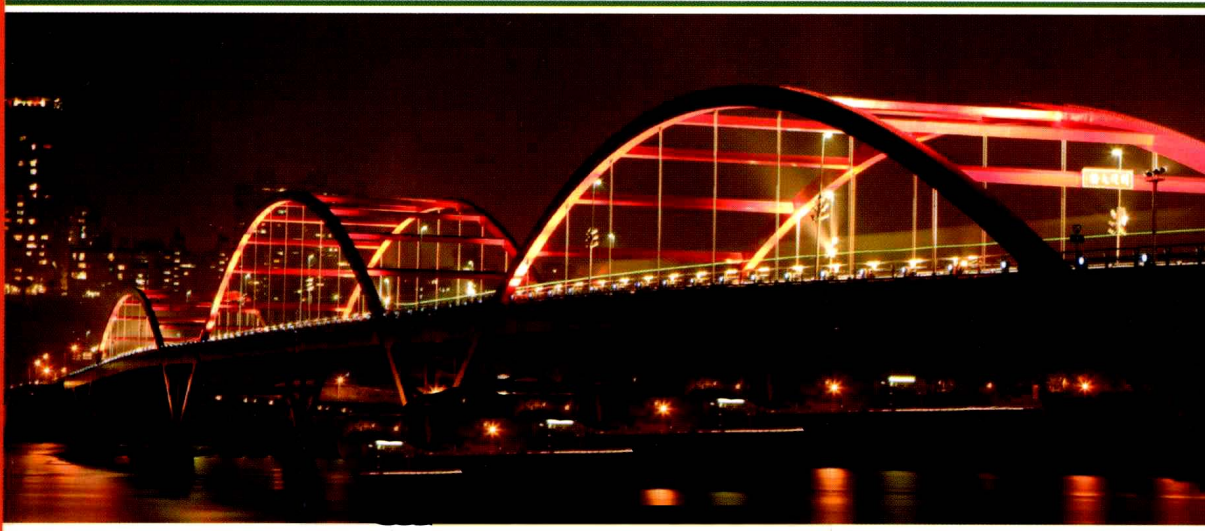




新能源工程应用系列丛书

LED景观照明工程设计与施工技术

◎ 周志敏 纪爱华 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

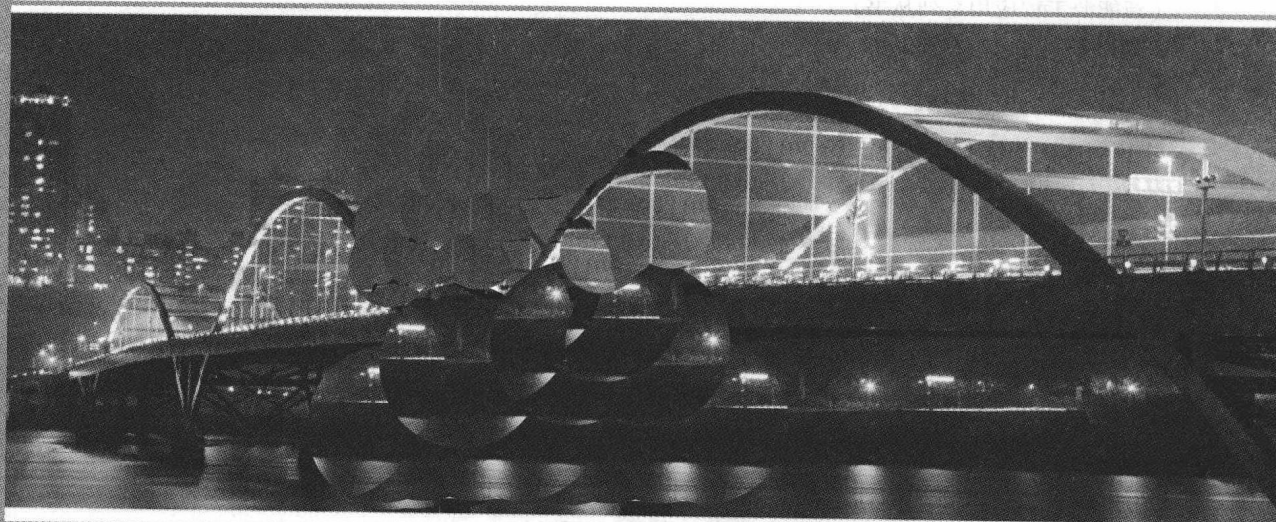
<http://www.phei.com.cn>



新能源工程应用系列丛书

LED景观照明工程设计与施工技术

◎ 周志敏 纪爱华 编著



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书结合我国绿色照明工程计划及国内外 LED 景观照明技术发展动态,以 LED 景观照明技术的工程设计与施工技术为本书的核心内容,全面系统地阐述了 LED 基础知识、城市灯光环境与景观照明设计、LED 景观照明灯具的结构及设计、LED 景观照明工程设计、LED 景观照明工程施工管理与施工技术。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,是从事 LED 景观照明工程设计和工程施工的工程技术人员必备读物。

本书可供从事城市建筑、广场、桥梁、园林等 LED 景观照明等领域的研发、设计、应用人员和 LED 景观照明灯具生产企业的工程技术人员及相关专业高等院校、职业技术院校的师生阅读参考。

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。

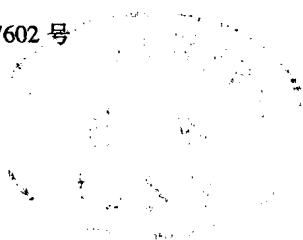
图书在版编目(CIP)数据

LED 景观照明工程设计与施工技术/周志敏,纪爱华编著. —北京:电子工业出版社,2012.1
(新能源工程应用系列丛书)

ISBN 978-7-121-14989-4

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 227602 号



策划编辑:富 军

责任编辑:侯丽平

印 刷: 北京京师印务有限公司
装 订:

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:15 字数:384 千字

印 次:2012 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:39.00 元

凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,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



随着 LED 技术的不断创新和发展,使得 LED 在景观照明领域得以推广应用。在景观照明领域,LED 景观照明灯具因为具有体积小、重量轻、方向性好、节能、寿命长、动态变幻、色彩丰富、抗振等特点而适用于各种恶劣环境条件,LED 景观照明灯必将对传统的景观照明光源市场带来冲击,成为一种很有竞争力的新型景观照明光源。

LED 作为一种新型的景观照明技术,被誉为 21 世纪景观照明最有价值的光源,必将引起景观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具有的优势,因此,LED 景观照明已成为 21 世纪景观照明领域的一种趋势。LED 光源技术、LED 景观照明灯具、控制技术的不断创新,在很大程度上改变了传统景观照明的理念,使 LED 景观照明灯具向更加节能化、健康化、艺术化和人性化的方向发展。

LED 景观照明技术的发展与应用已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 景观照明产品的开发、研制、生产已成为发展前景十分诱人的朝阳产业。目前,由于 LED 景观照明技术的广泛应用及其潜在的市场,LED 景观照明显示出了强大的发展潜力,并已形成一条完整的 LED 景观照明产业链。

在 21 世纪,景观照明设计将会以 LED 光源为主流,为此本书系统地将 LED 景观照明基础知识与 LED 景观照明的工程设计及工程施工技术有机地结合起来,系统地讲述了从事 LED 景观照明工程设计必备的基础知识、LED 景观照明系统设计原则和方法、LED 景观照明工程施工管理与施工技术等内容。本书在写作中尽量做到针对性和实用性,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实际工程应用,以便于读者掌握 LED 景观照明工程的设计方法和最新工程应用技术。

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、纪和平等,本书在写作过程中无论从资料的收集和技术信息交流上都得到了国内外的专业学者、LED 景观照明灯具制造商和 LED 景观照明控制系统集成商的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于时间短,加之作者水平有限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

编著者

目 录



第1章 LED 基础知识	1
1.1 LED 发光原理及主要参数与特性	1
1.1.1 LED 发光原理及发光效率	1
1.1.2 LED 的主要参数与特性	4
1.2 LED 固态照明技术	14
1.2.1 LED 固态光源	14
1.2.2 LED 固态照明技术的发展	21
第2章 城市灯光环境与景观照明设计	24
2.1 城市灯光环境与景观照明	24
2.1.1 城市灯光环境	24
2.1.2 城市景观照明	27
2.2 城市景观照明规划设计	30
2.2.1 城市景观照明规划设计的原则	30
2.2.2 城市景观照明规划设计的要点	32
2.2.3 城市景观照明设计方案	34
2.2.4 城市景观照明规划设计方法	37
2.3 绿色照明工程与 LED 光源	42
2.3.1 绿色照明工程	42
2.3.2 LED 景观照明	47
第3章 LED 景观照明灯具的结构及设计	51
3.1 LED 照明技术及景观照明灯具结构	51
3.1.1 LED 照明技术	51
3.1.2 LED 景观照明灯具结构	57
3.2 LED 景观灯具设计及特性	78
3.2.1 LED 景观灯具设计程序	78
3.2.2 LED 景观照明灯具特性	85
3.2.3 LED 景观照明灯具简介	87
第4章 LED 景观照明工程设计	110
4.1 桥梁 LED 景观照明设计	110
4.1.1 桥梁景观	110
4.1.2 桥梁景观照明	112
4.1.3 桥梁景观照明设计方法	115

4.1.4 城市立交桥景观照明设计方法	124
4.2 城市广场 LED 景观照明设计	128
4.2.1 城市广场定义及分类	128
4.2.2 城市广场灯光环境	132
4.2.3 城市广场 LED 景观照明设计方法	136
4.3 建筑物景观照明的规划设计	143
4.3.1 建筑物景观照明	143
4.3.2 建筑物照明的设计方法	146
4.4 园林景观照明规划设计	153
4.4.1 园林照明要素	153
4.4.2 园林景观照明设计方法	160
4.5 LED 景观照明控制系统	166
4.5.1 照明控制系统类型	166
4.5.2 LED 景观照明控制系统设计	168
第 5 章 LED 景观照明工程施工管理与施工技术	173
5.1 工程造价与施工管理	173
5.1.1 工程造价管理	173
5.1.2 LED 景观照明工程施工管理	184
5.1.3 LED 景观照明工程安全管理	193
5.1.4 LED 景观照明工程质量管理	197
5.2 LED 景观照明工程施工技术	204
5.2.1 LED 景观照明工程施工准备与工艺流程	204
5.2.2 LED 景观照明工程管路敷设	205
5.2.3 LED 景观照明工程管内穿线	210
5.2.4 LED 景观照明工程电缆敷设	212
5.2.5 LED 景观照明工程配电箱安装	219
5.2.6 LED 景观照明工程灯具安装	221
5.2.7 LED 景观照明工程防雷接地、等电位连接、漏电保护	224
参考文献	231

第1章 LED 基础知识



1.1 LED 发光原理及主要参数与特性



1.1.1 LED 发光原理及发光效率

1. LED 的结构

LED 是 Light Emitting Diode 的缩写, 中文译为发光二极管, 顾名思义, 这是一种会发光的半导体组件, 且具有二极管的电子特性。LED 属于半导体光电组件, 除了具有发光的特性之外, 它完全具备半导体二极管整流管的特性, 如果取它的整流特性, 它不但可以完全符合需求, 而且在外加正偏压的情况下, 会发出具有某种波长的光。LED 虽然具有整流二极管的功能, 但通常是利用 LED 的发光特性而非整流特性, 这种发光的特性是发生在二极管电子曲线正偏压部分。

50 年前人们已经了解半导体材料可产生光线的基本知识, 第一个商用二极管产生于 1960 年。LED 的结构主要由 PN 结芯片、电极和光学系统组成。当在电极上加上正向偏压之后, 使电子和空穴分别注入 P 区和 N 区, 当非平衡少数载流子与多数载流子复合时, 就会以辐射光子的形式将多余的能量转化为光能。

20 世纪 80 年代 LED 主要用于显示器件和短距离、低速率的光纤通信用光源, 如各种仪器仪表指示器的文字、数字及其他符号的显示等。由于亮度和颜色等原因, LED 还不能用于通用的照明, 而这正是 LED 未来的一个非常重要的发展方向。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, 所以 LED 的抗振性能好。LED 的结构示意图如图 1-1 所示。

LED 的两根引线中较长的一根为正极, 应接电源正极。有的 LED 的两根引线一样长, 但管壳上有一凸起的小舌, 靠近小舌的引线是正极。与白炽灯和氖灯相比, LED 的特点是: 工作电压低; 工作电流很小; 抗冲击和抗振性能好, 可靠性高, 寿命长; 通过调制 LED 的电流强弱可以方便地调制其发光的强弱。

LED 的发光过程包括三部分: 正向偏压下的载流子注入、复合辐射和光能传输。微小

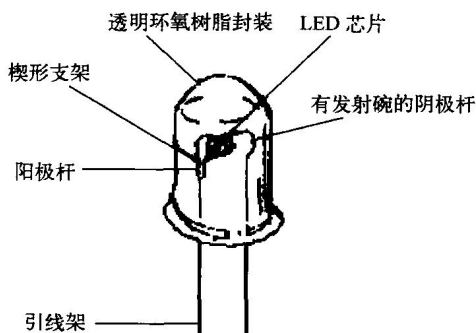


图 1-1 LED 的结构示意图

的半导体芯片被封装在洁净的环氧树脂中,当电子经过该芯片时,带负电的电子移动到带正电的空穴区域并与之复合,电子和空穴消失的同时产生光子。电子和空穴之间的能量(能隙)越大,产生的光子的能量就越高。光子的能量反过来与光的颜色对应,在可见光的频谱范围内,蓝色光、紫色光携带的能量最多,桔色光、红色光携带的能量最少。由于不同的材料具有不同的带隙,从而能够发出不同颜色的光。

不同的半导体材料中电子和空穴所处的能量状态不同,当电子和空穴复合时释放出的能量也不同,释放出的能量越多,则发出的光的波长越短。常用的是发红光、绿光或黄光的LED,磷化镓二极管发红光,磷化镓二极管发绿光,碳化硅二极管发黄光。它们的材料和主要特性见表1-1。

表1-1 红光、绿光或黄光LED的材料和主要特性

类 型	发 光 颜 色	最大工作电流(mA)	一般工作电流(mA)	正 向 压 降(V)
磷化镓红色LED	红	50	10	2.3
磷化镓LED	红	50	10	1.5
碳化硅LED	黄	50	10	6
磷化镓绿色LED	绿	50	10	2.3

LED的正向伏安特性曲线很陡,使用时必须串联限流电阻以控制通过LED的电流。在直流电路中,限流电阻 R 可用下式计算:

$$R = (E - V_F) / I_F \quad (1-1)$$

式中, E 为电源电压; V_F 为LED的正向压降; I_F 为LED的正向工作电流。

在交流电路中,限流电阻 R 可用下式估算:

$$R = (V_e - V_F) / 2I_F \quad (1-2)$$

式中, V_e 为交流电源电压的有效值。

2. LED的发光原理

LED是由Ⅲ-V族化合物,如GaAs(砷化镓)、GaP(磷化镓)、GaAsP(磷砷化镓)等半导体制成的,其核心是PN结。因此它具有一般PN结的 I - V 特性,即正向导通,反向截止、击穿特性。此外,在一定条件下,它还具有发光特性。

PN结根据其端电压构成一定的势垒;当加正向偏置时势垒下降,P区和N区的多数载

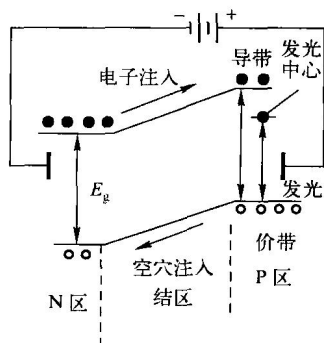


图1-2 LED发光原理示意图

流子向对方扩散。由于电子迁移率比空穴迁移率大得多,出现大量电子向P区扩散,构成对P区少数载流子的注入。这些电子与价带上的空穴复合,复合时得到的能量以光能的形式释放。这就是LED发光的原理,其示意图如图1-2所示。

PN结对电子和空穴具有不同高度的势垒,这两个势垒均很小,但空穴的势垒比电子的势垒小得多,而且空穴不断从P区向N区扩散,得到高的注入效率。N区的电子注入P区的速率却较小。这样N区的电子就跃迁到价带与注入的空穴复合,发射出由N型半导体能隙所决定的辐射。由于P区的能隙大,光辐射无法发到导带,因此不发生光的吸收,从而可直

接透射到 LED 外,减少了光能的损失。

假设发光是在 P 区中发生的,那么注入的电子与价带空穴直接复合而发光,或者先被发光中心捕获后,再与空穴复合发光。除了这种发光复合外,还有些电子被非发光中心(这个中心介于导带、价带中间附近)捕获,而后再与空穴复合,每次释放的能量不大,不能形成可见光。发光的复合量相对于非发光复合量的比例越大,光量子效率越高。由于复合是在少子扩散区内发光的,所以光仅在靠近 PN 结面几微米以内产生。理论和实践证明,发光的波长或频率取决于选用的半导体材料的能隙 E_g , E_g 的单位为电子伏 (eV):

$$E_g = h\nu/q = hc/(\lambda q) \quad (1-3)$$

$$\lambda = hc/(qE_g) = 1240/E_g \text{ (nm)} \quad (1-4)$$

式中, v 为电子运动速度; h 为普朗克常数; q 为载流子所带电荷; c 为光速; λ 为发光的波长。

半导体可分为直接能隙和间接能隙两种,LED 大都采用直接能隙材料,这样可使电子直接从导带跃迁到价带与空穴复合而发光,有很高的效率。反之,采用间接能隙材料,其效率就低一些。若能产生可见光 [波长在 380 nm (紫光) ~ 780 nm (红光)], 半导体材料的 E_g 应在 3.26 ~ 1.63 eV 之间。LED 的输出光谱决定其发光颜色及光辐射纯度,也反映出半导体材料的特性。表 1-2 列举了常用半导体材料及其发射的光波波长等参数。

表 1-2 常用半导体材料及其发射的光波波长等参数

半导体材料类型	GaAs			GaP		GaAsP	GaAlAs	GaN; Zn
系列	HG400	HG500	HG520			BT	BL	
发光颜色	红外	红外	红外	红	绿	红	红	蓝
发光波长 nm	940	930	930	695	555	650	680	490
发光亮度 mcd				>0.3	>1	>0.4	>0.4	2
发光功率 mW	>1	>10	>100					
正向电压 V	<1.3	<1.6	<2	<1.8	<2	<2.5	<2.5	7.5
工作电流 mA	30	200	300	10	10	10	10	10
最大工作电流 mA	50	200	300	50	50	50	50	
反向电流 μ A	<50					<50	<50	
反向耐压 V	>5					>5	>5	
最大功率 mW	75	300				100	100	

LED 正向伏安特性曲线比较陡,在正向导通之前 LED 几乎无电流流过。当电压超过开启电压时,电流就急剧上升。因此,LED 属于电流控制型半导体器件,其发光亮度 L (单位 cd/m^2 , 读作坎 [德拉] 每平方米) 与正向电流 I_F 近似成正比:

$$L = KI_F^m \quad (1-5)$$

式中, K 为比例系数。

在小电流范围内 ($I_F = 1 \sim 10\text{mA}$), $m = 1.3 \sim 1.5$ 。当 $I_F > 10\text{mA}$ 时, $m = 1$, 式 (1-5) 可简化为:

$$L = KI_F \quad (1-6)$$

即,LED 亮度与正向电流成正比,LED 的正向电压与正向电流与管芯的半导体材料有关。

使用时应根据所要求的显示亮度来选取合适的 I_F 值, 既保证亮度适中, 也不会损坏 LED。若电流过大, 就会烧毁 LED 的 PN 结。

对于 LED 而言, 晶格的匹配是一个重大的课题, 因为对于大部分 III-V 族半导体而言, 并没有刚好适合的基板可承载上方的垒晶 (heteroepitaxy) 层, 而成长的垒晶层的晶格大小必须与基板的晶格匹配, 才不至于因应力的因素导致晶格缺陷, 否则组件发出的光子被晶格缺陷吸收, 大幅降低组件的发光效率。最早的 III-V 族半导体异构垒晶是采用 GaAs 作基板, 并在其上成长 GaAlAs 垒晶层, 因为这两种材料的晶格非常近似, 所以垒晶层与基片之间的应力极小, 因此研发过程得以顺利进行。但是后来陆续发展出来的垒晶成长在 GaAs 基板上, 或是 GaAs_xP_{1-x} 成长在 GaP 基板上, 都因应力而存在问题。因此在光电材料中, 往往采用调整二元、三元甚至四元材料的比率的方法, 调整不同大小的多元原子的比例来匹配基片的晶格结构, 此方法同时也可通过调整半导体的能隙大小, 而调整发光组件发光的波长, 采用这样的方法在垒晶参数的调整上复杂许多, 因此可以看出, 垒晶技术可以称为半导体发光组件技术中的核心。



1.1.2 LED 的主要参数与特性

LED 是利用化合物材料制成 PN 结的光电器件。它具备 PN 结结型器件的电学特性 (I - V 特性、 C - V 特性) 和光学特性 (光谱响应特性、发光光强指向特性、时间特性) 及热学特性。

1. LED 的电学特性

1) I - V 特性

I - V 特性是表征 LED 芯片 PN 结性能的主要参数, LED 的 I - V 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 1-3 所示。

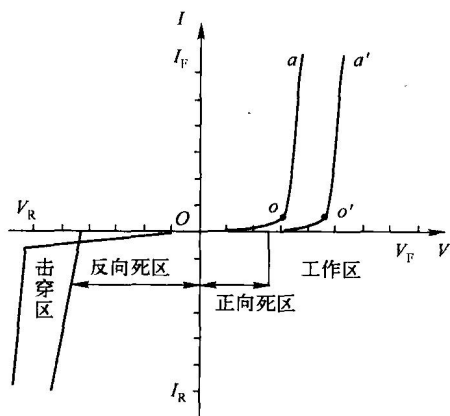


图 1-3 I - V 特性曲线

① 正向死区 (图 1-3 中的 oa 或 $o'a'$ 段)。 a 点对应于 V_a 为开启电压, 当 $V < V_a$ 时, 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; 开启电压对于不同 LED 其值不同, GaAs 为 1 V, 红色 GaAsP 为 1.2 V, GaP 为 1.8 V, GaN 为 2.5 V。

② 正向工作区。工作电流 I_F 与外加电压呈指数关系:

$$I_F = I_S (e^{qV_F/KT} - 1) \quad (1-7)$$

式中, I_S 为反向饱和电流。

在 $V > V_F$ 的正向工作区, I_F 随 V_F 指数上升:

$$I_F = I_S e^{qV_F/KT} \quad (1-8)$$

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。

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 在 1.4 ~ 3 V。在环境温度升高时, 正向工作电压 V_F 将下降。

在正向电压小于某一值(叫阈值)时,电流极小,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 I - V 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 1-4 所示。LED 伏安特性模型可用下式表示:

$$V_F = V_{\text{turn-on}} + R_s I_F + (\Delta V_F / \Delta T)(T - 25^\circ\text{C}) \quad (1-9)$$

式中, $V_{\text{turn-on}}$ 为 LED 的启动电压; R_s 为伏安曲线的斜率; 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 而言典型值为 $-2\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

从 LED 的 I - V 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。 $V < 0$ 时 PN 结加反偏压; 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 $V < -V_R$, V_R 称为反向击穿电压, V_R 电压对应的 I_R 为反向漏电流。当反向偏压一直增加使 $V < -V_R$ 时,则 I_R 突然增加而出现击穿现象。由于所用化合物材料种类不同,各种 LED 的反向击穿电压 V_R 也不同。

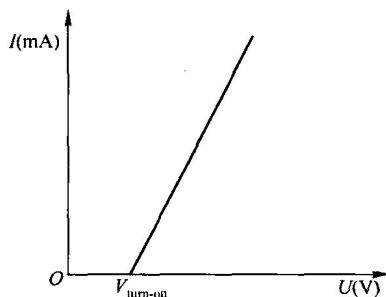


图 1-4 LED 的正向伏安特性

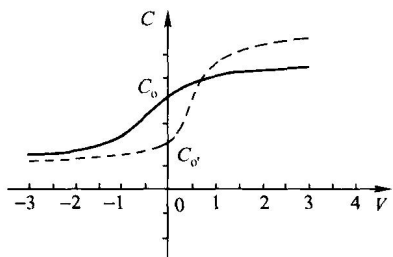


图 1-5 C-V 特性曲线

2) C-V 特性

LED 的芯片有 $9\text{mil} \times 9\text{mil}$ ($250\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$), $10\text{mil} \times 10\text{mil}$, $11\text{mil} \times 11\text{mil}$ ($280\mu\text{m} \times 280\mu\text{m}$), $12\text{mil} \times 12\text{mil}$ ($300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$) 几种规格,故 PN 结面积大小不一,其结电容(零偏压)近似为 $C \approx n^+ \text{pF}$ 。LED 的 C - V 特性呈二次函数关系,如图 1-5 所示(C - V 特性是由 1MHz 交流信号用 C - V 特性测试仪测得的)。

3) 允许功耗 P

当流过 LED 的电流为 I_F 、管压降为 V_F ,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:

$$P = K_T (T_j - T_a) \quad (1-10)$$

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地成指数衰减。直接跃迁的材料如 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Px}$ 的响应时间仅几纳秒,而间接跃迁材料 GaP 的响应时间则为 100ns 。

LED 可利用交流供电或脉冲供电获得调制光或脉冲光,调制频率可高达几十兆赫兹。

采用这种直接调制技术使 LED 在相位测距仪、能见度仪及短距离通信中得到应用。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 1-6 中的 t_r 、 t_f 。图 1-6

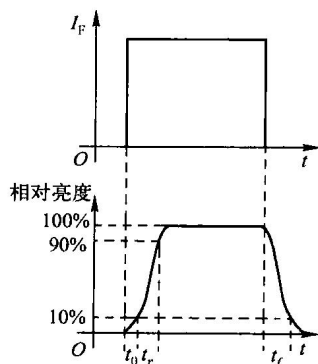


图 1-6 LED 响应时间特性图

中的 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 是指接通电源使发光亮度达到正常的 10% 开始,一直到发光亮度达到正常值的 90% 所经历的时间。

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

不同材料制得的 LED 响应时间各不相同,如 GaAs、GaAsP、GaAlAs 的响应时间 $< 10^{-9}$ s, GaP 为 10^{-7} s。因此它们可应用于 10 ~ 100 MHz 的高频系统。

2. LED 的光学特性

LED 有非可见光(红外光)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 发光强度是表征它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,所以研究了 LED 的发光强度分布特性。这个参数实际意义很大,直接影响到 LED 显示装置的最小观察角度。

① 发光强度(法向发光强度)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,故都具有很强指向性:位于法向方向发光强度最大,其与水平面交角为 90° 。当偏离法向方向不同角度时,发光强度也随之变化。

② 发光强度分布。一种在 GaP 基片上生成 GaAsP LED 的发光分布温度图如图 1-7 所示,谱线宽度为 $400\text{\AA}$,发射的角度宽度约为 22° ,LED 的光通量是集中在一定角度内发射出去的。

③ 光出射度。图 1-8 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, GaAsI-xPx 和 GaI-xAlxAs LED 具有良好的线性,其他两种则相当差。

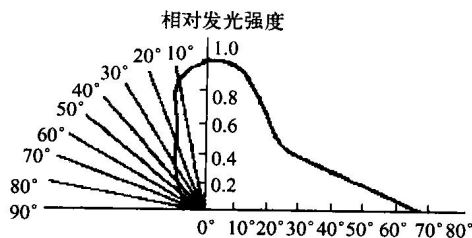


图 1-7 发光分布温度图

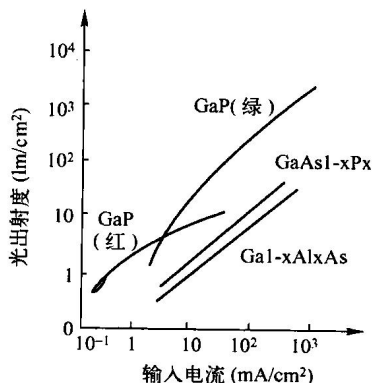


图 1-8 PN 结发射的光出射度与输入电流的关系

④ 发光强度的角分布。发光强度的角分布是描述 LED 发光在空间各个方向上的发光强度分布。它主要取决于封装的工艺（包括支架、模粒头、环氧树脂中是否添加散射剂）。为获得如图 1-9 所示的高指向性的角分布图，应采取以下措施：

- LED 管芯位置应离模粒头远些。
- 使用圆锥状（子弹头）的模粒头。
- 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 $2\theta_1/2 = 6^\circ$ 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（ $2\theta_1/2$ 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 1-10 所示分布。由图 1-10 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，此波长叫峰值波长，用 λ_0 表示。只有单色光才有 λ_0 波长。

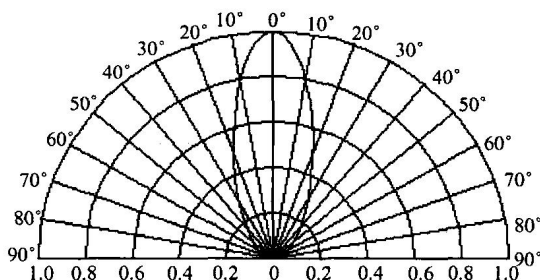


图 1-9 高指向性的角分布图

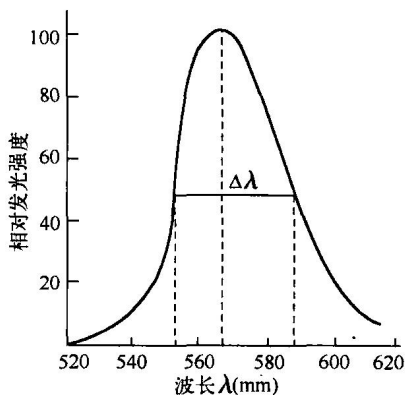


图 1-10 LED 光波长分布图

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，器件的有关主波长、纯度等相关色度参数也随之确定。

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，而与器件的几何形状、封装方式无关。图 1-11 绘出几种由不同化合物半导体及掺杂制得的 LED 光谱响应曲线。在图 1-11 中：

曲线 1 是蓝色 InGaN/GaN 的 LED，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，通常做光电接收用。

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能隙 E_g 小。例

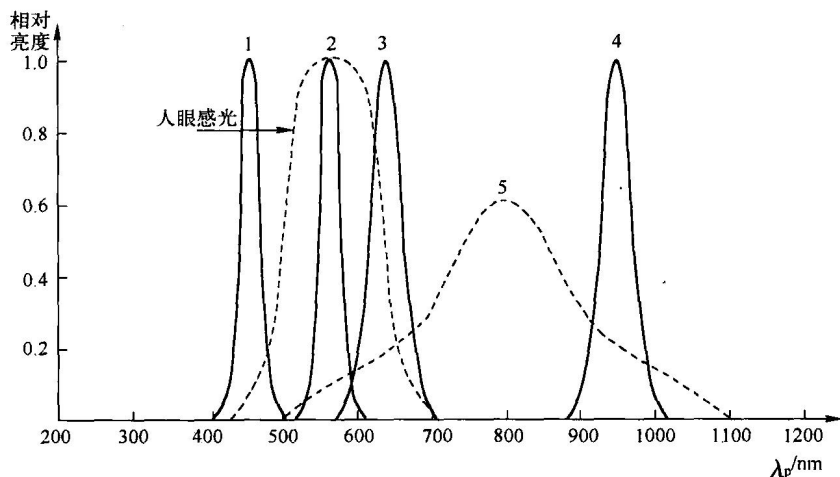


图 1-11 不同化合物半导体及掺杂制得的 LED 光谱响应曲线

如, GaAs 发射的峰值波长所对应的光子能量为 1.1 eV , 比室温下的能隙 E_g 小 0.3 eV 。改变 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Px}$ 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 提供的是半宽度很大的单色光。由于半导体的能隙随温度的上升而减小, 因此它所发射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, 存在两个发光强度等于峰值 (最大光强度) 一半的点, 此两点分别对应 $\lambda_p - \Delta\lambda$, $\lambda_p + \Delta\lambda$, 它们之间的宽度叫谱线宽度, 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 。光谱半高宽度 $2\Delta\lambda$ 表示 LED 的光谱纯度, 是指图 1-12 中 $1/2$ 峰值发光强度所对应两波长的间隔。

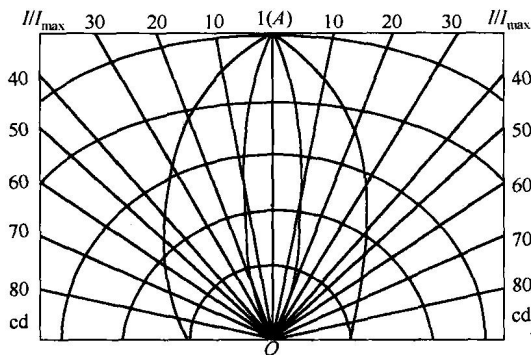


图 1-12 两只不同型号 LED 发光强度角分布的情况

图 1-12 给出二只不同型号 LED 发光强度角分布的情况, 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 1-12 可以得到半值角或视角值。半值角 $\theta_1/2$ 是指以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, 而且要注意到红、黄、蓝、绿、白色 LED 等主要的颜色是否纯正。因为在许多场合下, 比如交通信号灯对颜色的要求比较严格, 不过据观察现在我国的一些 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是有意义的。有的 LED 发光不是单一色, 即不仅有一个峰值波长, 而是有多个峰值, 并非单色光。为了描述 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 发出的主要单色光的波长。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, 结温升高而主波长偏向长波。

3) 光通量

光通量 Φ 是表征 LED 总光输出的辐射能量, 它标志着 LED 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 1 lm, 白光 LED 的 $\Phi \approx 1.5 \sim 1.8$ lm (小芯片), 对于 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的功率级芯片制成的白光 LED, 其 $\Phi = 18$ lm。

4) 发光效率和视觉灵敏度

① LED 效率有内部效率 (PN 结附近由电能转化成光能的效率) 与外部效率 (辐射到外部的效率)。内部效率只是用来分析和评价芯片优劣的特性。LED 最重要的特性是辐射出的光能量 (发光量) 与输入电能之比, 即发光效率。

② 视觉灵敏度。人的视觉灵敏度在 $\lambda = 555 \text{ nm}$ 处有一个最大值 680 lm/W 。若视觉灵敏度记为 K_λ , 则发光能量 P 与可见光通量 Φ 之间的关系为:

$$P = \int P_\lambda d\lambda \Phi = \int K_\lambda P_\lambda d\lambda \quad (1-11)$$

③ 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:

$$\eta = \text{发射的光子数} / \text{PN 结载流子数} = (e/hcI) \int \lambda P_\lambda d\lambda \quad (1-12)$$

若输入能量为 $W = VI$, 则发光能量效率为:

$$\eta_p = P/W \quad (1-13)$$

若光子能量 $hc = ev$, 则

$$\eta \approx \eta_p \quad (1-14)$$

则总光通为:

$$\Phi = (\Phi/P) P = K\eta_p W \quad (1-15)$$

式中, $K = \Phi/P$ 。

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 , 但是也有用内量子效率 η_{qi} 和外量子效率 η_{qe} 来表征的。内量子效率 η_{qi} 为:

$$\eta_{qi} = NT/G \quad (1-16)$$

式中, NT 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:

$$\eta_{qe} = NT/G \quad (1-17)$$

式中, NT 为从 LED 输出光子的效率。

这样 η_{qi} 等于注入每个电子空穴对所产生的输出到器件外的有效光子数, 一般只有 0.01% ~ 13%。发射红外光的 η_{qe} 可达 15%, 而发射绿光的 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, 是由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%, 采用图 1-13 (a) 所示结构的全反射损失为 96%,

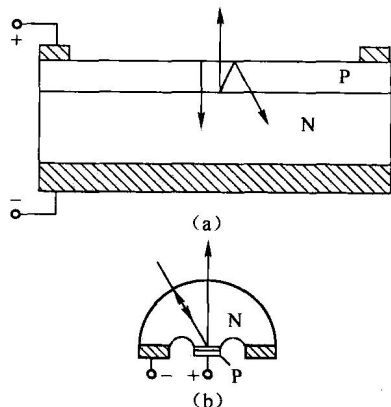


图 1-13 LED 结构示意图

出射的光只有百分之几。采用图 1-13 (b) 的结构, 全反射损失大大减少。图 1-13 (b) 的球形部分常用材料为透明树脂, 以降低成本。

④ 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, 故也叫可见光发光效率。表 1-3 列出几种常见 LED 流明效率 (可见光发光效率)。

表 1-3 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:

$$\eta = \eta_i \times \eta_c \times \eta_e \quad (1-18)$$

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的复合效率; 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), 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%, 鉴于晶体本身对光有相当一部分的吸收, 于是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:

- 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。
- 把芯片晶体表面加工成半球形。
- 用 E_g 大的半导体材料作衬底以减少晶体内部光吸收。若采用 $n = 2.4 \sim 2.6$ 的低熔点、热塑性大的玻璃作封帽, 可使红外 (GaAs、GaAsP、GaAlAs) 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。指定某方向上发光体表面亮度等于发光体表面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:

$$L_0 = I_0 / A \quad (1-19)$$

式中, L_0 为亮度; I_0 为漫射面在法线方向的辐射强度或发光强度; A 为被照面的面积。

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, 一般的 LED, 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, 温升后亮度呈饱和状态。

在 1970—1995 年间, LED 一直在逐渐发展以期提供更高级别的亮度。但是, 自从 20 世纪 90 年代中期, 伴随着蓝光和白光 LED 的出现以及器件平均光亮度的成倍增加, LED 创新的步伐才大大加快。LED 亮度的提高主要归功于基底材料的进步, 从最初的磷砷化镓 (GaAsP) 产品开始, 在 20 世纪 70 年代末转向掺杂氮的 GaAsP 和镓磷 (GaP), 实现了最早的黄光和绿光 LED; 随后利用单双异质砷铝化镓 (GaAlAs) 在 20 世纪 90 年代初实现了超过 0.1lm 的光通量。自 20 世纪 90 年代以来, 各种铟镓组合成为更新颖、更明亮的彩色 (包括蓝色) LED 的基底材料。尽管 LED 经历了上述发展, 但仍然存在几个问题, 其中一个现象就是基底往往会吸收 LED 产生的大部分光线。围绕这一问题有几种解决方法, Lumileds 公司利用获得专利的透明铝铟磷化镓 (AlInGaP) 基底来解决这个难题。另一种方法是在基底上添加 Bragg 反射器光栅层, 这样做所提供的 LED 亮度是一个吸光基底所能提供的两倍, 但是会损失所有以 90° 角发射的光线。Vishay 公司利用一种有机镜面附着 (OMA) 技术对此方法进行了改进, 该技术将一个镜面附着在硅基底上。所有到达镜面的光线从器件的正面反射, 因而可以达到与利用透明基底相同的光亮级别, 大约是标准 LED 的四倍。

6) 寿命

LED 的寿命一般很长, 电流密度小于 1 A/cm^2 的情况下, 寿命可达 1 000 000 小时, 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和老化时间常数 τ 有关。

LED 发光亮度随着长时间工作而出现发光强度或光亮度衰减现象称为老化, 器件老化程度与外加恒流源的大小有关, 可描述为:

$$L_t = L_0 e^{-t/\tau} \quad (1-20)$$

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, 点燃 $10^3 \sim 10^4$ 小时后, 先后测得 L_0 、 $L_t = 1\ 000 \sim 10\ 000$, 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 。

长期以来总认为 LED 寿命为 10^6 小时, 这是指单个 LED 在 $I_F = 20\text{ mA}$ 的情况下。随着功率型 LED 的开发应用, 国外学者以 LED 的光衰减百分比数值作为其寿命的依据, 如 LED 的光衰减为原来的 35%, 寿命大于 6000 h。

3. LED 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 $I_F < 10\text{ mA}$, 或者 $10 \sim 20\text{ mA}$ 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 LED 的温升对 LED 的可靠性、稳定性有影响。LED 的主波长随温度关系可表示为:

$$\lambda_p(T') = \lambda_0(T_0) + \Delta T_g \times 0.1\text{ nm}/^\circ\text{C} \quad (1-21)$$

由式 (1-21) 可知, 每当结温升高 10°C , 则波长向长波漂移 1 nm, 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发光强度、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。