明显示出了强大的发展潜力，并已形成完整的产业链。

在 21 世纪，照明设计将会以 LED 光源为主流，而 LED 驱动电路的研发、设计是 LED 应用技术创新的关键，直接关系到 LED 产品的性能和使用寿命。为此，本书结合 LED 驱动电路的最新应用技术，把 LED 驱动电路设计、LED 驱动电路 PCB 设计、LED 驱动电路可靠性设计有机地结合起来，系统地讲述了从事 LED 照明开发、设计和应用的工程技术人员所必备的基础知识及在设计过程中应掌握的设计要点。本书在写作中尽量做到有针对性和实用性，在保证科学性的同时注意通俗性，力求做到通俗易懂和结合工程实际，以便于读者掌握 LED 在照明工程应用中的设计要点。

参加本书编写工作的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、刘淑芬、纪达安、纪和平、陈爱华等，本书在写作过程中，无论资料的收集方面还是技术信息交流方面都得到了国内外专业学者和同行及 LED 制造商的大力支持，在此表示衷心的感谢！

由于时间短，加之作者水平有限，难免有不当之处，敬请读者批评指正。

编著者

目 录

第一部分 LED 驱动电路设计

第 1 章 LED 驱动电路设计要点	3
1.1 LED 芯片及模组选用要点	3
1.1.1 LED 芯片选用要点	3
1.1.2 LED 模组选用要点	18
1.2 LED 串联、并联电路设计要点及特性分析	25
1.2.1 LED 串联电路设计要点	25
1.2.2 LED 并联电路设计要点	28
1.2.3 LED 混联电路设计要点	30
1.2.4 LED 串联、并联电路特性分析	33
1.2.5 LED 串联、并联电路特性比较	41
第 2 章 开关电源驱动 LED 电路设计要点	48
2.1 AC/DC 驱动 LED 前端电路设计要点	48
2.1.1 AC/DC 驱动 LED 前端滤波电路设计要点	48
2.1.2 AC/DC 驱动 LED 前端整流电路设计要点	53
2.1.3 AC/DC 驱动 LED 前端功率因数校正电路设计要点	55
2.2 典型 LED 驱动电路设计要点	63
2.2.1 基于 PT4107 的 LED 驱动电路设计要点	63
2.2.2 具有功率因数校正的 LED 驱动电路设计要点	67
2.2.3 基于 NCP1014 的 LED 驱动电路设计要点	73
2.2.4 基于 PRM 和 VTM 的恒定电流驱动 LED 电路设计要点	76

第二部分 LED 驱动电路 PCB 设计

第 3 章 LED 驱动电路 PCB 设计要点	93
3.1 PCB 功能及分类	93
3.1.1 PCB 功能与特点	93
3.1.2 PCB 分类	95
3.2 PCB 设计流程及布局布线设计	96
3.2.1 PCB 设计流程	96
3.2.2 PCB 布局设计	99
3.2.3 PCB 布线设计	103
3.3 PCB 互连设计及焊盘	113
3.3.1 PCB 互连设计	113



3.3.2	PCB 焊盘	115
3.4	PCB 可靠性设计	124
3.4.1	地线设计	124
3.4.2	PCB 抗干扰设计	127
3.4.3	PCB EMC 辅助设计 (软件方法)	134
第4章	LED 驱动电路 PCB 热设计	138
4.1	热设计术语及热传递方式	138
4.1.1	热设计术语	138
4.1.2	热传递方式	143
4.2	LED 驱动电路 PCB 热设计要点	145
4.2.1	LED 驱动电路 PCB 热设计的相关知识	145
4.2.2	LED 驱动电路 PCB 热设计的基本要求	148
4.2.3	LED 驱动电路 PCB 热设计的注意事项	150
4.2.4	LED 驱动电路 PCB 温升及热设计的具体方法	152
4.2.5	表面贴装元器件热设计	154

第三部分 LED 驱动电路可靠性设计

第5章	LED 驱动电路浪涌抑制技术	161
5.1	浪涌产生及分类	161
5.1.1	浪涌产生及危害	161
5.1.2	浪涌分类	162
5.2	浪涌干扰抑制器件	168
5.2.1	TVS 瞬态干扰抑制器	168
5.2.2	氧化物压敏电阻	172
5.2.3	放电管	175
5.2.4	各种浪涌干扰抑制器件性能比较	178
5.3	LED 驱动电路浪涌抑制电路设计要点	179
5.3.1	供电系统组合浪涌保护	179
5.3.2	LED 驱动电路浪涌抑制解决方案	184
第6章	LED 驱动电路热管理	188
6.1	LED 热设计及热管理基础	188
6.1.1	LED 热设计	188
6.1.2	LED 热管理基础	191
6.2	LED 结温	203
6.2.1	LED 结温产生原因及结温热分析	203
6.2.2	LED 结温对性能的影响	208
6.2.3	降低 LED 结温的途径	210
6.3	LED 驱动电路散热控制方案	211



6.3.1 LED 驱动电路温度补偿原理	211
6.3.2 LED 驱动电路热保护	220
第 7 章 LED 灯具热设计	224
7.1 LED 灯具热特性及设计程序	224
7.1.1 LED 灯具热特性	224
7.1.2 LED 灯具设计程序	232
7.2 LED 灯具散热器	239
7.2.1 大功率 LED 散热器	239
7.2.2 LED 灯具散热器设计要点	249
7.3 LED 路灯热设计	254
7.3.1 LED 路灯热设计要素	254
7.3.2 LED 路灯热衬散热结构	258
7.3.3 LED 路灯设计要点	262
参考文献	266

第一部分 LED 驱动电路设计

LED 驱动电路设计要点

1.1 LED 芯片及模组选用要点

1.1.1 LED 芯片选用要点

1. LED 芯片电学特性

1) $I-V$ 特性

$I-V$ 特性是表征 LED 芯片 PN 结性能的主要指标。LED 的 $I-V$ 特性具有非线性、单向导电性等特点, 即外加正偏压表现为低电阻, 反之为高电阻, 如图 1-1 所示。

(1) 正向死区 (图 1-1 中的 oa 或 $o'a'$ 段)。 a 点对应的 V_a 为开启电压, 当 $V < V_a$ 时, 外加电场尚未克服由少数载流子扩散而形成的势垒电场, 此时电阻 R 很大。开启电压对于不同 LED 其值不同, GaAs 为 1V, 红色 GaAsP 为 1.2V, GaP 为 1.8V, GaN 为 2.5V。

(2) 正向工作区。工作电流 I_F 与外加电压呈指数关系, 即

$$I_F = I_S (e^{qV_F/KT} - 1) \quad (1-1)$$

式中, I_S 为反向饱和电流。

在 $V > V_a$ 的正向工作区, I_F 随 V_F 指数上升:

$$I_F = I_S e^{qV_F/KT} \quad (1-2)$$

① 正向工作电流 I_F 是指 LED 正常发光时的正向电流值, 在实际使用中应根据需要选择 I_F , 一般在 $0.6 \times I_{Fm}$ 以下。

② 正向工作电压 V_F 是在给定正向电流下得到的, 一般是在 $I_F = 20\text{mA}$ 时测得的。LED 正向工作电压 V_F 范围为 1.4 ~ 3V。在环境温度升高时, 正向工作电压 V_F 将下降。

当正向电压小于某一值 (叫阈值) 时, 电流极小, LED 不发光。当电压超过某一值后,

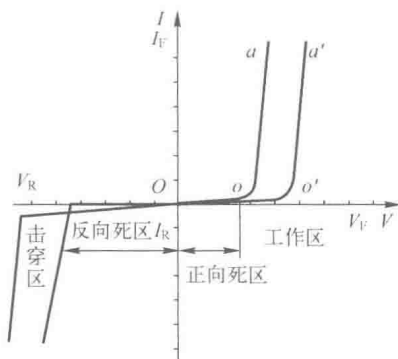


图 1-1 $I-V$ 特性曲线



正向电流随电压迅速增加而使 LED 发光。由 $I-V$ 特性曲线可以得出 LED 的正向工作电压、反向漏电流及反向击穿电压等参数。LED 反向漏电流 $I_R < 10\mu\text{A}$ 。LED 的正向伏安特性如图 1-2 所示。LED 伏安特性模型可表示为

$$V_F = V_a + R_s I_F + (\Delta V_F / \Delta T) (T - 25^\circ\text{C}) \tag{1-3}$$

式中， V_a 为 LED 的开启电压； R_s 表示伏安特性曲线的斜率； T 为环境温度； $\Delta V_F / \Delta T$ 为 LED 正向电压的温度系数，对于多数 LED 典型值为 $-2\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

从 LED 的伏安特性曲线及模型看，LED 在正向导通后其正向电压的细小变动将引起 LED 电流的很大变化，并且，环境温度、LED 老化时间等因素也将影响 LED 的电气性能。因 LED 的光输出直接与 LED 电流相关，所以在 LED 应用中，应控制驱动电路的输入电压、环境温度等因素发生变化，否则，LED 的光输出将随输入电压和温度等因素变化而变化；并且，若 LED 电流失控，LED 长期工作在大电流下将影响 LED 的可靠性和寿命，甚至造成 LED 失效。

(3) 反向死区。当 $V < 0$ 时，PN 结加反向偏压。GaP LED 的反向漏电流 $I_R (V = -5\text{V})$ 为 0A ，GaN LED 的反向漏电流 $I_R (V = -5\text{V})$ 为 $10\mu\text{A}$ 。

(4) 反向击穿区。 V_R 对应的 I_R 为反向漏电流。当反向偏压一直增加使 $V < -V_R$ 时，由于 I 突然增加而出现击穿现象。由于 LED 所用的化合物材料种类不同，各种 LED 的反向击穿电压 V_R 也不同。

2) $C-V$ 特性

LED 芯片有 9×9 (mil)、 10×10 (mil)、 11×11 (mil)、 12×12 (mil) 等规格。LED 芯片 PN 结的结电容 C_j 为势垒电容 C_b 与扩散电容 C_d 之和 ($C_j = C_b + C_d$)。LED 的 $C-V$ 特性呈二次函数关系，如图 1-3 所示 (图 1-3 所示的 $C-V$ 特性是由 1MHz 交流信号用 $C-V$ 特性测试仪测得的)。

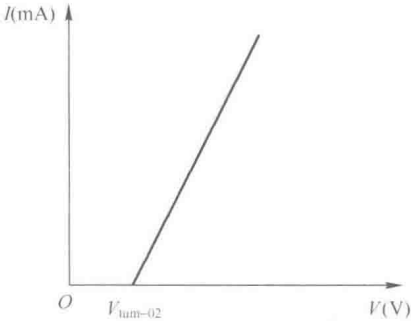


图 1-2 LED 的正向伏安特性

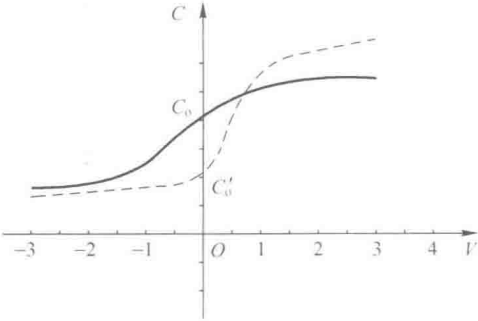


图 1-3 $C-V$ 特性曲线

3) 允许功耗 P

当流过 LED 的电流为 I_F 、管压降为 V_F 时，则 LED 的功率消耗为 $P = V_F \times I_F$ 。LED 工作时，外加偏压、偏流一定时促使 PN 结内一部分载流子复合发出光，还有一部分变为热，使结温升高。若结温为 T_j ，外部环境温度为 T_a ，则当 $T_j > T_a$ 时，LED 内部热量借助管座向外传热，散发热量 (功率) 可表示为

$$P = K_T (T_j - T_a) \tag{1-4}$$



4) 响应时间

LED 的响应时间是标志反应速度的一个重要参数,尤其在脉冲驱动或电调制时显得非常重要。响应时间是指输入正向电流后,LED 开始点亮(上升)和熄灭(下降)的时间。LED 的上升时间随着电流的增大近似成指数地衰减。直接跃迁材料(如 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$) 的 LED 响应时间仅几个纳秒,而间接跃迁材料(如 GaP) 的 LED 响应时间则为 100ns 。

LED 的响应时间从使用角度来看,就是 LED 点亮与熄灭所延迟的时间,如图 1-4 中的 t_r 、 t_f 。在图 1-4 中, t_0 值很小,可忽略。LED 的响应时间主要取决于载流子寿命、器件的结电容及电路阻抗。

(1) LED 的点亮时间 t_r (上升时间)。 t_r 是指从接通电源使 LED 发光强度达到正常值的 10% 开始,一直到 LED 发光强度达到正常值的 90% 所经历的时间。

(2) LED 的熄灭时间 t_f (下降时间)。 t_f 是指 LED 从正常发光减弱至原来的 10% 所经历的时间。

不同材料制造的 LED 响应时间各不相同,例如, GaAs 、 GaAsP 、 GaAlAs 的响应时间小于 10^{-9}s , GaP 为 10^{-7}s ,因此它们可应用于 $10 \sim 100\text{MHz}$ 的高频系统。

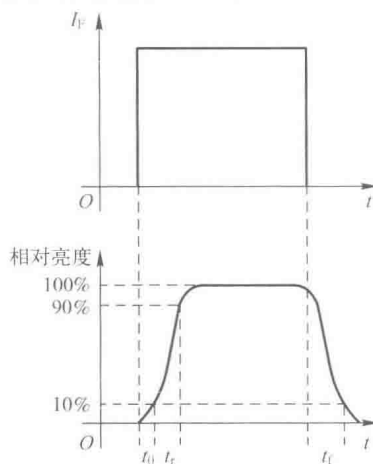


图 1-4 LED 响应时间特性图

2. LED 芯片光学特性

LED 有红外(非可见光)与可见光两个系列。非可见光系列 LED 可用辐射度来量度其光学特性,可见光系列 LED 可用光度学(对可见光的能量计量的学科)来量度其光学特性。

1) 发光强度及其角分布

LED 发光强度表征 LED 在某个方向上的发光强弱,由于 LED 在不同的空间角度光强相差很多,因此分析和研究 LED 的光强分布特性具有实际意义,其直接反映 LED 光源的最小观察角度。

(1) 发光强度。发光强度是表征发光器件发光强弱的重要性能。LED 采用的是圆柱、圆球形封装,由于凸透镜的作用,故具有很强指向性:位于法向方向光强最强,其与水平面交角为 90° 。偏离法向不同 θ 角度,光强也随之变化。

(2) 发光强度分布。发光强度随不同封装形状而不同,而使其发光强度依赖方向角。一种在 GaP 基片上生成的 GaAsP LED 发光强度分布图如图 1-5 所示,谱线宽度为 $400\text{\AA}$,光发射的角度宽度约为 22° ,LED 的辐射通量是集中在一定角度内发射出去的。

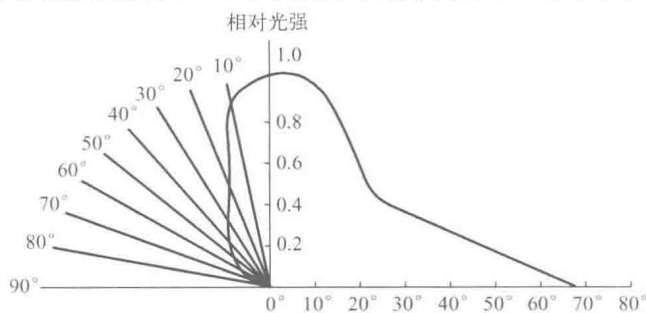


图 1-5 LED 发光强度分布图

(3) 光出射度。图 1-6 表明几种半导体 PN 结发射的光出射度与输入电流的关系。可



见, $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 和 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ LED 具有良好的线性关系, 其他两种则相当差。

(4) 发光强度的角分布。发光强度的角分布描述 LED 发出的光在空间各个方向上的光强分布。它主要取决于 LED 的封装工艺 (包括支架、模粒头、环氧树脂中是否添加散射剂), 为获得图 1-7 所示的高指向性的角分布, 应采取以下措施。

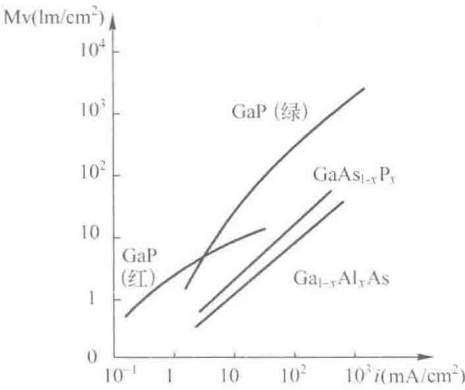


图 1-6 PN 结发射的光出射度与输入电流的关系图

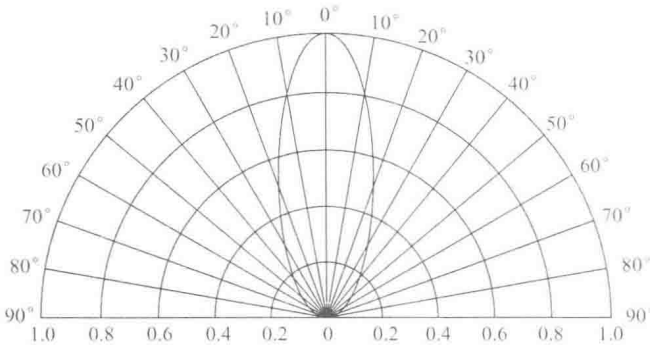


图 1-7 高指向性的角分布图

- ① LED 管芯位置应离模粒头远些。
- ② 使用圆锥状 (子弹头) 的模粒头。
- ③ 封装 LED 的环氧树脂中勿加散射剂。

采取上述措施可使 LED 散射角为 $2\theta_1/2 = 6^\circ$ 左右, 大大提高了指向性。当前几种常用圆形 LED 封装的散射角 ($2\theta_1/2$) 为: 5° 、 10° 、 30° 、 45° 。

2) LED 发光峰值波长及其光谱分布

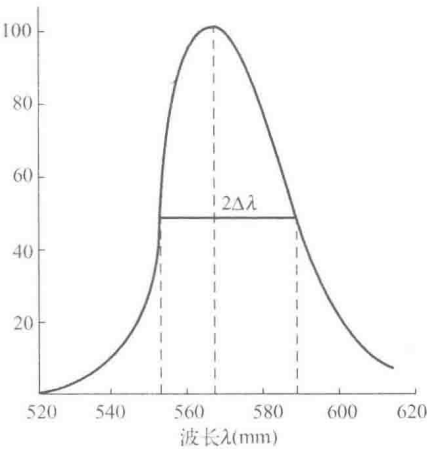


图 1-8 LED 光波长分布图

LED 所发的光并非单一波长, 其波长基本上按图 1-8 所示分布 (纵轴是相对光强)。由图 1-8 可见, 无论什么材料制成的 LED, LED 光谱分布曲线都有一个相对光强最大处 (光输出最大), 与之相对应有一个波长, 此波长叫峰值波长, 用 λ_p 表示。只有单色光才有 λ_p 波长。

LED 的发光强度通常是指法线 (对圆柱形 LED 是指其轴线) 方向上的发光强度。若在该方向上辐射强度为 $1/683 \text{ W/sr}$, 则发光强度为 1 坎德拉 (符号为 cd)。由于一般 LED 的发光强度小, 所以发光强度常用 mcd 作为单位。LED 发光强度或光功率输出随着波长变化而不同, 绘成一条分布曲线, 即为光谱分布曲线。当此曲线确定之后, LED 的有关主波长、纯度、相关色度参数亦随之确定。

LED 光谱分布与制备所用化合物半导体种类、性质及 PN 结结构 (外延层厚度、掺杂杂质) 等有关, 而与 LED 的几何形状、封装方式无关。图 1-9 绘出几种由不同化合物半导体及掺杂制得 LED 的光谱分布曲线。

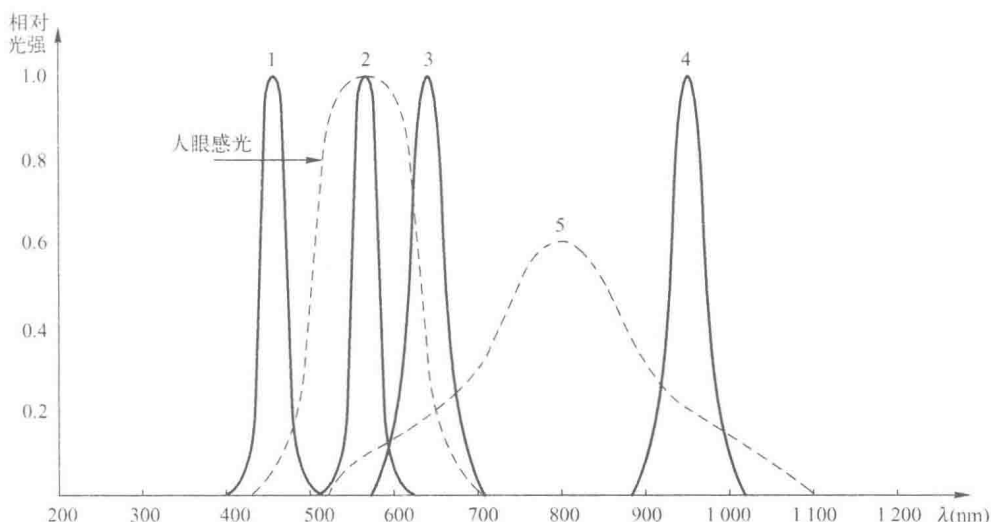


图 1-9 不同化合物半导体及掺杂制得 LED 的光谱分布曲线

在图 1-9 中, 曲线 1 是蓝色 InGaN/GaN 的 LED, 峰值波长 $\lambda_p = 460 \sim 465\text{nm}$; 曲线 2 是绿色 GaPN 的 LED, 峰值波长 $\lambda_p = 550\text{nm}$; 曲线 3 是红色 GaPZn-O 的 LED, 峰值波长 $\lambda_p = 680 \sim 700\text{nm}$; 曲线 4 是使用 GaAs 材料的 LED, 峰值波长 $\lambda_p = 910\text{nm}$; 曲线 5 是 Si 光电二极管, 通常作光电接收用。

对大多数半导体材料而言, 由于折射率较大, 在光逸出半导体之前, 往往已经过多次反射, 由于短波光比长波光易于吸收, 所以峰值波长所对应的光子能量比半导体材料的能量 E_g 小。例如, GaAs 发射的峰值波长所对应的光子能量为 1.1eV , 比室温下的半导体材料的能量 E_g 小 0.3eV 。改变 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 中的 x 值, 峰值波长在 $620 \sim 680\text{nm}$ 范围内变化。谱线半宽度为 $200 \sim 300\text{\AA}$ 。由此可知, LED 提供的是谱线半宽度很大的单色光。由于半导体的能量随温度的上升而减小, 因此它所发射光的峰值波长随温度的上升而增长, 温度系数为 $2 \sim 3/^{\circ}\text{C}$ 。

在 LED 谱线的峰值两侧 $\pm \Delta\lambda$ 处, 存在两个光强等于峰值 (最大光强) 一半的点, 此两点分别对应 $\lambda_p - \Delta\lambda$ 、 $\lambda_p + \Delta\lambda$, 它们之间的宽度叫谱线宽度, 也称半功率宽度或半高宽度 (简称半宽度)。半高宽度反映谱线宽窄, 为 LED 单色性的参数, LED 半高宽度小于 40nm 。光谱半宽度 $2\Delta\lambda$ 表示光谱的纯度, 是指图 1-9 中 $1/2$ 峰值光强所对应两波长的间隔。

图 1-10 给出两只不同型号 LED 发光强度角分布, 中垂线 (法线) AO 的坐标为相对发光强度 (即发光强度与最大发光强度之比), 显然, 法线方向上的相对发光强度为 1, 离开法线方向的角度越大, 相对发光强度越小。由图 1-10 可以得到半值角或视角值。半值角 $\theta_{1/2}$ 是指发光强度值为轴向强度值一半的方向与发光轴向 (法向) 的夹角。半值角的 2 倍为视角 (或称半功率角)。

对于 LED 的光谱特性, 主要看它的单色性是否优良, 而且要注意红、黄、蓝、绿、白等色 LED 的主要颜色是否纯正。因为在许多场合下 (如交通信号灯), 对颜色的要求比较严格。目前, 我国的一些 LED 信号灯中绿色发蓝, 红色的为深红, 从这个现象来看, 对 LED 的光谱特性进行专门研究是非常必要而且很有意义的。有的 LED 发光不是单一色, 即不仅有一个峰值波长, 有的甚至有多峰值, 并非单色光。为此, 描述 LED 色度特性而引入主



波长。主波长就是人眼所能观察到的、由 LED 发出主要单色光的波长。例如，GaP 材料可发出多个峰值波长，而主波长只有一个。随着 LED 长期工作，它会结温升高而使主波长偏向长波长。

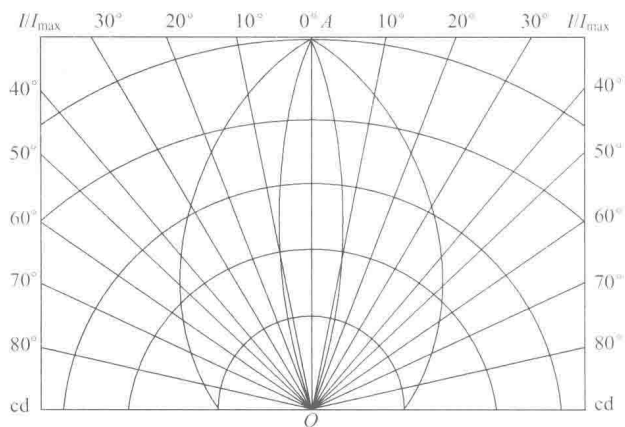


图 1-10 两只不同型号 LED 发光强度角分布

3) 光通量

光通量 Φ 是表征 LED 光输出的辐射能量，它标志器件的性能优劣。光通量为 LED 向各个方向发光的能量之和，它与工作电流直接有关。随着电流增加，LED 光通量随之增大。LED 的光通量单位为流明 (lm)。光通量与芯片材料、封装工艺水平及外加恒流源大小有关。目前，单色 LED 的光通量最大约 1lm；白光 LED 的光通量范围为 1.5 ~ 1.8lm (小芯片)；对于 1mm × 1mm 的功率级芯片制成的白光 LED，其光通量为 18lm。

4) 视觉灵敏度和发光效率

(1) 人的视觉灵敏度在 $\lambda = 555\text{nm}$ 处有一个最大值 680lm/W。若将视觉灵敏度记为 K_λ ，则发光能量 P 与可见光通量 Φ 之间的关系为

$$P = \int P_\lambda d\lambda, \quad \Phi = \int K_\lambda P_\lambda d\lambda \tag{1-5}$$

(2) 发光效率是光通量与电功率之比。发光效率表征光源的节能特性，这是衡量现代光源性能的一个重要指标。LED 的量子效率为

$$\eta = \text{发射的光子数} / \text{PN 结载流子数} = (e/h_e I) \int \lambda P_\lambda d\lambda \tag{1-6}$$

若输入能量为 $W = V \times I$ ，则发光能量效率为

$$\eta_p = P/W \tag{1-7}$$

若光子能量 $h_e = eV$ ，则

$$\eta \approx \eta_p \tag{1-8}$$

LED 的效率可以用电光源的常用术语来表征，即对红外光采用辐射效率 η_e ，对可见光则用发光效率 η_l ，也有用内量子效率 η_{qi} 和外量子效率 η_{qe} 来表征的。内量子效率 η_{qi} 为

$$\eta_{qi} = \eta_F/G \tag{1-9}$$

式中， η_F 为辐射复合产生光子的效率； G 为注入的电子空穴对数。

这样 η_{qi} 等于注入每个电子空穴对在半导体内所产生光子的效率，最高可接近 100%。



外量子效率 η_{qe} 为

$$\eta_{qe} = \eta_{OUT}/G \quad (1-10)$$

式中, η_{OUT} 为从 LED 输出光子的效率。

这样 η_{qe} 等于注入每个电子空穴对所产生的输出器件外的有效光子的效率, 一般只有 0.01% ~ 13%。发射红外的 η_{qe} 可达 15%, 而绿光的 η_{qe} 则下降到 1% 以下。

使外量子效率显著下降的主要原因是半导体本身的吸收, 是光从半导体射入空气时的反射损失和全反射损失造成的。例如, GaAs 的折射率 $n = 3.6$, 反射损失为 32%。图 1-11 (a) 所示 LED 的全反射损失为 96%, 出射的光只有百分之几。采用图 1-11 (b) 所示 LED 的全反射损失大为减少。图 1-11 (b) 所示 LED 结构的球形部分常用材料为透明树脂, 以降低成本。

(3) 流明效率是评价具有外封装 LED 特性的主要参数, LED 的流明效率高, 指在同样外加电流下辐射可见光的能量较大, 故也称为可见光发光效率。表 1-1 列出几种常见 LED 流明效率 (可见光发光效率)。

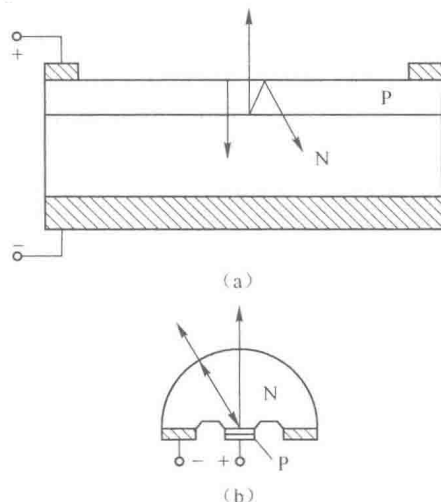


图 1-11 LED 结构示意图

表 1-1 几种常见 LED 流明效率 (可见光发光效率)

LED 发光颜色	λ_p (nm)	材 料	可见光发光效率 (lm/W)	外量子效率 (%)	
				最 高 值	平 均 值
红光	700	GaP: Zn-O	2.4	12	1~3
	660	GaAlAs	0.27	0.5	0.3
	650	GaAsP	0.38	0.5	0.2
黄光	590	GaP: N-N	0.45	0.1	
绿光	555	GaP: N	4.2	0.7	0.015~0.15
蓝光	465	GaN		10	
白光	谱带	GaN + YAG	小芯片 1.6, 大芯片 18		

品质优良的 LED 要求向外辐射的光能量大, 向外发出的光尽可能多, 即外部效率要高。事实上, LED 向外发出光仅是内部发光的一部分, 总的发光效率应为

$$\eta = \eta_i \times \eta_c \times \eta_e \quad (1-11)$$

式中, η_i 为 PN 结区少子注入效率; η_c 为在势垒区少子与多子复合效率; η_e 为外部出光效率 (光取出效率)。

由于 LED 材料折射率很高, $n_i \approx 3.6$ 。当芯片发出光垂直入射晶体材料与空气界面时 (无环氧封装), 被空气反射, 其反射率为 $(n_i - 1)^2 / (n_i + 1)^2 = 0.32$ 。反射出的光仅占 32%, 因有相当一部分光被吸收, 而大大降低了外部出光效率。为了进一步提高外部出光效率 η_e 可采取以下措施。

① 用折射率较高的透明材料 (环氧树脂 $n = 1.55$ 并不理想) 覆盖在芯片表面。



② 把芯片晶体表面加工成半球形。

③ 用 E_g 大的半导体材料作为衬底以减少晶体内光吸收, 若用折射率 $n=2.4 \sim 2.6$ 的低熔点、热塑性大的玻璃作为封帽, 则可使红外 GaAs、GaAsP、GaAlAs 系 LED 效率提高 4 ~ 6 倍。

5) 亮度

亮度是 LED 发光性能的又一重要参数, 具有很强的方向性。亮度是指在某方向上发光体表面亮度等于发光体表面上单位投射面积在单位立体角内所辐射的光通量。亮度的单位为 cd/m^2 或 Nit 。正法线方向的亮度为

$$L_0 = I_0 / A \quad (1-12)$$

若光源表面是理想漫反射面, 亮度 L_0 与方向无关, 为常数。晴朗的蓝天和荧光灯的表面亮度约为 $7\,000 \text{cd}/\text{m}^2$, 从地面看太阳表面亮度约为 $14 \times 10^8 \text{cd}/\text{m}^2$ 。LED 亮度与外加电流密度有关, 通常 LED 的 J_0 (电流密度) 增加, L_0 也近似增大。另外, 亮度还与环境温度有关, 随环境温度升高, η_c (复合效率) 下降, L_0 减小。当环境温度不变, 电流增大足以引起 PN 结结温升高, 温升后, 亮度呈饱和状态。

6) 寿命

LED 的寿命一般很长, 在电流密度 J_0 小于 $1 \text{A}/\text{cm}^2$ 的情况下, 寿命可达 $1\,000\,000 \text{h}$, 即可连续点燃一百多年。这是任何光源均无法与它相比的。LED 的亮度随着工作时间的加长而衰退, 这就是老化。老化的快慢与电流密度 J_0 和老化时间常数 τ 有关。

LED 随着长时间工作而出现的光强或光亮度衰减现象称为老化, 可描述为

$$L_t = L_0 e^{-t/\tau} \quad (1-13)$$

式中, L_t 为 t 时间后的亮度; L_0 为初始亮度。

通常把亮度降到 $L_t = 1/2 L_0$ 所经历的时间 t 称为 LED 的寿命。测定 t 要花很长的时间, 通常推算求得其寿命。测量方法是: 用一定的恒流源驱动 LED, 刚点燃时测得 L_0 , 在点燃 $10^3 \sim 10^4 \text{h}$ 后, 测得 L_t , 代入 $L_t = L_0 e^{-t/\tau}$ 求出 τ , 再把 $L_t = 1/2 L_0$ 代入, 可求出寿命 t 。

长期以来认为 LED 寿命为 10^6h , 这是指单个 LED 在 $I_F = 20 \text{mA}$ 的条件下。随着功率型 LED 开发应用, 国外学者认为以 LED 的光衰减百分比数值作为其寿命的依据。例如, LED 的光衰减为原来的 35%, 寿命大于 $6\,000 \text{h}$ 。

3. LED 芯片热学特性

LED 的光学参数与 PN 结结温有很大的关系, 一般工作条件为小电流 $I_F < 10 \text{mA}$ 或 $10 \sim 20 \text{mA}$ 长时间连续点亮 LED 时, LED 的温升不明显。若环境温度较高, 则 LED 的主波长或 λ_p 就会向长波长漂移, L_0 也会减小。点阵、大显示屏的温升对 LED 的可靠性、稳定性有一定影响。LED 的主波长随温度的关系可表示为

$$\lambda_p(T') = \lambda_0(T_0) + \Delta T_g \times 0.1 \text{nm}/^\circ\text{C} \quad (1-14)$$

由式 (1-14) 可知, 每当 LED 的结温升高 10°C , 则波长向长波漂移 1nm , 且发光的均匀性、一致性变差。这对作为照明用的灯具光源, 且要求小型化、密集排列以提高单位面积上的光强、光亮度的设计来说, 尤其应注意用散热好的灯具外壳或专门通风设备来确保 LED 长期稳定工作。