



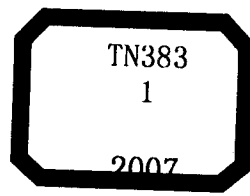
# 半导体 发光二极管 及固体照明

史光国 编著  
崔凯 校



科学出版社

[www.sciencepress.com](http://www.sciencepress.com)



# 半导体发光二极管 及固体照明

史光国 编著  
崔凯 校

科学出版社  
北京

图字: 01-2006-5329 号

## 内 容 简 介

固体照明用白光发光二极管由于可以节省能源减少污染且体积小、寿命长,因此已被全世界重视,中、美、日、韩及欧洲各国均积极参与研发工作。

本书系统地介绍有关白光发光二极管的制造方法及固体照明。本书内容详细丰富,包括固体照明概述,发光二极管光取出原理及方法,高功率红光发光二极管,高功率蓝光及绿光发光二极管,高功率紫外线及紫光发光二极管,白光发光二极管及荧光粉,发光二极管封装及固体照明发展趋势与展望等。

本书可供固体照明领域的研发人员、技术人员,以及高校相关专业的师生阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

半导体发光二极管及固体照明/史光国编著;崔凯校. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-018731-4

I. 半… II. ①史… ②崔… III. 发光二极管-应用-照明-技术-研究  
IV. TN383 TU113.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 034498 号

责任编辑:岳亚东 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面制作:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

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 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007年4月第一版 开本: B5(720×1000)

2007年4月第一次印刷 印张: 17 1/4

印数: 1—4 000 字数: 326 000

定 价: 35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

# 前 言

固体照明采用白色发光二极管,不仅可以节省能源、减少污染,而且使其体积小、寿命长。因此固体照明已被全世界重视,例如中国、美国、日本、韩国及欧洲国家等,这些国家均积极参与研发工作。作者在《现代半导体发光及激光二极管材料技术——进阶篇》一书中曾就白光发光二极管及照明应用作了简单介绍,并阐述了高功率红光、蓝光及紫光等发光二极管的发展近况。最近有关固体照明方面的论文如雨后春笋般纷纷被发表,因此许多新的材料亟需整理汇总。为了系统地介绍固体照明技术,作者撰写了本书,供专门从事固体照明的研发人员及技术人员作参考用书。

本书首先介绍照明领域的进展以及有关照明技术的基本参数,并将如何增加光的取出以得到高发光效率作详细介绍,然后将这些原理及方法应用在高功率红光、蓝光、紫光及紫外线发光二极管的制造上,并对结果作详细的叙述,最后阐述制造白光发光二极管、荧光粉以及封装发光二极管的方法,并展望固体照明的发展趋势与展望。

本书中的一些材料取自《现代半导体发光及激光二极管材料技术》和《现代半导体发光及激光二极管材料技术——进阶篇》两本书,另外还有最新的进展等。本书的每章相互紧密联系。如果要制造高功率白光发光二极管,则需要掌握如何制造高功率不同颜色发光二极管及荧光粉等;若要制造高功率有颜色发光二极管,则需要掌握如何有效地把光从发光二极管中取出。当然,这些技术除了可以应用在固体照明外,还可以应用在其他工业,如汽车、显示器、交通信号甚至医药、光学等领域。

现代科技进步迅速,日新月异,希望本书对固体照明研发人员及制造人员有所裨益,也希望固体照明技术一日千里,有朝一日能够取代白炽灯及日光灯等减少能源的消耗,对人类文明作出极大的贡献。

# 目 录

## 1 固体照明概述

- 1.1 照明技术的变迁 ..... 1
- 1.2 半导体发光二极管的基本原理 ..... 7
- 1.3 照明技术基本参数 ..... 14
- 1.4 高亮度发光二极管的应用 ..... 23
- 参考文献 ..... 24

## 2 发光二极管的光取出原理及方法

- 2.1 发光二极管光取出原理 ..... 25
- 2.2 增加光取出效率的方法 ..... 29
  - 2.2.1 增加内部量子效率 ..... 30
  - 2.2.2 改进内部结构 ..... 32
  - 2.2.3 改变表面结构及外形 ..... 41
  - 2.2.4 基本结构的改变 ..... 65
- 参考文献 ..... 80

## 3 高功率红光发光二极管

- 3.1 采用斜边结构增加光输出功率 ..... 81
- 3.2 组织结构的粗糙面 ..... 86
- 3.3 组织粗糙面加斜边结构 ..... 90
- 3.4 小反射镜 LED ..... 94
- 3.5 连接在有金属反射镜的衬底上 ..... 100
- 参考文献 ..... 107

## 4 高功率蓝光及绿光发光二极管

4.1	大面积 .....	109
4.2	FC LED .....	112
4.3	组织粗糙面 .....	115
4.4	几何变形结构 .....	126
4.5	薄膜 LED .....	130
4.6	图形衬底 .....	134
	参考文献 .....	138

## 5 高功率紫外线及紫光发光二极管

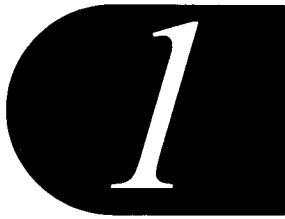
5.1	UV LED .....	139
5.2	紫光 LED .....	157
	参考文献 .....	164

## 6 白光发光二极管

6.1	基本考虑 .....	165
6.2	白光发光二极管的制作方法 .....	168
6.2.1	利用颜色光二极管 .....	169
6.2.2	蓝光 LED 加荧光粉 .....	189
6.2.3	紫外线及紫光 LED 加荧光粉 .....	203
6.2.4	其他方法 .....	219
	参考文献 .....	226

## 7 荧光粉、发光二极管封装及固体照明发展趋势与展望

7.1	荧光粉 .....	227
7.2	发光二极管的封装 .....	249
7.3	固体照明发展趋势与展望 .....	259
	参考文献 .....	266



# 固体照明概述

## 1.1 照明技术的变迁

人类在大约 50 万年前就以燃烧树木产生的火焰及光作为光源使用,这就是最早的光源。随着人类文明的进步,之后烧植物油及矿物油来产生光。1976 年爱迪生发明了白炽灯(Incandescent Lamp),它以碳棒作为灯丝,是照明技术的巨大改进,1938 年发明的日光灯(或称为荧光灯,Fluorescent Lamp)可以减少热的损失,节省能源的消耗,这又是一大进步,后来紧凑型日光灯(Compact Fluorescent Lamp)的开发使其应用更为普遍,同时高压气体放电(HID: High Intensity Discharge)灯如水银灯(Mercury Lamp)、金属卤素灯(Metal Halide Lamp)及钠灯(Sodium Lamp)等的发明可在室外实现照明,满足了各方面的需要。目前约有 21% 的电源用于照明,如果能在固体照明领域节省一半的能源,则会对人类的节约能源作出巨大的贡献。

采用半导体材料(Semiconducting Material)做成红光、黄光及绿光发光二极管(LED: Light Emitting Diode)已在约十年前研制成功,这些 LED 大都用 AlInGaP 材料做成,但直到数年前,用 AlGaInN 材料成功制成蓝光 LED,这才使白光 LED 的梦终成现实。用半导体材料制作白光 LED 被称为固体照明(Solid State Lighting),本书的宗旨就是介绍固体照明技术,下面将先介绍以前的光源的性能。

### 1. 白炽灯

白炽灯是用黑体(BB: Black Body)发热,主要以钨(Tungsten)丝作灯丝(Filament),因为钨有高熔点(3683K)及低蒸发率。只是白炽灯的大部分的光是红外线(Infrared),钨丝放热比黑体稍微蓝移(Blue Shift)即向短波长方向移,如图 1.1 所示,所以发光效率(Luminous Efficiency)比较高,而蓝移也不影响演色性(CRI: Color Rendering Index)。一般钨丝都卷成螺旋形放在球形玻璃壳中,并充入不起反应的惰性气体,例如氩气(Ar)及少数氮气(Nitrogen),而 40W 以

下的白炽灯则多数是抽真空。因为白炽灯的大部分辐射光是红外线，所以 120V 白炽灯的照明效率在 2400K 时约为 8lm/W，一般 100W 白炽灯只有 7% 的电功率转变为可见光。白炽灯寿命衰减的主要原因是钨丝蒸发，白炽灯的一般寿命约 750~1000h，但是因为白炽灯价廉，所以被大量应用在住宅。

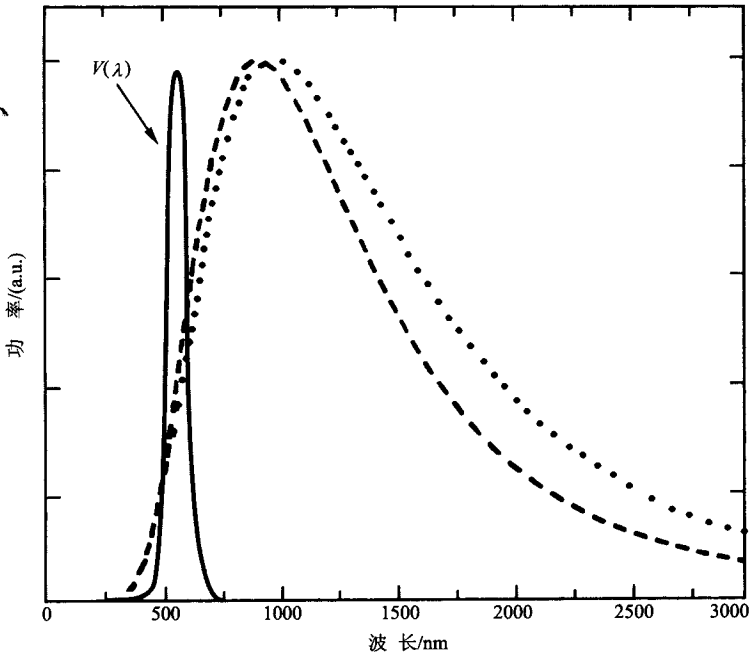


图 1.1 黑体(点虚线)及钨丝发热体(短虚线)在 3000K 时的光谱,图中实线是人眼的感光强度曲线(引自 A. Zukauskas 等人的著作)

## 2. 钨丝卤素灯

为减少钨丝蒸发率以增加其寿命及工作温度,在灯泡中添加卤素气体做成的钨丝卤素灯(Tungsten Halogen Lamp)也颇为流行。钨丝卤素灯的原理是在化学反应时,钨产生卤化物从高温灯丝扩散到冷玻璃壳壁上,由于这是一个可逆反应,所以同时钨的卤化物分解成钨而反方向扩散在钨丝上,结果钨丝的分量没有改变,因此温度可以高达 3450K。一般钨丝卤素灯均在高温工作,灯泡也较小,用的是比较硬的玻璃壳,其寿命比钨丝白炽灯要高两倍。

以上介绍的两种灯均是热辐射发光,下面将介绍气体放电发光。

## 3. 日光灯

当高压电通过气体时,气体会分离而离子化,产生由电子、离子及中性粒子等组成的等离子(Plasma)气体,限制电流使其不致产生雪崩(Avalanche)而逐渐稳定。一般日光灯用低压放电可以产生 11 000~13 000K 的高温,目前日光



灯可用的材料有汞即水银和钠,但是钠灯光是黄色多用在街道上,而汞灯则释放紫外线(UV:Ultraviolet)故多用于一般日光灯,灯管涂上荧光粉(Phosphor)以产生白光。

日光灯的荧光粉可以由 UV 激发产生白光,卤化磷酸盐(Halophosphate)  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{Cl}_3\text{F}):(\text{Sb}^{3+}, \text{Mn}^{2+})$  是最早使用的荧光粉,其中铈(Sb)的作用是增感(Sensitizer)及发光中心(Activator),铈受 UV 激发产生近 480nm 宽带,而锰(Mn)则产生 580nm 宽带,其光谱如图 1.2(a)所示,改变 Sb 及 Mn 的掺杂量可以得到不同的色温(Color Temperature)2700~6500K,但是因为缺少红光,所以其演色性值  $R_a$  只有 50~76 左右。如果要得到高的演色性,可以使用混合物,例如  $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3(\text{Cl}, \text{F}):(\text{Sb}^{3+}, \text{Mn}^{2+})$  及  $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2\text{Sn}^{2+}$ , 但是其发光效率较差。在 1970 年,三色荧光粉研发成功,得到如图 1.2(b)所示的光谱,其中有 600nm、550nm 及 450nm 波长的波峰。三色荧光粉中的红色多用  $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{2+}$ ; 绿色用  $\text{CeMgAl}_{11}\text{O}_{12}:\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{LaPO}_4:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$  及  $\text{CeMgB}_5\text{O}_{10}:\text{Ce}^{3+}; \text{Tb}^{3+}$ ; 蓝

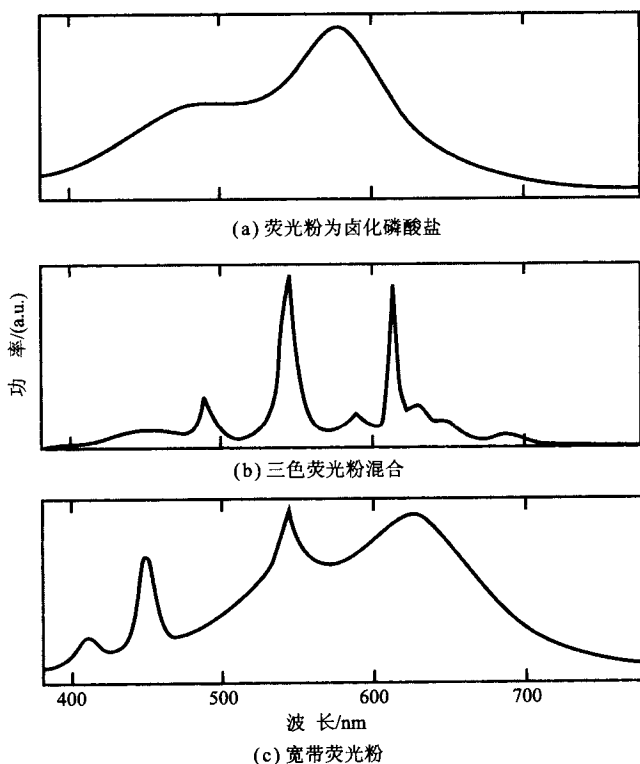


图 1.2 日光灯的光谱图(引自 J. R. Coaton 等人的著作)

色则用  $\text{BaMg}_2\text{Al}_{16}\text{O}_{37}:\text{Eu}^{2+}$  及  $\text{Sr}_{5-x-y}\text{Ba}_x\text{Ca}_y(\text{PO}_4)_3\text{Cl}:\text{Eu}^{2+}$ 。用稀土族 Eu、Tb 等材料可以得到高量子效率,但稀土族元素较昂贵。用三色荧光粉  $R_a$  值可达 80~85。若要得到  $R_a > 90$ ,则需要具有如图 1.2(c)所示宽带光谱的五种荧光粉,包括卤化磷酸盐、三色荧光粉以及宽带红色(620nm) $\text{Mn}^{2+}$  活性化的五硼(Pentaborate)酸盐等材料。

目前日光灯正朝着小管径紧凑型发展,这种灯被称为紧凑型荧光灯(CFL: Compact Fluorescent Lamp),小直径(10~16mm)管可以直接用在灯座上,转换效率可达 28%,比 100W 白炽灯要高四倍。这种灯因为省电、寿命长,并可与普通灯互换,已逐渐被普遍采用。

日光灯比白炽灯效率高、寿命长并且可选择光色,是室内照明光源中发展最快的光源,目前发光效率可达 100lm/W,寿命可达 24 000h, $R_a$  值大于 83。日光灯的最大缺点是光输出与温度有关,在室温下具有最高输出功率,增加或减少温度均会使光输出功率减少,其他缺点是演色性不够高、受无线电波长影响较大以及有噪声,同时因为含汞对环境有影响,但是已在公共场所被大量使用。

#### 4. 低压钠灯

低压钠灯(Low Pressure Sodium Lamp)用钠代替汞可得到含有 589nm 及 589.6nm(D 线)的黄光,但钠熔点比汞高,也比汞活泼,要用抗钠玻璃。因为 D 线的发光效率约为 530lm/W,所以低压钠灯的发光效率可达 100~200 lm/W,只是其演色性很低, $R_a = -44$ ,另外要长时间才能暖起来,所以大部分应用在街道及公路上。

#### 5. 高压汞灯

高压汞(HPMV: High Pressure Mercury Vapor)灯在 2~10atm(1 atm =  $1.01325 \times 10^5$  Pa)下工作,光谱移到宽的长波长波段(405nm、436nm、546nm 及 578nm),如图 1.3(a)所示,主要是蓝绿光,所以演色性低, $R_a$  约为 16,因为缺少红光,为了使  $R_a$  值提高到 50,管内涂上一层荧光粉,一般用  $\text{YV}:\text{Eu}$  或  $\text{Y(P,V,B)O}_4:\text{Eu}$  经 UV 光激发后变成红光,如图 1.3(b)所示。高压汞灯的一半功率变成热,所以效率不高,但是温度稳定性极佳,一般寿命约 8000~10 000h,大部分应用在道路照明及商用建筑的照明。

#### 6. 高压钠灯

高压钠灯主要是 D 线,如图 1.3(c)所示,可以产生 50~1000W 功率,发光效率 60~120lm/W,寿命可达 24 000h,演色性较差, $R_a$  约为 20~25,不适合用于室内照明。增加压力可以增加演色性,但会减少发光效率。最高演色性  $R_a$  可达 85,色温 2500K,但发光效率只有 58lm/W。

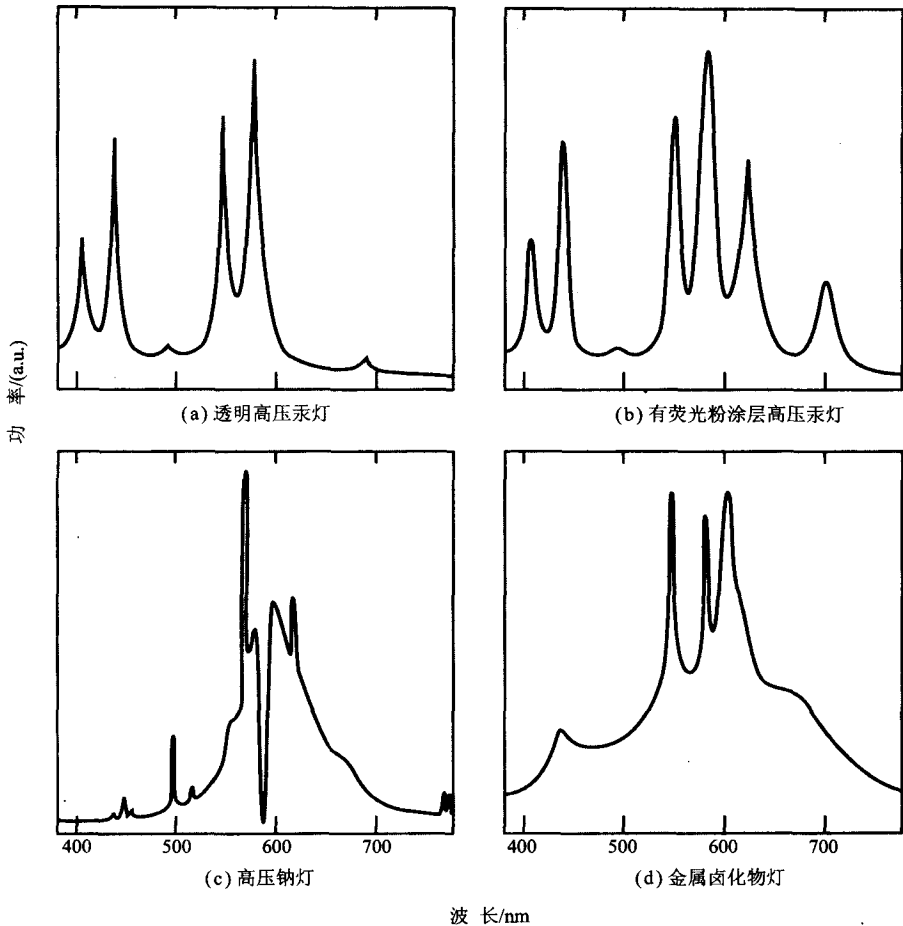


图 1.3 高压放电灯的功率分布(引自 J. R. Coaton 等人的著作)

### 7. 金属卤化物灯

金属卤化物(MH: Metal Halide)灯是在高压汞灯中加入了其他金属,这样可以改进发光效率及演色性。金属卤化物的特性与钨丝卤化物相同。金属卤化物分解产生金属原子辐射出光,而当金属扩散至灯管的冷区时,又与卤化物合成金属卤化物。一般压力在  $10\sim 100\text{Torr}$  ( $1\text{Torr}=1.333\ 22\times 10^2\text{Pa}$ ),虽然其压力比汞灯的  $1\sim 20\text{atm}$  要小,但是其他金属产生一部分光而其激发能量(约为  $4\text{eV}$ )比汞(约为  $7.8\text{eV}$ )要低,一般使用 Na、Sc、Ta、In、Ce 及稀土族碘化物,在连续光谱时使用 Sn 及 Sn-Na 卤化物、铍化物加硼化物及氯化物。图 1.3(d)示出了金属卤化物加上稀土族(Dy/Ho/Tm)-Na-Tl 后所得的光谱。

MH 灯与 HPMV 灯结构相似,功率可以达到  $200\sim 18\ 000\text{W}$ ,发光效率

70~110lm/W,色温 3000~8000K, $R_a$ 为 60~95,寿命 2000~30 000h,可以用于办公室、超级市场、大型店以及工业照明,也可以用在室外照明。目前金属卤化物灯仍处于技术成长阶段,新技术仍在发展中,尤其是投影用金属卤化物灯正向高显色性、高发光效率、高色温、小型化、超高亮度及长寿命方向发展,逐渐取代高压汞灯及钨丝卤素灯。

目前 HID(High Intensity Discharge)灯包括高压汞灯、高压钠灯及金属卤化物灯,其中以金属卤化物灯最具市场潜力及前瞻性。

A. Zukaskus 等人比较了各种照明光源的特性,其结果列在表 1.1 中,以供参考。表 1.2 比较了白炽灯、日光灯、金属卤化物灯与发光二极管等光源的功率转换效率,由表可知白炽灯有极高的红外线损失,金属卤化物灯的可见光转换效率最高,而 LED 虽无红外线的损失,但是有很多功率转变成热。

表 1.1 比较各种照明光源的特性

类 型	功率/W	光通量 (平均值)/lm	效率 /(lm/W)	$R_a$	CT(CCT) /K	使用寿命 /h	1 Mlm·h 价格/\$
白炽灯(120V)	60	865	14.4	100	2790	1000	7.4
钨丝卤素灯(120V)	50	590	11.8	100	2750	2000	12
三色荧光粉日光灯	32	2850 (2710)	84	78	(4100)	24 000	1.6
紧凑型日光灯	15	900 (765)	51	82	(2700)	10 000	3.9
低压钠灯	90	12 750 (11 095)	123	-44	(1800)	16 000	1.6
高压汞灯	250	11 200 (8400)	34	50	(3900)	24 000	3.8
高压钠灯	250	28 000 (27 000)	108	22	(2100)	24 000	1.3
金属卤化物灯	400	36 000 (24 000)	60	65	(4000)	20 000	2
感应灯	55	3500 (2800)	64	80	(3000)	100 000	2
微波硫化物灯	1425	135 000	95	79	(5700)	20 000	?

(引自 A. Zukaskus 等人的著作)

表 1.2 不同照明光源的功率转换效率

输入功率转换为:	发光二极管	白炽灯	日光灯	金属卤化物灯
可见光辐射能量	10%~12%	5%	23%	27%
红外辐射能量	0%	90%	36%	17%
紫外辐射能量	0%	0%	0%	19%
辐射能量总和	10%~12%	95%	59%	63%
热能	88%~90%	5%	41%	37%
总和	100%	100%	100%	100%

(引自 I. Ferguson 的论文)

总之,照明光源已逐渐由白炽灯发展为日光灯,而未来的希望则是白光 LED。白炽灯的色温在 2500~3000K,而日光灯及白光 LED 的色温均可达 3000~10 000K。白炽灯是热发光,日光灯是气体发光,而白光 LED 是冷发光。白炽灯的寿命只有 1000h,日光灯可达 10 000h,白光 LED 则可达 100 000h。白炽灯的反应时间慢,约为 100ms,而且耗电、易碎;而日光灯反应较快但是含有汞会产生污染且易碎;白光 LED 则省电,固体元件特性强,耐震动、反应时间极快,只是价格高,技术尚未成熟。

## 1.2 半导体发光二极管的基本原理

目前使用的大部分灯具是白炽钨丝灯或者采取气体放电,而半导体发光二极管(LED)的发光原理则与大部分灯迥然不同。发光二极管自发性(Spontaneous)的发光是由于电子与空穴的复合而产生的。一般的半导体发光二极管,多以 III-V 族、II-VI 族化合物半导体为材料。图 1.4 示出的是 III-V 及 II-VI 族元素的带隙(Bandgap)与晶格常数(Lattice Constant)的关系。由图可知,这些材料的发光范围由红光到紫外线,目前红光的材料主要有 AlGaInP,而蓝绿光及紫外线的主要材料则有 AlGaInN。虽然 II-VI 族材料也可以得到红光和绿光,但是这族材料极为不稳定,所以目前使用的发光材料大部分是 III-V 族。

发光效率与材料是否为直接带隙(Direct Bandgap)有关,图 1.5(a)是直接带隙材料,包括 GaN-InN-AlN、GaAs、InP、InAs 及 GaAs 等,这些材料的导带最低点与价带最高点在同一 K 空间。所以电子与空穴可以有效地再复合(Recombination)而发光。而图 1.5(b)的材料均是间接带隙(Indirect Bandgap),其带隙即导带最低点与价带最高点不在同一 K 空间,以致电子与空穴复合时除了发光外,还需要声子(Phonon)的配合,所以发光效率低。目前发光二极管用

的都是直接带隙的材料。

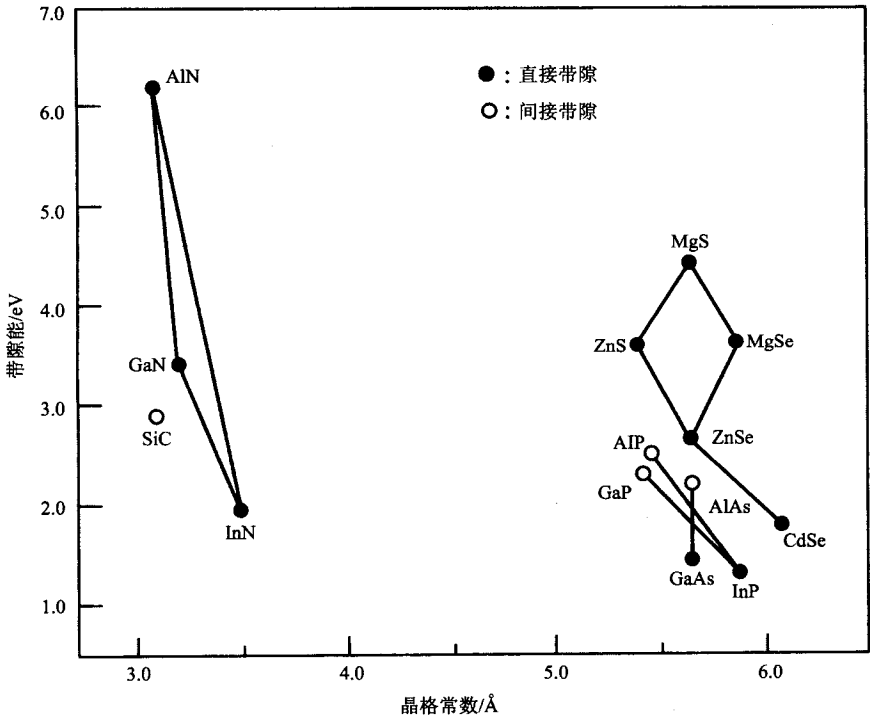


图 1.4 III-V 和 II-VI 族元素的带隙

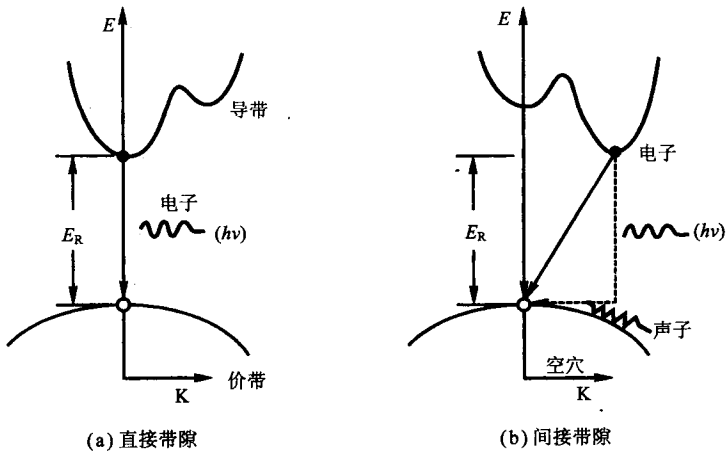


图 1.5 半导体的直接带隙与间接带隙

在直接带隙材料中,电子与空穴复合时,其发光跃迁(Radiative Transition)有多种可能性,如图 1.6 所示。图 1.6(a)是带间复合,图 1.6(b)是自由激子(Exciton)相互抵消,图 1.6(c)是在能带势能波动区域低势能区局部束缚激子的再复合。图 1.6(a)及(b)是一般 AlGaInP 红光 LED 产生光的原理,而图 1.6(c)则是 AlGaInN 的蓝光及绿光 LED 产生光的原理。

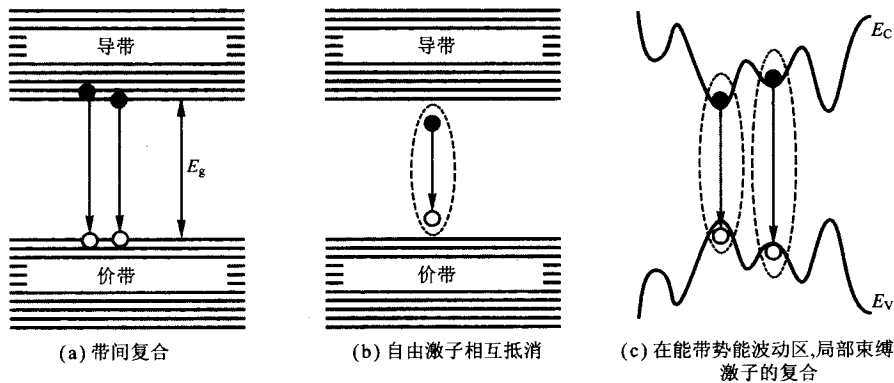


图 1.6 半导体固有发光变迁过程

上述的“复合”是由于本身内部(Intrinsic)而产生的,但是假设将杂质(Impurity)掺入半导体,则会在带隙中产生施主(Donor)及受主(Acceptor)的能级,因此又可能产生不同的复合而发出光如图 1.7 所示。图 1.7(a)是受主与导带复合,图 1.7(b)是施主与价带复合,图 1.7(c)是施主与受主的再复合,图 1.7(d)是激子再复合。

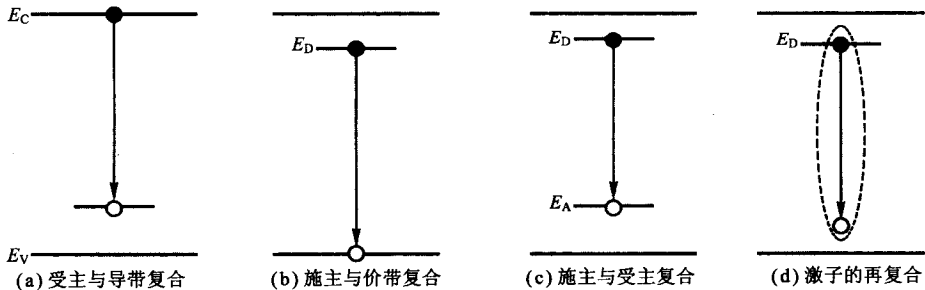


图 1.7 因杂质而产生的发光再复合过程

当电子与空穴复合而产生光时,这些光被称为自发辐射(Spontaneous Emission),其光的方向如图 1.8(a)所示,是多方向的,这是发光二极管的发光特性。但是,如果发出的光是激发辐射(Stimulated)的,如图 1.8(b)所示其方

向一致,则此种元件被称为半导体激光二极管(LD:Laser Diode)。目前要得到高功率 LED 就是要得到非常高的自发辐射。

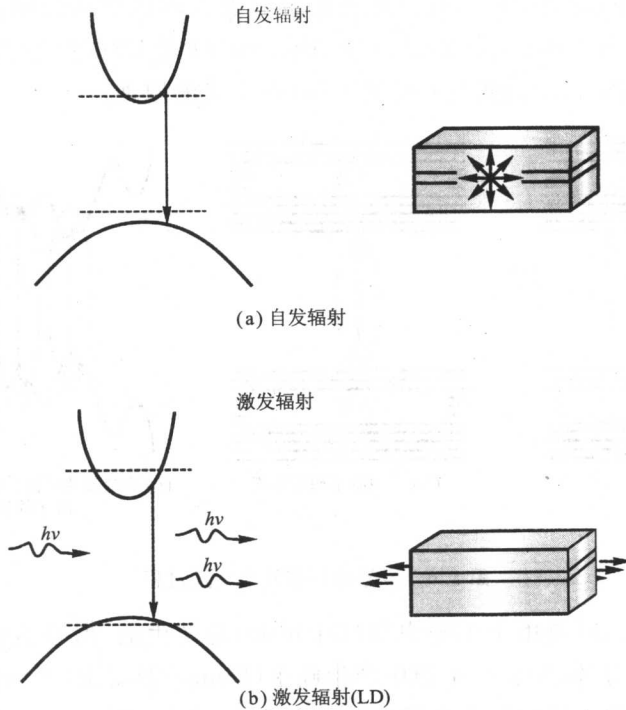


图 1.8

图 1.9 所示为发光二极管 pn 结(Junction)的能带结构, p 型半导体是掺杂了受主杂质,而 n 型则是掺杂了施主杂质,将两种材料放在一起即得到 pn 结。n 型半导体中产生电子, p 型半导体中产生空穴,在中间产生耗尽层(Depletion Layer)。当正向偏压(Forward Bias)加在 pn 结时,多余的载流子(Carrier)会经过耗尽层而渗透至对方。图 1.9 所示的是 pn 结能带,其中,图 1.9(a)表示在平衡状态,图 1.9(b)表示在正向偏压时,图 1.9(c)表示在注入高密度电流时的电子与空穴复合产生光的情况,至于不发光的复合,则有通过禁带中央深能级(Deep Trap Center)的复合以及在晶体中产生的热能损失。当电子与空穴复合时产生不同波长的光,而光波长  $\lambda$  与能量  $E$  间的关系是

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{1240}{E} \text{ (nm)}$$

其中,  $h$  是普朗克常数;  $c$  是光速。



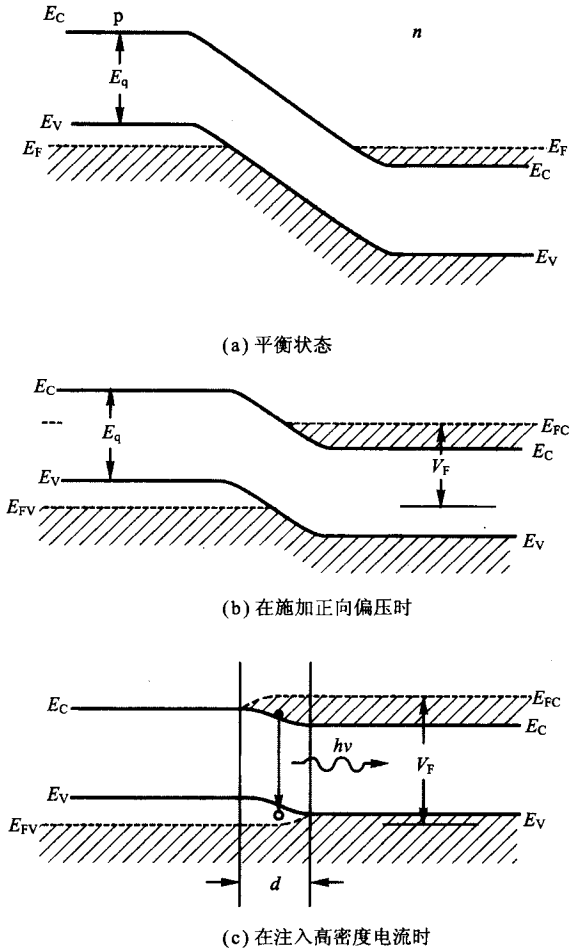


图 1.9 pn 结能带

所有的发光元件都需要具有高的内部量子效率 (Internal Quantum Efficiency), 即产生的光子 (Photon) 与进入 pn 结内的载流子之比, 同时也要有高的外部量子效率 (External Quantum Efficiency), 即产生的发光光子数目与越过 pn 结的载流子数目之比, 外部量子效率比内部量子效率低, 原因之一是有些光在材料表面辐射之前被吸收, 而且光到达表面时只有低于临界角 (Critical Angle) 的光才能辐射。

要得到高的内部量子效率, 一部分与结构有关, 简单的 pn 结用同质结构 (Homo-Structure) 不易得到高效率, 因为 pn 结材料间折射率之差低, 光的阈值也低, 其结果如图 1.10(a) 所示。用图 1.10(b) 所示的双异质结构 (DH: Double-Hetero Structure,) 可以提高效率。在双异质结构中, pn 结材料与中间活性