



半導體物理與元件

(Semiconductor Physics and Devices)

陳隆建

教授

國立臺北科技大學光電工程系

E-mail: ocean@ntut.edu.tw

National Taipei University of Technology

半導體物理與元件

課程大綱

1. 半導體材料概論
2. 晶體成長與量測技術
3. 元件製程技術
4. 金屬-半導體接觸理論
5. Light-Emitting Diodes (LEDs)
6. Photovoltaic Devices (PV Devices)
7. 光電半導體元件技術發展趨勢

課本

1. 發光二極體之原理與製程/陳隆建(全華圖書)
2. P. Bhattacharya, Semiconductor Optoelectronic Devices, Prentice Hall

National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

- ⚙ 晶體性質
- ⚙ 能帶
- ⚙ 半導體材料
- ⚙ 晶體匹配

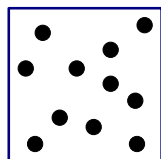
National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

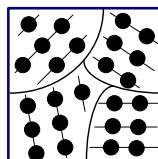
1.1 晶體性質

1.1.1 晶格(lattice)

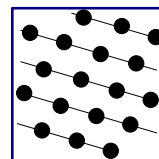
固體材料依其結晶性，可分成三種：(a)非晶(amorphous)，(b)多晶(poly-crystalline)，和(c)單晶(single crystal)。在非晶材料中，原子的排列幾乎是無序的。多晶材料則是在局部的原子或分子級尺寸範圍內，原子的排列具有高度的有序性，因此在整個多晶材料中具有許多有序的區域(或稱為單晶區域)，這些區域稱為結晶區域(grains)，而且彼此以結晶界面(grain boundaries)分隔。至於單晶，理想上，單晶材料在整個材料中，原子的排列具有高度的有序性。



(a)



(b)



(c)

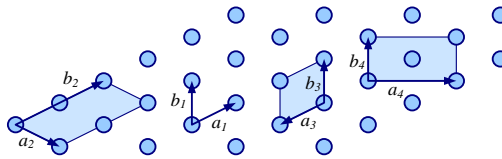
National Taipei University of Technology

1.半導體材料概論

1.1 晶體性質

1.1.1 晶格(lattice)

原子在晶體中週期性排列稱為晶格(lattice)，而晶格所包含之排列週期的空間稱為單胞(unit cell)。在體積空間中，最小的單胞稱為原始單胞(primitive unit cell)。通常為了簡化表示或說明，會以單胞代表整個晶格，而該週期的長度稱為晶格常數(lattice constant)。晶格不但決定晶體的材料性質，也決定晶體的光電特性。



Two-dimensional representation of a single-crystal lattice showing various possible unit cells.

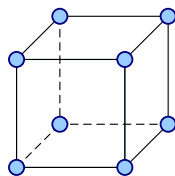
National Taipei University of Technology

1.半導體材料概論

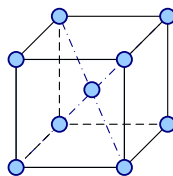
1.1 晶體性質

1.1.1 晶格(lattice)

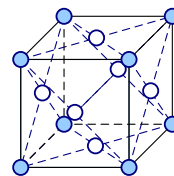
-- Three basic lattice types: (a) simple cubic, (b) body-centered cubic, and (c) face-centered cubic.



(a) 簡單立方



(b) 體心立方



(c) 面心立方

National Taipei University of Technology

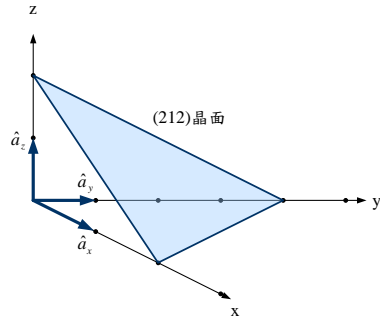
1. 半導體材料概論

1.1 晶體性質

1.1.2 晶面與晶向

-- 米勒指數(Miller Indices)

- A convenient method of defining the various planes in a crystal is to use Miller indices.
- These indices are obtained using the following steps:
 - Find the intercepts of the plane on the three Cartesian coordinated in terms of the lattice constant.
 - Take the reciprocals of these numbers and reduce them to the smallest three integers having the same ratio.
 - Enclose the result in parentheses (hkl) as the Miller indices for a single plane.



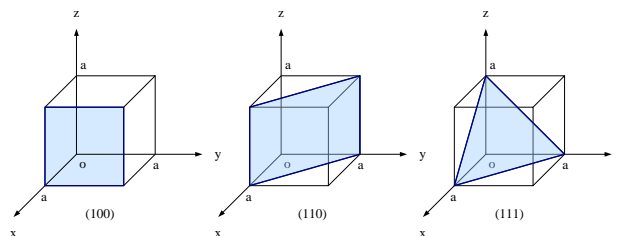
National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

1.1 晶體性質

1.1.2 晶面與晶向

- (a) $\{hkl\}$ 代表等效晶面，例如， (100) ， (010) ， (001) ， (00) ， (00) ， (00) 六個晶面，可以用 $\{100\}$ 表示；及
- (b) $\langle hkl \rangle$ 代表等效晶向，例如， $[100]$ ， $[010]$ ， $[001]$ ， $[00]$ ， $[00]$ ， $[00]$ 六個晶向，可以用 $\langle 100 \rangle$ 表示。



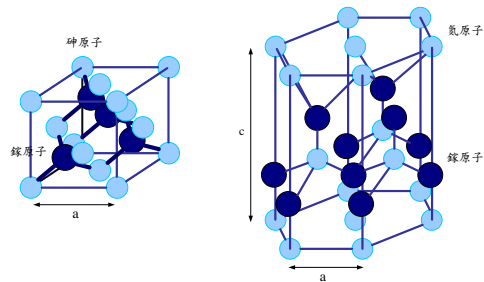
National Taipei University of Technology

1.半導體材料概論

1.1 晶體性質

1.1.3 晶體結構

光電半導體元件(包含發光二極體)的晶體結構有兩種：閃鋅礦結構(zincblende structure)，如砷化鎵(GaAs)，其為立方(cubic)晶系， a 為晶格常數；及纖維鋅礦結構(wurtzite structure)，如氮化鎵(GaN)，其為六角(hexagonal)晶系，因此，其有兩個晶格常數： a 和 c ，如下圖所示。



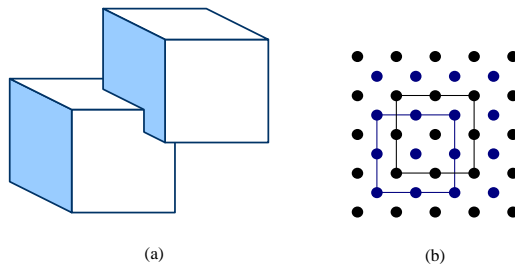
National Taipei University of Technology

1.半導體材料概論

1.1 晶體性質

1.1.3 晶體結構

--閃鋅礦結構(zincblende structure): 兩個FCC $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{4}$ 交錯



National Taipei University of Technology

補充

■ Indium oxide

- The structure of In_2O_3 is C-rare earth structure (or bixbyite)
- In_2O_3 have body centred cubic structure with the lattice constant $a=1.012 \text{ nm}$
- In_2O_3 is a wide-band-gap ($E_g \approx 3.5 \text{ eV}$) transparent semiconductor

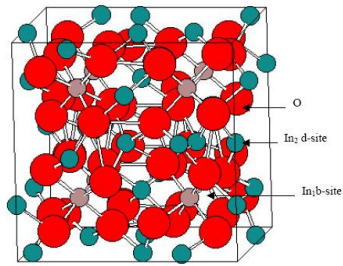


圖 3-1 氧化銦單位晶胞的晶体結構圖(cubic structure)

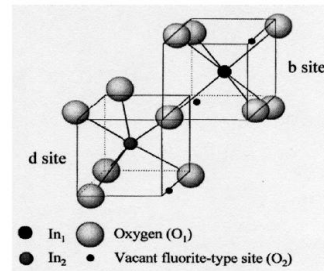


圖 3-2 1/8個氧化銦單位晶胞，氧原子與銦原子的

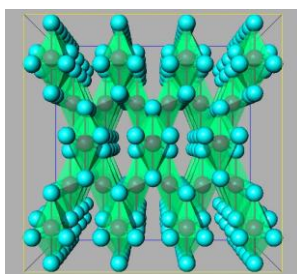
相對位子局部示意圖

National Taipei University of Technology

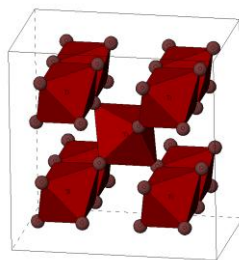
補充

■ TiO_2

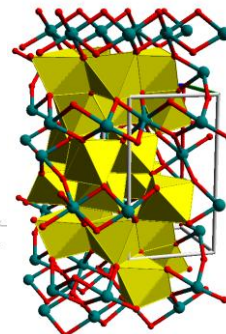
- 有三種結晶型：銳鈦礦 (Anatase)、金紅石 (Rutile) 與板鈦礦 (Brookite)



Anatase(低溫正方晶形)



Rutile(高溫正方晶形)



Brookite

National Taipei University of Technology

1.半導體材料概論

1.1 晶體性質

1.1.4 Brillouin zone

晶體中的電子最好是在反商空間或 k -空間之中說明。在反商空間中最小的單胞稱為第一布里勞因區(first Brillouin zone)。立方晶系半導體之第一布里勞因區(或稱為韋格納-塞茲單胞(Wigner-Seitz cell))係一個斜截八面體，如下圖所示。

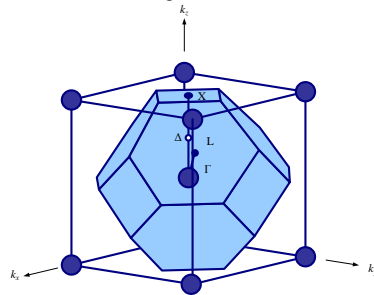


表1

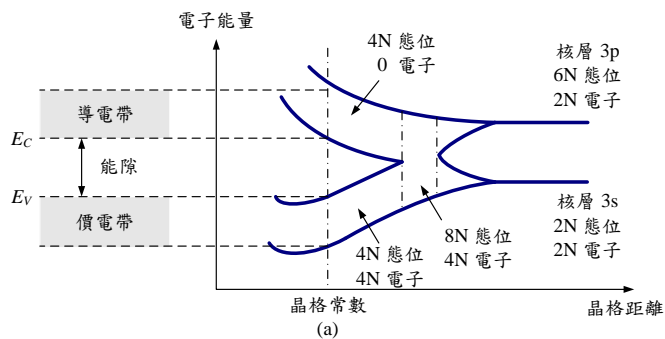
標示	座標
Γ	(0,0,0)
X	(1,0,0)
L	(1,1,1)
Δ	(2x,0,0)

National Taipei University of Technology

1.半導體材料概論

1.2 能帶

1.2.1能帶的形成



National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

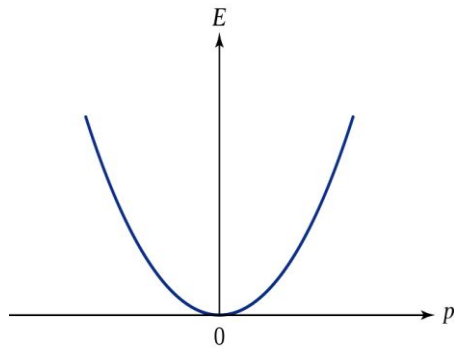
1.2 能帶

1.2.2 能量-動量關係

$$E = \frac{p^2}{2m_0}$$

$$E = \frac{p^2}{2m_n}$$

$$m_n \equiv \left(\frac{d^2 E}{dp^2} \right)^{-1}$$

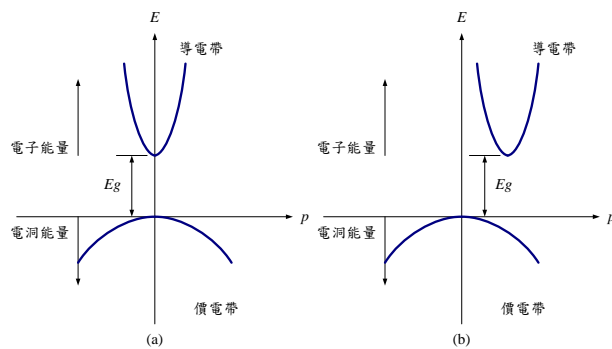


National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

1.2 能帶

1.2.2 能量-動量關係

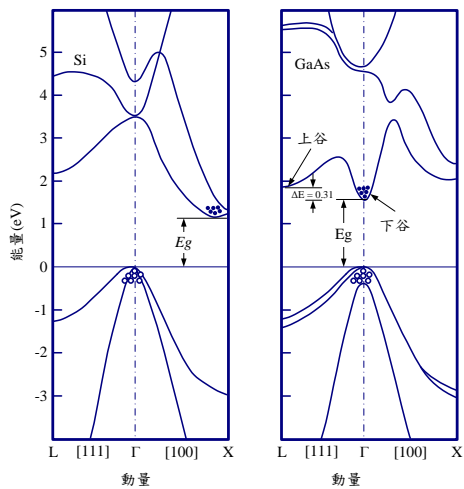


National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

1.2 能帶

1.2.2 能量-動量關係

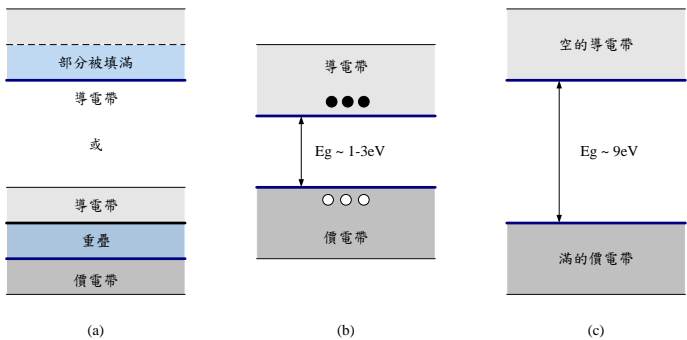


National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

1.2 能帶

1.2.3 導體、半導體和絕緣體



National Taipei University of Technology

1.半導體材料概論

1.3 半導體材料

1.3.1 半導體材料的分類

半導體材料的電阻係數 ρ 約為 10^8 到 $10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 之間，其導電性介於導體和絕緣體之間。半導體材料易受到溫度，輻射，磁場和摻雜雜質的影響。這也是半導體材料成為各種電子元件的材料之重要因素。表2列出週期表中一些跟半導體材料相關的元素。

表2

週期	II	III	IV	V	VI
2		硼(B)	碳(C)	氮(N)	氧(O)
3	鎂(Mg)	鋁(Al)	矽(Si)	磷(P)	硫(S)
4	鋅(Zn)	鎵(Ga)	鍺(Ge)	砷(As)	硒(Se)
5	鎘(Cd)	銦(In)	錫(Sn)	銻(Sb)	碲(Te)
6	汞(Hg)		鉛(Pb)	鉍(Bi)	

National Taipei University of Technology

1.半導體材料概論

1.3 半導體材料

1.3.1 半導體材料的分類

依構成的元素分類，半導體材料可以分為：

- (a)元素半導體(element semiconductor)：如矽(Si)，鍺(Ge)。
- (b)化合物半導體(compound semiconductors)：
化合物半導體又可分成：
 - a)四-四(IV-IV)族化合物半導體：如碳化矽(SiC)
 - b)三-五(III-V)族化合物半導體：如砷化鎵(GaAs)，氮化鎵(GaN)。
 - c)二-六(II-VI)族化合物半導體：如氧化鋅(ZnO)，硒化鋅(ZnSe)。
 - d)四-六(IV-VI)族化合物半導體：如硫化鉛(PbS)。

National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

1.3 半導體材料

1.3.2 化合物半導體(compound semiconductors)

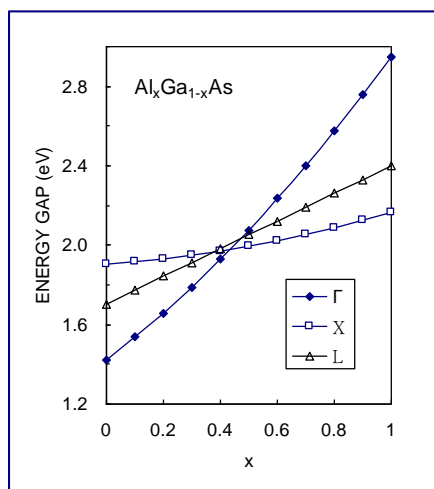
對於三元化合物半導體而言，晶格常數， a ，跟二元的組成呈線性關係。
例如，對於 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 三元化合物半導體，其中 x 稱為化學計量比(stoichiometry)，或稱為固相組成比。其晶格常數可以藉由維加定律(Vegard's law)決定：

$$a_{\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}} = xa_{\text{AlAs}} + (1-x)a_{\text{GaAs}} \quad (1)$$

其中， a_{AlAs} 係AlAs二元化合物半導體的晶格常數，及 a_{GaAs} 係GaAs二元化合物半導體的晶格常數。

National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論



National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

1.3 半導體材料

1.3.2 化合物半導體(compound semiconductors)

但是，其他的參數通常就不會遵守這種線性關係，如能隙(E_g)。三元化合物半導體一般都會使用一種經驗關係式估算：

$$E_g(x) = E_{go} + bx + cx^2 \quad (2)$$

其中， E_{go} 為較低能隙之二元化合物半導體的能隙， b 為適合參數(fitting parameter)， c 為彎曲參數(bowing parameter)，其可以藉由理論計算或由實驗決定。能隙的彎曲性會因合金(alloying)，使原子排列的失序性更嚴重。

對於一個新的化合物半導體材料，由於能隙對組成的變化關係是未知的，所以無法估算(2)式中的 b 和 c 。有一種可以根據下列之方程式，估算出化合物半導體材料的能隙之方法：

$$E_g(x) = xE_g^A + (1-x)E_g^B \quad (3)$$

依A材料和B材料的能隙權重，估算化合物半導體的能隙，此種方法稱為虛擬晶體近似法(virtual crystal approximation)。

National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

1.3 半導體材料

1.3.2 化合物半導體(compound semiconductors)

至於能隙對溫度的變化關係，則可以藉由下列之經驗關係式表示，此關係式由Varshni最先提出：

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{AT^2}{B+T} \quad (4)$$

其中， A 、 B 為適合參數(fitting parameter)，係依實驗結果決定。

- Q: 半導體材料的能隙會隨溫度的增加而減少，為什麼？

National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

1.3 半導體材料

1.3.3 半導體的摻雜

(a) 態位密度(Density of States, DOS)

在邊長為 L 的半導體材料中之電子，三維的薛丁格波動方程(Schrödinger wave equation)為：

$$-\frac{\hbar^2}{2m_n} \nabla^2 \psi = E \psi \quad (5)$$

其中， ψ 為波函數(Wave function)， E 為電子的能量。(7)式之解的形式為：

$$\psi = \psi_0 e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad (6)$$

其中， $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$ ， $\vec{r} = \hat{a}_x L + \hat{a}_y L + \hat{a}_z L$ 。因為電子係以駐波方式來回移動，所以由(8)式，得

National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

$$k_x = n_x \frac{2\pi}{L}, \quad k_y = n_y \frac{2\pi}{L}, \quad k_z = n_z \frac{2\pi}{L} \quad (7)$$

其中 n_x 、 n_y 和 n_z 為正整數，此處為了方便令 $n_x = n_y = n_z = 1$ 。另一方面，電子的動能可表示為：

$$E = \frac{p^2}{2m_n} = \frac{(\hbar k)^2}{2m_n} \quad (8)$$

因此，

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{2m_n E}{\hbar^2} \quad (9) \quad k = \frac{\sqrt{2m_n E}}{\hbar} \quad (10)$$

在3維的 k -空間中， k 空間的體積 V 為 $\frac{4}{3}\pi k_F^3$ 。因此，在3維的 k -空間中電子的總數 N 為：

$$N = 2 \times \frac{\frac{4}{3}\pi k_F^3}{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3} = \frac{k_F^3 L^3}{3\pi^2} \quad (11)$$

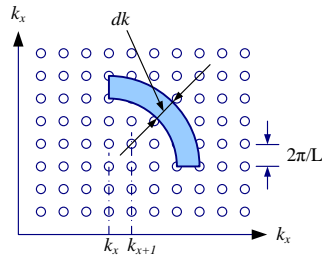
態密度 $D(E)$ 定義為 dN/dE ，所以：

$$D(E) \equiv \frac{dN}{dE} = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_n E}{\hbar^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{2m_n}{\hbar^2} \right) = 4\pi \left(\frac{2m_n}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} E^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

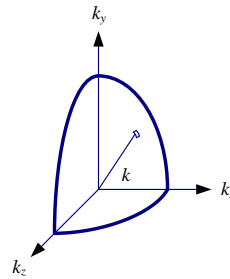
National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

--在 k 空間中所允許的態位



(a) 二維的情形



(b) 三維的情形

✿ Q: DOS的物理意義為何?

National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

1.3 半導體材料

1.3.3 半導體的摻雜

(b) 本質半導體

在本質半導體之導電帶中的電子濃度(或稱為本質電子濃度)係由下式求得：

$$n = \int_{E_c}^{\infty} n(E) dE = \int_{E_c}^{\infty} D(E) F(E) \quad (13)$$

其中 n 為本質電子濃度(單位為 cm^{-3})， E_c 為導電帶中最底端的能量， $n(E)$ 為能量為 E 時的本質電子濃度， dE 為能量增量， $N(E)$ 為能量為 E 時的態位密度(density of state, DOS)， $F(E)$ 為費米-狄拉克分佈函數(Fermi-Dirac distribution function)。

費米-狄拉克分佈函數係一個電子佔據能量 E 之態位的機率，其方程式為：

$$F(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} \quad (14)$$

其中 k 為波茲曼常數(Boltzmann constant)， T 為絕對溫度， E_F 為費米能階(Fermi level)，即電子佔據機率為 $1/2$ 時的能量。

National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

1.3 半導體材料

1.3.3 半導體的摻雜

(b) 本質半導體

在半導體材料在熱平衡狀態下，若無任何外加能量，如照光或電場，電子會因熱擾動而從價電帶躍遷到導電帶，同時在價電帶留下等數量的電洞。此時，若半導體材料中的雜質數量遠小於因熱所產生的載子(電子/電洞)數量時，則此半導體材料稱為**本質半導體(intrinsic semiconductor)**。

在本質半導體之導電帶中的電子濃度(或稱為本質半導體濃度)係由下式求得：

$$n = \int_{E_c}^{\infty} n(E) dE = \int_{E_c}^{\infty} D(E) F(E) dE \quad (15)$$

其中 n 為本質電子濃度(單位為 cm^{-3})， E_c 為導電帶中最底端的能量， $n(E)$ 為能量為 E 時的本質電子濃度， dE 為能量增量， $D(E)$ 為能量為 E 時的態位密度(density of state, DOS)， $F(E)$ 為費米-狄拉克分佈函數(Fermi-Dirac distribution function)。

National Taipei University of Technology

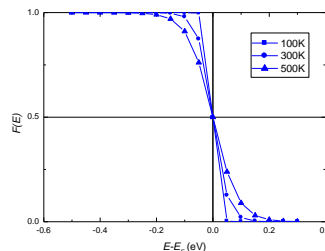
1. 半導體材料概論

● 費米-狄拉克分佈函數(Fermi-Dirac distribution function)

一個電子佔據能量 E 態位的機率，其方程式為：

$$F(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/KT}} \quad (16)$$

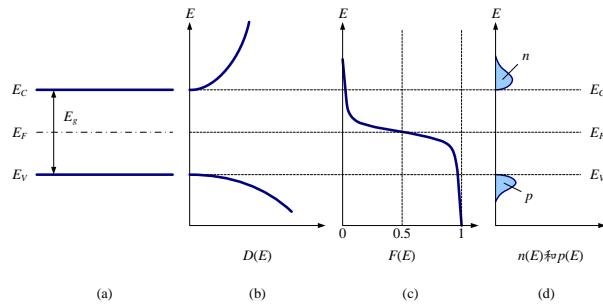
其中 k 為波茲曼常數(Boltzmann constant)， T 為絕對溫度， E_F 為費米能階(Fermi level)，即電子佔據機率為1/2時的能量。



National Taipei University of Technology

1.半導體材料概論

- 本質半導體的能帶圖，態位密度，費米-狄拉克分佈函數，和載子濃度
注意: $n = p = n_i$



- Q: 利用(14), (15), (16)式，推導：

$$n = N_C \exp[-(E_C - E_F)/kT], \quad N_C \equiv 2(2\pi m_n kT/h^2)^{3/2} \quad (17)$$

$$p = N_V \exp[-(E_F - E_V)/kT], \quad N_V \equiv 2(2\pi m_p kT/h^2)^{3/2} \quad (18)$$

National Taipei University of Technology

1.半導體材料概論

- 質量作用定律(mass action law)

$$np = n_i^2 \quad (19)$$

$$n_i^2 = N_C N_V \exp(-E_g/kT) \quad (20)$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp(-E_g/2kT) \quad (21)$$

- 本質半導體的費米能階

$$E_F = E_i = \frac{(E_C + E_V)}{2} + \left(\frac{kT}{2}\right) \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) \quad (22)$$

National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

1.3 半導體材料

1.3.3 半導體的摻雜

(c) 外質半導體

- 當半導體材料被摻入一些雜質(impurity)時，此時的半導體材料就會從本質半導體(intrinsic semiconductor)變成外質半導體(extrinsic semiconductor)。摻入的雜質原子會取代半導體材料中原來的原子，在適當的溫度下，如150K，這些摻入的雜質就會貢獻出額外的電子或電洞，此種情形稱為「游離化(ionization)」，而貢獻出額外電子的雜質稱為施體(donor)，此時的外質半導體為n型半導體，而貢獻出額外電洞的雜質稱為受體(acceptor)，此時的外質半導體為p型半導體。

- n型半導體(假設完全游離)

$$n = N_D \quad (23) \quad E_C - E_F = kT \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) \quad (24)$$

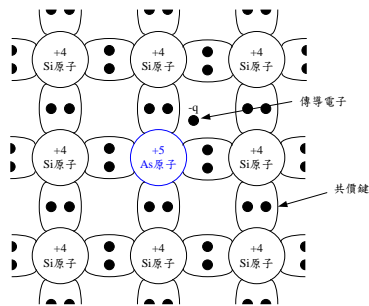
- p型半導體(假設完全游離)

$$p = N_A \quad (25) \quad E_F - E_V = kT \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) \quad (26)$$

National Taipei University of Technology

1. 半導體材料概論

✱ 例如



第1.14圖 摻入施體砷之矽半導體。

- ✱ Q: 對矽(Si)而言，可使用的p型摻雜物(dopant)為何?
- ✱ Q: 質量作用定律是否依然適用?

National Taipei University of Technology

1.半 導體材料概論

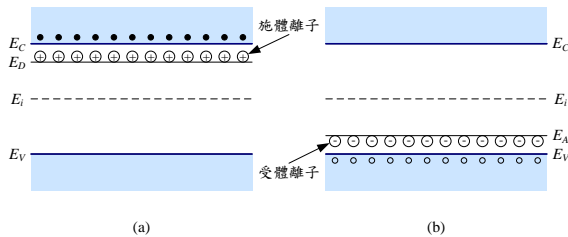
1.3 半 導體材料

1.3.3 半 導體的摻雜

(c) 外質半導體

當受體濃度 N_A 越高， E_F-E_V 的值越小，即雜質能階就越接近價電帶

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \quad (27) \quad p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) \quad (28)$$



第1.15圖 (a)施體離子和(b)受體離子的外質半導體的能帶示意圖。

National Taipei University of Technology

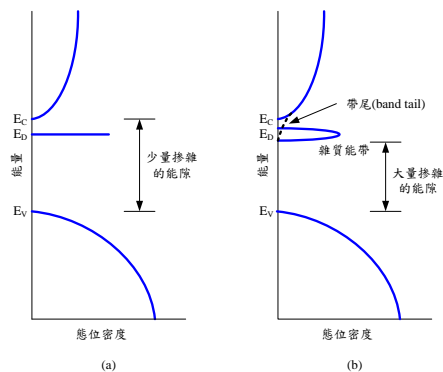
1.半 導體材料概論

1.3 半 導體材料

1.3.3 半 導體的摻雜

(d) 簡併半導體

當半導體材料中的施體濃度 N_D 或受體濃度 N_A 等於或高於有效態位密度(N_C 或 N_V)時，也就是半導體材料在高摻雜的情形下，此時的半導體稱為簡併半導體 (degenerate semiconductor, 或稱為退化半導體)。半導體材料在大量摻雜的情形下，摻雜物(dopant)之電子的波函數(wave function)會重疊而形成雜質能帶。同時，導電帶因過度擁擠使得導電帶會向能隙延伸，而形成帶尾(band tail)，因此產生一種能隙窄化效應 (bandgap narrowing effect)。



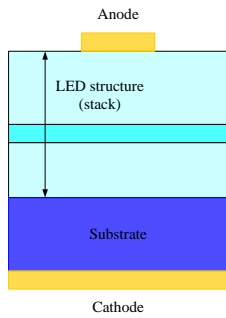
(a)少量摻雜和(b)大量摻雜施體雜質時的能帶示意圖。

National Taipei University of Technology

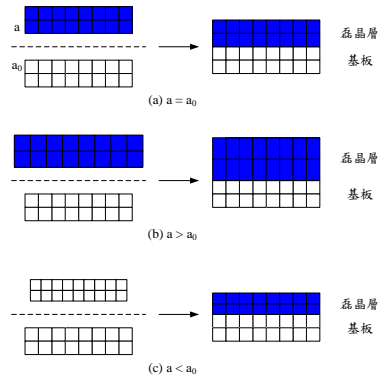
1.半導體材料概論

1.4 晶體匹配

1.4.1 晶格匹配



磊晶層與基板接合的三種情形：
(a)晶格匹配，(b)收縮形變，(c)張大形變。

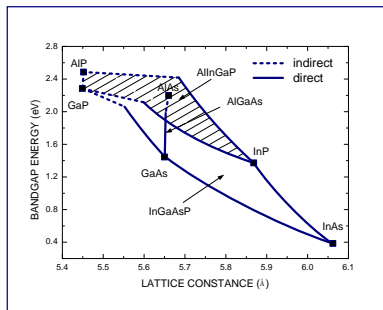


National Taipei University of Technology

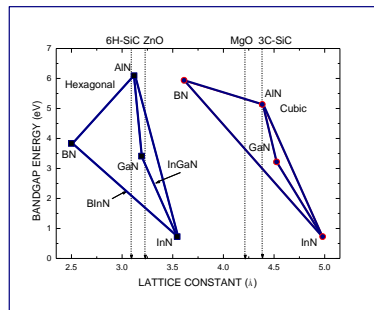
1.半導體材料概論

1.4 晶體匹配

1.4.2 材料的選擇



閃鋅礦晶格之III-V族化合物半導體的晶格常數-能隙關係圖。



纖維鋅礦晶格之III-V族化合物半導體的晶格常數-能隙關係圖。

National Taipei University of Technology

2. 晶體成長與量測

- ⚙ 單晶成長
- ⚙ 磊晶成長
- ⚙ 晶體量測
- ⚙ 其他的晶體成長方法

2.1 單晶成長

1. 柴可拉斯基長晶法

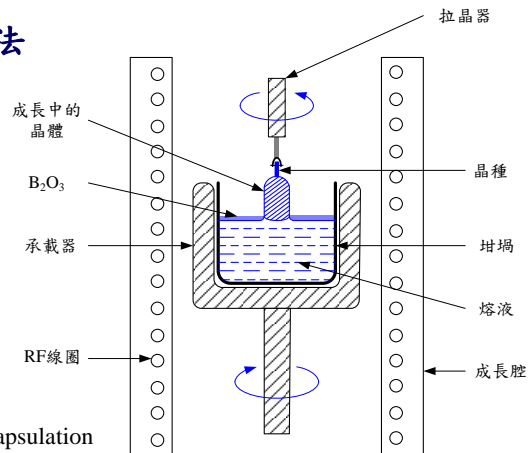
Pre-process

- Starting from raw material to form metallurgical-grade Si
 - $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow (2000\text{ }^\circ\text{C}) \text{Si} + 2\text{CO}\uparrow$
- Metallurgical-grade Si to form Trichlorosilane
 - $\text{Si} + n\text{HCl} \rightarrow (300\text{ }^\circ\text{C}) \text{SiHCl}_3 + \text{MCl}_x$
- Trichlorosilane to form polysilicon
 - $2\text{SiHCl}_3 + 2\text{H}_2 \rightarrow 2\text{Si} + 6\text{HCl}$
- Ready for CZ growth

2.1 單晶成長

1. 柴可拉斯基長晶法

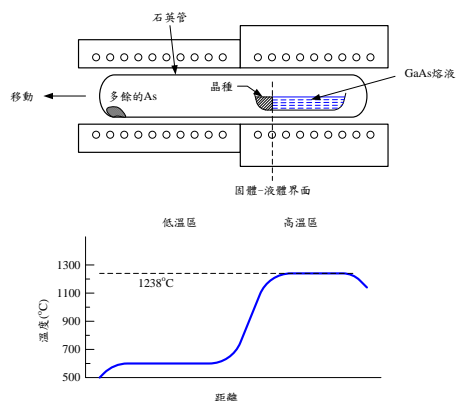
成長單晶最重要的技術之一就是柴可拉斯基 (Czochralski) 在 1917 年提出的長晶法，稱為柴可拉斯基長晶法。



液封式柴可拉斯基 (Liquid Encapsulation Czochralski, LEC) 長晶系統。

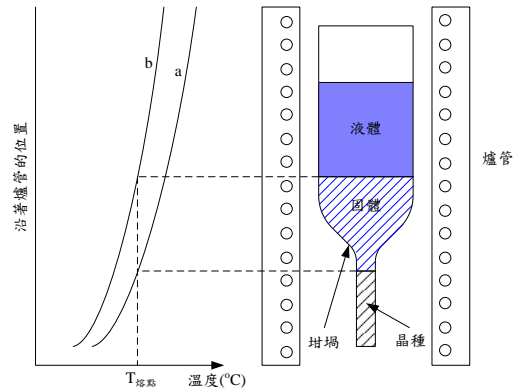
2.1 單晶成長

2. Bridgman Method



2.1 單晶成長

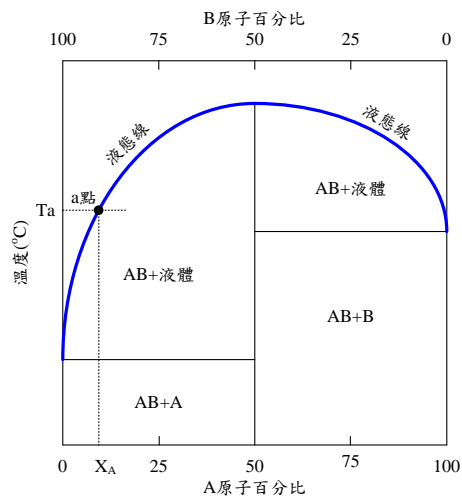
3. Vertical Gradient Freeze (VGF) Method



2.2 磊晶成長

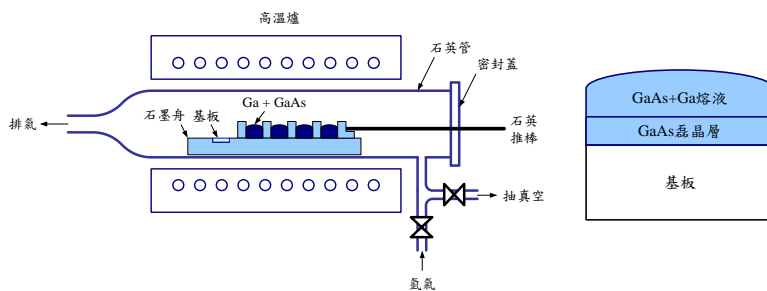
1. 液相磊晶法

➤ Phase Diagram



2.2 磊晶成長

1.2 液相磊晶系統

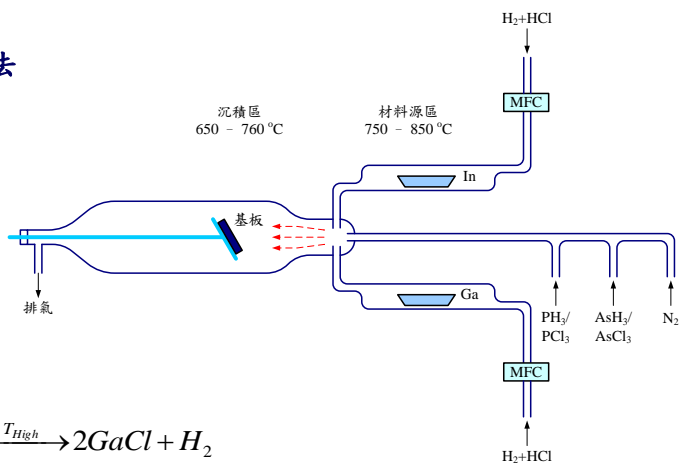


National Taipei University of Technology

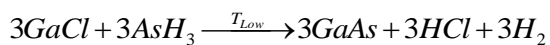
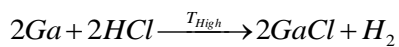
7

2.2 磊晶成長

2.1 氣相磊晶法



-- 例如: GaAs

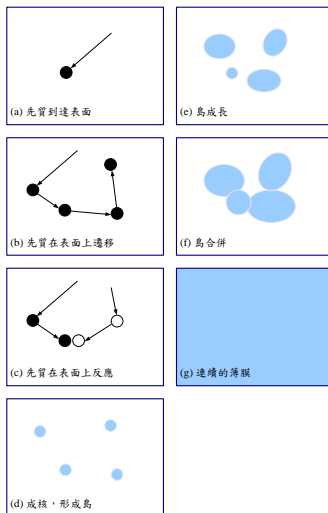


National Taipei University of Technology

8

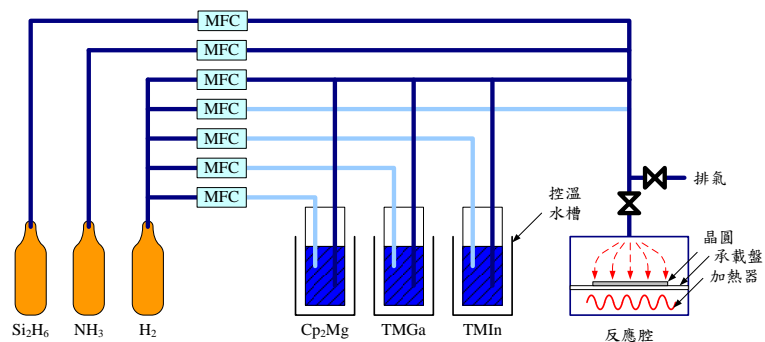
2.2 磊晶成長

2.2 膜的形成



2.2 磊晶成長

3.1 有機金屬化學氣相沉積 (MOCVD) 法



2.2 磊晶成長

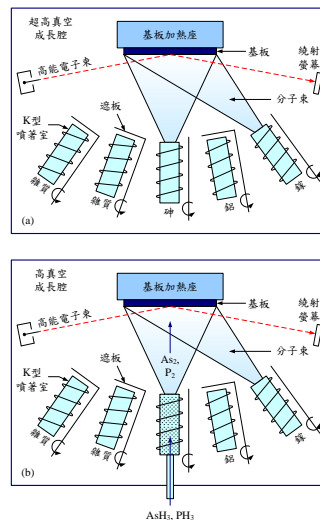
3.2 實例---- $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 的成長反應式



2.2 磊晶成長

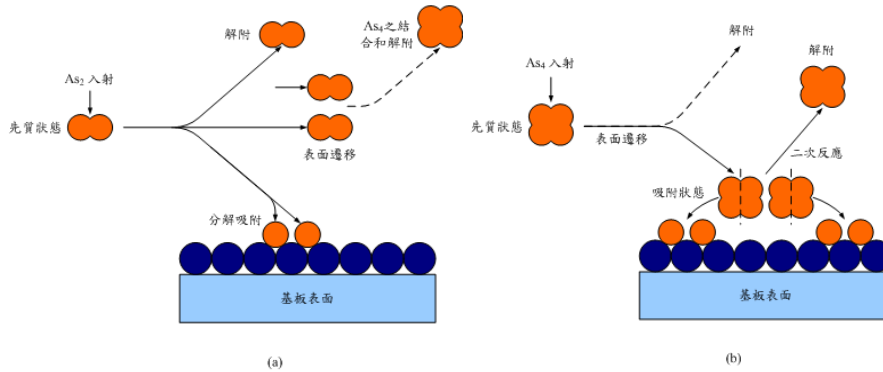
4.1 分子束磊晶法

雖然使用固體源之分子束磊晶法已成功用於成長GaAs和AlGaAs等化合物半導體，但是含磷之III-V族化合物半導體很難用固體源之分子束磊晶法成長。因為元素的固體磷包含具有不同蒸氣壓之同素異形的形式(P2和P4)，所以通量很難控制。1980年，Panish提出分子束磊晶法加AsH3和PH3分解的方法成長GaAs和InP。其係將AsH3和PH3分別裂解成As2和P2。此種技術稱為氣體源分子束磊晶法(Gas Source Molecular Beam Epitaxy, GSMBE)。



2.2 磊晶成長

4.2 成長機制



2.2 磊晶成長

四種磊晶法的比較結果

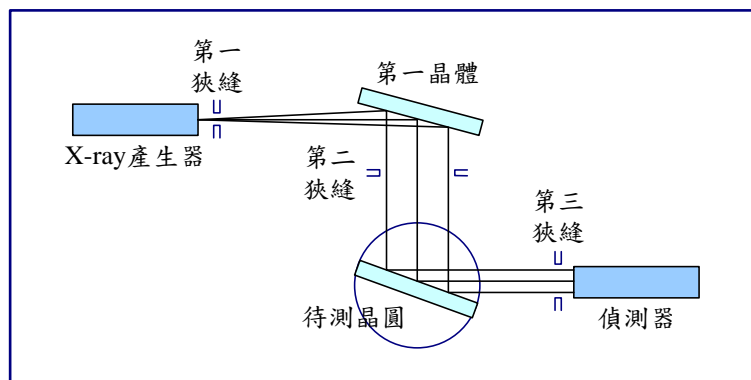
	LPE	VPE	MOCVD	MBE
真空(Torr)	760	760	10^{-2}	$\leq 10^{-9}$
成本	低	貴	昂貴	昂貴
成長速率	快	快	慢	很慢
磊晶品質	很好	好	很好	很好
表面形態	差	佳	佳	佳
應用性	差	差	佳	佳

2.3 晶體量測

- ✿ X-ray Diffraction
- ✿ Absorption Spectrum
- ✿ Photoluminescence (PL)
- ✿ Hall Measurement

2.3 晶體量測

- ✿ X-ray Diffraction



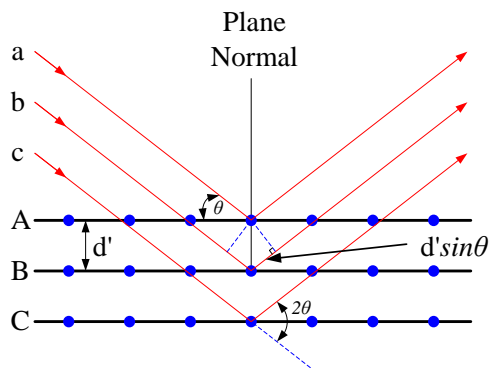
2.3 晶體量測

✿ X-ray Diffraction

$$m\lambda = 2d \sin \theta, m = 1, 2, 3, \dots$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2)}{a^2}$$

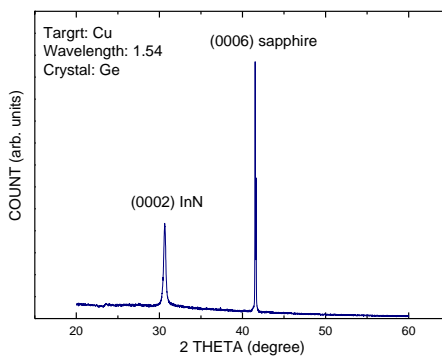
$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2}$$



2.3 晶體量測

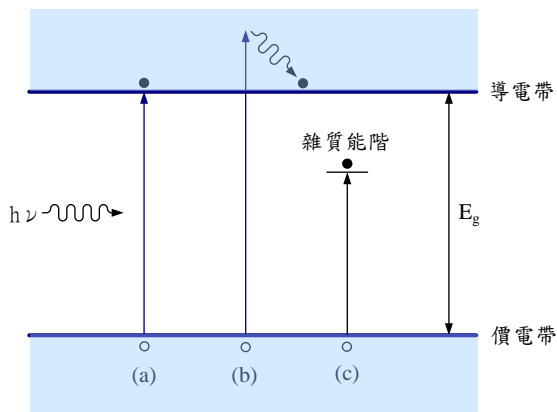
✿ X-ray Diffraction

$$\frac{\Delta a}{a_{epi}} = \frac{a_{epi} - a_{sub}}{a_{epi}} = 1 - \frac{\sin \theta_{epi}}{\sin \theta_{sub}} = 1 - \frac{\sin 15.32}{\sin 20.76} = 25.46\%$$



2.3 晶體量測

✿ Absorption Spectrum

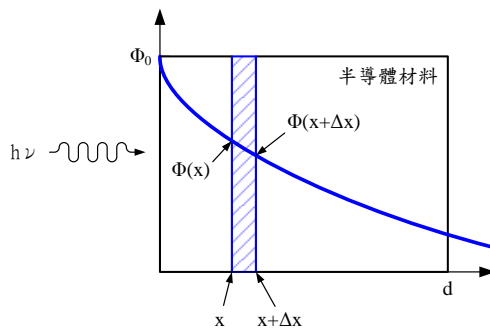


2.3 晶體量測

✿ Absorption Spectrum

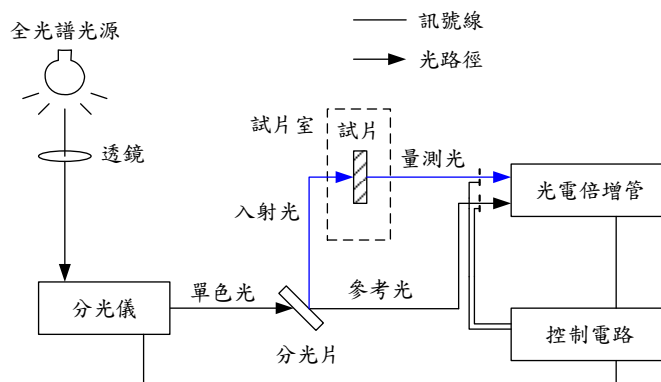
$$\frac{d\Phi(x)}{dx} = -\alpha\Phi(x)$$

$$T = \frac{\Phi(d)}{\Phi_0} = e^{-\alpha d}$$



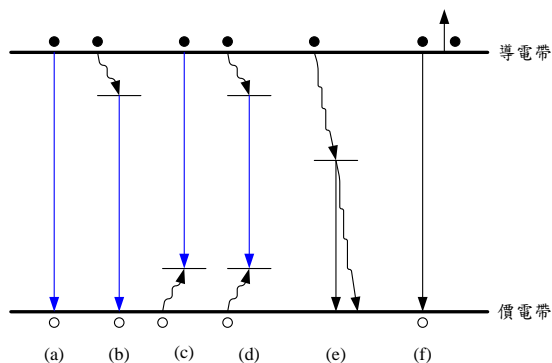
2.3 晶體量測

✿ Absorption Spectrum



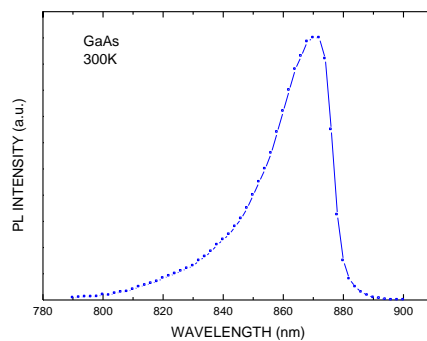
2.3 晶體量測

✿ Photoluminescence (PL)



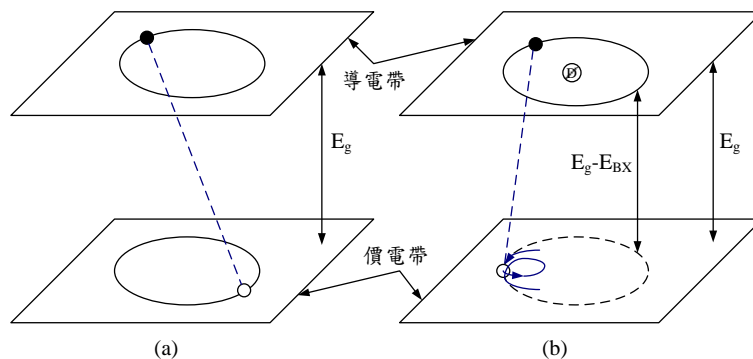
2.3 晶體量測

✿ Photoluminescence (PL)



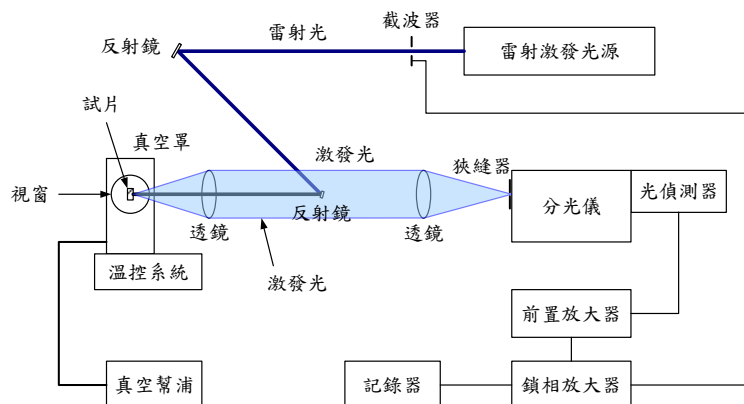
2.3 晶體量測

✿ Photoluminescence (PL)



2.3 晶體量測

Photoluminescence (PL)



National Taipei University of Technology

25

2.3 晶體量測

Hall Measurement

$$q\vec{v} \times \vec{B} = -\vec{a}_y qv_x B_z$$

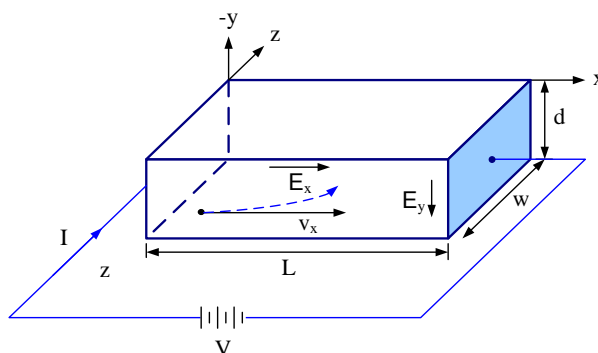
$$q\mathcal{E}_y = +qv_x B_z$$

$$\mathcal{E}_y = \frac{V_H}{d}$$

$$J = \frac{I}{A} = qpv_x$$

$$p = \frac{dIB_z}{qAV_H}$$

$$\rho = \frac{1}{qp\mu_n}$$



National Taipei University of Technology

26

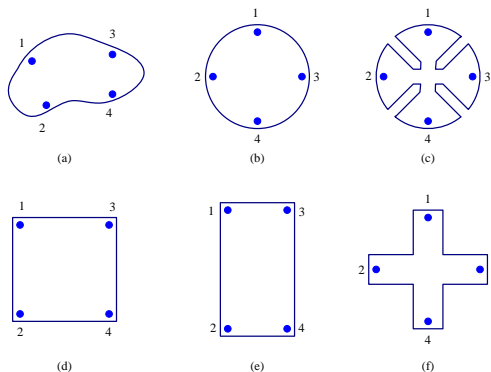
2.3 晶體量測

✿ van der Pauw 法

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{(R_{12,34} + R_{23,41})}{2} F$$

$$\frac{R_r - 1}{R_r + 1} = \frac{F}{\ln 2} \cosh^{-1} \left[\frac{\exp(\ln 2 / F)}{2} \right]$$

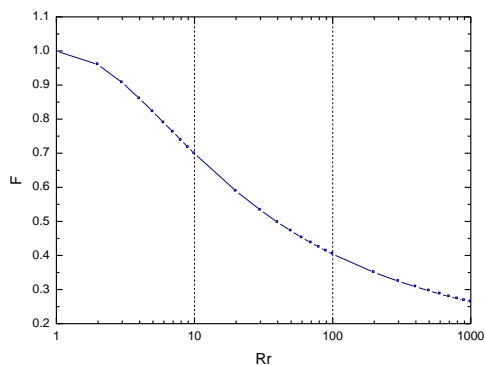
$$R_r = \frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}$$



2.3 晶體量測

✿ 校正因子

$$\frac{R_r - 1}{R_r + 1} = \frac{F}{\ln 2} \cosh^{-1} \left[\frac{\exp(\ln 2 / F)}{2} \right]$$

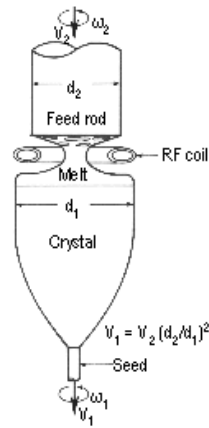


2.4 補充

□ Growth of single crystals

⊕ Float-zone (FZ) 長晶法

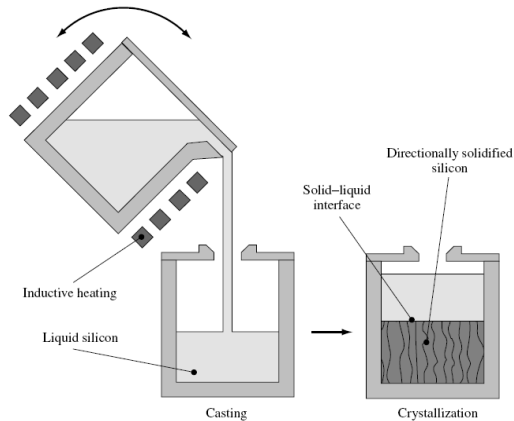
此種長晶法係將RF加熱器掃瞄過整個複晶棒。



2.4 補充

□ Growth of polycrystals

⊕ Block casting



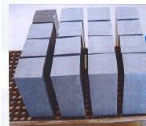
2.4 補充

□ Growth of polycrystals

⊕ Block casting



Ingot manufacturing



Ingot Cutting

Brick treatment



Wafer Slicing

Wafer Cleaning

Wafer Inspection

Treatment of Silicon Bricks

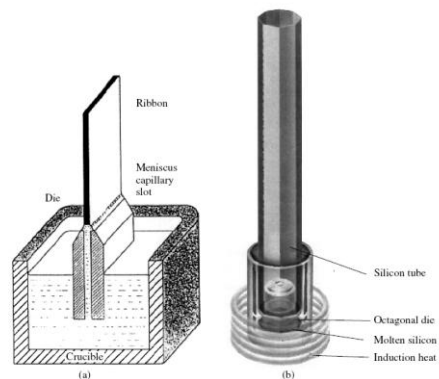
- characterization
life time, resistivity, size
- surface grinding
- chamfer grinding
- cutting of top and bottom

2.4 補充

□ Ribbon techniques

⊕ Edge defined film fed growth (EFG-growth)

利用毛細作用，經石墨做成的鑄模槽孔（slotted die）將矽帶從矽液中拉長出來的。由Mobil Tyco公司研究發展，目前已可同時拉長5條5公分寬的矽帶，製成的太陽電池最高效率已達12.4%。EFG法的最大優點是生長率高，但缺點是無法控制均一性的晶粒品質，故仍待改進。

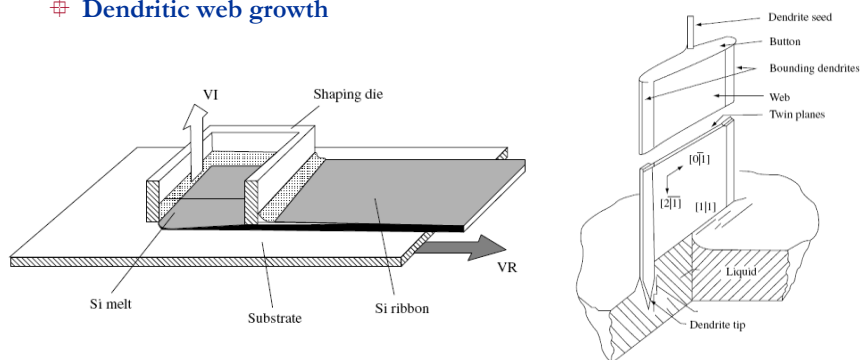




ASE Americas' production line for EFG crystal growth.

2.4 補充

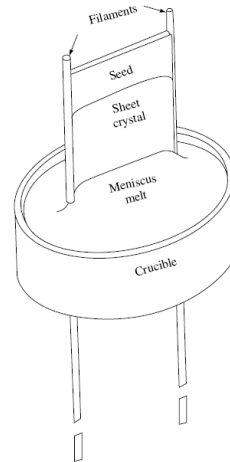
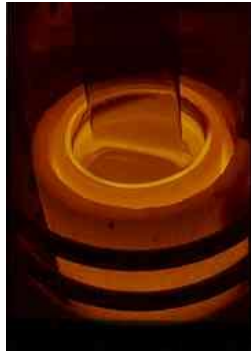
- Ribbon techniques
- ⊕ Ribbon Growth on a Substrate (RGS)
- ⊕ Dendritic web growth



2.4 補充

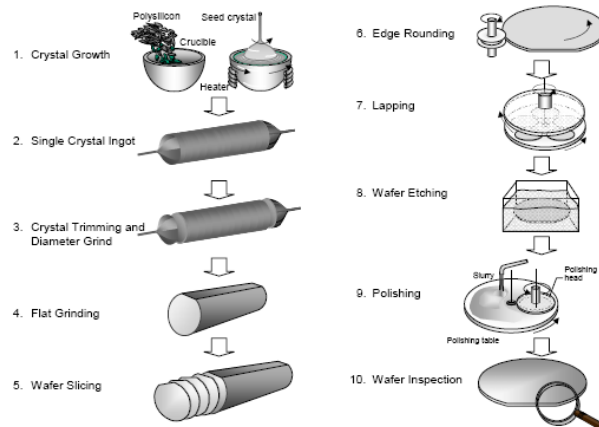
❑ Ribbon techniques

⊕ String Ribbon (STR) growth



2.4 補充

❑ Preparation of wafers



2.4 補充

❑ Slicing machine

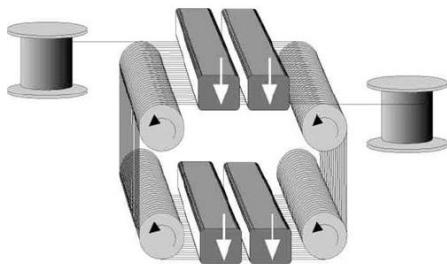


National Taipei University of Technology

37

2.4 補充

❑ Slicing machine

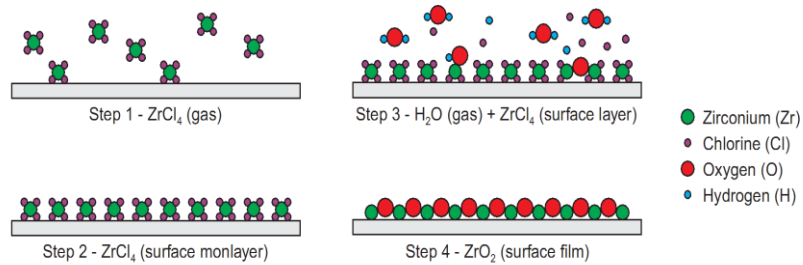


National Taipei University of Technology

38

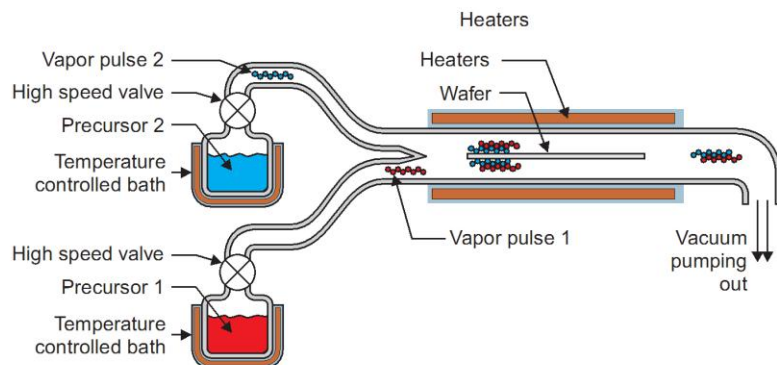
2.4 補充

✱ Atomic Layer Deposition (ALD)



2.4 補充

✱ Atomic Layer Deposition (ALD)



3.LED製程技術

- ✧ 金屬化製程
- ✧ 微影製程
- ✧ 化學氣相沉積製程
- ✧ 擴散製程
- ✧ 蝕刻製程
- ✧ 研磨製程
- ✧ 切割製程

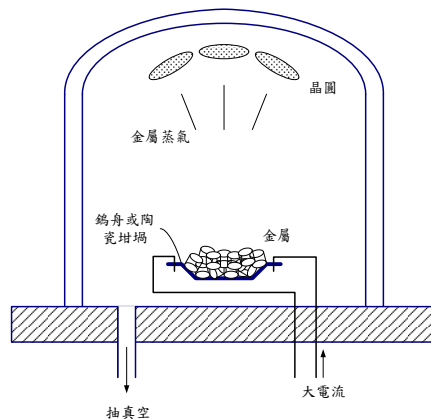
3.LED製程技術

1.金屬化製程

常見的金屬化製程技術有下列三種：

❖ 熱阻式蒸鍍技術

此種金屬化技術通常只適用於較低溶點的金屬，如鋁(Al)，金(Au)，鎳(Ni)等。其系統圖示於第1圖。在製程期間，熱阻式蒸鍍系統被抽真空到約 10^{-6} Torr的高真空下，然後將大電流流過盛加金屬之鎢舟或陶瓷坩堝，因其電阻很大，所以溫度會很高，連帶使得在鎢舟或陶瓷坩堝內的金屬被加熱而蒸發，因此可以使金屬蒸着在晶圓上。注意，鎳(Ni)很容易和鎢(W)形成共金(eutectic)，鋁(Al)在加熱鎔化之後很容易包覆鎢舟，這些都會影響鎢舟的使用率。



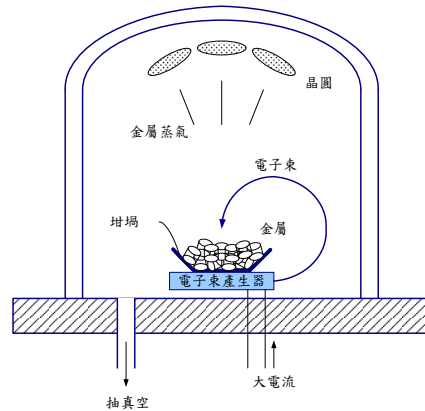
第1圖 熱阻式蒸鍍系統。

3.LED製程技術

1.金屬化製程

❖ 電子槍蒸鍍技術

此種金屬化技術係目前發光二極體製程當中最普遍被採用的蒸鍍技術。其系統圖示於第2圖。在製程期間，電子槍蒸鍍系統被抽真空到約 10^{-6} Torr的高真空下，然後將電子束加速、引導去撞擊坩堝內的金屬，在坩堝內的金屬因電子束的撞擊被加熱而蒸發，因此可以使金屬蒸着在晶圓上。



第2圖 電子槍蒸鍍系統。

3.LED製程技術

1.金屬化製程

❖ 電漿濺鍍技術

電漿製程已被廣泛應用在半導體製程當中，例如：電漿輔助式化學氣相沉積法(plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)，感應耦合電漿式反應離子蝕刻法(inductively coupled plasma - reactive ion etching, ICP-RIE)，及物理氣相沉積法。前兩項會在後面介紹，而本節將介紹應用電漿製程之物理氣相沉積法，此種方法稱為電漿濺鍍技術。

3.LED製程技術

(a) 電漿原理

電漿一詞起源於希臘文plasma(意思是：成形的東西)，1928年Langmuir研究真空放電時，將所產生的電離氣體稱為plasma。此種電離氣體與一般氣體性質不同，有人將之比喻為「物質的第四種狀態」。古代希臘哲學家恩培多克勒主張「四元說」，認為形成世界的四個基本要素是地、水、空氣、火。地是固體，水是液體，空氣是氣體，而目前知道高溫的火炎也是呈電漿狀態。據報導指出宇宙間物質有99.9%是處在這種狀態。與最初三個狀態相比，電漿的發現要慢了很多，那是因為地球是顆冷卻的行星，物質是以高密度的結合狀態存在，必須給予很大能量，才能產生電漿狀態。但是，我們還是要給電漿下一個廣義的定義：具有等量正電荷和負電荷之離化氣體稱為電漿。**電漿係由中性原子或分子，正電荷(離子)和負電荷(電子)所構成。**

在電漿中，電子濃度會約等於離子濃度，即。電子濃度和總濃度的比率定義為離化率 R_I ：

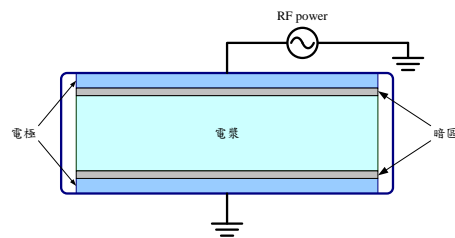
$$R_I = n_e / (n_e + n_{neu}) \quad (1)$$

其中， n_{neu} 為中性濃度。離化率主要由電子能量決定，但是也跟氣體種類有關，因為不同的氣體需要不同的離化能量。

3.LED製程技術

(b) 電漿的產生

如第3圖所示，在兩相對應的金屬電極板上施加高壓電場，若二電極板之間的氣體分子濃度再在某一特定區間，則電極板表面因離子轟擊而產生的二次電子。由於在二電極板施加電場之下，氣體中存在極微量的游離電子獲足夠能量，促使了氣體分子及原子產生解離、離子化、激發等反應。經解離後所產生電子，被電場加速並引發出其它的離子化過程，此時氣體解離又產生更多的離子與電子，如此一連串效應造成在低壓氣體中產生大量的電漿。



第3圖 電容耦合式電漿源系統。

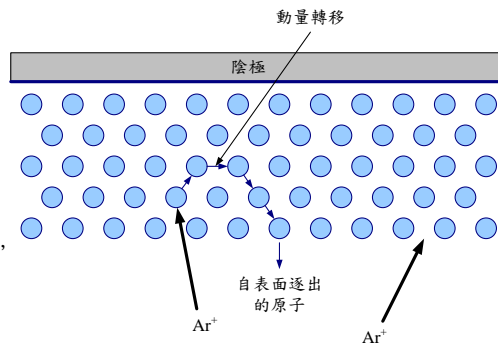
3.LED製程技術

最常用於濺射的惰性氣體是氬氣(Ar)，隨著轟擊粒子的入射角度變的越來越偏，濺射產出可增長2~3倍，直到轟擊粒子入射角度太高而轉化的動量太少，此後濺射所產生將漸少。通常在濺射表面有氧化或氮化物表層，這些化合物的化學鍵結能強於所需組成之材料，在這層沒被移走之前，初始濺射是有一段時間會產生很慢的。此外，若活性氣體存在，它會在靶面材料表面形成化合物，進而地附著於靶材表面，使濺射產出很低。當真空壓力降低時，會降低離子化碰撞並使電流降低；若真空壓力提高時，會提高濺鍍原子與氣體的碰撞機率造成濺射原子散射。

3.LED製程技術

(C)濺鍍過程

第4圖為濺鍍過程的示意圖。當電場應用在兩個電極之間時，自由電子會因獲得能量而被加速，高能量的電子和惰性氣體相互碰撞產生能量轉移效果，並讓惰性氣體分子，如氬氣，離子化，氣體離子最後經外加電場作用撞擊固體靶材，然後經動量轉移而將靶材表面的原子逐出，被逐出的原子謂稱為濺射原子，此現象就是濺擊。濺射原子進入電漿中，然後利用擴散方式，最後傳遞到基材表面上進行薄膜沈積。此種利用電漿的離子轟擊以動量轉移原理，將所需沈積材料濺擊出並擴散到基板沈積的過程，稱為濺鍍。



第4圖 濺鍍過程的示意圖。

3.LED製程技術

2.微影製程

微影製程(photolithography)係利用光罩(photomask)上的幾何圖案，將圖案轉移在感光材料(一般稱為光阻)上的一種製程，例如，這些圖案可能是歐姆接觸電極、焊接墊、或發光區。本節將分兩個部分討論：曝光系統和製程步驟。

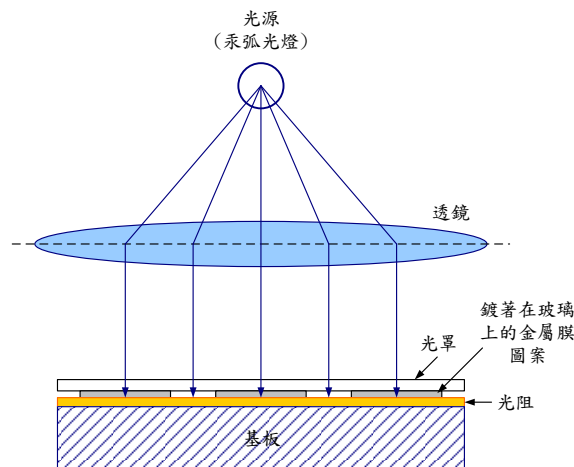
❖ 曝光系統

(a)投影曝光法

如第5圖所示，將塗佈有光阻的基板載入系統中，並使其與光罩緊密接觸，然後使紫外光從光罩背面照射光阻一段預定的時間，使被紫外光照射到的光阻化學鍵斷裂(正光阻)或鍊結(負光阻)。於是，在經過顯影之後，就可以將光罩上的圖案複製在光阻上。

此種方法的主要缺點為：晶片上的塵粒會對光罩造成損傷，而優點則是解析度較高。

3.LED製程技術



第5圖 投影式曝光系統。

3.LED製程技術

(b)光罩

在微影製程中，通常使用光罩定義薄膜的圖案。其製作方式如下：

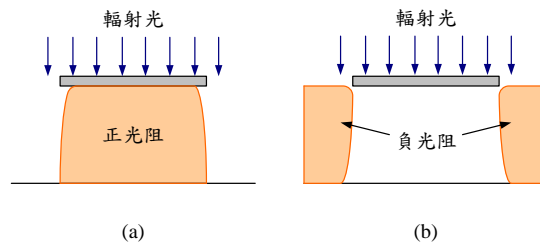
- ❑ 在玻璃(或石英)上依序沉積一層鉻(chromium)和電子光阻；
- ❑ 利用電子束在整個表面上製作期望的圖案；
- ❑ 利用製作圖案的電子光阻當作遮罩，使用鉻蝕刻液去除不要的鉻膜；
- ❑ 去除電子光阻，於是形成具有期望圖案之微影製程用光罩。

3.LED製程技術

(c)光阻

光阻係一種輻射光敏化合物，依其對輻射光的反應，可以分為兩種：正光阻和負光阻。當輻射光照射正光阻時，曝光區域之光阻的化學鍵結被打斷，使得曝光區域之光阻很容易被溶解並去除，於是最後所遺留之圖案和光罩相同。另一方面，當輻射光照射負光阻時，曝光區域之光阻的化學鍵結鍊結，使得曝光區域之光阻很難被溶解，於是最後所遺留之圖案和光罩相反。

第6圖圖示顯影後之光阻的典型影像橫截面圖。



第6圖 顯影後之光阻的典型影像橫截面圖。

3.LED製程技術

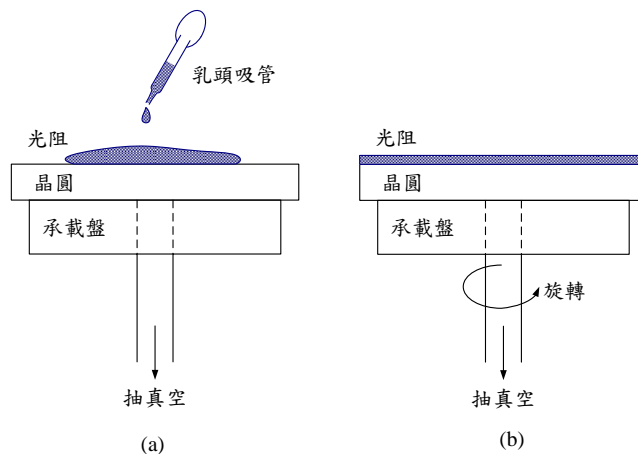
2.微影製程

❖ 製程步驟

在發光二極體的製程當中，目前大部分都是採用光學微影製程，而光阻塗佈的方式則採用旋佈法(spin coating)，旋佈法包含下列幾項步驟：

- ❑ 參考第7(a)圖，以乳頭吸管吸取適量的光阻，將光阻滴在晶圓中央的位置上，使其覆蓋晶圓大部分的面積；
- ❑ 參考第7(b)圖，打開真空幫浦，在確定晶圓已被吸附在承載盤(chuck)上之後，使晶圓約以2000rpm之轉速旋轉約10秒，讓光阻可以覆蓋整片晶圓；
- ❑ 再使晶圓約以4000rpm之轉速旋轉約20秒，讓光阻可以很均勻地覆蓋整片晶圓；
- ❑ 關掉真空幫浦，取出晶圓。

3.LED製程技術



第7圖 旋佈法。

3.LED製程技術

(a)正光阻法

正光阻包含感光化合物和有機溶劑。在曝光前，感光化合物並不會溶解於顯影液中，在曝光後，曝光區的感光化合物吸收輻射，而改變本身的化學結構，而變得可以溶解於顯影液中。在顯影的步驟中，正光阻的曝光區會被移除。其詳細步驟如第8圖所示。

3.LED製程技術

(b)負光阻法

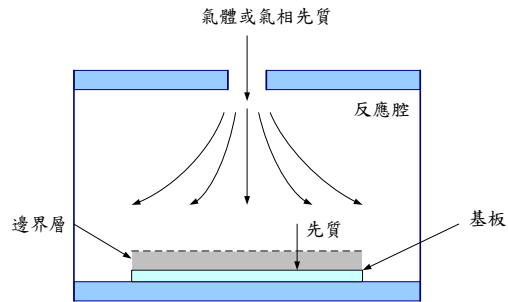
負光阻係由聚合物和感光化合物所構成。在曝光之後，感光化合物吸收光能量並將其轉換成化學能，以引起聚合物連結反應(polymer linking)，此反應使得聚合物分子交互連結(cross-link)。因此，此交互連結的聚合物分子有較大的分子量，而變得較難溶解於顯影液中。在顯影的步驟中，負光阻的未曝光區會被移除。其詳細步驟如第9圖所示。注意，負光阻的一項重要缺點為：在顯影的步驟中，負光阻會吸收顯影液而造成腫脹，因此限制負光阻的解析度。

3.LED製程技術

3.化學氣相沉積製程

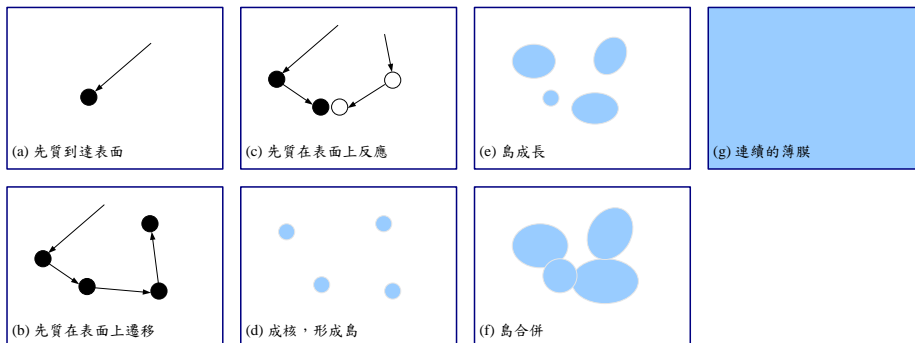
參考第10圖和第11圖，化學氣相沉積(chemical vapor deposition, CVD)係一種包含下列幾項步驟之製程：

- ❑ 將氣體或氣相先質(precursors)通入反應腔；
- ❑ 氣體或氣相先質擴散越過邊界層，然後到達基板表面；
- ❑ 先質被吸附在基板表面上；
- ❑ 在基板表面上開始發生化學反應；
- ❑ 固體生成物成核(nucleate)在基板表面上；
- ❑ 核子成長為島，再由島合併成連續的薄膜；
- ❑ 氣體生成物自基板表面解附，然後擴散越過邊界層；
- ❑ 最後將氣體生成物引出反應腔。



第10圖 說明CVD在基板表面上的化學反應。

3.LED製程技術



第11圖 薄膜形成的過程。

3.LED製程技術

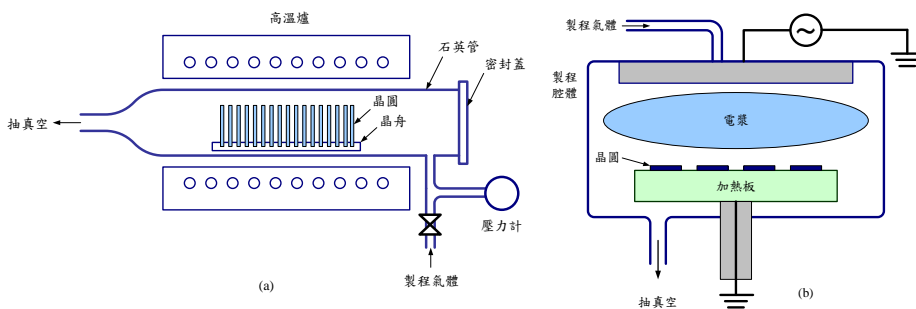
3.化學氣相沉積製程

目前有兩種常用的沉積方式沉積介電質薄膜：低壓化學氣相沉積法(low-pressure chemical vapor deposition, LPCVD)和電漿輔助式化學氣相沉積法(plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD)。

LPCVD的操作壓力一般係從0.1到1Torr。其反應腔和氧化爐很類似，都具有加熱區。LPCVD反應系統需要真空系統，以控制反應腔內部的壓力。沉積過程主要係由晶圓溫度控制，而且對氣體流量相當敏感。因此，晶圓可以垂直方式載入，而且間距可以非常小。所以這種沉積方式很適合量產。第12(a)圖圖示典型的LPCVD系統。LPCVD系統通常係用以沉積氧化物，氮化物，和多晶矽。LPCVD反應腔通常操作在高於650°C的溫度下。

在PECVD的製程當中，反應氣體從輝光放電等離子場中獲得能量，激發並輔助化學反應，從而實現化學氣相沉積的技術。第12(b)圖為典型的PECVD系統。

3.LED製程技術



第12圖典型的(a)LPCVD和(b)PECVD系統。

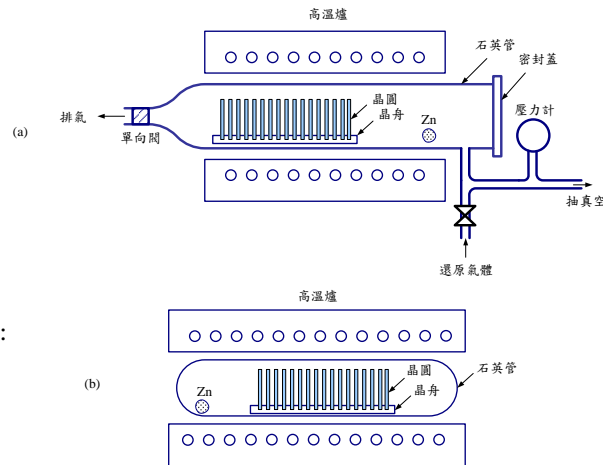
3.LED製程技術

4.擴散製程

❖ 擴散摻雜

若要在n型(或p型)磊晶片上形成一個簡單的p-n接面發光二極體結構，此時就可以使用擴散製程，將補償的雜質擴散到磊晶層中。擴散製程有兩種：

(a)開放式系統；和(b)密封式系統，如第13圖所示(以擴散Zn為例)。



第13圖 擴散製程之(a)開放式系統；和(b)密封式系統。

3.LED製程技術

(a)開放式擴散技術

- ❑ 將晶圓和鋅(Zn)清洗乾淨之後放入石英管中；
- ❑ 將系統抽真空到約 1×10^{-3} Torr後通入載運氣體(如氬氣)；
- ❑ 將高溫爐升溫到約 500°C ，使Zn熔化蒸發，並藉由載運氣體將Zn蒸氣運送到晶圓表面附近；
- ❑ 藉由高溫將Zn原子驅入晶圓，並持續進行一段期望的時間；
- ❑ 降溫，改通入惰性氣體(如氬氣)，然後取出晶圓。

(b)密封式擴散技術

- ❑ 將晶圓和鋅(Zn)清洗乾淨之後放入石英管中；
- ❑ 將系統抽真空到約 1×10^{-6} Torr後，用氫氧鎂將石英管密封；
- ❑ 將高溫爐升溫到約 500°C ，使Zn熔化蒸發，藉由高溫將Zn原子驅入晶圓，並持續進行一段期望的時間；
- ❑ 降溫，取出石英管，並緩慢地切開，然後取出晶圓。

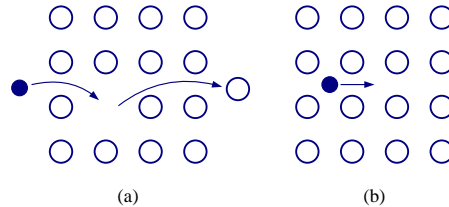
3.LED製程技術

4.擴散製程

❖ 擴散理論

(a)擴散機制

擴散的機制有兩種：空位(vacancy)擴散和間隙(interstitial)擴散，其中圓圈代表主體原子(host atom)，藍點代表雜質原子。首先，當環境溫度升高時，主體原子因獲得熱能而離開晶格的位置，成為間隙原子，同時，在原來的位置會產生一個空位。然後，在該空位附近的雜質原子就會移入該空位，這種機制稱為空位擴散，如第14(a)圖所示。另一方面，若雜質原子沒有佔據空位而在主體原子之間移動，則稱這種機制為間隙擴散，如第14(b)圖所示。



第14圖 擴散機制：空位(vacancy)擴散和間隙(interstitial)擴散。

3.LED製程技術

(b)擴散縱曲線(diffusion profile)

考慮一維的擴散方程式：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

其中， C 為每單位體積的摻雜濃度，而 D 為擴散係數。在典型的發光二極體擴散製程中，雜質原子係經由氣態源傳遞到磊晶片表面，然後再擴散進入磊晶層。因此，在擴散製程期間，氣態源會維持固定的表面濃度， C_s ，於是擴散方程式的起始條件為：

$$C(x, t=0) = 0 \quad (3)$$

而邊界值條件為：

$$C(x=0, t) = C_s \quad (4)$$

及

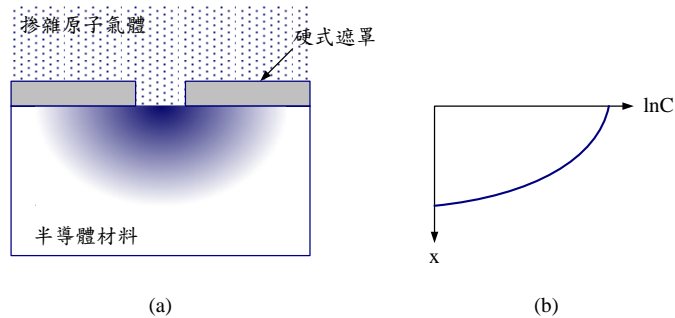
$$C(x=\infty, t) = 0 \quad (5)$$

因此，擴散方程式的解為：

$$C(x, t) = C_s \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (6)$$

3.LED製程技術

其中， $erfc$ 為互補誤差函數(complementary error function)，而為擴散長度。第15圖為根據(6)式所繪製之典型的擴散橫截面示意圖(第15(a)圖)與擴散縱曲線(第15(b)圖)。



第15圖 典型的擴散橫截面示意圖與擴散縱曲線。

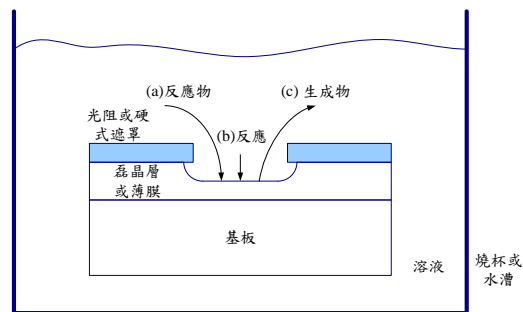
3.LED製程技術

5.蝕刻製程

蝕刻製程可分為濕式化學蝕刻和乾式電漿蝕刻。

❖ 濕式化學蝕刻

濕式化學蝕刻在各種半導體製程當中均被廣泛地使用。如第16圖所示，濕式化學蝕刻的機制包含三個主要步驟：(a)反應物經由擴散方式到達反應表面；(b)在表面發生化學反應；及(c)反應生成物以擴散方式從表面移除。



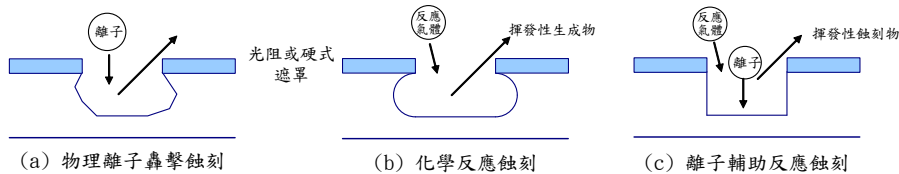
第16圖 濕式化學蝕刻的機制。

3.LED製程技術

❖ 乾式電漿蝕刻

當施加於氣體之電場的強度足夠大時，會使得氣體崩潰而游離化，這種狀態稱為電漿。因此，電漿係部分或完全游離的氣體，包含等數的正、負電荷和一些未游離的氣體分子。乾式電漿蝕刻就是一種利用電漿當作蝕刻源的蝕刻技術。

如第17圖所示，電漿蝕刻方式依反應機制可分為三種：(a)物理離子轟擊蝕刻；(b)化學反應蝕刻；及(c)離子輔助反應蝕刻。



第17圖 電漿蝕刻方式。

National Taipei University of Technology

27

3.LED製程技術

(a)物理離子轟擊蝕刻

物理離子轟擊蝕刻係利用偏壓將電漿中帶正電的離子加速的往晶片表面撞擊，經部分離子能量的轉移而將蝕刻材料擊出。擊出的蝕刻物並在低壓下被真空抽氣系統抽離。此機制係物理上的能量轉移，因此對材料沒有選擇性，而蝕刻效果則和蝕刻材料原子間的化學鍵能有相當大的關係。由於缺乏材料蝕刻選擇性，而且高速離子的轟擊會使得蝕刻處的晶格受到損傷，因此在許多蝕刻應用上很少被使用。

(b)化學反應蝕刻

化學反應蝕刻則是利用電漿中的反應氣體與蝕刻表面原子進行反應，並形成易揮發性生成物而達蝕刻效果。在此反應機制中，反應氣體的組成主要是蝕刻氣體經電漿放電解離成的自由基原子團。原子團經擴散到達蝕刻表面而進行等向性蝕刻，所形成的高揮發性生成物可由幫浦抽離；至於低揮發性生成物則會沈積在蝕刻表面，阻礙蝕刻的進行，因此，在製程中若不將低揮發性生成物移除，則蝕刻速率會愈來愈慢。

National Taipei University of Technology

28

3.LED製程技術

(c)離子輔助反應蝕刻

最後一種蝕刻機制基本上是上述兩種機制的組合，即物理離子轟擊加化學反應蝕刻。此種蝕刻方式兼具非等向性和高蝕刻選擇比，目前最被廣泛地使用。在理想的離子輔助反應蝕刻機制中，當離子撞擊晶片表面造成晶片表面晶格的破壞、原子鍵的斷裂、或其他激發型態而造成表面原子的反應能增加，進而與電漿中的原子團反應形成揮發性生成物，達到蝕刻效果。或是反應氣體的自由原子團會與晶片表面發生反應，而離子轟擊表面的再沈積物或生成物，使蝕刻表面能再與電漿氣體接觸反應。這種機制能夠產生高垂直度的蝕刻縱剖面。

3.LED製程技術

6.研磨製程

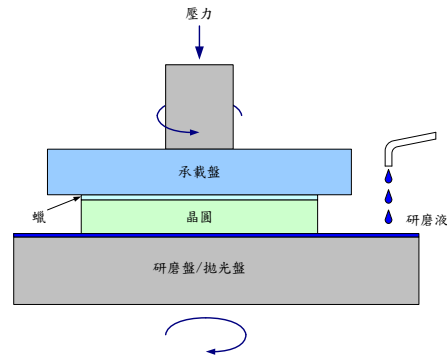
半導體基板或晶圓的厚度約為 $350\mu\text{m}$ 或 $430\mu\text{m}$ ，在將已製作好晶粒圖案之製程晶圓切割成晶粒之前，為了方便切割或減少元件的串聯電阻，通常要將晶圓研磨減薄到 $250\mu\text{m}$ (一般半導體基板)或 $85\mu\text{m}$ (藍寶石基板)。目前的晶圓研磨技術大致上可分為兩種：研磨法(lapping)和切削法(grinding)。

3.LED製程技術

❖ 研磨法

如第19圖所示，其方法包含：

- ❑ 將承載盤加熱到約120℃；
- ❑ 將蠟均勻塗抹在承載盤上；
- ❑ 將晶圓正面貼上，然後施加適當壓力，使晶圓完全黏貼在承載盤上；
- ❑ 將承載盤安裝在施壓器上，同時注入適量的研磨液，而研磨液的配方通常為乙二醇(或純水)+氧化鋁粉(或碳化矽粉，或鑽石粉)；
- ❑ 使承載盤對着研磨盤(鑄鐵盤)施加壓力，同時承載盤和研磨盤分別以相反的方向轉動，直到將晶圓研磨減薄到期望的厚度；
- ❑ 將研磨盤換成質地較軟的銅盤或錫盤，將研磨面拋亮。



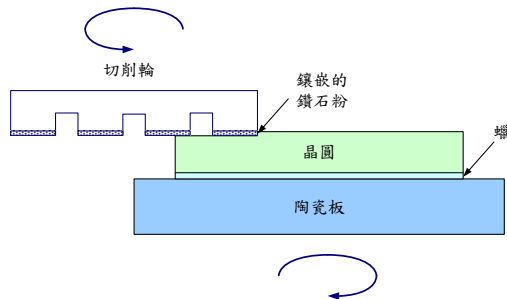
第19圖 研磨法示意圖。

3.LED製程技術

❖ 切削法

如第20圖所示，其方法包含：

- ❑ 將陶瓷板加熱到約120℃；
- ❑ 將蠟均勻塗抹在陶瓷板上；
- ❑ 將晶圓正面貼上，然後施加適當壓力，使晶圓完全黏貼在陶瓷板上；
- ❑ 用切削輪使晶圓背面減薄，直到期望厚度為止；
- ❑ 取下陶瓷板，然後安裝在第19圖所示拋光盤上，將粗糙的背面拋亮。



第20圖 切削法示意圖。

3.LED製程技術

7.切割製程

在磊晶片完成電極製作之後，要執行晶片切割，如第21圖所示，目前切割晶粒的方式約有三種：(a)輪刀式；(b)鑽石式；和(c)雷射式。

❖ 輪刀式切割法

將鑲嵌鑽石粉之輪刀片以高速旋轉切入晶圓，就可以將晶片分割。使用此種技術所得之晶片具有整齊的矩形。但是，鑲嵌鑽石粉之輪刀很難切割氮化鎵系發光二極體所採用的藍寶石基板。

❖ 鑽石式切割法

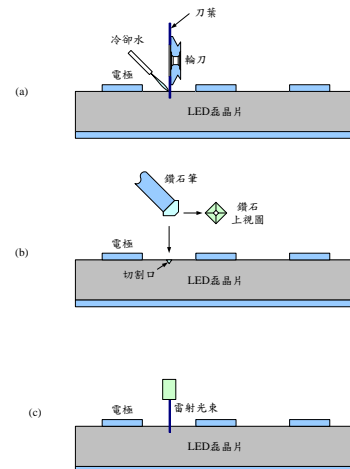
尖端鑲嵌特殊形狀的鑽石之工具，利用鑽石的稜線切過晶圓的正面，然後再在另一面施以適當壓力，就可以將晶片分割。此種技術早期使用於切割氮化鎵系發光二極體所採用的藍寶石基板。但是，使用此種技術所得之晶片邊緣並不整齊。

3.LED製程技術

❖ 雷射式切割法

目前切割氮化鎵系發光二極體所採用的藍寶石基板係採用雷射式切割法，其係使用可以讓待切材料吸收之波長的聚焦雷射光束，雷射光束會在晶圓表面燒出一個小洞，若此時移動雷射光束或晶圓，就可以將洞連成線，然後再在另一面施以適當壓力，於是就可以將晶片分割。使用此種技術所得之晶片具有整齊的矩形。但是，晶片有時會被雷射灰化(aching)所產生的粉末污染。

第21圖 三種晶片切割方式：
(a)輪刀式；(b)鑽石式；和(c)雷射式。



4. LED原理

- ✧ 輻射轉換
- ✧ 發光效率
- ✧ 電流-電壓特性的修正
- ✧ 電流擴散理論
- ✧ 金-半接觸理論

4. LED原理

1. 輻射轉換

❖ 自發性放射

若入射光的能量 $h\nu < E_2 - E_1$ ，則位在基態的電子無法被激勵到激態，此時入射光不會被吸收。因此，對於入射光而言，固體材料是透明的。電子與光子之間的交互作用，如第1(a)圖所示，什麼事都沒有發生。

若入射光的能量 $h\nu > E_2 - E_1$ ，則位在基態的電子會吸收入射光而被激勵到激態。因此，對於入射光而言，固體材料是不透明的。電子與光子之間的交互作用，如第1(b)圖所示，電子從基態躍遷到激態，此為光偵測元件和太陽能電池的基本原理。

如第1(c)圖所示，當電子從激態回到基態時，會釋放一個能量大小為 $E_2 - E_1$ 的光子，此交互作用的過程稱為自發性放射，此為發光二極體的基本原理。至於光子的波長 λ 可以藉由下式得到：

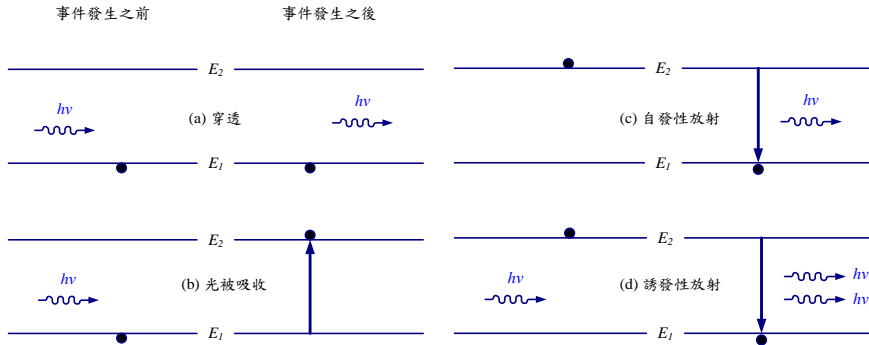
$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{h\nu} = \frac{1240}{E_2 - E_1} \quad (nm) \quad (1)$$

其中 c 是光子在真空中的速度， ν 是光的頻率， h 是蒲朗克常數 (Planck's constant)， $h\nu$ 是光子的能量，單位是電子伏特 (eV)。

如第1(d)圖所示，若入射光的能量 $h\nu = E_2 - E_1$ ，當入射光射入時，誘使電子從激態回到基態，同時會釋放一個能量大小為 $E_2 - E_1$ 的同相位光子，此交互作用的過程稱為誘發性放射。誘發性放射所造成的輻射都是單色光 (monochromatic)，也是同調光 (coherent)，此為雷射二極體的基本原理。

4. LED原理

1. 輻射轉換



第1圖 電子與光子之間的交互作用：(a)穿透，(b)光被吸收，(c)自發性放射，(d)誘發性放射。

4. LED原理

1. 輻射轉換

❖ 放射光譜

發光二極體係一種兩端點的半導體元件。第2(a)圖係最簡單的p-n同質結構(homostructure)式的發光二極體，即p側和n側都是由相同的半導體材料構成。第2(b)圖係目前常用的雙異質結構(double heterostructure, DH結構)式的發光二極體，即p側和n側之間插入一個能隙較小的半導體材料，此中間層稱為活性層(active layer)，兩側的半導體材料稱為侷限層(confinement layer)或披覆層(cladding layer)，主要目的是希望將注入的載子限制在活性層內，以利於發光。

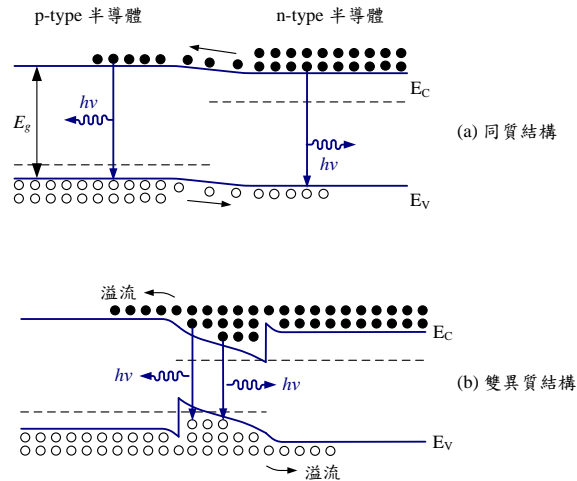
當以順向偏壓方式外加一個電場到發光二極體時，電洞和電子分別從p側和n側注入，兩者會在接面附近或活性層複合而發光。

4. LED原理

1. 輻射轉換

❖ 放射光譜

第2圖 在順向偏壓下的
發光二極體：
(a)同質結構式的發光二極體，
(b)雙異質結構式的發光二極體。



National Taipei University of Technology

5

4. LED原理

1. 輻射轉換

❖ 放射光譜

電洞和電子的複合過程如第3圖所示。假設在導電帶的電子和在價電帶的電洞具有拋物線的分佈關係：

$$E_n = E_C + \frac{k^2 \hbar^2}{2m_n} \quad (\text{電子}) \quad (2)$$

和

$$E_p = E_V - \frac{k^2 \hbar^2}{2m_p} \quad (\text{電洞}) \quad (3)$$

其中 m_n 和 m_p 分別為電子和電洞的有效質量， E_C 和 E_V 分別為導電帶和價電帶的邊緣， k 為載子的波數 (wave number)， \hbar 為約化蒲朗克常數 (Planck's constant)。

National Taipei University of Technology

6

4. LED原理

1. 輻射轉換

❖ 放射光譜

由於能量守恆的要求，使得光子的能量等於電子和電洞之間的能量差，即：

$$h\nu = E_n - E_p \cong E_g \quad (4)$$

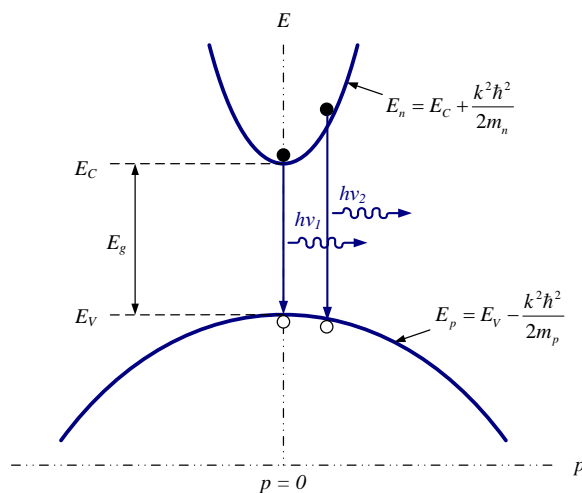
若熱能遠小於能隙，即 $kT \ll E_g$ ，則光子的能量約等於能隙。因此，藉由選擇不同能隙的半導體材料，可以改變發光二極體的發光波長。例如，GaN的能隙為3.4eV，則GaN發光二極體的發光波長約為362nm。

4. LED原理

1. 輻射轉換

❖ 放射光譜

第3圖 具有拋物線分佈關係的電子和在電洞，垂直複合並放射光子。



4. LED原理

1. 輻射轉換

❖ 放射光譜

比較電子的動量和光子的動量，其中電子的動量可以表示為：

$$p = m_n v = \sqrt{2m_n \cdot \frac{1}{2} m_n v^2} = \sqrt{2m_n kT} \quad (5)$$

其中 m_n 為電子有效質量。光子的動量可以根據德布羅格利關係式(de Broglie relation)推得：

$$p = \frac{h}{2\pi} k = \frac{h\nu}{c} = \frac{E_g}{c} \quad (6)$$

4. LED原理

1. 輻射轉換

❖ 放射光譜

因此，由(5)式和(6)式可以發現電子的動量遠大於光子的動量。因此，對於直接複合而言，電子在從導電帶遷移到價電帶時，其動量沒有太大的改變。

假設電子和電洞具有相同的動量，則光子的能量可以表示為聯合分佈關係式(joint dispersion relation)：

$$h\nu = E_C + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_n} - E_V + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_p} = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_r} \quad (7)$$

其中 m_r 為約化質量，可以表示為：

$$\frac{1}{m_r} = \frac{1}{m_n} + \frac{1}{m_p} \quad (8)$$

4. LED原理

1. 輻射轉換

❖ 放射光譜

電子的態位密度(density of states) 列於下並且修正為聯合態位密度：

$$N(E) = 4\pi \left(\frac{2m_r}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_g)^{1/2} \quad (9)$$

在允許的能帶中，載子的分佈係根據波茲曼分佈，即

$$F_B(E) = \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (10)$$

因此，發光強度 $I(E)$ 正比於(9)式和(10)式的乘積：

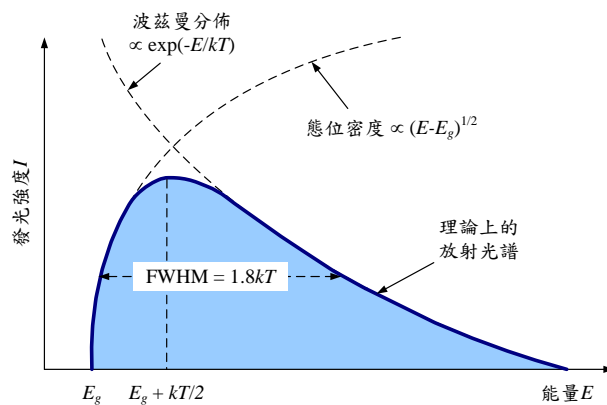
$$I(E) \propto (E - E_g)^{1/2} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (11)$$

$$\text{而發光強度的最大值發生在：} \quad E = E_g + \frac{1}{2}kT \quad (12)$$

4. LED原理

1. 輻射轉換

❖ 放射光譜



第4圖 發光二極體理論上的放射光譜。

4. LED原理

2. 發光效率

❖ 定義

影響發光二極體發光效率的因素很多，其中包含材料品質，元件結構和製程等，因此常用其來分析發光二極體的特性。至於發光效率的定義，目前學術界常使用量子效率(quantum efficiency) η ：

$$\eta = \eta_{int} \eta_{ext} \quad (14)$$

其中 η_{int} 稱為內部量子效率(internal quantum efficiency)，定義為：

$$\eta_{int} = \frac{R_r}{R_{nr} + R_r} = \frac{\Delta n / \tau_r}{\Delta n / \tau_{nr} + \Delta n / \tau_r} = \frac{1 / \tau_r}{1 / \tau_r + 1 / \tau_{nr}} \quad (15)$$

其中， R_r 和 R_{nr} 分別稱為輻射複合速率(radiative recombination rate)和非輻射複合速率(nonradiative recombination rate)， τ_r 和 τ_{nr} 分別稱為輻射複合壽命(radiative recombination lifetime)和非輻射複合壽命(nonradiative recombination lifetime)。

4. LED原理

此外， η_{ext} 稱為外部量子效率(external quantum efficiency)，這是發光二極體最重要的參數之一，定義為每秒發射之光子數與每秒注入之電子數的比值：

$$\eta_{ext} = \frac{P_L / (h\nu)}{I / q} = \frac{q P_L}{I h \nu} \quad (16)$$

其中， P_L 為發光二極體的光輸出功率。最近，在產業界漸漸在使用的定義有兩種，一是取光效率(extraction efficiency)，一是功率效率(power efficiency)，又稱為wallplug efficiency。

取光效率的定義為在發光二極體內部所產生的光子數射出發光二極體的比例：

$$\eta_{extraction} = \frac{\eta_{ext}}{\eta_{int}} \quad (17)$$

功率效率的定義為光輸出功率與外加電功率的比值：

$$\eta_{power} = \frac{P_L}{P_e} = \frac{P_L}{IV} \quad (18)$$

其中， P_L 為發光二極體的光輸出功率， P_e 為外加的電功率，等於注入電流和順向偏壓的乘積。

4. LED原理

2.發光效率

❖ 影響量子效率的因素

A. 內部量子效率

由(15)式，可以知道影響內部量子效率的因素主要為非輻射複合速率。非輻射複合速率正比於位在能隙之中的非輻射缺陷密度(N_T)。當 N_T 減少時，輻射效率就會增加。由於電子的移動率遠高於電洞，所以輻射複合速率主要正比於p型摻雜。當p型摻雜增加時，輻射複合速率就會增加。但是，當p型摻雜增加時，注入效率就會減少。因此，要優化摻雜條件才能得到最大的內部量子效率。

4. LED原理

2.發光效率

❖ 影響量子效率的因素

B. 外部量子效率

影響外部量子效率的因素有三：

(1)弗萊斯涅爾損失(Fresnel loss)

發光二極體所發射的光子必須從半導體進入空氣，因此光子必須傳輸穿越兩者之間的界面。如第5(a)圖所示，有一部分的光會透射而進入空氣，有一部分的光會被反射回半導體。反射係數為：

$$\Gamma = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (19)$$

其中 n_2 為半導體的折射率， n_1 為空氣的折射率。反射係數 Γ 為入射光被反射回半導體的比例。

4. LED原理

(2) 臨界角損失

考慮光子傾斜入射界面的情形，如第5(b)圖所示。當光子傾斜入射界面時，會發生折射，如光線A。但是，當入射角太大時，會發生全反射，如光線B，此時的入射角稱為臨界角 θ_c 。其可以由斯涅爾定律(Snell's law)決定：

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad (20)$$

1999年，Hewlett-Packard的Krames等人針對臨界角損失的問題，提出一種斜截倒金字塔式(truncated inverted pyramid, TIP)的AlInGaP發光二極體結構，如第6(a)圖所示。其斜切的側面有助於光子的射出，如第6(b)圖所示。TIP AlInGaP發光二極體的亮度約比傳統形狀的AlInGaP發光二極體亮40%，外部量子效率約為55%。

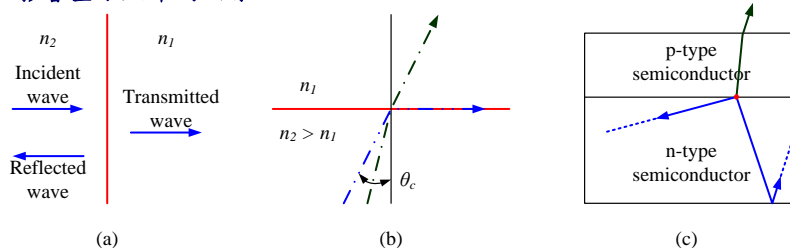
(3) 內部吸收

當發光二極體內部因電子和電洞複合而放射光子時，會向四面八方放射。一部分的光子會符合上述(1)和(2)的條件而進入空氣，如光線A。剩下的部分則會在半導體內部一直行進，直到被半導體材料吸收為止，如光線B和C。

4. LED原理

2. 發光效率

❖ 影響量子效率的因素



Fresnell's loss:

$$\Gamma = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2$$

Snell's loss:

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$$

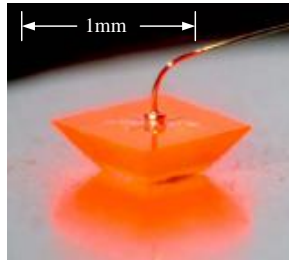
Absorption within the semiconductor

第5圖 影響外部量子效率的因素。

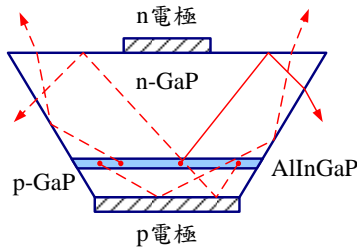
4. LED原理

2.發光效率

❖ 影響量子效率的因素



(a)



(b)

第6圖 TIP AlInGaP發光二極體。

4. LED原理

2.發光效率

❖ 光射出錐(light escape cone)

如第7(a)圖所示，其為臨界角的示意圖。入射角小於臨界角之所有入射光可以構成一個圓錐體。若發光點之光源(點光源)與射出界面之距離為 r ，藉由第7(b)圖，則光子射出半導體時所形成的球形體之表面積為：

$$A = \int dA = \int_0^{\theta_c} 2\pi r \sin \theta \cdot r d\theta = 2\pi r^2 (1 - \cos \theta_c) \quad (21)$$

假設光源之光輸出功率為 P_{source} ，則射出發光二極體的功率為：

$$P_{escape} = P_{source} \frac{2\pi r^2 (1 - \cos \theta_c)}{4\pi r^2} \quad (22)$$

其中 $4\pi r^2$ 為具有半徑 r 之球形體的整個表面積。

4. LED原理

因此，光子可以射出發光二極體的比例為：

$$\frac{P_{escape}}{P_{source}} = \frac{1}{2}(1 - \cos \theta_c) \quad (23)$$

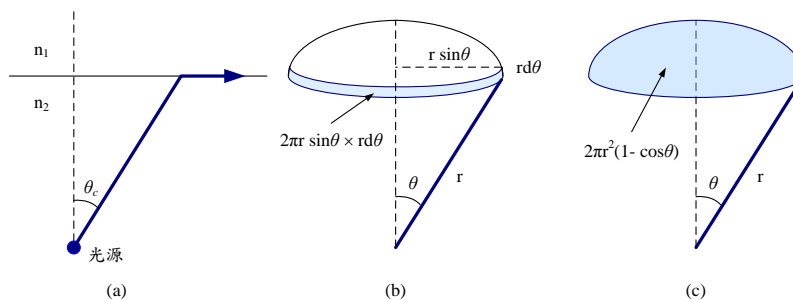
對於具有高折射率之半導體材料而言，臨界角很小，所以可以將(23)式的餘弦項展開成冪級數，於是(23)式可以改寫成：

$$\frac{P_{escape}}{P_{source}} \cong \frac{1}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{\theta_c^2}{2} \right) \right] = \frac{1}{4} \theta_c^2 \quad (24)$$

4. LED原理

2. 發光效率

❖ 光射出錐(light escape cone)



第7圖 (a)臨界角的示意圖，(b)圓形錐的面積元素，(c)圓形錐。

4. LED原理

3. 電流-電壓特性的修正

❖ 電阻效應

二極體方程式：

$$I = I_s (e^{qV/nkT} - 1) \quad (25)$$

發光二極體的內部往往會有不期望的串接電阻，串接電阻可能是由於金屬-半導體介面之接觸電阻，發光二極體內部的堆疊層之間的接觸電阻，或半導體材料本身的電阻所造成。如第8圖所示，曲線(a)為InGaN藍光發光二極體的典型電流-電壓特性曲線，曲線(b)為理想的電流-電壓特性曲線。因此，將串接電阻項加入(25)式之中：

$$I = I_s (e^{q(V-IR_s)/nkT} - 1) \quad (26)$$

其中 R_s 為內部串接電阻。在順向偏壓時，(26)式中的指數項遠大於1。因此，(26)式可以改寫為：

$$V = IR_s + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_s}\right) \quad (27)$$

4. LED原理

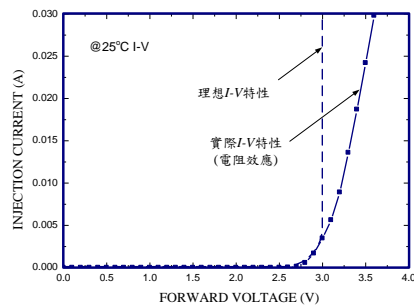
將(27)式對電流 I 作一階微分，得：

$$\frac{dV}{dI} = R_s + \frac{nkT}{q} \frac{1}{I} \quad (28)$$

或是

$$I \frac{dV}{dI} = IR_s + \frac{nkT}{q} \quad (29)$$

於是，將 $I dV/dI$ 對 I 作圖，其斜率為串接電阻 R_s 。



第8圖 串接電阻效應。

4. LED原理

3. 電流-電壓特性的修正

❖ 異質接面對電特性的影響

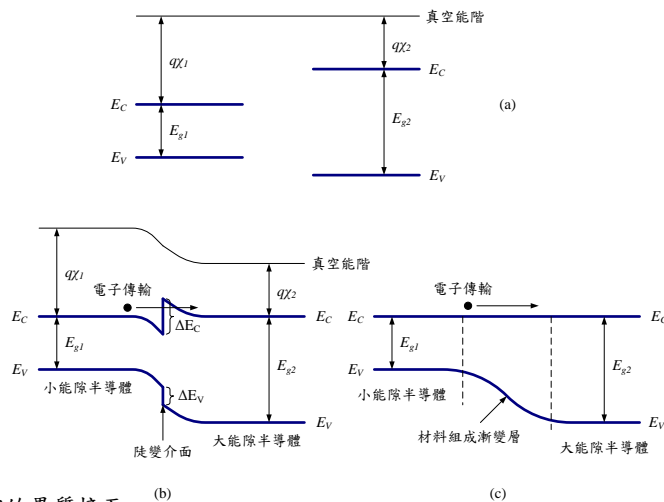
串接電阻主要是由於金屬-半導體介面之接觸電阻，發光二極體內部的堆疊層之間的接觸電阻，或半導體材料本身的電阻所造成。

有兩個具有不同能隙但是分開的n型半導體，其能帶圖如第9(a)圖所示。當兩個不同材料的n型半導體相接時，由於真空能階是連續的，所以其能帶圖如第9(b)圖所示。電子若要從能隙較小的半導體傳輸到能隙較大的半導體，則電子會在介面處遇到一個障礙物(spike)，使得電子的運動受到影響。因此，常用的解決方法如第9(c)圖所示。在兩個半導體之間加入一個組成漸變層，以消除障礙物(spike)。例如，藉由MOCVD技術，在GaAs之上要成長AlGaAs時，會將TMAl(三甲基鋁)的流量漸漸增加，TMGa(三甲基鎵)的流量漸漸減少，然後才開始成長AlGaAs。

National Taipei University of Technology

25

4. LED原理



第9圖 兩個n型半導體的異質介面。(b)

(c)

National Taipei University of Technology

26

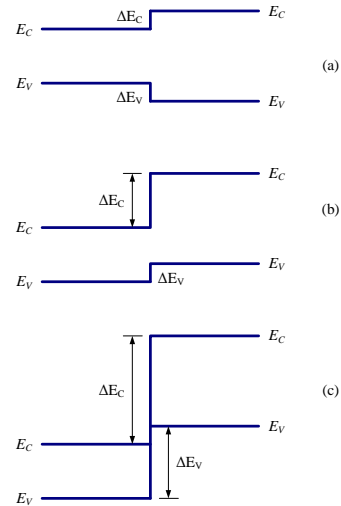
4. LED原理

3. 電流-電壓特性的修正

❖ 異質接面對電特性的影響

到目前為止，異質接面的型態有三種：

- 第10(a)圖所示，兩種半導體的能隙差，分成在導電帶和價電帶的不連續差， ΔE_C 和 ΔE_V 。此種型態稱為分叉式(straddling)。
- 第10(b)圖所示，小能隙半導體的導電帶低於大能隙半導體的導電帶，但是小能隙半導體的價電帶也低於大能隙半導體的價電帶。此種型態稱為交錯式(staggered)。
- 第10(c)圖所示，小能隙半導體的導電帶和價電帶都低於大能隙半導體的價電帶。此種型態稱為能隙不連續式(broken gap)。



第10圖 幾種不同型式的異質接面。

4. LED原理

7.3 電流-電壓特性的修正

7.3.3 載子的侷限與分佈

以p-n接面為例，當發光二極體在順向偏壓時，載子會擴散進入相對側而成為少數載子。發光二極體的發光區由少數載子的擴散長度決定。根據愛因斯坦關係式：

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \quad (\text{電子}) \quad (7.30)$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p \quad (\text{電洞}) \quad (7.31)$$

4. LED原理

3. 電流-電壓特性的修正

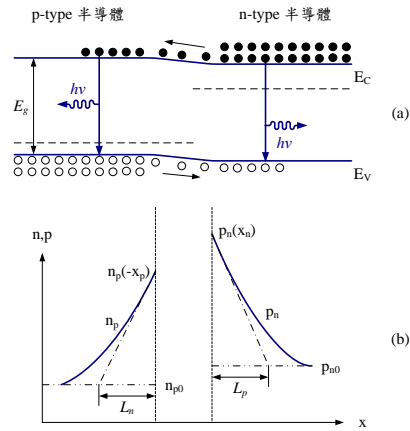
❖ 載子的侷限與分佈

因此，可以計算出少數載子在與多數載子複合之前的擴散長度：

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (\text{電子}) \quad (32)$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (\text{電洞}) \quad (33)$$

第11(a)圖為p-n接面發光二極體在順向偏壓時，電子和電洞注入，然後在發光區發光的情形。而少數載子的分佈如第11(b)圖所示。以p型GaN為例， $L_n = (7.8\text{cm}^2/\text{s} \times 10^{-8}\text{s})^{1/2} \approx 2.79\mu\text{m}$ 。因此，p-n接面發光二極體的發光區係兩側的擴散長度。



第11圖 p-n接面發光二極體在順向偏壓時，
(a)電子和電洞注入，然後在發光區發光的情形。
(b)少數載子的分佈情形。

National Taipei University of Technology

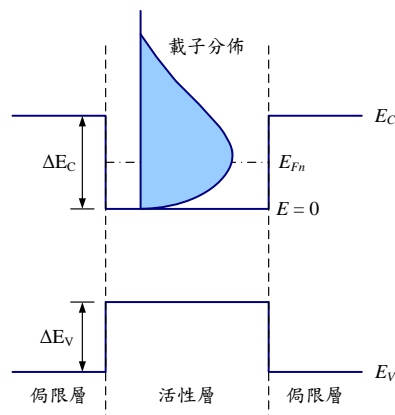
29

4. LED原理

3. 電流-電壓特性的修正

❖ 載子的侷限與分佈

但是，現在的高亮度發光二極體結構，因為載子的侷限效果不佳，所以都不是採用第11(a)圖所示之同質接面(homojunction)或稱為同質結構(homostucture)，而是採用雙異質結構(double heterostructure, DH結構)，如第11(b)圖所示。或是，採用多重量子井結構(multiple-quantum-wells structure, MQW結構)，係將DH結構中的活性層從單一層改為MQW結構。第12圖為侷限在活性層中之載子的分佈情形。



第12圖 載子在活性層中之分佈。

National Taipei University of Technology

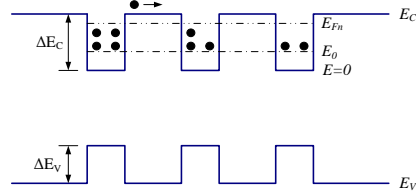
30

4. LED原理

理想狀況下，載子係被侷限在活性層中，用以複合發光。但是，如果侷限層和活性層之間的位能差太小，則載子會從活性層(或量子井)逃逸。因此，侷限層和活性層之間的位障能差應遠大於熱能，即 kT 。參考第12圖，能量高於位障能差，會從活性層(或量子井)逃逸電子濃度為：

$$n_{\text{escape}} = \int_{E_0}^{\infty} N(E)F(E)dE \quad (34)$$

另一方面，當注入電流太大時，會造成載子的溢流現象，即使再增加注入電流，發光二極體的亮度也不會增加。也就是亮度發生飽和。MQW結構可以使溢流的載子再流入下一個井中，而改善亮度飽和現象，如第13圖所示。



第13圖 多重量子井結構。

4. LED原理

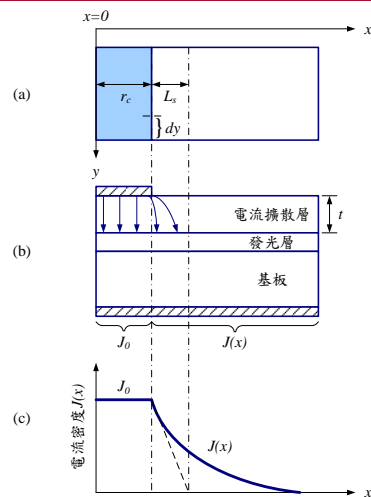
4. 電流擴散理論

發光二極體係將電能轉變成光能的半導體元件。因此，需要電流的注入，尤其是使注入電流很均勻的擴散在整個發光二極體。

❖ 矩形電極

Thompson在1980年提出一種線性帶形幾何之電流擴散理論，如第14(a)圖所示。因其左右對稱，故只考慮右側。首先，假設金屬的電阻為零，即在金屬區有固定電壓和電流密度 J_0 。因此，從金屬接點離開之電流密度可以表示為：

$$J(x) = \frac{2J_0}{\left[\frac{(x-r_c)}{L_s} + \sqrt{2} \right]^2} \quad (35)$$



第14圖 線性帶形幾何之電流擴散。

4. LED原理

其中 L_s 為電流擴散長度，藉由下式可以得到：

$$L_s = \sqrt{\frac{tnkT}{\rho J_0 q}} \quad (36)$$

其中 t 為電流擴散層厚度， ρ 為電流擴散層電阻率， n 為二極體理想因子。

假設在擴散邊緣($x = r_c + L_s$)的電流等於金屬區電流的 e^{-1} 。因此，在擴散邊緣的電壓降為 nkT/q 。寬度為 dy 之電流擴散層的橫向電阻為：

$$R = \rho \frac{L_s}{tdy} \quad (37)$$

電流擴散層之縱向電流為： $I = J_0 L_s dy$ (38)

藉由歐姆定律，得：

$$\rho \frac{L_s}{tdy} J_0 L_s dy = \frac{nkT}{q} \quad (39)$$

所以，可以解出電流擴散層的厚度 t ：

$$t = \rho L_s^2 J_0 \frac{q}{nkT} \quad (40)$$

藉由(40)式，可以計算出電流擴散層需要的厚度。

4. LED原理

4. 電流擴散理論

❖ 圓形電極

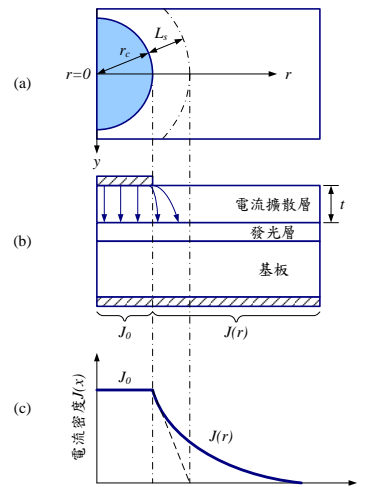
有時發光二極體的電極是作成圓形的，因此本節要藉由Thompson和上節的結果，推導圓形電極的理論。

如第15圖所示，電流擴散層的橫向電阻為：

$$R = \int_{r_c}^{r_c+L_s} \rho \frac{1}{A} dr = \int_{r_c}^{r_c+L_s} \frac{\rho}{t \cdot 2\pi r} dr = \frac{\rho}{2\pi t} \ln \left(1 + \frac{L_s}{r_c} \right) \quad (41)$$

電流擴散層之縱向電流為：

$$I = J_0 [\pi(L_s + r_c)^2 - \pi r_c^2] = J_0 \pi L_s (L_s + 2r_c) \quad (42)$$



第15圖 圓形幾何之電流擴散。

4. LED原理

4. 電流擴散理論

❖ 圓形電極

藉由歐姆定律，得：

$$\frac{\rho}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{L_s}{r_c}\right) J_o \pi L_s (L_s + 2r_c) = \frac{nkT}{q} \quad (43)$$

所以，可以解出電流擴散層的厚度 t ：

$$t = \rho L_s \left(r_c + \frac{L_s}{2}\right) \ln\left(1 + \frac{L_s}{r_c}\right) \left(J_o \frac{q}{nkT}\right) \quad (44)$$

注意，當時，(44)式會等於(40)式。

4. LED原理

4. 電流擴散理論

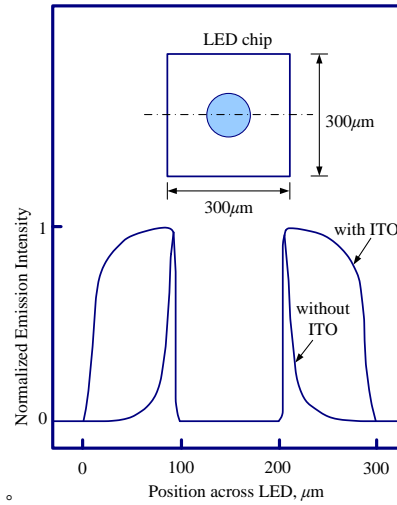
❖ 電流擴散層對亮度的影響

1991年，Hewlett-Packard的Fletcher等人在AlInGaP發光二極體最上層成長一層厚度大於15 μm 的GaP，用以擴散電流。因為GaP的能隙大於AlInGaP發光二極體所發射的光子能量，所以GaP層稱為窗層(window layer)。

1994年，清華大學吳孟奇教授的研究團隊將AlInGaP發光二極體的表面，鍍上一層厚度約為600Å之透明導電氧化物-氧化銦錫(indium tin oxide, ITO)，用以擴散電流，結果如第16圖所示。表面沒有ITO電流擴散層的AlInGaP發光二極體，只有在電極四周有亮。但是，表面有ITO電流擴散層的AlInGaP發光二極體，則幾乎整個表面都有亮。

現在，電流擴散層已廣泛使用在GaN發光二極體上。因為p-GaN的電洞移動率約為10 cm²/V-sec，電阻值很大，所以需要電流擴散層幫助擴散電流。

4. LED原理



第16圖 ITO電流擴散層對亮度的影響。

5. LED結構

- ✧ 可見光發光二極體
- ✧ 白光發光二極體
- ✧ 通訊發光二極體
- ✧ 背光源發光二極體
- ✧ LED結構分析

5. LED結構

1. 可見光發光二極體

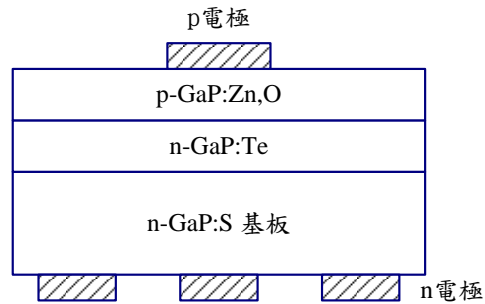
目前常見之可見光發光二極體大約可歸納為：(1)GaP/GaAsP系發光二極體；(2)AlGaAs系發光二極體；(3)AlInGaP系發光二極體；和(4)GaN系發光二極體。下面將詳細介紹這幾種發光二極體。

❖ GaP/GaAsP系發光二極體

此系列之發光二極體有三種：GaP 680nm 紅光發光二極體，GaP 570nm 黃綠光發光二極體，和GaAsP 系發光二極體。

5. LED結構

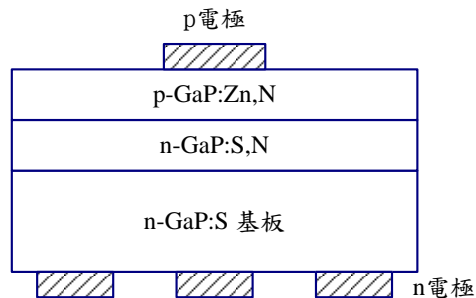
(a) 680nm 紅光發光二極體



第1圖 GaP紅光發光二極體的橫截面圖。

5. LED結構

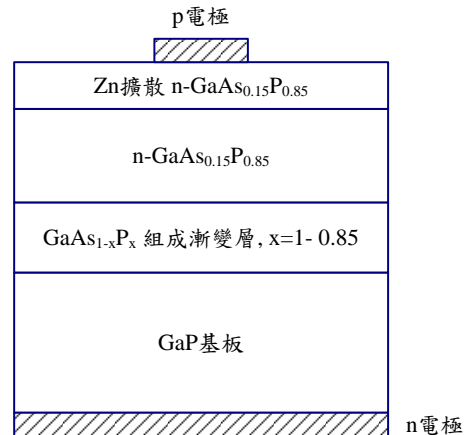
(b) 570nm 黃綠光發光二極體



第2圖 GaP黃綠光發光二極體的橫截面圖。

5. LED結構

(c)GaAsP系發光二極體



第3圖 GaAsP黃光發光二極體的橫截面圖。

5. LED結構

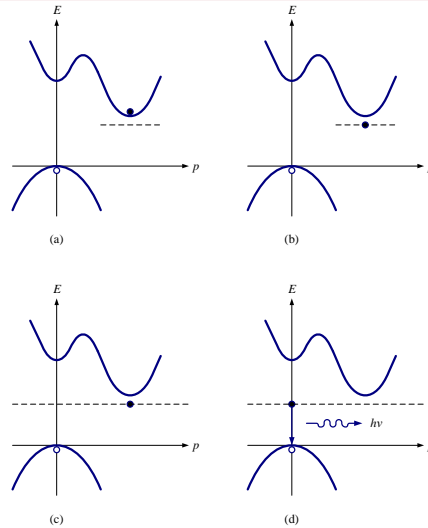
(d)等電子陷阱(isoelectronic trap)理論

本節之發光二極體所使用的GaP和GaAs_{1-x}P_x ($x > 0.45$)半導體材料都是間接半導體，其發生輻射轉換的機率非常小。而發光的關鍵在於其所引入的雜質。GaP紅光發光二極體摻的是(Zn,O)，GaP黃綠光發光二極體和GaAsP系發光二極體摻的是氮(N)原子，此二者稱為等電子中心或等電子陷阱。以GaAs_{1-x}P_x為例，當氮(N)原子被引入時，其會取代磷(P)原子的位置，並在能隙中形成一個雜質能階，如第4(a)圖所示。氮(N)原子的雜質能階可以捕捉電子，如第4(b)圖所示。因為氮(N)原子的陰電性比較強，所以被捕捉電子的運動空間較狹小。根據海森堡測不準原理(Heisenberg uncertainty principle)：

$$\Delta x \cdot \Delta p > \hbar \quad (1)$$

所以其動量值較大，如第4(c)圖所示。因此，部分的電子會和電洞具有相同的動量，與其複合而發光，如第4(d)圖所示。

5. LED結構



第4圖 具有等電子陷阱
之間接半導體發光的過程。

5. LED結構

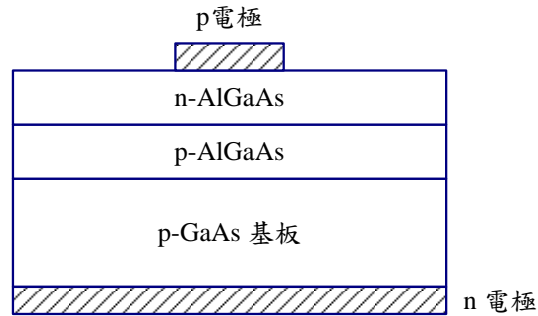
1. 可見光發光二極體

❖ AlGaAs系發光二極體

此系列之發光二極體發光波長為660nm紅光，但是依結構可分為三種：單異質結構(single heterostructure, SH)，雙異質結構(double heterostructure, DH)，雙行雙異質結構(double line-double heterostructure, DDH)。其主要係以液相磊晶技術(Liquid-Phase Epitaxy, LPE)成長。

5. LED結構

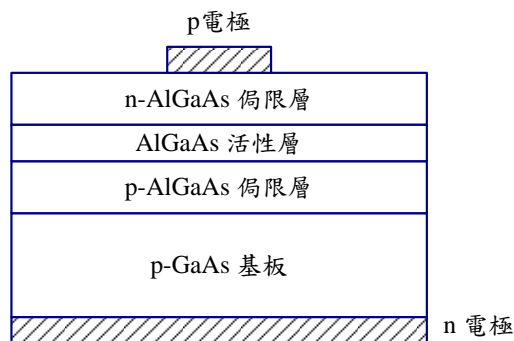
(a) 單異質結構AlGaAs紅光發光二極體



第5圖 SH結構AlGaAs發光二極體的橫截面圖。

5. LED結構

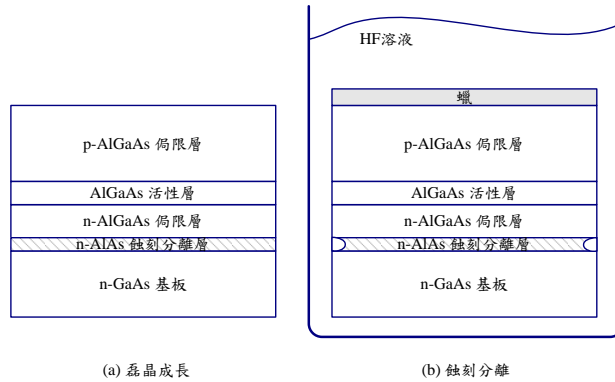
(b) 雙異質結構AlGaAs紅光發光二極體



第6圖 DH結構AlGaAs發光二極體的橫截面圖。

5. LED結構

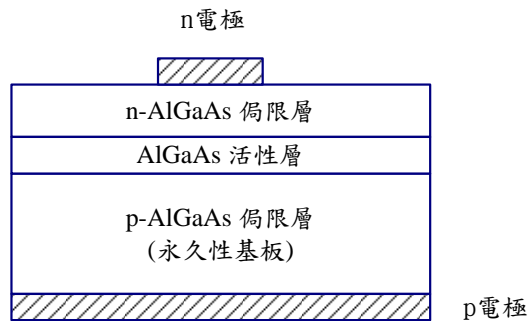
(c) 雙行雙異質結構AlGaAs發光二極體



第7圖 DDH結構 AlGaAs發光二極體的臨時性基板分離過程。

5. LED結構

(c) 雙行雙異質結構AlGaAs發光二極體

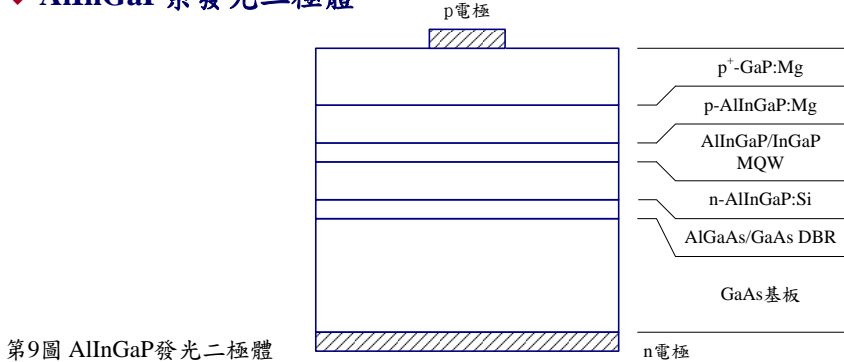


第8圖 DDH結構AlGaAs發光二極體的橫截面圖。

5. LED結構

1.可見光發光二極體

❖ AlInGaP系發光二極體

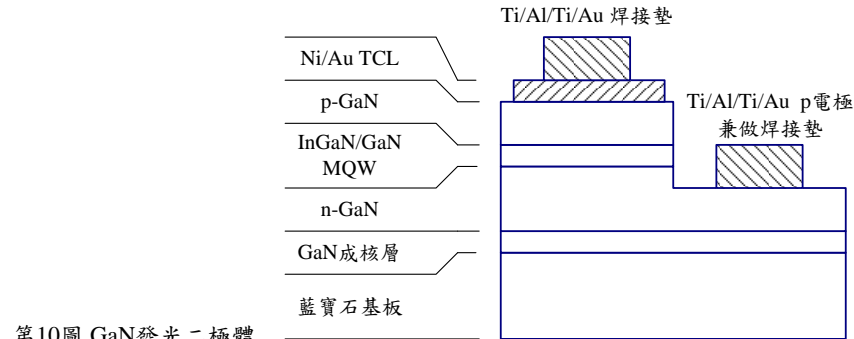


第9圖 AlInGaP發光二極體的橫截面圖。

5. LED結構

1.可見光發光二極體

❖ GaN系發光二極體



第10圖 GaN發光二極體的橫截面圖。

5. LED結構

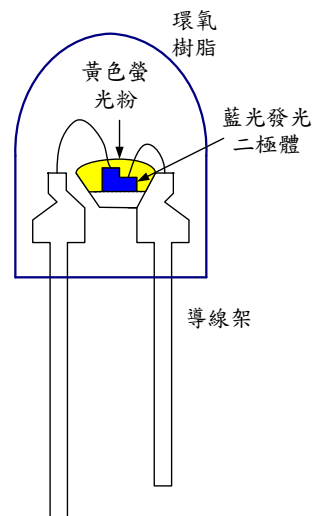
2. 白光發光二極體

因為發光二極體是一種半導體元件，故壽命長；由電轉換為光的效率高，耗電量少；同時發光二極體元件是一種極小的發光源，所以可配合各種應用設備的小型化。和一般燈泡比較起來，發光二極體燈泡的壽命要高出50-100倍，二極體本身耗費的電量約是一般燈泡的1/3-1/5，由於白色發光二極體燈泡具有多項優點，可望在二十一世紀取代鎢絲燈和水銀燈，成為兼具省電和環保概念的新照明光源。

5. LED結構

❖ 藍光發光二極體/黃色螢光粉

此種白光發光二極體係在封裝時，使用GaN藍光發光二極體當作激發光源，然後在GaN藍光發光二極體上覆蓋一層黃色螢光粉，最後再用環氧樹脂(epoxy)模塑成型，如第11圖所示。



第11圖 典型封裝的白光發光二極體。

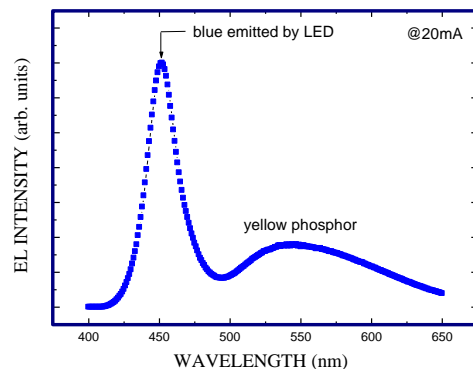
5. LED結構

2. 白光發光二極體

❖ 藍光發光二極體/黃色螢光粉

當材料粒子的尺寸縮小到奈米等級時，其物理和化學性質會發生改變，因此，奈米技術(nanotechnology, NT)被認為是二十一世紀最重要的技術之一，世界各國都非常重視。發光二極體則是下一世代照明技術當中，因耗電量低和壽命長等特性，而成為最被看好的照明光源，一般稱之為固態照明(solid state lighting, SSL)。如果將奈米技術應用在發光二極體上，是否可以大幅提升發光二極體的性能呢？傳統的商用白光發光二極體(light-emitting diode, LED)包含：當作激發光源之藍光LED，和黃色螢光粉，如第11圖所示，其中黃色螢光粉被藍光激發之後發出黃光，加上藍光混光之後形成白光，而光譜如第12圖所示。最常見的黃色螢光粉係由鉕鋁石榴石(yttrium aluminum garnet, YAG)所製成的，其化學式為 $Y_3Al_5O_{12}$ 。

5. LED結構



第12圖 傳統白光發光二極體的光譜。

5. LED結構

❖ 藍光發光二極體/黃色螢光粉

為了獲得更高亮度的白光發光二極體，必須發展更高亮度的激發光源，或是具有更高發光轉換效率的螢光粉。本文將介紹奈米級螢光粉的相關發展。目前奈米級螢光粉的研究方向主要有兩種：量子點螢光粉和奈米螢光粉。下面將分別介紹。

(a) 奈米效應

當材料尺寸縮小到奈米等級時，會發生一些有趣的現象：

5. LED結構

(a) 奈米效應

當材料尺寸縮小到奈米等級時，會發生一些有趣的現象：

□ 表面效應

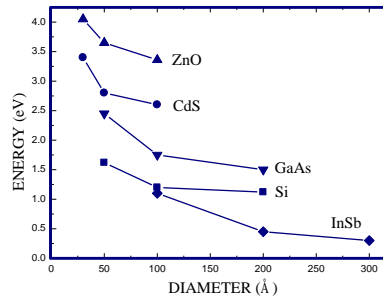
材料粒子縮小到奈米等級時，分佈於奈米粒子表面的原子數比例隨之增加，使得奈米粒子表面有較高的位能，而使奈米粒子具有很高的活性，這個現象就是所謂的奈米效應。例如，當導電的銅粒子縮小到某一奈米尺度時就不再導電；原本惰性的金，在奈米尺度下可以當作非常好的催化劑等。

當材料粒子變小，比表面積（表面積／體積）相對地增加，而比表面積增加會引發物質化學活性、光學、熱性質等的改變，這就是所謂奈米粒子的表面效應。

5. LED結構

量子尺寸效應

發光二極體所發的光色跟其能隙有直接的關係，但是當半導體材料的尺寸縮小到數個奈米時，也是遵守這樣的關係嗎？1986年，哥倫比亞大學的Brus估算出幾種半導體原子團直徑與能隙的關係，如第8.12圖所示。而矽半導體也有類似的現象。此種當半導體材料的尺寸改變時，其能隙也會改變的現象稱為量子尺寸效應(quantum size effect, QSE)。

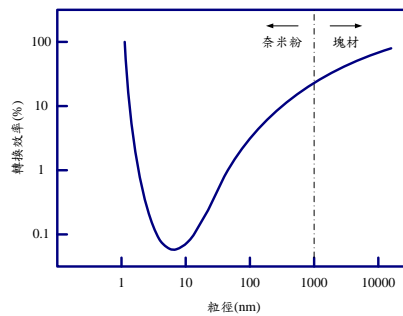


第13圖 量子尺寸效應。

5. LED結構

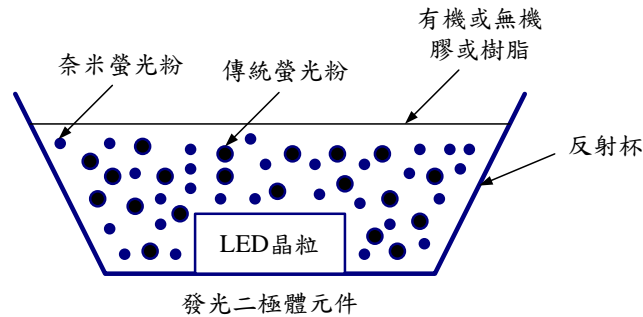
(b) 奈米螢光粉

美國Nanocrystals Technology公司的Bhargava博士在1993年提出一種假設：當螢光粉的粒徑約小於7nm時，隨著粒徑的減小，其發光效率會急遽增加，如第14圖所示。此一假設引起全世界各國相關研究人員的注意而相繼投入奈米螢光粉的研究。另一方面，LumiLeds的研究人員發現：傳統螢光粉轉換發光二極體之效率的下降，係因螢光粉粉粒對一次光(發光二極體的光)和二次光(螢光粉的光)的散射，於是在2002年6月7日提出應用在發光二極體之奈米螢光粉(粒徑 $\ll 1\mu\text{m}$)的專利，如第15圖所示。



第14圖 螢光粉的粒徑與轉換效率之關係圖。[Nanocrystals Technology公司]

5. LED結構

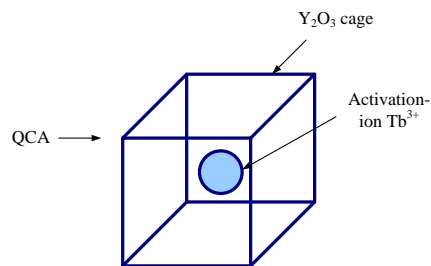


第15圖 使用奈米螢光粉的發光二極體。

5. LED結構

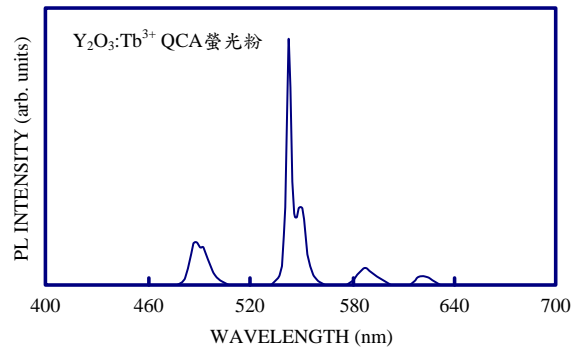
(c) 量子點螢光粉

量子點螢光粉的粒徑約為2~10nm，這比奈米螢光粉的粒徑還要細。其具有：無史脫克(Stokes)藍位移效應，光吸收率高，和高溫下穩定等特性。目前有研究成果的大約有三種：量子侷限型原子(quantum confined atom, QCA) 螢光粉，ZnS系之半導體螢光粉，和Si半導體螢光粉。Nanocrystals Technology公司所提出的量子侷限型原子(quantum confined atom, QCA) 螢光粉，第16圖圖示 $Y_2O_3:Tb^{3+}$ QCA螢光粉的結構，其螢光特性如第8.17圖所示，但是到目前為止似乎並未應用在發光二極體上。根據Nanocrystals Technology公司所發表的資料，目前QCA螢光粉的量子轉換效率約為70%；



第16圖 $Y_2O_3:Tb^{3+}$ QCA螢光粉的結構。[Nanocrystals Technology公司]

5. LED結構

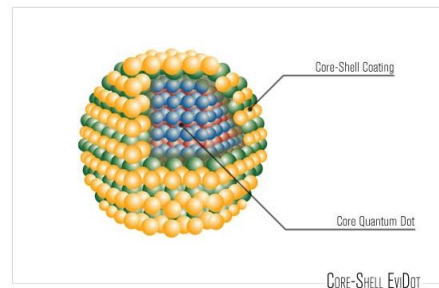


第17圖 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Tb}^{3+}$ QCA螢光粉的激發光譜。

5. LED結構

(c)量子點螢光粉

LumiLeds 公司和美國能源部(U. S. Department of Energy)所屬之 Sandia National Laboratories 所共同開發的ZnS系量子點螢光粉，如第8.18圖所示。LumiLeds所使用的量子點螢光粉係由CdSe核心和ZnS外殼所構成的，如第18圖所示CdSe核心的尺寸可以決定量子點螢光粉的吸收和發光特性，而ZnS外殼可以將電子和電洞侷限在核心，而且可以電性和化學性鈍化量子點螢光粉的表面。根據美國能源部在2004年所發表的資料，量子點螢光粉的量子轉換效率約為76%，此結果稍優於QCA的量子轉換效率。

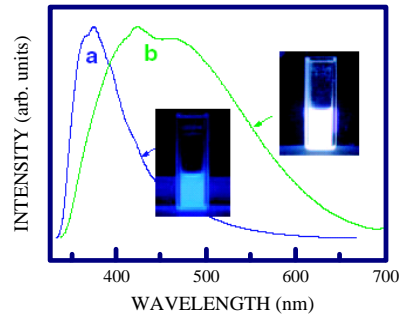


第18圖 CdSe核心-ZnS外殼量子點螢光粉的示意圖。[Evident Technologies公司]

5. LED結構

(c)量子點螢光粉

除了上述這兩類螢光粉之外，韓國西江大學(Sogang University)和韓國科學技術研究院(KIST)另闢蹊徑，研發出Si量子點螢光粉。Si奈米晶之能隙變化如第13圖所示。如圖所示，當Si晶體的尺寸小至奈米級後，電子會受到量子侷限效應的影響，不但能隙會變大，而且原本間接能隙的能帶結構也會變成直接能隙的能帶結構，使得原本不會發光的Si半導體，在變成量子點之後，就可發出單色光或白光。第19圖為以325nm-UV光照射兩種不同粒徑(曲線a:80nm, 曲線b:190nm)之Si量子點螢光粉的激發光譜。



第19圖 兩種不同粒徑之Si量子點螢光粉的激發光譜。

5. LED結構

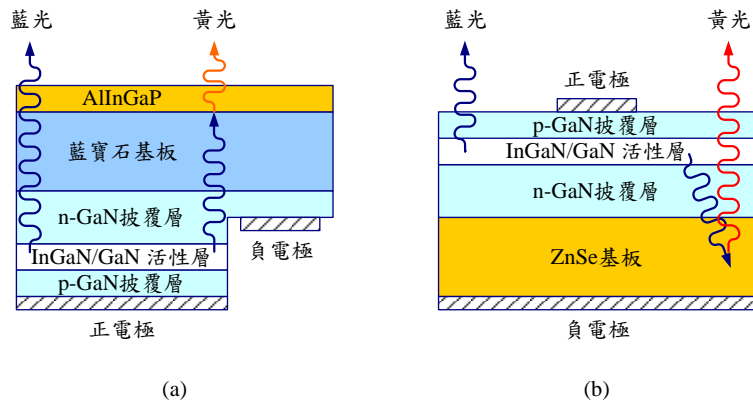
❖ 光子回收式白光發光二極體

波士頓大學光子研究中心的E. Schubert研究團隊在1999年提出一種白光發光二極體組態。其係將GaN系藍光發光二極體磊晶片(採用藍寶石基板)和AlInGaP系黃光發光二極體(採用GaAs基板)，利用晶片貼合技術(wafer bonding)黏貼在一起，然後使用濕式蝕刻法移除GaAs基板，最後製作成示於第20(a)圖之元件。在元件操作時，AlInGaP活性層會吸收部分的藍光而發出黃光，經由光色混合之後，可以觀察到白光。

另一方面，日本的住友電工也提出一種白光發光二極體組態，其係採用ZnSe基板，然後利用MOCVD磊晶技術在ZnSe基板上成長GaN系發光二極體結構，最後製作成示於第20(b)圖之元件。在元件操作時，GaN系藍光發光二極體結構會發出藍光，而有部分的藍光會射入ZnSe基板，由於ZnSe基板呈現黃色，因此當較高能量的藍光射入時，ZnSe會吸收藍光而發出黃光，經由光色混合之後，也可以觀察到白光。

上述之AlInGaP和ZnSe都是吸收具有較高能量的光線而發出較低能量的光線之半導體材料，因此，可以將其稱之為半導體波長轉換體(semiconductor wavelength converter)，而採用半導體波長轉換體之白光發光二極體稱為光子回收式(photon recycling)白光發光二極體。

5. LED結構



第20圖 採用半導體波長轉換體之光子回收式白光發光二極體。

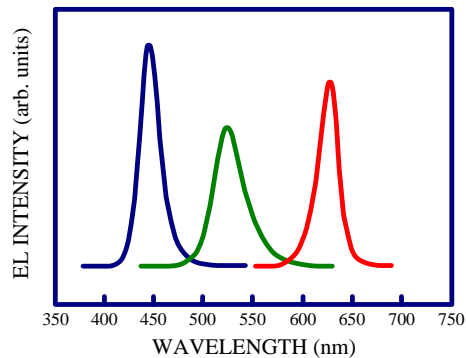
National Taipei University of Technology

29

5. LED結構

❖ 多晶片式白光發光二極體

利用紅、綠、藍三種發光二極體，光譜圖如第21(a)圖所示，調整其各別亮度來達到白光，而為了或得白光，紅、綠、藍的亮度比3：6：1，或只利用紅、綠或藍黃兩顆LED調整其各別亮度來發出白光。但是，缺點是價格較貴，只能用在高附加價格的產品上，例如：LCD背光源模組。



第21圖 RGB三色發光二極體的光譜。

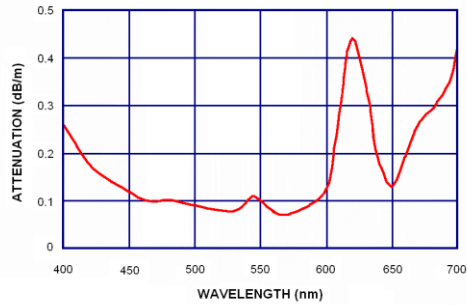
National Taipei University of Technology

30

5. LED結構

3. 通訊發光二極體

用於通訊之發光二極體可分為兩種：(a)有線傳輸，即用於短距離之光纖通訊的共振腔發光二極體，(b)無線傳輸，即用於遙控或短距離資料傳輸的紅外線發光二極體。



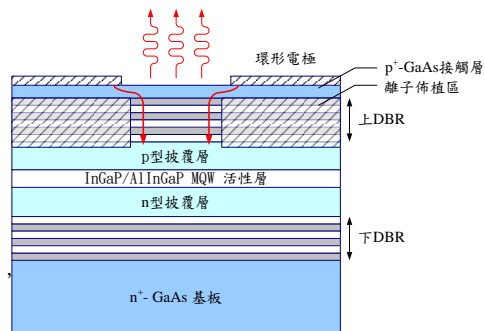
第23圖 典型PMMA光纖的衰減。

5. LED結構

❖ 共振腔發光二極體(resonate cavity light-emitting diodes, RCLEDs)

❑ 650nm AlGaInP/GaAs RCLEDs

使用AlInGaP材料系統之650nm RCLED已在1998年由K. Streubel研究團隊研製成功，其元件的橫截面示意圖如第24圖所示，元件係由AlInGaP/InGaP多重量子井(Multiple-Quantum-Well, MQW)活性層和AlInGaP披覆層所組成的。DBR係由AlAs/AlGaAs層構成，DBR之AlGaAs層中的Al含量可以選擇適當。另一方面，RCLED具有環形的上接觸電極，使具有容易耦合至光纖之圓形光點。由於環形接觸電極的外圍區域使用離子佈植，而產生絕緣區，所以電流會經由環形接觸電極流進元件的中央。注意，離子佈植區係只位在p型區，而且不會延至進入活性層，因此可以避免在活性層中產生缺陷，而使元件退化。



第24圖 650nm AlInGaP/InGaP RCLED的典型結構。

5. LED結構

4. 背光源發光二極體

液晶顯示器(LCD)係一種本身不會發光的顯示器，所以需要光源，如陽光，日光燈和LED燈，才能看見其所顯示的內容。在照明用之氮化鎵系發光二極體光源的亮度尚未到達市場的要求之際，2002年彩色手機的流行使得氮化鎵系LED的應用大幅成長，甚至供不應求。也因此LCD面板廠開始考慮中大型尺寸之LCD螢幕，甚至LCD TV(液晶電視)的背光源是否可以採用LED燈。2004年11月，SONY首度推出使用LED燈當作光源的LCD TV – QUALIA 005。因此，正式宣告雙D(LED和LCD)產業結合。

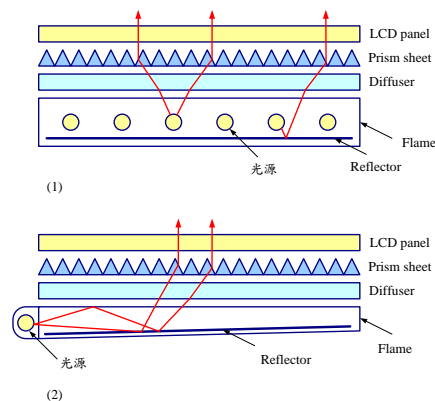
液晶顯示器的組成可分為顯示器面板、連接軟板(驅動IC)、背光模組(backlight module)與框架四大部分，其中背光模組中光源將是2006年產業界的發展重心，目前7吋以下的液晶面板大多係以LED取代傳統的冷陰極螢光燈管(CCFL)，而2006年將進行到7-10.4吋的液晶面板。

5. LED結構

4. 背光源發光二極體

❖ LCD的背光源

背光模組由光源、導光板、光學膜片、塑膠框等主要組件組成，由於液晶面板不是主動元件，本身不會發光，因此背光模組的主要功能就是提供液晶面板光源，將光投射出使用者的方向，透過液晶面板將色彩及畫面呈現給使用者。第27圖圖示兩種背光模組的配置方式：(1)直下式和(2)側光式。



第27圖 LCD背光模組配置示意圖：
(1)直下式和(2)側光式。

5. LED結構

❖ LCD的背光源

目前最常見的光源是冷陰極螢光燈管(Cold Cathode Fluorescent Lamp; CCFL)。冷陰極電管是先將螢光燈管管壁塗佈螢光粉，利用二次電子的放射撞擊汞蒸氣後發出紫外光，紫外光發射後撞擊到螢光燈的管壁，將紫外光轉換成為可見光。但是，環保議題將是CCFL的致命傷。根據「歐盟特定有害物質管制指令」的規定，雖然以目前CCFL的含汞量而言仍然可以使用，但是已經引爆無汞替代光源的強烈需求。

其次，另一種常用的光源是發光二極體(Light Emitting Diode)，發光二極體主要是應用在小尺寸的LCD面板光源，如手機、PDA、遊戲機、各類型儀表、車用型數位電視等輕薄短小的電子產品，LED主要是因為具有幾項重點特色：主動式發光源具有質量輕、體積小、製造成本低且兼具省電之低功率光電元件特性，因此現階段以LED背光源已廣泛的應用於各項產品。

5. LED結構

❖ 技術分析

□ 光色

LCD面板所使用的白光LED燈有兩種：(1)藍光LED加黃色螢光粉和(2)RGB三色LED模組。藍光LED加黃色螢光粉之白光LED的結構非常簡單，而且發光效率很高，目前被當作小尺寸LCD的背光光源，缺點是紅色成份的強度較弱。因此，大尺寸LCD的背光光源通常係採用RGB三色LED模組。此種LED模組的演色性很好(可達85%)。RGB三色LED模組有兩種：(1)紫外光LED加RGB三色螢光體粉和(2)單體RGB三色LED。前者由於紫外光LED的發光效率不佳，而且紫外光會使封裝樹脂與螢光粉劣化，所以尚處在實驗室研發階段。後者容易產生顏色不均勻的現象，因此這方面，就必須由增加光的路徑，改善背光結構，以達成充分混光的目標。此外，由於LED的光色會隨時間和溫度而有所改變，因此必須以色彩感測器或溫度感測器控制電流大小，以調整各色LED所需的光通量。

5. LED結構

□ 點燈技術

LED在直流操作和交流操作時亮度不同，在直流操作時亮度較亮，但消耗功率較大且產生的熱也多，而交流操作時亮度較暗，但消耗功率較少且產生的熱也少。另一方面，LED的光色(發光波長)也會因溫度(外在或內在因素)和注入電流的不同而產生非線性變化。因此，點燈電路設計也是LED背光模組的另一個關鍵因素，例如設計因LED非線性的變化所影響的亮度控制和白平衡調校。如果使用藍光LED加黃色螢光粉的白光LED燈，點燈技術相對簡單。但是，如果使用單體RGB三色LED燈時，三顆LED晶粒的特性不同，所以對外在環境的對應變化也不一樣。

例如，2005年5月，三菱電機在2005年顯示資訊學會(SID 2005)發表了一款以6色LED搭配雙色彩色濾光片的LCD，其中背光源係利用兩組3色LED搭配而成，其波長分別為第一組的410nm（藍）、540nm（綠）、615nm（紅），及第二組的430nm（藍）、510nm（綠）、625nm（紅），在每一個框架中，LED係採用子場順序方式點亮。

5. LED結構

為了解決上述的缺點，SONY採用脈衝寬度調變(pulse width modulated, PWM)技術。另外，因為LED本身特性的關係，縱使點燈電路設計的相當優異，但是由於長時間的發光下，溫度、長時間使用所帶來的白平衡變化，也是很難預期的，例如在低溫點燈時畫面可能會稍偏紅色，經過一段時間後，才會轉回白色等等，都是因為LED特性所造成的變化。另一方面，為了對LED的光色進行監控，則需要增加光色感測器，以監控亮度及白平衡。

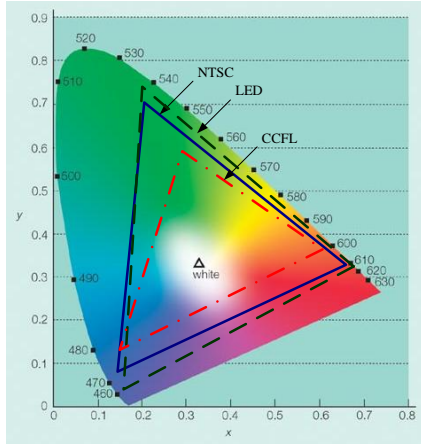
□ 色域(NTSC)

1953年，美國國家電視標準委員會(NTSC)根據美國照明協會(CIE)的1931年版色度座標圖，訂定彩色電視的色域(或以NTSC直接稱之)。如第28圖所示之實線範圍，在CIE的1931年版色度座標圖中，由紅色座標(0.67, 0.33)，綠色座標(0.21, 0.71)，和藍色座標(0.14, 0.08)所圍之區域稱為色域，而白色座標為(0.31, 0.316)。

5. LED結構

因此，使LCD 面板(或電視)的色域接近NTSC，也就成了LCD廠商努力的目標。由於需要背光源，所以採用何種背光源也就最直接地影響LCD的色彩表現能力。

傳統上，幾乎所有大尺寸的LCD都採用冷陰極管（CCFL）作為背光源，冷陰極管的色溫約為4800K，由於先天的條件，目前CCFL僅能達到65～75% NTSC所規範的色域表現，如第28圖所示之點虛線範圍。事實上，在2005年已經有相當多公司發表以3色LED作為LCD的背光源，甚至號稱可以超越NTSC色域。



第28圖 NTSC所定義的色域和LED模組所產生的色域。

5. LED結構

SONY的QUALIA 005係採用美國Lumileds Lighting公司的Lumileds Luxeon™ LEDs，其色域範圍可達105%NTSC，如第28圖所示之虛線範圍，而其色度座標則表列於表1。利用RGB三色LED表現出的色域超過CCFL的150%。但是，因為LCD面板的亮度最低大多約為 300 nit，若以10%的穿透光計算，約需要使用80顆LED燈，所以需要解決LED燈所演衍生的散熱問題。

表1 Lumileds RGB-LED的色度座標

色度座標	x	y
R	0.6824	0.3152
G	0.1991	0.7209
B	0.1566	0.0237

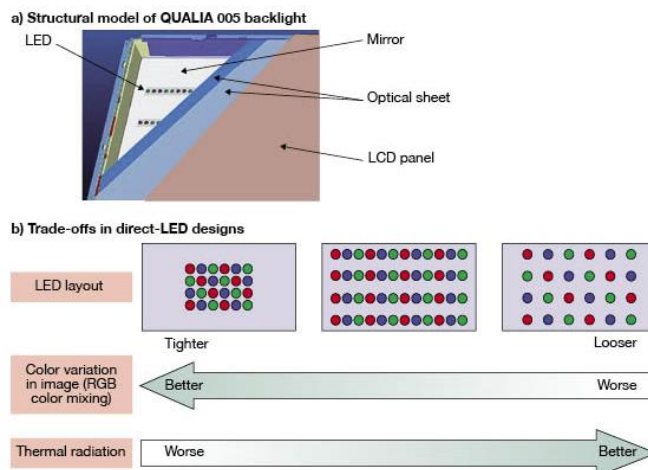
5. LED結構

❖ 散熱

由於，LED的熱效應會影響亮度與光色(色度)，所以散熱問題是一個相當重要的課題。散熱最直接的方法就是使用風扇，目前已有一些解決方案來達到散熱的效果，例如，SONY是利用風扇、導熱管與散熱片(heat sink)，把導熱管做橫向排列，並且將大型散熱片放在模組背面兩側，利用這樣的設計，可以將導熱管傳送出來的熱，分散到兩側裝有風扇的散熱片進行散熱。但是因為隨著面板尺寸的擴大，使用的風扇數量也會隨之增加，如此一來，數量龐大風扇會又產生噪音的問題。因此，問題又回到LED。

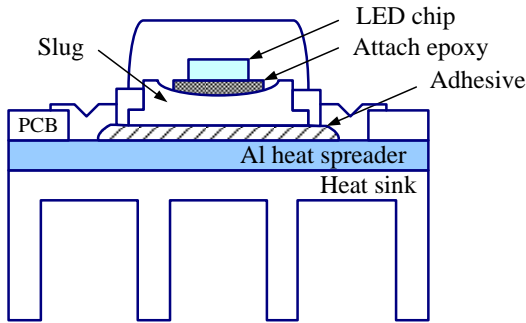
從最近這兩年所發表的專利來看，解決的方向有二：改變模組機構的設計和晶粒與構裝支架，如此才能達到低溫且亮度高的LED燈。第29圖係SONY QUALIA 005的散熱機構。第30圖係SONY QUALIA 005所採用的Lumileds高功率LED之散熱設計。

5. LED結構



第29圖 SONY QUALIA 005的散熱機構設計。[Nikkei Electronics]

5. LED結構



第30圖 Lumileds的Luxeon高功率LED之散熱設計。

5. LED結構

5.LED結構分析

由上可知，發光二極體的種類繁多，故將上述的各種發光二極體之特徵整理成下表：

光色	基板	發光層	結構	磊晶方式	發光波長 (nm)	裸晶亮度 (mcd)(典型值)
紅外線	GaAs	AlGaAs	DH	LPE	880, 940	---
紅光	GaP	GaP	HS	VPE+擴散	700	0.6
紅光	GaP	GaAsP	HS	LPE	650	15
紅光	GaAs	AlGaAs	SH	LPE	660	20
紅光	GaAs	AlGaAs	DH	LPE	660	50
紅光	AlGaAs	AlGaAs	DDH	VPE+擴散	660	70

5. LED結構

橘紅光	GaP	GaAsP	HS	VPE+擴散	630	15
橘紅光	GaAs	AlInGaP	MQW	MOCVD	625	150
黃光	GaP	GaAsP	HS	VPE+擴散	590	15
黃光	GaAs	AlInGaP	MQW	MOCVD	590	100
黃綠光	GaP	GaP	HS	LPE	570	14
綠光	sapphire	InGaN	MQW	MOCVD	525	300
藍光	sapphire	InGaN	MQW	MOCVD	470	100
白光	sapphire	InGaN+黃色螢光粉		MOCVD	470+580雙峰	50流明/瓦

5. LED結構

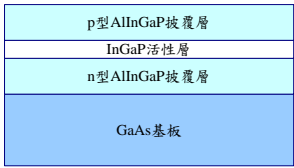
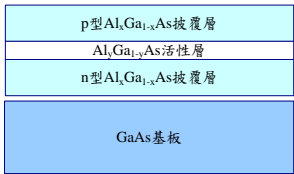
5.LED結構分析

❖ 基本結構

上面有提到各種發光二極體的結構和名詞，為了方便，整理如下：

結構名稱	說明	圖解
同質結構(homostructure, HS)	發光區的兩側為相同的半導體材料。	<p>p型GaP</p> <p>n型GaP</p> <p>GaP基板</p>
單異質結構(single heterostructure, SH)	發光區的兩側為不同的半導體材料。	<p>p型InGaP</p> <p>n型GaAs</p> <p>GaAs基板</p>

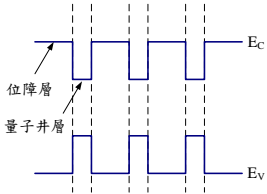
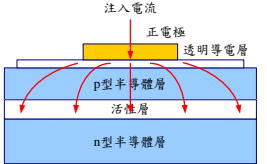
5. LED結構

雙異質結構(double heterostructure, DH)	發光結構為一種三明治結構，其中具有較小能隙的活性層被夾在上下具有較大能隙的披覆層之間。	
雙行雙異質結構(double line double heterostructure, DDH)	結構和雙異質結構大致相同，除了要將基板移除之外。	

National Taipei University of Technology

47

5. LED結構

多重量子井結構(multiple-quantum-well, MQW)	雙異質結構中的活性層係由較大能隙的位障層和較小能隙的量子井層所堆疊形成的。	
透明導電層(transparent conductive layer)	為了改善注入電流的分散，使擴增發光面積。	

National Taipei University of Technology

48

5. LED結構

電流阻擋層(current blocking layer)	因為電極不透光，若使電流不流過其下方的發光區，則可以增加其他發光區的電流密度。	
窗層(window layer)	可以分散注入電流及增加側向光。	
布拉格反射鏡(Brag distributed reflector, DBR)	可以將射向基板的光線反射向發光面。	

National Taipei University of Technology

49

5. LED結構

透明基板型(transparent substrate type, TS type) 發光二極體	基板的能隙大於活性層的能隙，即射向基板的光線不會被基板吸收。	
吸光基板型(absorption substrate type, AS type) 發光二極體	基板的能隙小於活性層的能隙，即射向基板的光線會被基板吸收。	

National Taipei University of Technology

50

5. LED結構

5.發光二極體的結構

❖ 高等結構

❑ 覆晶型發光二極體 (Flip-Chip LEDs, FC LEDs)

傳統的氮化鎵系發光二極體之外觀如第31(a)圖所示。其主要的缺點有三：

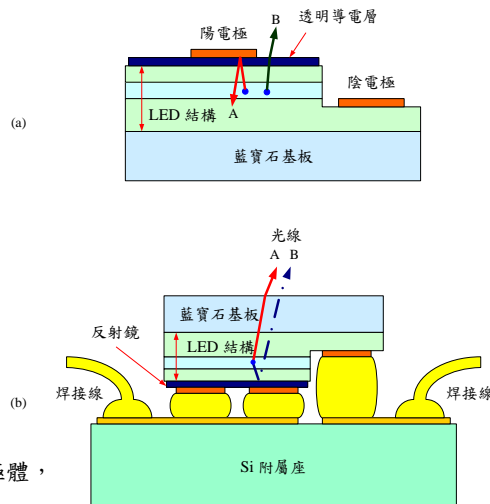
- (1) 陽電極焊接墊之面積約佔整個發光面積的20%，因其不透光，所以會有部分的光線無法自發光二極體的正面射出，如光線A；
- (2) 透明導電層的透光率，若其係由薄金屬層構成，則透光率約為70%，若其係由金屬氧化物層構成，則透光率約為95%。由薄金屬層所構成之透明導電層透光性不好，而由金屬氧化物層所構成之透明導電層，其與發光二極體之半導體的接觸電阻較高，而且熱穩定性不好。
- (3) 發光二極體本身所產生的熱，會隨操作電流(或輸入功率)的增加而增加，但是因為藍寶石基板的熱傳導性不佳(18W/m-K)，所以無法很快地將在發光區所產生的熱排到環境當中。

National Taipei University of Technology

51

5. LED結構

因此，基於以上三種原因，目前有幾家公司，如美國Lumileds，已開發出可以在1-5W功率下工作之高功率發光二極體，如第31(b)圖所示。



第31圖 (a) 傳統的氮化鎵系發光二極體，
(b)覆晶型氮化鎵系發光二極體。

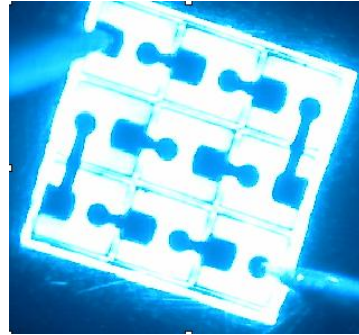
National Taipei University of Technology

52

5. LED結構

❖ 串聯式發光二極體

因為發光二極體的面積愈大，由於電流擴散較差和電流密度較小，所以發光效率愈差。因此若將許多個小面積的發光二極體串聯(或並聯)起來，可以得到發光效率較佳的發光二極體。第32圖為3x3串聯式發光二極體。

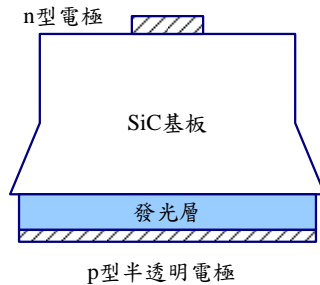


第32圖為3x3串聯式發光二極體。

❖ 斜截倒金字塔式 (truncated inverted pyramid, TIP)發光二極體

TIP AlInGaP發光二極體之優點，如上一章的說明。2005年CREE公司也推出TIP式覆晶型GaN發光二極體(名稱為XBright)，如第33(a)圖所示。其輸出光功率可達15mW(波長為470nm)，發光時的情形如第33(b)圖所示(2mA操作)。

5. LED結構



(a)



(b)

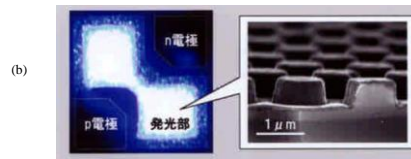
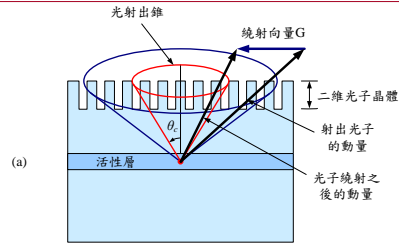
第33圖 CREE公司的XBright LED。

5. LED結構

❖ 光子晶體(photonic crystal, PhC)發光二極體

1987年，美國UCLA的Yablonovitch和普林斯頓大學的S. John 不約而同地提出電磁波在具有其波長尺度下週期性排列的介電質之中，其行為有如電子在晶體之中一般，由能帶控制，該具有波長尺度之週期性排列的介電質稱為光子晶體(photonic crystal)，或光子能隙材料(photonic bandgap materials)。

光子從發光二極體射出時，因受限於臨界角的問題而無法具有較佳的外部量子效率，如第34(a)圖所示。2004年，日本松下電器推出具有光子晶體之發光二極體，利用光子晶體對入射光的繞射，可以增加光子從發光二極體射出時的臨界角。



第34圖 (a)射出角度改善的示意圖，
(b)松下電器之光子晶體發光二極體。

5. LED結構

如第34(a)圖所示，當光子從發光二極體射出時，因受到光子晶體繞射的影響，而改變其原有的動量，使得可以以大於臨界角的角度射出。其中繞射向量可由下式決定：

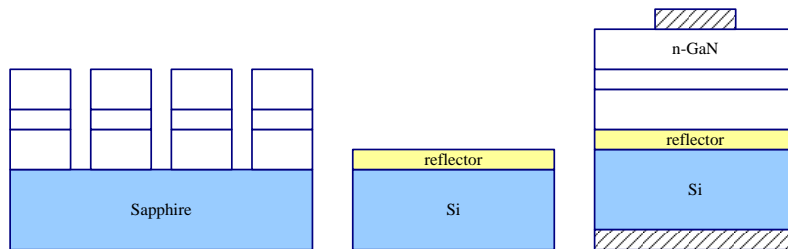
$$G = \frac{2\pi}{a} \quad (6)$$

其中a係光子晶體的晶格常數。例如，第34(b)圖右側之圓柱或凹槽之間的間距。松下電器之光子晶體發光二極體的發光情形如第34(b)圖所示。其亮度可以提升約50%。

5. LED結構

❖ 晶片貼合式發光二極體

由於藍寶石基板係電性絕緣體，而且導熱性也不佳，所以最好可以將它移除，而改用導電、導熱都不錯的矽基板或金屬基板，如銅基板。例如，如第35圖的左圖所示，韓國三星先在磊晶片上方界定出各個晶粒的區域。同時，另外製備上方沉積反射層之Si基板，如第35圖的中圖所示。將兩片晶片面對面貼合，然後再用雷射剝離技術移除藍寶石基板，最後製作成如第35圖的右圖所示之結構。



第35圖 GaN發光二極體之晶片貼合過程。

發光二極體之度量學

陳隆建 博士

教授

國立臺北科技大學光電工程系

1

OUTLINE

- 輻射定義
- 測系統與量測方法
- 波長與亮度
- 固態照明技術

2

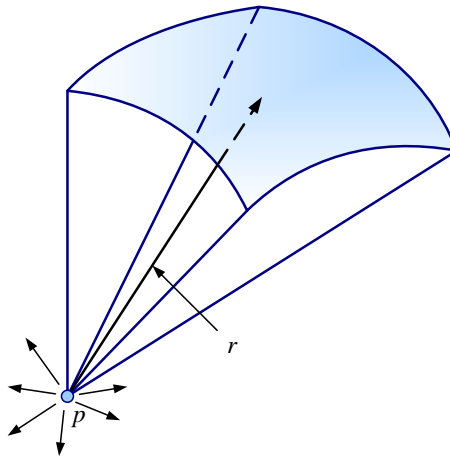
輻射定義

- 輻射度量
- 光度量
- 發光效率(luminous efficiency)
 - 光輻射之發光效率
 - 光源之發光效率

3

輻射度量

參考點輻射源 p 向所有方向的輻射能量為 Q_e 。



4

常用的輻射度量的名稱，符號，定義，及單位

度量	符號	定義	單位
輻射能量	Q_e	以輻射形式向所有方向發射之能量	焦耳(J)
輻射通量	$\Phi_e = dQ_e/dt$	單位時間(秒)通過之輻射能量	瓦特(W)
輻射強度	$I_e = d\Phi_e/d\omega$	點輻射源在給定的方向上，單位立體角所傳播之輻射通量	瓦特每球面度(W-sr ⁻¹)
輻射照度	$E_e = d\Phi_e/dA$	投射在單位面積上之輻射通量	瓦特每平方米(W-m ⁻²)
輻射亮度	$L_e = dI_e/dA$	表面單位立體角單位投影面積上的輻通量	瓦特每球面度每平方米(W-sr ⁻¹ -m ⁻²)

5

光度量

- 光度量的量測條件和輻射度量相同。
- 光度量與人類的眼睛對光的有效性有關。眼睛的感覺器官有兩種：錐狀體(cones)和柱狀體(rods)。
- 柱狀體細胞負責感光，錐狀體細胞負責感色。單一的錐狀細胞並不包含能辨認每一種可見色彩的受體，而是有3種不同受體的混合體，即對紅色(red)、綠色(green)和藍色(blue)敏感。後來，這三色被定名為光之原色，也就是三原色。
- 在高度刺激的情形下，錐狀體的效率較高(明視感度, photopic vision)。另一方面，當亮度很低時，柱狀體較靈敏(暗視感度, scotopic vision)。眼睛的相對靈敏度會朝向短波長增加。
- 在此要討論的係明視感度，其中，應該注意：

$$1cd = 4\pi lm = 12.57lm$$

6

常用的光度量的名稱，符號，定義，及單位

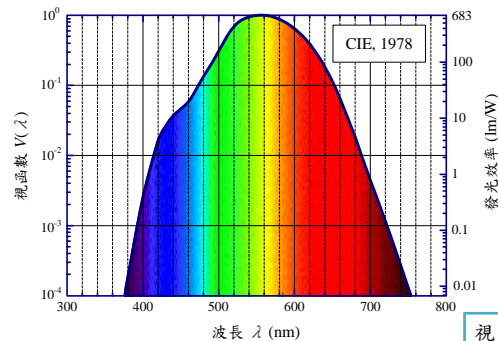
度量	符號	定義	單位
光能量	Q_v	光被感知的能量，有時也叫光量。	流明每秒(lm-s)
光通量	Φ_v	用光譜靈敏度為 $V(\lambda)$ 函數所量測之輻射通量。	流明(lm)
光強度	$I_v = d\Phi_v / d\omega$	點光源在給定方向上，單位立體角內發射的光通量。1流明則等於光強度為1燭光之均勻點光源，在單位立體角內所發出之光通量。	燭光(cd = lm-sr ⁻¹)
光照度	$E_v = d\Phi_v / dA$	投射在單位面積上的光通量	勒克斯(lux = lm-m ⁻²)
光亮度	$L_v = dI_v / dA$	表面單位立體角單位投影面積上的光通量。	尼特(nit = cd-m ⁻²)

7

- 光度量所採用之光通量(luminous flux) Φ_v 的單位為流明(lumen, lm)。其定義係555nm的單色光發射1/683 瓦特(W)的光功率時，其具有1 lm的光通量。輻射度量和光度量之間的轉換可以藉由示於圖中之眼睛靈敏度函數(eye sensitivity function, 或稱為視函數)， $V(\lambda)$ ，執行：

$$\Phi_v = 683 \int_{380}^{760} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda$$

- 其中 Φ_e 為輻射通量，單位為瓦特(W)，而683係歸一化因子，單位為lm/W，其表示：對於眼睛的最大靈敏度，1 W的輻射能量等於683 lm。如圖中所示，眼睛的最大靈敏度係在波長555nm，此時的視函數 $V(555\text{nm})$ 為1。因此，如果有相同功率強度的黃綠光跟藍光分別照在眼睛上，則我們會覺得黃綠光會比較亮。

視函數， $V(\lambda)$ ，和發光效率

光輻射之發光效率

- 係指光功率轉換成光通量之轉換效率，單位為每瓦光功率的亮度(lm/W)，其定義為：

$$\eta_{lum,o} \equiv \frac{\Phi_v}{\Phi_e} = \frac{\left[683 \int_{380}^{760} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \right]}{\int_{380}^{760} \Phi_e(\lambda) d\lambda} \quad (\text{式1})$$

- 對於全光譜的光源而言，需要藉由積分所有的波長，才能計算出光輻射之發光效率。

9

各種光源的發光效率

光源	發光效率(lm/W)
愛迪生發明的燈泡	1.4
鎢絲燈泡	15 – 20
LED燈	90 – 160
日光燈	50 – 80
高壓汞燈	50 – 60
高壓鈉燈	100 – 140

10

光源之發光效率

- 係將光源輸出的光通量除以輸入的電功率，單位也是每瓦光功率的亮度(lm/W)，其定義為：

$$\eta_{lum,e} \equiv \frac{\Phi_v}{P_e} = \frac{\Phi_v}{IV} \quad (\text{式2})$$

- 其中， P_e 為輸入的電功率， I 為順向注入電流， V 為順向電壓。若將(2)式除以(1)式可以得到(3)式之功率效率。

$$\eta_{power} = \frac{P_L}{P_e} = \frac{P_L}{IV} \quad (\text{式3})$$

- 發光二極體的輻射圖案(radiation pattern)或遠場圖案(far-field pattern)會因封裝的形式而改變，因此，亮度也會因量測的位置而改變。所以，發光二極體所發射的全部輻射通量為：

$$\Phi_e = \int_A \int_{\lambda} E_e(\lambda) d\lambda dA \quad (\text{式4})$$

- 其中 E_e 為輻射照度， A 為表面積， λ 為波長。

11

量測系統與量測方法

- 電特性
- 光特性
 - 亮度
 - 波長

12

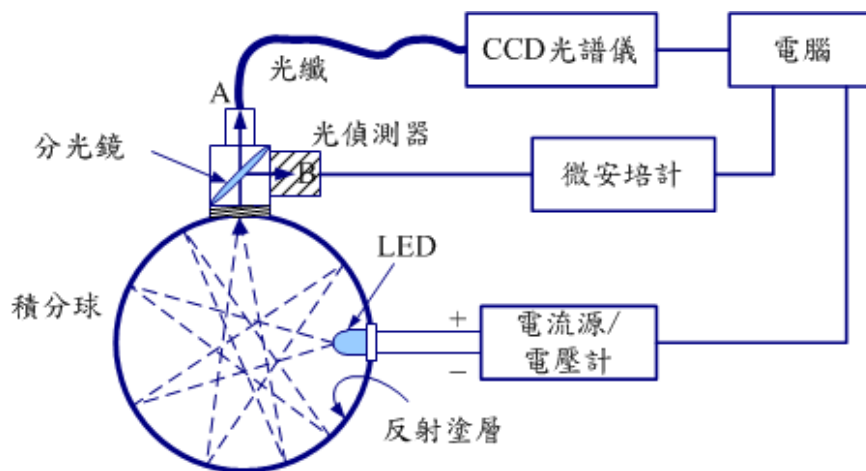
電特性

- 發光二極體的電特性可以藉由電流源，電壓計，和電腦，即利用輻射度量所使用之取光配件量測系統，繪製出電流-電壓特性曲線。
- 由於氮化鎵系發光二極體(GaN-based light-emitting diodes)之氮化鎵與藍寶石基板之間的晶格差配很大，所以缺陷密度過多，因此有漏電流的問題而影響發光二極體的可靠度。
- 目前產業界為了管制出貨的品質，將順向偏壓從慣用的20mA時的順向偏壓再細分出小電流時的順向偏壓。

13

發光二極體的量測系統

輻射度量所使用之取光配件量測系統



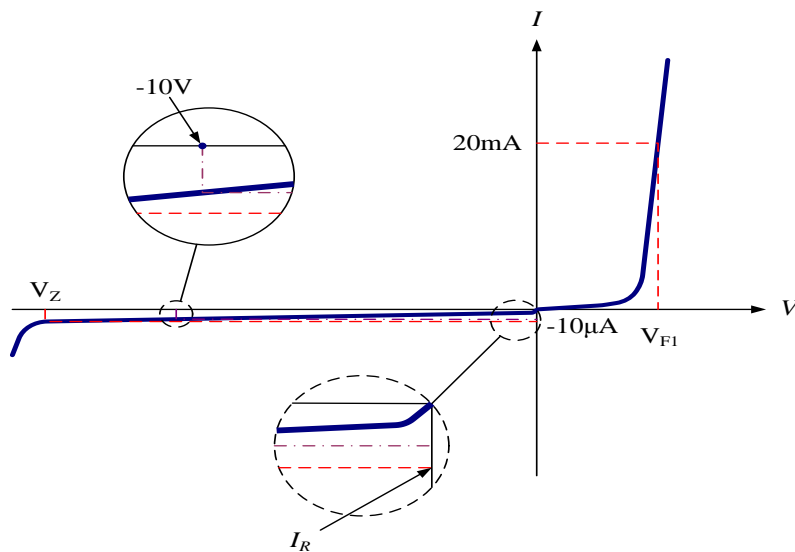
14

一些常用之描述電特性的符號和定義

名稱	符號	定義
第一順向偏壓	V_{F1}	20mA時的順向偏壓
第二順向偏壓	V_{F2}	1mA時的順向偏壓
第三順向偏壓	V_{F3}	10 μ A時的順向偏壓
逆向偏壓	V_Z	-10 μ A時的逆向偏壓
漏電流	I_R	-10V時的漏電流

15

發光二極體的電流-電壓特性曲線及電特性的定義位置



16

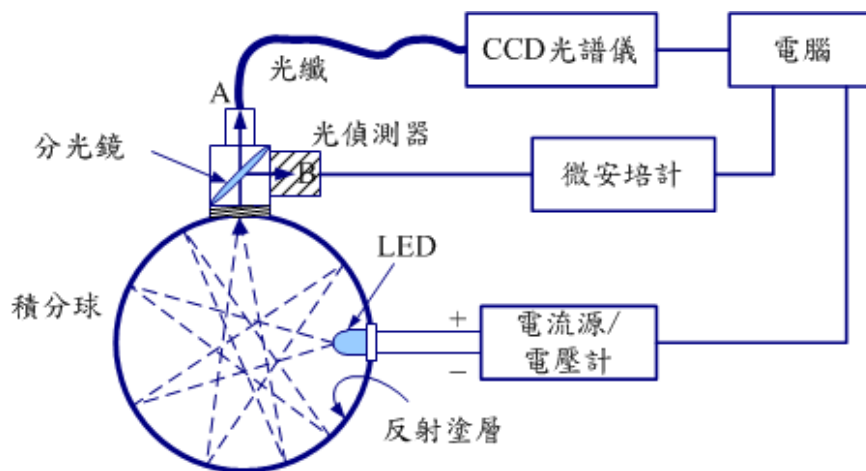
光特性

- 當外加電場使發光二極體發光時，發光二極體的亮度若以輻射度量，則系統係採用輻射度量量測系統之架構，利用積分球收集所有的光線。
- 若以光度量，則將輻射度量量測系統的積分球換成光度量量測系統的取光配件，只收取單點的光線。
- 然後，將收取得的光線利用分光鏡分成光線A和光線B。光線A用以量測波長，光線B用以量測亮度。

17

發光二極體的量測系統

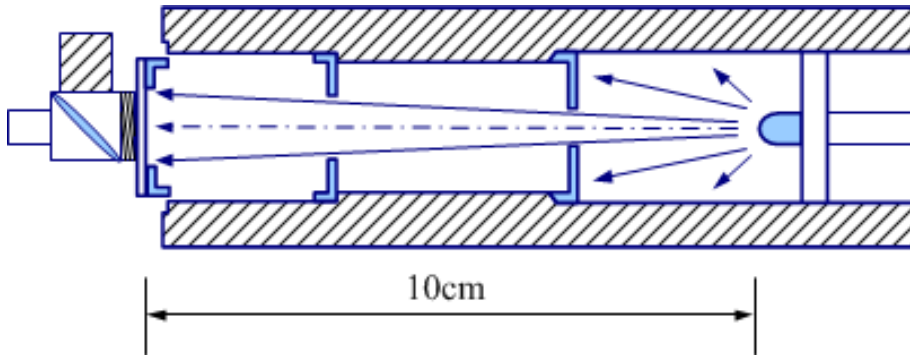
輻射度量所使用之取光配件量測系統



18

發光二極體的量測系統

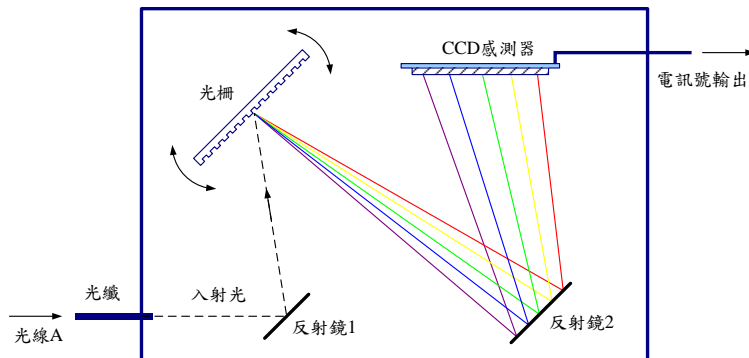
光度量所使用之取光配件量測系統



19

CCD光譜儀

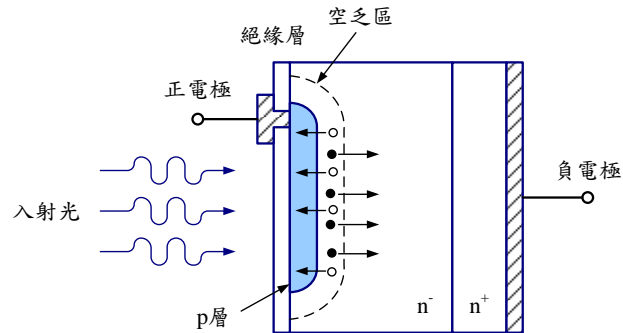
- 波長的量測通常係採用光譜儀，例如CCD(charge-coupled device, 電荷耦合元件)光譜儀，如圖所示。光線A藉由光纖和反射鏡1入射到光柵，轉動光柵，將入射光分出單一波長的單色光。藉由反射鏡2將單色光入射在CCD感測器上，CCD感測器將光訊號轉換成電訊號，然後將電訊號輸出到電腦。電腦依波長和電訊號強弱繪製出光譜，而光譜中的最大值，稱為峰值波長(peak wavelength)。



20

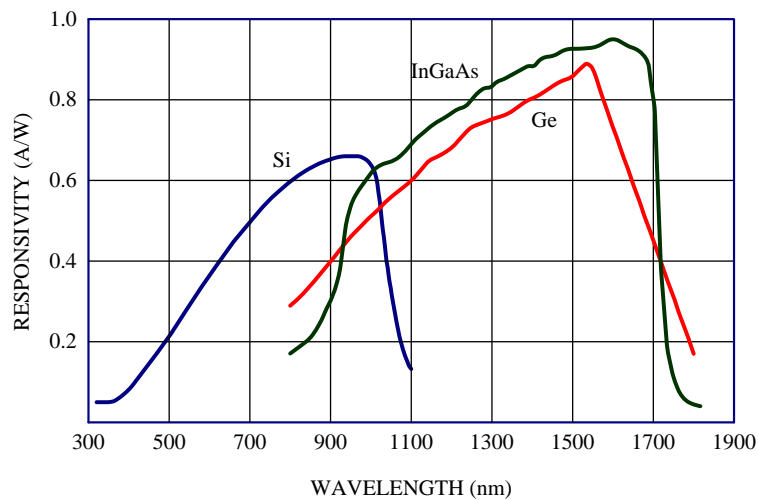
光偵測器

- 另一方面，光線B入射到光偵測器。如第9.6圖所示，光偵測器因入射光而產生電子電洞對，因反向偏壓，使光偵測器會產生光電流，藉由微安培計量得其電流量，然後將電流量的數值輸出到電腦。電腦依電流量的數值與內建值作比較，換算出亮度值。常用之矽光偵測器用以量測可見光發光二極體，可量測的波長範圍為350nm到1100nm。紅外線發光二極體可使用InGaAs光偵測器或Ge光偵測器。但是，紫外光發光二極體目前尚未有適當的光偵測器。



21

常用之光偵測器的光響應度



22

波長與亮度

- 波長的計算
 - 色彩匹配函數與色度座標
 - 主波長的計算

23

波長的計算

- 波長的計算相當複雜，這是因為人類的眼睛無法精確地描述出發光體的波長，所以需要藉由光譜儀量測出波形，然後再修正為眼睛所看到的波長(稱為主波長，dominate wavelength)。

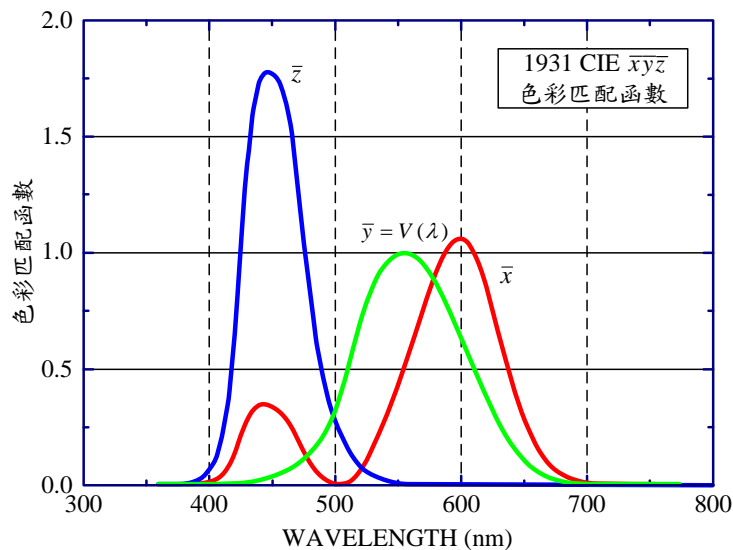
24

色彩匹配函數與色度座標

- 國際照明委員會 (the International Commission for Illumination 或 Commission Internationale de l'Eclairage, CIE) 使用色彩匹配函數(color matching functions)和色度座標(chromaticity diagram)，將色彩的量測標準化。注意，色彩匹配函數和色度座標並不是唯一的，CIE的版本常會修改。
- 目前常用的是1931年的版本。其中， \bar{x} 表示紅光色彩匹配函數， \bar{y} 表示綠光色彩匹配函數，而 \bar{z} 表示藍光色彩匹配函數。
- \bar{y} 色彩匹配函數即為視函數 $V(\lambda)$ 。此外，要注意： \bar{x} ， \bar{y} ， \bar{z} 和 $V(\lambda)$ 都是無因次量。1953年改版CIE色度座標則適用NTSC 電視色彩系統。
- 色度座標圖又稱為色像圖。CIE將所有的光色都給予一個座標值。

25

CIE (1931) 色彩匹配函數



26

色彩匹配函數

- 三種錐狀體的刺激程度公式

$$X = \int_{380}^{760} \bar{x}(\lambda) \phi_e(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{380}^{760} \bar{y}(\lambda) \phi_e(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_{380}^{760} \bar{z}(\lambda) \phi_e(\lambda) d\lambda$$

- 其中，其中X，Y，Z係表示每一個錐狀體相對刺激程度的刺激值。 \bar{x} 表示紅光色彩匹配函數， \bar{y} 表示綠光色彩匹配函數， \bar{z} 表示藍光色彩匹配函數。

27

色彩匹配函數

- 色度座標中的x值

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

- 色度座標中的y值

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

- 色度座標中的z值

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = 1 - x - y$$

- 注意，所有的色度座標都被歸一化。此外，z值可由x值和y值計算出來，所以z座標是多餘的，不需要使用。

28

主波長的計算

- 顏色的主波長(dominate peak)相當於人眼觀測到的顏色的色調(hue)。
- 主波長的任何一個顏色都可以看作為用某一個光譜按一定比例與一個參考光源（如CIE標準光源A、B、C，標準照明體D65，和等白光光源E等）相混合而匹配出來的顏色，這個光譜就是顏色的主波長。
- 若已獲得待測LED的色度座標，就可以採用等能白光E光源(equal-energy point)的色度座標為 $x = 0.3333$ ， $y = 0.3333$ 當作原點計算主波長。
- 在計算出 x ， y 值之後，就可以在色度座標圖上標示出座標位置。
- 例如，利用第9.9圖之GaN系藍光LED的光譜圖和方程式(9.6)~(9.11)計算出 $x = 0.1939$ ， $y = 0.1576$ 。根據色像圖上連接原點(參考光源色度座標)與待測LED的色度座標點形成一條延伸至色像圖邊界的直線，此直線與色像圖邊界的交點即為主波長。如第9.10圖所示，主波長結果為470.5 nm。

29

CIE標準照明體的色度座標

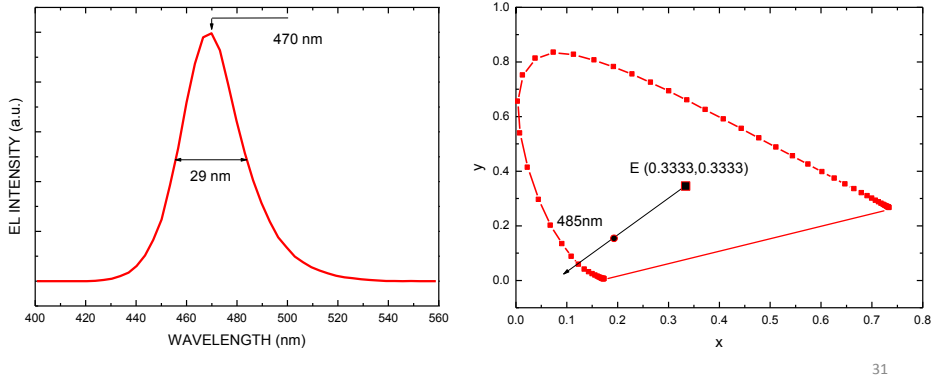
照明體	x	y
A光源	0.4476	0.4075
B光源	0.3485	0.3517
C光源	0.3101	0.3163
D65光源	0.3127	0.3291
E光源	0.3333	0.3333

30

GaN系藍光LED的光譜圖

利用左圖之GaN系藍光LED的光譜圖和色彩匹配函數之三種錐狀體的刺激程度公式計算出 $x = 0.1939$ ， $y = 0.1576$ 。

根據色像圖上連接原點(參考光源色度座標)與待測LED的色度座標點形成一條延伸至色像圖邊界的直線，此直線與色像圖邊界的交點即為主波長。如右圖所示，主波長結果為470.5 nm。



31

固態照明技術

- 名詞說明
 - 發光效率 (luminous efficiency: lm/W)
 - 色溫 (correlated color temperature, CCT)
 - 演色指數 (color rendering index, CRI)
- LED燈具的光學設計
- LED燈具的散熱問題
- LED燈具的驅動技術

32

固態照明技術

- LED燈是對環境無化學污染的綠色燈具，具有節能、低熱能、少輻射、壽命長又耐衝擊，集各項優點節能光源，因此，繼2000年在LCD背光源的應用之後，LED燈已成為世界各國政府照明光源推廣之指標。
- LED燈具效率 = LED晶片效率*熱損*光損*電損，所以LED燈的實際效率約只剩下六成。總而言之，目前LED燈具所面臨的問題有四:光色，驅動，散熱，和亮度。

33

名詞說明

- 從西元前3世紀起，蠟燭和油燈陪伴人類的夜晚已長達22個世紀。西元1810年代，煤油燈的出現，正式進入第一代照明光源的時代。
- 從此，每約間隔60年就有一個新世代的照明光源出現。西元1879年愛迪生發明了第二世代光源---白熾燈，開啟了近代照明光源技術的演進。
- 1938年，美國GE公司發表第三世代照明光源---螢光燈，從此引發一連串放電光源技術的開發。
- 到了1996年，日本的日亞化學發表第一顆白光發光二極體，正式宣告第四世代照明光源--LED的固態照明世代來了。
- 第一顆可見光的LED於1962年問世，現在LED的應用已從原先的指示燈演進到照明光源。

34

發光效率 (luminous efficiency: lm/W)

- 發光效能是光源的最重要特性之一，白光 LED 的發光機制是把電能轉換為光能，所發出的光能以流明表示，因此白光 LED 的效率通常以發光效能來說明。

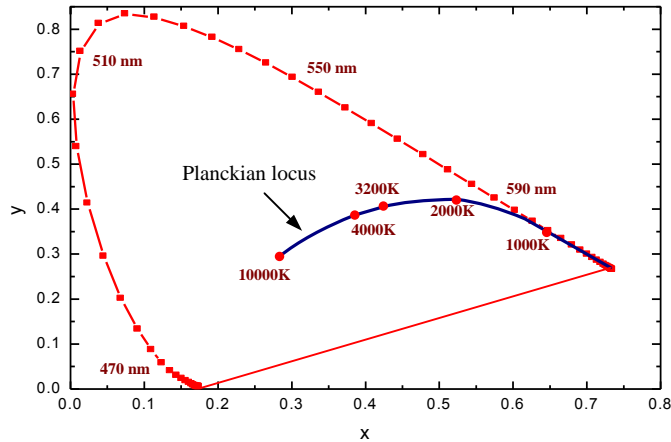
35

色溫 (correlated color temperature, CCT)

- 色溫的定義是依據黑體（例如鐵）加熱，當溫度升高至某一程度以上時，其發光顏色是深紅色，當溫度升高發光顏色逐漸改變為淺紅、橙黃、白、藍白、藍等各種光色。
- 倘若以色度座標系統（如CIE 1931）來觀察，其光色的色度座標變化會呈現出曲線的軌跡，而這色溫曲線一般稱為普朗克軌跡(planckian locus)，如圖所示。在實用上，做為照明光源的色度座標，都要求必須非常接近普朗克軌跡，否則人類眼睛會有不舒服的感覺。
- 一般而言，色溫在 3300K 以下時，光色有偏紅的現象，給人是一種溫暖的感覺，稱為暖色系。而色溫超過 6000K 時顏色會偏向藍光，給人一種清冷的感覺，稱為冷色系。
- 在不同的應用場所，使用照明光源會有不同的偏好，例如美國人一般在辦公室多喜歡使用 4200K 的白光照明光源，在家庭則常用低於3300K的光源。

36

普朗克軌跡



37

演色指數 (color rendering index, CRI)

- 演色性是照明光源能展現物體顏色真實程度的一種特性，演色性高的光源對物體顏色的表現較為逼真，被照物體對人類眼睛所呈現的顏色也比較接近其自然的原色。
- 演色性通常以演色指數做為指標。測量標準是把標準參考光源照射物體所呈現的顏色定義為 100，並把由測試光源照射物體所呈現顏色的真實程度，以百分比表示（如 75 即 75% 真實色彩），做為這測試光源的演色指數。

38

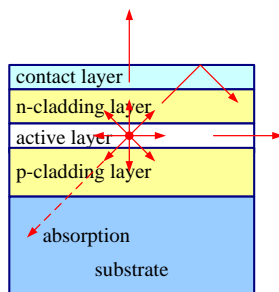
LED燈具的光學設計

- 在LED燈具的光學設計方面，有幾個術語：
 - A. 零次光學：將LED晶片內部的光儘可能地引出的LED晶片外部。
 - B. 一次光學：把LED封裝成LED組件時，要先進行一次光學設計，以解決LED的出光角度、光強、光通量大小、光強分佈、色溫的範圍與遠場圖案(far-field pattern)。
 - C. 二次光學：針對大功率LED照明來說，一般大功率LED都有一二次透鏡。二次光學就是將經過一次透鏡後的光再通過一個光學透鏡改變它的光學性能。

39

LED的光學

零次光學設計的目的是盡可能的取出LED晶片中發出的光。一次光學設計的目的是將LED晶片中發出的光引導到LED封裝體的正面。二次光學設計的目的則是讓整個燈具系統發出的光亮度和光形能滿足設計者的需求。



(a) 零次光學



(b) 一次光學



(c) 二次光學

40

光學模擬軟體設計

- LED燈具可採用光學模擬軟體來做光學設計，這一類的軟體包含ASAP、TracePro、和LightTools等，可進行一系列之幾何光學模擬，其可用應用的領域包含了，LED模擬、二次光學設計、車燈設計及模擬、LED背光源模擬及設計、等等。其主要內容如下：
 - 1.LED混光：進行LED混光設計與各項分析功能。
 - 2.集光模擬：針對路燈或背光源模組，進行LED之二次光學設計，進而設計LED之光型分佈。
 - 3.燈具設計應用：設計燈具模型、光學參數設定與各項分析功能。
 - 4.車燈設計：設計各種類型之反射罩及搭配車燈專利進行車燈設計及模擬。

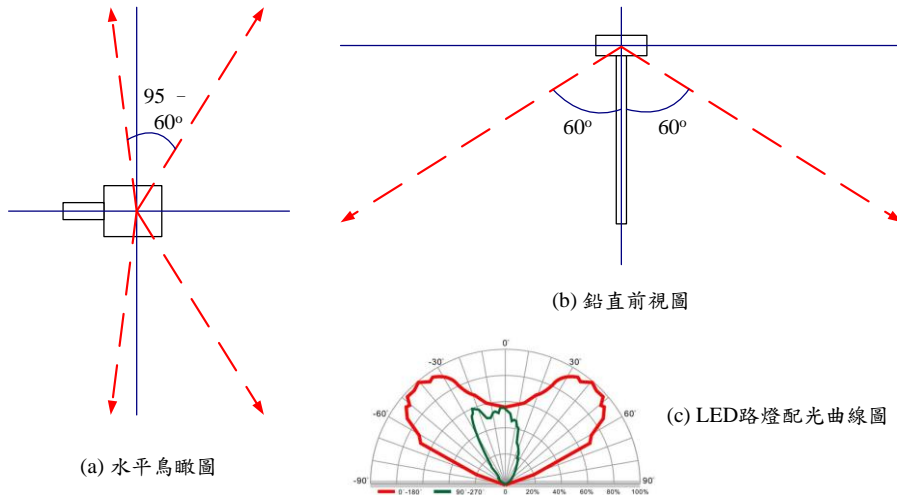
41

「發光二極體道路照明燈具」標準

- 2008年以後，LED燈具已逐漸應用於路燈。97年12月4日經濟部標準檢驗局公告CNS 15233「發光二極體道路照明燈具」標準，LED 路燈之發光效率須大於或等於50 lm/W。
- 其中包含LED 模組光學與電性量測標準，LED 熱阻量測標準，和LED 道路照明燈具標準。
- 在LED路燈的基本特性中：LED 路燈的功率因數必須大於或等於0.95，且其功率因數測試值須在標示值 95%以上，總電路功率需在廠商標示值 $\pm 10\%$ ，LED 光源之色溫不得高於7000K。
- LED路燈的配光特性之光度分佈須符合下圖之要求。

42

LED路燈配光曲線圖



43

LED燈具的散熱問題

- LED封裝的作用是将外引線連接到LED晶片的電極上，不但可以保護晶片防禦輻射，水氣，氧氣，以及外力破壞，而且提高發光效率的作用、提高元件之可靠度、改善/提升晶片性能、提供晶片散熱機構及設計各式封裝形式，提供不同之產品應用，所以LED封裝不僅僅只是完成輸出電信號，更重要的是保護管芯正常工作，輸出可見光的功能。可見LED封裝既有電參數，又有光參數的設計及技術要求，所以並不是一項簡單的工作。

44

發光二極體其後段封裝結構與製程

- 第一種是**LED燈**，其係將發光二極體晶片先行固定於具接腳之支架上，再打線及膠體封裝，其使用係將LED燈的接腳插設焊固於預設電路的電路基板上，完成其LED燈的光源結構及製程。
- 第二種是**表面粘貼式的LED (SMD LED)**，其係將晶片先行固定到細小基板上，再進行打線的動作，接著進行膠體封裝，最後再將該封裝後的LED焊設於印刷電路板上，完成SMD LED的光源結構及製程。
- 第三種是**覆晶式LED**，完成晶片製作後，將晶片覆設於覆晶轉接板上（凸塊制程），並利用金球、銀球、錫球等焊接製程以高週波方式焊接，然後做成LAMP或SMD進行膠體封裝，最後再將成品焊設於印刷電路板上，而完成其光源結構與製程。
- 第四種是**CHIP ON BOARD (COB)**，係將晶片固設於印刷電路板上，再進行打線的動作，接著進行膠體封裝，而完成其光源結構與製程。

45

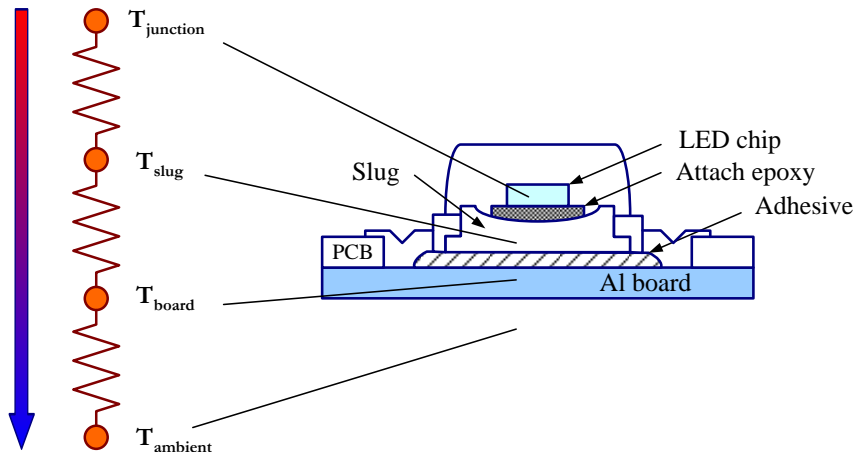
LED封裝形式

- 隨著白光LED發光效率的逐漸提高，將白光LED已應用在照明，但是很明顯地，單顆白光LED其驅動電源偏低，因此，以目前的封裝形式不太可能以單顆白光LED來達到照明所需要的流明數。針對於這個問題，目前主要的解決方法大致上可分為兩類
 - 一是較傳統的將多顆LED，利用組成光源模組來使用，而其中每顆LED所需要的驅動電源與一般所使用的相同（約為20~30 mA）；
 - 另一種方法則為目前幾個高亮度發光二極體製造商所使用的方法，即是使用所謂的大面積晶粒製程，此時不再使用傳統晶粒的大小，而將晶粒製程為更大的尺寸，並使用高驅動電流驅動這樣的發光元件（一般為150~350 mA，目前更可高至500 mA以上）。
- 但無論是使用何種方法，都會因為必須在極小的LED封裝中處理極高的溫度，若元件無法將高熱散去，除了各種封裝材料會因為彼此間膨脹係數的不同而有產品可靠度的問題，晶粒的發光效率更會隨著溫度的上升而有明顯地下降，並造成元件壽命明顯縮短。因此如何散去元件中的高熱，成為目前LED封裝技術的重要課題。散熱除了使用良好導熱材料之外，還需考慮到面積、空氣力學及環境。
- 熱傳的方法有傳導、對流和輻射三種方法

46

LED的散熱示意圖

LED的熱係在p/n接面處的發光區產生，然後傳導到散熱塊和金屬板，最後藉由對流和輻射散熱。



47

LED的散熱材料

- 對於LED 而言，最重要的便是輸出的光通量及光場分佈，所以LED 其中一端必定不能遮光，而需使用高透明效果的Epoxy 材料包覆。但目前的Epoxy 幾乎都為不導熱材料，因此對於目前的LED 封裝技術而言，其主要的散熱均是利用其LED 晶粒下方的金屬腳座來散去元件所發出的熱能。
- 就目前的趨勢而言，金屬腳座材料的選擇主要是以熱傳導係數高的材料為組成，如鋁、銅甚至陶瓷材料等，但這些材料與晶粒間的熱膨脹係數差異甚大，若讓其直接接觸，很可能因為在溫度升高時材料間產生的應力而造成可靠度的問題，所以一般都會在材料間加上兼具傳導係數及膨脹係數的中間材料作為間隔。
- 採用上述的觀念，松下電器於2003 年將多顆發光二極體製成在金屬材料與金屬系複合材料所製成的多層基板模組上以形成光源模組，利用光源基板的高導熱效果，使光源的輸出在長時間使用下仍能維持穩定。
- 同樣利用高散熱基板的想法，Lumileds 將其應用在大面積晶粒的產品上。Lumileds 基板所使用的材料為具有高傳導係數的銅材，再將其連接至特製之金屬電路板，兼顧電路導通及增加熱傳出之效果。

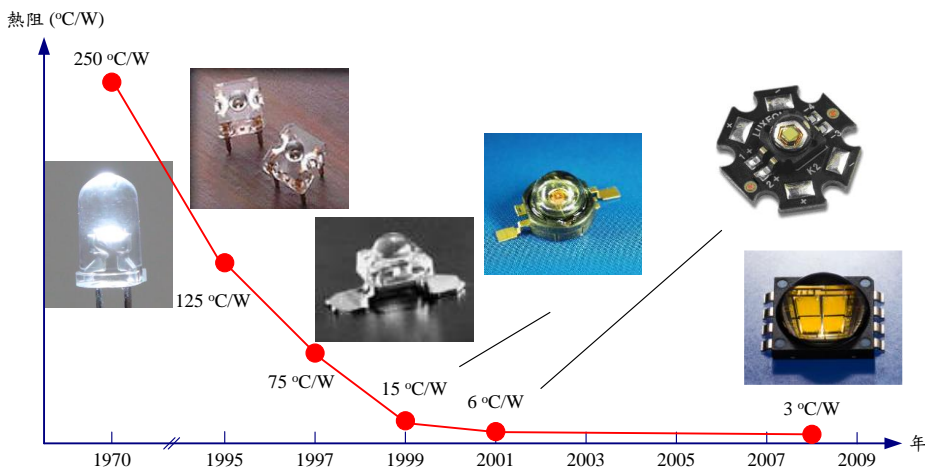
48

一些物質的熱傳導係數

物質	k(W/mK)	物質	k(W/mK)
黃銅(Brass)	109.0	SiC	490
銅(Copper)	385.0	Si	130
水銀(Mercury)	8.3	空氣(Air)	0.024
鋁(Aluminum)	205.0	氧(Oxygen)	0.023
不銹鋼 (Stainless Steel)	50.2	氫(Hydrogen)	0.14
銀(Silver)	406.0	GaN	130
Sapphire	46	AlN	285

49

各種LED封裝體熱阻的演進



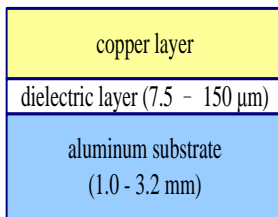
50

MCPCB、IMS PCB和DBC

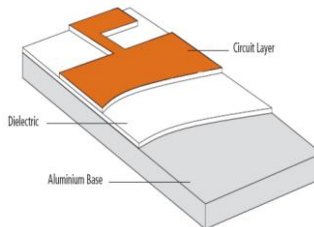
- 業者提出使用金屬核心的印刷電路板（Metal Core PCB, MCPCB），將原有的印刷電路板附貼在另外一種熱傳導效果更好的金屬上(如：鋁、銅)，以此來強化散熱效果，MCPCB的熱傳導率就高於傳統FR4 PCB（熱傳導率僅0.36 W/mK），達1 ~ 2.2 W/m.K。不過，MCPCB也有些限制，在電路系統運作時不能超過140 °C，這個主要是來自介電層（Dielectric Layer，也稱Insulated Layer，絕緣層）的特性限制，此外在製造過程中也不得超過250 ~ 300 °C。
- 業者提出IMS PCB (Insulated Metal Substrate PCB，絕緣金屬基板)，將高分子絕緣層及銅箔電路以環氧方式直接與鋁、銅板接合，然後再將LED配置在絕緣基板上，此絕緣基板的熱傳導率約1.1 ~ 2 W/mK。
- 有人提出用陶瓷基板（ceramic Substrate），或者是直接銅接合基板（Direct Copper Bonded Substrate, DCB基板）。此種基板的熱傳導率約24 ~ 170 W/mK。其允許製程溫度、運作溫度達800 °C以上。
- 最近IRC公司提出一種名為Anotherm的陽極氧化鋁基板，用以當作LED燈的散熱基板。鋁基板在陽極處理之後會在其表面形成一層厚度約數微米的絕緣氧化鋁薄膜，此種陽極氧化鋁基板的熱阻約只有0.02 °C /W。

51

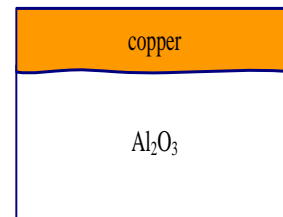
MCPCB、IMS PCB和DBC的結構圖



(a) MCPCB



(b) IMS PCB

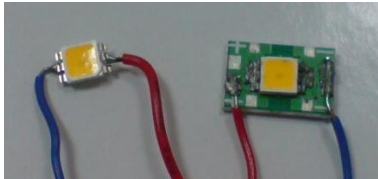


(c) DCB 基板

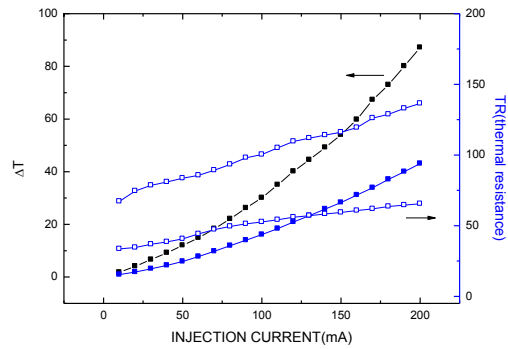
52

LED接面溫度

LED燈在不同注入電流下的溫升和熱阻值



(a)



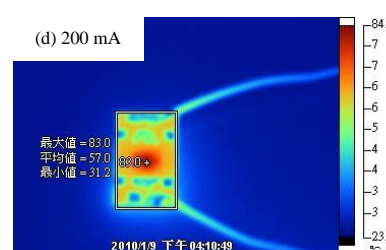
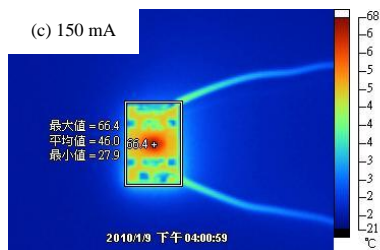
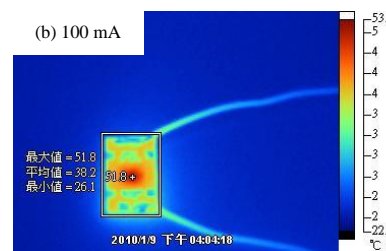
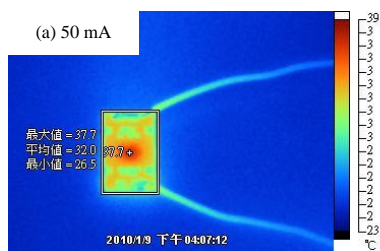
(b)

在50 mA的注入電流下，5050 LED燈有/無焊接MCPCB的溫升和熱阻值分別為6和12 °C，及40和80 °C/W。顯示MCPCB對LED的散熱非常有幫助。

53

LED接面溫度

LED燈在不同注入電流下的熱影像圖



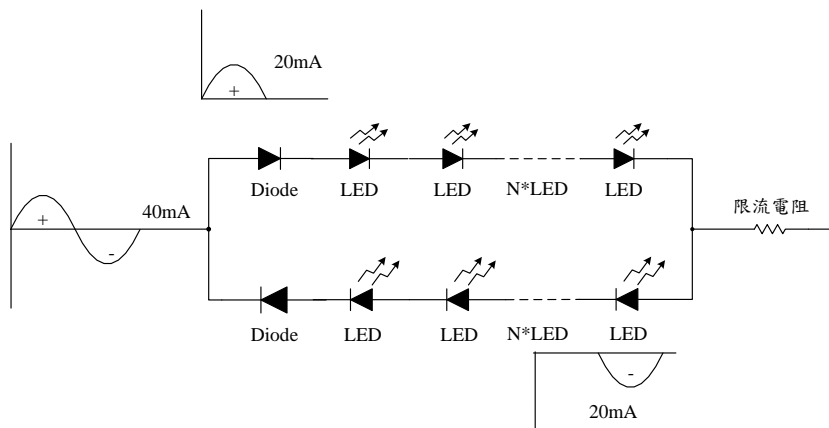
54

LED燈具的驅動技術

- 為了讓LED燈具的亮度或照度可以到達照明的用途，LED燈具一般都是使用LED陣列。LED陣列到底是串聯較佳呢？還是並聯較佳呢？目前尚未有一個定論。串聯的優點為電流相同，亮度接近；而缺點則是一顆LED死掉，整串都無法工作。至於並聯的優點為一顆LED死掉，其他LED仍然可以工作；而缺點則是每一顆LED的注入電流都不同，所以亮度會不同。
- 另一方面，根據二極體方程式或I-V特性曲線，LED的偏壓發生微量變化時，其注入電流會產生巨大改變，所以為了讓LED燈有一個穩定的操作環境，LED應以定電流驅動為佳。例如，對於LCD背光源模組的應用，LED燈係採用直流(DC)驅動的方式。
- 2008年10月，工研院(IRT)推出AC-LED的概念，並組成應用研發聯盟。以交流(AC)方式驅動LED燈主要是針對照明用LED燈具之電源的取得。

55

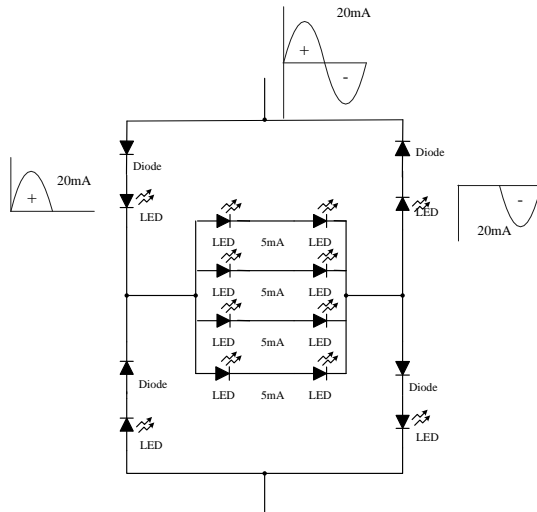
LED燈具之驅動電路-A



LED直接以正反向串接組成，外加限流電阻用以降壓達到適合的驅動電流。優點為簡單、直接。缺點為效率低。

56

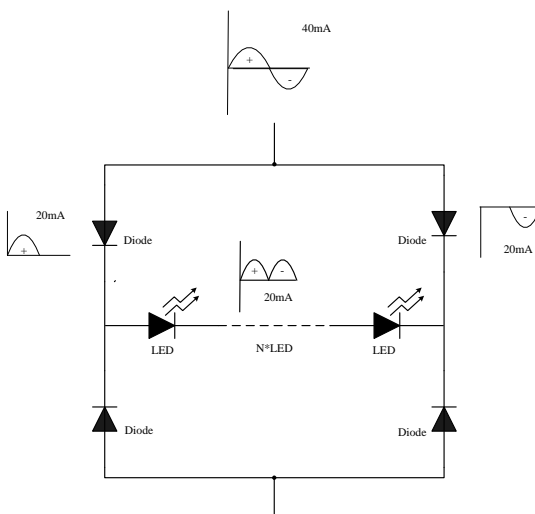
LED燈具之驅動電路-B



LED以複合橋式串接組成，外加限流電阻用以降壓達到適合的驅動電流。優點為效率較高於種類A，恆亮LED晶片數增加以及電流差異亦增加發光效率。缺點為以發光效率而言，效率仍比DC驅動LED低20% ~ 40%。

57

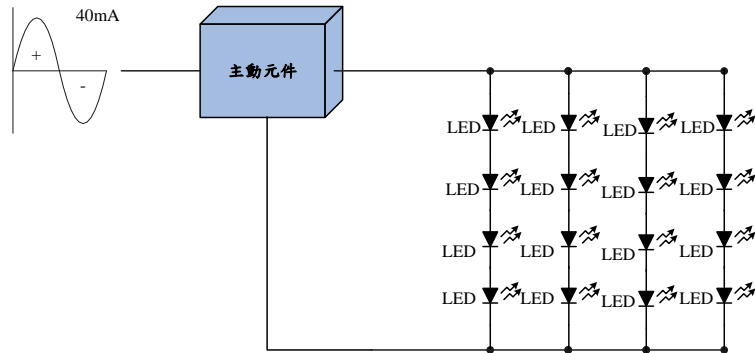
LED燈具之驅動電路-C



LED以直接串接組成，外加橋整以及電阻用以降壓達到適合的驅動電流。優點為效率較高於種類B，全維恆亮LED晶片和減少閃爍，增加發光效率。缺點為以發光效率而言，效率仍比DC驅動LED低15% ~ 25%，電路成本開始增加，屬半個DC驅動LED。

58

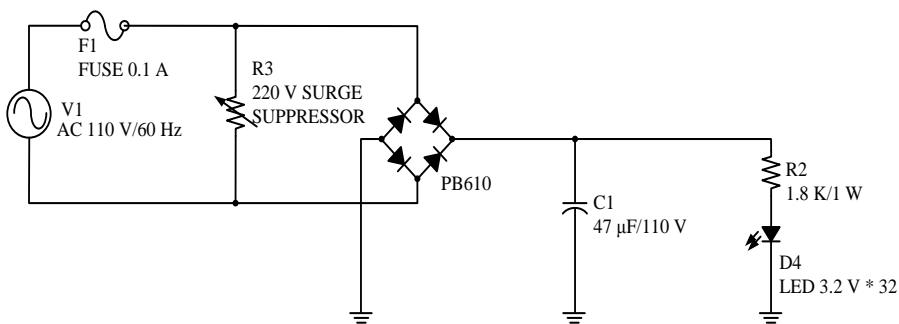
LED燈具之驅動電路-D



LED以複合串並方式組成，外加主動元件，達到降壓和定電流的輸出。優點為體積小、成本低，LED不會因短路或者正常電壓波動下，或因溫升造成LED電流改變、明亮不均。缺點為仍有一定程度的能量消耗，輸出控制等設計品質需經得起考驗，90%已是接近DC驅動LED。

59

LED燈具之驅動電路-E



常見之LED燈具電路。其中的橋式電路係用以整流，電容器可以減少漣波，電阻器係限流電阻，用以保護LED。

60

參考文獻

- [1] A. A. Bergh, P. J. Dean, Light-emitting diodes, Oxford University Press, London, 1976.
- [2] <http://www.cie.co.at>
- [3] E. Fred Schubert, Light-Emitting Diodes, Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
- [4] <http://web1.nsc.gov.tw/ctpd.aspx?xItem=10345&ctNode=76&mp=8>
- [5] CNS 15233 「發光二極體道路照明燈具」標準
- [6] <http://www.precel.com>