

【量子點專訪（下輯）】三星電子的工程突破如何成為推動科學與產業發展的關鍵動力

「三星電子的 QLED 技術發揮關鍵作用，促成量子點技術獲得諾貝爾化學獎的肯定。」

- 首爾大學 Taeghwan Hyeon 教授

過去十年來，量子點始終位居顯示技術創新前端，在現有材料中實現了最精準的色彩再現。2015 年，三星電子推出 SUHD 智慧顯示器，樹立量子點技術商業化的全新里程碑。該項技術突破傳統量子點合成仰賴重金屬鎘（Cd）的限制，率先導入全球首創的無鎘量子點技術，深具指標性意義。

該技術亦引發學術界高度關注。無鎘量子點智慧顯示器的成功商業化，不僅為量子點相關研究與技術發展開創了全新方向，也在 2023 年諾貝爾化學獎頒發給量子點的發現與合成研究過程中，扮演了舉足輕重的重要角色。

承接上輯的專訪內容，三星新聞中心將繼續深入探討三星電子如何透過材料創新的突破性進展，持續為學術界帶來貢獻。



奈米技術巨擘，以研究量子點合成加熱製程聞名

Taeghwan Hyeon
博士，傑出教授

首爾大學（SNU）
化學與生物工程系



量子點先驅者，以研究聚合物與環保技術聞名

Doh Chang Lee
博士，教授

韓國科學技術院（KAIST）
化學與生物分子工程系



傑出專家工程師，於推動全球首款不含鎘量子點顯示器商品化具卓越貢獻

Sanghyun Sohn
博士，先進顯示器實驗室負責人

三星電子
影像顯示事業部

▲ Taeghwan Hyeon（左）、Doh Chang Lee（中）與 Sanghyun Sohn（右）

為何鎘成為量子點研究的起點

「我對三星電子成功將無鎘量子點顯示器商業化深感敬佩。」

- 首爾大學 Taeghwan Hyeon 教授

量子點於 1980 年代開始受到科學界關注，Nanocrystals Technology Inc. 前首席科學家 Aleksey Yekimov 與哥倫比亞大學化學系榮譽教授 Louis E. Brus，在當時各自發表了研究來探討量子侷限效應及量子點尺寸對其光學特性所產生的影響。

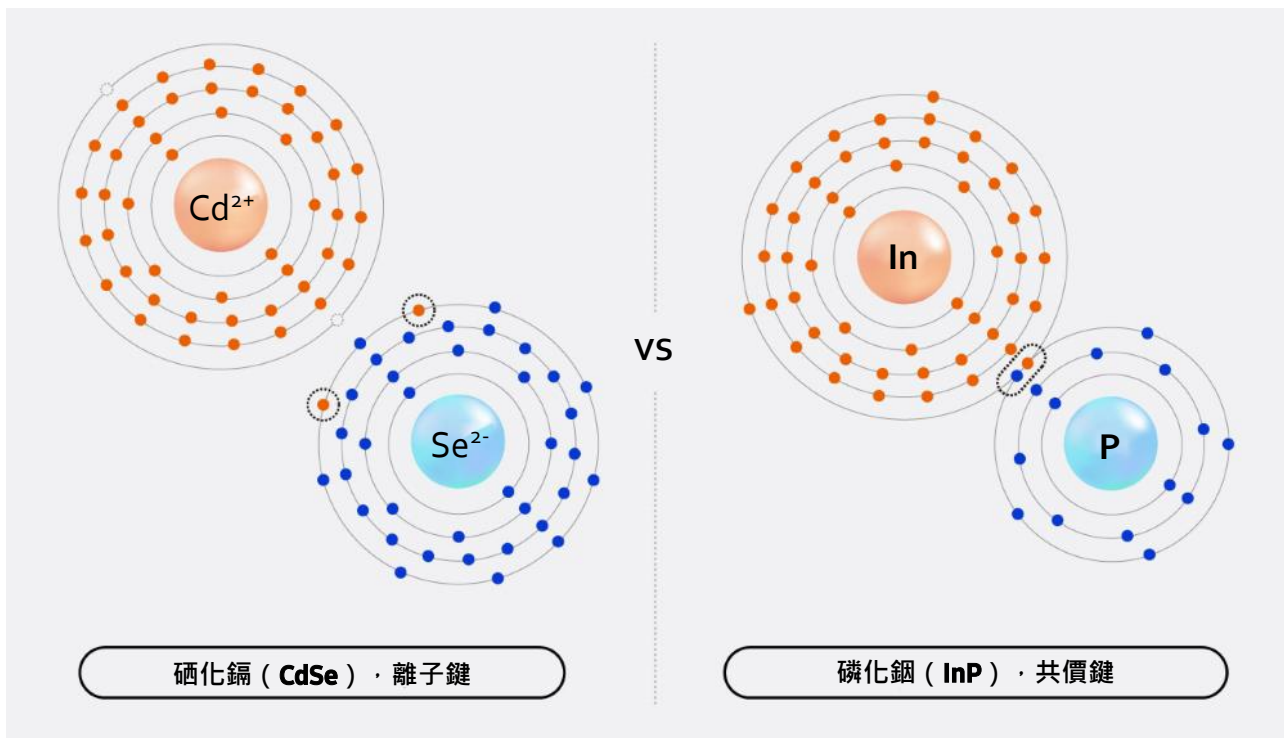
1993 年，麻省理工學院 (MIT) 化學系教授 Mounji Bawendi 發展出了可靠的量子點合成方法，推動技術研究大幅躍進。2001 年，首爾大學 (SNU) 化學與生物工程系的傑出教授 Taeghwan Hyeon 發表「加熱製程」(heat-up process)，一種可在無需篩選尺寸的情況下合成高度均勻的奈米顆粒。2004 年，Hyeon 將具規模化潛力的製程技術發表於《Nature Materials》，被廣泛視為業內具有劃時代意義的進展。



▲ Taeghwan Hyeon

然而，這些研究成果並未立即得以商業化。當時，量子點仍高度依賴鎘 (Cd) 作為核心材料，而鎘不僅對人體有害，亦被歐盟有害物質限制指令 (RoHS) 規範列為限用物質。

Hyeon 表示：「目前能夠穩定合成量子點的材料，僅有硒化鎘 (CdSe) 與磷化鎵 (InP)。傳統量子點材料硒化鎘為第二族與第六族元素所構成的化合物，而磷化鎵則由第三族與第五族元素合成。相較之下，第二族與第六族元素的反應相對單純，而第三族與第五族元素之間的化學合成則更為複雜。」



▲ 帶離子鍵的鎘系量子點與帶共價鍵的銦系量子點比較

鎘是一種具有兩個價電子的元素，可與硒 (Se)、硫 (S) 及碲 (Te) 等具六個價電子的元素形成穩定的離子鍵^(註一)。此類組合能生成穩定的半導體材料，亦即所謂的二六族半導體，其特性使其即便在相對較低的溫度下，仍能合成高品質的奈米晶體，長期以來深受學術研究領域青睞。因此鎘在量子點合成中的應用曾被廣泛視為學界標準。

相較之下，作為鎘替代材料的銦 (In) 具有三個價電子，可與磷 (P) 等具有五個價電子的元素形成共價鍵^(註二)。相較於離子鍵，共價鍵通常穩定性低且具方向性，因而在奈米晶體合成過程中更易產生缺陷，使銦在研究與量產應用上皆面臨許多挑戰。

Lee 表示：「以磷化銦製成的量子點在提升結晶品質方面極具挑戰，難以實現高結晶度。若欲達到商業化應用所要求的品質標準，必須仰賴一套高度複雜且條件嚴苛的合成製程。」

絕不妥協 - 從技術突破邁向量產實現

「面對消費者安全，絕無任何妥協的空間。」

- 三星電子 Sanghyun Sohn

然而，三星電子選擇了一條截然不同的技術路徑。

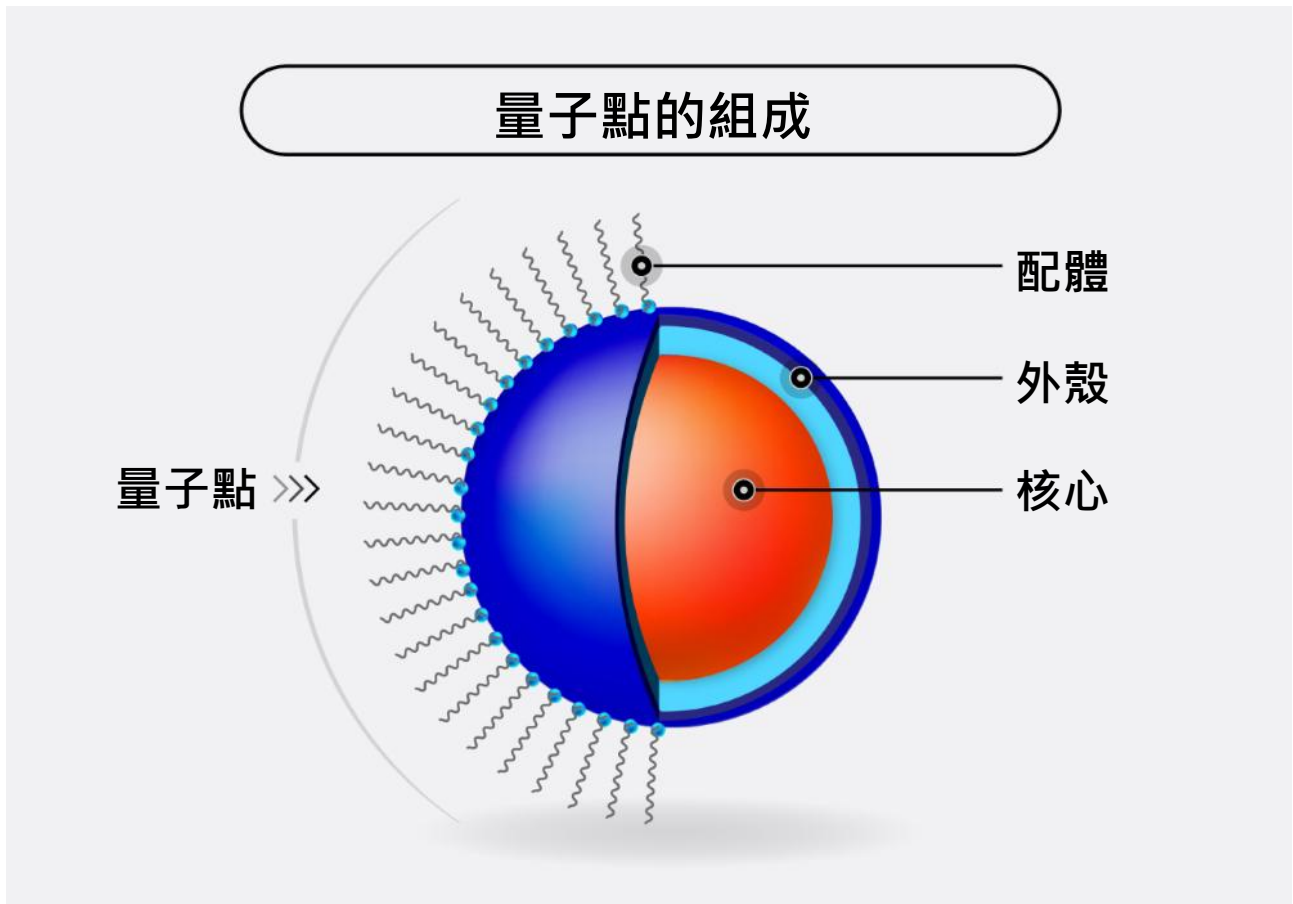
三星電子影像顯示事業部 (VD) 顯示實驗室負責人 Sanghyun Sohn 表示：「自 2001 年起，三星便持續投入量子點技術的研究與開發。在技術探索初期，三星即確立因鎘對人體具有潛在危害性，並不適合作為商業化材料。儘管部分地區法規在技術層面允許電子產品中含有最高 100ppm 的鎘含量，三星自始即堅持實施零鎘政策。無鎘，無妥協 - 始終是我們在產品開發上的核心原則。在消費者安全層面上，我們絕無讓步空間。」



▲ Sanghyun Sohn

[2014](#) 年，三星電子成功研發全球首創無鎘量子點材料，長期堅持的「安全無妥協」原則亦因此受到高度關注。為同時確保材料的耐用性與影像品質，三星導入三層防護塗層技術，有效隔絕氧氣、光線等外部因素對磷化銦奈米顆粒的影響。隔年，三星推出全球首部採用無鎘量子點技術的商用 SUHD 智慧顯示器，成為顯示技術領域的重要轉捩點，亦代表自 2000 年代初啟動之相關研發工作的重大里程碑。

Sohn 表示：「相較於鎘系量子點，磷化銦量子點具備穩定度較低、合成難度較高等特性，初期僅能達成約 80% 的效能表現。然而經由三星先進技術研究院（SAIT）推動之密集研發計畫，成功將其效能提升至與鎘系量子點同等水準，並確保其可靠性達 10 年以上，滿足長期應用需求。」



▲ 組成量子點的三個部分

三星 QLED 所採用之量子點結構由三項關鍵組成元素構成：其一為核心，負責發出光信號；其二為外殼，用以包覆並穩定核心結構；其三為配體，即覆蓋於外殼之外之高分子塗層，具備提升抗氧化穩定性的功能。量子點技術的核心價值，即在於上述三項元素的高度整合。涵蓋自原材料取得、合成至量產，以及申請眾多關鍵技術專利。

Lee 補充：「核心、外殼與配體三者缺一不可，三星電子在磷化銦的合成技術非常卓越。」

Hyeon 表示：「在實驗室中開發技術本身即具高度挑戰，而若要推進至商業化階段，則需投入更多的努力，以確保產品的穩定性與色彩品質的一致性。我對於三星電子成功實現無鎘量子點顯示技術的商業化，深感敬佩。」

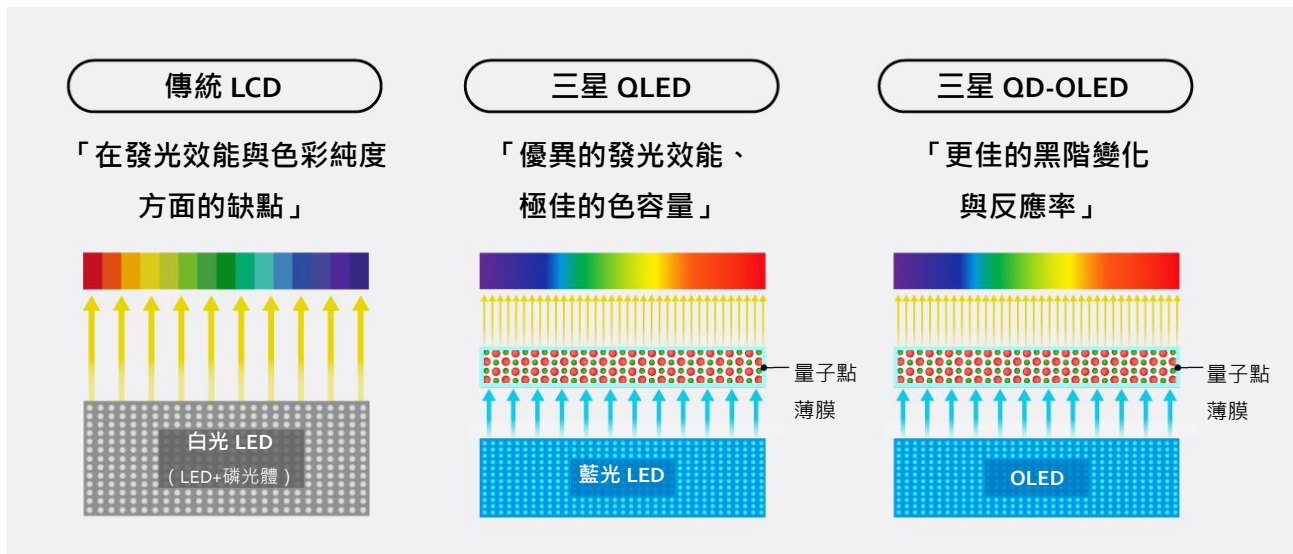
樹立量子點技術標準

「三星量子點顯示器問世後，學術界的研究趨勢出現了明顯轉變。」

- 韓國科學技術院 Doh Chang Lee 教授

量子點的光學特性現已廣泛應用於多個領域，涵蓋太陽能電池、醫療技術與量子運算等。然而，至今最具研究活躍度且實現商業化的，仍屬量子點顯示技術，而三星電子正是該領域的技術先驅。

憑藉多年的基礎研究與開創 SUHD 智慧顯示器的經驗，三星電子於 2017 年推出 QLED 智慧顯示器，為高階顯示技術樹立全新標準。2022 年，三星再度推進技術創新，發表全球首款將量子點技術與 OLED 結構的 QD-OLED 智慧顯示器。



▲ LCD、QLED 與 QD-OLED 的結構比較

QD-OLED 為新一代顯示技術，將量子點導入 OLED 的自發光結構中，提供更快速的反應時間、更細緻的黑階表現與更高的對比度。三星 QD-OLED 榮獲全球最大的顯示技術組織 - 國際資訊顯示學會 (SID) 頒發 2023 年度「最佳顯示器」獎項。

Sohn 表示：「三星電子不僅以其磷化銦量子點顯示器引領市場，亦是目前唯一成功將量子點技術整合至 OLED 並實現商業化的企業。三星將持續發揮在量子點技術領域的領先優勢，推動顯示技術創新，引領產業發展。」



▲ Doh Chang Lee

韓國科學技術院 (KAIST) 化學與生物分子工程系教授 Doh Chang Lee 表示：「學術界的研究趨勢在三星量子點顯示器發表後發生了明顯的變化。自產品發表以來，討論重點逐漸從材料本身轉向實際應用，反映出量子點顯示技術進行實作的潛力。」

Lee 補充說明：「量子點的應用已延伸至包括光觸媒在內的多個領域，但與顯示器的應用相比，這些實驗仍處於早期階段。」

Hyeon 亦指出，三星量子點顯示器的成功商業化，對 Bawendi、Brus 與 Yekimov 獲頒 2023 年諾貝爾化學獎具有重要推動作用，為其研究成果的全球肯定奠定了關鍵基礎。

Hyeon 表示：「諾貝爾獎最重要的標準之一，在於是否已透過商業化，對人類社會產生實質貢獻。三星電子的 QLED 可謂奈米技術領域的重要里程碑，若無其成功實現商業化，量子點技術或許難以獲得諾貝爾獎的肯定。」

三星電子對顯示器的未來展望

自從推出 QLED 智慧顯示器以來，三星電子大幅加速量子點技術於產業界與學術界的發展進程。當提及量子點顯示技術的未來發展方向時，多位專家也分享了他們的觀察與見解。

Sohn 表示：「作為新一代顯示技術，三星目前正積極推進具自發光能力之量子點的研發。過去，量子點需依賴外部光源來呈現紅光與綠光。而三星未來的目標，是開發能透過電致發光機制，自主發出光譜三原色的量子點 - 亦即透過注入電能可直接產生三原色，目前藍光量子點的研發亦在同步推進中。」

Lee 表示：「顯示技術未來將迎來重大的變革，電致發光材料的應用可有效縮小裝置元件尺寸，進而實現虛擬實境（VR）與擴增實境（AR）等應用所需的高解析度、高效率與高亮度。」

Sohn 表示：「理想的顯示器，應讓觀者幾乎察覺不到其存在。而三星的終極目標就是實現與現實無異、無縫融合的視覺體驗。作為量子點顯示創新領域的領導者，三星將持續堅定邁步，引領未來顯示技術的發展。」

憑藉持續的技術領導力與前瞻願景，三星正重塑顯示技術的未來版圖，並重新定義量子點應用的可能性。



註一：離子鍵是電子在原子間轉移時所形成的化學鍵，會產生因電吸引力而結合的離子。

註二：共價鍵是兩個原子共用電子形成的化學鍵。