

# 半導體膠體量子點之未來應用 —— 白光LED

■ 陳學仕

## 一、引言

目前全球民生及工業照明所消耗的能源約佔整體能源耗用之20~25%，因此各主要能源消耗國均積極研發下世代之節能照明產品，以期降低能源短缺所造成的衝擊。照明裝置約可區分為三種：白熾燈泡、放電燈及固態光源。白熾燈是利用熱阻絲(如鎢絲)在通過電流，高溫時產生之熱輻射，又熱輻射光譜連續且跨越可見光區，因此肉眼見為白光，常見的產品如鎢絲燈泡。放電燈係利用燈管內通電之電極，使管中之氣體(如氣體汞)產生紫外光，並激發燈管內壁之螢光物質，產生肉眼可見之光線，常見產品如日光燈。前者耗電且易碎，後者有汞污染的環保問題。

半導體固態光源體積小、重量輕、效率高、堅固且壽命長，是各國皆看好之未來照明設備。半導體固態光源為一種可發光之半導體二極體，故稱為發光二極體(Light Emitting Diode, LED)。發光二極體為P型半導體與N型半導體界面(P-N Junction)之電洞與電子復合(Recombination)產生光，因產生光之機制為電子/電洞復合，與鎢絲燈因熱產生光的原理不同，故又稱為冷光，但實際上磊晶過程可能

產生晶體缺陷，降低電子/電洞復合機率，故仍有部分能量，經熱振動釋放會產生些微熱量。發光二極體產生光之波長，則由半導體材料組成及結構決定。

因材料及半導體製程技術的演進，使發光二極體產品亮度不斷提升，並可放射出更多的顏色。1960年代，紅、橘光發光二極體首次出現；至1970年代，黃光發光二極體出現在商用手錶及計算機上，之後又出現了綠光發光二極體；1993年日商日亞公司(Nichia Co.)成功開發出高效率的氮化鎵藍光發光二極體，宣告發光二極體全彩之時代已經來臨。1996年時，日亞公司又以藍光發光二極體為基礎，發表了藍/黃光互補型之白光發光二極體(簡稱為白光LED)。因日亞之藍/黃光互補型白光LED之製程簡單、成本較低，故引起各照明大廠競相投入研發並生產。表一為幾個常見光源與白光LED之比較。

1998年日本通產省(MITI)投入「21世紀照明計畫」，並結合日本三十餘家廠商，開發以氮化鎵半導體為主的光源技術，預計在五年內投資4,000萬美元。美國能源部亦於1999年的半導體照明光源白皮書中，規劃十年投入5億美元的國家型研究計畫，接著歐盟、韓國

表一 常見白光光源之功率、發光效率與使用壽命比較表

光源種類	功率(W)	發光效率(lm/W)	壽命(hrs)
白熾燈	15	8	1,000
白熾燈	100	15	1,000
長壽命型白熾燈	135	12	5,000
鹵素燈	20	12	3,000
鹵素燈	300	24	3,000
精緻型鹵素燈	50	12	2,500
精緻型螢光燈(省電燈泡)	11	50	10,000
螢光燈	30	80	20,000
白光 LED (2000 年)	-	20	100,000
白光 LED (2002 年)	-	30	100,000
白光 LED (2005 年)	-	40	100,000
白光 LED (2010 年)	-	50	100,000

白光 LED 效率及壽命，依據 LED 接面溫度 85°C 下得之

資料來源：ITIS, 2003年4月

等也順應世界潮流發展，推出國家型的半導體照明計畫。另外，世界三大照明公司，如奇異(GE)、飛利浦(Philips)及歐斯朗(OSRAM)等也紛紛與LED大廠合作，投入LED照明產品開發，由此可見白光LED在未來光源之重要性。因白光LED省電、質輕且堅固，目前已逐漸的被應用在手機閃光燈、戶外看板等市場。近年來隨著彩色照相機之發展，白光LED需求成長迅速，預估2006年後之白光LED市場，將以汽車照明及液晶顯示器背光源為主，2008年則將逐漸應用至室內照明。

彩色照相機近年來市場龐大，除了手機面板需使用2~3顆白光LED外，閃光燈亦需使用約3~4顆，按鍵若使用白光LED則須8~10顆。另外，液晶顯示器因屬非自發光型顯示器，需要白光背光源，目前多使用冷陰極螢光

燈管(CCFL)。然而，冷陰極螢光燈管體積大、重量重、耗電，並有汞污染之虞，目前世界各大廠如韓國三星(Samsung)、樂金飛利浦(LG. Philips)及部分國內廠商，均積極投入研發以白光LED作為背光源之液晶顯示器。表二為行動電話上顯示器光源的比較，表三為白光LED作為液晶顯示器光源使用分析。在汽車照明市場，目前白光LED以車內用燈應用為主，未來效率提升後有機會應用至車用頭燈。

根據iSuppli、Strategies Unlimited、國科會、工研院等機構之研究報告指出，2004年全球白光LED市場約32億美元，預估2005年將達到40億美元，成長約19%，佔整體LED產值比重由62%提升至68%。2004年台灣廠商在全球白光LED市場佔有率約為10%，預估將提升到20%以上。

表二 行動電話用液晶顯示器背光源技術比較

	CCFL	LED
所需電壓	300V~1,000V	<5V
所需電流	2mA~5mA	40mA~100mA
相對成本	高	低
優點	高亮度	成本低、省電
缺點	電磁干擾、高功率、小管徑 CCFL 製造難度高	亮度、光線不均

資料來源：世界電子元器件；工研院經資中心(2002年)

表三 白光LED作為液晶顯示器背光之使用分析

液晶顯示器模組		白光 LED 使用分析			
型態	亮度	單位使用量	產品特性要求	供應商	單價(美元/顆)
TFT-LCD	-	2~4 顆	高	Nichia, Toyoda Gosei	>0.6
Transmissive C-STN	>100cd/m <sup>2</sup>	2~4 顆	相對較低	Nichia, Toyoda Gosei, Taiwan	>0.4
Transflective C-STN	>100cd/m <sup>2</sup>	2~4 顆	高	Nichia, Toyoda Gosei	0.6~0.8

資料來源：工研院經資中心(2003年1月)

## 二、白光 LED 及螢光粉

白光光譜為連續光譜，需至少兩種顏色(波長)以上的光混合，才能形成肉眼所見之白光。目前白光LED約可區分為兩種，第一種為三原色型白光LED，係利用紅、綠、藍色三種半導體晶片組合而成，亦稱為多晶片型白光LED(Multi-chip White LED)，或稱為三波長型白光LED(Triple wavelength White LED)。另一種為互補色型白光LED，因僅用單一晶片，故又稱為單晶片型白光LED(Single-chip White LED)。

1993年日亞公司成功開發第一個高亮度藍光LED，因此組合紅光、綠光及藍光三種晶片的多晶片型白光LED。多晶片型白光LED之演色性較佳，但因為使用多個晶片，線路製作較複雜，生產成本相對較高。另外，各發光二極體之衰減速率不同，白光顏色可能在長時間使用後，或是不同工作電流下而改變，故除了部份高演色性需求外，一般將可能被單晶片白光LED取代。

1996年時日亞公司發明單晶片白光LED(Single-chip White LED)。將黃光鉍鋁石榴石(Yttrium Aluminum Garnet, YAG)螢光粉

搭配藍光氮化鎵晶片，成功的製備單晶片型之氮化鎵白光LED。白光之產生為利用一藍光晶片之部分藍光激發黃光螢光粉，使螢光粉產生之黃光與另一部分藍光混合，而產生白光。此型態白光LED僅使用單一藍光晶片及少量之螢光粉，其製程簡單、生產成本低，故目前市場主流以單晶片白光LED為主。另外，硒化鋅系列的白光LED亦使用單一硒化鋅晶片，因效率較低、壽命較短，所以目前較不被市場重視。單晶片白光LED照片如圖一所示。

單晶片白光LED，係利用螢光粉轉換激發光波長而產生白光，又稱為螢光粉轉換型白光LED(Phosphor-converted White LED, pc-White LED)。此白光LED發光效率大約可由封裝技術、半導體晶片及螢光粉三者決定。除了半導體磊晶及封裝技術，螢光粉之研發經費相對較其他兩者低，故目前螢光粉在可見光及近紫外光之吸收與發光效率仍有改善空間。

傳統的螢光粉體大多利用雜質作為螢光粉的發光中心，以YAG為例，原本YAG( $Y_3Al_5O_{12}$ )為氧化物並無發光性質，但經摻雜Ce後，Ce在YAG能帶內可產生新的能階，電子在基態與激發態間躍遷即可產生黃光，YAG一般稱為主體晶格(Host lattice)，Ce稱為活性中心(Active center)。目前商品化之YAG螢光粉多摻雜數種不同的雜質(如Ce、Tb)，以調整其發光波長及效率，因主要摻雜以Ce為主，故較理想的表達方式是YAG:Ce，但一般仍習慣稱為YAG。傳統螢光粉之組成及結構較複雜，主體晶體與發光中心間的能量移轉機制較難確認，不易藉由理論描述及調整其發光行為，所以目前螢光粉的研究，仍需要長時



圖一 單晶片氮化鎵(InGaN)/YAG螢光粉白光LED

間的重複實驗，才能達到預期的發光或吸收光波長。

### 三、膠體量子點

近十年來奈米科技發展迅速，其中最具有代表性的是奈米晶體之成長技術。奈米晶體在小於10nm時，表現出明顯的量子效應，材料性質迥異於一般大尺寸材料(塊材)。在塊材中，因材料的電子波長遠小於材料尺寸，所以無法觀察到明顯之量子效應；而當材料尺寸縮減到與電子波長相近或是更小時(約在數奈米，依材料而定)，因電子之波函數會受到晶體邊界條件影響，所以無法像在塊材內一樣自由的運動，此種效應即稱為量子侷限效應(Quantum Confinement Effect, QCE)，此奈米尺寸材料則稱為量子點(Quantum Dots, QDs)。受到量子侷限效應影響，量子點之電子傳輸性質也受到影響，能帶結構(Band structure)產生變化，因此光、電、磁質與塊材相異，並可藉由尺寸控制性質。對具有發光性質的直接能隙半導體

晶體而言，晶體尺寸降低到數奈米後，載子複合機率大幅增加，所以發光效率大幅超越塊材，且可由尺寸控制吸/放光波長。

II-VI族半導體如鋅化物 $ZnX$ ( $X=S, S, Te$ )或鎘化物 $CdX$ ( $X=S, Se, Te$ )，為直接能隙半導體，常用於發光或感光元件。早期合成奈米粒子的方法多以膠體水溶液在室溫下聚合，然而此法製得的奈米粒子粒徑分佈不均，結晶缺陷多，所以較難觀測到量子侷限效應。1993年MIT的研究團隊，用非水相式的膠體化學法，在高溫下( $\sim 360^\circ C$ )裂解有機金屬前驅物，得到單一尺寸分佈、且高結晶性的硒化鎘奈米粒子，並發現硒化鎘具有高發光效率，且能隙隨尺寸縮小而變大<sup>(1)</sup>。此方法直接加熱界面活性劑作為溶劑，並非一般的膠體水溶液，所以也稱高溫熱裂解法。2000年Peng研究團隊，成功以氧化鎘取代昂貴且危險的有機金屬，得到硒化鎘量子點，2002年工研院亦以類似方法，發展以氧化鋅粉末製備硫化鋅、硒化鋅、碲化鋅膠體量子點<sup>(2)</sup>。

另外，因膠體量子點粒徑甚小，表面缺陷會影響其發光效率，且因其表面能大，易受到外界的影響，因而降低發光強度。為移除量子點表面缺陷，並有效隔絕外界環境影響，量子點可藉由在晶體表面，磊晶成長一層高能隙材料如硫化鋅或硒化鋅，形成核/殼量子點(Core/Shell Quantum Dots)，一方面可以鈍化量子點，另一方面更有效的侷限晶體內之載子，此材料一般稱為殼層<sup>(3)</sup>。除了高能隙半導體殼層外，以有機分子物如Trioctylphosphine Oxide (TOPO)亦有類似效果，但改善幅度不如無機材

料，TOPO分子一般會吸附在量子點表面，也增加了量子點在有機溶劑中之分散性。

硒化鎘量子點為目前製備最成功、研究最廣泛的半導體膠體量子點。硒化鎘塊材之能隙約 $1.72 eV$ ，發光波長約在 $720 nm$ 。根據量子點侷限效應理論，硒化鎘量子點之發光波長會隨尺寸減少而藍移至可見光，目前工研院硒化鎘量子點可藉由精確的尺寸控制，調整其發光波長在藍光~紅光( $480 nm \sim 640 nm$ )，發光尖峰半高寬小於 $28 nm$ (圖二)。另外，硒化鋅塊材為高能隙材料(能隙 $\sim 2.70 eV$ ，發光波長 $\sim 460 nm$ )，可控制發光波長介於近紫外光~藍光( $370 nm \sim 440 nm$ )，發光尖峰半高寬小於 $25 nm$ (圖三)。

硒化鎘膠體量子點之光激發光效率高(Quantum Yield $>40\%$ )，發光波長在可見光範圍，並可由藍光或紫外光激發，可作為白光LED之螢光粉。相較於傳統螢光粉，此膠體量子點之製備時間及程序均佔優勢。傳統螢光粉YAG的製備時間，從前驅物合成、燒結到研磨完成，至少需要一天，製備程序較複雜、時間較久、且因燒結需消耗大量能源，生產成本高。膠體量子點之合成方式為化學反應，藉由高溫( $\sim 300^\circ C$ )熱裂解其前驅物，反應程序較單純，合成時間僅需 $1 \sim 2$ 小時，原料價格亦不高，較佔優勢。另外，膠體量子點表面自然會吸附有機分子，所以在溶劑中的分散性佳，在樹脂中分散容易，對白光LED之發光效率及發光均勻度，均有改善效果。表四為硒化鎘量子點與YAG之比較。

此外，因受到半導體量子點發展的影響，近年來亦有許多螢光粉之研究團隊製備奈米級

螢光粉，希望能觀察到如同半導體量子點之量子性質，以提升傳統螢光粉之發光效率。大部分的文獻結果顯示，奈米螢光粉之發光效率不如一般微米級螢光粉，其原因可能是材料吸收光能力下降，或是表面缺陷降低發光效率所致。

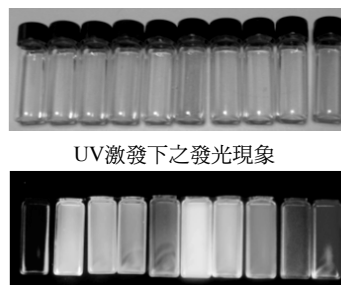
#### 四、藍光氮化鎵/硒化鎘量子點白光 LED

硒化鎘膠體量子點在精確的粒徑控制下，可發出藍、綠、黃、橘及紅光，激發波長約在380~480nm，可由藍光或紫外光激發，並結合目前成熟之藍光氮化鎵晶片與「黃光硒化鎘量子點」或「綠光+紅光硒化鎘量子點」，即可得單晶片之藍/黃光互補型，或紅/綠/藍三波長型白光LED。

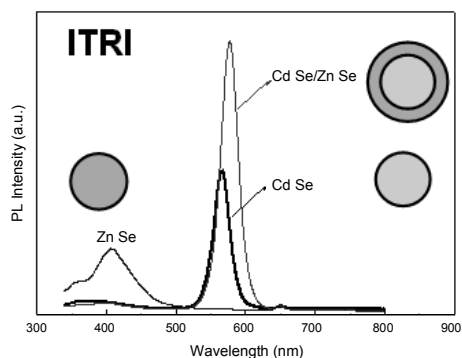
以量子點作為白光LED螢光粉之製備，其程序類似傳統螢光粉，首先量子點需與樹脂摻混，因膠體量子點可溶於有機溶劑中，接著將摻混物塗佈至表面附著型(Surface Mounted Devices, SMD)氮化鎵晶片上，再經由熱烤使樹脂硬化後，即完成初步的白光LED製作。圖四為雙波長藍/黃光氮化鎵/膠體量子點白光LED之電激發光光譜。將3.3nm(發光波長為570nm,黃光)或3.8nm(發光波長為590nm,橘光)之膠體量子點與氮化鎵(460nm)組合，可得到不同色度座標的LED。除了發光波長，膠體量子點在樹脂中之含量亦須考慮，一般螢光粉使用量約在10~20wt%左右，其膠體量子點之多寡，可能影響色度座標及發光效率。另外，晶片塗佈方式及樹脂硬化條件，亦會影響最後元件光譜。

相較於日亞以YAG為基礎之白光LED專利網，以黃光量子點作為白光LED之螢光粉，具有相當大的潛力。但如同目前YAG型的白光LED一樣，此互補色白光LED之演色性較低，對某些顏色的物體，較難顯現正確的顏色。該公司近來發表了涵蓋至部分紅光的氮化鎵/YAG白光LED，希望能改善演色性，推斷其可能混入部分橘紅光螢光粉或其他雜質。

不同粒徑之量子點溶於有機溶劑



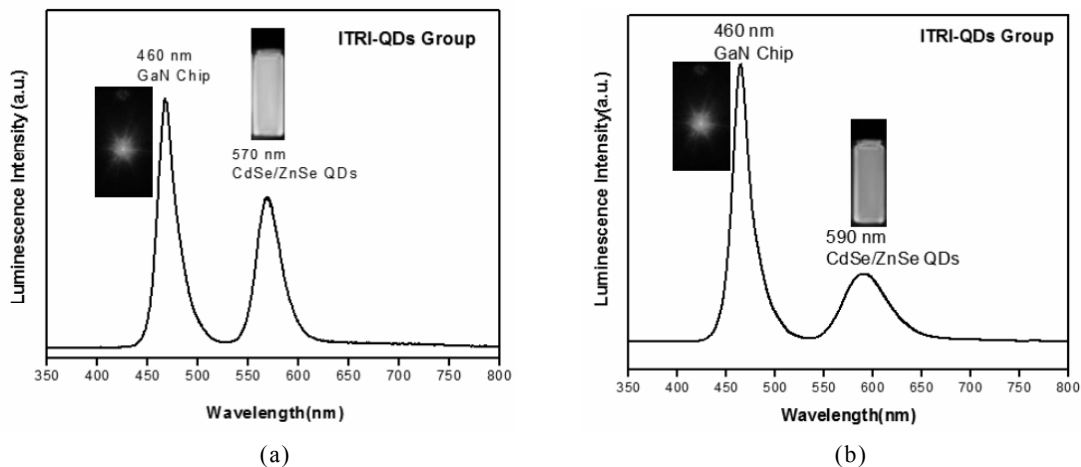
圖二 工研院之膠體量子點光激發光譜



圖三 核/殼硒化鎘/硒化鎘量子點之光激發光譜圖。經由硒化鎘殼層之鈍化，硒化鎘之光激發光強度增加至少一倍，圖形左邊為同樣實驗條件下成長之硒化鎘之光激發光譜，顯示硒化鎘並未單獨形成晶體。

表四 硒化銅量子點與YAG之製程及優缺點比較

鈮鋁石榴石 Yttrium Aluminum Garnet(YAG, Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )		CdSe 膠體量子點 (CdSe/ZnS, CdSe/ZnSe, CdSe/CdS Quantum Dots)
粒徑	5~20μm	2~6 nm
製備方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 膠體共沈法(Coprecipitation)</li> <li>■ 檸檬酸凝膠法(Citric gel method)</li> <li>■ 固態燒結法(Solid state method)</li> </ul>	熱裂解法 (Thermal decomposition approach)
優點	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 傳統優良螢光粉</li> <li>■ 藍光激發之發光效率高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 在樹脂之分散性佳，白光 LED 發光範圍較均勻</li> <li>■ 發光效率高，理論發光效率接近 100%</li> <li>■ 藍光或 UV 光皆可激發</li> <li>■ 與目前 InGaN/YAG 製程相容</li> </ul>
缺點	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 熱穩定性較差</li> <li>■ 吸收範圍窄，僅能吸收460nm附近之藍光光源</li> <li>■ 無法用UV LED激發</li> </ul>	目前較不成熟，元件穩定度尚需釐清及解決



圖四 雙波長氮化鎵/膠體量子點白光LED發光光譜。(a)為黃光核/殼硒化銅/硒化鋅量子點；(b)為黃光核/殼硒化銅/硒化鋅量子點。由圖可知，利用藍光氮化鎵晶片與不同粒徑之核/殼硒化銅/硒化鋅膠體量子點組成，可得到互補色之白光

為了解決日亞公司專利限制及藍/黃互補色白光LED之低演色性問題，目前一般認定的白光LED之發展方向為「紫外光氮化鎵晶片+紅/綠/藍三色螢光粉」，Toyota Gosei於

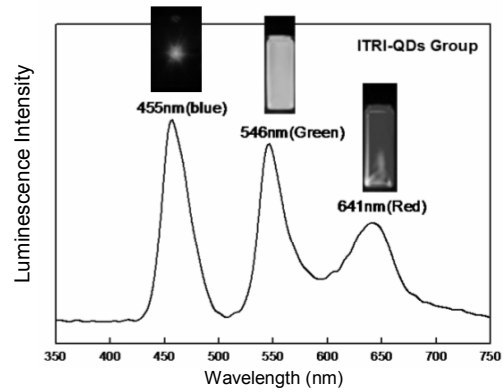
2003年發表此型白光LED。紫外光白光LED之演色性較佳，發光原理類似日光燈管，係利用氮化鎵晶片產生之紫外光激發三色螢光粉，因日光燈原理為成熟技術，所以專利限制問題

較小，但仍有部分廠商申請相關保護專利。另外，日光燈用螢光粉為成熟產品，所以可直接應用至紫外光白光LED。然而此螢光粉之激發波長約在254nm(即氣體汞之輻射波長)，無法有效吸收氮化銦鎵晶片所產生之近紫外光(約380nm)能量，所以目前高效率之近紫外光螢光粉研發仍持續進行中。

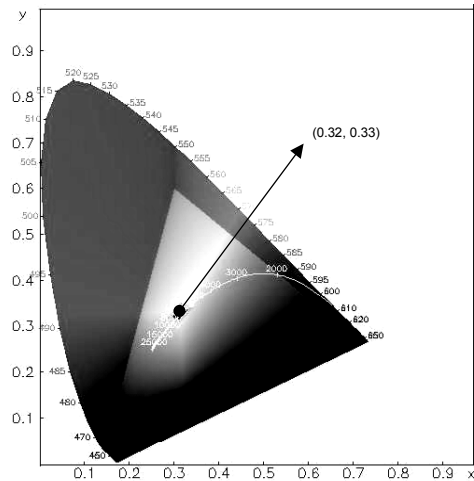
本研究利用綠光與紅光硒化鎘量子點，以藍光晶片作為激發光源，製備單晶片三波長型之白光LED。將適當比例的2.8nm(發光波長為546nm,綠光)與5.1nm(發光波長為641nm,紅光)膠體量子點與樹脂混合後，塗佈至455nm之表面附著型氮化銦鎵晶片上，當晶片通過電流時產生藍光，部分藍光激發了膠體量子點，產生紅光與綠光，並與部分未被吸收的藍光混合，即產生三波長光譜，白光LED色度座標為(0.32,0.33)，如圖五及圖六所示，經由適當的比例可得到不同色度或色溫。另外，由此光譜可知，藍綠光位置之發光強度偏低，因此可由適當粒徑的量子點調配補足。所以，藉由膠體量子點可製備演色性趨近於自然光的白光LED。

## 五、紫外光氮化銦鎵/硒化鋅量子點白光LED

2002年本研究團隊亦同時進行硒化鋅量子點之發光研究。目前已製備出具有白光光譜之硒化鋅量子點，並利用近紫外光氮化銦鎵晶片作為激發光源，成功製備出新型的白光LED，除了已申請相關專利，目前部份結果也已發表在著名國際期刊<sup>(4~5)</sup>。



(a)



(b)

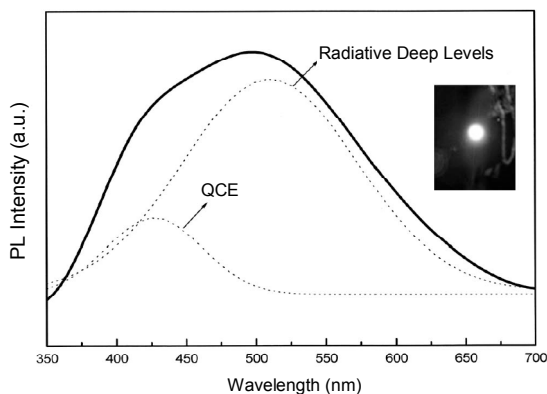
圖五 三波長氮化銦鎵/硒化鎘量子點白光LED。白光LED使用單一氮化銦鎵晶片，以及紅光、綠光核/殼硒化鎘/硒化鋅膠體量子點



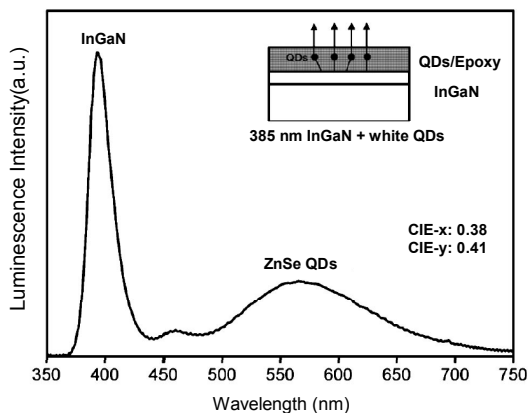
圖六 工研院之氮化銦鎵/量子點白光LED



圖七白光硒化鋅量子點之光激發光譜。由圖七可知，硒化鋅量子點之發光波帶相當寬廣，演色性佳。另外，藉由適當的調整，可控制白光量子點發光帶之形狀，達到趨近於自然光之光譜。因白光量子點為單一材料產生白光，製備時間僅需2~3小時，亦不需高溫燒



圖七 白光硒化鋅膠體量子點之光激發光譜圖形，激發波長為325nm，右上插圖為量子點照射紫外光後之照片



圖八 紫外光氮化鎵/硒化鋅量子點白光LED之電激發光譜圖形

結，故具有相當潛力。表五為白光硒化鋅量子點與傳統螢光粉在白光LED應用上之比較；應用白光量子點之紫外光白光LED光譜如圖八所示。目前因紫外光晶片之功率仍低，且白光量子點之製程中，其分散問題尚未克服，故此白光LED之效率仍不如目前「藍光氮化鎵+黃光YAG」白光LED，但未來若能提高晶片功率並最佳化製程參數，此新型白光LED在未來具有相當大的潛力。

## 六、結論

目前白光LED在手機、液晶顯示器及特殊照明(需要堅固、省電、壽命長，如手電筒、指示燈或不易維修之實驗室或高處光源等)，已成為市場主流，未來將成為照明產品。然而，目前台灣大多數的白光LED廠商是以日亞公司的「藍光氮化鎵+黃光YAG」為架構生產白光LED，而日亞公司正虎視眈眈著專利侵權問題。另外，雖然已有部分廠商獲得歐司朗公司授權另一類似YAG螢光粉及白光LED，因其效率僅約YAG之70~80%，授權金額亦頗高，且歐司朗並無法保證日亞公司不會對其進行侵權訴訟，所以專利問題仍為目前國內白光LED廠最大的隱憂。

台灣廠商在世界上被公認具有優異的生產能力，可惜的是大部分都缺乏關鍵性的原創技術及專利，往往需要取得國外大廠之技術授權，並支付大筆權利金，甚至可能讓國外廠商予取予求。為解決此問題，除了要積極整合國內上中下游各廠，廠商應具有永續經營的理念，除了生產營利，還需投入更多的研發能量，以開發更新、更有效率的產品。

表五 白光量子點與傳統三色螢光粉之比較

	白光量子點	三色螢光粉
白光原理	單一材料激發白光	需三種不同螢光粉混合才可產生白光
顏色調整	可任意調整發光波長	無法調整波長
演色性	具超寬白光譜，演色性佳	三波長光譜
激發波長	近紫外光(340~400nm)，適合 UV InGaN 晶片激發	中紫外光(254nm)，以 InGaN(近紫外光)晶片激發之發光效率低
製程	熱裂解 300°C, ~2 小時	燒結>1,000°C, 1~2 天
成本	較低	較高
白光 LED 效率	尚待提升，因分散性不佳	尚待提升，因無法吸收 InGaN 晶片能量

當年日亞公司投入的研發經費，約佔其年營業額十分之一，但今日來看，當年的研發經費不過是今日日亞公司盈餘的零頭。以台灣的环境，大部分廠商習慣以當前的利益為重心，較缺乏開創及永續經營的概念。台灣的半導體技術世界聞名，然而各廠之間的競爭及研發能量則太過發散，無形中消耗了與國外大廠的競爭力。所以，台灣廠商應共同致力於未來的發展，除了產業界，也應與學研單位建立良好的互動關係，與其個別爭取眼前蠅頭小利，不如共同放眼未來。

## 參考文獻

1. C. B. Murray et al., J. Am. Chem. Soc. 115, 8706 (1993).
2. H.-S. Chen et al., J. Phy. Chem. B 108, 17119 (2004).
3. B. O. Dabbousi et al., J. Phys. Chem. B 101, 9463 (1997).
4. H.-S. Chen et al., Appl. Phys. Lett. 86, 131905 (2005).
5. Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology 11, 13, April 4 (2005).

## 作者

陳學仕 / 工研院化工所高分子組研究員

## 更正啟事

第22期奈米專欄「半導體膠體量子點之未來應用－電激發光元件」之 M.G. Bawendi 教授誤植為 M.G. awendi 教授及 M.G. Bawedi 教授，特此更正。