

LED

驱动电路

设计要点与电路实例

周志敏 纪爱华 编著

LED QUDONG DIANLU

SHEJI YAODIAN

YU DIANLU SHILI



化学工业出版社

LED 驱动电路 设计要点与电路实例

周志敏 纪爱华 编著

LED QUDONG DIANLU
SHEJI YAODIAN
YU DIANLU SHILI



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

LED 驱动电路设计要点与电路实例/周志敏, 纪爱华
编著. —北京: 化学工业出版社, 2012.5

ISBN 978-7-122-13807-1

I. LED… II. ①周… ②纪… III. 发光二极管-电
路设计 IV. TN383.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 046974 号

责任编辑: 宋 辉

文字编辑: 余纪军

责任校对: 陈 静

装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 390 千字 2012 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

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 优点众多，除了寿命长、耗能低以外，控制极为方便，属于典型的绿色照明光源。随着 LED 技术的不断创新和发展，LED 在照明领域得以推广应用。LED 作为一种新型的照明光源技术，其应用前景举世瞩目，LED 被誉为 21 世纪照明最有价值的光源，必将引起照明领域一场新的革命。

LED 照明技术的发展引起了国内外光源界的普遍关注，现已成为具有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诱人的朝阳产业，目前，已形成完整的 LED 照明产业链。

LED 驱动电路的研发、设计是 LED 应用技术创新的关键技术，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 驱动电路设计要点与电路实例有机地结合起来，系统地介绍了从事 LED 驱动电路研发、设计所必备的基础知识，及在驱动电路设计过程中应掌握的设计要点，读者可将书中的 LED 驱动电路设计实例直接或部分修改后，应用于工程设计中。本书在写作中尽量做到针对性和实用性，力求做到通俗易懂和结合实际工程应用，以便于读者掌握 LED 驱动电路的设计要点，以使从事 LED 驱动电路开发、设计、应用的技术人员从中获益。

本书由周志敏、纪爱华编著，周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、刘淑芬、纪达安、纪和平等为本书写作提供了帮助，在此表示衷心的感谢。

由于时间短，水平有限，难免有不当之处，敬请读者批评指正。

编著者

欢迎订阅电子类科技图书

书号	书 名	定价/元
电子技术基础系列图书		
13256	图解音频功率放大电路(配视频光盘)(胡斌)	48
12761	555 时基实用电路解读(门宏)	29
12648	晶体管实用电路解读(门宏)	29
05700	电子技术(路金星)	30
00736	电子技术基础	16
09587	电子技术速学问答	49
04518	电子设计制作完全指导	39
08071	电子元器件选用与检测——本通	29.8
05699	电工电子技术(郭宏彦)(非电类专业适用)	29
03256	电子产品工艺	42
08157	全国大学生电子设计竞赛赛前训练题精选	39
07823	贴片元器件应用及检测技巧	22
10584	贴片元器件应用速查宝典——代码·型号·简明参数	62
03131	电子工艺入门	23
00147	新编通用电子元器件替换手册	95
07050	电力电子技术及应用	36
03984	怎样用万用表检测电子元器件	28
10334	无线电爱好者——制作与维修	58
05437	电子测量仪器使用和维护	36
08974	卫星电视接收实用技术	48
10009	现代蓄电池电动船舶的电力推进技术	59
电路设计		
02713	Altium Designer6 电路图设计百例	38
06582	Cadence 完全学习手册	56
03962	快速精通 Altium Designer6 电路图和 PCB 设计	49
07626	例解 Protel DXP 电路板设计	42
08572	LED 驱动电路设计与工程施工案例精讲	36
10375	LED 照明驱动器设计案例精解	29
06079	绿色照明 LED 实用技术	49
01968	电子电路综合设计实例集萃	30
10507	电子电路识读一本通	39
实用电路		
07718	典型电子电路 160 例	22
9348	新编实用电子电路 500 例	40
9076	开关电路手册	58
9333	化工设备电气控制电路详解	25
02218	实用电器电源电路图册	39
9032	注塑机电路维修(二版)	45
7494	注塑机电机电气电路(附光盘)	45
08048	嵌入式硬件系统接口电路设计	48
02237	传感器应用及电路设计	35
电子图说系列图书		
03734	图说 VHDL 数字电路设计	22
04662	图说模拟电子技术	20
015556	图说数字电子技术	16

续表

书号	书 名	定价/元
电子工程设计与应用百例系列		
04140	51 单片机应用设计百例	36
06201	555 时基电路应用 280 例	32
05405	实用电子制作百例	28
05412	数字集成电路应用 260 例	43
02556	Cadence 电路图设计百例	38
零起点系列图书		
06751	零起点就业直通车——电梯的使用与维护	12
06789	零起点就业直通车——电子元器件的识别及安装调试	15
09426	零起点看图学——电子爱好者入门	26
08243	零起点看图学——万用表检测电子元器件	19
实用电子技术培训读本		
7627	实用电子技术培训读本——电子测量技术问答	24
7613	实用电子技术培训读本——电子技术基础问答	26
7633	实用电子技术培训读本——电子元器件的选用与检测问答	28
集成电路和嵌入式系统		
02230	集成电路设计实例	22
04032	集成电路设计实验和实践	35
07125	集成电路图识读快速入门	25
04384	CMOS 数字集成电路应用百例	36
02948	集成电路测试技术基础(附光盘)	26
8131	现代集成电路测试技术	95
8987	现代数字集成电路设计	35
05781	现代集成电路版图设计	36
8440	运算放大器集成电路手册	98
08959	谐振式高频电源转换器设计	98
7793	DSP 处理器和微控制器硬件电路	58
07486	TMS320F2812DSP 应用实例精讲	48
03621	数字信号处理器 DSP 应用 100 例	39
11583	可编程片上系统 PSoC 设计指南(附光盘)	48
微电子技术		
09629	硅基纳米电子学	45
9258	硅微机械加工技术	58
8236	低成本倒装芯片技术——DCA, WLCSP 和 PBGA 芯片的贴装技术	68
8158	微电子机械系统	28
电动自行车		
08680	电动自行车维修自学速成——电动自行车/三轮车图表速查速修	30
09469	电动自行车维修自学速成——电动自行车充电器/控制器图表速查速修	26
11030	电动自行车/三轮车维修实例精选(附光盘)	58

以上图书由化学工业出版社电气分社出版。如需以上图书的内容简介、详细目录以及更多的科技图书信息,请登录 www.cip.com.cn。

邮购地址:(100011)北京市东城区青年湖南街13号化学工业出版社

服务电话:010-64519685, 64519683(销售中心)

如要出版新著,请与编辑联系。

编辑电话:010-64519262

投稿邮箱:sh_cip_2004@163.com

目录

第1章	LED 芯片选用要点与应用实例	1
1.1	LED 芯片选用要点与应用实例	1
1.1.1	LED 芯片选用要点	1
1.1.2	LED 芯片应用实例	16
1.2	LED 模组选用要点与实例	18
1.2.1	LED 模组选择要点	18
1.2.2	LED 模组应用实例	25
第2章	LED 电路设计要点与实例	34
2.1	LED 串联电路设计要点与实例	34
2.1.1	LED 串联电路设计要点	34
2.1.2	驱动串联 LED 电路设计实例	37
2.2	LED 并联电路设计要点与电路实例	42
2.2.1	LED 并联电路设计要点	42
2.2.2	驱动并联 LED 电路设计实例	43
2.3	LED 串并联电路设计要点与电路实例	49
2.3.1	LED 串并联电路设计要点	49
2.3.2	驱动串并联 LED 电路实例	51
2.4	LED 并联与串联驱动电路特性	62
2.4.1	白光 LED 并联与串联驱动	62
2.4.2	LED 串联与并联驱动电路特性分析与比较	70
第3章	DC/DC LED 驱动器设计要点与实例	77
3.1	低压差 DC/DC LED 驱动器设计要点与实例	77
3.1.1	低压差 DC/DC LED 驱动器设计要点	77
3.1.2	低压差 DC/DC LED 驱动器设计实例	80
3.2	电感式 DC/DC LED 驱动器设计要点与实例	88
3.2.1	电感式 DC/DC LED 驱动器设计要点	88
3.2.2	电感式 DC/DC LED 驱动器设计实例	95
3.3	电荷泵式 LED 驱动器设计要点与实例	106
3.3.1	电荷泵式 LED 驱动器设计要点	106

3.3.2 电荷泵式 LED 驱动器设计实例	118
------------------------------	-----

第4章 LED 驱动器前端电路设计要点与电路实例 135

4.1 AC/DC 电路设计要点与电路实例	135
4.1.1 AC/DC 电路设计要点	135
4.1.2 AC/DC 驱动电路设计实例	142
4.2 功率因数校正电路设计要点与电路实例	148
4.2.1 功率因数校正电路设计要点	148
4.2.2 具有功率因数校正的 LED 驱动电路设计实例	167

第5章 LED 驱动器 PCB 及保护电路设计要点 182

5.1 PCB 布局及布线设计要点	182
5.1.1 PCB 设计流程	182
5.1.2 PCB 布局设计要点	184
5.1.3 PCB 布线设计要点	187
5.2 PCB 热设计	200
5.2.1 PCB 热设计的基本原则	200
5.2.2 PCB 的热设计与热分析技术	207
5.3 LED 驱动器浪涌抑制电路设计要点及热管理	211
5.3.1 浪涌抑制电路设计要点	211
5.3.2 LED 驱动器热管理	223
5.4 LED 驱动器温度补偿及保护电路	234
5.4.1 LED 驱动器温度补偿	234
5.4.2 LED 驱动器及 LED 保护电路	243

参考文献 248

第1章

LED 芯片选用要点与应用实例

1.1 LED 芯片选用要点与应用实例

1.1.1 LED 芯片选用要点

1.1.1.1 LED 芯片的电学特性

(1) I - U 特性

I - U 特性是表征 LED 芯片 PN 结性能的主要参数, LED 的 I - U 特性具有非线性、单向导电性, 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 Oo 或 Oo' 段)。 a 点对应的 U_a 为开启电压, 当 $U < U_a$, 外加电场尚未克服少数载流子扩散而形成的势垒电场, 此时电阻 R 很大, 正向电流很小。开启电压对于不同 LED 其值不同, 砷化镓 (GaAs) 为 1V, 红色磷砷化镓 (GaAsP) 为 1.2V, 磷化镓 (GaP) 为 1.8V, 氮化镓 (GaN) 为 2.5V。

2) 正向工作区 (图 1-1 中的 oa 或 $o'a'$ 段)。工作电流 I_F 与外加电压呈指数关系

$$I_F = I_S(e^{qU_F/K_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中, I_S 为正向饱和电流。

在 $U > U_F$ 的正向工作区, I_F 随 U_F 指数上升

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

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 在 $0.6 \times I_{Fm}$ 以下。

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

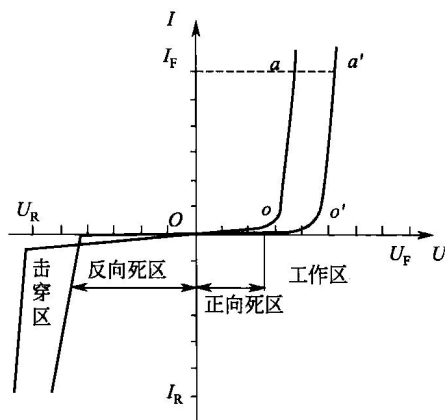


图 1-1 I - U 特性曲线

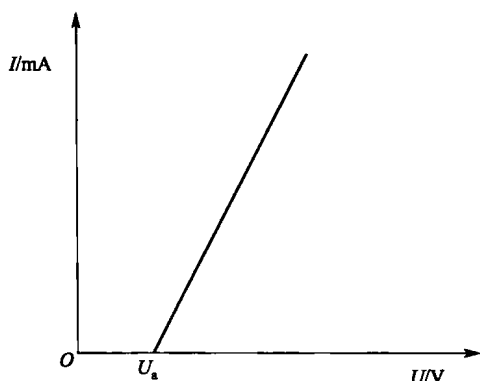


图 1-2 LED 正向伏安特性

在正向电压小于某一值（称为阈值）时，电流极小，LED 不发光。当电压超过某一值后，正向电流随电压迅速增加而使 LED 发光。由 U - I 曲线可以得出 LED 的正向电压、反向电流及反向电压等参数。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 伏安特性模型可用下式表示

$$U_F = U_a + R_s I_F + (\Delta U_F / \Delta T)(T - 25^\circ\text{C}) \quad (1-3)$$

式中， U_a 为 LED 的启动电压； R_s 表示伏安曲线的斜率； T 为环境温度； $\Delta U_F / \Delta T$ 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 U - I 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。因为 LED 的光输出直接与 LED 电流相关，所以在 LED 应用中，应该控制驱动电路的输入电压、环境温度等因素，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。 $U < 0$ 时，PN 结加反偏压，反向电流始终很小；磷化镓 (GaP) LED 的反向漏电流 I_R ($U = -5\text{V}$) 为 0A ，氮化镓 (GaN) LED 的反向漏电流 I_R ($U = -5\text{V}$) 为 $10\mu\text{A}$ 。

4) 反向击穿区 U_R ， U_R 对应的 I_R 为反向漏电流。当反向偏压一直增加使 $U < -U_R$ 时，则出现 I_R 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 U_R 也不同。

(2) C-U 特性

LED 的芯片有 $9\text{mil} \times 9\text{mil}$ ， $10\text{mil} \times 10\text{mil}$ ， $11\text{mil} \times 11\text{mil}$ ， $12\text{mil} \times 12\text{mil}$ 等规格 (mil 为非法定计量单位 $1\text{mil} = 25.4 \times 10^{-6}\text{m}$)，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 - U 特性呈二次函数关系，如图 1-3 所示 (图 1-3 所示的 C - U 特性是由 1MHz 交流信号用 C - U 特性测试仪测得)。

(3) 允许功耗 P

当流过 LED 的电流为 I_F 、管压降为 U_F ，则 LED 的功率消耗为 $P = U_F \times I_F$ 。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：

$$P = K_T (T_j - T_a) \quad (1-4)$$

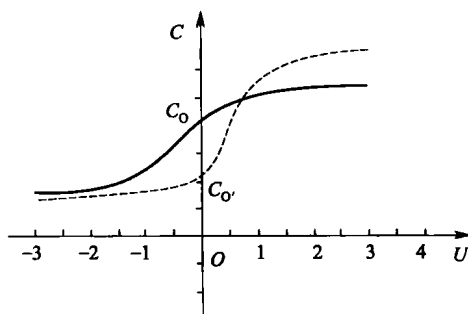


图 1-3 LED C-U 特性曲线

(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 开始发光(上升)和熄灭(衰减)的时间。LED 的上升时间随着电流的增大近似成指数衰减。直接跃迁材料(如 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Px}$)的 LED 响应时间仅几个 ns,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 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;如 GaAs、GaAsP、GaAlAs 的响应时间 $< 10^{-9}\text{s}$, GaP 为 10^{-7}s , 因此它们可应用于 10~100MHz 的高频系统。

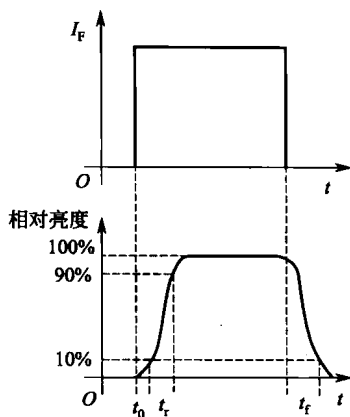


图 1-4 LED 响应时间特性图

1.1.1.2 LED 芯片的光学特性

LED 有红外(非可见)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) 法线发光强度及其角分布

LED 发光强度是表征 LED 在某个方向上的发光强弱,由于 LED 在不同的空间角度发光强度相差很多,因此分析和研究 LED 的发光强度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(法线发光强度)。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,具有很强指向性:位于法线方向发光强度最大,其与水平面交角为 90° 。当偏离法线不同 θ 角度,发光强度也随之变化。

2) 发光强度分布。发光强度随着不同封装形状而使其发光强度依赖方向角,一种在 GaP 基片上生成的 GaAsP-LED 发光分布图,如图 1-5 所示,谱线宽度为 $400\text{\AA}$,光发射的

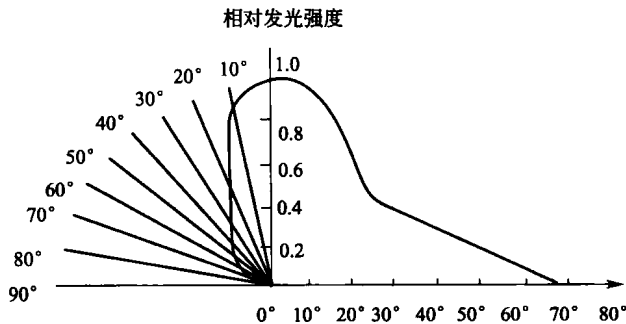


图 1-5 LED 的发光分布图

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。

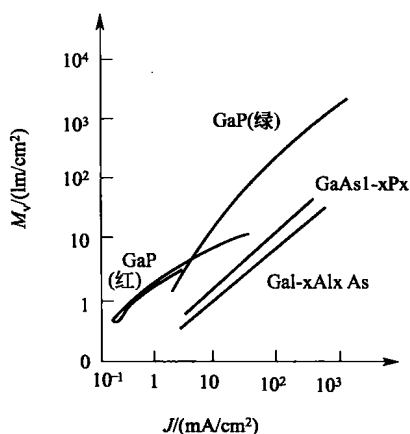


图 1-6 P-N 结发射的光出射度
与输入电流的关系图

大大提高了指向性。当前几种常用圆形 LED 封装的散射角 ($2\theta_1/2$ 角) 为: 5° 、 10° 、 30° 、 45° 。

(2) 发光峰值波长及其光谱分布

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 (纵轴是相对发光强度)。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发光强度最强处 (光输出最大)，与之相对应有一个波长，此波长叫发光峰值波长，用 λ_p 表示。只有单色光才有 λ_p 波长。在图 1-8 中， $\Delta\lambda$ 表征半峰宽度。

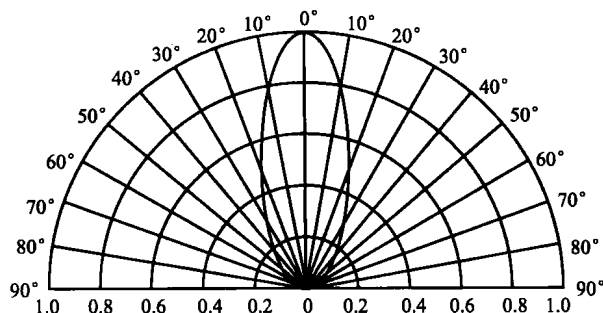


图 1-7 高指向性的角分布图

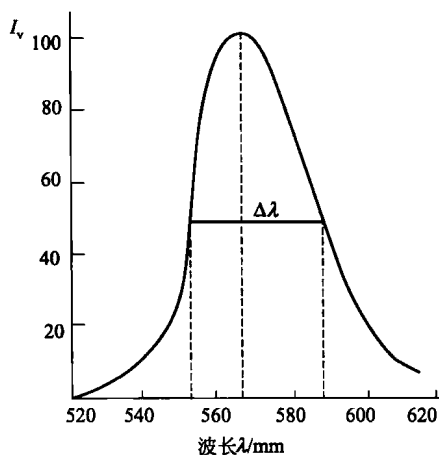


图 1-8 LED 光波长分布图

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 $1/683 \text{ W/sr}$ 时，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 的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 的光谱响应曲线。在图 1-9 中：

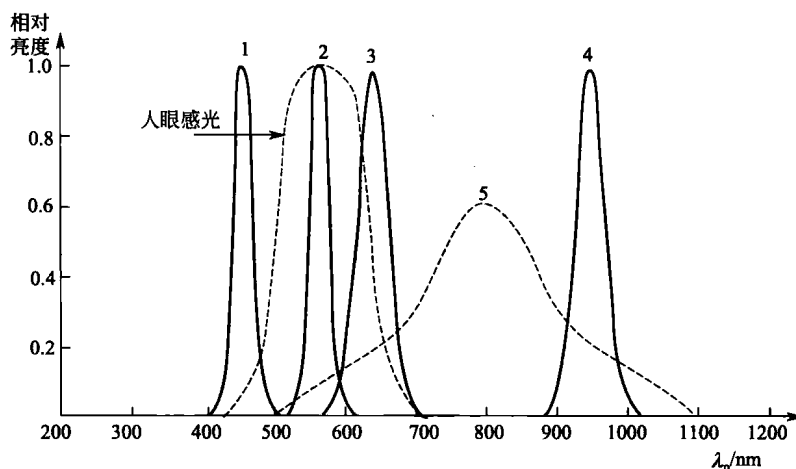


图 1-9 不同化合物半导体及掺杂制得 LED 光谱响应曲线

曲线 1 是蓝色 InGaN/GaNLED，发光谱峰 $\lambda_p = 460 \sim 465 \text{ nm}$ 。

曲线 2 是绿色 GaPN 的 LED，发光谱峰 $\lambda_p = 550 \text{ nm}$ 。

曲线 3 是红色 GaPZn-O 的 LED，发光谱峰 $\lambda_p = 680 \sim 700 \text{ nm}$ 。

曲线 4 是使用 GaAs 材料的 LED，发光谱峰 $\lambda_p = 910 \text{ nm}$ 。

曲线 5 是 Si 光电二极管，通常作光电接收用。

对于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 1.1 eV ，比室温下的半导体材料的能量 E_g 小 0.3 eV 。改变 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Px}$ 中的 x （混晶比）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，温度系数约为 $2 \sim 3 \text{ \AA/}^\circ\text{C}$ 。

在 LED 谱线的峰值两侧 $\pm \Delta \lambda$ 处，存在两个光强等于峰值（最大光强度）一半的点，此两点分别对应 $\lambda_p - \Delta \lambda$ ， $\lambda_p + \Delta \lambda$ 之间宽度叫谱线宽度，也称半功率宽度或半高宽度。半高宽度反映谱线宽窄，即 LED 单色性的参数，LED 半宽小于 40 nm 。光谱半宽度 $2\Delta \lambda$ 表示光谱的纯度，是指图 1-10 中 $1/2$ 峰值光强所对应两波长的间隔。

图 1-10 给出二只不同型号 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的比），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强度轴向（法线）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，而且要注意到红、黄、蓝、绿、白色 LED 等的主要颜色是否纯正。因为在许多场合下，比如交通信号灯对颜色的要求比较

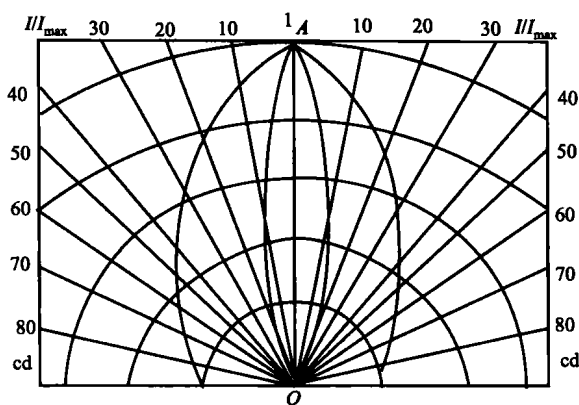


图 1-10 二只不同型号 LED 发光强度角分布

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；甚至有多个峰值波长，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。如 GaP 材料可发出多个峰值波长，而主波长只有一个，它会随着 LED 长期工作，结温升高而使主波长偏向长波长。

(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。 Φ 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 11lm，白光 LED 的 $\Phi \approx 1.5 \sim 1.8\text{lm}$ (小芯片)，对于 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的功率级芯片制成白光 LED，其 $\Phi = 18\text{lm}$ 。

(4) 光视效能和发光效率

1) 光视效能。光视效能在 $\lambda = 555\text{nm}$ 处有一个最大值 680lm/W 。若将光视效能记为 K_λ ，则发光能量 P 与可见光通量 Φ 之间关系为

$$P = \int P_\lambda d\lambda; \Phi = \int K_\lambda P_\lambda d\lambda \quad (1-5)$$

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

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

若输入能量为 $W = U \times I$ ，则发光能量效率为

$$\eta_p = P/W \quad (1-7)$$

若光子能量 $h_c = ev$ ，则

$$\eta \approx \eta_p \quad (1-8)$$

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

$$\eta_{qi} = \eta_F / G \quad (1-9)$$

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发生的光子数，最高可接近 100%。外量子效率 η_{qe} 为

$$\eta_{qe} = \eta_{OUT} / G \tag{1-10}$$

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数，一般只有 0.01%~13%。发射红外的 η_{qe} 可达 15%，而绿光 η_{qe} 则下降到 1% 以下。

光的辐射主要从垂直于结面的 P 型区发出，如图 1-11(a) 所示。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%。如图 1-11(a) 所示 LED 的全反射损失为 96%，出射的光只有百分之几。采用如图 1-11(b) 所示 LED 的全反射损失大为减少。图 1-11(b) 所示 LED 结构的球型部分常用材料为透明树脂，以降低成本。

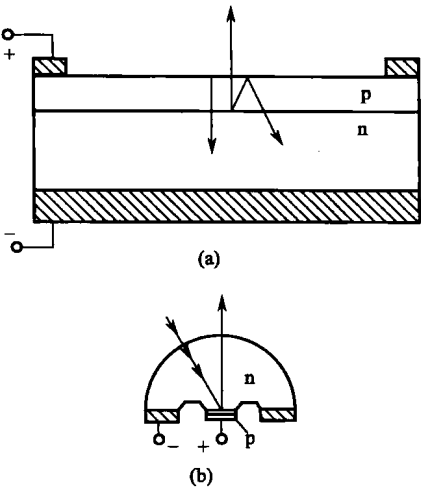


图 1-11 LED 结构示意图

3) 流明效率。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）。

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

$$\eta = \eta_i \eta_c \eta_e \tag{1-11}$$

式中， η_i 向为 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， $\eta_i \approx 3.6$ 。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），而被空气反射，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 大的半导体材料作衬底以减少晶体内部光吸收, 若用折射率 $n=2.4\sim 2.6$ 的低熔点、热塑性大的玻璃作封帽, 可使红外 GaAs、GaAsP、GaAlAs 系 LED 效率提高 4~6 倍。

(5) 亮度

亮度是 LED 发光性能又一重要参数, 具有很强方向性。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 。其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 $7000\text{cd}/\text{m}^2$, 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, 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 结温升高时, 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 1000000h , 即可连续点燃一百多年。这是任何光源均无法与它竞争的。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 发光强度随着长时间工作而出现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, 通常以推算求得寿命。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 (LED 点燃后 $1000 \sim 10000\text{h}$), 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 $I_F = 20\text{mA}$ 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。如 LED 的光衰减为原来 35%, 寿命 $> 6000\text{h}$ 。

1.1.1.3 LED 芯片的热学特性

LED 的光学参数与 PN 结结温有很大的关系, 一般工作在小电流 $I_F < 10\text{mA}$ 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, LED 的主波长或 λ_p 就会向长波长漂移, L_0 也会下降, 尤其是点阵、大显示屏的温升对 LED 的可靠性、稳定性的影响。LED 的主波长随温度关系可表示为

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

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。这对于作为照明用的灯具光源要求小型化、密集排列以提高单位面积上的亮度的设计, 尤其应注意用散热好的灯具外壳或专门通风设备、确保 LED 长期稳定工作。

1.1.1.4 LED 芯片磊晶材料种类

LED 芯片磊晶材料的种类有:

- 1) LPE LiqVid Phase Epitaxy (液相磊晶法) 获得的 GaP/GaN 材料。
- 2) VPE Vapor Phase Epitaxy (气相磊晶法) 获得的 GaAsP/GaAs 材料。

3) MOVPE Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (有机金属气相磊晶法) 获得的 Al-GaInP、GaN 材料。

4) SH GaAlAs/GaAs Single HeterostrVctVre (单异型结构) 获得的 GaAlAs/GaAs 材料。

5) DH GaAlAs/GaAs DoVble HeterostrVctVre (双异型结构) 获得的 GaAlAs/GaAs 材料。

6) DDH GaAlAs/GaAlAs DoVble HeterostrVctVre (双异型结构) 获得的 GaAlAs/GaAlAs 材料。

LED 晶片主要由砷 (AS)、铝 (Al)、镓 (Ga)、铟 (IN)、磷 (P)、氮 (N)、锗 (Si) 这几种元素中的若干种组成。

1.1.1.5 LED 分类

1) LED 按极性分类 可分为 N/P-LED 和 P/N-LED。

2) LED 按发光亮度分类 可分为一般亮度: R、H、G、Y、E 等; 高亮度: VG、VY、SR 等; 超高亮度: VG、VY、VR、VYS、VRF、VE 等; 不可见光 (红外线): R、SIR、VIR、HIRE; 红外线接收管: PTF; 光电管: PD。

3) LED 按出光面特征分类 可分为圆形 LED、方形 LED、矩形 LED、面 LED、侧向 LED、表面安装用微型 LED 等。

圆形 LED 按直径分为 $\phi 2\text{mm}$ 、 $\phi 4.4\text{mm}$ 、 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 8\text{mm}$ 、 $\phi 10\text{mm}$ 及 $\phi 20\text{mm}$ 等, 国外通常把 $\phi 3\text{mm}$ 的 LED 记作 T-1; 把 $\phi 5\text{mm}$ 的记作 T-1(3/4); 把 $\phi 4.4\text{mm}$ 的记作 T-1(1/4)。由半值角大小可以估计圆形 LED 发光强度角分布情况。从发光强度角分布图来分圆形 LED 有三类。

① 高指向性。一般为尖头环氧封装或是带金属反射腔封装, 且不加散射剂。半值角为 $5^\circ \sim 20^\circ$ 或更小, 具有很高的指向性, 可作局部照明光源用, 或与光检出器联用以组成自动检测系统。

② 标准型。通常作指示灯用, 其半值角为 $20^\circ \sim 45^\circ$ 。

③ 散射型。这是视角较大的指示灯, 半值角为 $45^\circ \sim 90^\circ$ 或更大, 添加散射剂的量较大。

4) LED 按组成分类 可分为二元、三元、四元 LED。所谓的二元、三元、四元 LED, 是指 LED 芯片中所含有效元素的数目:

① 二元芯片 (磷、镓)。H、G 等产品 (有两种有效元素)。

② 三元芯片 (磷、镓、砷)。SR、HR、VR 等产品 (有三种有效元素)。

③ 四元芯片 (磷、铝、镓、铟)。SRF、HRF、VRF、VY、HY、VY、VYS、VE、HE、VG 等产品。

三元 LED 芯片指主要含有三种元素的 LED 芯片, 如 HY、HO、IR、SR 等产品, 被称为三元 LED。三元 LED 的可见光亮度一般较四元 (四种元素) LED 要低, 全彩显示幕所用的红光芯片大部分是四元系产品, 其特点是亮度高。三元 LED 芯片和四元 LED 芯片的区分, 主要在于它们的发光区的半导体材料不同。

5) LED 按结构分类

① MB 芯片。Metal Bonding (金属黏着) 芯片属于 UEC 的专利产品, 其特点是采用高散热系数的材料 Si 作为衬底, 散热容易。通过金属层来接合磊晶层和衬底, 同时反射光子,