

近代光電技術專題

光電材料 ——

LED 之專題報告

指導教授：劉威志、蔡志申教授

組員：

物97甲 493411052 賴盈樺

物97乙 493412381 廖盈翔

Outline

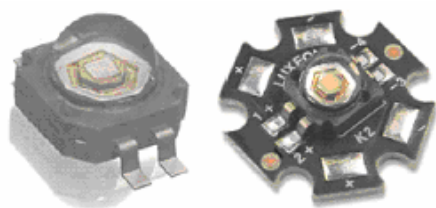
1. LED 發展
2. LED 的發光原理
3. LED 的元件結構
4. LED 的材料特性
5. LED 的製作過程
6. LED 的組裝過程
7. LED 的基本特性
8. 白光 LED 的發光機制 【附註】照明用語
9. LED 之應用
10. 產業分析
11. 台灣 LED 產業發展概況
12. 產業特性
13. 關鍵成功因素
14. LED 整體產業 SWOT 分析
15. 產業發展瓶頸
16. 結論
17. 參考資料

➤ LED 發展

自古以來，人類文明的各項活動即十分依賴著所使用光源品質而改變，白天主要依靠太陽光，夜間或室內活動則由火炬、油燈到近代的電燈、日光燈。光的產業及使用愈來愈便捷、安全，亮度更充足，照明的品質更舒適、穩定。進入21世紀後，鑑於人們對能源的需求逐年增長，而開發廉價的能源愈來愈難，節約用電成為各國主要的努力方向之一。先進國家的照明用電約佔總發電量的20%左右，若要節約照明用電，同時維持照明品質，提昇光源的發光效率為當務之急。然而，電燈是愛迪生於1879年發明，其他傳統照明用光源的發明距今也都有50年以上的歷史，其技術之成長及發光效率的改善，至今大都已停滯或趨緩。因此，新興的半導體光源遂受到美日等先進國家的注意和期待。

1962年開始出現的LED是一種固態半導體元件，並早在1968年LED商品問世，其間許多顏色LED皆陸續被開發出來，但直到1993年日本日亞公司成功開發出較高效率的藍光LED之後，乃使全彩化LED產品得以實現。1995年日本日亞公司(Nichia)公司以雙異質結構(double heterostructure)的InGaN族，成功的將藍光LED的亮度推昇至一個燭光以上。緊接著在1996年初發表室溫操作之藍光LED，引起學術界及工業界的風潮，對光電產業具有不可輕忽的影響。在InGaN系的藍色及綠色LED開發完成後，白光LED即成為業界追求的對象。從1996年日亞化學量產白光LED開始，全球LED業者紛紛將研發的重點轉移至白光LED。

Lumileds在1998年開始釋出的第一個商業化之高亮度LED，在輸入功率1Watt下，典型的光強度約為25 lm，在之後陸續釋出之3W及5W之單體LED，其發光強度可達80及120流明，該公司為因應不同的應用型式與場合，產出不同的模組類型，包括方型、圓型、長條型、可繞式等，其亦針對單體LED之照明需求，產出個別單體所用之聚焦鏡片。Lumileds在2006年推出Luxeon K2系列如圖(1)所示，其發光效率為一瓦達60流明與三瓦120流明。



圖(1) Lumileds 所產 k2 高亮度白光 LED 外觀

Osram在2005年推出Hyper TOP白光LED發光效率22lm/W，2006年推出TOP LED發光效率50lm/W。

不同於一般白熾燈泡，發光二極體係屬於冷發光，耗電量僅一般白熾燈泡之1/8及日光燈之1/2、元件壽命長、無須暖燈時間、以及反應速度快等優點，再加

註解 [u1]: 許榮宗、韓偉國、陳秋伶，“白光LED 燈板封裝設計及製作”，照明學刊 第十二卷第五期，(2002)。

註解 [u2]: N. Holonyak Jr. and S. F. Bevacqua, "Coherent (Visible) Light Emission from Ga(As_{1-x}P_x) Junctions," Appl. Phys. Lett., vol.1, Issue 4, (1962)

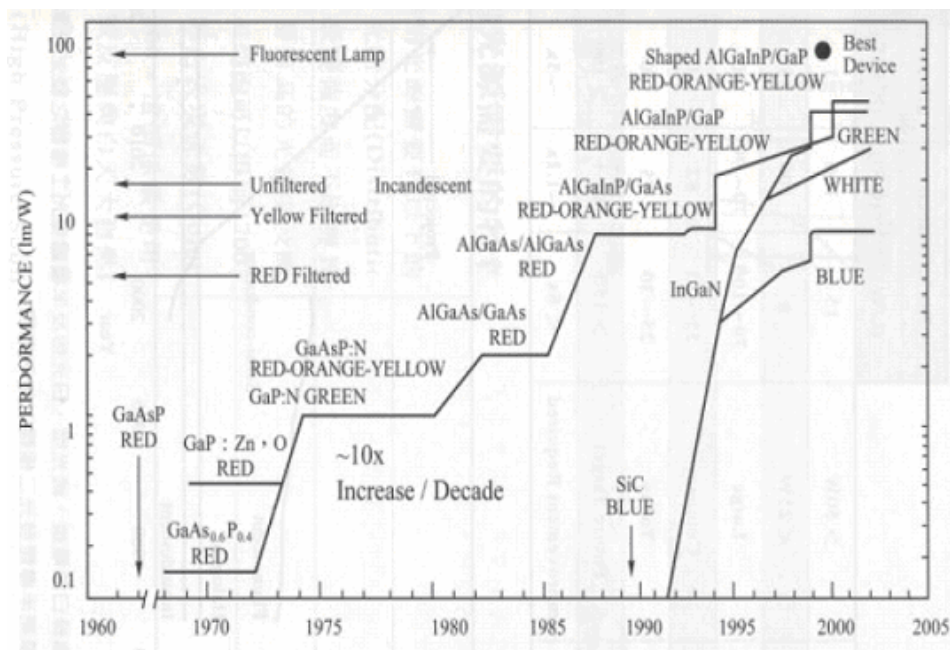
註解 [u3]: 陳興，“白光發光二極體簡介”，工業材料，162期，民國89年6月。

註解 [u4]: Philips Lumileds Luxeon Company, Technical Datasheet DS51,DS46,DS40

註解 [u5]: Osram Company, Technical Datasheet LW T67C, LW T6SG

上體積小、耐震動、適合量產，容易配合應用上之需求製成極小或陣列式的器件等優點，在人類的生活當中扮演著如此重要的角色，能解決許多過去白熾燈泡所難以克服之問題，取代傳統光源，因此我們想藉此進一步深入瞭解LED的各項特性及應用。

圖(2)為可見光發光史。

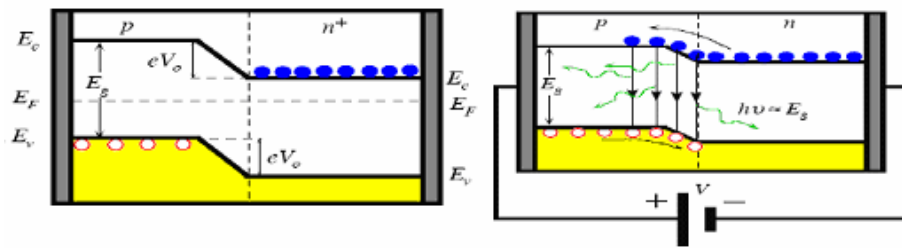


圖(2)可見光 LED 發展史

註解 [u6]: F. M. Steranka, J. Bhat, D Collins and L. Cook et al., "High Power LED-Technology Status and Market Applications," Phys. Stat. Sol. (a), vol. 194, Issue.2, (2002)

➤ LED 的發光原理

發光二極體(Light Emitting Diode, LED)的發光原理為，當P型半導體與N型半導體形成一個接面時，其能帶結構並未施加任何電壓(偏壓)，此時P型半導體的費米能階與N型半導體的費米能階相互對齊，並在接面處形成一電場，即存在一電位能，這會使導電帶和價電帶彎曲。P、N半導體由導電帶的高度落差為能障，來阻止電子的流動。當接合的兩層半導體屬同一材質時，此種接面稱為同質接面；若兩者分屬不同材質，則稱為異質接面。將正電壓接到P型半導體，負電壓接到N型半導體，稱之為順向偏壓。此時負電壓端的所有能階相對於正電壓，皆會向上提升，因而破壞原先保持的平衡狀態，使得P型半導體的費米能階與N型半導體的費米能階不再對齊，且電子在導電帶中向左流動所遇到的能障也降低，因而非常容易流通，形成電路導通狀態，電流也因而急速上升。在適當的順向偏壓下，電子、電洞分別注入N、P兩端後，便會在P-N接面區域結合而發光，即電子由高能量狀態掉回低能量狀態與電洞結合，將能量以光的形式釋放出來。外部會由N側不斷的注入電子，並由P側注入電洞，使得電子、電洞結合而發光的動作持續進行，達到發光的目的。



圖(3) (a) 無外加偏壓二極體能帶圖 (b) 順向偏壓二極體能帶圖

電子電洞注入後，在 P-N 接面上結合，且注入電流與外加電壓之關係為：

$$i = i_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{\beta kT}\right) - 1 \right]$$

其中 i_0 、 β 為與材料有關之常數， V 為 P-N 順向偏壓的值，

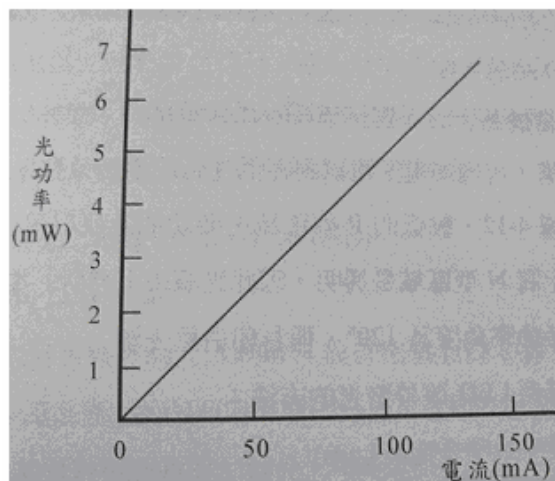
$$k \text{ 為波茲曼常數，且發光波長為： } \lambda_g = \frac{hc}{E_g} = \frac{1240(\text{nm})}{\Delta E_g(\text{eV})}$$

LED 產生的光能與順向驅動電流的大小成正比，如圖(4)為一個典型的能量—電流曲線圖，其線性關係可由下列論證中說明：電流 i 是每秒注入電荷的量，則每秒鐘的電荷數將是 $N=i/e$ ，其中 e 是每個電子的電荷量大小，假設 η 是這些

電荷中會重結合並產生光子的比率，則光能輸出為： $P = \eta N W_g = \frac{\eta W_g}{e} i$ ，此證

明光能量與電流的線性關係。在此結果中，能量間隙的單位是焦耳，若用電子伏特表示，則此公式可簡化成 $P = \eta i W_g$ 。

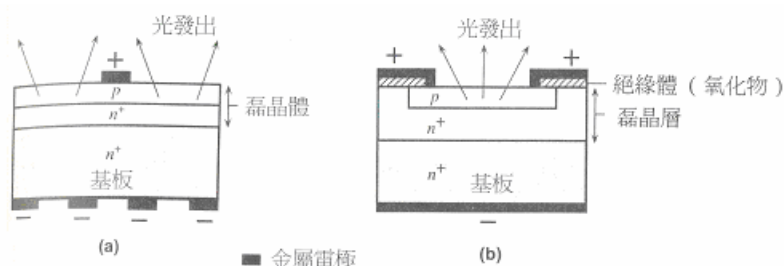
註解 [u7]: 廖顯奎，“當代光電工程”，滄海書局，民國 95 年 11 月。



圖(4) LED 能量—電流關係圖

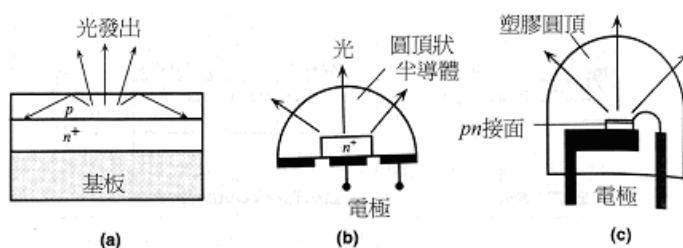
➤ LED 的元件結構

最簡單的形式，LED 典型地由磊晶成長摻雜半導體層在一合適的基板上(例如 GaAs 或 GaP)構成，如圖(5)(a)。這種平面型 pn 接面，由先磊晶成長 n^+ 層，然後為 p 層構成，基板實質上用來作為 pn 接面的機械支承，並可以是不同的材料，p 側位於光發出的表面，因此作成狹窄(幾個微米)以允許光子脫離而沒有被再吸收；為了確定主要的複合發生於 p 側，n 側需要重摻雜(n^+)，那些往 n 側發光的光子，會被吸收或從基板界面反射回到表面，取決於基板厚度及 LED 的確切結構。使用分段背部電極，如圖(5)(a)，將促進半導體空間界面的反射，也可能經由擴散受體到磊晶 n^+ 層以形成 p 側，這是擴散接面平面型 LED，如圖(5)(b)。



圖(5) 圖示說明典型平面表面發射 LED 元件，(a) p 層磊晶成長於 n^+ 基板上；(b) 首先磊晶成長 n^+ ，然後藉由受體擴散到磊晶層以形成 p 區。

圖(5)(a)(b)兩者顯示以平面 pn 接面為根據的簡單 LED 結構。然而並非所有到達半導體—空氣界面的光能逃脫出來，這是因為內部全反射(TIR)，這些射線具有入射角大於臨界角而被反射，如圖(6)(a)，對 GaAs—空氣界面，例如，臨界角只為 16 度，其意味較多的光遭到 TIR，如圖(6)(b)。然而這種結構的主要缺點為增加製程困難度，在製造這樣圓頂狀的 LED 及增加相關的花費。有一不昂貴且慣用程序可減少 TIR，就是將半導體接面封入一透明的塑膠圓頂中，其折射率高於空氣；而另外，也有一圓頂狀的表面在 pn 接面的一側上，如圖(6)(c)，很多個別的 LED 被焊於相似形式的塑膠體中。



圖(6) (a) 一些光遭到全反射並無法逃脫；(b) 內部反射能被減少，可藉由將半導體塑造成圓頂狀，所以半導體 - 空氣表面的入射角會小於臨界角，以收集更多的光；(c) 有一較經濟的方法，可允許較多的光從 LED 逃脫，那是將它封入一透明的塑膠圓頂中。

註解 [u8]: 黃俊達、陳金嘉、楊奇達、楊國輝、雷伯勳(原著: K. O. Kasap), “光電半導體元件”, 台灣培生教育出版, 2006 年 1 月。

註解 [u9]: 黃俊達、陳金嘉、楊奇達、楊國輝、雷伯勳(原著: K. O. Kasap), “光電半導體元件”, 台灣培生教育出版, 2006 年 1 月。

➤ LED 的材料特性

LED 是 P-N 接面發光元件，發光顏色取決於單晶材料的禁帶寬度。要獲得各種顏色的 LED，並有高效率發光，LED 材料應具備三個條件：

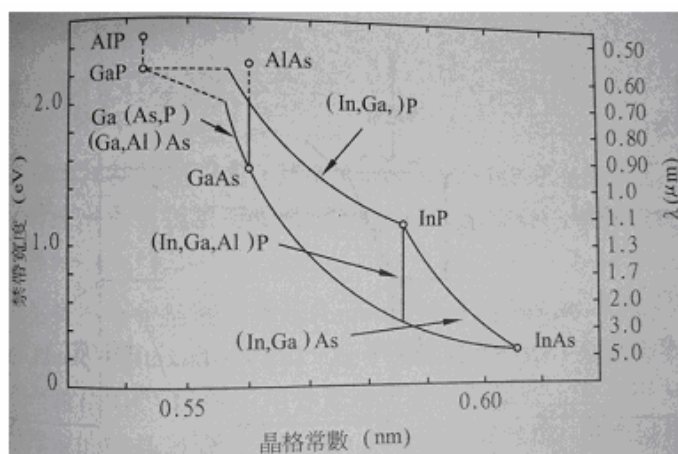
註解 [u10]: 詹國禎、朱建國, “電子與光電子材料”, 新文京開發出版, 民國 91 年 12 月。

一、材料的導電性易控制：

LED 元件結構核心是 P-N 接面。要製作 P-N 接面，需要高純度單晶材料中摻入極少量施主或受主雜質，得到 N 型材料或 P 型材料，且這些材料要有良好的導電性。GaAs、GaP 等 III-V 族材料具有這種性能。

二、對發射光的透明性好：

半導體和絕緣體材料具有吸收端。當光能量低於吸收端時，光可以透過；當光能量高於吸收端時，光被吸收，不能透過。材料的光吸收端就是該材料的禁帶寬度。下圖為 III-V 族化合物半導體材料的禁帶寬度和發光波長。圖(7)表明，可利用三元系或四元系混晶方法得到任意禁帶寬度，因而，可得到任意波長的發光。

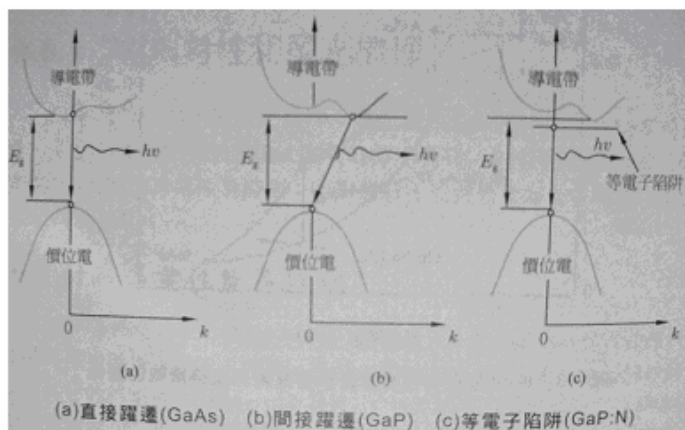


圖(7) III-V 族化合物半導體禁帶寬度與晶格常數的關係

三、發光躍遷機率高：

LED 注入發光是由 P 區少數載子—電子和 N 區少數載子—電洞分別與 P 區多數載子—電洞和 N 區多數載子—電子相結合而發光，亦即一對電子和電洞結合輻射一個光子。從動量守恆角度，電子和電洞結合前後動量要守恆，光子本身動量很少，所以要求電子和電洞動量之和接近零。滿足這種條件時，光吸收或光輻射過程的躍遷機率高。這過程稱為直接躍遷(direct transition)。不滿足上述動量守恆條件時，發光前後能量差送到晶格，增加晶格振動能。這種發光躍遷過程稱為間接躍遷(indirect transition)，且躍遷機率低於直接躍遷。兩種躍遷機率完全決定於能帶結構。由圖(8)(a)可知，直接躍遷的價帶頂和導帶底處在同一位置。圖(8)(b)表示間接躍遷，導帶底和價帶頂不處在同一位置，結果發光效率低。為了改善發

光效率，在 GaP 中摻入 N 原子，形成等電子陷阱，圖(8)(c)。等電子陷阱束縛激子，通過激子發光提高了發光效率，發光效率仍低於直接躍遷，但比間接躍遷高。



圖(8) 能帶結構模型

LED 基底材料是單晶體，其中 GaAs、GaP、InP 單晶體已工業生產，一般採用外延生長法。外延生長技術包括液相外延(Liquid Phase Epitaxial, LPE)、氣相外延(Vapor Phase Epitaxial, VPE)、分子束外延(MBE)、金屬有機化合物化學氣相沉積(MOCVD)等。用外延法可在單晶基底上生長不同材料、不同薄膜厚度的單晶薄膜層。因此，外延製程是 LED 器件製作的關鍵製程。

用於發光元件之材料，主要在元素週期表中，有將 III 族與 V 族元素加以化合物所成的化合物半導體，以下介紹幾個較常使用之 LED 材料。

1. GaAs :

這是在 III-V 族化合物半導體中，最受到研究，性質最被理解，且又能得到最好的結晶者，現在以作為紅外線發光元件材料而受到使用。

2. GaP :

這是屬於間接遷移型半導體，但因它可以低電流、高效率發光，且發光顏色能由紅色以至黃綠色，故已成為現今 LED 的主流材料。

3. GaAsP :

$GaAs_{1-x}P_x$ (x 是用混晶化，來表示材料中 As 與 P 之比率，於此雙方用 1) 是 GaAs 和 GaP 的混晶，其利用氣相外延式長晶法，能很容易地量產出良質的結晶。其間發光顏色有黃色和橘色。

4. GaAlAs :

此種材料近年來用於高亮度紅色方面甚受到重視。它以 GaAs 和 AlAs 間的混合，也可用於半導體雷射。

註解 [u11]: 詹國禎、朱建國, “電子與光電子材料”, 新文京開發出版, 民國 91 年 12 月。

註解 [u12]: 許書務、游金湖, “光電元件應用技術(增訂版)”, 全華科技圖書, 民國 90 年 2 月。

有關各種晶粒材料和發光顏色的不同，如表一。

註解 [u13]: 詹國禎、朱建國，“電子與光電子材料”，新文京開發出版，民國 91 年 12 月。

表一

晶片材料		接合成形法	發光色	波長 (nm)	外部量子效率		流明效率		亮度 (mcd)
發光層	基板				產品(%)	最高(%)	產品 (lm/W)	最高 (lm/W)	
GaP(Zn,O)	GaP	LPE	紅	700	~4	15	~0.8	3.0	30
Ga _{0.65} Al _{0.35} As	GaAs	LPE(SH)	紅	660	~3	7	~1.2	2.1	500
Ga _{0.65} Al _{0.35} As	GaAlAs	LPE(DH)	紅	660	~15	21	~6.6	1.2	3000
GaAs _{0.6} P _{0.4}	GaAs	VPE+擴散	紅	660	0.1	0.15	0.04	0.07	20
GaAs _{0.45} P _{0.55} (N)	GaP	VPE+擴散	紅	650	0.2	0.5	0.15	0.35	100
GaAs _{0.35} P _{0.65} (N)	GaP	VPE+擴散	橙	630	0.3	0.65	0.6	1.2	300
InGaAlP	GaAs	MOCVD(DH)	橙	620	4.2	—	—	—	3000
GaAs _{0.25} P _{0.75} (N)	GaP	VPE+擴散	橙	610	0.3	0.60	1.0	2.0	300
GaAs _{0.15} P _{0.85} (N)	GaP	VPE+擴散	黃	590	0.12	0.25	0.5	1.1	200
InGaAlP	GaAs	MOCVD(DH)	黃	590	—	1.2	—	—	2500
GaAs _{0.1} P _{0.9} (N)	GaP	VPE+擴散	黃	583	0.10	6.20	0.55	1.1	200
GaP(N)	GaP	LPE	黃綠	565	0.3	0.7	1.8	4.3	500
GaP	GaP	LPE	黃綠	560	0.12	0.3	0.96	1.6	250
GaP	GaP	LPE	純綠	555	0.08	0.2	0.54	1.36	200
SiC(N,Al)	SiC	LPE	藍	470	0.02	0.05	—	—	30

➤ LED 的製作過程

發光二極體之製作過程涵蓋：上游的晶圓(wafer)製作與磊晶成長(epitaxy)，中游的擴散製程(diffusion)、金屬蒸鍍與晶粒製作及下游的產品封裝與產品應用等，表二為其製程與應用之流程圖。

註解 [u14]: 劉如意、王健源，“白光發光二極體製作技術-21世紀人類的新曙光”，全華科技圖書，民國 90 年 10 月。

表二

上游製程	一、原料：含 Ga、As、P 等 III-V 族元素為起始物	
	二、單晶棒：形成等 GaAs、GaP 材料	
	三、單晶片：將單晶棒切片而得，作為磊晶成長用的基板	
	四、磊晶片：在單晶基板上成長多層不同厚度之多元單晶薄膜，如：GaAs、GaP、GaAsP、AlGaAs、AlGaInP 等二元、三元或四元磊晶片。	
中游製程	一、金屬蒸鍍	此步驟涉及之技術包含：光罩、乾式或溼式蝕刻、真空蒸鍍與晶粒切割。此步驟之成品係依元件結構之需求，先在磊晶片上蝕刻並製作電極，在切割成為小的晶粒。
	二、光罩刻蝕	
	三、熱處理	
	四、P、N 極電極製作	
	五、切割及崩裂	

下游製程	封裝	一、晶粒黏著	主要使用材料：晶粒、支架、環氧樹脂、驅動電路，此步驟之成品為燈泡型(lamp)、數字(digital)或字元型、點矩陣型(dot matrix)、集束型或表面黏著型(surface mount)或其它模組等。
		二、打線	
		三、樹脂封裝	
		四、剪腳	
	成品加工與應用	一、顯示應用：家電或汽車儀表顯示板、第三煞車燈、大型資訊看板或交通號誌燈等。 二、光源應用：掃描器讀取光源、影印機光源或液晶被光源等。 三、自動量控應用：遙控器、滑鼠、物體檢側或煙霧感應等。 四、通訊應用：光纖資料傳輸模組或無線資料傳輸模組等。	

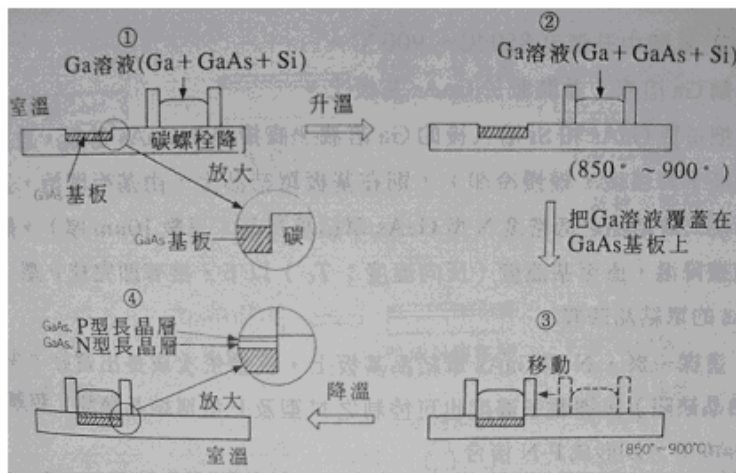
在此將以「紅外線發光二極體的晶片製作過程」為例。

• P-N 接合的形成

通常把由製作具有 P-N 接合之晶片(wafer)，以至使成晶粒(chip)之工程，稱為晶片製作過程。

圖(9)說明針對在紅外線發光上，製作 P-N 接合之一的液相長晶法。

註解 [u15]: 許書務、游金湖, “光電元件應用技術(增訂版)”, 全華科技圖書, 民國 90 年 2 月。



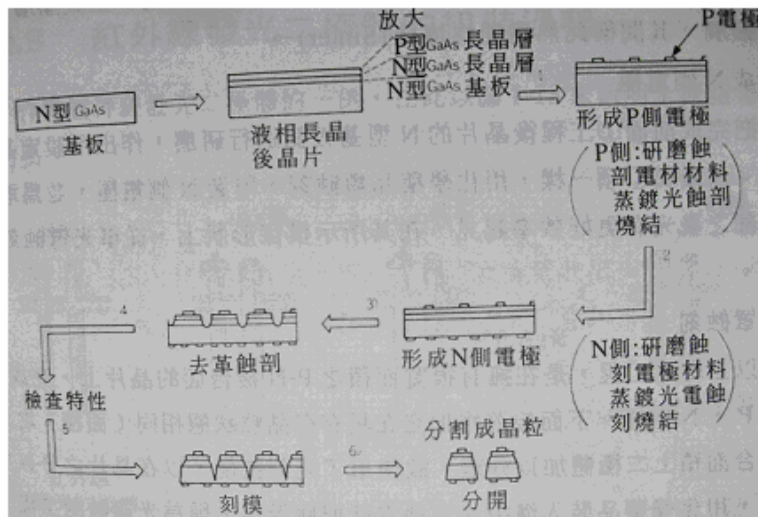
圖(9) GaAs液相長晶(液相外延式長晶)法解說圖

1. 將具有格子缺陷「低密度 GaAs」之 N 型單結晶基板，和 GaAs 多結晶，甚或加有 Si 的 Ga 溶液，分別裝載在碳板上。
2. 在 H₂ 氣體中升溫至 850~900°C。
3. 移動 Ga 溶液，並裝載於 GaAs 基板上。
4. 如把這種 GaAs 和 Si 溶入後的 Ga 溶液，直接澆入 GaAs 基板，並對其逐漸下降溫度(緩慢冷卻)，則在基板單結晶上，由基板開始，進一步使缺陷結晶之低密度 N 型 GaAs 單結晶長晶(呈數十微米厚)。隨之繼續降溫，直至某溫度(反向溫度：T_c)以下，接著即完成 P 型 GaAs 的單結晶薄膜。

這樣一來，N 型 GaAs 單結晶基板上，就會依次成長出質好(少出現結晶缺陷)，連載子濃度也可控制之 N 型及 P 型單結晶薄膜(膜厚約 100 微米)，以形成 P-N 接合。

- 作成晶粒

圖(10)說明把所作成的晶片，再給予施行晶粒工程處理。



圖(10) GaAs發光二極體之晶片製作過程解說圖

1. 形成 P 側電極：

將具有 P-N 接合之晶片 P 側表面做研磨，然後用化學藥品清洗、蝕刻、去污，且從事為獲取連「結晶學」上亦少出現缺陷之表面處理。於是此表面上，會附著用蒸鍍，使呈 P 側電壓的金屬材料。下面接著使用光電石版印刷技術，把 P 側電極去除掉圓形或方形模樣(光電蝕刻)。這時進行各種模樣的努力功夫，由考慮諸如晶粒尺寸大小，或產品指示燈形狀等，已用 P-N 接合使發光之光能在外部有效取出。進而對晶片上所剩電極材料做熱處理，且於 GaAs 的 P 型長晶層取出電阻接觸。期間稱此熱處理為燒結(Sinter)。

2. 形成 N 側電極：

把完成前面 1 工程後晶片的 N 型基板側進行研磨，作出所設定晶片厚度。然後與前項一樣，用化學藥品類蝕刻，附裝 N 側電極，並為取得對外部之光有更好的效率起見，在其所示模樣形狀上，從事光電刻蝕及燒結。

3. 光罩刻蝕：

以上所述工程，是在擁有很寬面積的 P-N 接合面的晶片上，完成各附予 P、N 電極。下面接著為把它在具有與晶粒狀態相同(面積)之 P-N 接合面積上二極體加以分哩，故使用了光刻技術，以在晶片之 P-N 接合上，用化學藥品裝入溝中。而通常把此過程，稱為光罩刻蝕工程。

4. 檢查特性：

這是指利用光罩刻蝕，在晶片上製作有若干並排小二極體，因此對此晶片狀態下各個二極體，以針扎刺，再通電，然後測量其電氣特性及發光強度，由此檢查各二集體是否充分擁有本身特性。

5. 刻模：

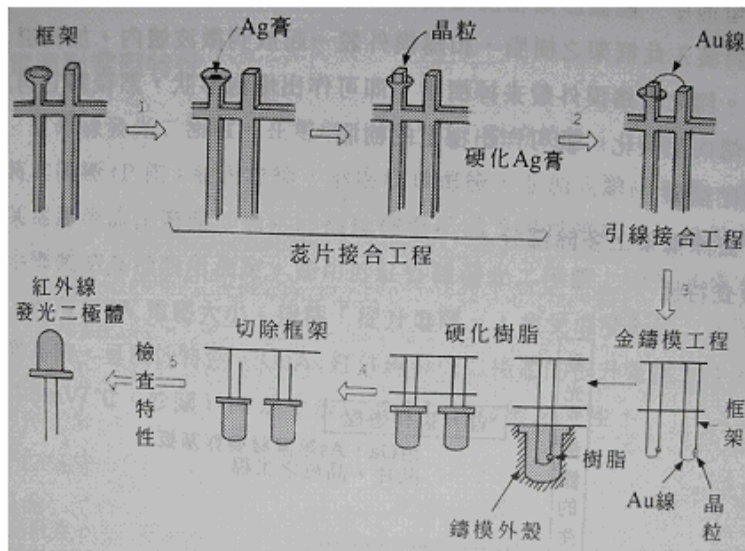
爲了把排列於晶片(wafer)上二極體，給於分離出晶粒，故把光罩蝕刻所製作的溝，用鑽石刀刻模，並加入深切。

6. 分開：

完成刻模的晶片，只用少許力量，給予分成細粒。這樣就完成晶粒。

➤ LED 的組裝過程

可見光發光二極體和紅外線發光二極體的晶片組裝過程其實是相類似的。在此將以「紅外線發光二極體的晶片組裝過程」爲例。並以圖(11)來說明全樹脂型的作出方法。



圖(11) 組裝過程

1. 芯片接合：

在框架(Frane)前端(極狀部內)塗上銀膏。在於銀膏上把晶粒之 N 側朝下載上，隨之放入 100°C 以上微波爐內，使銀膏硬化的話，框架和晶粒就會成機械性固定，同時也能獲得電氣性連接。於是由此使得 N 側，做好對框架之歐姆連接。

2. 引線接合：

於 P 側電極上連接銅線，然後把銅線接至未載有框架晶粒之前端即成。

3. 樹脂鑄模：

註解 [u16]: 許書務、游金湖, “光電元件應用技術(增訂版)”, 全華科技圖書, 民國 90 年 2 月。

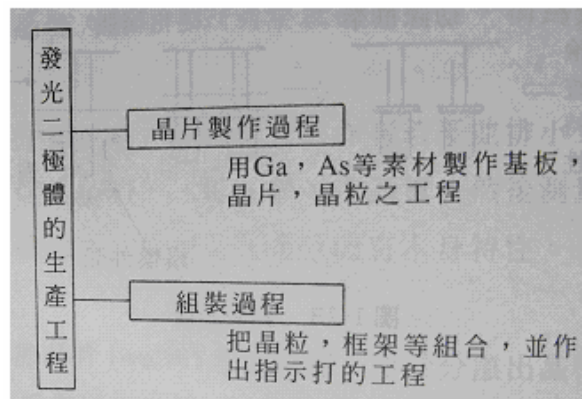
把置有晶粒的極狀部，和用晶片與 Au 線連接之框架，裝入於用樹脂添滿之鑄模外殼內。當然於此工程，還須進行各種努力功夫，以使燈泡中能至於高精度之晶粒位置。

將裝入此框架之樹脂，和鑄模外殼一起放到微波爐內，加高溫使之硬化。隨之由鑄模外殼去掉樹脂，即可作出燈泡形狀，然後將它在放入微波爐內使硬化，就可作出穩定的樹脂。

4. 切除框架：

去除框架多餘部分。

5. 檢查特性：



圖(12) 發光二極體的生產過程

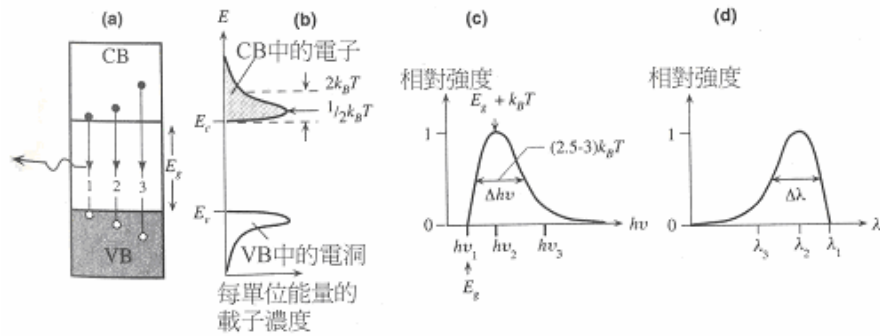
對結束上面四步驟所形成的燈泡，進行電氣與光量特性檢查，並進一步除掉多於框架，即成製品。當然期間不僅只做特性檢查而已，還要檢查各工程(例如：外觀檢查等)，由此才能獲得高品質燈泡。

➤ LED 的基本特性

• 能帶與頻譜

從 LED 所發射之光子能量並不是簡單的等於能隙 E_g ，因為導電帶(CB)電子以能量方式分布，並如同電洞在價電帶(VB)般；圖(13)(a)、(b)說明電子和電洞分別於導電帶和價電帶能量分布的能帶圖；電子濃度為 CB 中能量的函數，可表示成 $g(E)f(E)$ ，其中 $g(E)$ 為態密度； $f(E)$ 是費米狄拉克函數(在一具能量 E 的態發現一個電子的機率)，乘積 $g(E)f(E)$ 代表每單位能量的電子濃度或是能量下的濃度，並被以沿水平軸繪於圖(13)(b)，對於 VB 中的電洞，也有一相似的能量分布。

註解 [u17]: 黃俊達、陳金嘉、楊奇達、楊國輝、雷伯勳 (原著: K. O. Kasap), “光電半導體元件”, 台灣培生教育出版, 2006 年 1 月。

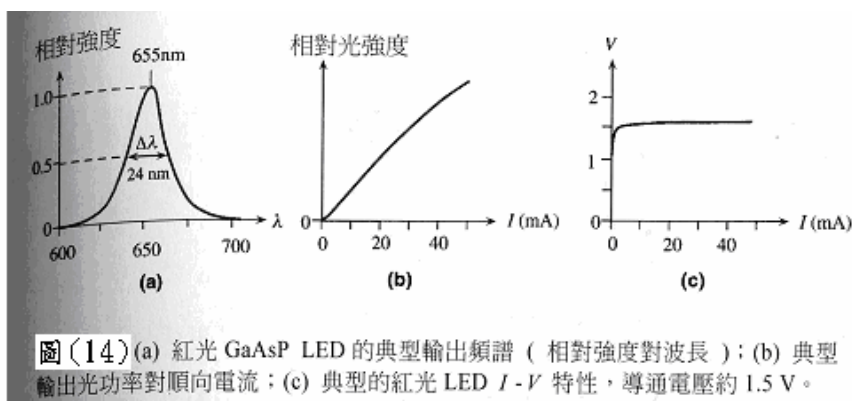


圖(13) (a) 可能復合路徑之能帶圖；(b) 電子在 CB 和電洞在 VB 的能量分布，最高的電子濃度是在高於 E_c 的 $(1/2)k_B T$ 處；(c) 根據 (b) 相對光強度為光子能量函數；(d) 根據 (b) 和 (c) 相對強度為輸出波長頻譜的函數。

CB 中電子濃度為能量函數，是非對稱的並有一高於 E_c 的峰值在 $(1/2)k_B T$ ，這些電子能量散布，典型地約離 $E_c \sim 2k_B T$ ，如圖(13)(b)所示。電洞濃度也相似的從價電帶 E_v 處散開；注意，直接復合速率是成比例於與能量有關的電子和電洞的濃度。圖(13)(a)中的轉移 1，它牽涉到在 E_c 之電子和 E_v 之電洞的直接復合，但是能帶邊緣的載子濃度很小，因此這型的復合沒有很常發生，光在這個光子能量 $h\nu_1$ 處的相對強度很小。如圖(13)(a)的轉移 2，有最大的機率，當電子和電洞在這個能量下有最大的濃度，如圖(13)(b)所示，這對應於轉移能量 $h\nu_2$ ，光的相對強度是最大的或接近最大，如圖(13)(c)。在圖(13)(a)轉移標記為 3 所發射之較高能量光子 $h\nu_3$ ，牽涉到較高能量的電子和電洞，其濃度不高，如顯示於圖(13)(b)。因此這些具較高能光子能量之光強度是弱的，光強度隨光子能量變弱，被顯示於圖(13)(c)；相對光強度對輸出頻譜的光子能量特性，是顯示於圖(13)(c)，其代表一重要的 LED 特性，對一特定頻譜，由圖(13)(c)可以得到相對光強度對波長特性，如圖(13)(d)所示，因為 $\lambda = c/\nu$ ，輸出頻譜的線寬(linewidth)， $\Delta\nu$ 或 $\Delta\lambda$ 定義在半強度點間的寬度，如圖(13)(c)和(d)的定義。

波峰強度的波長和頻譜的線寬 $\Delta\lambda$ ，明顯的和導電帶和價電帶中的電子和電洞之能量分布及這些能帶的能態密度(因此和個別半導體性質)有關，波峰發射的光子能量約為 $E_g + k_B T$ ，因為它對應於電子和電洞能量分布在圖(13)(b)之峰到峰轉移，線寬 $\Delta(h\nu)$ ，典型地在 $2.5k_B T$ 到 $3k_B T$ 之間，如圖(13)(c)所示。

LED 的輸出頻譜或相對強度對波長特性，不僅和半導體材料有關，更取決於 pn 接面二極體的結構，包含摻雜濃度之程度。圖(13)(d)之頻譜代表一理想化的頻譜，並沒有包含重摻雜對能帶之影響，對一重摻雜的 n 型半導體，有如如此的施體以致於在這些施體的電子波函數互相重疊，並生成以 E_d 為中心的一狹窄雜質能帶，而其並沒有延伸進入導電帶，因此施體雜質能帶和導電帶相重疊並因此有效地降低 E_c ，重摻雜半導體的最小發射光子能量因此小於 E_g 並取決於摻雜量。

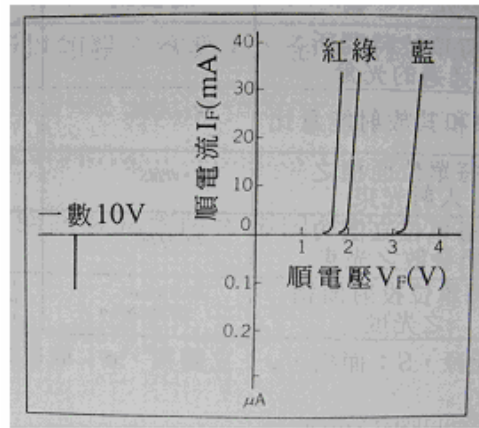


以紅光 LED(655nm)為例, 其典型的特性如圖(14)(a)到(c)所示。圖(14)(a)的輸出頻譜和圖(14)(d)理想化頻譜相比, 展現較少之不對稱性, 頻譜的寬度約為 24nm, 在發射光子的能量分布下, 對應於約 $2.7 k_B T$ 寬度。當 LED 電流增加, 注入少數載子濃度增加, 使得複合速率和輸出光強度也隨之增加; 然而, 輸出光功率並非隨 LED 電流而呈線性增加如圖(14)(b)所示, 在高電流基準下, 強大的注入少數載子導致複合時間取決於入載子的濃度和它本身的電流, 這導致隨電流而變的非線性複合速率; 典型電流—電壓特性, 如圖(14)(c)所示, 從中可看出導通(turnon)或切入電壓(cut-in voltage)約 1.5V, 在此點電流隨電壓迅速地增加, 導通電壓取決於半導體, 而一般隨能隙 E_g 而增加, 例如典型地對藍光 LED, 它約為 3.5~4.5V, 對黃光 LED, 它約為 2V, 而對一 GaAs 紅外線 LED, 它在 1V 左右。

• 電流對電壓特性

順向方向擁有和一般二極體很相似。也就是說, 至升波長以前, 即使加入電壓亦幾乎無電流流動, 且一旦電壓超越升波點, 會表示出呈現歐姆性的導通特性。其中升波點會隨結晶材料不同而異, 在 GaAs 約為 1.0V。GaAsP 及 GaAlAs 為 1.5V 左右(實際上因混晶化關係多少有些不一樣), 另於 GaP(紅色)是 1.8V, GaP(綠色)則呈 2.0V 值。又當開始流電流時, 因內阻會產生壓降。此值在推薦動作電流值中, 約為 0.3~0.5V。反方向亦會和一般二極體依樣, 沒有什麼改變。雖然逆向崩潰電壓, 具有十幾至數十伏特, 但考慮到使用條件間關聯, 通常只規定流 3~4V 逆向電壓的洩漏電流。圖(15)為發光二極體的電壓對電流特性。

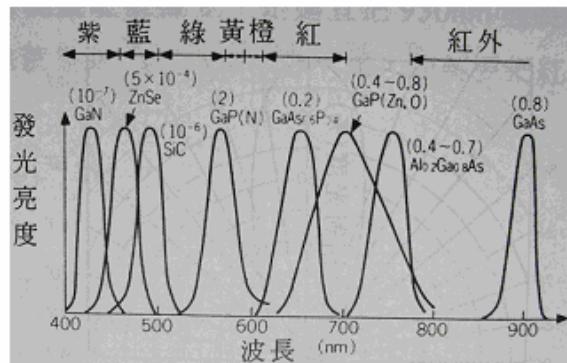
註解 [u18]: 許書務、游金湖, “光電元件應用技術(增訂版)”, 全華科技圖書, 民國 90 年 2 月。



圖(15) 發光二極體的電壓對電流特性

• 發光光譜

發光二極體所發光之光波長，和升波電壓一樣，由結晶種類決定。圖(16)表示各種發光二極體的發光光譜。



圖(16) 發光二極體的發光光譜

近年來有因發光顏色，由紅外頻色以至藍色，約大致可加以掌握，且正朝多顏色化邁進。這種光譜呈單一峰值，在對發光峰值上，約呈對稱形。

通常把峰值相對光度達 50%之波長寬度，稱為光譜半光度值，於Ⅲ-V族間化合物系列材料中，約在 30~50nm 左右範圍。對我們人眼而言，光譜的半值寬度愈廣，顏色就愈模糊不清感受，同時刺激變少，但相對的在狹半值寬情況，將可看到尖銳顏色。

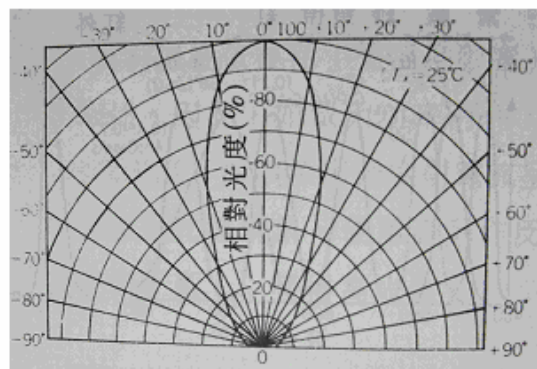
• 指向特性

發光二極體的光度，依樹脂透鏡形狀方向不同會有不同光度。圖(17)中表示指向特性之例子。圖中所示是說明發光光度在最大處作基準所求得，此時利用指向角之發光光度相對值。在附裝有透鏡指示燈場合，如果以設計透鏡和芯片位置，即使是相同光度芯片，亦可藉由採用有效透鏡效果之某形狀，來使具有指向

註解 [u19]: 許書務、游金湖, “光電元件應用技術(增訂版)”, 全華科技圖書, 民國 90 年 2 月。

註解 [u20]: 許書務、游金湖, “光電元件應用技術(增訂版)”, 全華科技圖書, 民國 90 年 2 月。

性的話，那麼在正面方向將得強的相對發光光度。於此並把相對發光光度的峰值呈 50%處，來自光軸的偏離角度，稱為指向半值角，期間又以角度愈小所示指向性愈尖銳。



圖(17) 指向特性

• 反應特性

流電流於發光二極體，至發光為止所需時間，稱為反應速度。一般發光二極體的反應速度，雖為 1 微秒大小，但特別作為通訊用，亦有開發出達 10ns 高速動作的 LED。

註解 [u21]: 許書務、游金湖，“光電元件應用技術(增訂版)”，全華科技圖書，民國 90 年 2 月。

➤ 白光 LED 的發光機制

由於傳統型 LED 仍有許多待改進之處，因此後來發展出白光發光二極體 (WLED)，以下將介紹 WLED 的作用原理

白光是一種多顏色的混合光，可被人眼感覺為白光的至少包括二種以上波長之混合光，例如人眼同時受紅、藍、綠光的刺激時，或同時受到藍光與黃光的刺激時均可感受為白光，故依此原理可產生白光 LED 的光源。

註解 [u22]: 劉如意、王健源，“白光發光二極體製作技術-21 世紀人類的新曙光”，全華科技圖書，民國 90 年 10 月。

一般產生白光 LED 較普遍有五種方法：

1. 使用以 InGaAlP(紅)、GaN(藍)與 GaN(綠)為材質的三顆 LED，分別控制通過 LED 的電流發出紅、藍及綠光。因這三顆晶粒是放在同一個燈泡(lamp)中，透鏡可將發出的光加以混合而產生被肉眼視為白光。但是，三種 LED 在時間上的光亮衰減率不一，混合面發出的白光亦會因此隨時間變化而改變。
2. 使用 GaN 與 GaP 二顆 LED 亦分別控制通過 LED 之電流，發出藍及黃綠光以產生白光。

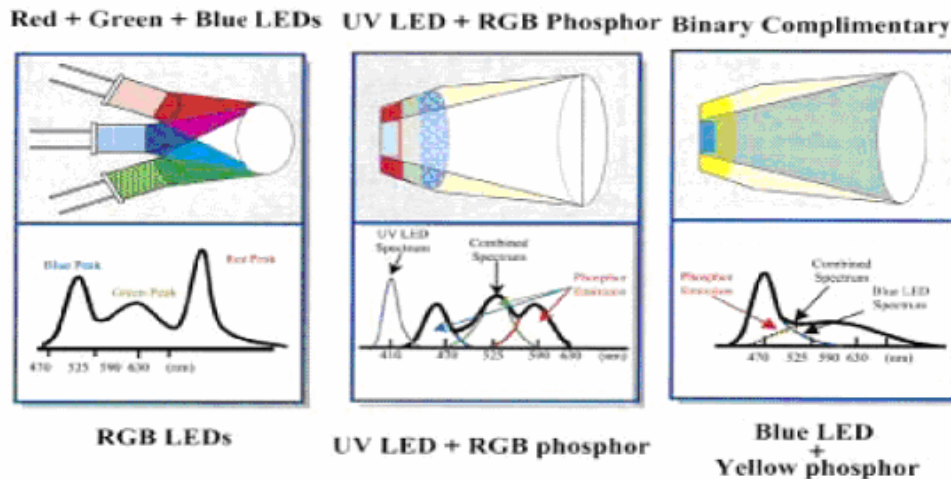
註解 [u23]: 陳興，“白色光發光二極體發展動向”，零組件雜誌，民國 89 年 4 月號。

但以上兩種方法有個共同的缺點，即這些同時使用的不同光色 LED 若其中之一發生故障，則將無法得到正常的白光。且因為它們的正向偏壓各不相同，故需多套控制電路，致使成本較高。

註解 [u24]: 劉如意、王健源，“白光發光二極體製作技術-21 世紀人類的新曙光”，全華科技圖書，民國 90 年 10 月。

3. 以紫外光LED晶片激發塗佈在其表面及周圍的三原色的螢光粉(內含RGB三色混合)，使產生三波長具有連續光譜特性的白光。由於紫外光UV激發螢光粉其使轉變波長發光的效率頗高，透過濾光膜可顯現全彩色系且發光功率高，並且量產容易，光色也較均勻，不會像二波長白光會有偏色現象(偏黃或偏藍)及光色不均勻現象，故此法未來最被看好。

圖(18)顯示以上三種白光LED的發光機制。



圖(18)白光LED發光機制

4. 1996年，日本日亞化學公司(Nichia Chemical)發展出以氮化銦鎵(InGaN)藍光發光二極體配合發黃光的鈮鋁石榴石型螢光粉 $Y_3Al_5O_{12}$ (Yttrium aluminum garnet, YAG)，亦可發出白光光源。白光產生過程係利用InGaN之LED發出460nm波長的藍光，再激發可發出黃色光之YAG型螢光粉粉體以產生可與藍光互補的555nm波長的黃光，同時也有部份未被吸收的藍光會直接射出來；如此搭配後再以可塑性的適當材質，如環氧樹脂，封裝形成燈泡結構，由於這種封裝形式具有光學透鏡的色光混合作用，故LED之藍光與黃色螢光混合後即可產生出二波長混合的白色光。此法的發光效率雖較第一和第二種方法稍低，但因只需一組LED晶片即可，大幅降低製造成本。

不過，這種方法有四大缺點：(1)光色不均勻，色溫會有偏色偏黃或偏藍的現象，其演色性在實質上仍偏低。(2)堆積方式會阻礙光，使得亮度減小，因為部份藍光能量在轉換成黃光的過程中會損失掉。(3)只能用氧化物為螢光物。(4)不夠白。

5. 日本住友電工(Sumitomo Electric Industries, Ltd)在1999年1月開發出利用ZnSe產生白光之技術。其基本之作用原理有別於日亞化學所提出之藍光晶片配合螢光材料的系統，乃先於ZnSe單晶基板上形成CdZnSe薄膜，通電後使薄膜發出藍光，同時部份的藍光照射於基板上而發出黃光，最後藍光、黃光混合後即形成白光。由於此法亦僅使用單顆LED晶粒，其操作電壓僅

註解 [u25]: 陳興, “白色光發光二極體發展動向”, 零組件雜誌, pp.84-87, 民國89年4月號

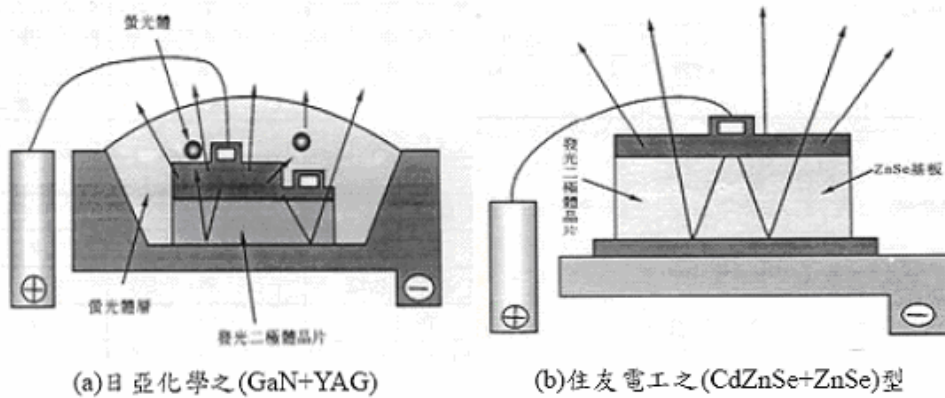
註解 [u26]: D. A. Steigerwald, J. C. Bhat, D. Collins, R. M. Fletcher, M.O. Holcomb, “Illumination With Solid State Lighting Technology” Proc. of IEEE, vol.8, (2002)

註解 [u27]: 史光國, “GaN藍光發光及雷色二極體之發展現況”, 工業材料, 第126期, 民國86年6月。

2.7V，較Ga_N型LED之3.5V低，且不需螢光物質即可得到白光。但其缺點發光效率僅8 lm/W，壽命亦只有8000小時，於實用層面的考量上仍須更進一步地突破。

有關日亞化學所開發的(GaN+YAG)型與住友電工之(CdZnSe+ZnSe)型的白光LED元件結構示意圖極其特性數據分別如圖(19)與表三所示。

註解 [u28]: 劉如意、王健源, “白光發光二極體製作技術-21世紀人類的新曙光”, 全華科技圖書, 民國90年10月。



圖(19) 白光LED元件結構與作用原理示意圖

表三、日亞化學(GaN+YAG)型 與 住友電工(CdZnSe+ZnSe)型 WLED 元件的特性數據表

特性 (20mA, 25°C)	日亞化學	住友電工
發光層	InGa _N	CdZnSe
發光波長	藍 460nm + 黃 555nm	藍 487nm + 黃 585nm
螢光體	YAG	無
製造過程	複雜	簡單
操作電壓	3.6 V	2.7 V
光強度	8 cd	—
輸出功率	4 mW	2 mW
發光效率	15 lm/W	8 lm/W
外部量子效率	9 %	—
色溫	6500 K	3500 K
演色性 (CRI)	85	68
色度座標 (CIE)	(0.31, 0.32)	(0.42, 0.41)
發光壽命	40000 hr	超過 800 hr
成本	較高	較低

資料來源：PIDA，2000/1

【附註】照明用語

1. 光通量 (Luminous flux) :
光源每秒鐘所發射並被人眼感知之所有輻射能，稱之為光通量，單位為流明(lumen，lm)。通常以 F 為其代號。
2. 光強度 (luminous intensity) :
一般而言，光源將於不同方向以不同之強度放射出其光通量。於特定立體角(ω)內所放出之可見光輻射強度稱為光強度。通常以 I 為其代號，其單位為坎德拉(candela)或燭光(cd)。又 $I=d F/d\omega$ ，如光源之光通量為 1 流明，其週圍之立體角為 4π 時，光強度為 1 燭光(即球面光度為 1 燭光)。
3. 照度 (density of illumination) :
指照在工作面上每單位面積的光束(光通量)通常以 E 為其代號，單位為勒克司(Lux)， $E = F / A$ 【F:光束(Lm)，A：面積(m^2)】
4. 光亮度，即輝度 (Luminance) :
一定面積之發光面沿法線方向所產生之光強度密度稱發光亮度，及人眼所感知此光源或被照面之明亮程度。通常以 L 為其代號，單位為坎德拉每平方米(cd/m^2)，為沿 $1 m^2$ 發光面之法線方向產生 1 燭光之光強度。
5. 發光功效 (Luminous efficacy) :
代表光源將所消耗之電能(以 W 為單位)轉換成光(以 lm 為單位)之效率，其中因發光元件控制器部分亦消耗部分之能量轉為熱能，故實際發光體所能接受之能量小於所輸入之能量，即扣除由發光元件所消耗之能量，單位為流明每瓦(lm/W)。
6. 發光效率 (Luminous efficiency) :
代表光源將所消耗之電能(W)轉換成光(lm)之效率，但其中並為扣除發光元件之控制器部分所消耗之電能，其單位亦為流明每瓦(lm/W)。
7. 色溫 (Color Temperature) :
係指光源色的程度，色溫不同僅表示光色的不同，與顏色顯現之優劣無關；標準黑體加熱時，在低溫時發出帶紅色之光，隨溫度提高，顏色由深紅—淺紅—橙黃—白—藍白—漸顯帶藍色之光。某光源之光色與某一溫度黑體的光色一樣時，此時黑體的溫度稱為此光源之色溫度，色溫度以絕對溫度表示，單位是 K(Kelvin)，色溫度在 5000K 以上為冷色，具有涼快感，3000K 以下為暖色，有暖和之感覺。
8. 演色性 (Color Rendering Index，CRI) :
演色性代表物體於光源下變色與失真之程度，演色性高之光源其顏色表現性較佳，亦即人眼所見之顏色愈接近自然顏色。平均演色性評價指數 Ra 乃為被照物，分別於光源與近似自然光之參考光源照射下，被照物所顯示各種顏色比值之平均數。設參考光源之 Ra 值為 100，當 Ra 愈高，愈接近 100，被照物顯示之色彩愈真實自然。Ra 值可區分為：100~90 演色性優良，90~85 演色性良，85~75 演色性一般，75 以下演色性差。

➤ LED 之應用

LED 的產品種類如表四所示。

表四、LED 產品種類	產品項目
可見光 LED	傳統 LED
	高亮度 LED
	超高亮度 LED
不可見光 LED	傳統紅外線
	高速、高功率紅外線 LED
感測元件	光電晶體、光二極體
	高速光二極體

LED 之應用領域大略可分為六大類，消費電子產品、號誌/顯示看板、通訊業、資訊業、汽車業及工業/儀表等。整理如表五，並分述於後。

表五、LED 之應用領域

消費電子產品	號誌/顯示看板	通訊業
音響 MP3 播放器 PDA 遊戲機 數位相機 LCD TV 背光源	室內外廣告看板 火車/飛機看板 股市看板 運動場看板 交通號誌交通資訊看板	按鍵背光源 行動電話訊息顯示 行動電話 LCD 背光源
資訊業	汽車業	工業/儀表
電腦及其週邊產品指示燈 傳真機的掃描光源 影印機的掃描光源	第三煞車燈 尾燈 方向燈 儀表板背光源 閱讀燈 車內照明燈	儀器設備的指示燈 工廠生產量顯示 工廠生產良率顯示

1. 消費電子產品：

可應用在音響、MP3 播放器、PDA、遊戲機、數位相機、LCD TV 背光源等各類電器產品上，主要以指示燈的形態出現。

2. 號誌/顯示看板：

大致以室、內外看板應用為主，早期由單色看板開始發展，後來因 GaN 材料應用，帶領著看板世界進入全彩的境界，再加上目前技術的提昇，配合著全彩及動畫的表現，使得看板的世界更為生動，更擴大了應用的範圍，舉凡室內外廣告看板、火車/飛機看板、股市看板、運動場看板及交通號誌交通資訊

看板等，都可發現 LED 技術的蹤跡。

3. 通訊業：

由於 LED 產品小型化、低耗電等特性，因此目前廣泛的應用在有線、無線及行動電話中的按鍵背光源上，再加上行動電話輕薄短小的發展，電子零組件的需求在功能上也需越來越強及越來越小，而 LED 正好符合這樣的需求，因此在使用上的接受度也就越來越高。目前，行動電話的訊息顯示及背光源的應用上多已廣泛的採用 LED 產品。

4. 資訊業：

LED 產品大都使用在電腦及其週邊產品的指示燈上，當作產品運作顯示用，而應用領域也擴大至傳真機及影印機光源。

5. 汽車業：

目前來說，除了大燈之外，LED 可取代汽車上的多種光源，如第三煞車燈 (Centre High-mounted Stop Light；CHMSL)、尾燈、方向燈、儀表板背光源、閱讀燈、車內照明燈及各按鍵的顯示燈等，再加上產品的壽命可達 100,000 小時，使用時間高達 10 年以上，在車子報廢前，該產品可能還未損壞。因此，也可省去人工替換費用，且使用此產品做為煞車燈，由於其反應時間短，可讓後方的駕駛員多出一段煞車距離，在安全上又多了一分保障。

6. 工業/儀表：

LED 在工業/儀表的應用也和資訊業相同，以儀器設備的指示燈為主，在工廠的生產線上，則用於生產量顯示及生產良率顯示上。

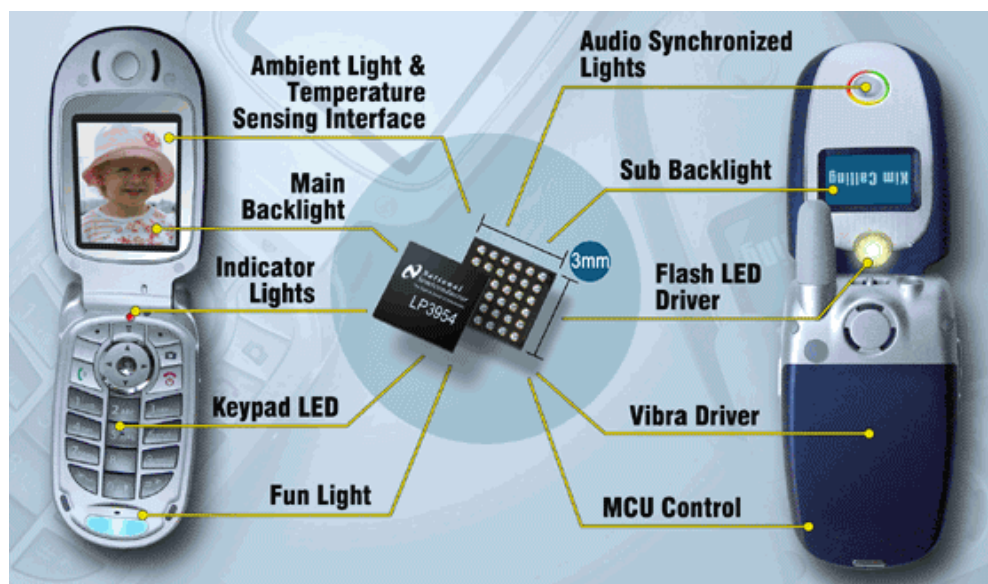
LED 的應用領域之所以如此廣闊，最主要是由於白光 LED 的出現，使 LED 擺脫過去只能用於指示燈號、霓虹燈飾等場合，以下針對 LED 作為背光源及應用照明應用方面上做進一步的介紹。

• 背光源

液晶顯示器(Liquid Crystal Display，LCD)為非自發光之顯示器，需要冷陰極螢光燈(Cold Cathode Florescent Lamp，CCFL)及發光二極體以提供外部光源。目前市面上之小尺寸 2.2、2.5 吋等手機，多見 WLED 作為背光源之蹤跡。此些小吋數 LCD 若用 WLED 作為其背光源，只須將 3~6 顆 WLED 加以串並聯即可。另外，初階數位相機或帶有照相功能之手機，也開始用 WLED 充當閃光燈(約 1~4 顆)。

而以 WLED 取代冷陰極螢光燈之優點乃因 WLED 只須正向電壓即可驅動，且可直接使用 3.6V 鋰電池驅動，相對於冷陰極螢光燈需要交流電才能驅動，且要較高之驅動電壓，約正負 10V 以上，故電源不盡相同還須升壓，其供電設計較 WLED 複雜。

冷陰極螢光燈其發光過程中利用汞蒸氣作為放電介質，因汞蒸氣具溫度依存性，不利於低溫下啟動。且汞會對人體產生危害，名列歐盟特定有害物質管制指令(Restriction of The Use Certain Hazardous Substance)中之禁用物質，2006 年後含汞之冷陰極螢光燈將無法於歐盟地區銷售。此外 WLED 對衝撞較具有抗受性，反之以光管發光之冷陰極螢光燈一但受衝撞破裂，即無法再行發光。也因此今日有許多礦工所配屬頭燈已改用 WLED，此於嚴苛、多撞擊之工作環境、場合中格外受用。



圖(20) LED用於照相手機之背光源與閃光燈

圖片來源：http://member.digitimes.com.tw/newsimage/060313164f8e_0.gif

而於 2006 年之消費性電子展，各大廠牌皆展出 LED 背光源之液晶電視，甚至提出 LED 當發光源之投影技術。LCD Monitor 與 LCD TV 尺寸多數多於 15、17 吋以上，此層次 WLED 除具光均度問題，同時又衍生出散熱問題及價格問題需要解決。

大尺寸 LVD 之背光陰須與窄扁之空間密佈大量之 WLED，WLED 之發熱將不易消散，而冷陰極螢光燈之冷光源則無此方面問題，且必須光均與散熱兩項都顧及，不能因散熱可行但光度不均。目前 Sony 以克服 WLED 背光源之散熱問題，進而推出實際量產之 LCD TV 商品，然其將散熱技術申請專利，使其他業者難以仿效跟進，使 WLED 背光用於大吋數產品之進度受阻。

接著，針對「LCD 主要背光源優缺點」及「LCD 背光源成本」做個比較。

在背光源的優缺點方面，CCFL 高色彩飽和度燈管推出後，與 LED 差距已甚為有限，至於含汞量 3mg 亦不高於歐洲要求的 5mg，LED 優勢縮小，不過仍在使用壽命、反應時間及啟動電壓方面表現較佳，且適合在溫度環境較惡劣的地

註解 [u29]: 劉如意、劉宇恒，“發光二極體 用氧氮螢光粉介紹”，全華科技圖書，民國 95 年 11 月。

方使用。若未來規定全面零含汞，或 LED 與 CCFL 價差縮小，則 LED 將獲大幅採用。如表六。

表六 LCD 主要背光源優缺點

	單位	CCFL	EEFL	LED
色彩飽和度	NTSC	92%	92%	105%
發光效率	lm/W	70	70	40~50
厚度	mm	30	30	30~50
啟動電壓	KV	1.2~1.5	~1.5	<0.3
耗電	W	110	110	<130
表面溫度	°C	40~60	40~60	<40
作用溫度範圍	°C	0~50	0~50	-40~85
驅動速度	Sec	<1	<1	<50ns
使用壽命	hrs	10,000~50,000	60,000	70,000~100,000
環保		含汞	含汞	無
價格		低	中	高

資料來源：IBTS整理

【註】EEFL(External Electrode Fluorescent Lamp)：外部電極螢光燈

EEFL 為一棒狀螢光管，與一般冷陰極燈管最大差別在於將電極做在燈管外部，即在螢光管外利用玻璃的絕緣性套入電極。由於可做並聯設計(如右圖)，使一顆轉換器(inverter)可並行驅動多根螢光管，利用轉換器本身的安定性驅動，提供高頻、高壓讓燈管啟動，並維持點燈的高度穩定性。



EEFL 並聯設計

資料來源：Naujing Lamps Photoelectronic Co., Ltd

註解 [u30]: 張文珊, “EEFL 燈源特性”, 工研院 IEK-ITIS 計畫, 民國 95 年 4 月 11 日。

至於成本方面，白光 LED 應用於 NB 背光源具有省電、薄型化的優點，不過由於採用側光式光源，畫面的表現並未明顯優於 CCFL，但相較於 CCFL 成本差距已漸縮小，若以 11.1 吋面板使用 45 顆白光 LED 為例，價差已在 1 倍以內，提高 NB 廠商採用的意願，而 TV 背光源價格差距仍大。如表七。

表七 LCD 背光源成本

單位：個

NB	CCFL	白光LED
LED(單價3NT)	-	45~150
燈管(單價1USD)	1	-
Inverter(單價2USD)	1	-
總成本NT	99	135~450

32吋LCD TV	CCFL	白光LED
LED(單價1.5USD)	-	230~450
燈管(單價2USD)	16	-
Inverter(單價2USD)	8	-
總成本NT	1,584	11,385~22,275

資料來源：IBTS整理

• 照明應用

照明市場依應用領域分為三類：一般照明、車用照明與專業照明。如表八。

表八 資料來源：IBTS整理

	說明	應用範圍
一般照明	泛指室內及室外所使用的各種照明光源，以及手電筒等可攜式產品	工廠，辦公室，學校，道路，景觀，運動場等照明
車用照明	各類運輸工具的光源	汽車，火車，航空器等照明
專業照明	各類電子產品用光源或機器視覺用光源	投影機，顯示器，手機等光源

隨著白光 LED 發光效率提升至 100 lm/w，已超越目前常用白熾燈、螢光燈及鹵素燈，可大幅節能，LED 將在照明市場佔一席之地。表九為 LED 與傳統燈泡之比較。

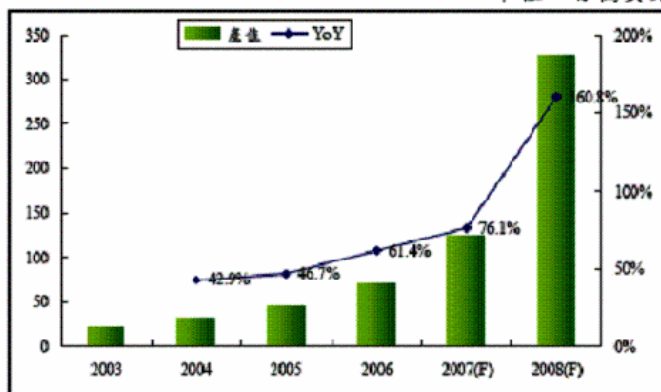
表九 LED與傳統燈泡之比較 資料來源：IBTS整理

	白光LED	白熾燈泡	螢光燈
驅動電壓(V)	3.5	100	>100
發光效率lm/w	100	16	85
冷熱發光	冷發光	熱發光	氣體發光
耐衝擊性	堅固	脆弱	脆弱
耗電量	最低(較白熾燈省電80~90%)	高	較低(較白熾燈省電40~50%)
壽命(hrs)	50,000	1,000	10,000
體積	小	大	大
環保	不含汞	不含汞	含汞

因發光效率不斷提升，且克服散熱問題及機構元件，將加快 LED 取代日光燈及鎢絲燈泡腳步，為 LED 成長的另一明星產品。圖(21)為 LED 應用在照明市場之預估。

圖(21) 2003~2008年照明用白光LED市場預估

單位：百萬美元



資料來源：IEK；IBTS整理預估

在一般照明的部分，由於 LED 發光效率較佳，且具指向性，60W 的 LED 路燈可用來取代 150W 的傳統路燈，150W 的 LED 路燈可用來取代 400W 的傳統路燈。High Power LED 單價約 1~2 美元，整組燈具價格約 2 萬元台幣，遠高於傳統路燈的 6 千元，不過採用 LED 可節省電費及維護成本，隨著 LED 每年降價 20~25%，LED 路燈滲透率將逐漸提高。

表十

單位：元

燈具高度	8 米		10 米	
	高壓鈉燈	LED	高壓鈉燈	LED
消耗功率(W)	150	60	400	150
使用壽命(hrs)	4,000	50,000	4,000	50,000
2年電費	5,500	1,325	8,750	3,250
價格	6,000	20,000	8,000	50,000
維護成本	10,000	-	14,000	-
總成本	21,500	21,325	30,750	53,250

資料來源：IBTS 整理

至於車用照明方面，汽車照明設備從早期使用鎢絲燈泡，至灌入惰性氣體之鹵素燈泡發明，而無燈絲氙 HID 車燈推出，使車燈照明技術與效果獲得大幅進步。近年來車燈則大幅改以 LED 作為燈具，因其輕薄短小、省電省空間、使用壽命長、下雨起霧時安全性更高。目前應用高亮度發光二極體作為車外光源，主要以煞車燈、方向燈、尾燈組等車後端照明為主。而車廠以歐洲及日本廠商為例，涵蓋歐洲 Audi、BMW、日本 Mitsubishi、Toyota 等車廠推出相關產品，且其應用車種有由高價車往國民車發展之趨勢。

近年來油價不段攀升，然車內電子儀器之電源來源須倚靠油，有報導指出，若汽車之內外燈具都用 LED，將可省下約 15% 之耗油量，使 LED 無疑地成為汽車照明之新主流。



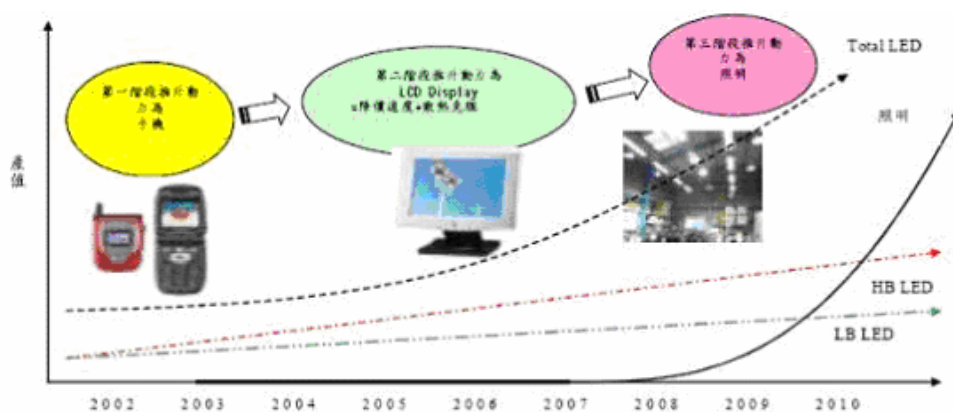
圖(22) 2007年5月豐田所發表最新一款的混合動力車 LEXUS LS600h，在頭燈方面正式引用LED作為光源。

圖片來源：<http://www.digitimes.com.tw/Ext/Ext.asp>

此外，由於 LED 可耐低溫，亦可用於低溫照明市場。該市場可分為電冰箱及冷藏/冷凍庫，2006 年全球電冰箱出貨量 1.06 億台，冷藏/冷凍庫 0.58 億台。電冰箱使用 1~2 顆 5~15W 白熾燈，每顆單價約 60 日圓，冷藏/冷凍庫則使用 2~4 根 10~58W 螢光燈，每根單價 390~2,250 日圓之間，整體市場規模約 350 億日圓。除了省電節能之外，LED 可適應低溫環境，以較小的電壓迅速啟動，且 LED 體積小、具光指向性，因此可適當調配光源，達到最佳照度。

註解 [u31]: 劉如憲、劉宇恒，“發光二極體 用氧氮螢光粉介紹”，全華科技圖書，民國 95 年 11 月。

➤ 產業分析

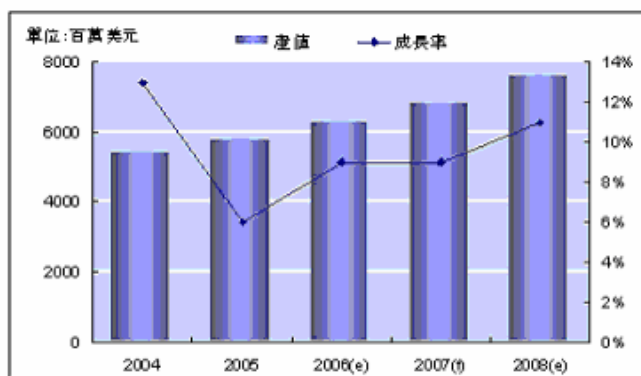


圖(23) 資料來源：IBTS整理

從圖(23)，可看出LED產業應用的趨勢，由手機市場帶動LED產業第一波大幅成長，隨著應用面不斷擴大，LCD面板背光源被視為下一階段最大推升動力，除了電子產品以外，在日常生活照明相關應用也不斷增加，使LED產業成長呈現多元化的現象。

LED市場規模方面，2002年起在高亮度LED需求成長帶動下，全球LED產業規模呈現兩位數成長。2005年由於缺乏新市場帶動，造成市場供需失調，產品單價大幅下滑影響，此一快速成長趨勢於2005年劃下休止符，2005年全球LED市場規模達57.3億美元，較2004年微幅成長6%。圖(24)為2004~2008年全球LED市場規模。

註解 [u32]: 林志勳, “全球LED市場規模”, 工研院IEK-ITIS計畫, 民國95年4月3日。

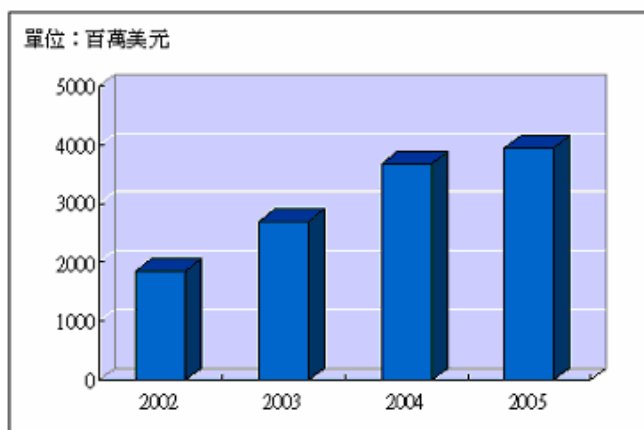


圖(24) 「2004-2008年全球LED市場規模」

資料來源：工研院IEK-ITIS計畫 2006/04

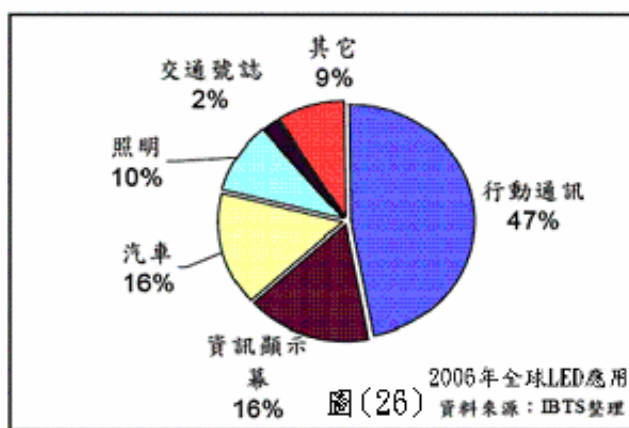
2005年高亮度LED市場受到產品單價持續下滑，及大尺寸背光模組等新興市場成長不如預期影響，整體市場僅呈現微幅成長，較2004年微幅成長7%，達3,963百萬美元。圖(25)為全球高亮度LED市場規模。

註解 [u33]: 林志勳, “高亮度LED市場規模”, 工研院IEK-ITIS計畫, 民國95年7月11日。



圖(25) 全球高亮度LED市場規模
資料來源：工研院IEK-ITIS計畫2006/07

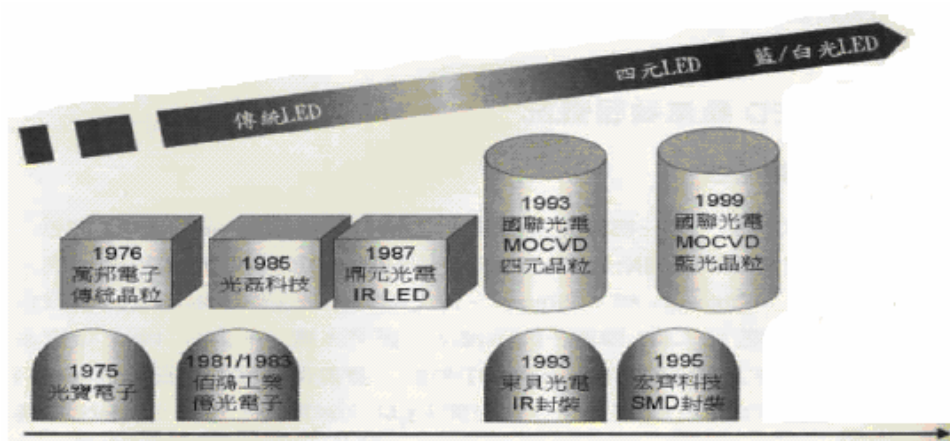
由圖(26)可看出 2006 年全球 LED 應用仍以手機及閃光燈為最大，佔 47%，顯示器與車用居次，各佔 16%。



圖(26) 2006年LED應用
資料來源：IBTS整理

➤ 台灣 LED 產業發展概況

台灣 LED 晶粒發展的始祖為 1973 年成立之萬邦電子，創設初期良率一直未有起色，直到萬邦顧問石修先生改良石英管冷凝技術之後開始獲利，故 LED 晶粒發展時起源於 1976 年。在 1975 年後，下游封裝業陸續成立，大多集中於中和、土城一帶，以光寶(1975 年創立)為代表。1985 年後封裝業日漸壯大，為了整體產業的突破，此時關注的焦點再度回到了上游技術。在石修先生的奔走下，工研院投入上游磊晶 MOCVD(有機金屬化學氣相磊晶法)技術研發與技術轉移，同時海外技術人才也陸續回台設立磊晶廠商，逐漸建構出台灣 LED 產業完整的上中下游供需鏈。然而台灣 LED 產業在高亮度 LED 領域之研究投入過晚，一路走來並不順利，使得至今仍無法突破藍光、白光及紫外光的專利封鎖。



圖(27) 台灣LED產業發展圖

LED產品發展依時間先後可分為傳統低亮度及紅外光、四元高亮度及藍/白光三階段，每一階段針對發光亮度及波長(即人類肉眼所見光的顏色)有突破性之發展，整體趨勢朝向高亮度及全彩化發展。LED與IC製造業相許多雷同之處，LED與IC業同樣分為上游磊晶片及原物料供應、中游晶粒製造及下游封裝，唯一不同是LED產業的中游亦進行晶粒特性測試，而IC業則由下游封測廠負責，原因是LED晶粒特性測試較IC簡易且測試項目較少，且中游業者亦可藉測試資料要求上游磊晶片品質或調整製程參數以提高良率及製程穩定性。

而LED產業結構分為上游的磊晶片形成、中游的晶粒製作、下游的封裝成各式各樣應用產品，各層的狀況概略如下：

(1) 上游概況：

LED在上游的產品主要為單晶片及磊晶片，以砷、鎵、磷等III-V族化合物作材料的基板，在上成長多層的磊晶，也就是磊晶片使用的方法有下列幾種：(一)LPE法(液相磊晶法)、(二)VPE法(氣相磊晶法)、(三)MOCVD法(有機金屬氣相磊晶法)，目前MOCVD法為生產高亮度產品的主流製作方式，以AlGaInP材料生產紅、黃、綠光，以GaN材料生產藍光，至於LPE法則為成本效率較高，但產品以中低亮度為主，此外IrDa的晶粒也是採用LPE法。

(2) 中游概況：

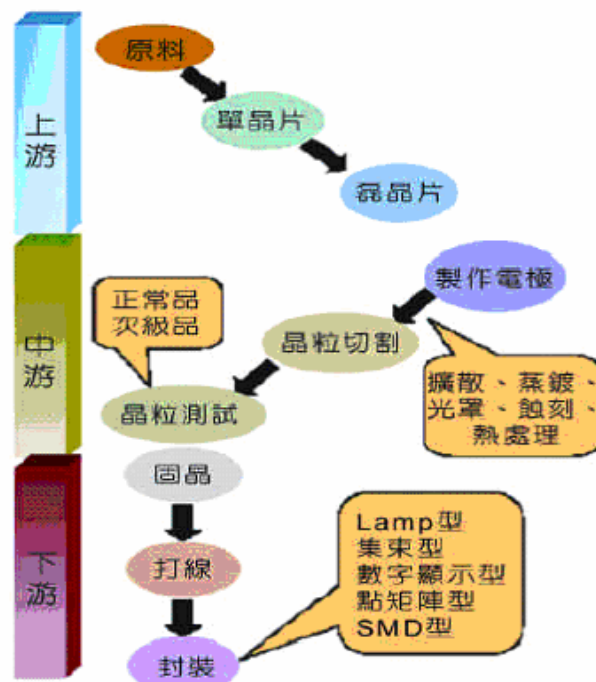
主要的產品為晶粒切割，製造過程為：依LED元需求作磊晶片擴散，然後金屬蒸鍍，之後在磊晶片上光罩、作蝕刻、熱處理，製成LED 兩端金屬電極，接著將基板磨薄、拋光後再作切割。

(3) 下游概況：

下游主要是將晶粒封裝，將晶粒黏於導線架，依各類產品的不同應用將晶粒封裝成不同的LED，目前封裝後的產品類型有Lamp(子彈型)、集束型、

數字顯示、點矩陣型與SMD(表面黏著型)，其中SMD型LED的體積較其他傳統型LED小，因此SMD型主要用在手機的螢幕背光源及手機的按鍵，故受手機的需求影響甚大。

LED發光特性良莠取決於磊晶片整體內部結構，隨著終端產品對發光特性的要求日漸嚴苛，原本分工明確的產業結構自四元高亮度產品階段出現改變，即中游晶粒廠開始自行生產磊晶片自給自足外並銷售給無力生產磊晶片之同業以增加營收。



Source：拓璞產業研究所，2004/12

圖(28) LED 產業結構與製程概況

➤ 產業特性

1. 資本額度

我國LED廠商，以登記資本額來看，在數千萬元至數億元不等，不若其他產業如LCD、IC等，往往資本額需投入數百億甚至於數千億元不等，相較之下，投資風險較低，因此，整個產業型態是屬於多數小廠林立的局面，大多屬於中小型企業式經營，上市上櫃公司僅約佔全部廠商家數一成左右。

2. 技術與專利特性

就全球LED產業中的廠商動向方面來看，各大廠都擁有不同領域的技術及專

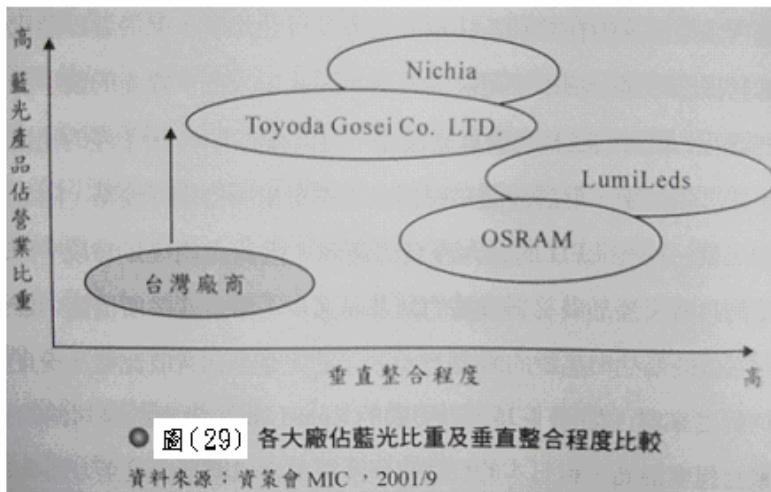
利優勢，在磷化鋁鎵銦(AlGaInP)的紅、黃光LED市場主要的供應商有美國的LumiLeds、歐洲的OSRAM Opto Semiconductors、日本的Toshiba以及台灣的晶元光電與國聯光電等。其中以晶元光電的銷售量已成為全球排名第一的四元高亮度LED晶粒供應商。

另外，全球氮化鎵(GaN)的藍、綠光LED市場是由日本Nichia、Toyoda Gosei及美國的Cree和歐洲的OSRAM Opto Semiconductors等廠商所掌握，其中在專利及技術最強的是Nichia，但最近Nichia的專利權已經被突破，因此未來藍、綠光的競爭勢必更加激烈，相對的成長也會更為快速。

而美國的Cree所生產的亮度雖然不如Nichia，但該產品具有低成本與單電極打線等優點，所以成為全球藍、綠光LED的最大產量的廠商。因此可發現LED產業的發展是受磊晶與材料技術的演進而進步，所以產業價值鏈中最具附加價值的部份是磊晶與晶粒的製造上。若以藍光產品佔營收比重及垂直整合的程度來看，如圖(29)，以美國的LumiLeds、歐洲的OSRAM Opto Semiconductors的垂直整合程度最高，但日本的Nichia及Toyoda Gosei則是在藍光方面具有領先的技術及專利，因此藍光佔營收比重則較高。

而台灣廠商則是產業分工較為完整，再加上各領域所需的專業及資源並不相同，因此只有上中游整合的情形，如國聯、晶元。而藍光的比重方面，台灣先前主要以四元為主，而藍光方面的技術及量產能力是近幾年才漸漸有些成果，因此藍光佔台灣廠商的營收比重仍然不是很大，但以目前各廠商幾乎都能生產藍光晶粒的狀況來看，加上Nichia的專利權已經被突破的情形下，很快就能像四元(AlGaInP)一樣，成為全球前幾大量產藍光的國家。

註解 [u34]: 廖顯奎, “當代光電工程”, 滄海書局, 民國95年11月。



3. 零組件將趨向輕、薄、短、小、省電及高附加價值的特性

該產品具有小型化、省電、低發熱、高壽命、耐震、單色發光、反應速度快

等優點，是目前市場上系統產品中指示燈的最愛，再加上技術的提升，高亮度LED的開發成功，產品更是朝向高附加價值的方向邁進，且在這資訊爆發及產品趨向小型化、可攜帶化的導向下，未來應用的零組件將趨向輕、薄、短、小、省電的特質，因此，未來的發展也將以符合上述產品需求為主流，而放眼未來，並在能源的短缺下，取代傳統照明市場，將是LED製造商另一大商機。

4. LED傳統封裝產品生命周期長，不易被取代

可見光LED傳統封裝自問世以來已達20多年，成為許多產品中的發光源，由於其價格便宜、小型化、控制容易、及省電等優點，因此歷久不衰，預料在未來仍能持續穩定成長。

5. 一般亮度LED傳統封裝技術成熟，再降價幅度不大，毛利穩定

一般亮度的LED晶片及封裝因相關技術已成熟，在前幾年價格大幅滑落後，目前價格再下降的空間不大，毛利率也趨穩定，且在既有客戶關係及經濟規模的限制下，新進廠商並不容易進入此一成熟產業，未來LED下游的發展必將由既有廠商就其品質、成本及對新產品的研發或多角化作競爭。

6. LED下游廠商的客戶分散、穩定度高

因LED屬工業產品，且應用廣泛，因此只要是資訊、通訊、消費電子或家電等製造業，都可能是其客戶，造成LED下游廠的客戶眾多，營運穩定度高，其盈衰基本上是隨整體景氣而變。

➤ 關鍵成功因素

1. 產業結構完整，並以專業分工的模式運作

由1993年我國發光二極體產業開始向上游生根，觸角已囊括上中下游，產業結構相當完整，並採專業分工的營運模式，和垂直整合的方式大不相同，優於其他地區及國家，佔盡了地利之便，也減少了供貨困擾及節省物流時間具有靈活運作及高彈性的優點，且目前正朝向策略聯盟的腳步邁進，結合上中下游的力量，開發新契機，可將整個產業競爭力推至最高點。

2. 生產規模

我國LED產值位居全球第二，僅次於日本，除少數特殊規格產品仰賴進口外，大多能自給自足，並以外銷為導向，比重超過一半，於生產規模上堪稱座二望一。

3. 成本競爭優勢

於整體發展上，產品的成本控制、大量生產、製程的Cost Down以及良率的掌握向來是我國最引以為傲的競爭利器，再加上近幾年來的慘烈競爭，部份廠商外移大陸或東南亞，運用當地低廉的人力資源，並配合台灣的行銷策略，

國內廠商早已訓練出靈活管理的經營模式，對於成本的控制策略更是享譽國際，形成了成本競爭優勢，而此低成本營運能力更是讓國內廠商得以持續擴大其產業版圖。

4. 產品品質及品牌形象

雖然我國初期發展定位於低階、可量產性產品，但隨著時間及技術演進與提昇，於產品品質及品牌形象上逐漸漸入佳境，再加上成本的競爭優勢，目前部份產品已成功的打入日本及歐美市場，未來 Made In Taiwan 將不再是次級品的代稱了。

5. 行銷網路

於行銷通路上，國內廠商大多為經由自己國內外銷售據點及透過國內外代理商銷售，以前者居多；而 OEM 部份，比重則偏低，另外則是由台灣總公司自行負責銷售。而整個產業發展主要是以外銷為導向，因此，織密的行銷通路，正是我國外銷事業拓展的利器。

6. 交貨期

由於我國於量產技術上有著過人之處，且配合著彈性化的生產，往往皆能配合廠商的需求，於交貨期上，更是能滿足客戶的要求。

➤ LED 整體產業 SWOT 分析

國內發光二極體產業發展至今，已有 20~30 年的歷史之久，技術由發展期慢慢進入成熟期，產業結構非常完整，是國外業者或其他區域所無法比擬的。而該產業的角色及地位也隨著現有技術的提昇及環境的變遷，使得競爭更加激烈，尤其是高亮度領域，更是兵家必爭之地。

(一) S-優勢

以整體構面看來，國內於此產業的優勢主要為產業分佈完整，且以專業分工的型態經營，比起國外廠商上中下游垂直整合的營運模式，來得靈活多了，加上政府近年來積極輔導相關的科技專案，對於國內業界的人力培養及技術提昇方面貢獻頗大，而我國於成本的控制上，向來皆是聞名海內外，因此低成本產品走向也是重要的優勢之一。

(二) W-劣勢

由於我國該產業於發展初期，定位以生產較低階產品為導向，因此在技術佈局上，和國外大廠有著一段落差，其中包括專利的自主性，往往受制於人，發展上備受阻擾，再者產品以元件成品為主，整體性的系統整合能力較弱，因此在發展上，無法居於主導者的角色，且在研發上的投入及能力還有待加強。

(三) O-機會

若以機會面來探究，由於高亮度應用市場呈現一片榮景，因此是帶動未來整個產業的脈動力量，而國內於後來的投入者又以發展此領域居多，因此在整個競爭力來看，無異是如虎添翼。另一方面，由於大環境的景氣不佳，加上廠商彼此的削價競爭，因此國外廠商於低價位的產品，已無競爭力，而國內廠商則有更多的機會藉此搶攻全球市場。

(四) T-威脅

由於大陸的投資環境開放，部份國內廠商紛紛外移，尤其是下游業者，為因應成本的考量，因此，西進大陸是必然的趨勢，且當地的廠商也由於看好市場的發展性，造就了一波投資熱潮。但這對台灣的衝擊很大，有可能大陸會成為第二個台灣，以低價的攻防戰來贏得這場勝利，但這勢必落得兩敗俱傷，因此在策略的因應上，可將生產競爭的模式轉變為 R&D 的兩岸生產方式，將危機化為轉機。

➤ 產業發展瓶頸

1. 專業技術人才難尋

我國光電產業正逐年地快速成長，然而研發人員的培育速度及素質，卻不能及時配合業界的需要，再加上此領域成員多半熟識，因此在相互提攜及跳槽的風氣下，流動率一直是居高不下的，這也造成業者極大的困擾及研發進度的落後。且若有優良的技術，無優良的人才傳承下去，一切只是空談，因此人才的培養是營造企業競爭力的重點要素之一，而技術層次的水準，則影響著公司定位及生存命脈，兩者關係唇亡齒寒，缺一不可。

2. 缺乏獎勵投資及減稅措施

政府於新竹科學園區施行的獎勵投資及減稅措施，成功的造就了經濟的奇蹟，但這只限於某些特定產業及特定區域，其他的國內業者並無法完全享受到此等的待遇。若政府能因應未來大環境的變動，及早訂定相關條款，獎勵投資，讓企業能依據政策制訂計畫及目標，並優惠企業稅收，獎勵企業研發新產品，以提昇競爭力。

3. 生產勞力不足

我國目前正由已開發國家進入開發中國家，國民所得逐年提昇，於整個產業的型態上，已進入知識經濟年代，已非當初的勞力密集型態所能比擬，人力上素質較佳，但相對的人力成本也不若從前優勢，再加上教育的普及，從事勞力工作的意願低弱，因此需大量的引進外勞，以保有成本競爭優勢，相對的這也引發了一些管理上的問題，也因如此，國內業者才會有前進大陸的政策及行動。

4. 關鍵技術取得不易

由於目前關鍵技術取得不易，大多掌握於日本手中，再加上國內業者及研究

單位研發的投入及時程的掌握上，和國際知名大廠還有一段差距，因此，在發展上，確實有落差，一方面業者抱怨研發經費投入過高，於另一方面又覺得政府應大力支援，發展大型之國家級遠程計畫，以提昇整體的產業競爭力。

5. 生產設備研發能力弱

目前國內的生產設備幾乎皆為進口，尤其是上游，國內於設備研發這方面的發展，能力較弱，縱使業者想針對製程作一些設備上的改良，也只能求助於這些進口設備商，一來於時程上較不能配合，二來，可能也需增加一筆不小的花費，若國內能多加強這方面的能力，業者將受用不盡。

6. 國際市場開拓不易

打入國際市場需要有較長的產品時間認證及銷售佈點，且需花費大量的人力及物力，目前國內廠商雖以外銷為主，但在整個市場的開發上，皆以能提昇銷往開發中國家的比重為首要目標，一來擴大外需，二來則在建立品牌及品質知名度。

7. 中、下游新應用產品拓展過慢

目前全球 LED 市場是呈現一個穩健的成長，再加上當前大環境的低迷及新應用產品拓展過慢，因此造成市場上的需求量無法擴大，無法有效的刺激市場，製造商機，因此市場無爆發性的成長出現，針對此，各國無不積極的在擴大內外需，除能疏解產品的過度競爭，另外在經營上，也趨向多元化的發展。

8. 系統整合能力弱

目前國內業者成品於元件設計部份能力尚可，但對於整體系統整合這方面的設計能力，多還需仰賴國外技術，於發展上，受到不少限制，無法居於技術主導的地位。

9. 上游技術水平未能完全符合中下游需求

儘管目前國內上游業者於中、下游廠商在產量上的供應是不虞匱乏，但一些特殊規格(較高單價)產品，如藍、綠、白光 LED 及紅外光模組設計等，還需仰賴進口，造成成本上的負荷，中、下游廠商也希望上游業者能早日達成目標，以建構一自給自足的產業環境。

➤ 結論

LED 的應用市場很廣，其中較具發展潛力的主要有手機、汽車、交通號誌、戶外看板及照明市場；目前台灣廠商的發展方面，是以藍光 LED 為主流，但未來廠商要走向白光 LED，若白光 LED 能夠成熟量產之後，則以照明市場最大且最具潛力。展望未來，高效率光源和兼具環保及耐久的省電照明是時代發展趨勢，屆時，LED 產業將因產品應用持續擴大與技術創新而大放異彩。

► 參考資料

1. 「光電元件應用技術(增訂版)」，許書務、游金湖，全華科技圖書，90年2月。
2. 「電子與光電子材料」，詹國禎、朱建國，新文京開發出版，91年12月。
3. 「白光發光二極體簡介」，陳興，工業材料，162期，民國89年6月。
4. 「當代光電工程」，廖顯奎，滄海書局，民國95年11月。
5. 「光電半導體元件」，黃俊達、陳金嘉、楊奇達、楊國輝、雷伯勳(原著：K. O. Kasap)，台灣培生教育出版，2006年1月。
6. 「白光發光二極體製作技術-21世紀人類的新曙光」，劉如意、王健源，全華科技圖書，民國90年10月。
7. 「白色光發光二極體發展動向」，陳興，零組件雜誌，民國89年4月號。
8. 「白光LED燈板封裝設計及製作」，許榮宗、韓偉國、陳秋伶，照明學刊 第十二卷第五期，2002。
9. 「GaN 藍光發光及雷色二極體之發展現況」，史光國，工業材料，第126期，民國86年6月。
10. 「發光二極體 用氧氮螢光粉介紹」，劉如意、劉宇恒，全華科技圖書，民國95年11月。
11. 「半導體元件物理基礎」，王廣發，儒林圖書，1996年7月。
12. 「現代半導體發光及雷射二極體材料技術」，史光國，全華科技圖書，2001年5月。
13. 「深入解析LED產業市場焦點」，拓璞產業研究所，2005年1月。
14. 「白光LED新興市場機會與材料發展趨勢」，經濟部技術處，民94年8月。
15. 「LED上游磊晶產業分析」，王志方，台灣工業銀行，2006年4月。
16. 「工研院經資中心ITIS計畫」專題研究：
 - 「EFL燈源特性」，張文珊，民國95年4月11日。
 - 「全球LED市場規模」，林志勳，民國95年4月3日。
 - 「高亮度LED市場規模」，林志勳，民國95年7月11日。
17. N. Holonyak Jr. and S. F. Bevacqua, "Coherent (Visible) Light Emission from Ga(As_{1-x}P_x) Junctions," Appl. Phys. Lett., vol.1, Issue 4, (1962)
18. Philips Lumileds Luxeon Company, Technical Datasheet DS51,DS46,DS40
19. Osram Company, Technical Datasheet LW T67C, LW T6SG
20. F. M. Steranka, J. Bhat, D Collins and L. Cook et al., "High Power LED-Technology Status and Market Applications," Phys. Stat. Sol. (a), vol. 194, Issue.2, (2002)
21. D. A. Steigerwald, J. C. Bhat, D. Collins, R. M. Fletcher, M.O. Holcomb, "Illumination With Solid State Lighting Technology" Proc. of IEEE, vol.8, (2002)
22. Nikkei Microelectronics 雜誌
23. 光電科技雜誌 <http://csot.acesuppliers.com/news/new.asp>
24. 工業研究院 http://www.itri.org.tw/chi/services/ieknews/iek_news_cat.jsp
25. 威力盟電子 <http://www.wellypower.com.tw/>

26. 世新大學陳鴻興助理教授色彩管理的兩種思考方式：sRGB v.s. ICC。
27. LEDinside <http://blog.ecstart.com/batch.viewlink.php?itemid=2137>
28. 全球華文行銷知識庫
<http://www.cyberone.com.tw/ItemDetailPage/SearchResult/05SearchResult.asp?Keyword=LED>
29. 聚亨網 <http://www.cnyes.com/>
30. 奇摩股市 <http://tw.stock.yahoo.com/>