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hv < E1- E2，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hv > E1- E2，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E1- E2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：

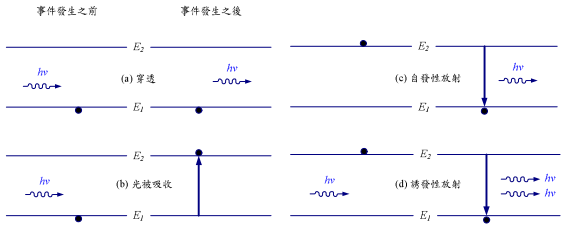
$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{h\nu} = \frac{1240}{E_2 - E_1} \quad (nm) \quad (1)$$

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)，hν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hv = E1- E2，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E1- E2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

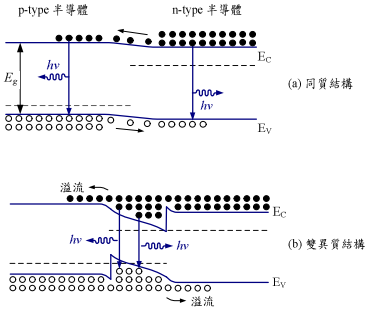
發光二極體係一種兩端點的半導體元件。第2(a)圖係最簡單的p-n同質結構(homostructure)式的發光二極體，即p側和n側都是由相同的半導體材料構成。第2(b)圖係目前常用的雙異質結構(double heterostructure, DH結構)式的發光二極體，即p側和n側之間插入一個能隙較小的半導體材料，此中間層稱為活性層(active layer)，兩側的半導體材料稱為侷限層(confinement layer)或披覆層(cladding layer)，主要目的是希望可以將注入的載子限制在活性層內，以利於發光。

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。

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：

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

和

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

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)，為約化蒲朗克常數(Planck's constant)。

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：

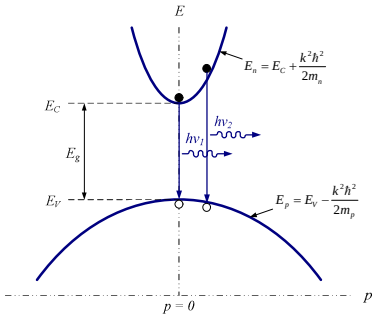
$$h\nu = E_n - E_p \cong E_g \qquad (4)$$

若熱能遠小於能隙，即$kT << Eg$，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：

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

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：

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

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)：

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

其中m_r為約化質量，可以表示為：

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

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：

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

在允許的能帶中，載子的分佈係根據波茲曼分佈，即

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

因此，發光強度I(E)正比於(9)式和(10)式的乘積：

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

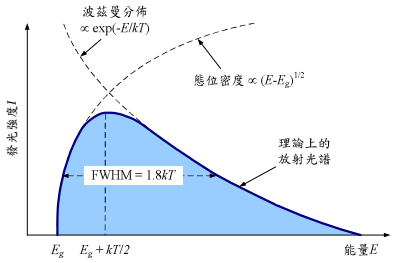
而發光強度的最大值發生在：

$$E = E_g + \frac{1}{2}kT \qquad (12)$$

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：

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

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：

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

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，Pe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θc。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%。

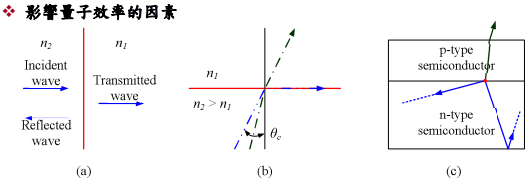
(3) 內部吸收

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

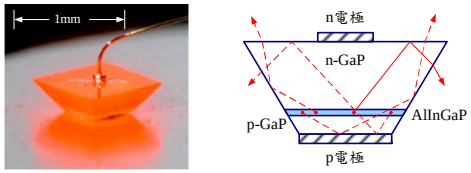
Absorption within the semiconductor

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：

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

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：

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

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：

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

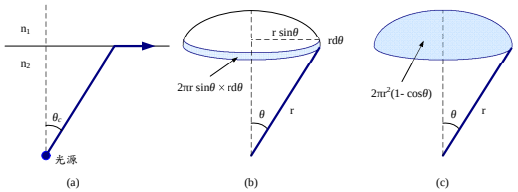
對於具有高折射率之半導體材料而言，臨界角很小，所以可以將(23)式的餘弦項展開成冪級數，於是(23)式可以改寫成：

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

4. LED原理

2.發光效率

❖ **光射出錐(light escape cone)**



(a) (b) (c)

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：

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

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：

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

其中Rs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：

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

4. LED原理

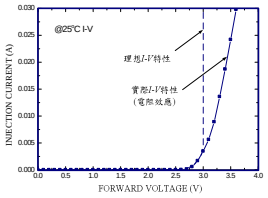
將(27)式對電流I作一階微分，得：

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

或是

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

於是，將IdV/dI對I作圖，其斜率為串接電阻Rs。



第8圖 串接電阻效應。

4. LED原理

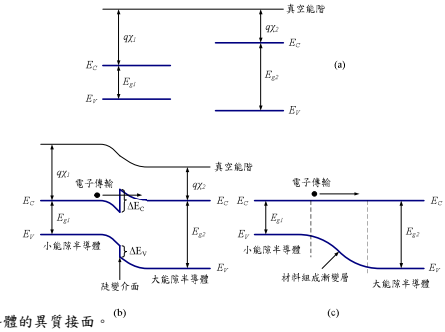
3.電流-電壓特性的修正

❖ 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。

4. LED原理



第9圖 兩個n型半導體的異質接面。

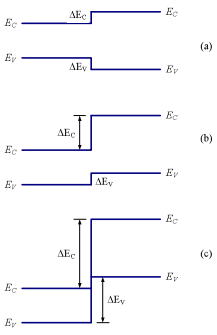
4. LED原理

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：

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

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

4. LED原理

3.電流-電壓特性的修正

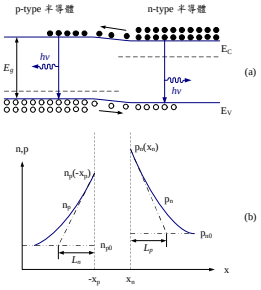
❖ 載子的侷限與分佈

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：

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

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

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，$Ln = (7.8cm2/sx10\text{-}8s)1/2 \approx 2.79\mu m$。因此，p-n接面發光二極體的發光區係兩側的擴散長度。



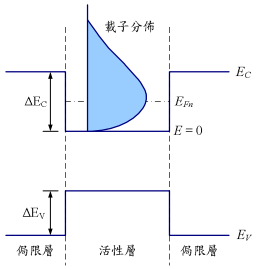
第11圖 p-n接面發光二極體在順向偏壓時，(a)電子和電洞注入，然後在發光區發光的情形。(b)少數載子的分佈情形。

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(homostructure)，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。



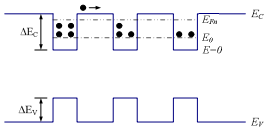
第12圖 載子在活性層中之分佈。

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：

$$n_{escape} = \int_{E_b}^{\infty} N(E)F(E)dE \qquad (34)$$

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

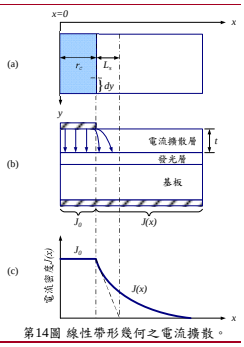
4. 電流擴散理論

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：

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



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：

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

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($x = rc+Ls$)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：

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

電流擴散層之縱向電流為：

$$I = J_0 L_s dy \qquad (38)$$

藉由歐姆定律，得：

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

所以，可以解出電流擴散層的厚度t：

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

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

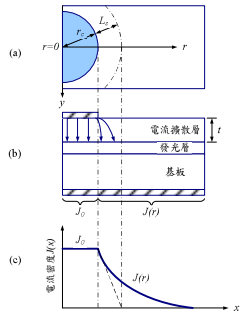
有時發光二極體的電極是作成圓形的，因此本節要藉由Thompson和上節的結果，推導圓形電極的理論。

如第15圖所示，電流擴散層的橫向電阻為：

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

電流擴散層之縱向電流為：

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



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：

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

所以，可以解出電流擴散層的厚度t：

$$t = \rho L_s\left(r_c+\frac{L_s}{2}\right)\ln\left(1+\frac{L_s}{r_c}\right)\left(J_0\frac{q}{nkT}\right) \qquad (44)$$

注意，當時，(44)式會等於(40)式。

4. LED原理

4. 電流擴散理論

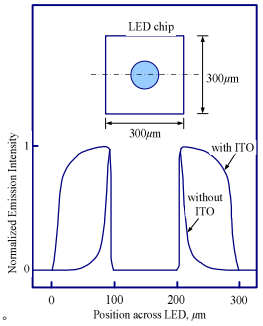
❖ 電流擴散層對亮度的影響

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15μm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 cm^2/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。