



工業技術研究院  
Industrial Technology  
Research Institute

*Nano Information for Industrial Applications*

奈米技術

產業資訊

第3期

2014年10月

# 前 言

政府投入奈米科技發展已經超過 10 年，近年來全球各種奈米材料製造技術與產業應用亦持續發展中。為協助國內廠商了解全球奈米材料與應用技術最新趨勢，工研院將每季發行「奈米技術產業資訊」。此產業資訊內容主要包括最新奈米材料與應用產品開發資訊、全球奈米風險管理現況、應用產品市場趨勢、及技術專題報導等。此外，我們將在每期「奈米技術產業資訊」發行後，邀請廠商參加奈米技術論壇，透過邀請國內外專家來分享該期重點報導內容，以促進更多跨領域產業間的資訊交流與商業機會。希望透過這樣產業資訊收集與分享平台，能對國內廠商導入奈米技術提升產品附加價值做一些貢獻，協助推動台灣奈米技術應用產業化的腳步。

工研院產業經濟與趨勢研究中心  
工研院材料與化工研究所  
(奈米科技產業化推動專案)  
2014 年 10 月

---

編輯委員：工研院 張敏忠(產經中心)、汪若蕙(材化所)、宋清潭(材化所)

聯絡人：游雅娟

聯絡電話：03-5912736

Email: [YaChuan\\_0810@itri.org.tw](mailto:YaChuan_0810@itri.org.tw)

聯絡地址：新竹縣竹東鎮中興路四段 195 號 10 館 302 室

# 本期摘要

本期奈米材料與產業應用資訊報導重點，主要包括量子點的應用、奈米材料在儲能的應用、透明導電膜應用、奈米複合材料等。量子點可提升 LCD 顯示器色彩飽和度形成和 OLED 顯示器競爭、可提高 LED 照明的光演色性指數等，預期將加速量子點的市場發展；儲能方面鋰離子電池導入奈米材料提升電池效能，包括奈米碳球包覆鋰陽極材料增長電池壽命、多壁奈米碳管塗層隔離膜提升電池安全性、多孔性矽粉末負極材料增長電池壽命；磷酸鐵類電極材料中混合特殊的奈米碳實現了蓄電池小型化和大容量化。此外報導石墨烯材料應用於高透明與高導電之超薄膜，奈米鋁線金屬網格之透明導電膜應用於可撓性大面積互動式觸控螢幕；奈米複合材料包括石墨烯紙應用於電子元件的導熱材料，石墨烯海綿可利用太陽光將水轉化成水蒸氣。

本期奈米風險管理方面包括，丹麥開始實施一般大眾關於含有奈米物質的混合物及產品的製造商和進口商，強制要求進行年度申報；德國 BASF 公司的 Tinosorb® 列入歐盟新化妝品法規正面表列的 UV 隔離劑，是第一個在歐洲獲准使用於化妝品、粒子尺度小於 100 nm 的 UV 隔離劑。奈米銀對水生生態毒性影響及法規的規範應可以保護水生生物安全性；經濟合作暨發展組織發佈工程奈米物質物理化學特性及測試指引的專家會議報告，包括奈米材料的分散和聚集性、大小及粒徑分布、表面積和多孔性、表面反應性等試驗指標。

本期奈米材料應用產品之市場趨勢，包括『鋰電池應用之奈米材料』與『量子點的應用與市場趨勢』。專題報導特別邀請清華大學材料系陳學仕教授介紹量子點技術與應用發展，量子點在生物影像螢光標計、防偽標籤、廣色域顯示器、白光光源已經進入實用開發階段，預計在未來 10 年會成為一新興產業，在行動裝置及顯示器產業扮演極重要的角色。

## D. 專題報導

### 量子點技術與應用發展

陳學仕教授 國立清華大學材料系

#### 螢光量子點簡介

近年來奈米科技發展迅速，其中最具代表性的是螢光量子點之發展與應用，具有明顯量子侷限效應的奈米晶體，稱為量子點，因量子點甚小，巨觀上可視為一個點，經常被視為是一種零維晶體，而線狀的奈米晶體則被稱為一維的量子線。一般小於 10 nm 的奈米晶體會有較明顯的量子效應，性質迥異於的大尺寸相同晶體，以半導體量子點為例，當晶體尺寸降低到數奈米後，材料性質（如能帶結構、晶體表面組成...等）會隨尺寸變化，例如晶體之發光波長隨尺寸變化，另外，因量子點尺寸甚小，晶體內之載子（carriers，如電子與電洞）如同被侷限在微小空間，載子複合機率大幅增加，使得某些材料之載子複合效率可近 100%，輸入的能量可大部分轉換為光能，能源損耗極低，此兩種性質－材料性質隨尺寸變化、載子運動行為變化，即所謂的量子侷限效應（Quantum Confinement Effect）或簡稱量子效應（Quantum Effect）所造成。因此，半導體量子點有許多嶄新的物理性質與應用，許多文獻已提供了許多新的研究方向，目前多以光電材料或元件為主，如量子點電激發光元件、量子點生物感測器、量子點太陽電池、白光發光二極體(LED)...等，其中，最受矚目的為發光二極體及太陽電池之應用，前者已逐漸進入應用階段，後者目前為近年來研究快速發展之科研課題之一。

一般常見量子點為化合物半導體，如 II-VI 族的硒化鋅(ZnSe)、硫化鋅(ZnS)、硒化鎘(CdSe)、硫化鎘(CdS)、硒化鉛(PbSe)、硫化鉛(PbS)...等，或是 III-VI 族的砷化鎵(GaAs)或磷化銮(InP)，純物質 IV 族的矽(Si)、碳(C)或金屬 Au 奈米顆粒，近年來也受到很大的關注。到目前為止，研究最廣泛的量子點為 CdSe 量子點，因合成的 CdSe 量子點晶體品質較佳、缺陷較少及光電性質優異，CdS 量子點亦有許多研究，主要其一維的量子柱性質較佳，另外非鎘系列的量子點晶體品質稍差，仍有很大發展空間，目前主要以 InP、ZnSe 與 ZnS 為主。以目前最佳的 CdSe 量子點為例，一般 CdSe 塊材之能隙約 1.72 eV，發光波長在近紅外光( ~720 nm )，根據量子點侷限效應理論，CdSe 量子點尺寸越小，發光波長會變短，從近紅外光變為紅光、橙光、黃光、綠光、藍光...等可見光，發光顏色僅由晶體尺寸控制即可，因此只要能將尺寸控制恰當，製備一尺寸分布較小的 CdSe 量子點，即可得到純紅、純綠或純藍顏色的量子點如如不同的量子點之光激發光光譜（由左至右：硫化鋅、硒化鋅、硫化鎘、硒化鎘、硫化鉛），發光波長從紫外光延伸至紅外光，同一種材料可以由尺寸控制發光波長。中間插圖為 CdSe 量子點之穿透式電子顯微鏡圖片，上方插圖為不同尺寸的 CdSe（右）

及 ZnSe (左) 量子點分散於甲苯後在 UV 光下之照片，圖下方標示了各材料在大尺寸塊材時之發光波長。(資料來源：清華大學量子點實驗室，部分資料源自於工研院)。圖 1 不同的量子點之光激發光光譜 (由左至右：硫化鋅、硒化鋅、硫化鎘、硒化鎘、硫化鉛)，發光波長從紫外光延伸至紅外光，同一種材料可以由尺寸控制發光波長。中間插圖為 CdSe 量子點之穿透式電子顯微鏡圖片，上方插圖為不同尺寸的 CdSe (右) 及 ZnSe (左) 量子點分散於甲苯後在 UV 光下之照片，圖下方標示了各材料在大尺寸塊材時之發光波長。(資料來源：清華大學量子點實驗室，部分資料源自於工研院) 圖 1 所示，藉由簡單改變粒徑或材料，即可得到橫跨紫外光—紅外光發光波長的量子點，因此，目前已有許多應用研究，如螢光標記、照明或光源、太陽電池、顯示器或一些安全性標籤...等，部分甚至已經商品化，新的用途仍有不少研究單位或是廠商投入開發，顯示了量子點廣泛應用的潛力。

一般量子點在光電方面的應用，會在量子點表面在成長一層「殼層」，稱之為「核/殼量子點」(Core/Shell Quantum Dots)，目的是為了消除量子點表面的缺陷 (Surface Defects)，以防止量子點晶體內的載子被表面缺陷所影響，降低了發光效率，「殼層」一般會選擇比「核」的能隙 (Band Gap) 還高的材料，目的是為了阻止載子往較低能量的表面移動，被表面缺陷所捕獲，有時這種消除表面缺陷或懸擺鍵的 (Dangling Bonds) 的過程也稱為鈍化 (Passivation)，殼層材料有時也會根據不同用途，選擇較低能隙或不同能帶結構的材料，如 CdS 或 InAs，以控制載子的運動行為。一般成長 CdSe 量子點後，經常會再成長 0.1—0.3 nm 的 ZnS 作為殼層，形成 CdSe/ZnS 核/殼量子點，這樣的核/殼量子點因為量子侷限效應關係，加上晶體表面極少缺陷緣故，使得光激發光的效率極高，許多文獻都報導了 CdSe/ZnS 核/殼量子點之光激發光之量子效率 (Quantum Yield) 可達到 80% 以上，亦有多篇文獻報導可達 95% 以上，另外，因為 CdSe/ZnS 核/殼量子點的主要發光波長仍由核決定，有時也會忽略殼層，直接以 CdSe 量子點稱呼。

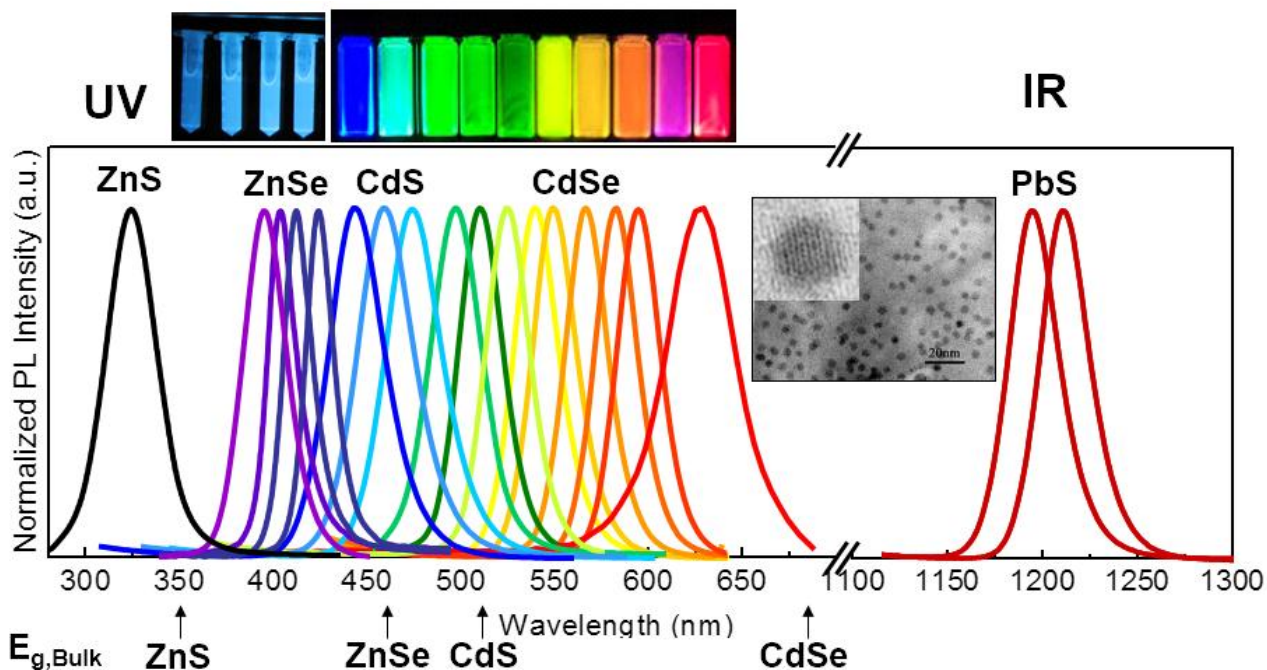


圖 1 不同的量子點之光激發光光譜（由左至右：硫化鋅、硒化鋅、硫化鎘、硒化鎘、硫化鉛），發光波長從紫外光延伸至紅外光，同一種材料可以由尺寸控制發光波長。中間插圖為CdSe量子點之穿透式電子顯微鏡圖片，上方插圖為不同尺寸的CdSe（右）及ZnSe（左）量子點分散於甲苯後在UV光下之照片，圖下方標示了各材料在大尺寸塊材時之發光波長。（資料來源：清華大學量子點實驗室，部分資料源自於工研院）

### 量子點之製備方式

量子點之製備技術可分為真空法及濕式化學法，由濕式化學法製備的量子點成本與品質，皆優於真空法，為目前的主流製備技術。一般濕式化學法製備方式以 CdSe 為例，將 Cd 的前驅物（一般為氧化鎘）在有機酸與界面活性劑（如三正辛基氧化磷, Tri-n-octylphosphine Oxide, TOPO）下加熱到高溫（200–300 °C），再加入 Se 的前驅物（一般為硒的化合物），反應約數分鐘即可得小於 2–10 nm 之 CdSe 晶體，製備步驟簡易，但製程控制上有許多 Know-how，如溫、濕度的控制、加熱時間的掌握及純化程序，皆會影響到最終的量子點品質及光電性質。殼的成長一般在製備 CdSe 量子點晶體後，在較低溫下成長 ZnS 殼層，此步驟亦影響最終的量子點品質，例如，太薄的殼層無法有效保護 CdSe 核，太厚的殼層可能會產生額外缺陷及影響光子或載子進入 CdSe 核內，一般而言在 1–2 層原子層厚度時較佳，控制上需較注意。由濕式化學法製備出之量子點表面具有官能基團（Functional Groups）如 TOPO，因 TOPO 一端的氧會鍵結於量子點表面的鎘，另一端則為碳氫鏈，因此可輕易的分散於非極性溶劑之中（如甲苯、正己烷...），若要使量子點成為水溶性，則需再進行表面修飾或改質或改以水相方式製備量子點，但一般而言，以水相製備之量子點缺陷較多，光電性質較差，目前仍以非水

相方式製備為主。目前市面上已有提供 CdSe/ZnS 量子點產品，係將其分散於非極性溶劑之中，或是分散於醇或水的表面修飾量子點，一般而言量子點價格價高，因目前具備較大量生產技術的廠商僅有數家，國內廠商仍有機會投入。

### 量子點於白光 LED 之技術與應用發展

發光二極體(Light Emitting Diodes, LEDs)光源體積小、重量輕、效率高、堅固且壽命長，目前已逐漸取代傳統照明光源。發光二極體之工作原理為電洞與電子在 P 型半導體與 N 型半導體界面 (P-N Junction) 復合後產生光，因產生光之機制與鎢絲燈因熱輻射之原理不同，故又稱為冷光，但實際上半導體在磊晶過程可能產生一些晶體缺陷，使得部分的能量經由熱振動釋放，仍會產生熱量，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，一般為單色光，如 InGaN 晶片為主要放射波長為藍光。白光需至少兩種顏色 (波長) 以上的光混合後，才能形成肉眼所見之白光，如三原色「紅光+綠光+藍光」混合後即為白光，或是利用互補色，如「藍光+黃光」亦可形成白光。因此，白光 LED 可分為三原色型白光 LED (RGB White LEDs, RGB 白光 LED)，係利用紅、綠及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 or Tri-chromatic White LED)，優點是演色性佳，但多個晶片需用較複雜的電路設計，成本較高，目前大多已被單晶片型白光 LED 取代。目前的單晶片型白光 LED (Single-chip White LED) 主要使用一 InGaN 藍光晶片及黃光鈮鋁石榴石 (Yttrium Aluminum Garnet, YAG) 螢光粉，利用藍光+黃光之互補而產生白光，製程簡單、生產成本低，為目前主流。但以 InGaN 晶片+YAG 為主體之白光 LED 之演色性(Color rendering index, CRI)較差，一般為 70 左右，在演色性需求較高的照明或顯示器背光源方面有所限制，需再以紅色螢光粉改善白光 LED 演色性，但因螢光粉之發光波長及可激發之光源波長固定，可選擇較少，較難調整白光 LED 發光光譜，所以其演色性通常較難高於 90，照明方面無法呈現正確的物體顏色，在液晶顯示器背光源應用方面，可表現的色域或色彩表現也會受到限制。因量子點發光效率高，並可輕易的調整其發光顏色，且多種顏色量子點可由單一波長的 InGaN 光源激發，故在高演色性的光源及超廣色域的顯示器方面極具應用潛力，目前已有少部分廠商引入 (後面詳述)。

CdSe 量子點在精確的粒徑控制下，可發出藍、綠、黃、橘及紅光，並可由藍光或紫外光激發 (激發波長：320–510 nm)，故結合目前成熟之藍光氮化鎵晶片與「黃光量子點」或「綠光+紅光量子點」，即可得單晶片之藍-黃光互補型或紅-綠-藍三波長型白光 LED，圖 2 為雙波長型藍-黃光互補色的 InGaN/CdSe 量子點白光 LED 及其發光光譜，此互補色白光 LED 與傳統 InGaN/YAG 白光 LED 相同，演色性偏低 (< 70)。圖 3 為文獻首篇以藍光 InGaN 晶片+綠光 CdSe 量子點+紅光 CdSe 量子點之白光 LED 之發光光譜圖形，白光 LED 色度座標為正白色 (0.32, 0.33)，光源演色係數 Ra 值為 91，經藍綠光量子

點補足 500 nm 附近之發光波長後，可得到 Ra 值 95 之白光。若針對顯示器背光源設計，改變量子點尺寸分布做更細微的光譜調整後，可得廣色域的 NTSC 100%，甚至超過 NTSC 100% 的色彩表現。目前包含 Samsung、Sony、QD Vision 及 Nanosys 皆延伸此概念（藍光晶片光源+綠光量子點+紅光量子點）投入研發其廣色域顯示器相關產品。

單晶片型三波長量子點白光 LED，目前主要的問題是有穩定度與含重金屬鎘問題。在實際測試中，未封裝的白光 LED 發光衰減速度較快，為量子點氧化問題，封裝後的量子點穩定性則大幅改善，另外，InGaN 晶片的散熱也會影響量子點穩定性，若能改善封裝及散熱問題，量子點可靠性即可改善。對於重金屬鎘的問題方面，白光 LED 外部為塑膠，機械强度高，並不易破裂，即使外部塑膠被破壞，已被封入樹脂之量子點除非經高溫鍛燒，否則量子點較難從樹脂逸出。從另一個觀點來看，即便使用傳統螢光粉，白光 LED 之塑膠部份亦無法經由環境自然分解，仍會對環境造成衝擊，所以若未來廢棄的 LED 需要資源回收，即可解決此問題。因為量子點大幅提升了平面液晶顯示器的色彩優勢，多家廠商已經歐盟申請推延含鎘產品（如顯示器）的豁免期限至 2017 年，但一般估計，若消費者大幅接受含量子點的廣色域平面液晶顯示器後，預期歐盟會再延後豁免年限。另外，非鎘量子點一般性質較含鎘量子點差，但目前快速發展中，如 NANOCO 公司宣稱已可製備公斤級單位之無鎘紅、綠光量子點技術，如圖 4 所示，若未來成長技術持續改進，光電性質可接近 CdSe 量子點，並降低生產成本，預估屆時量子點的應用將有爆炸性的成長。

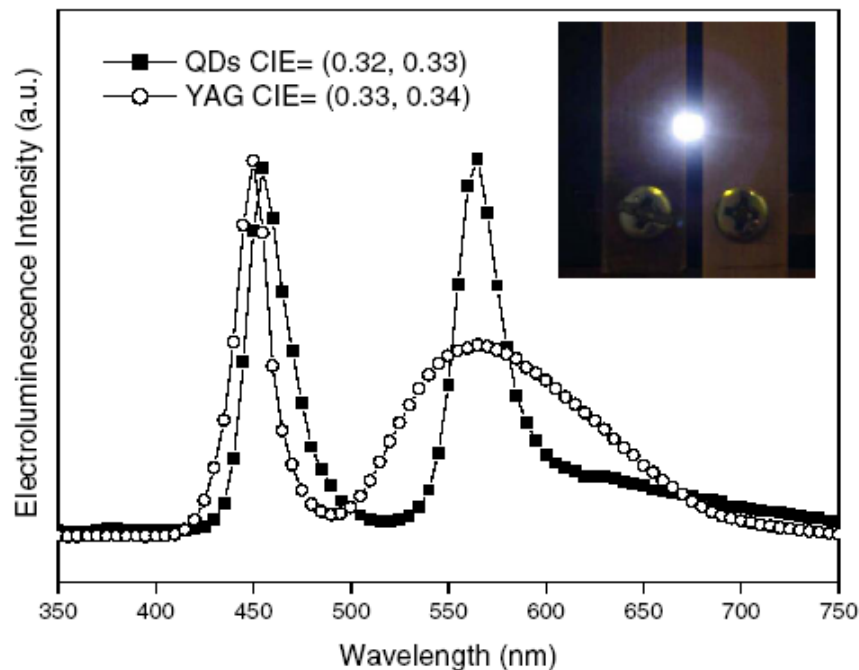


圖 2 雙波長氮化鎵鎂/YAG:Ce(空心圓)與氮化鎵鎂/硒化鎘量子點(實心方塊)之白光LED發光光譜圖形，右上角插圖為白光LED在3.0 V/20 mA下之照片。(資



料來源：Chen et al., IEEE Photo. Tech. Lett. 18, 193, 2006.)

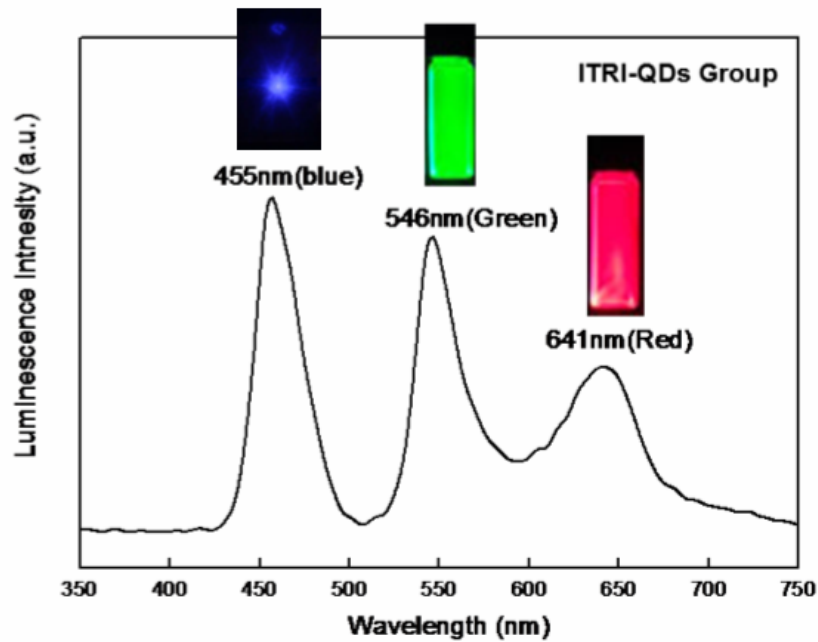


圖 3 三波長氮化鎵鎵/硒化鎘量子點白光LED之光譜，首先使用了單一藍光氮化鎵鎵晶片及紅光、綠光硒化鎘量子點。(資料來源：Chen et al., IEEE Photo. Tech. Lett. 18, 193, 2006.)



圖 4 左圖：NANOCO於2011年發表紅光無鎘量子點製備技術。右圖：2012年發表綠光無鎘量子點製備技術。(資料來源：NANOCO 網站 - <http://www.nanocotechnologies.com/>)

圖 5 為另一形態的量子點白光 LED，使用單一可發白光的 ZnSe 量子點作為螢光粉，並以近紫外光氮化鎵鎵晶片激發之白光 LED 光譜及結構示意圖。此一新型單一晶片 + 單一量子點的白光 LED，為文獻中首個具連續光譜的量子點白光 LED，但發光效率不佳，若改善量子點製備程序，減少缺陷，此白光 LED 在未來仍具有的潛力。

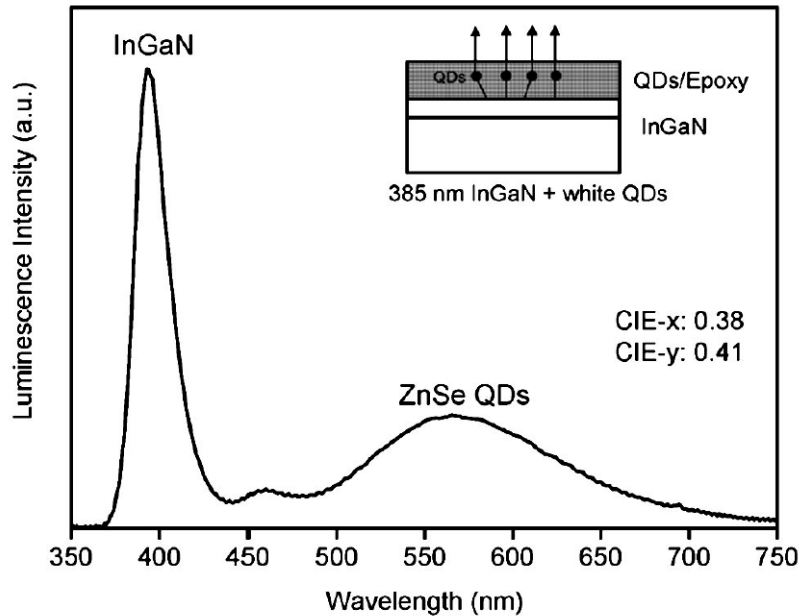


圖 5 以單一硒化鋅白光量子點作為螢光體，並由近紫外光的氮化銦鎵晶片激發之量子點白光LED之光譜，為首顆單一白光量子點LED。(資料來源：Chen et al., Appl. Phys. Lett. 86, 131905, 2005.)

## 量子點應用於平面液晶顯示器的技術與應用發展

自 2012 年開始，Sony、三星集團、LG 集團及國內部分廠商，開始積極投入量子點之研發生產及廣色域顯示器之應用，蘋果公司在 2014 年揭示了多樣量子點顯示器相關專利後，量子點產業及其在未來生活中的應用開發，已經成為現在進行式。自 2007 年起，三星集團即開始積極佈局量子點相關技術，包括量子點製備技術、量子點作為白光 LED 螢光粉、量子點電激發光元件及平面液晶顯示器的色彩增強裝置，有趣的是三星集團原全力推動其 OLED 顯示器，但最近也見到了量子點的應用潛力，開始轉向開發量子點補強的平面液晶顯示器，可見量子點在液晶顯示器市場之應用潛力，據傳聞，三星與 LG 會在 2014 年底或 2015 年初，將推出具量子點補強之液晶顯示器在其行動裝置或液晶電視。

在這一波的量子點發展中，最重要的推手是源於麻省理工學院的 QD Vision 公司及源於加州柏克萊大學的 Nanosys 公司，及首先引入平板電腦的 Amazon 及液晶電視的 Sony。QD Vision 為目前主要的量子點供應商之一，該公司擁有許多量子點的智財，目前具有 39 項專利，另有 200 多項專利申請中，主要技術來源為膠體螢光量子點先期研究者－麻省理工學院的 Vladimir Bulovic 與 Mounji Bawendi 教授，合作廠商包括，Corning, DuPont, Rohm and Haas, GTE/Sylvania, Cabot, E Ink and Color Kinetics...等。QD Vision 原本主要研發量子點電激發光光件，擬以電驅動量子點作為發光體，但 2009 年時轉向了將量子點作為螢光體，將量子點塗佈於一白光 LED，並與 Nexxus Lighting 推出了所謂世界上第一個商

品化的 Quantum Dot/LED Lamp，如圖 6 所示，但此產品叫好不叫座，目前未能大幅應用於一般照明市場。2013 年一月時，QD Vision 發表了 Color IQ™，將螢光量子點引入平面液晶顯示器之背光源之光譜修正與補強，如圖 7 所示，其將紅光、綠光及藍光量子點，引入了液晶電視之後，可具有如 OLED 顯示器一樣的鮮豔色彩，但價格只要 OLED 顯示器的 1/3，目前已經引起市場的關注。Sony 已在最近引入量子點到高階的 BRAVIA 液晶電視，即所謂的 TRILUMINOS Display，其將量子點材料封入玻璃管中，由國內的隆達公司代工，據稱可將 NTSC 色彩表現由原來的 60-70% 提升至 100%。事實上，在 2004 年左右，隆達公司所合併的凱鼎光電公司，即與工研院進行奈米級螢光粉合作，當時工研院量子點研究團隊即已發表世界上首顆以量子點作為螢光體的 R-G-B 高演色性的白光 LED，即圖 3 所示的三波長 InGaN/CdSe 量子點白光 LED。

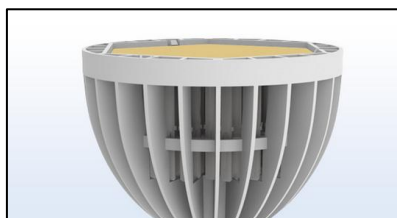
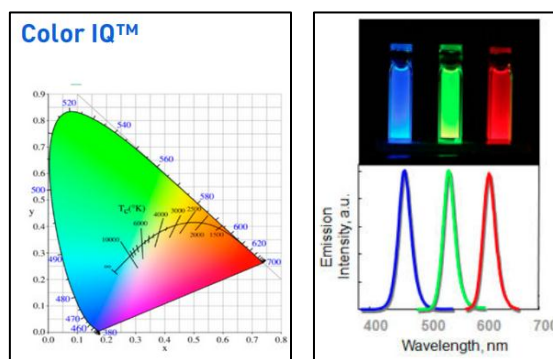


圖 6 QD Vision 在 2009 年將量子點塗佈於白光 LED，增加了白光 LED 之演色性，色溫為 2700K，CRI 為 90，白光 LED 效率為 65 流明瓦。(資料來源：QD Vision 網站 - <http://www.qdvision.com/>)



	<p><b>With Color IQ™ (Simulation)</b></p> <p>QD Vision's Color IQ™ is an innovative semiconductor nanocrystal technology that precisely emits light to produce a far more natural and vivid viewing experience.</p>
	<p><b>Without Color IQ™ (Simulation)</b></p> <p>Prior to Color IQ™, LCD TV designs have had to sacrifice color quality typically only delivering 60-70% of the NTSC color standard. The result – duller images and less color.</p>

圖 7 QD Vision 之量子點產品—QD Vision's Color IQ™。左圖為使用 Color IQ™

之色度座標。中圖為Color IQ™ (即量子點)。右圖為應用其Color IQ™產品至LCD電視之畫面模擬照片。(資料來源：QD Vision網站- <http://www.qdvision.com/>)

另一個量子點開發商為 Nanosys Inc.公司，為 QD Vision 之競爭對手，其技術來源為 UC Berkeley 的 A. P. Alivisatos 教授，亦為早期的量子點研究者之一。主要投資公司有 Samsung, Venrock Associates, Arch Venture Partners, Intel, El Dorado Ventures, Polaris Venture Partners, Prospect Ventures, Harris & Harris Group, Lux Capital, Kodak, and Wasatch Advisors...等。Nanosys 在 2010 年 CES 展覽後發表了一款螢光量子點產品，稱為 QuantumRail，係將紅光及綠光量子點封入一毛細管中，由藍光 LED 激發，所產生的白光之色彩表現較原白光 LED 更佳，如圖 8 所示，實際上此方式僅是將原螢光量子點由藍光晶片上移到了毛細管內，白光產生原理仍相同。隔一年後，Nanosys 改將螢光量子點分散於高分子（如 PET）中，製備成為一高分子/量子點混成薄膜，在 2011 年五月的 Society for Information Display（SID）顯示器展發表了所謂的量子點增強薄膜（Quantum Dot Enhancement Film），又稱 QDEF，其目的是要改善白光 LED 背光源之演色性及液晶顯示器之色彩表現，如圖 9 所示，背光源為仍為藍光光源，激發高分子薄膜內的紅光、綠光量子點。與 QuantumRail 之差異僅是結構上的不同，但製造上僅要將此薄膜加入 LED 背光模組上，對原顯示器的製程影響小，設備成本低，市場接受度較高。另外，雖然 Nanosys 所顯示的結構圖皆以藍光晶片激發螢光量子點以產生白光，但實際上，可能仍以傳統白光 LED 之 YAG 螢光粉為主體加上螢光量子點來調整其發光光譜，此方式對目前製程變動較小，較具可行性，且考慮量子點之成本與長時間使用之色彩衰減，以螢光量子點做為唯一螢光體的白光 LED，目前仍有技術需要克服。2013 年時，Amazon Kindle Fire HDX 7 引入了 Nanosys 的 QDEF 量子點增強膜，色彩表現令人驚艷（圖 10）。2014 年 8 月，華碩亦推出了包含 QDEF 量子點增強膜的筆記型電腦（Zenbook NX-500），如圖 11 所示。

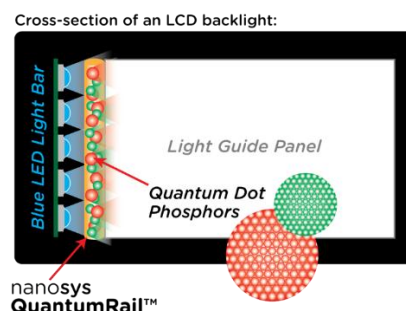


圖 8 Nanosys的QuantumRail產品。左側為藍光LED激發光源，加上一包含紅、綠光量子點之毛細管。(資料來源：Nanosys網站)

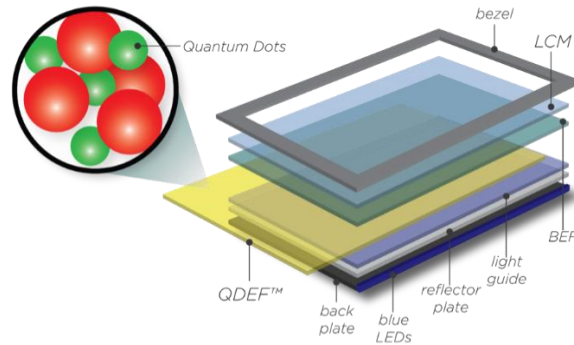


圖 9 Nanosys的量子點增強膜 (Quantum Dot Enhancement Film, QDEF)，為一高分子/量子點混成薄膜，直接附加於背光模組。(資料來源：Nanosys網站)

kindle fire HDX

Built for work and play

Exclusive 7" HDX display | Fast quad-core processor



圖 10 Amazon的Kindle Fire HDX 7首先使用了Nanosys QDEF量子點增強膜之平板電腦 (2013年十月)。(資料來源：Amazon網站)



圖 11 華碩在2014年八月在筆記型電腦引入了Nanosys的QDEF量子點增強膜。(資料來源：<http://www.nanosysinc.com/press-releases/2014/5/30/asus-adopts-3m-color-enhancing-technology-for-asus-zenbook-nx500-notebook-pc>)

量子點電激發光元件之技術與應用發展

前述的量子點白光 LED 為使用量子點作為螢光體，由一 InGaN 半導體晶片激發，為螢光粉轉換型的白光 LED。另外一個型態的白光 LED 為直接以電驅動量子點作為發光體，因量子點可輕易地藉由尺寸來調整發光顏色，因此，此量子點點激發光元件極具潛力取代有機電激發光光件（OLED），目前有許多研究團隊投入研發。最初的量子點電激發光元件或發光二極體（QLEDs），主要由麻省理工學院的 M. G. Bawendi 團隊所開發，藉由類似於高分子電激發光元件（Polymer-based LED, PLED）的製程製備，但多年來未能太多的技術突破。QD Vision 約在 2004 年末，開始繼續研究量子點發光二極體，在 2006 年底發表了綠光量子點發光二極體，外部量子效率(External Quantum Efficiency, EQE)為 0.81%、發光效率（Luminous Efficiency）為 2.7 lm/W (2.8 Cd/A)、亮度為 140 nits 及色度座標（CIE xy color coordinates）為（0.32, 0.62），不久後又改進了製程，將外部量子效率提升至 3.1%、發光效率為 3.4 lm/W（4.2 Cd/A）、亮度為 210 nits 及色度座標為（0.66, 0.33），此時的製備程序已改為類似於 OLED 的製備方式。然而，直接以電激發量子點之 QLEDs 效率偏低，該公司未能有更進一步突破，在 2007 – 2008 年時並無明顯進展。2010 年底時，QD Vision 與韓國 LG 集團，宣布要以量子點 LED（QLEDs）共同投入研發下世代的 Active Matrix 量子點顯示器。2013 年四月 QD Vision 在 Nature Photonics 發表了外部量子點效率為 18% 的 QLEDs（圖 12），其發光效率較 OLEDs 佳，在同樣色度座標下大幅領先了 OLEDs。目前為止，此部分研究仍持續進行中，雖然離實用階段尚有一段距離，但隨著 Samsung 積極的投入，利用其在 OLED 製程的經驗與設備，預期此量子點 LED 技術會加速發展。

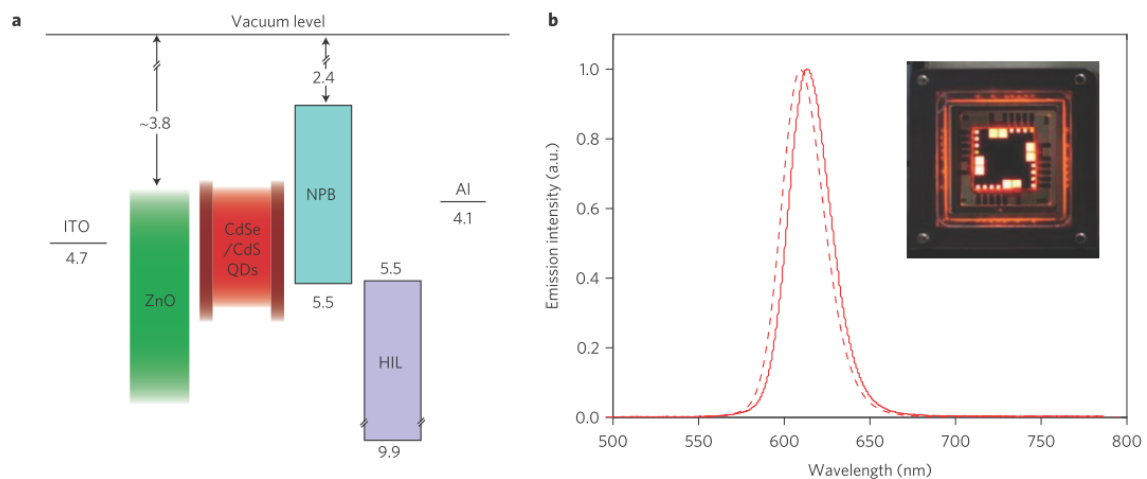


圖 12 QD Vision 發表之直接以電驅動量子點之發光二極體（QLED），左圖為元件之能帶結構，右圖為電激發光光譜與 24 像素的元件插圖。（資料來源：Mashford et al., Nature Photonics, 7, 407, 2013.）

### 量子點於太陽電池技術與應用發展

量子點太陽電池為近年來發展的新領域，如 CdSe、CdS、PbSe、PbS...等量

子點，在可見光及紅外光範圍，具備很好的光電特性。量子點太陽電池的製備程序較傳統真空或薄膜製程簡單，主動層之製備可混合單種或多種能隙的量子點於一溶劑，再以塗佈方式鍍覆奈米晶薄膜至一基板，覆上電極即成為光伏元件。由結構區分，可將奈米晶體製備成為單層薄膜、多層薄膜或塊材異質界面（Bulk Heterojunction）；塗佈方式可為旋轉塗佈法、網印或 Roll-to-Roll 方式；基板可選擇為矽基板、玻璃基板或塑膠基板，相較於傳統真空製程如分子束磊晶（MBE）方式或矽晶太陽電池，奈米晶太陽電池的優點為生產成本低、可大量生產、可翹曲、質輕...等，因近 10 年來 II-VI 族奈米晶及量子點合成技術的快速發展，除了鉛系量子點外，塗佈型太陽電池多基於 II-VI 族化合物半導體材料。總的來說，目前由量子點或量子柱與導電高分子摻混後製備的光伏元件效率皆不高，研究已進行許多年，目前尚未明顯的提升太陽電池之能量轉換效率，離實用階段仍遠。

### 量子點於生物感測、生物影像之技術與應用發展

量子點最早受到關注的應用領域是生物醫學研究。在生物醫學上，為了研究或追蹤細胞生長及分化的狀況，一般會使用螢光體標定特定生物體細胞或分子，以利觀察，傳統上，使用的螢光體為有機螢光分子，但有機分子之發光穩定性不佳，在長時間觀察下容易裂解，使得原標定區域螢光消失，造成研究及觀察上的困難，另外，因有機分子的激發光譜範圍較窄，若想要用不同顏色或波長的有機螢光分子觀察不同的細胞區域，則需用使用多個的激發光源，使用上有較多限制。量子點如 CdSe，可藉由尺寸調控發光波長，如紅光、綠光、黃光、藍光...等，並可由單一波長激發，而量子點發光效率高，且為無機晶體，發光穩定性也較有機分子佳，在生物體內螢光可長達數個月，因此，目前在生物影像領域方面，受到很大的關注，並已經有少部分產品應用，目前的缺點是量子點價格仍偏高，且因許多高效率的量子點如 CdSe、CdTe、PbSe...等含重金屬，對於環境與生物體的毒性仍存在很大的疑慮。另外一方面，其他非重金屬的量子點或奈米粒子，也有部分研究團隊研究開發，如 InP 量子點、矽量子點、金奈米顆粒...等，亦有不錯的發光效率，也頗具潛力。

一般量子點要應用於生物影像，需進行表面修飾，如圖 13 左圖所示。一般而言，會先依據所需要的發光波長選擇適當的材料與尺寸合成量子點（Design of QD Core），大部分高效率的量子點為親油相，要先進行表面改質，使量子點可溶（分散）於水相，轉至水相後（Design of Organic Shell），再由依據目的，將特定的分子（Design of Surface Ligands）接至量子點，使量子點表面具有生物官能團，可以與特定生物分子反應，形成鍵結。圖 13 右圖為使用不同發光波長的螢光量子點標定特定生物細胞組織的生物影像圖形。量子點也可以與其它的功能性奈米顆粒結合，如磁性氧化鐵奈米粒子可透過聚苯乙烯（Polystyrene）球與螢光量子點結合，如圖 14 所示，磁性氧化鐵奈米粒子首先由聚苯乙烯包覆，再將表面官能化的螢光量子點接至聚苯乙烯表面，形成多功能性的量子點螢光標籤。

最近的量子點在生物標定與影像的發展，部分團隊開始往近紅外光的量子點

(如：700–900 nm)，因為在長波長的光，對細胞組織有較好的穿透深度，另外，也比較不會被細胞組織的自發光所干擾，部分細胞組織在 400–600 nm 有發光現象。

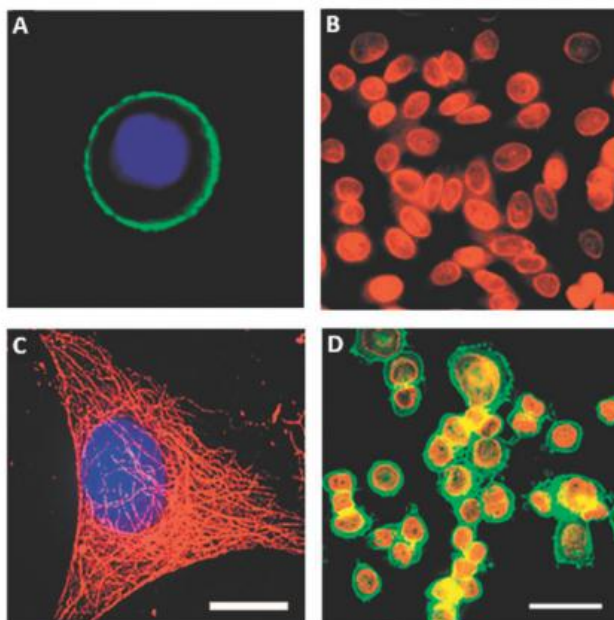
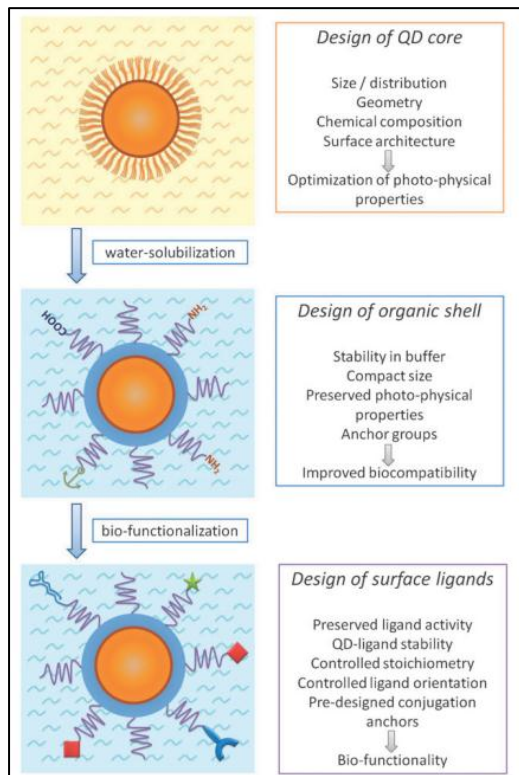


圖 13 螢光量子點作為生物影像的應用。左圖為一般使用螢光量子點作為生物影像應用之改質步驟。右圖是使用不同顏色的量子點標定細胞的影像。(資料來源：Zrazhevskiy et al., Chem Soc Rev, 2009; DOI: 10.1039/b915139g)



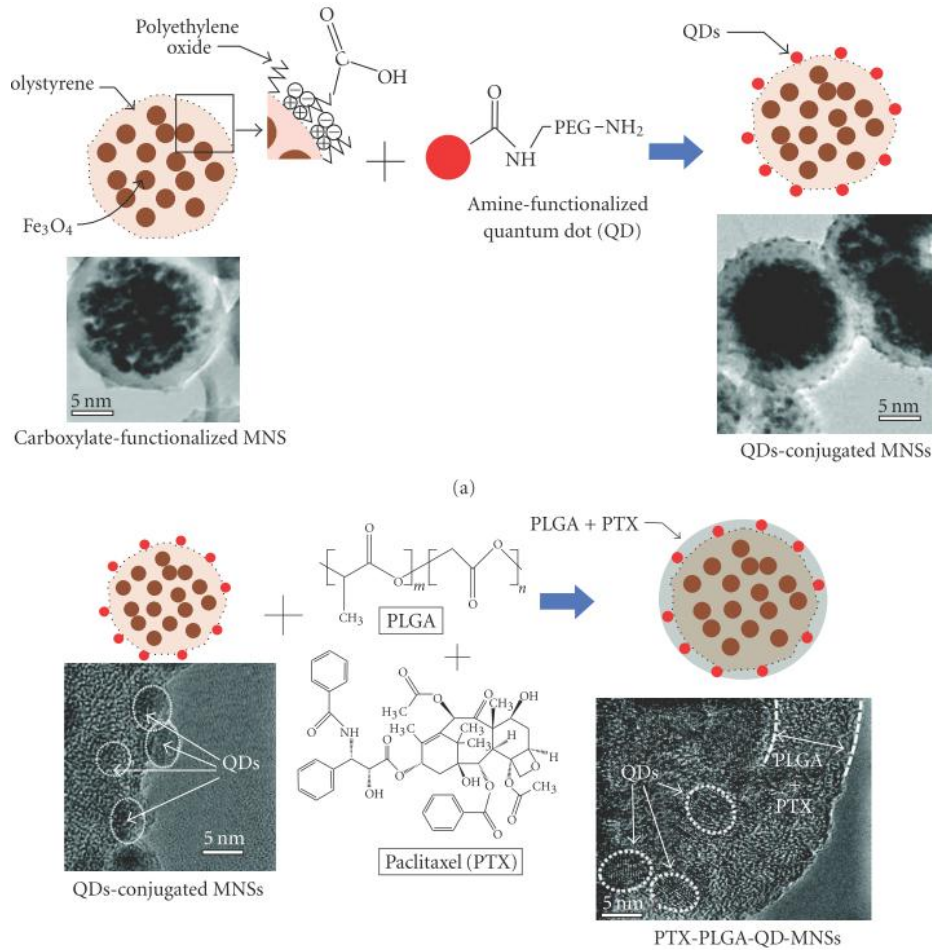


圖 14 結合磁性氧化鐵奈米粒子與量子點之聚苯乙烯顆粒。(資料來源：Cho et al., ACS Nano, 4, 5398, 2010)

### 量子點於防偽之技術與應用發展

利用量子點獨特的吸光及放光光譜及波長，目前已有許多研究單位及公司投入研發列印式量子點作為安全防偽標籤。HP 公司使用其印表機，將包含不同尺寸的水相 CdSe 量子點墨水，列印出不同排列組合的圖形及二維條碼，如圖 15 所示，上圖為綠光 CdSe 量子點列印的二維條碼，使用不同粒徑的 CdSe 量子點，可在紫外光下可顯示出不同的條碼顏色。HP 公司亦混合兩種粒徑的量子點，將綠光與紅光量子點列印成二維條碼，在紫外光激發下，可顯示彩色的二維條碼，藉由不同量子點螢光顏色及發光光譜的組合，可大幅提升了原來黑白條碼的安全性。

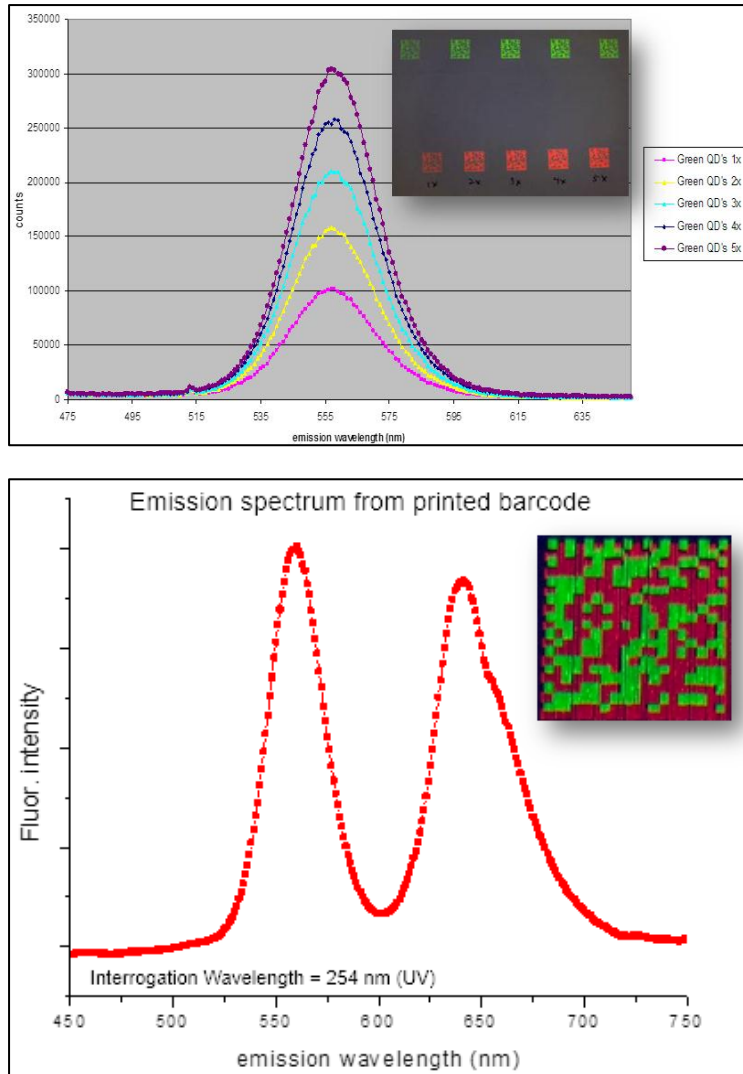


圖 15 HP 公司以其印表機列印水相量子點墨水，做為防偽標籤。上圖為單一綠光量子點的條碼，下圖為兩種綠光及紅光量子點的二維條碼，若變化組成條碼的量子點發光顏色或光譜波長，可使原來的黑白無色二維條碼，提升更佳的安全性。（資料來源：Hewlett-Packard Company）

2014年6月，Quantum Materials 公司與 Virginia Tech 宣布以 3D 列印量子點，利用多種量子點或四足/三足狀量子晶體的獨特的物理性質，如不同的發光波長，組成獨特的指紋，安全性可由原來的 128-bit 達到 256-bit，大幅增加安全性，並難以破解，圖 16 為其發表的量子點圖片。根據 Allied Market Research 估計，2013 年全球防偽包裝標籤市場有 574 億美金，並預估在 2020 年時可達 1,427 億美金，年複合增長率約為 13.9%（2013—2020）。另外，Global Industry Analysts 的研究報告指出，對此防偽技術最積極的是食品與醫藥廠商，全球防偽技術市場在 2015 年可達到 822 億美金。

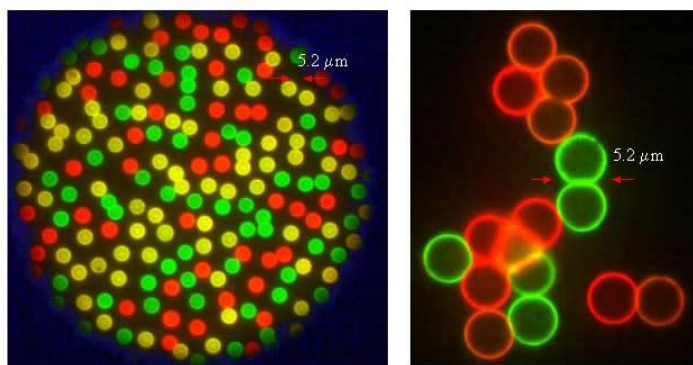


圖 16 以 3D 列印技術列印量子點防偽標籤。(資料來源：  
<http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/7920/3D-Printed-Quantum-Dots-Could-Lead-to-Anti-Counterfeiting-Tech.aspx>)

## 結論

量子點在過去二十年來的技術與應用發展，已經被證明其獨特性及商業應用潛力，目前仍有許多研究單位或廠商不斷持續投入經費，以研發製備技術與新的應用。目前量子點在太陽電池、電激發光元件...等之效率尚低，離實用階段尚遙遠，但在生物影像螢光標計、防偽標籤、廣色域顯示器、白光光源...等，已經進入實用開發階段，目前美國、日本、韓國...等國家，已有多家廠商投入或在規劃生產，預計在未來 10 年會成為一新興產業，在行動裝置及顯示器產業扮演極重要的角色。與台灣產業最相關的是白光 LED 與液晶顯示器產業，目前白光 LED 在平面液晶顯示器之滲透率已經趨於飽和，高解像 4K/2K 技術也趨於成熟，顯示器正朝著更輕薄及色彩更鮮豔的方向前進，在韓國三星集團目前掌握了大部分 OLED 顯示器主要的技術與市場後，多家廠商包含 Apple、Sony、ASUS、Amazon... 等公司，積極朝向開發以量子點補強之液晶顯示器跟 OLED 顯示器競爭，因此可預期平面液晶顯示器產業在未來的行動裝置與顯示器的市場上仍可佔有一席之地。

## 作者簡介

陳學仕，2000 年清華大學畢業後即於工研院擔任副研究員、研究員及工研院量子點前瞻計畫、經濟部科專計畫及白光 LED 工業計畫主持人，2006—2009 年於劍橋大學攻讀博士，之後於日本產業總合技術研究院、英國劍橋大學、英國自然環境協會及英國伯明罕大學擔任大學專任研究員及講師，2013 年回台於清華大學材料系擔任助理教授至今，主要研究領域為螢光量子點及奈米顆粒合成、溶液—凝膠製程與塗佈、有機/無機混成材料及光電元件技術。

## 奈米科技技術論壇 ~ 產業化機會說明會 ~

敬邀您~

經濟部 103 年度科技專案「精密化學材料技術及應用開發計畫」，為落實奈米科技產業化推動，計畫內「奈米科技產業化推動」分項扮演橋接推動角色，推動五項原型產品之技術聯結整合與團隊建立，完成重點領域專利與技術成熟度，研製具市場規格的原型產品。本次產業化機會說明會針對五項原型產品技術介紹及實品展示，期望引發與會貴賓交流討論與互動，促進跨領域技術整合與產業應用，推動技術往量產技轉或新創公司之商業化階段邁進，創造更多產業化落實案，敬邀各位業界先進蒞臨指導。

此論壇同時透過專家在奈米技術產業應用的分享，對國內廠商在量子點技術應用、奈米高分子材料技術應用、以及鋰電池應用奈米材料市場趨勢等相關技術和市場資訊，能有所深入的了解。期望藉由更多的互動與討論，協助國內廠商掌握奈米材料發展重點並導入產業應用商機。

工研院 材料與化工研究所 敬邀

指導單位：經濟部技術處

主辦單位：工研院 材化所、產經中心、台灣奈米技術產業發展協會

時間：103 年 11 月 27 日（星期四） 9:00~15:30

地點：台大國際會議廳 402AB (台北市中正區徐州路 2 號)

議程：

時間	會議內容	主持人/主講人
9:00~9:30	報到 & 交流	
9:30~9:40	引言	林正良 博士 工研院材化所 副所長
9:40~9:55	小型二氧化碳捕集回收裝置	戴清智 博士 工研院材化所 研究室主任
9:55~10:10	薄型壓電喇叭	林家欣 博士 工研院材化所
10:10~10:25	低熱阻 SiC 功率模組	張景堯 專案副理 工研院電光所
10:25~10:40	交流 & 休息 (敬備茶點)	

10:40~10:55	可重複寫入電子紙	劉祖閔 資深工程師 工研院顯示器中心
10:55~11:10	導電高分子	衛靖燕 博士 工研院材化所
11:10~12:00	實品展示與討論	
12:00~13:10	交流 & 午餐 (敬備午餐)	
13:10~13:40	有機無機奈米混成材料	林江珍 教授 台灣大學高分子研究所
13:40~14:10	量子點技術與應用發展	陳學仕 教授 清華大學材料工程系
14:10~14:30	交流 & 休息 (敬備茶點)	
14:30~15:00	奈米材料在鋰電池的應用	呂學隆 資深研究員 工研院產經中心
15:00~15:30	綜合討論	

※主辦單位得視情況保留變動講師、議程變更之權利

- 一、報名方式，線上報名網址：<http://goo.gl/Be0sNM>
- 二、費用：免費
- 三、餐點：本場次提供午餐。
- 四、報名截止日期：2014 年 11 月 24 日(星期一)下午 5 點前 (名額有限額滿為止)
- 五、本案聯絡窗口：林真君小姐 TEL：03-5914567；Email：[Irene\\_lin@itri.org.tw](mailto:Irene_lin@itri.org.tw)
- 六、備註:因名額有限，每家公司報名超過 2 位者，第 3 位起為備取。