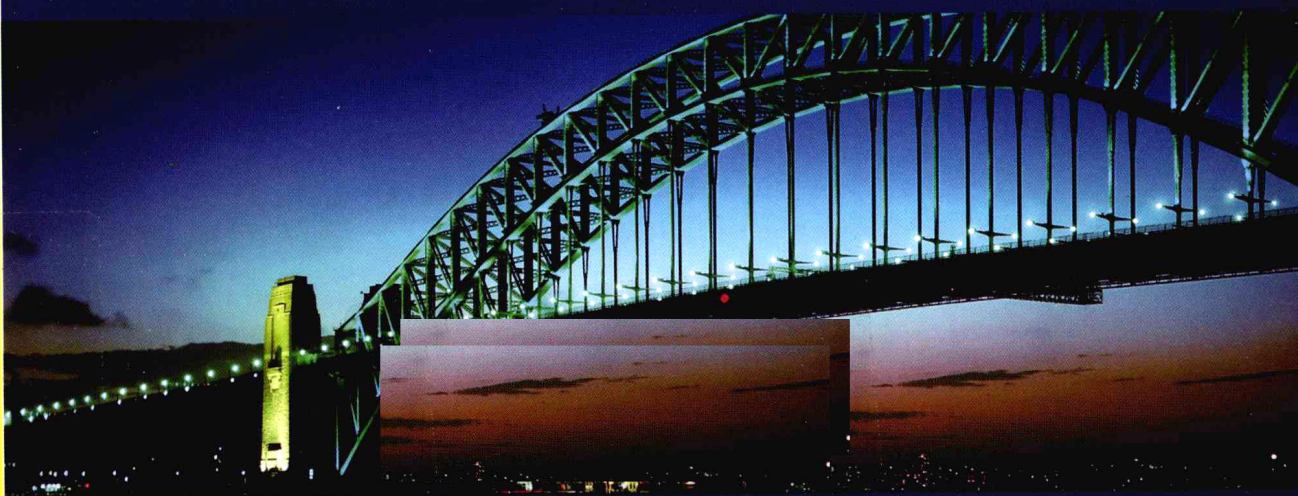


电子工程技术丛书

LED 照明电路 设计100例

——通用照明·车用照明·背光照明

● 周志敏 纪爱华 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电子工程技术丛书

LED 照明电路设计 100 例

——通用照明·车用照明·背光照明

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

本书结合目前国内外LED照明技术的发展动态,以LED照明驱动电路设计实例为核心内容,系统地介绍了LED照明基础知识、通用LED照明驱动电路与设计实例、车用LED照明驱动电路与设计实例、LED背光照明驱动电路与设计实例。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照明设计和应用的工程技术人员的必备读物。

本书可供电信、信息、航天、汽车、国防及家电等领域从事LED照明研发、设计、应用和生产企业的工程技术人员及相关专业高等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照明电路设计100例:通用照明·车用照明·背光照明/周志敏,纪爱华编著. —北京:电子工业出版社,2011.1

(电子工程技术丛书)

ISBN 978-7-121-12607-9

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第249696号

策划编辑:富 军

责任编辑:刘 凡

印 刷:北京市海淀区四季青印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

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:19.75 字数:505.6千字

印 次:2011年1月第1次印刷

印 数:4000册 定价:39.80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

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。高亮度的白光 LED 的开发成功，使得 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。LED 属于典型的绿色照明光源，具有寿命长、启动时间短、无紫外线、色彩丰富饱满、可做全彩变化、低压安全等特点，不仅可用于大型广告显示屏、建筑和交通照明，还可用于城市重点建筑的夜景照明。此外，LED 照明正在迅速成为非豪华汽车的标准配置，白光 LED 也已经成为电子产品显示屏的主要光源，并朝着日常照明应用的方向发展。LED 技术的发展引起了国内外光源界的普遍关注，现已成为极具发展前景和影响力的一项高新技术产品。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，随着我国能源规划的方针政策和低碳经济产业链上的高能源利用效率的提升，绿色照明工程的组织实施及我国城市建设和电子信息产业的高速发展，人们对绿色光源的需求与日俱增，促进了 LED 照明技术的创新和发展，使得 LED 在照明应用领域得以广泛应用，LED 潜在的市场使其显示出了强大的发展潜力。

本书系统地将 LED 照明设计要点与 LED 照明电路实例有机地结合起来，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实际工程应用，使从事 LED 驱动器的开发、设计、应用的技术人员能从中获益，读者可以以此为“桥梁”，系统、全面地了解 and 掌握 LED 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、刘建秀、顾发娥、纪达安、刘淑芬、纪和平等。本书在写作过程中，在资料的收集和技术信息交流上都得到了国内的专业学者和同行的大力支持，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

目 录

第 1 章 LED 照明基础知识	1
1.1 白光 LED 基础知识	1
1.1.1 白光 LED 的发展与特点	1
1.1.2 白光 LED 的实现方法	5
1.1.3 白光 LED 的效率	9
1.1.4 高效率白光 LED 的技术动向	12
1.2 大功率白光 LED 驱动器	15
1.2.1 大功率白光 LED 的结构特点	15
1.2.2 大功率 LED 的优点及特性	20
1.2.3 大功率白光 LED 的散热技术	22
1.2.4 大功率 LED 驱动电源	25
1.2.5 大功率白光 LED 驱动器拓扑结构	30
1.2.6 LED 照明应用的电源解决方案	40
1.2.7 白光 LED 的并联和串联驱动	47
第 2 章 通用 LED 照明驱动电路与设计实例	59
2.1 通用 LED 照明	59
2.1.1 通用照明光源	59
2.1.2 通用 LED 照明驱动电路	63
2.1.3 通用 LED 照明驱动电路解决方案	65
2.1.4 通用 LED 照明驱动电路设计要素	71
2.2 通用 LED 照明驱动电路设计实例	75
实例 1. 基于 XLT604 的 LED 驱动电路	75
实例 2. 基于 LT3756 的 LED 驱动电路	77
实例 3. 基于 PT4201 的 LED 驱动电路	78
实例 4. 基于 ZXLD1350 的 LED 驱动电路	82
实例 5. 基于 LM3445 的 LED 驱动电路	83
实例 6. 基于 PT4107 的 LED 驱动器	86
实例 7. 基于 SLM2842S 的 LED 驱动电路	90
实例 8. 基于 SLM2842J 的 LED 驱动电路	92
实例 9. 基于 SLM2842SJ 的 LED 驱动电路	94
实例 10. 基于 HV991x LED 驱动电路	95
实例 11. 基于 IRS2540 的 LED 驱动电路	97
实例 12. 基于 IRS2541 的 LED 驱动电路	100
实例 13. 基于 LT3476 的 LED 驱动电路	104

实例 14. 基于 LTC3783 的 LED 驱动电路	104
实例 15. 基于 PT4115 的 LED 驱动电路	107
案例 16. 基于 NCP1200 的 LED 驱动电路	111
案例 17. 基于 NCP1216 的 LED 驱动电路	112
案例 18. 基于 NCP1014/1028/的 LED 驱动电路	114
案例 19. 基于 NCP3065/3066 的 LED 驱动电路	114
案例 20. 基于 iW1689 的 LED 驱动电路	116
案例 21. 基于 SG1524 的 LED 驱动电路	117
案例 22. 基于 PAM2842 的 LED 驱动电路	118
实例 23. 无源 PFCLED 驱动电路	120
实例 24. 非隔离降压式 LED 驱动电路	123
实例 25. 非隔离 0.5W 恒流 LED 驱动电路	125
实例 26. 带 PFC 的 20WLED 驱动电路	126
实例 27. 可调光的 LED 驱动电路	130
实例 28. 高效 LED 驱动电路	132
实例 29. 14W 高效率 LED 驱动电路	133
实例 30. 隔离式、带 PFC 的 17WLED 驱动电路	135
实例 31. 非隔离 1.25W 恒流 LED 驱动电路	137
实例 32. 单级 PFC 恒压/恒流 LED 驱动电路	138
实例 33. 高效率、低成本、非隔离 350mA/12VLED 驱动器	141
实例 34. 高效率 7.6V/700mA 隔离式 LED 驱动器	144
实例 35. 隔离式 350mA/4.2WLED 驱动器	145
实例 36. 高效恒流降压式 LED 驱动电路	146
实例 37. 基于 AP3706 的 LED 驱动电路	148
实例 38. 基于 HA22004P 的 LED 驱动电路	149
实例 39. 基于 DD311 的 LED 驱动电路	150
实例 40. 基于 DD312 的 LED 驱动电路	155
实例 41. 基于 DD313 的 LED 驱动电路	156
实例 42. 基于 KXL7135 的 LED 驱动电路	159
第 3 章. 车用 LED 照明驱动电路与设计实例	161
3.1 车用 LED 照明驱动电路设计	161
3.1.1 汽车照明发展历程与分类	161
3.1.2 LED 在汽车照明系统中的应用	165
3.1.3 汽车 LED 驱动器的技术要求	169
3.1.4 汽车 LED 照明驱动电路方案	170
3.2 车用 LED 照明驱动电路设计实例	176
实例 1. 基于 MAX16800 的 LED 驱动电路	176
实例 2. 基于 MAX16805/MAX16806 的 LED 驱动电路	177
实例 3. 基于 MAX16807/16808 的 LED 驱动电路	179
实例 4. 基于 MAX16818 的 LED 驱动电路	180
实例 5. 基于 MAX16814 的 LED 驱动电路	184
实例 6. 基于 MAX16812 的 LED 驱动电路	186

实例 7. 基于 MAX16834 的 LED 驱动电路	187
实例 8. 基于 MAX16803 的 LED 驱动电路	187
实例 9. 基于 MAX16804 的 LED 驱动电路	189
实例 10. 基于 MAX16802 的 LED 驱动电路	191
实例 11. 基于 MAX5003 的 LED 驱动电路	194
实例 12. 基于 MAX16809/16810 的 LED 驱动电路	196
实例 13. 基于 MAX16818 的 LED 驱动电路	197
实例 14. 基于 MAX16821A/16821B/16821C 的 LED 驱动电路	198
实例 15. 基于 MAX16831 的 LED 驱动电路	199
实例 16. 基于 LT3474 的 LED 驱动电路	200
实例 17. 基于 LT3475 的 LED 驱动电路	202
实例 18. 基于 LT3486 的 LED 驱动电路	203
实例 19. 基于 LT3575 的 LED 驱动电路	205
实例 20. 基于 LT3477 的 LED 驱动电路	207
实例 21. 基于 LT3466 的 LED 驱动电路	207
实例 22. 基于 LTC3783 的 LED 驱动电路	209
实例 23. 基于 LM3423 的 LED 驱动电路	211
实例 24. 基于 LM3406 的 LED 驱动电路	211
实例 25. 基于 ZXSC300/310 的 LED 驱动电路	213
实例 26. 基于 T6321A/T6325A 的 LED 驱动电路	216
实例 27. 基于 MLX10803 的 LED 驱动电路	217
第 4 章 LED 背光照明驱动电路与设计实例	218
4.1 LED 背光照明技术	218
4.1.1 LED 背光源技术特性	218
4.1.2 白光 LED 用于 LCD 背光照明	221
4.1.3 LED 背光照明技术优势	224
4.1.4 RGB-LED 背光照明技术	226
4.1.5 LED 背光照明技术动向	232
4.2 LED 背光照明驱动电路设计实例	234
实例 1. 基于 LTC3206 的 LED 背光照明驱动电路	234
实例 2. 基于 LTC3208 的 LED 背光照明驱动电路	235
实例 3. 基于 LTC3219 的 LED 背光照明驱动电路	237
实例 4. 基于 MAX1916 的 LED 背光照明驱动电路	239
实例 5. 基于 MAX1582 的 LED 背光照明驱动电路	242
案例 6. 基于 LM2733/LM27313 的 LED 背光照明驱动电路	245
实例 7. 基于 MAX1576 的 LED 背光照明驱动电路	247
案例 8. 基于 AP3605 的 LED 背光照明驱动电路	250
实例 9. 基于 LM3431 的 LED 背光照明驱动电路	252
实例 10. 基于 LT3595 的 LED 背光照明驱动电路	255
实例 11. 基于 LT3543 的 LED 背光照明驱动电路	258
实例 12. 基于 LT3478/LT3478-1 的 LED 背光照明驱动电路	259
实例 13. 基于 LT3755 的 LED 背光照明驱动电路	263

实例 14. 基于 LT3599 的 LED 背光照明驱动电路	264
实例 15. 基于 NCP101x 的 LED 背光照明驱动电路	265
实例 16. 基于 NCP5009 的 LED 背光照明驱动电路	267
实例 17. 基于 NCP560x 的 LED 背光照明驱动电路	269
实例 18. 基于 TPS6106x 的 LED 背光照明驱动电路	271
实例 19. 基于 TPS61150/1 的 LED 背光照明驱动电路	276
实例 20. 基于 TPS60230/60231 的 LED 背光照明驱动电路	277
实例 21. 基于 CAT37 的 LED 背光照明驱动电路	278
实例 22. 基于 CAT32 的 LED 背光照明驱动电路	281
实例 23. 基于 CAT3200/3200-5 的 LED 背光照明驱动电路	285
实例 24. 基于 CAT3604 的 LED 背光照明驱动电路	287
实例 25. 基于 CAT3606 的 LED 背光照明驱动电路	290
实例 26. 基于 CAT3636 的 LED 背光照明驱动电路	291
实例 27. 基于 LM3402/3402HV 的 LED 背光照明驱动电路	295
实例 28. 基于 LM27952 的 LED 背光照明驱动电路	296
实例 29. 基于 AS3691 的 LED 背光照明驱动电路	299
实例 30. 基于 SP761x 的 LED 背光照明驱动电路	300
实例 31. 基于 MAX16809 的 LED 背光照明驱动电路	306
参考文献	308

第 1 章

LED 照明基础知识

1.1 白光 LED 基础知识

1.1.1 白光 LED 的发展与特点

1. 白光 LED 的发展

自从出现 LED 以来，人们一直在努力追求实现固体白光照明光源。随着 LED 制造工艺的不断进步和新型材料（氮化物晶体和荧光粉）的开发及应用，白光 LED 的性能也不断完善并进入实用阶段。白光 LED 应用领域也已经扩展到高效率照明光源市场。所谓白光，是指由多种颜色混合而成的光。以人类眼睛所能见的白光形式，至少需两种光混合。目前已商品化的产品仅有二波长蓝光单芯片加上 YAG 黄色荧光粉，在未来较被看好的是三波长光，即无机紫外光芯片加 RGB 三原色荧光粉。此外，有机单层三波长白光 LED 也具有成本低、制作容易等优点。预计三波长白光 LED 在未来的应用中将取代荧光灯、紧凑型节能荧光灯及 LCD 背光源等市场，这对白光 LED 的市场成长有很大的帮助。

在技术方面，白光 LED 目前主要分为两种发光方式。第一种是日亚化学（Nichia）开发的以 460nm 波长的 InGaN 蓝光晶粒涂上一层 YAG 荧光物质，利用蓝光 LED 照射此荧光物质以产生与蓝光互补的 555nm 波长黄光，再利用透镜原理将互补的黄光、蓝光予以混合，便可得到肉眼所需的白光。白光 LED 开发基础在于蓝光技术，目前在蓝光 LED 技术方面仍以日亚化学领先。第二种是日本住友电工开发出的以 ZnSe 为材料的白光 LED，不过发光效率较差，但由于目前白光 LED 市场热销，仍呈现出供不应求的现象。

20 世纪 60 年代，利用半导体 PN 结发光的原理研制成了 LED。当时研制的 LED，所用的材料是 GaAsP，其发光颜色为红色。经过近 30 年的发展，已能发出红、橙、黄、绿、蓝等多种色光。然而照明需用的白色光 LED 是在近年才发展起来的，如图 1-1 所示是白光 LED 的发展历程。

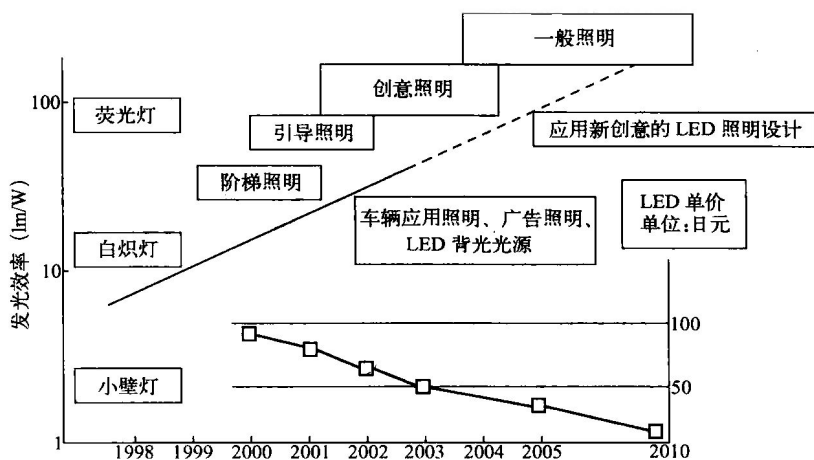


图 1-1 白光 LED 的发展历程

目前已商品化的圆头柱状白光 LED 大多是利用色互补关系产生的仿真白光，结合了蓝光与黄光之间的色差，加上模拟光容易使人产生一种不协调感，并无法获得高演色性 ($R_a > 90$)，且高电流时会有色度偏差等问题，这些都是白光 LED 今后发展仍需努力的方向。

可见光光谱的波长范围为 380 ~ 760nm，是人眼可感受到的七色光（红、橙、黄、绿、青、蓝、紫），但这七种颜色的光都各自是一种单色光，如 LED 发的红光的峰值波长为 660nm。在可见光的光谱中是没有白色光的，因为白光不是单色光，而是由多种单色光合成的复合光，正如太阳光是由七种单色光合成的白色光，而彩色电视机中的白色光也是由三基色黄、绿、蓝合成的。由此可见，要使 LED 发出白光，它的光谱特性应包括整个可见的光谱范围。但要制造这种性能的白光 LED，在目前的工艺条件下是不可能的。根据人们对可见光的研究，人眼睛所能见的白光，至少需两种光的混合，即二波长光（蓝色光 + 黄色光）或三波长光（蓝色光 + 绿色光 + 红色光）的混合模式。上述两种模式复合的白光，都需要蓝色光，所以摄取蓝色光已成为制造白光的关键技术，即当前各大 LED 制造公司都在追逐的“蓝光技术”。

白炽灯和卤钨灯的光效为 12 ~ 24lm/W；荧光灯和 HID 灯的光效为 50 ~ 120lm/W。对于白光 LED：在 1998 年，其光效只有 5lm/W；到了 1999 年已达到 15lm/W，这一指标与一般家用白炽灯相近；而在 2000 年时，白光 LED 的光效已达到 25lm/W，这一指标与卤钨灯相近。预计到 2015 年时，白光 LED 的光效可达到 150 ~ 200lm/W。那时的白光 LED 的工作电流便可达安培级。

普通照明用的白炽灯和卤钨灯虽价格便宜，但光效低（灯的热效应白白耗电）、寿命短、维护工作量大，若用白光 LED 作照明，不仅光效高，而且寿命长（连续工作时间为 10000h 以上），几乎无须维护。目前，德国 Hella 公司利用白光 LED 开发了飞机阅读灯；澳大利亚首都堪培拉的一条街道已用白光 LED 作路灯照明。可以预见不久的将来，白光 LED 一定会进入普通家庭取代现有的照明灯。

对于一般照明而言，人们更需要白色的光源。1998 年，白光 LED 开发成功，它是将 GaN 芯片和钇铝石榴石（YAG）封装在一起制成的。GaN 芯片发蓝光 ($\lambda_p = 465\text{nm}$, $W_d = 30\text{nm}$)，高温烧结制成的含 Ce^{3+} 的 YAG 荧光粉受此蓝光激发后发出黄色光，峰值为 550nm。蓝光 LED

基片安装在碗形反射腔中，覆盖以混有 YAG 的树脂薄层。蓝光 LED 芯片发出的蓝光部分被荧光粉吸收，另一部分蓝光与荧光粉发出的黄光混合，可以得到白色光。现在，对于 InGaN-YAG 白光 LED，通过改变 YAG 荧光粉的化学组成和调节荧光粉层的厚度，可以获得色温为 3500 ~ 10000K 的各色白光，白光 LED 的结构示意图如图 1-2 所示。如图 1-3 所示为白光 LED 和普通白炽灯的发光光谱，表 1-1 列出了目前白光 LED 的种类及其发光原理。

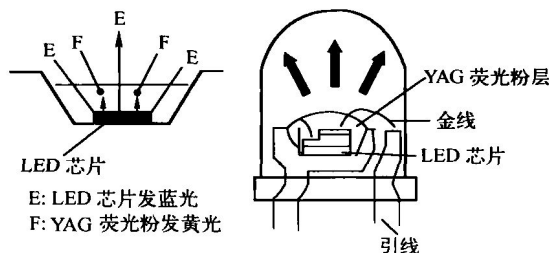


图 1-2 白光 LED 的结构示意图

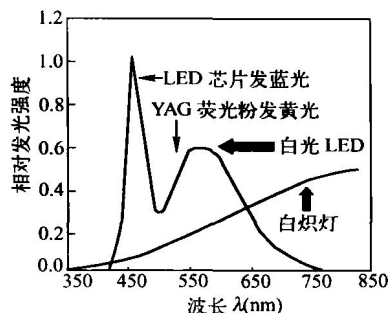


图 1-3 白光 LED 和普通白炽灯的发光光谱

表 1-1 白光 LED 的种类和发光原理

芯片数	激发源	发光材料	发光原理
1	蓝色 LED	InGaN/YAG	InGaN 的蓝光与 YAG 的黄光混合成白光
	蓝色 LED	InGaN/荧光粉	InGaN 的蓝光激发的红绿蓝三基色荧光粉发白光
	蓝色 LED	ZnSe	由薄膜层发出的蓝光和在基板上激发出的黄光混色成白光
	紫外 LED	InGaN/荧光粉	InGaN 的紫外激发的红绿蓝三基色荧光粉发白光
2	蓝色 LED 黄绿 LED	InGaN、GaP	将具有补色关系的两种芯片封装在一起，构成白光 LED
3	蓝色 LED 绿色 LED 红色 LED	InGaN AlInGaP	将发三原色的三种小片封装在一起，构成白光 LED
多个	多种光色的 LED	InGaN、GaP AlInGaP	将遍布可见光区的多种光芯片封装在一起，构成白光 LED

从表 1-1 中也可以看出，某些种类的白光 LED 光源离不开四种荧光粉：三基色稀土红、绿、蓝粉和石榴石结构的黄色粉。在未来较被看好的是三波长光，即以无机紫外光晶片加 RGB 三基色荧光粉，但此三基色荧光粉的粒度要求比较小，稳定性要求也高，具体应用方面还在探索之中。

采用白光 LED 光源进行照明，首先可取代耗电的白炽灯，然后逐步向整个照明市场推广，将会节约大量的电能。近期，白光 LED 已达到单只功率超过 1W，光输出为 25lm，这也增大了它的实用性。表 1-2 和表 1-3 列出了单只白光 LED 的发光效率进展和长远发展目标。

表 1-2 单只白光 LED 的发光效率进展

年份	发光效率 (lm/W)	备注	年份	发光效率 (lm/W)	备注
1998	5		2001	25	卤钨灯
1999	15	白炽灯	2005	50	估计

表 1-3 长远发展目标

单只白光 LED	
输入功率	10W
发光效率	100lm/W
输出光能	1000lm/W

2. 白光 LED 的特点

白光 LED 是最被看好的 LED 新兴产品，它在照明市场的发展潜力值得期待。与白炽灯及荧光灯相比，白光 LED 具有体积小（多只、多种组合）、发热量低（没有热辐射）、耗电量小（低电压、低电流启动）、寿命长（10000h 以上）、反应速度快（可在高频操作）、环保（耐震、耐冲击不易破、废弃物可回收，没有污染）、可平面封装、易开发成轻薄短小的产品等优点，没有白炽灯高耗电、易碎及日光灯废弃物含汞污染环境等缺点。白光 LED 与现行照明设备的比较见表 1-4。白光 LED 是被业界看好在未来 10 年内，成为替代传统照明光源的一大潜力商品。

表 1-4 白光 LED 与现行照明设备的比较

照明方式	特 点
白光 LED	具有发热量低、耗电量少（白炽灯泡的八分之一，荧光灯泡的二分之一）、寿命长（数万小时以上，是荧光灯的 10 倍）、反应速度快、体积小、可平面封装等优点，易开发成轻薄短小的产品，是被业界看好在未来 10 年内，成为替代传统照明光源的一潜力商品
荧光灯	荧光灯省电，但有易碎、废弃物含汞污染等问题
白炽钨丝灯泡	低效率、高耗电、寿命短、易碎

白炽灯、 $\phi 5\text{mm}$ LED 与大功率白光 LED 的寿命对比，大功率白光 LED 在寿命上有很大的优势，而白炽灯及其他一些传统光源在很多技术方面提升的空间已经很小了。LED 光谱分布决定了其色纯度和饱和度是传统光源无法比拟的，因此具有很强的竞争优势。大功率白光 LED 的光效高、单位体积小巧，设计弹性很大，可最大限度配合灯光载体的结构特点，且安装方便。

目前白光 LED 仍处于初期发展阶段，在使用寿命上仍待改进，但基本上没有白炽灯、荧光灯的缺点，价格过高是影响推广应用的主要原因。据日本业者估计，LED 晶粒成本需由每只 1 美元降至 0.2 美元以下，才有更高的市场接受度。未来白光 LED 的应用市场将非常广泛，包括手电筒、装饰灯、LCD 背光源、汽车内部照明市场、投影灯光源等，不过最被看好的市场以及最大的市场还是取代白炽灯及荧光灯。

白光 LED 亮度和功率的每一次提高，都进一步扩展了它的应用范围。功率型白光 LED 已被用于特殊照明领域，如可拍照移动电话的闪光灯，将 LVmi-LEDs 作为液晶电视屏的背光源，提高了色彩保真度。此外，目前白光 LED 在景观照明、庭院灯等方面已大量应用。若白光 LED 以 1lm/个的单位为基础，每单位降到 1 元时就进入一般家庭的户外照明；当降到 0.5 元时，可望进入室内照明、走廊照明等市场；当降到 0.25 元时，将开始置换荧光灯。从发光效率看，一旦跨进 60lm/W，相当于 20W 的荧光灯，白光 LED 将迅速普及。在未来 5~6 年中，若发光效率突破 100lm/W，再加上单价继续下降，白光 LED 照明将逐渐普及至一般家庭的各种照明灯具，正式成为 21 世纪的照明新光源。

▶▶ 1.1.2 白光LED的实现方法

1. 蓝光LED + 不同色光荧光粉

日亚公司在蓝光LED成功开发出来之后,随之开发出来的产品便是白光LED。其实日亚公司的白光LED并不是半导体材料本身直接发出白光,而是由蓝光LED激发涂布在其上方的黄光YAG荧光粉,荧光粉被激发后产生的黄光与原先用于激发的蓝光互补而产生白光。通过芯片发出的蓝光与荧光粉发出的绿光和红光复合得到白光,显色性较好。但是,这种方法所用荧光粉的转换效率较低,尤其是红色荧光粉的效率需要较大幅度的提高。目前日亚公司市售商品是利用460nm的InGaN蓝光半导体激发YAG荧光粉,而产生出555nm的黄光,且已经完全商品化,而随着蓝光晶粒发光效率的不断提升以及YAG荧光粉合成技术的逐渐成熟,蓝光晶粒与黄光荧光粉封装的白光LED为目前较成熟的白光LED技术。

虽然利用蓝光晶粒配合黄光YAG荧光粉封装的白光LED是目前较成熟的技术,但是采用这种方法封装出来的白光LED有几个严重的问题迟迟无法解决。首先是均匀度的问题,因为激发黄光YAG荧光粉的蓝光参与白光的配色,所以蓝光波长的偏移、强度的变化及荧光粉涂布厚度的改变均会影响白光的均匀度。最常见的例子便是利用这种方式封成的白光LED,中央部分看起来较蓝(或较白),而旁边的区域看起来较黄(荧光粉涂布较厚),每只白光LED的颜色不尽相同,并具有白光色温偏高、演色性偏低等问题。因此开发一个效果更好的技术是目前各LED厂商的重大课题。

2. 利用紫外或紫光(300~400nm)LED + RGB荧光粉

用紫外或紫光(300~400nm)LED + RGB荧光粉来合成白光LED的工作原理和日光灯类似,但是比日光灯性能要优越,紫光(400nm)LED的转换系数可达0.8,各色荧光粉的量子转换效率可达0.9。该方法显色性更好,但同样存在荧光粉的转换效率较低,尤其是红色荧光粉的效率需要较大幅度提高的问题,并且目前转换效率较高的红色和绿色荧光粉多为硫化物体系,这类荧光粉发光稳定性差、光衰较大,所以开发高效、低光衰的白光LED用荧光粉已成为一项迫在眉睫的工作。

利用不参与配出白光的紫外光LED激发RGB三色荧光粉,由三色荧光粉发出的三色光配成白光。这种方法因为紫外光LED不参与白光的配色,所以紫外光LED波长与强度的波动对于配出的白光而言不会特别敏感。并且可由各色荧光粉的选择及配比,调制出可接受色温及演色性的白光。但是这种技术虽然有种种的优点,却仍有相当的技术难度,包括紫外光波长的选择(荧光粉最佳转换效率的激发波长)、紫外光LED制作的难度以及抗紫外光封装材料的开发等,仍有待进一步的研发。

3. 利用三基色原理将RGB三种LED混合成白光

将RGB三基色LED组成一个像素可得到白光;但这种办法的主要问题是绿光LED的转换效率,现在红、绿、蓝光LED的转换效率分别达30%、10%和25%,白光LED效率可达60lm/W。通过进一步提高蓝、绿光LED的效率,则白光LED的效率可达200lm/W。由于合成白光所要求的色温和显色指数不同,对合成白光的各色LED的效率要求也不同。

利用三色LED直接封装成白光LED的方法是最早用于制成白光LED的方式,其优点是不需要经过荧光粉的转换,由三色LED直接配成白光,除了可避免因荧光粉转换的损失而得到较佳的发光效率外,更可以由分开控制三色LED的光强度,达到全彩的变色效果(可

变色温), 并可由 LED 波长及强度的选择得到较佳的演色性。但其缺点是混光困难, 使用者在此光源前方各处可轻易观察到多种不同的颜色, 并在各遮蔽物后方看到彩色的影子。另外, 因为所使用的红、绿、蓝三个 LED 都是热源, 散热问题更是其他封装形式的 3 倍, 而增加其使用上的困难。目前利用三色 LED 封装形式的白光 LED 的效率可达 25 ~ 30lm/W, 主要应用在散热问题较不严重的户外显示广告牌、户外景观灯、可变色洗墙灯等。但另一方面, 采用电子电路控制, 利用三色 LED 封装形式的白光 LED, 很有机会成为取代目前 LCD 背光模块中的 CCFL 背光源。

红、绿、蓝三色 LED 合成白光综合性能最好, 在高显色指数下, 效率可达 200lm/W, 要解决的主要技术难题是提高绿光 LED 的电光转换效率, 目前只有 13% 左右, 同时成本较高。

三种实现白光技术均已实现产业化, 利用紫外或紫光(300 ~ 400nm) LED + RGB 荧光粉和利用三基色原理将红、绿、蓝三种 LED 混合成白光的技术发展较快。而用单芯片形成白光, 即只要一个芯片就可以形成白光, 这种技术现在还在研发中。

目前市售白光 LED 的水平为: 室温下, 正向电工作压为 3.6V、电流 20mA 时, 发光强度是 0.6cd(最大为 1.1cd); 反向电压为 5V 时, 漏电流为 50 μ A; 色度坐标为 $x=0.31$, $y=0.32$ (20mA), 发光效率为 7.5lm/W, 色温为 6000K。目前利用白光 LED 可以制成最大亮度为 500cd/m² 的白色平板光源。

氮化物 LED 有着广泛的应用前景、大量的市场需求和巨大的经济效益。它的研制成功, 将带动一大批相关产业飞速发展, 推动显示系统和照明方式的更新换代。氮化物的研究已经成为高科技领域国际竞争的制高点, 而且这种趋势仍将继续下去。

随着以氮化物为基础的高亮度白光 LED 应用的开发, 新一代绿色环保型固体照明光源(氮化物白光 LED) 已成为人们关注的焦点。它与传统的白炽灯和荧光灯相比, 具有亮度高、能耗低、寿命长、结构紧凑、体积小、平面化、质量轻、方向性好、响应快、无辐射、耐各种恶劣条件等优点。

4. 白光 LED 的特性

1) 利用蓝光 LED 激发 YAG 荧光体的白光 LED 的特性

如图 1-4 所示是圆头桶状白光 LED (10cd 级) 的发光频谱与温度的关系曲线, 该圆头桶状白光 LED 由多个 LED 矩阵构成, 室温时, 蓝光 LED 的波长最大值为 465nm。波长为 555nm 的黄光是由具有 150nm 发光幅宽的 YAG: Ce³⁺ 离子 (5d \rightarrow 4f 迁移) 构成的。YAG: Ce³⁺ 的发光激发波长为 460nm, 随着温度上升, 465nm 最大发光激发波长会迁移到长波长区段, 这与 InGaN 半导体的禁止波长领域的温度变化相同。而 555nm 的黄光波长区段则不会有迁移现象, 但发光强度却会急剧下降, 主要原因是温度上升后蓝光 LED 的最大发光波长迁移到长波长区段, YAG: Ce³⁺ 激发区段的共鸣位置依序偏移, 造成发光强度随之下降。由于白光 LED 的发光特性受到温度的影响, 所以温度若超过 50 $^{\circ}$ C, 黄色发光强度会急剧下降, 白光的演色性变差, 色度则大幅偏移。

图 1-5 所示是白光 LED 发光效率与正向电流的关系曲线, 由图可知白光 LED 1mA 的发光效率约等于 45lm/W。不过 10mA、20mA 时则变为 27lm/W 与 23lm/W, 如此高的发光效率是蓝光 LED 本身具有很高的内部量子效率, 以及低电流时的高注入效率所造成的。

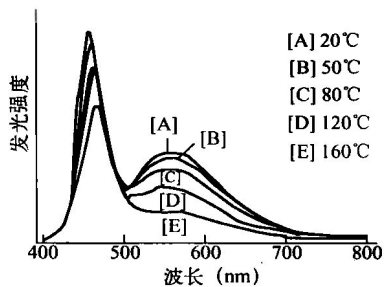


图 1-4 白光 LED 的发光频谱与温度的关系曲线

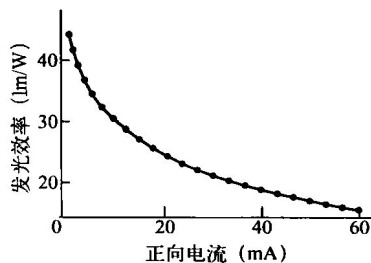


图 1-5 白光 LED 发光效率与正向电流的关系曲线

2) 利用紫外光 LED 激发 RGB 荧光体的白光 LED 的特性

利用紫外光 LED 激发 RGB 荧光体的白光 LED 结构图如图 1-6 所示。利用紫外光 LED 激发 RGB 荧光体的白光 LED 属于 InGaN-LED (发光波长为 382nm)，它是由高反射率的金属电极与覆芯片和蓝宝石基板取光结构所构成的，可被紫外线波长激发变成白光的荧光体涂布于作为紫外线反射膜的玻璃基板表面，将其贴附于紫外光 LED 芯片上方，紫外光 LED 芯片端缘则镀有一层可把紫外线转换成可视光的膜层。

紫外光 LED 室温时发光频谱与电流的关系曲线如图 1-7 所示。在电流为 10mA 时、发光波长为 382nm (3.24eV)、半值幅为 100nm 时却随着电流的增加，发光波长会朝短波长区段移动，100mA 时则移动至 3.14eV (约等于 394nm) 低能量范围。

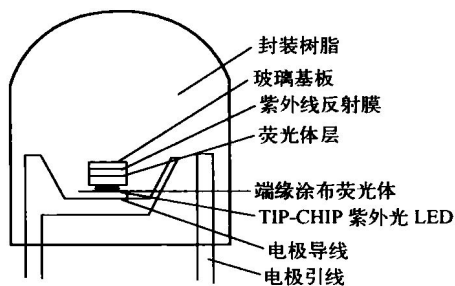


图 1-6 紫外光 LED 与 RGB 荧光体构成的白光 LED 结构图

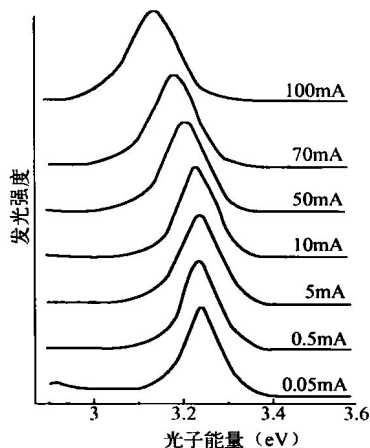


图 1-7 紫外光 LED 室温时发光频谱与电流的关系曲线

如图 1-8 所示是紫外光 LED 的发光频谱与正向电流的关系曲线，由图可知紫外光 LED 发光强度最大值分别依附于波长 626nm、528nm、447nm 范围内，即使增加注入电流发光频谱也没有显著的改变，反而是发光强度随着电流的增加呈线性成长。此时白光 LED 的发光效率约为 10lm/W，平均演色指数 R_a 可通过 RGB 荧光体剂量的最佳化选择而达到 83~90。

如图 1-9 所示是利用紫外光激发的白光 LED 与蓝光激发的白光 LED 的电流与色度关系

曲线。电流从 1mA 增加至 150mA，利用蓝光与 YAG 构成的白光 LED，蓝光反而逐渐变强，白光的色度变化则显著改变；而利用紫外光激发的白光 LED 几乎没有发生任何变化，所以利用紫外光激发 RGB 荧光体的白光 LED 可通过荧光体的组合获得 R_a 值超过 90 的高演色性白光，使得未来一般室内照明的应用范围更加广阔。

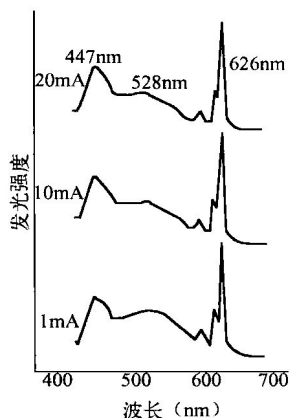


图 1-8 紫外光 LED 的发光频谱与正向电流的关系曲线

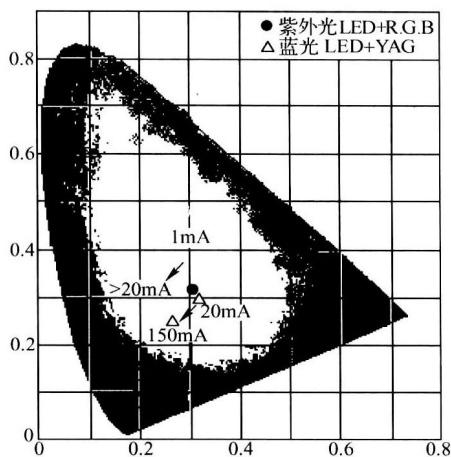


图 1-9 两种白光 LED 的色度电流注入关系

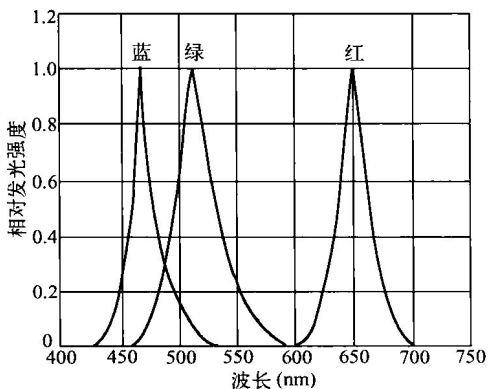


图 1-10 RGB 三原色 LED 的发光光谱

如图 1-10 所示是利用 RGB 三原色 LED 的发光光谱。利用 RGB 三原色 LED 组合构成的白光 LED，在技术上是最单纯，但是至今还迟迟无法商业化，主要原因是 RGB 三原色 LED 的半导体材质的差异极大，因此驱动电路的设计也变得极为复杂。因红光 LED 的驱动电压为 1.8V，绿光与蓝光则为 3.5V，且 RGB 三原色 LED 的发光波长分别是红光 640nm、绿光 525nm、蓝光 470nm，彼此的半幅值相当狭窄，所以采用 RGB 三原色 LED 构成的白光 LED 距实用阶段还有一段距离。除了技术上还有许多问题有待克服之外，每只白光 LED 的成本价格

也是实用化的阻力。虽然美国业者曾经利用蓝、绿光 LED（波长为 500nm）与琥珀色 LED（波长为 612nm）的互补色关系制作虚拟白光 LED，但 R_a 值相当低，前景并不乐观。

为了使白光 LED 能具有高发光效率 (K) 与演色性 ($R_a = 80$)，基本上有单晶片与多晶片两种封装方式，见表 1-5。所谓单晶片，是使用蓝色或紫色以及紫外线光线撞击荧光体或 ZnSe 结晶产生白光；多晶片则是使用 RGB 三原色 LED 或加黄橙色 LED，3~4 种 LED 同时工作产生白光。多晶片方式除了驱动电压与发光方式不同之外，温度特性与元件寿命也有很大的差异，距离实用化仍有许多问题需要克服；单晶片方式则因为是由单一元件所构成，因此驱动电路较易设计。

表 1-5 白光 LED 的分类

方式	结构	荧光材料和发光体	发光原理	特性	
				$K(\text{lm/W})$	R_a
单晶片	蓝光 LED	InGaN/YAG、CdZnSe/ZnSe 结晶	发光体激发荧光体	15(YAG)、10	>80(YAG)
	紫光 LED	InGaN/RGB 等 3-4 种荧光体	利用紫外光激发荧光体	80	80-90
多晶片	蓝光 LED 黄橙光 LED 绿光 LED 红光 LED	InGaN、AlInGaP、AlGaAs	3 或 4 种 LED 同时封装为一体	20	80

表 1-5 的 K 与 R_a 值适用于上述任何种类的白光 LED。表 1-6 是紫外系白光 LED 的基本特性。

表 1-6 紫外系白光 LED 的基本特性

结构	材料/参数	结构	材料/参数
基板	已加工过蓝宝石	顺向 20mA 时的电压	3.4V
转位密度	$1.5 \times 10^8 \text{ cm}^2$	光输出	15.6mW
封装方式	复晶片	外部量子效率	24%

利用紫外撞击三原色荧光体所获得白光的发光效率可由式 (1-1) 计算:

$$K_{\text{uvwhite}} = \frac{\int \frac{\lambda_0}{\lambda} \times F_{\text{ph}}(\lambda) \times k(\lambda) d\lambda}{I \times V \int F_{\text{ph}}(\lambda) d\lambda} \times P \times \eta_{\text{uvph}} \times \eta_{\text{ph}} \quad (1-1)$$

式中, I 为白光 LED 的驱动电流; V 为白光 LED 的驱动电压; P 为紫外系列白光 LED 的光输出; λ_0 为紫外系列白光 LED 的波长; η_{ph} 为 RGB 荧光体的效率; η_{uvph} 为转换效率; $F_{\text{ph}}(\lambda)$ 为荧光体的发光频谱; $k(\lambda)$ 为视感度系数。

假设 $\eta_{\text{uvph}} = 95\%$; $\eta_{\text{ph}} = 90\%$, 30mW 光输出的白光 LED, 代入式 (1-1) 可计算出的白光 LED 发光效率为 100lm/W。

▶▶ 1.1.3 白光 LED 的效率

从理论和技术发展分析, 白光 LED 的光效可以达到 200lm/W 以上, 白光 LED 的光效在近 5 年内提高 6 倍, 目前人们将白光 LED 划分为 2005 年和 2012 年两个阶段目标。2005 年后开始替代白炽灯, 进入商业照明; 2012 年进入一般家庭照明。达到预定目标白光 LED 有两个问题必须克服, 即提高光效和光通量。人们正对蓝色、紫外 LED 芯片、LED 封装 (包括荧光粉涂敷工艺) 及荧光粉进行改进。对芯片来说, 需要发展大尺寸芯片、制造大功率芯片、采用芯片倒置新技术使外量子效率提高、积极研制波长更短的紫外光 LED。最近, 美国南加州大学采用四元 AlInGaN 多层量子阱 (MQW) 技术研制出波长为 305 ~ 340nm 的紫外光 LED, 这是目前最短波长的紫外光 LED, 对 $20\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m}$ 这种条状器件而言, 波长为 340nm 时的输出功率高达 1mW。

人们的肉眼相对光敏感性 (虚线), 如图 1-11 所示。因为白光是不同波长的混合, 所