



白光 LED

照明技术

● 田民波 朱焰焰 著

图字:01-2011-6775 号

内 容 简 介

白色发光二极管(LED)于1996年问世,当初主要在小光源及手机背光源等领域使用。开始出现的白光,是由蓝光LED发出的蓝光与靠蓝光激发YAG荧光体发出的黄光混色而得的拟似白光。此后,随着LED发光波长的多样化、高输出化以及蓝光乃至近紫外光激发的高辉度、高效率发光的新型荧光体的开发,白光LED在最近几年间正向着替代白炽灯泡及荧光灯的方向,作为下一代光源而急速进展。目前,面向一般家庭照明用的白光LED光源已有市售。

目前国内正在推广的节能型灯泡式荧光灯,在今后逐渐被白光LED所替代,这听起来似乎令人不可思议。当然,在LED及荧光体的高性能化、低价格化、生态学及人们观念改变等方面,还有大量问题需要解决。白光LED作为下一代光源的动向,正成为全世界关注的焦点。

本书内容包括白光LED发光原理、白光LED照明的研发与展望、白光LED照明的种类及其特征、白光LED照明的关键技术、外延基板与封装基板、白光LED照明的颜色与色彩评价技术、白光LED照明的应用开发、白光LED照明的技术革新、经营战略与国际标准等。

本书可作为相关专业本科生及研究生用教材,特别适合产业界的技术人员阅读。

本书为(台湾)五南图书出版股份有限公司授权科学出版社在大陆地区出版发行简体字版本。

图书在版编目(CIP)数据

白光LED照明技术 / 田民波, 朱焰焰著. —北京: 科学出版社, 2012
ISBN 978-7-03-033877-8

I. ①白… II. ①田… ②朱… III. ①发光二极管—照明 IV. ①TN383
中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第047041号

责任编辑: 霍志国 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年5月第一版 开本: 787×1092 1/16

2012年5月第一次印刷 印张: 18 1/2

字数: 391 000

定价: 69.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

白色发光二极管 (light emitting diode, LED) 照明起源于日本, 作为可取代白炽灯泡、荧光灯、高压放电灯 (high-intensity discharge lamp, HID) 等的高新技术和新兴产品而备受瞩目。在过去的十年间, 科技界以蓝光、近紫外 LED 技术为基础, 以一般照明光源的应用为努力目标, 实现从“看”的照明向装饰照明发展, 世界各国都在不懈地进行学术、产业的研究与开发。

2001 年世界各国和地区陆续拟订了新能源政策: 美国能源部提出“固态照明国家研究项目”; 日本提出“21 世纪的照明”技术研究发展计划; 欧盟设立了“彩虹”计划; 中国正式设立了“国家半导体照明工程项目”国家计划; 中国台湾地区提出了“次世纪照明光源开发计划”。每个发展计划都有大量公司、科研机构和大学参与其中, 白光 LED 在照明领域的应用具有重要的意义, 已带来照明领域的重大技术创新。

照明用白光 LED 光源的开发利用之所以如火如荼, 是因为它具有白炽灯泡和荧光灯所不具备的优良特征。如 LED 照明寿命长, 小型轻量, 节省电力, 热损耗低, 且不像荧光灯那样含有水银等有害物质, 而且兼备光量可自由调节、亮度能自在控制的高功能性。日本于 1998 年由经济产业省确定的通称“21 世纪的照明”计划中, 作为白光 LED 照明世界先驱, 开始了与荧光灯相同发光原理的白光 LED 照明光源的研发; 更于 2007 年 11 月在东京召开“第一届白光 LED 和固体照明国际会议”, 并由业界确定了“LED 照明”这一专业名词。

根据各国发表的信息, 2010 年以后将终止白炽灯泡的生产, 逐渐转换为电灯泡形荧光灯, 将来进一步替换为 LED 照明的生产。因此, 节能减排型的 LED 照明光源的实用化已迫在眉睫, 我们正处在照明历史的转折点。

现今世界各国用于照明的电量约占全部能耗的 20%; 预计从 2011 年始, 全部白炽灯泡、荧光灯类中的 10% 以上将由 LED 照明所取代; 由于 LED 照明的推广与普及而节约的能源, 预计到 2030 年将达到 20%, 即 200 亿 kWh。

以“照”为主体的映像和照明也属于文化范畴, 包含了人文科学的很

多层面，因国家和地域不同而有差异。但关于节能和环保的概念，全世界都是一致的。白色 LED 光源的研究开发课题，首先集中在改善发光效率方面，还包括提高以自然光为高品质目标的色再现性以及新的制作、封装工艺的研发，新材料的创新等。关于世界各国研究开发的最新发展动向和照明光源、器具、包括安全性在内的标准化，也在本书中进行了讨论。

本书内容包括白光 LED 发光原理、白光 LED 照明的研发与展望、白光 LED 照明的种类及其特征、白光 LED 照明的关键技术、外延基板与封装基板、白光 LED 照明的颜色与色彩评价技术、白光 LED 照明的应用开发、白光 LED 照明的技术革新、经营战略与国际标准等。

本书的内容主要面向企业的研究者、工程技术人员和理工科大学生、研究生等，且为了便于业内实际操作者、经营者以及一般读者等理解，免去了分析和公式推导，使用了大量的图、表等，尽量做到图文并茂，通俗易懂。

本书除了内容新、覆盖面广、思路开阔、概念清晰之外，最突出的特色是所讨论的内容都源于技术研发和产品制作的第一线。读者可以从了解到，要生产具有市场竞争力的先进白光 LED 固体照明器件和器具，要涉及什么技术，用到哪些关键材料，技术诀窍在哪里，目前的技术水平如何，发展动向、前景又是怎样等。

本书在编写过程中，参考了主要先进国家的 LED 技术，尤其以日本、美国为主。作者水平有限，不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

田民波

清华大学材料科学与工程系教授

朱焰焰

天诺光电材料股份有限公司董事长

2012 年春

目 录

前言

第 1 章 白光 LED 发光原理	1
1.1 LED 及相关材料	2
1.1.1 LED 的发光原理	2
1.1.2 LED 相关材料	4
1.2 LED 的基本知识	8
1.2.1 LED 的基本结构和基本方程	8
1.2.2 内部量子效率	12
1.2.3 光取出效率	15
1.2.4 配光特性	16
1.2.5 工作电压	18
1.2.6 发光光谱	20
1.2.7 热设计	21
1.3 蓝光 LED——实现白光 LED 照明的起点与关键	22
1.3.1 LED 早期发展简介	22
1.3.2 蓝光 LED 的发展	23
1.3.3 蓝光 LED 元件结构	24
1.3.4 制作蓝光 LED 元件关键技术	30
第 2 章 白光 LED 照明的研发与展望	33
2.1 利用 LED 照明技术的研发	34
2.2 白光 LED 照明特征与最新技术	37
2.2.1 白光 LED 的种类与特征	37
2.2.2 构造与配光特性及发光效率	42

2.2.3	最新技术动态与节能照明技术	46
2.2.4	色调可变的白光 LED 照明光源	47
2.3	应用产品与市场动态及技术发展预测	49
第 3 章	白光 LED 照明的种类及其特征	53
3.1	以蓝光 LED 为基础的白光 LED	54
3.1.1	以蓝光 LED 为激发源的白光 LED 发光原理与构造	54
3.1.2	白光 LED 的效率	60
3.1.3	照明用高光通量白光 LED 的开发	63
3.1.4	白光 LED 显色性的改善	66
3.1.5	正在普及的半导体固体照明	68
3.2	以近紫外 LED 为基础的白光 LED	70
3.2.1	近紫外激发荧光体变换型白光 LED 研发与光品质	70
3.2.2	近紫外激发白光 LED 的特征与其他方式的比较	71
3.2.3	近紫外 LED 及近紫外激发的白光 LED 所需要的材料特性	74
3.2.4	近紫外激发白光 LED 的发光效率和损失	75
3.2.5	高显色性近紫外激发白光 LED 的现状	79
3.2.6	高附加值光源	84
第 4 章	白光 LED 照明的关键技术	87
4.1	荧光体	88
4.1.1	从荧光体看白光 LED 的历史	88
4.1.2	白色 LED 的构成及特征	89
4.1.3	白光 LED 照明用荧光体的性能	91
4.1.4	对应于蓝光激发的白光 LED 用荧光体	92
4.1.5	对应于紫外或近紫外激发的白光 LED 用荧光体	99
4.2	LED 材料	101
4.2.1	作为 LED 材料的荧光体	101
4.2.2	灌封用树脂材料	110
4.3	内部量子效率的评价方法	117
4.3.1	LED 的效率	117

4.3.2	内部量子效率的导出法	118
4.3.3	内部量子效率导出方法的检测实验	120
4.4	封装材料与封装技术	125
4.4.1	炮弹型 LED	125
4.4.2	炮弹型 LED 的封装材料	130
4.4.3	炮弹型 LED 的封装技术	137
4.4.4	表面安装 (SMD) 型 LED	142
4.4.5	SMD 型 LCD 的元件构造	143
4.4.6	SMD 型 LED 的封装技术	144
4.5	多晶片白光 LED 的种类及其特征	148
4.5.1	LED 的发展与多晶片 LED	148
4.5.2	多晶片方式与单晶片方式的比较	150
4.5.3	多晶片 LED 的构造及特征	155
4.5.4	多晶片 LED 的应用现状	158
4.5.5	多晶片 LED 的发展前景	159
第 5 章	外延基板与封装基板	161
5.1	外延基板	162
5.1.1	各种外延基板材料	162
5.1.2	基板材料开发的变迁	162
5.1.3	蓝宝石单晶	164
5.1.4	GaN 基板	171
5.1.5	SiC 基板和 AlN 基板	173
5.1.6	氧化镓基板	175
5.2	封装基板	177
5.2.1	大功率 LED 封装工艺进展	177
5.2.2	新型大功率 LED 封装离不开封装基板	183
5.2.3	高热导基板的分类和特点	184
5.2.4	热传输的数学物理模型	185
5.2.5	高热导聚合物基复合材料基板	188
5.2.6	金属基板 (IMS)	193
5.2.7	陶瓷基板 (ceramic substrate)	195

5.2.8 陶瓷直接覆铜板 (DBC)	198
5.2.9 其他类型的散热基板	198
第 6 章 白光 LED 照明的颜色与色彩评价技术	201
6.1 显色性评价的基础	202
6.1.1 显色性与评价方法	202
6.1.2 显色性评价方法的变迁	203
6.1.3 CIE/JIS 显色性评价方法	204
6.2 显色、色彩评价的研发与白光 LED 显色应用	210
6.2.1 显色评价数及其存在的问题	210
6.2.2 色彩	211
6.2.3 条件等色 (metameism, 条件配色同色异谱)	218
6.2.4 利用 CIELAB 对白光 LED 的评价	221
6.2.5 可变色 RGBCYM 白光 LED	225
6.3 小结	228
第 7 章 白光 LED 照明的应用开发	231
7.1 光源特征及设计方面的课题	232
7.1.1 关注外形的设计	232
7.1.2 关注照度的设计	234
7.1.3 关注光流量的设计	235
7.1.4 关注寿命的设计	236
7.1.5 关注效率的设计	237
7.1.6 关注显色性的设计	238
7.2 技术课题	239
7.2.1 导热及散热技术	239
7.2.2 寿命预测技术	242
7.2.3 如何减低色偏差与非均匀性	244
7.2.4 如何减低眩光 (glare)	247
7.3 LED 照明器件的开发趋势	250
7.3.1 LED 器件的应用实例	251

7.3.2 白光LED从晶片到照明器具的工艺过程和主要的技术课题	252
7.3.3 220~280nm带域AlGaIn系深紫外LED的应用领域	253
7.3.4 LED照明器件的价格	254
7.4 小结	255
第8章 白光LED照明的技术革新、经营战略与国际标准	257
8.1 技术革新与国际竞争力	258
8.2 白光LED光源与传统光源的比较	263
8.3 新市场开拓与企业的经营模式	265
8.3.1 蓝光激发白光LED	265
8.3.2 近紫外激发白光LED	268
8.3.3 市场的变化	269
8.4 如何应对国际标准化	271
8.4.1 标准化简介	272
8.4.2 各国应对国际化的方针	272
8.5 小结	275
结束语	275
参考文献	277
索 引	281

白光 LED 发光原理

- 1.1 LED 及相关材料
- 1.2 LED 的基本知识
- 1.3 蓝光 LED——实现白光 LED 照明的起点与关键

发光二极管 (light emitting diode, LED) 是近几年迅速崛起的半导体固态发光元件, 与传统的白炽灯泡、荧光灯等比较, 具有小型、设计紧凑耐振动性好, 简约、坚固稳定性好, 发热少而寿命长, 亮度高、发光响应速度快, 工作电压低、驱动电源非常简单等优点, 随着 LED 效率提高, 其产量快速增加, 扩展迅速。

作为全书的起点, 本章首先针对 LED 的基本知识、蓝光 LED 与白光 LED 的发光原理作简要介绍。

1.1 LED 及相关材料

1.1.1 LED 的发光原理

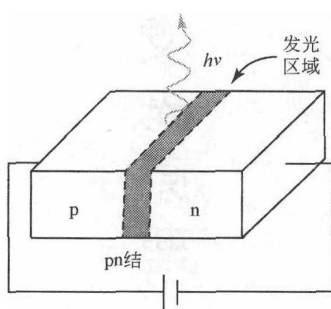


图 1.1 LED 的结构示意

LED 元件是在由电子传导的 n 型半导体和由空穴传导的 p 型半导体所构成的 pn 结上施加顺向偏压, 由于注入少数载流子而发生复合所引起发光 (自然发射) 的元件。LED 的结构如图 1.1 所示, 核心部位是一个 pn 结。但如何在发光层附近高效率地复合发光, 发何种波长的光, 以及如何提高光的射出效率等, 需要各种各样的技术方法。

图 1.2 给出表示 LED 工作原理的能带结构。如图 1.2 (a) 所示, 在外加偏压为零、热平衡的状态下, 因无载流子注入而不发光; 而如图 1.2 (b) 所示, 当 pn 结上外加顺向偏压时, 通过耗尽层, 电子从 n 型区向 p 型区注入, 同时空穴从 p 型区向 n 型区注入, 该过程称为少数载流子注入。

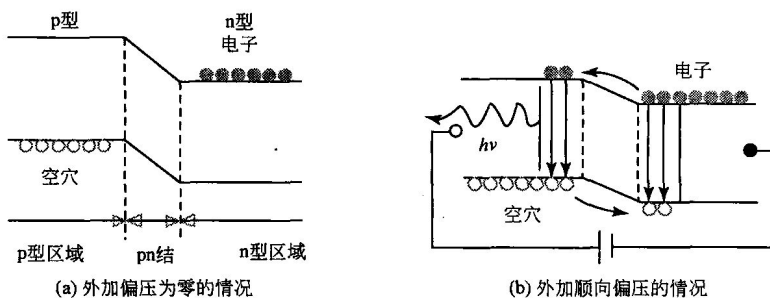


图 1.2 LED 的能带结构

设从 n 型区向 p 型区注入电子。在 n 型区, 电子是多数载流子; 而在 p 型区, 电子是少数载流子。流入 p 型区的电子, 即较之热平衡状态过剩的电子, 与作为多数载流子的空穴发生复合而消失。同时如图 1.2 (b) 所示, 有可能放出光子, 而光子所带的能量与带隙能量相等。少数载流子空穴发生的过程与上述电子发生的过

程相反。由于pn结上施加顺向偏压时，流过的电流是因少数载流子引起，因此，LED的光输出大致与电流成正比，如图1.3所示。

pn结是由p型半导体和n型半导体的结合面（结面）构成，有同质结和异质结之分。前者是由同种半导体，后者是由异种半导体结合而成。在异质结中，利用p型区和n型区的带隙能不同，可形成较高能垒，就可保证基本上不引起载流子注入。即通过采用异质结，可以对注入载流子进行控制。该载流子控制技术一直是LED开发的重要课题。

为提高LED的亮度和发光效率，近年来LED的开发几乎都是采用双异质结结构。以下以GaAs系LED作实例说明。

图1.4给出n-GaAlAs/GaAs/p-GaAlAs双异质结结构，图1.5表示其能带结构。在双异质结结构中，如图1.4所示，其是由两个异质结组合而成的。

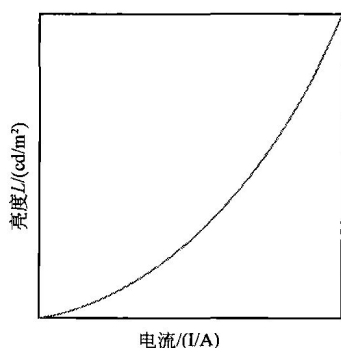


图 1.3 LED 的亮度 - 电流特性

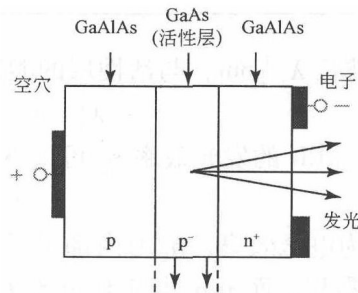


图 1.4 双异质结结构概念图

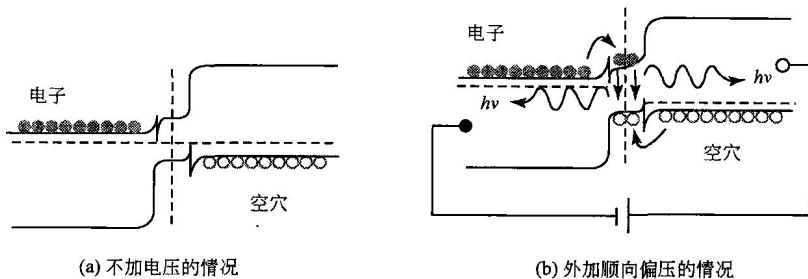


图 1.5 双异质结能带结构图

图 1.5 (a) 是不加电压的情况，左侧是 n-Ga_{1-x}Al_xAs，它的能隙 E_g 也与混晶比 x 相关，大致为 2eV；中间是 GaAs，它的 E_g 为 1.4eV；右侧是 p-Ga_{1-x}Al_xAs，它的 E_g 大致为 2eV。也就是说，由于中间 GaAs 的 E_g 小，从能带看，如同一个井，称其为阱层。同时，由于发光主要是在此 GaAs 层发生，因此，该层也称为活性层。与之相对，两侧的 Ga_{1-x}Al_xAs 层，由于能隙大，从中间的井中看，如同井壁，故称其为阱壁层。

图 1.5 (b) 表示对双异质结构外加电压 (顺向偏压): 对于中间的阱层来说, 自左侧来的 n-GaAlAs 电子注入会在其中存留电子, 自右侧来的 p-GaAlAs 空穴注入会在其中存留空穴, 这样, 阱层中既会有电子又会有空穴的存留, 从而这些电子和空穴容易在阱中发生复合。表 1.1 给出已实用化的三色高效率 LED 的基本材料和结构。其中红色的发光层使用的是 GaInP, 绿色和蓝色发光层都使用的是 GaInN。虽然绿色和蓝色发光层使用的是同一材料系, In 的含量不同; In 含量越高, 能带间隙则越宽。

表 1.1 几种已实用化的高效率 LED 的基本材料和结构

彩色	发光层材料	双异质结构
红 (R)	Ga _{0.5} In _{0.5} P	n-AlGaInP/GaInP/p-AlGaInP
绿 (G)	Ga _{0.25} In _{0.75} N	n-GaN/GaInN/p-AlGaN/p-GaN
蓝 (B)	Ga _{0.2} In _{0.8} N	n-GaN/GaInN/p-AlGaN/p-GaN

发光波长 λ [nm] 与活性层的能带间隙 E_g [eV] 之间的关系, 大致可表示为

$$\lambda [\text{nm}] = 1240/E_g [\text{eV}] \quad (1.1)$$

而且, LED 的发光效率 η_o 可由下式给出

$$\eta_o = \eta_v \eta_i \eta_e \quad (1.2)$$

式中, η_v 为电压效率; η_i 为内部量子效率; η_e 为光的取出效率。外部量子效率是 η_i 与 η_e 的乘积, 而 $\eta_i \eta_e$ 与工作电流密切相关。

1.1.2 LED 相关材料

1. 发光材料

LED 中使用的材料都是化合物半导体。化合物半导体中有 III-V 族的 GaAs、GaP、GaAsP、GaAlAs、AlInGaP、GaN 及 II-VI 族的 ZnS、ZnSe、ZnCdSe, IV-IV 族的 SiC 等多种。目前可达到实用化水准且有市场供应的 LED 只采用 III-V 族化合物半导体。可见光 LED 多数是由 GaAs、GaP、GaN 系化合物及其混晶半导体制成, 其产品有高发光效率的红、橙、棕、绿、蓝及近紫外 LED 等。

LED 发光的颜色由发光层晶体的种类、组成即 LED 的结构决定。根据式 (1.1), 发光波长 λ 与能隙宽度 E_g 相对应。表 1.2 汇总了用于 LED 的代表性化合物半导体发光材料和其相对应的发光色。其中, 四元混晶半导体 AlInGaP 的发光效率可达到 100lm/W 以上, 而且 InAlGaP 系发光效率也获得明显改善, 在过去的十年中提高了两个数量级以上。采用 InGaN 的蓝光、绿光 LED 也达到商品化, 并使得白光及全色显示成为可能。

表 1.2 用于 LED 的代表性化合物半导体发光材料及发光色

发光材料	代表性发光色/nm
GaAs	红外 (890)
GaP	黄绿色 (565)、红色 (700)
GaAsP	黄色 (583)、橙色 (610)、红色 (630)
GaAlAs	红色 (655)
AlInGaP	橙色 (590)、红色 (635)
InGaN	紫外 (365)、蓝色 (465)、蓝绿色 (500)、绿色 (520)

图 1.6 表示包括 LED 在内的各种光源发光效率的发展史，由此可以看出，LED 发光效率的改善速度进步之快令人惊异。

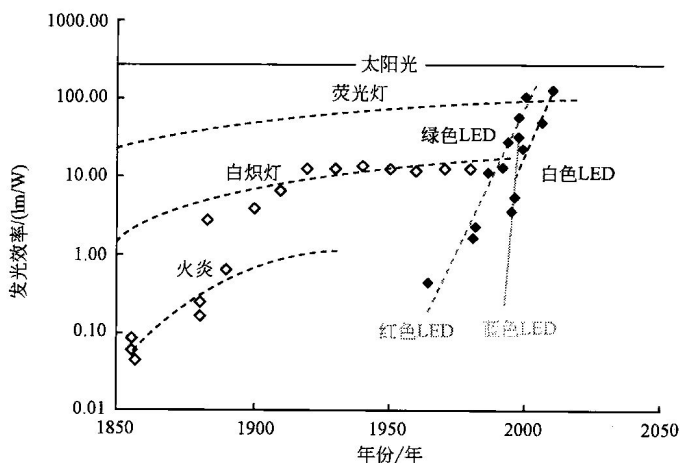


图 1.6 各种光源发光效率的发展史

近年来，InAlGa_N 系在短波长化方面得到飞跃性进展，使得发光波长 300nm 左右的元件都可以制造。为实现 InAlGa_N 系的短波长化，需要增加 Al 的组成比，这样会形成 p 型电导，造成发光效率下降，难以获得特性优良的元件。一般采用宽禁带半导体必须面对的问题是如何生长优质的化合物单晶体、如何控制半导体的导电类型等。

限制比绿光区域波长更长的发光元件性能的原因是：一般认为是氮化物半导体内部发生的压电电场（Piezo）以及自发极化电场。作为解决这一问题的方法，可借由选择晶体的生长面，按人的意愿控制所发生的电场，这种方法近年来受到广泛关注。

氮化物半导体外延膜的生长面多为 *c* 面，借由 *c* 轴的倾斜，可使生长方向上发生的极化电场的影响减小。极化电场为零的面为非极性面，除此以外的面为半极性面。采用非极性面、半极性面氮化物半导体，可以获得过去利用 *c* 面难以实现的不存在压电电场影响的发光层，并且作为单晶生长的面可发挥更大效能。

2. 外延基板材料

大多数以 LED 为主的半导体元件，不是由块体单晶，而是由单晶薄膜制作的。为了提高发光特性及对发光波长进行控制，必须采用将多层不同种类薄膜相互重叠的结构。为此，只能借由将单晶薄膜置入基板单晶上的技术获得。

基板单晶对薄膜单晶的品质与方向位置等许多物性都会产生影响，选择适合的基板单晶对于薄膜单晶的生长至关重要。理想的基板单晶应该是由与希望得到的薄膜单晶为同一种材料做出的。例如，若制作 GaAs 的薄膜，由 GaAs 块体单晶作基板是最为理想的。这种薄膜与基板双方为相同物质的单晶薄膜生长方式被称为同质外延 (homo-epitaxial)。通常，半导体的薄膜生长大部分是由同质外延进行的，这是因为像 GaAs 及 InP 这类化合物半导体的块体单晶可以由溶液生长 (液相外延)。

而蓝光、白光 LED 中所用 GaN 的情况则有很大不同。GaN 在常压下不能获得溶液，而且蒸气压极高，采用传统的溶液生长法不能得到块体单晶，因此这种单晶的生长是极为困难的。为此，在 GaN 薄膜的外延生长中，要采用与之不同物质的蓝宝石 (Al_2O_3 单晶) 作基板，目前已达到实用化。这种外延薄膜与所用基板为不同物质的薄膜生长被称为异质外延 (hetero-epitaxial)。

蓝宝石与 GaN 间点阵常数差异很大 (参照第 5 章图 5.1)，按以往的常识，蓝宝石非最适用的基板。因此，人们对多种单晶作为 GaN 外延薄膜的基板做了大量试验，但到目前为止，对于蓝光、白光 LED 来说，蓝宝石基板已稳居不可替代的位置。这大概是由于蓝宝石具有以下优点所致：可以生长大尺寸单晶，价格有可能降低，对于 GaN 薄膜的生长工艺来说蓝宝石十分稳定等。

尽管在蓝光、白光 LED 的应用方面，以蓝宝石基板作为主流，但针对未来高辉度、短波长为目标的研究，同时也对其他基板的应用进行了探索。在这种背景下，经过研究者的努力，据说也成功制作出 GaN 及 SiC、AlN 等材料的块体单晶。GaN 作为 LD 用基板已开始在市场上流通，但作为高辉度 LED 用基板，在价格方面仍不能被用户接受，目前仍在研究之中。SiC 可以获得高品质单晶，其中导电性的 SiC 作为正、反面引出电极的 LED 元件来说具有得天独厚的优势，但是在与蓝宝石的价格竞争方面却略逊一筹。

针对比 GaN 发光更短波长的紫外区域，人们也在抓紧研究 AlN 基板单晶。与 GaN 不同，AlN 有可能借由升华的方法制取，因此升华法是生长 AlN 单晶的主要方法。对于 AlN 单晶的开发，欧美比日本更是先行一步，目前已有直径 1 英寸及 2 英寸的样品问世，但是未能真正做到结晶性和特性兼优的产品。也有人对 AlN 基板的实用性产生疑问，由于单晶生长相继遇到困难，使得一时期内研究人员减少，研究机构撤消，但最近又开始重新组织队伍，据报道，有人已获得相当大尺寸的 AlN 自立单晶。

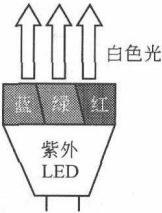
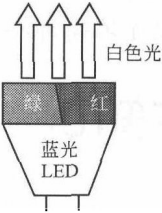
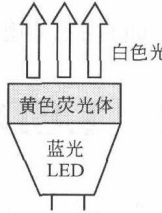
氧化镓 ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) 被认为最新崭露头角的基板材料。由于它兼具大的能带间

隙 ($E_g = 4.8\text{eV}$) 和导电性, 特别是可以生长出大尺寸单晶, 由其直接封装的 LED 也可获得蓝色发光。

3. 荧光体材料

对于白光 LED 来说, 为了获得真正的白光, 一般采用表 1.3 所示的三种方法: ①用紫外光 LED 激发红、绿、蓝三种荧光体; ②用蓝光 LED 激发绿、红两种荧光体; ③用蓝光 LED 激发黄光荧光体。而目前已实用化的白光 LED 几乎都采用由蓝光 LED 与黄光荧光体相组合来实现白光, 但无论哪种方法, 为构成白光 LED, 高效率发光的荧光体是必不可少的。

表 1.3 实现白光 LED 的 LED 发光元件与荧光体的组合

	三波长型白光 LED (红、绿、蓝色荧光体 + 紫外 LED)	三波长型白光 LED (红、绿色荧光体 + 蓝光 LED)	二波长型白光 LED (黄色荧光体 + 蓝光 LED)
方式			

作为蓝光激发而发光的荧光体, 已发表的如表 1.4 所示, 有氧化物系、氮化物系、氧氮化物系、硫化物系等各种不同的种类。

表 1.4 蓝色激发发光的主要荧光体及发光色

化合物类型	荧光体组成	代表性发光色
氮化物系	$(\text{Ca}, \text{Sr})_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}$	红色
	$(\text{Ca}, \text{Sr})\text{AlSiN}_3:\text{Eu}$, 简称 CASN	红色
	$\text{CaSiN}_2:\text{Eu}$	红色
氧氮化物系	$\text{Ca}_x(\text{Si}, \text{Al})_{12}(\text{O}, \text{N})_{16}:\text{Eu}$, 简称 $\alpha\text{-SiAlON}$	橙色
	$(\text{Si}, \text{Al})_6(\text{O}, \text{N})_8:\text{Eu}$, 简称 $\beta\text{-SiAlON}$	绿色
	$\text{BaSi}_2\text{O}_2\text{N}_2:\text{Eu}$	蓝绿色
氧化物系	$(\text{Y}, \text{Gd})_3(\text{Al}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$, 简称 YAG	绿色~黄色
	$(\text{Sr}, \text{Ba})_2\text{SiO}_4:\text{Eu}$	绿色~黄色
	$\text{Ca}_3\text{Sc}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$	绿色
	$\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}$	蓝绿色
硫化物系	$(\text{Ca}, \text{Sr})\text{S}:\text{Eu}$	橙色~红色
	$\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Eu}$	黄色
	$\text{ZnS}:\text{Cu}, \text{Al}$	绿色

氧化物的代表是 YAG 荧光体，它可以有效吸收 460nm 附近的 LED 蓝光，受其激发而发出黄光。YAG 荧光体可表示为 $(Y_a Gd_{1-a})_3 (Al_b Ga_{1-b})_5 O_{12} : Ce$ 。在作为 YAG 激光器所使用的 $Y_3 Al_5 O_{12}$ 单晶的 Y、Al 的各位置，分别用 Gd、Ga 作部分置换，而作为发光中心，添加稀土元素 Ce。YAG: Ce^{3+} 系荧光体因其发光效率高及材料自身的高稳定性而多为采用，但存在高温下发光效率降低等严重问题。而且 YAG 与 Ce^{3+} 系的发光色，因红色成分不足而显示出带绿的黄色，而且在蓝光激发的情况下，还存在白光的色温度高等问题，因此用途受到限制。

氮化物系的特征是，除硫化物系以外，可以说是唯一的由蓝色激发而实现红色发光的荧光体。由于氮的存在，其共价键性增大，致使 Eu 等发光中心的发光向长波长方向变化，并且牢固的化学键合作用使得材料的耐久性更为优良。

在硫化物系中， $(Ca, Sr)S : Eu$ 系、 $CaGa_2 S_4 : Eu$ 系、 $ZnS : Cu, Al$ 系等作为可见光激发荧光体早已被人们所熟知，由蓝光激发可使其高效率地发光。具有半高宽窄的发光光谱之荧光体很多，可产生鲜艳的绿光及红光。但硫化物系一般在耐久性和吸湿性方面存在问题，目前还难以无障碍地在 LED 中应用。

1.2 LED 的基本知识

在本节中，将就 LED 的基本结构，支配 LED 效率的内部量子效率、光取出效率，以及其他特性等，对 LED 的基本知识作简要说明。

1.2.1 LED 的基本结构和基本方程

目前市场上流通的 LED 大部分采用多重量子阱 (multiple quantum well, MQW) 结构，为便于理解其工作原理，首先对双异质结 (double hetero-junction, DH) 结构的 LED 作简要说明。

DH 结构即是作为发光层的活性层，用两层能带间隙宽度比其能带间隙更宽的包覆 (clad) 层相夹的结构。图 1.7 表示 GaAlAs 系 DH 结构 LED 的构造实例及电流分布、发光分布的模拟结果。

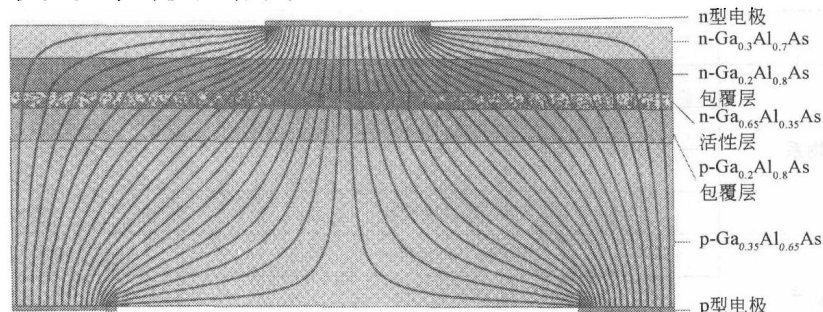


图 1.7 GaAlAs 系 DH 结构 LED 的构造实例与电流分布、发光分布模拟