



新 能 源 及 高 效 节 能 应 用 技 术 丛 书

白光LED驱动电路 设计与应用实例



周志敏 纪爱华 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



新能源及高效节能应用技术丛书

白光LED驱动电路 设计与应用实例

周志敏 纪爱华 编著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

白光LED驱动电路设计与应用实例 / 周志敏, 纪爱华编
著. —北京: 人民邮电出版社, 2009. 9
(新能源及高效节能应用技术丛书)
ISBN 978-7-115-20096-9

I. 白… 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(2009)第119145号

内 容 提 要

本书结合我国绿色照明工程计划及国内外LED照明技术发展动态,系统地阐述了白光LED的基础知识和LED照明最新应用技术,主要内容包括LED的发展历程与应用领域、LED的发光原理和特性参数、白光LED技术、白光LED驱动电源、白光LED驱动电路设计实例等内容。

本书题材新颖,内容丰富,文字通俗易懂,具有较高的实用性,可供电子、信息、航天、汽车、国防及家电等领域从事白光LED照明研发、设计和应用的工程技术人员阅读,也可供高等院校相关专业的师生参考。

新能源及高效节能应用技术丛书

白光LED驱动电路设计与应用实例

-
- ◆ 编 著 周志敏 纪爱华
责任编辑 刘 朋
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
中国铁道出版社印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 19.75
字数: 482千字
印数: 1—4 000册
 - 2009年9月第1版
2009年9月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-20096-9

定价: 39.00元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

丛 书 前 言

近几年,我国政府在新能源开发、环境保护和资源节约方面相继出台了一系列方针政策和法律法规,实施了“金太阳”、绿色照明等一批重点工程,收到了较大成效。从我国目前的实际情况来看,解决能源短缺问题主要应从两方面入手:一是开发和利用新的能源,尤其是可再生清洁能源;二是提高能源的利用效率,即能效。

新能源是国家“十一五”规划重点要求发展的产业,政策对其扶持力度很大。2009年3月,由科技部、国家发展和改革委员会等部门联合举办的2009年中国国际节能和新能源科技博览会上集中展示了节能减排和新能源科技的重大成果,引起了国内外的广泛关注。2009年5月全国财政新能源与节能减排工作会议指出,国家财政要全力支持新能源发展和节能减排工作,重点抓好支持风电规模化发展、加快启动国内光伏发电市场、开展节能与新能源汽车示范推广试点等十项工作。从技术的角度看,太阳能、风能等新能源的一些关键技术已经成熟并具有较高的推广价值,以发光二极管、IGBT等为代表的高效半导体器件的制造工艺已取得重大突破,变频器、软启动器、伺服驱动器等节能设备的节能效果日益得到了社会各界的认可并获得广泛应用。

为了在我国进一步推广和普及绿色能源及高效节能技术的应用,我们结合当前技术热点和应用热点,组织有关专家、学者和技术人员专门编写了“新能源及高效节能应用技术丛书”。本丛书以介绍目前国内外绿色能源及高效节能领域内的新产品、新工艺、新技术和新方法为主,在编写时力求突出实用性和先进性,力争做到题材新颖,技术先进,内容丰富,具有较高的实用价值。我们希望本丛书的出版能够在解决我国绿色能源及高效节能技术应用中的一些实际问题,促进我国“十一五”规划确定的资源节约目标得以实现,推动全社会采用高效节能新技术和绿色能源,提高能源利用效率,保护和改善环境,促进经济社会全面协调可持续发展方面起到积极的推动作用。

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、能耗低之外,控制极为方便,只要调整电流就可以随意调光,属于典型的绿色照明光源。随着大功率白光 LED 的开发成功,LED 在照明领域得以推广应用,使照明技术面临一场新的革命。就白光 LED 技术发展而言,白光 LED 必将成为一种很有竞争力的新型电光源。LED 作为新型固态光源还具有启动时间短、无紫外线、色彩丰富饱满、可全彩变化、低压安全等特点,应用非常灵活,可以做点、线、面各种形式形态的轻薄短小的光源产品。

白光 LED 技术的发展引起了国内外光源界的普遍关注,现已成为一种具有广阔发展前景和重大影响力的高新技术产品。近年来随着城市建设步伐的加快以及电子信息产业的高速发展,人们对光源的需求与日俱增,白光 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。我国绿色照明工程的组织实施极大地促进了白光 LED 驱动技术的创新和发展,使得白光 LED 在照明应用领域得到了大量使用,白光 LED 市场显示出了强大的发展潜力。

本书紧紧围绕我国“十一五”能源规划的方针政策和“中国绿色照明工程”的宗旨,有机地把白光 LED 基础知识与白光 LED 驱动技术、应用技术结合起来,并着重介绍了数十种基于线性电源、AC/DC 开关电源、电感式 DC/DC 开关电源、电容式 DC/DC 开关电源(电荷泵)的白光 LED 驱动电路设计实例,具有较高的参考价值。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力求做到通俗易懂,使得从事白光 LED 开发、设计和应用的技术人员从中获益。读者可以以此为“桥梁”,系统地了解 and 掌握 LED 驱动器的设计和应用技术。

参加本书编写工作的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、秦庆莲、刘建秀、顾发娥、纪达安、刘淑芬、纪和平等。在本书写作过程中,在资料收集和技术信息交流方面都得到了国内专业学者和同行及 LED 制造商的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促,作者水平有限,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 LED 的发展历程及应用领域	1
1.1.1 LED 的发展历程	1
1.1.2 LED 的应用领域	3
1.2 LED 的发光原理、主要参数与特性	7
1.2.1 LED 的结构和发光原理	7
1.2.2 LED 的主要参数与特性	10
1.3 LED 照明技术的发展	20
第 2 章 白光 LED 技术	29
2.1 白光 LED 基础知识	29
2.1.1 白光 LED 的发展与特点	29
2.1.2 白光 LED 的实现方法	33
2.1.3 白光 LED 的特性	35
2.1.4 白光 LED 的效率	38
2.1.5 高效率白光 LED 技术动向	41
2.2 大功率白光 LED 的结构与特性	46
2.2.1 大功率白光 LED 的结构特点	46
2.2.2 大功率白光 LED 亮度提高技术	51
2.2.3 大功率白光 LED 散热技术	53
2.2.4 大功率白光 LED 可靠性技术	62
第 3 章 白光 LED 驱动电源	65
3.1 白光 LED 驱动技术	65
3.1.1 白光 LED 驱动电源的分类及方法	65
3.1.2 白光 LED 驱动电路拓扑和调光方式	73
3.1.3 白光 LED 与驱动器的匹配	86
3.1.4 大功率白光 LED 恒流驱动电路	91

3.1.5	白光 LED 的并联和串联驱动	96
3.2	LED 背光应用的电源解决方案	111
3.2.1	基于 LED 的 LCD 背光源驱动电路的要求	111
3.2.2	基于 LED 的 LCD 背光源驱动电路	117
3.2.3	TFT-LCD 背光驱动电路设计	134
3.2.4	8 英寸 LCD 背光驱动电路设计	137
3.3	Flash LED 驱动电路	140
3.3.1	Flash LED 驱动电路的电流控制方案	140
3.3.2	基于电荷泵的 Flash LED 驱动电路	144
3.3.3	基于升/降压变换器的 Flash LED 驱动电路	145
3.4	白光 LED 照明应用的电源解决方案	150
3.4.1	LED 照明设计	150
3.4.2	LED 路灯照明设计	154
第 4 章	白光 LED 驱动电路设计实例	159
4.1	线性电源驱动 LED 电路设计实例	159
4.1.1	基于 DD311 的 LED 驱动电路	159
4.1.2	基于 DD312 的 LED 驱动电路	164
4.1.3	基于 KXL7135 的 LED 驱动电路	166
4.1.4	基于 TLE4242 的 LED 驱动电路	167
4.1.5	基于 MAX16800 的 LED 驱动电路	169
4.2	AC/DC 驱动 LED 电路设计实例	171
4.2.1	1.25W 恒流 LED 驱动电路	171
4.2.2	70V/130mA 恒流 LED 驱动电路	174
4.2.3	可调光 LED 驱动电路	175
4.2.4	非隔离降压式 LED 驱动电路	177
4.2.5	0.5W 非隔离恒流 LED 驱动电路	180
4.2.6	单级 PFC 恒压/恒流 LED 驱动电路	181
4.2.7	高能效、低成本、非隔离型 350mA/12V LED 驱动电流	183
4.2.8	高效率 7.6V/700mA 隔离式 LED 驱动电流	186
4.2.9	带 PFC 电路的隔离式 17W LED 驱动电路	187
4.2.10	带 PFC 电路的 20W LED 驱动电路	189
4.2.11	14W 高效率 LED 驱动电路	191
4.2.12	无源 PFC LED 驱动电路	192
4.2.13	基于 AP3706 的 LED 驱动电路	194
4.2.14	基于 XLT604 的 LED 驱动电路	195
4.2.15	基于 HA22004P 的 LED 驱动电路	198
4.3	基于电感式变换器的 LED 驱动电路设计实例	199
4.3.1	基于 NCP × × × × 系列 DC/DC 变换器的 LED 驱动电路	199

4.3.2	基于 SG1524 的 LED 驱动电路	206
4.3.3	基于 SLM2842S/SLM2842J 的 LED 驱动电路	207
4.3.4	基于 MAX5033 的大功率白光 LED 驱动电路	214
4.3.5	基于 MAX168 × × 的 LED 驱动电路	217
4.3.6	基于 TPS6106 × 的白光 LED 驱动电路	227
4.3.7	基于 ZXSC310 的白光 LED 驱动电路	232
4.3.8	基于 NCP5009 的白光 LED 驱动电路	235
4.3.9	基于 EL7516 的白光 LED 驱动电路	238
4.3.10	基于 XC9103 的白光 LED 驱动电路	240
4.3.11	基于 LT 系列 DC/DC 变换器的 LED 驱动电路	242
4.3.12	基于 IRS254 × 的 LED 驱动电路	260
4.3.13	基于 CAT37 的白光 LED 驱动电路	266
4.3.14	基于 CAT32 的白光 LED 驱动电路	270
4.3.15	基于 LM3402/3402HV 的 LED 驱动电路	272
4.3.16	基于 HV991 × 的 LED 驱动电路	274
4.3.17	基于 PT4115 的 LED 驱动电路	277
4.4	基于电荷泵的 LED 驱动电路设计实例	282
4.4.1	基于 LC40159 的白光 LED 驱动电路	282
4.4.2	基于 LM27952 的白光 LED 驱动电路	287
4.4.3	基于 CAT3200/CAT3200-5 的白光 LED 驱动电路	290
4.4.4	基于 CAT3604/CAT3606 的白光 LED 驱动电路	293
4.4.5	基于 CAT3636 的白光 LED 驱动电路	295
4.4.6	基于 LTC3202/LTC3206/LTC3208/LTC3215 的白光 LED 驱动电路	300
4.4.7	基于 TPS60230/TPS60231 的白光 LED 驱动电路	304
4.4.8	基于 NCP56 × × 的白光 LED 驱动电路	305
参考文献		308

第 1 章

概 述

1.1 LED 的发展历程及应用领域

1.1.1 LED 的发展历程

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器件，且具有二极管的电子特性。LED 属于半导体光电器件，除了具有发光特性之外，它完全具备半导体整流二极管的特性。如果取它的整流特性，它不但可以完全符合整流需求，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特性，但通常是利用 LED 的发光特性而非整流特性，这种发光特性发生在二极管特性曲线的正偏压部分。

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；并因碳化硅与电致发光不能很好地适应，从而使研究被摒弃了。20 世纪 20 年代晚期，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研发。

1936 年，George Destiau 发表了一个关于硫化锌粉末发射光的报告。随着电子器件的研发和业界的认识，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试验中使用半导体砷化镓，发明了第一个具有现代意义的 LED，并于 20 世纪 60 年代面世。在早期的试验中，LED 需要放置在液化氦里，因此，需要进一步的工作与研发以使其能在室温下高效工作。第一个商用 LED 仅能发出不可视的红外光，但被迅速地应用于感应与光电领域。

20 世纪 60 年代末，在砷化镓基体上使用磷化物发明了第一个可见红光的 LED。磷化镓的改变使得 LED 更高效，并使发出的红光更亮，甚至产生出橙色的光。全球第一款商用 LED 是在 1965 年用锗材料制成的，随后不久 Monsanto 和惠普公司也推出了用 GaAsP 材料制作的商用 LED。Monsanto 公司将其作为指示灯，Hewlett-Packard 公司则首次用于电子显示设备。早期产品为 GaAsP LED，性能相当差，工作电流为 20mA 的 LED 光通量只有千分之几流明，相应的发光效率为 0.1lm/W，而且只能发出一种 650nm 的红色光。这些早期的红光 LED 每瓦大约能提供 0.1lm 的光通量，不足一般 60~100W 白炽灯（15lm）的 1/100。1968 年，LED

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 11lm/W,并且能够发出红光、橙光和黄光。

20 世纪 70 年代,LED 器件在家庭与办公设备中的大量应用拓展了 LED 产品的类型,此后 LED 开始应用于文字点阵显示器、背景图案用的灯栅和线条图阵列。数字显示屏的尺寸和复杂度在不断增大,从 2 位数字到 3 位甚至 4 位,从 7 段数字到能够显示复杂的文字与图案组合的 14 或 16 段阵列。1980 年 LED 制造商开始提供智能化的点阵 LED 显示屏。

1972 年开始有少量 LED 显示屏用于钟表和计算器,全球首款采用 LED 的手表最初还是在昂贵的珠宝商店出售的。几乎与此同时,惠普与德州仪器公司也推出了带 7 段红光 LED 显示屏的计算器。1971 年,业界又推出了具有相同效率的 GaP 绿光裸片 LED。在 20 世纪 70 年代末,人们研发出了发出纯绿色光的 LED。

20 世纪 80 年代早期的重大技术突破是开发出了 AlGaAs LED,它能以每瓦 10lm 的发光效率发出红光。这一技术进步使 LED 能够应用于各种室外信息发布以及汽车信号灯。GaAs、Alp 的使用促使了第一代高亮度 LED 的诞生,先是红色,接着就是黄色,最后为绿色。

20 世纪 90 年代早期,采用 AlInGaP 生产出了发橘红、橙、黄和绿光的 LED,业界又开发出了能够提供相当于最好的红色器件性能的 AlInGaP 技术,这比当时标准的 GaAsP 器件的性能要高出 10 倍。第一只具有历史意义的蓝光 LED 也出现在 20 世纪 90 年代早期,用当今的技术标准去衡量,它与早期的红光 LED 一样暗淡。20 世纪 90 年代中期出现了超亮度的 GaN LED,随即又制造出了能产生高强度绿光和蓝光的铟氮镓 LED。超亮度蓝光芯片是白光 LED 的核心,在这个发光芯片上涂上荧光磷,然后荧光磷通过吸收来自芯片的蓝色光源,再转化为白光。可利用这种技术制造出任何可见光 LED。在 1991~2001 年期间,材料技术、裸片尺寸和外形方面的进一步发展使商用 LED 的光通量提高了将近 20 倍。

20 世纪 90 年代初期,惠普公司光电部、LVmi-LEDs Lighting 公司和松下公司就已经掌握了如何用金属有机化学气相沉积法在 GaAs 衬底上外延生长 AlInGaP 的工艺,AlInGaP 材料在可见光谱区产生红光和橙光。合金有序化、受主原子的氢钝化、PN 结排列以及把氧掺入含铝器件层都是相当复杂的工艺技术,这些问题历经近 10 年时间才得以解决,最终实现了内量子效率接近 100%的 AlInGaP LED。几乎每个注入到器件中的电子一空穴对都产生一个光子,因此,如何使在 PN 结内形成的光子到达 LED 外就成了一种挑战。首先是如何防止光被窄带隙(0.87nm) GaAs 衬底吸收。研究中曾经尝试过在布喇格反射镜的外延结构中掺杂并在 GaP 衬底上直接生长技术,但是最成功的还是通过蚀刻法强力除去 GaAs 衬底,采用芯片接合法取代 GaP 技术。采用该技术研制的发光器的发光效率为 25lm/W,几乎是带红色滤光的灯泡发光效率的 10 倍。每个 LED 的光通量为几流明,由它们组成的 LED 阵列首先被制成了汽车上的停车灯、红色交通信号灯以及单色室外信号标志。

继 AlInGaP 之后,Nichia 公司(日本德岛)和名古屋大学(日本名古屋市)的研究人员掌握了使用金属有机化学气相沉积技术在蓝宝石衬底上外延生长 AlInGaN 的复杂工艺。AlInGaN 材料的带隙比 AlInGaP 的宽,可以覆盖高能量的蓝光和绿光波段。AlInGaN 绿光组件在标准的工作电流下内量子效率停留在 40%~50%,而蓝光器件的内量子效率为 60%~80%。通过利用透明的蓝宝石衬底以及人眼对绿光比对蓝光或红光更敏感的特点,人们已经制造出几流明的绿光 LED。这种 LED 和红光 AlInGaP LED、近流明级的蓝光 LED 组合起来,

就可以完全用固体光源制作大型全色信号标志。蓝光 AlInGaP LED 产生的光子和荧光粉的发光将一部分蓝光光子转变为其互补色(黄色)。人眼看到这种蓝光和黄光的混合是一种不鲜明的白色。

LVmi-LEDs Lighting 公司在 Philips Lighting 公司的技术指导下生产了一系列大功率 LED。在 12W 输入功率下, LVmi-LEDs Lighting 公司生产的 LVxeon 型器件的亮度比传统的 5mm 指示灯 LED 高 20 倍, 发光效率高出 50%, 寿命可达几万小时。目前市场上出售的器件不仅有红光和橙光 AlInGaP LED, 而且还有绿光、蓝光和白光 AlInGaP LED。LED 的封装热阻由 $300\Omega/\text{W}$ 降到 $15\Omega/\text{W}$ 以下, 由于 LED 封装热阻的降低使其能应用于 20 倍泵浦能量激光器中, 并获得 55lm 红光、30lm 绿光、10lm 蓝光与荧光粉转换为 25lm 的白光输出。单管 5W 封装的 110lm 白光 LED 和 15W 白炽灯的光输出相当, 而封装体积仅相当于白炽灯的 1%, 功耗仅为其 1/3。12 个 110lm 的器件足以制成一只汽车前灯。每只单色绿光 5W LED 的光通量超过 130lm。两只这样的光源即可以替代传统的 8~12 英寸(1 英寸=2.54cm) 150W 交通信号灯, 可节约 90% 的能源。由红光、绿光、蓝光组合的这些光源的发光效率可与液晶显示屏电视机和监视器的背光照明应用的冷阴极荧光灯相媲美, 而且具有体积小和窄谱带光色的特点。

对高强度蓝光 LED 的不断研发产生了好几代亮度越来越高的器件, 在 1990 年左右推出的基于碳化硅(SiC) 裸片材料的 LED 的发光效率大约是 $0.04\text{lm}/\text{W}$, 其发出的光强度很少超过 15mcd。20 世纪 90 年代中期研发出了第一个基于 GaN 的实用 LED。现在还有许多公司在用不同的基底(如蓝宝石和 SiC) 生产 GaN LED, 这些 LED 能够发出绿光、蓝光或紫罗兰等颜色的光。高亮蓝光 LED 的发明使真彩广告显示屏的实现成为可能, 这样的显示屏能够显示真彩和全运动的视频图像。

蓝光 LED 的出现使人们还能利用倒行转换的磷光材料, 将较高能量的蓝光部分转换成其他颜色。将蓝光与转换磷的黄光整合在一起就能得到白光, 而整合适当数量的蓝光与红橙磷则可以产生略带桃色或紫色的色彩。现在仅用 LED 光源就能完全覆盖 CIE 色度曲线中的所有饱和颜色, 并且各种颜色 LED 与磷的有机整合几乎能够毫无限制地产生任何颜色。

在可靠性方面, LED 的半衰期(即光输出量减少到最初值一半的时间)大概是 1 万至 10 万小时。相反, 小型指示型白炽灯的半衰期(此处的半衰期指的是有一半数量的灯失效的时间)典型值是 10 万小时到数千小时不等, 具体时间取决于灯的额定工作电流。

白光 LED 的出现是 LED 从标识功能向照明功能跨出的实质性一步。白光 LED 最接近日光, 更能较好地反映照射物体的真实颜色, 所以, 从技术角度看, 白光 LED 无疑是 LED 最尖端的技术。目前, 白光 LED 已开始进入一些应用领域, 应急灯、手电筒、闪光灯等产品相继问世。但是, 由于十分昂贵, 故而难以普及。白光 LED 普及的前提是价格下降, 而价格下降必须在白光 LED 形成一定市场规模后才有可能。毫无疑问, 两者的融合最终有赖于技术进步。

1.1.2 LED 的应用领域

最初 LED 用作仪器仪表的指示光源, 后来各种光色的 LED 在交通信号灯和大面积显示屏中得到了广泛应用, 产生了很好的经济效益和社会效益。以 12 英寸的红色交通信号灯为例, 若采用长寿命、低光效的 140W 白炽灯作为光源, 它可产生 2 000lm 的白光。经红色滤光片后, 光损失 90%, 只剩下 200lm 的红光。而在新设计的灯中, LVmi-LEDs 公司采用了 18 个

红光 LED 光源, 包括电路损失在内, 共耗电 14W, 即可产生同样的光效。

自从 1968 年第一批 LED 开始进入市场至今已有 40 多年, 随着新材料的开发和工艺的改进, LED 趋于高亮度化、全色化。在氮化镓基底的蓝光 LED 出现后, 更是扩展了 LED 的应用领域。LED 的主要应用领域包括大屏幕彩色显示、照明灯具、激光器、多媒体显像、LCD 背光源、探测器、交通信号灯、仪器仪表、光纤通信、卫星通信、海洋光通信、图形识别等, 但目前还主要是用于照明和显示。

1. 背光源

LED 作为显示屏的背光源是 LED 应用最为广泛的领域, 约占 LED 应用的 40%, 主要原因是 LED 体积小、重量轻、厚度小、坚固耐用。随着全球具有显示屏的电子设备产量的增长, 对 LED 背光源的需求也不断增长。

LED 背光源的形式有静态 LED 背光源、反馈型 LED 背光源、光导板组合式 LED 背光源以及高亮度直接型 LED 背光源。最新研究表明, LED 背光源正在向液晶电视机进军。日本索尼公司推出了世界上第一台利用 LED 背光源的液晶电视机, LED 作为液晶显示背光源的前景是非常看好的。

在液晶显示中至少有 10% 采用有源光作为背光照明, 光源可使 LCD 显示屏在黑暗的环境下变得易读, 全色 LCD 显示也需要背光源。LCD 背光照明所需的光源主要有白炽灯、场致发光、冷阴极荧光、LED 等, 其中 LED 在 LCD 背光照明中最具竞争力。新型的超高亮度 AlGaInP、AlGaAs、InGaN LED 可以提供高效率的发光和宽范围的颜色。LED 用于 LCD 背光照明主要有以下 3 种方式。

① 最简单的是把 LED 直接安装在 LCD 散射膜的后面, 可采用许多封装的 LED, 它们应当具有非常宽的光束角, 以使轴向光的均匀性较好。也可以采用未封装的管芯, 一般用 GaP LED, 而采用 AlGaInP、TS-AlGaAs LED 则可在小电流下工作, 减小功耗。

② 其次是边缘光 LCD 背光照明。用一个透明或半透明的矩形塑料块作为导光体, 将其直接安装在 LCD 散射膜的后面。LED 发出的光从塑料块的一个侧面射入, 其余侧面涂上白色反光材料。

③ 将 LED 发出的光导入光纤束中, 光纤束在散射膜后面构成一个平坦的薄片, 可以用不同的方法将光从薄片取出作为 LCD 的背光照明。采用 LED 作为背光照明的液晶显示器可用于移动电话、笔记本电脑。随着小型液晶显示器在节电型通信产品中的广泛使用, 将会对超高亮度 LED 有更大的需求。

2. 显示屏幕

LED 在显示屏幕中的应用占到 LED 应用的 20%~25%。显示屏幕可分为单色和彩色两种, 单色显示屏幕一般用于室内外信息显示, 主要用在公共场所, 如机场、车站、道路、银行等, 以显示文字和数字信息为主。这类显示在欧美一些城市应用比较普遍。彩色屏幕以显示广告居多, 全彩色 LED 大屏幕显示用于体育场馆和广场等室外场所, 可以显示比赛现场的动态画面。这类大屏幕已成为大型体育馆的必要设施。在大屏幕显示方面, LED 芯片依靠进口, 在国内封装并组装成模组, 制成大屏幕。全彩色大屏幕在国内的应用逐渐增多, 除体育场馆外, 室内及室外用量也不断增大。

大屏幕显示是超高亮度 LED 应用的一个巨大市场, 包括图形、文字、数字的单色、双色

和全色显示。传统的大屏幕有源显示一般采用白炽灯、光纤、阴极射线管等，无源显示一般采用翻牌的方法。LED 显示曾一直受到 LED 本身性能和颜色的限制，如今超高亮度 AlGaInP、TS-AlGaAs、InGaN LED 已能够提供明亮的红、黄、绿、蓝等各种颜色的光，可完全满足全色大屏幕显示的要求。LED 显示屏可按像素尺寸装配成各种结构，小像素直径一般小于 5mm，单色显示的每个像素用一个 T-1 (3/4) LED 灯，双色显示的每个像素为双色的 T-1 (3/4) LED 灯，全色显示则需要 3 个 T-1 灯（红、绿、蓝），或装配一个多芯片的 T-1 (3/4) LED 灯作为一个像素。大像素则是通过把许多 T-1 (3/4) 红、绿、蓝光 LED 灯组合在一起构成的。用 InGaN (480nm) 蓝、InGaN (515nm) 绿和 AlGaAs (637nm) 红 LED 灯作为 LED 显示的三基色，可以提供逼真的全色性能，而且具有较宽的颜色范围，包括蓝绿、绿红等，与国际电视系统委员会 (NTSC) 规定的电视颜色范围基本相符。

3. 汽车照明

大功率 LED 已被大量用于汽车照明中，汽车照明占 LED 市场的 18% 左右。LED 用于汽车最早是在 20 世纪 80 年代中期，当时主要用于汽车的高位刹车灯。预计 2010 年绝大部分汽车的尾灯照明（包括倒车灯、牌照灯）将采用 LED。在车厢里 LED 可以用作顶灯、阅读灯、仪表盘灯和门灯，LED 前照明灯是目前研究的重点。我国在汽车中应用 LED 是从 1998 大规模生产安装后雾灯开始的，此举带动一批企业开发 LED 灯具。从我国目前实际情况来看，近期 LED 主要用于汽车制动灯（刹车灯），包括应用最普遍的高位刹车灯。

我国开发了一种 LED 汽车行驶状态灯，通过安装于汽车后部的 LED 状态灯的灯光变化，显示汽车行驶过程中的各种不同状态，以提示尾随车辆驾驶者，有效防止追尾撞车等事故发生。除具备一般高位刹车灯显示刹车（红灯亮）的功能外，可显示滑行（黄灯亮）和回速（绿灯亮）的行驶状态，同时还可以通过不同组合显示汽左转、右转、倒车、临时停车等 10 余种状态，使车辆在行驶过程中的所有状态都通过信号得以充分表达。随着 LED 光学性能不断提高，封装设计更有针对性和实用性，它将为汽车的个性化、一体化提供更大的发展空间。

汽车指示灯在车的外部主要作为方向灯、尾灯和刹车灯，在车的内部主要用于各种仪表的照明和显示。超高亮度 LED 用于汽车指示灯，与传统的白炽灯相比具有许多优点，在汽车产业中有着广阔的市场。LED 能够经受较强的机械冲击和震动，平均工作寿命 (MTBF) 比白炽灯泡高出几个数量级，远远高于汽车本身的工作寿命，因此，LED 刹车灯可封装成一个整体而不必考虑维修。透明衬底 AlGaAs 和 AlInGaP LED 与带有滤光片的白炽灯相比具有相当高的流明效率，这样 LED 刹车灯和方向灯就能够在较小的驱动电流下工作，典型的驱动电流只有白炽灯的 1/4。较低的功率还可减小汽车内部线路系统的体积和重量，同时还可降低集成化的 LED 信号灯的内部温升，允许透镜和外罩使用耐温性能较低的塑料。LED 刹车灯的响应时间为 100ns，比白炽灯的响应时间短，这样便给驾驶员留下了更多的反应时间，从而提高了行车的安全保证。汽车外部指示灯的照度及颜色均有明确规定。汽车的内部照明显示虽不像外部信号灯那样受到政府有关部门的控制，但汽车制造商对 LED 的颜色及照明度也有要求。GaP LED 早已用于车内，超高亮度 AlGaInP 和 InGaN LED 由于在颜色和照度上可满足制造商的要求，因而将更多地取代车内白炽灯。从价格上看，尽管 LED 与白炽灯相比还是比较贵的，但从整个系统来看，二者的价格并没有明显的差别。随着超高亮度 TS-AlGaAs 和 AlGaInP LED 向实用化方向发展，最近几年 LED 的价格一直在不断降低，今后降低的幅度还

会更大。

4. 建筑装饰照明

由于 LED 尺寸小, 便于亮度和颜色的动态控制, 因此, 比较适合用于建筑装饰照明。建筑装饰照明占 LED 市场的 12% 左右。建筑装饰照明除大量用于室外照明外, 室内照明的应用也逐渐增多, 例如商场橱窗的照明。这是典型的商业应用, 可充分运用 LED 光和色的变化吸引顾客的眼球。另外, 在一些餐厅和娱乐场所也可以采用 LED 进行装饰和点缀。

LED 在建筑装饰领域的应用出现了不少创新设计, 以往对建筑立面照明主要采用投射方式, 但许多建筑物没有地方放置传统的投光灯。LED 由于光源尺寸小, 可以水平或垂直安装, 与建筑物表面更好地结合, 拓展了照明设计师的创作空间。

在景观照明中, LED 在广场、公园、绿地、水面、水下、道路等方面均有不同的应用。由于 LED 灯具体积小、便于隐藏, 因此, 会产生较好的景观照明效果。为满足景观照明的需求, 人们开发出了品种繁多的 LED 灯具, 在造型、款式、色彩、功能等方面均富有变化。同时, 由于采用智能控制, 对色彩、亮度均可控制, 使得色彩丰富、变化多姿。

5. 固体照明灯

全色超高亮度 LED 的实用化和商品化, 使照明技术面临一场新的革命。由多个超高亮度红、蓝、绿三色 LED 制成的固体照明灯不仅可以发出波长连续可调的各种色光, 而且还可以发出亮度达几十烛光到一百烛光的白光, 成为照明光源。最近, 日本日亚公司利用 InGa_N 蓝光 LED 和荧光技术, 推出了白光固体发光器件, 其色温为 6 500K, 发光效率达 7.5lm/W。对于相同发光亮度的白炽灯和 LED 固体照明灯来说, 后者的功耗只占前者的 10%~20%, 白炽灯的寿命一般不超过 2 000h, 而 LED 的寿命长达数万小时。这种体积小、重量轻、方向性好、节能、寿命长、耐各种恶劣条件的固体光源必将对传统的光源市场带来冲击。尽管这种新型照明固体光源的成本依然偏高, 但可以应用于一些特殊场合, 如矿山、潜水、抢险、军用装置的照明等。从长远看, 如果超高亮度 LED 的生产规模进一步扩大, 成本进一步降低, 其节能和长寿命的优势足以弥补价格偏高的劣势。超高亮度 LED 将有可能成为一种很有竞争力的新型电光源。

6. 信号照明

信号照明是 LED 单色光应用比较广泛也比较早的一个领域, 占 LED 应用市场的 4% 左右, 典型的应用实例是交通信号灯。LED 在各种单色信号和照明方面足以与加滤色片的白炽灯相抗衡。LED 交通信号灯的发展可分为 3 个阶段, 第一个阶段是 1998 年以前, LED 信号灯为试用期, 一方面受 LED 发光器件的限制, 使用效果一般; 另一方面 LED 信号灯刚刚开发出来, 对其在户外条件下的使用也需要考察一段时间。这一时期主要在北京、上海使用, 未大面积铺开。第二个阶段是 1998~2000 年, LED 信号灯从试用走向规模化使用。在这一阶段, LED 信号灯开始成批量地更换原来的信号灯或在新增交通信号控制路口使用。这一时期的 LED 信号灯技术水平不高, 主要靠 LED 发光器件技术水平的提高来达到使用要求。2001 年以来称为第三个阶段。随着 GB 14887—1994《道路交通信号技术要求及测试方法》的修订, LED 信号灯的技术水平进入一个总体提高阶段。在这一阶段, 国内许多城市开始大规模地使用或都全面使用 LED 信号灯。LED 在交通诱导信息显示屏中的应用, 既可看作显示屏幕, 也可以作为交通信号。对于显示路段交通状况和停车场情况等文字信息的显示屏, 高亮度是

一个重要的发展趋势。LED 在交通标志和倒计时显示器中的应用也日益广泛,主要包括可变交通标志,如可变限速标志、可变车道标志和配合交通信号灯使用的倒计时显示器。

上面讲的是一般城市道路用交通信号灯,实际上广义的交通信号灯还包括航标灯、铁路信号灯、机场相关信号指示灯等。LED 航标灯光源采用碟状结构,与相应的光学系统匹配构成了一个相对独立的发光单元。在实际应用中,根据大小河流或沿海的不同需求选择灯具中所使用的单元数目,获得不同的射程。LED 铁路信号灯在国内也处于研究开发之中,目前已经研制出 LED 手提信号灯。铁路信号灯的研制目前还要解决颜色和光强问题。航空和机场助航灯光系统也在采用 LED,国产的障碍灯、环境灯已用于国内机场。机场滑行道边灯采用了蓝光 LED,也已通过民航总局的认可,拟投入使用。

用超高亮度 LED 取代白炽灯用于交通信号灯、警示灯、标志灯现已遍及世界各地,市场广阔,需求量增长很快。目前采用超高亮度 LED 取代传统的白炽灯来降低电力损耗已取得明显效果。日本每年在交通信号灯上的耗电量约为 100 万千瓦,采用超高亮度 LED 取代白炽灯后,其耗电量仅为原来的 12%。

对于交通信号灯,每个国家的主管部门都要制定相应的规范,规定信号的颜色、最低的照明强度、光束空间分布的图样以及对安装环境的要求等。尽管这些要求是按白炽灯编写的,但目前采用的超高亮度 LED 交通信号灯基本上是适用的。

LED 交通信号灯与白炽灯相比工作寿命较长,一般可达到 10 年,若考虑到户外恶劣环境的影响,预计寿命要减少到 5~6 年。目前超高亮度 AlGaInP LED 已实现产业化,价格也比较低。若用超高亮度红光 LED 组成的模块取代传统的红色白炽交通信号灯头,则可将红色白炽灯突然失效给安全造成的影响降低到最低程度。一般 LED 交通信号模块由若干组串联的 LED 单灯组成。以 12 英寸的红光 LED 交通信号模块为例,在 3~9 组串联的 LED 单灯中,每组串联的 LED 单灯数为 70~75 只(总数为 210~675 只),当有一个 LED 单灯失效时,只会影响一组信号,其余各组减小到原来的 2/3 或 8/9,并不会像白炽灯那样使整个信号灯头失效。

7. LED 其他应用

除了前面讲到的屏幕显示、建筑装饰、交通信号和汽车照明外,LED 的应用还渗透到的领域有以下几种。白光 LED 已用于各式各样的手电筒,国内一些企业与煤矿合作开发井下矿灯,在新开通的城际直达列车上,全程软卧车厢的床头阅读灯已改成 LED 灯(采用了 21 只白光 LED 组装而成)。同时车辆夜间行驶时,走道的地灯也采用 LED。

彩色 LED 的应用更加花样繁多。在电视演播厅和一些演出场所,以往的透明地板采用彩色白炽灯,现已改为 LED,配合音乐与表演显示动态彩色变幻的效果。另外,LED 还用在一些玩具和纪念品上作为一种装饰,如圆珠笔、钥匙链等。

1.2 LED 的发光原理、主要参数与特性

1.2.1 LED 的结构和发光原理

1. LED 的结构

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 LED 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，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。

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 的抗震性能好。LED 的结构如图 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，抗冲击和抗震性能好，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 3 部分：正向偏压下的载流子注入、复合辐射和光能传输。微小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（带隙）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，蓝光、紫光携带的能量最多，橘色光、红光携带的能量最少。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。

在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多少不同，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、绿光和黄光的 LED，GaAsP LED 发红光，GaP LED 发绿光，SiC LED 发黄光。它们的材料和主要特性见表 1-1。

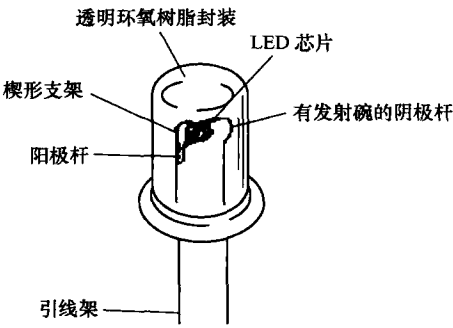


图 1-1 LED 的结构图

表 1-1 红光、绿光和黄光 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)
GaAsP LED	红	50	10	1.5
SiC LED	黄	50	10	6
GaP 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、GaP、GaAsP 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，当加正向偏置电压时势垒下降，P 区和 N 区的多数载流子向对方扩散。由于电子迁移率 μ 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 PN 结发光的原理，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 区的效率却较小。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。由于复合是在少数扩散区内发光的，所以，光仅在靠近 PN 结面数微米以内产生。理论和实践证明，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）。

$$E_g = h\nu/q = hc/(\lambda q) \tag{1-3}$$

$$\lambda = hc/(qE_g) = 1\,240/E_g(\text{nm}) \tag{1-4}$$

式中： ν 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 为光的波长。

半导体可分为直接带隙和间接带隙两种，LED 大都采用直接带隙材料，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，采用间接带隙材料，其效率就低一些。若能产生可见光（波长为 380~780nm），半导体材料的 E_g 应在 3.26~1.63eV 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参数。

表 1-2 常用半导体材料及其发射的光波波长参数

半导体材料类型	GaAs			GaP		GaAsP	GaAlAs	GaN: Zn
系列	HG400	HG500	HG520			BT	BL	
发光颜色	红外光	红外光	红外光	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

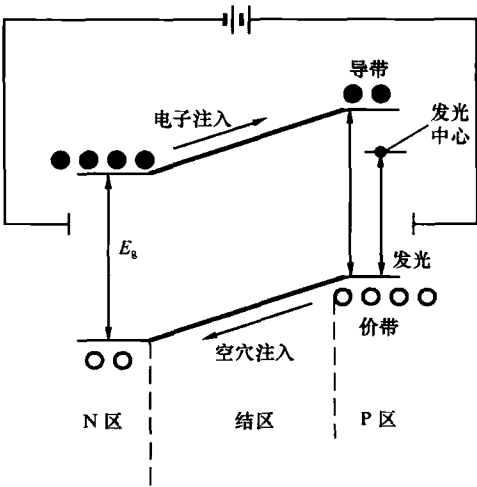


图 1-2 LED 发光原理示意图