

2023 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 030014

參展科別 化學

作品名稱 以奈米碳與二氧化矽複合物優化發光薄膜之研究

得獎獎項

就讀學校 台北市立第一女子高級中學

指導教師 周必泰、周芳妃

作者姓名 陳靖叡、楊傑愉

關鍵詞 奈米碳量子點、碳矽複合物、發光薄膜

作者簡介



大家好，我們是北一女中科學班的學生陳靖叡、楊傑愉，從小就對科學充滿熱情，很高興可以有機會進行專題研究。從校內實驗發想到如今站上國際科展的舞台，過程中也曾遇到過許多挫折，非常感謝周芳妃指導老師、周必泰教授與實驗室學長姐們的教導與支持，讓我們能夠一步步的成長，並在科學的道路中收穫了許多美好的回憶。

摘要

本研究延伸自文獻影片「奈米碳來排隊」實驗，自製奈米碳量子點（carbon quantum dots, cQD），並結合鈣鈦礦量子點（perovskite quantum dots, pQD）製程，以探討優化發光薄膜材料的合成技術與製程。目前完成的變因探討如下：（一）比較碘化鉛與溴化鉛兩種前驅物對 pQD 粒子成長的效應，（二）萃取不同型態 cQD 的溶劑效應，（三）調控 cQD 之添加方式，包括劑量、順序與添加時刻。製程條件的添加順序分成兩種流程：（A）方法 PC（perovskite - carbon）：先有鈣鈦礦後有碳，也就是先合成 pQD，期間再加入 cQD，（B）方法 CP（carbon - perovskite）：先有碳後有鈣鈦礦，也就是先加入 cQD，再合成 pQD。

為了找出 pQD 發光特性的優化條件，研究結果進行討論四項指標：光致發光量子產率（photoluminescence quantum yield, PLQY）、譜線半峰全寬（full width at half maximum, FWHM）、波長位移及 pQD 穩定度。觀察 PLQY 與 FWHM 的結果顯示：多數以方法 PC 添加之 cQD 能達優化效果，而其中又以甲苯萃取的 PhMe-cQD（178.0%）與異丙醇萃取的 IPA-cQD（182.6%）對 PLQY 提升幅度最為顯著。目前也進行市售碳化矽（SiC）與自製碳矽複合物（簡稱 CSiX）的添加效應，期能找出更加優化 pQD 條件，發展出簡易製程但更具綠能經濟之發光薄膜原料，也提供碳循環應用之契機。

Abstract

Extended from a chemistry experiment “nano carbon stand in line”, this research combined self-made carbon quantum dots (cQD) with perovskite quantum dots (pQD) process to optimized luminescent film. At present, the variables are discussed as follows: (1) comparing the effects of two precursors of lead iodide and lead bromide on the growth of pQD particles, (2) the solvent effect of extracting different forms of cQD from different organic solutions, and (3) regulating the addition method of cQD, including dose, sequence and time of addition. Two different sequence of addition in the process were carried out: (A) method PC (perovskite - carbon): first there is perovskite followed by carbon, that is, pQD is synthesized first, and cQD is then added, (B) method CP (carbon - perovskite): cQD is first added and then pQD is formed.

To maximize the optimization of pQD luminescence characteristics, four indicators are discussed: photoluminescence quantum yield (PLQY), full width at half maximum (FWHM), wavelength shift and stability. The results showed that most of PC process could improve PLQY and FWHM, and the PhMe-cQD extracted from toluene (178.0%) and IPA-cQD extracted from isopropanol (182.6%) increased PLQY the most. At present, the addition of commercially available silicon carbide (SiC) and self-made carbon-silicon composite (CSiX) are also carried out, hoping to find out more methods to optimize pQD, develop simple, eco-friendly, economy process of luminescent film raw materials, which also provide opportunities for carbon recycling applications.

壹、前言

一、研究動機

展現極佳光電轉換效率的鈣鈦礦目前已廣泛應用於光電元件、顯示器（LCD 發光背板或彩色濾光片）、UV 與 X ray 感測器、量子顯示器的材料等。鈣鈦礦量子點（奈米晶體）有通用的化學式， ABX_3 ：A 是 Cs 或 FA（Formamidinium 甲脒）；B 是 Pb；X 是 Cl、Br、或 I。這些量子點表現出極高的致光螢光效率以及高吸收常數，這些特性使其在應用在太陽能產業、電視顯色等等都有極大的功用與產業價值。

在化學實驗課中操作「奈米碳來排隊」實驗，加入二氧化矽粉體於奈米碳溶液中，並用不同有機溶劑提取出奈米碳粒子的膠體溶液。使用 UV 燈照射這些膠體溶液時，可以發現奈米粒子的量子點特性。經由文獻探討，奈米碳量子點在光線照射下，本身會發出螢光，具有無毒、良好水溶性、成本低、對環境危害小等優點。奈米矽量子點在 S 波段發光波長激發態的性質與傳統量子點的光發射波長形成鮮明對比，這有助於其獨特的材料應用。奈米碳化矽量子點則具有很強的波長連續可調發光的性質，使得碳化矽奈米材料具有良好的應用前景。

為了使發光薄膜在市場上有更加的競爭力，我們想利用這些低成本又容易取得奈米粒子來優化目前發光薄膜的性質，以提高其發光效率。此外，近年來綠能意識抬頭，因應電動車的蓬勃發展，其電池如何再利用亦成為重要課題。將奈米碳結合鈣鈦礦量子點優化發光薄膜之作法可使廢棄電池中的碳發揮新功用，在創造經濟價值的同時提供了更能兼顧地球永續發展的鈣鈦礦量子點製程。

二、研究目的

1. 探討使奈米碳、奈米碳矽複合物於有機溶劑中分離不同粒徑粒子之方法
2. 研究不同有機溶液對提煉奈米碳量子點所造成的影響
3. 找出添加不同奈米碳有機溶液優化鈣鈦礦量子點的最佳反應條件
4. 找出溶劑法製作奈米碳矽複合物的條件與添加界面活性劑的效應
5. 研究在鈣鈦礦量子點製程中加入奈米碳矽複合物、碳化矽所造成的影響

三、研究原理

本研究以熱溶劑注射法製備全無機鈣鈦礦量子點 CsPbX_3 。在製程中加入自製奈米碳量子點有機溶液，改變鈣鈦礦量子點尺寸與形貌，並以測量吸收光譜與光致發光量子產率分析鈣鈦礦量子點之優化結果。

(一) 燃燒法合成奈米碳 (Combustion method)

在高中的化學實驗課程中，將電石加入水中能生成乙炔，其化學反應式為 $\text{CaC}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{C}_2\text{H}_2 \uparrow$ 。接著點燃以排水集氣法蒐集之乙炔，使其熱裂解奈米碳，其化學反應式為 $\text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow 2\text{C} + \text{H}_2 \uparrow$ ^[30]

(二) 鈣鈦礦量子點 (perovskite quantum dots)

鈣鈦礦是具有通式 ABX_3 結構的一類化合物，其名稱源自於同名礦物鈣鈦礦 (CaTiO_3)。

ABX_3 : A 是 Cs 或 FA(Formamidinium 甲脞) ; B 是 Pb ; X 是 Cl、Br、或 I。

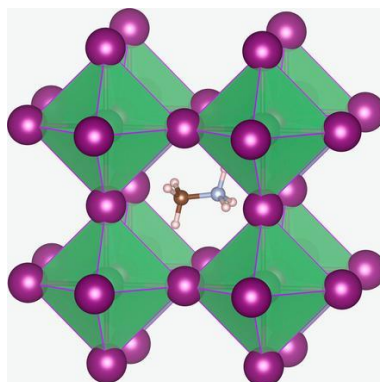


圖 1、鈣鈦礦晶體結構 (圖源：維基百科)

本研究以熱注入合成法製備全無機鈣鈦礦量子點 CsPbX_3 製程為基底，銻離子與溴化鉛、碘化鉛作為前驅物。前驅鹽分別與不同的配位基作用，加熱使其在溶劑中達到完全溶解。加熱至特定溫度後，將含有銻離子的溶液熱注入於含有溴化鉛的溶液中，此時前驅鹽離子在配位基的保護下快速成長為鈣鈦礦晶體。^[31]

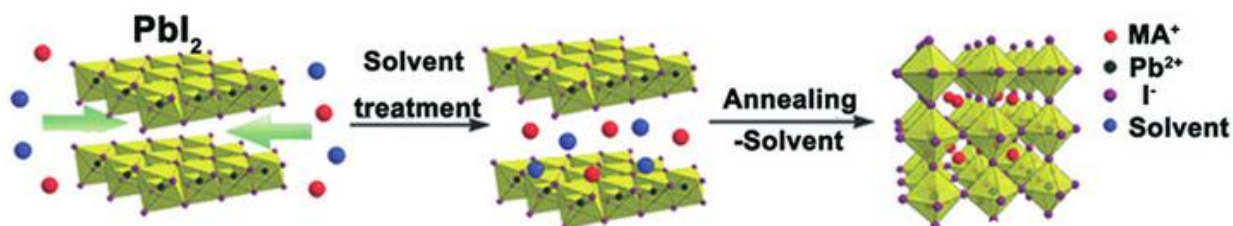


圖 2、鈣鈦礦晶體之成長過程示意圖 (圖源：參考資料 16)

在製造量子點過程中也可藉由不同變因調控鈣鈦礦材料的尺寸與形貌，進而改變其發光特性。本研究分別將自製奈米碳有機溶液添加於鈣鈦礦成長期間先後，使奈米碳粒子在鈣鈦礦成長期間附著於其之上，影響生長速率，進而影響鈣鈦礦量子點的吸收光譜與發光效率。

(三) 光致發光量子產率檢測原理 (photoluminescence quantum yield)

光致發光量子產率定義為發光物質由光激發後的發射光子數與所吸收的激發光子數之比值。光致發光為物質吸收光子躍遷到較高能量的激發態後返回基態同時放出光子的過程。在相對量子產率法中，通過將樣品的吸收、發射與已知量子產率的標準品進行比較，計算出所測樣品的量子產率。樣品和標準品的發射光譜是在相同的激發條件下測量的，因此透過比較兩者的發射光譜積分面積可計算樣品的量子產率。^[3]

$$\frac{QY_{QD}}{QY_{Standard}} = \frac{\frac{F_{QD} \cdot n_{QD}^2}{Abs_{400nm,QD}}}{\frac{F_{Standard} \cdot n_{Standard}^2}{Abs_{400nm,Standard}}} = \frac{F_{QD} \cdot n_{QD}^2 \cdot Abs_{400nm,Standard}}{F_{Standard} \cdot n_{Standard}^2 \cdot Abs_{400nm,QD}}$$

圖 3、光致發光量子產率計算公式 (圖源：參考資料 3)

(四) 發射光譜之判讀原理 (emission spectrum)

本研究以螢光光譜儀繪製優化後樣品之發射光譜。可以藉由發射光譜觀察優化後樣品的波峰位移與譜線寬度。在現代液晶顯示器之發光背板發展趨勢中，色純度與色域面積為高品質發光背板之重要指標。為了製造出品質更加、在市場更具競爭力的鈣鈦礦量子點，其可調控性質變得十分重要。此性質的判斷指標為波長位移現象與半高寬寬度。從發射光譜中可以依波長是否有藍移或紅移的現象、半高寬是否可以變得更窄為分析加入奈米碳有機溶液對鈣鈦礦量子點的優化作用的重要依據。

(五) 半峰全寬 (FWHM, full width at half maximum)

半峰全寬指的是光信號在其最大強度的一半處的寬度。設定特定波長於一個單色器，而光會從出口狹縫發出。在圖四中，直虛線代表儀器上所設定的波長數值；兩條紅色直線所對應到之寬度即為半峰全寬。較窄的半峰全寬代表此量子點能製造出的發光元件具有較高的色純度。^[9]

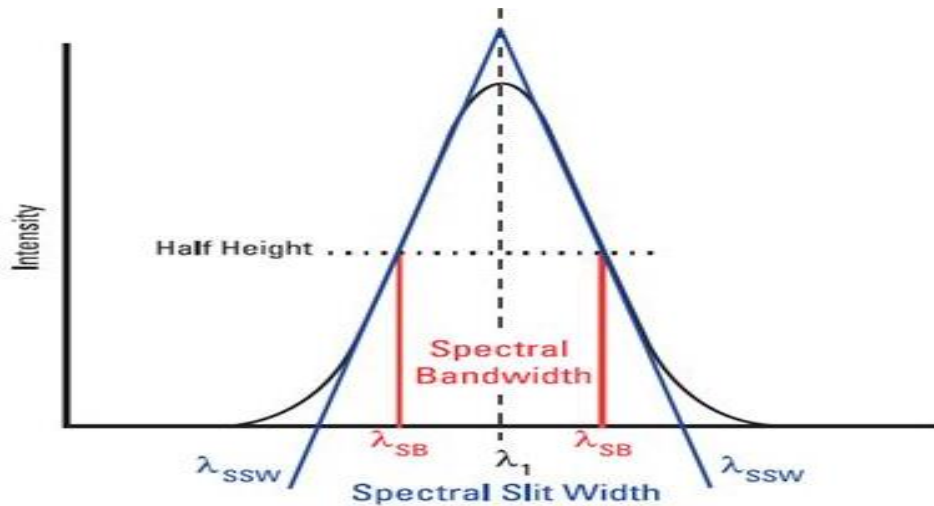


圖 4、半峰全寬示意圖 (圖源：Science Direct)

(六) QD 團聚 (quantum dots aggregation)

量子點的團聚主要源自於表面效應。由於量子點尺寸極小，表面原子比例相對較高，因表面原子配位不足，微粒的表面能及表面張力發生改變，導致量子點容易團聚為大顆粒。而大顆粒之量子點性質會發生變化甚至失效。^[6]而奈米顆粒的聚集常分為軟團聚與硬團聚。軟團聚主要由凡得瓦力與庫倫靜電力作用，常利用機械力來克服粒子之間的吸引力。硬團聚以化學鍵為主要作用力，因此較難消除。常見解決方法包含表面包覆法與分散劑法等。

(七) 優化發光薄膜之研究前例

將還原氧化石墨烯 (RGO) 加入以銻離子與溴化鉛作為前驅物之 pQD 製程。利用橢圓偏光術 (薄膜特性量測技術) 得知 RGO 會影響 QD 之複數折射率與其他光學性質。實驗結果顯示：在一定範圍內，RGO 之多寡與 pQD 之 PLQY 成正相關，過多的 RGO 則會造成屏蔽效應降低其 PLQY。^[2]

貳、研究方法與過程

一、研究流程

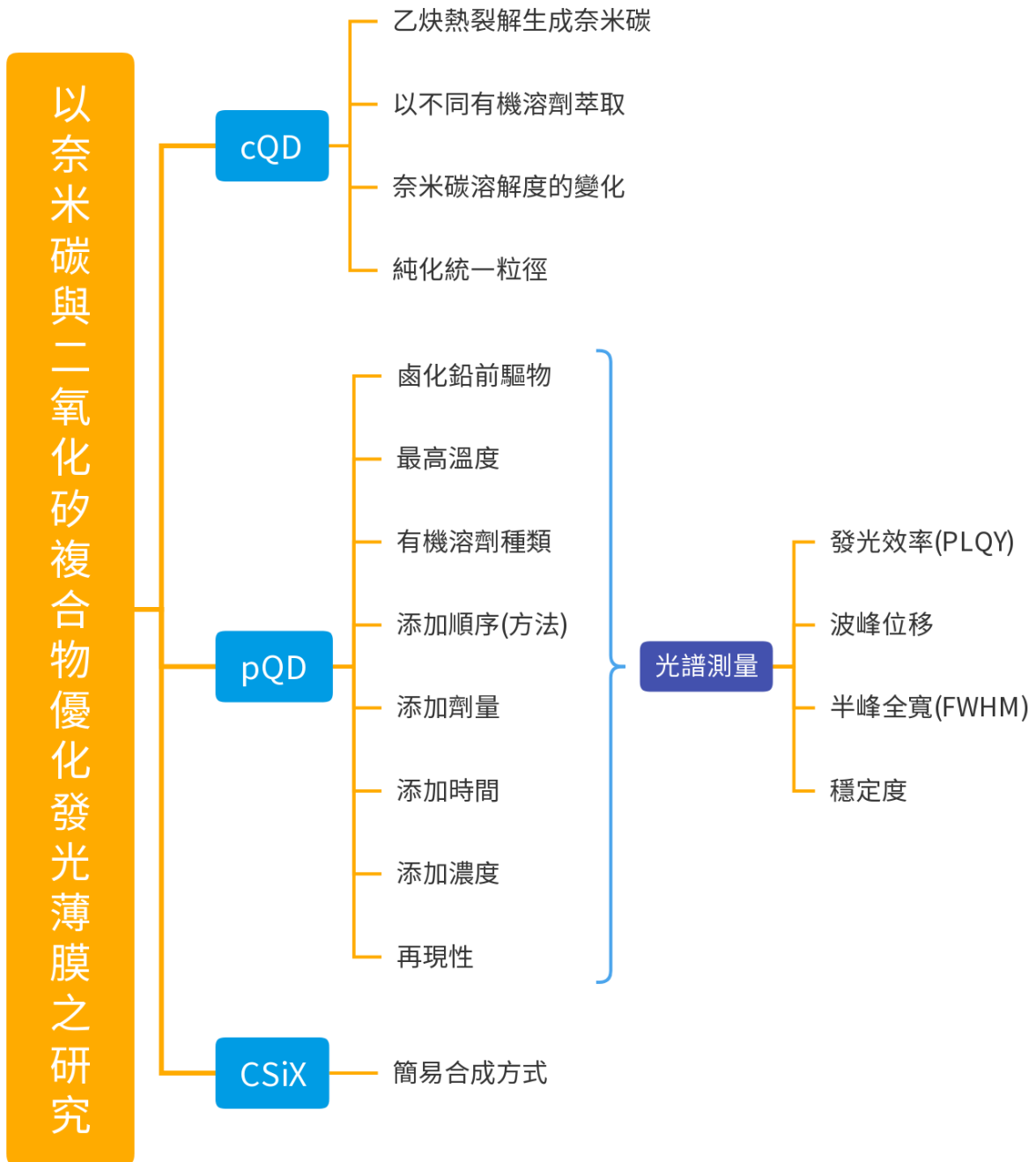


圖 5、研究流程圖

二、研究藥品與器材

(一) 藥品：碳化鈣 (Calcium carbide)、甲苯 (Toluene)、正己烷 (Hexane)、正丙醇 (Propanol)、異丙醇 (Isopropanol)、乙酸戊酯 (Amyl acetate)、甲醇 (Methanol)、乙醇 (Ethanol)、碳酸銫 (Cesium carbonate)、碘化鉛 (Lead(II) iodide)、溴化鉛 (Lead(II) bromide)、ODE 1-十八烯 (1-Octadecene)、OA 油酸 (Oleic Acid)、OAm 油胺 (Oleyl amine)、MeOAc 乙酸甲酯 (Methyl acetate)、二氧化矽 (Silicon dioxide)、清潔劑

(二) 器材：試管、試管塞、試管架、塑膠滴瓶、橡膠管、小水盆、鑷子、滴管、燒杯、濾紙、漏斗、攪拌匙、秤量紙、離心管、小玻璃瓶、450 μm PTFE、220 μm PTFE、刮勺、三頸瓶、沸石、磁鐵、針管、針頭、加熱架、防爆扣、冰浴池、微量滴管、量筒

(三) 設備：電子秤量計、離心機、冰箱、抽氣管、氮氣管、加熱機、攪拌機、光致發光螢光光譜儀、吸收光連續波長光譜儀

三、研究步驟

(一) 火焰燃燒法—以乙炔熱裂解產出奈米碳

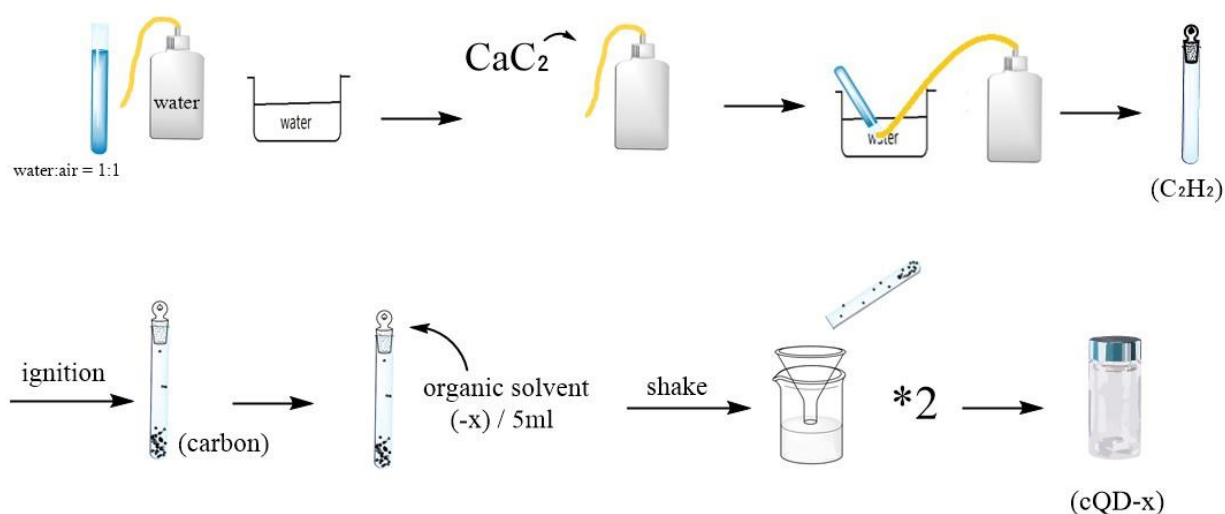


圖 6、以乙炔熱裂解產出奈米碳的研究步驟

1. 在小水盆中加水至 5 分滿
2. 在試管中加水至 5 分滿，蓋上試管塞
3. 將橡膠管接上塑膠滴瓶的瓶蓋，在瓶中加水至 7 分滿
4. 將碳化鈣加入塑膠滴瓶中並快速蓋緊蓋子
5. 將橡膠管放置水下等待 10 秒排出原本空氣
6. 將試管倒插進水中，在水下打開試管塞蒐集乙炔氣體
7. 待試管內水排空後，在水下蓋上試管塞
8. 拔開試管塞，以火柴點燃乙炔後迅速蓋上試管塞蒐集奈米碳
9. 等待一分鐘後打開試管塞，添加 5ml 有機溶劑並搖晃使其溶解
10. 以濾紙與漏斗進行過濾，以燒杯蒐集濾液後再倒至試管內靜置
11. 等待濾液沉澱，再過濾一次得到飽和奈米碳溶液

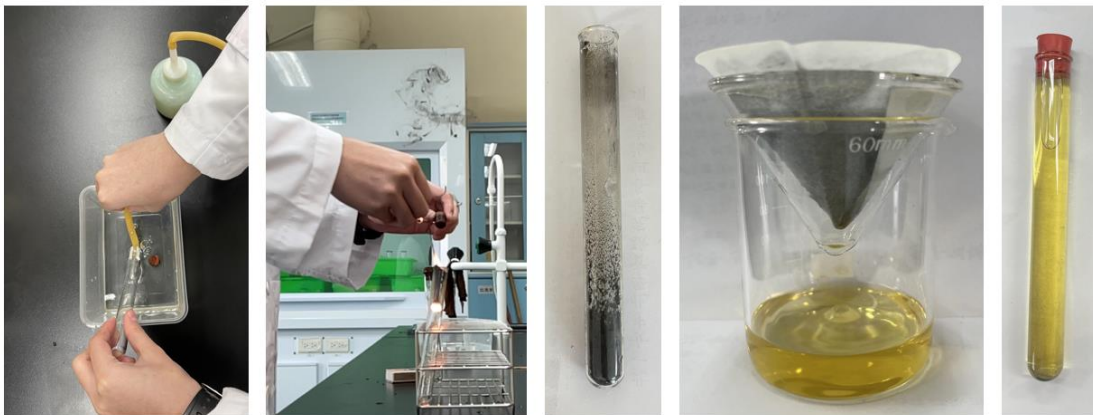


圖 7、以乙炔熱裂解產出奈米碳的研究照片

(二) 以不同有機溶劑分離並收集不同粒徑之奈米碳量子點

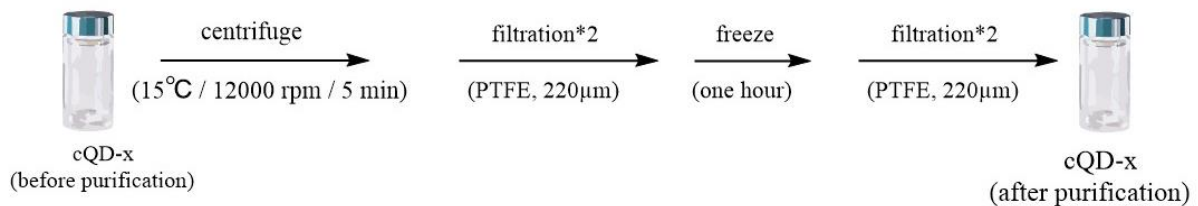


圖 8、以不同有機溶劑分離並收集不同粒徑之 cQD 的研究步驟

1. 改變前置作業中溶解奈米碳溶液的溶劑：
甲苯、甲醇、乙醇、異丙醇、正丙醇、正己烷、乙酸戊酯
2. 離心（15°C/12000rpm/5 分鐘）
3. 將離心後的奈米碳溶液用孔徑為 220 μm 的 PTFE 過濾兩次
4. 將溶液放入冰箱的冷凍櫃冷凍一小時
5. 將離心後的奈米碳溶液用孔徑為 220 μm 的 PTFE 過濾一次
6. 測量上述溶液之放光光譜



圖 9、以不同有機溶劑分離並收集不同粒徑之 cQD 的研究照片

(三) 以不同奈米碳量子點有機溶劑優化鈣鈦礦量子點

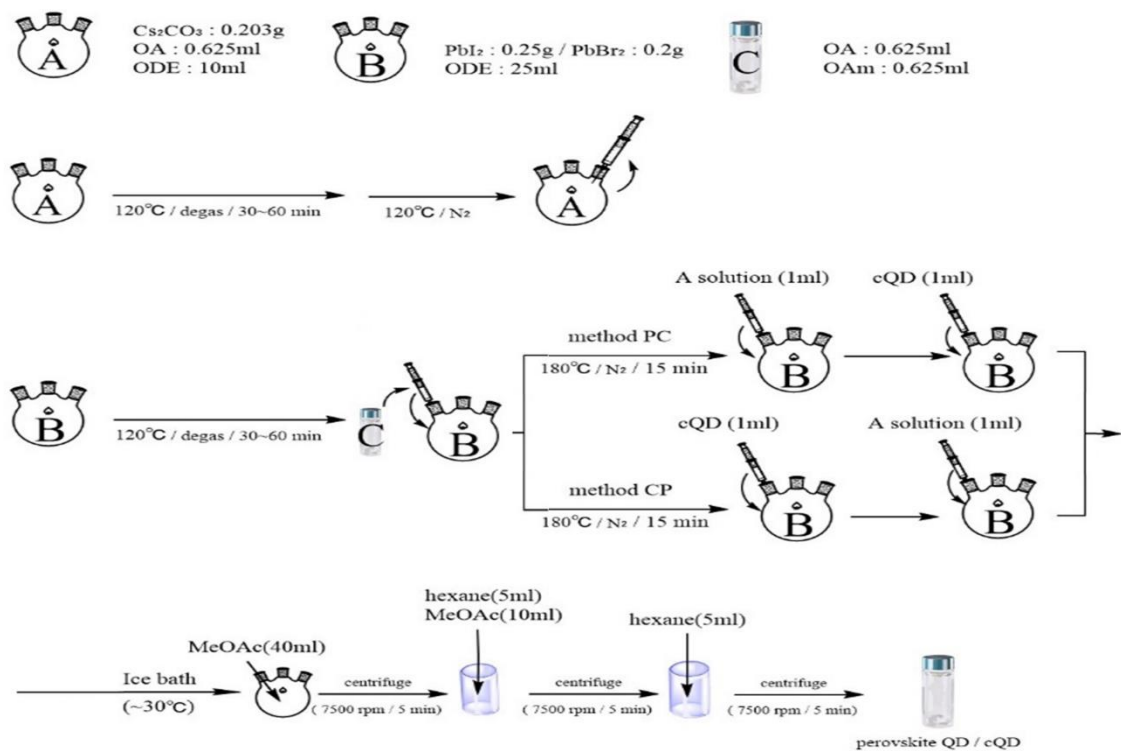


圖 10、以不同 cQD 有機溶劑優化 pQD 的研究步驟

1. 將 0.625mmol (0.2035g) Cs₂CO₃、0.625ml OA、10ml ODE 加入 A 瓶中
 2. 將 A 瓶在真空下加熱至 50°C 維持 30 分鐘，再灌入氮氣加熱至 120 度
 3. 將 1.08mmol 鹵化鉛前驅物 (0.25g PbI₂ 或 0.2g PbBr₂)、12.5ml ODE 加入 B 瓶中
 4. 將 B 瓶在真空下加熱至 120°C 維持 30 分鐘
 5. 將 3.78mmol (1.25ml) OA、3.78mmol (1.25ml) OAm 加入 C 瓶中
 6. 將 C 瓶加熱至 120°C
 7. 將 C 瓶在真空下加入 B 瓶中，等待 15 分鐘後再灌入氮氣，再加熱至不同溫度 (150°C -180°C)
 8. 吸取 1ml A 瓶中的液體與自製溶液 (如分組細項一)，加入 B 瓶與 C 瓶的混合液中，再快速 (10 秒內) 放入冰浴中降溫，直到降為 30°C
 9. 添加 40ml MeOAc，以 7500rpm 離心 5 分鐘，取沉澱
 10. 添加 10ml MeOAc 與 5ml 正己烷，以 7500rpm 離心 5 分鐘，取沉澱
 11. 添加 5ml 正己烷，以 7500rpm 離心 5 分鐘，取上清液得鈣鈦礦量子點 (pQD)
- 分組細項一 (研究方法):
- (1) PC: 取離心後之不同奈米碳溶液 1ml 於 A 瓶加入 B 瓶與 C 瓶混合液後加入
 - (2) CP: 取離心後之不同奈米碳溶液 1ml 於 A 瓶加入 B 瓶與 C 瓶混合液前加入
 - (3) 改變方法 PC 與 CP 中奈米碳有機溶液的奈米碳量
 - (4) 改變方法 PC 與 CP 中添加的奈米碳有機溶液的劑量
 - (5) 改變方法 PC 與 CP 中添加的奈米碳有機溶液的時間點

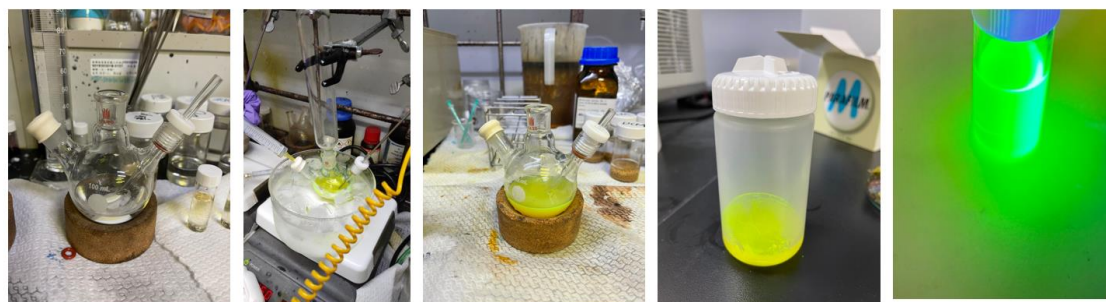
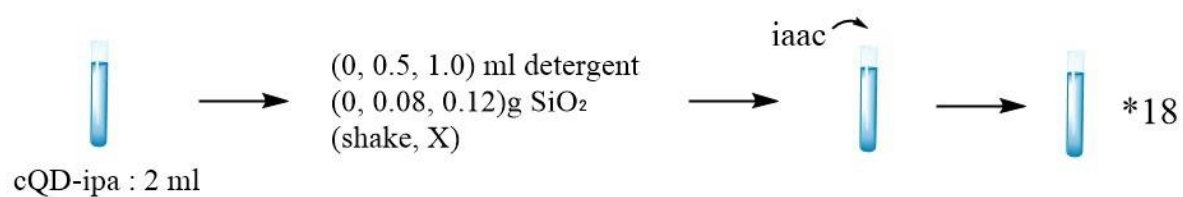


圖 11、以不同 cQD 有機溶劑優化 pQD 的研究照片

(四) 以奈米碳量子點與奈米二氧化矽產出碳矽複合物



(註：一平匙為 0.04 公克)















圖 12、添加界面活性劑與奈米二氧化矽產出 CSiX 的研究步驟

1. 以秤量紙與電子秤量計秤量 1 平匙二氧化矽約為 0.04g
2. 在每個小試管中加入 2mL 飽和奈米碳異丙醇溶液
3. 將三個小試管分為一組並進行不同操作（如表 10）
4. 在小試管中加入乙酸戊酯至 8 分滿
5. 觀察並拍照記錄試管內的變化

參、研究結果與討論

一、添加不同有機溶液對提煉不同粒徑奈米碳的影響

表 1、cQD 在不同有機溶劑中的分散情形

Solvent	PhMe	NPA	IPA	HEX	IAAC	MeOH	EtOH
Picture							
UV							

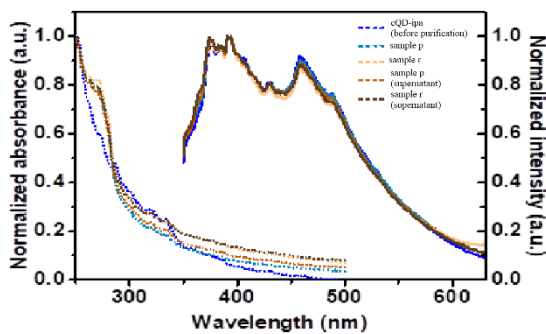


圖 13、以 400nm 激發光照射純化前 CSiX-QD 異丙醇溶液的歸一化強度對放光波長之作圖

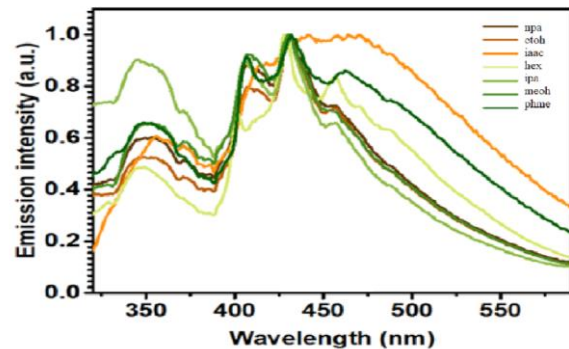


圖 14、以 300nm 激發光照射純化後 cQD 的歸一化強度對放光波長之作圖

討論：

(一) 奈米碳異丙醇溶液在純化前後放光光譜之比較

圖 13 中，我們測量自製的 cQD 異丙醇溶液之放光光譜，發現所測得的放光光譜有許多波峰。我們推論其可能原因為燃燒乙炔所收集的 cQD 顆粒大小不均勻所導致，故決定用離心與過濾的方式來統一 cQD 的粒徑大小。且與圖 20 進行比較，可以發現純化前 cQD 異丙醇溶液之最強放光波長區間位於 400nm 左右，而純化後 cQD 異丙醇溶液之最強放光波長區間位於 430nm 左右，且純化前 cQD 異丙醇溶液之放光曲線較純化後 cQD 異丙醇溶液之放光曲線更加曲折，存在較多小波峰，故證實此離心過濾法確實有助於篩選 cQD 之粒徑，並會對其 cQD 之放光波峰波長造成影響。

(二) 以不同有機溶劑萃取奈米碳量子點對其放光光譜之影響





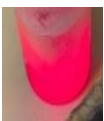



經過研究後，我們發現不同有機溶液溶解 cQD 後的顏色有所不同（如表 1），而其在照射 UV 光之後的顏色也有些許差異，因此我們決定將七種不同 cQD 有機溶液純化後，以 300nm 之激發光測量其放光光譜，得到圖 14，觀察比較後發現以下現象：

1. cQD 異丙醇溶液在較短波長處（400nm 前）有相較於其他 cQD 有機溶液較為突出的放光。
2. cQD 乙酸戊酯溶液在較長波長處（450nm 後）有相較於其他 cQD 有機溶液較為突出的放光，且其半峰全寬較寬廣，其次為 cQD 甲苯溶液與 cQD 正己烷溶液。

因此，綜合以上，我們推論以不同有機溶液提煉 cQD 確實會對其放光效應產生影響。

二、添加不同鹵化鉛前驅物與改變溫度對鈣鈦礦量子點放光效應的影響

表 2、添加不同鹵化鉛前驅物與溫度對 pQD 製程之結果

樣品編號	1	2	3	4
溫度	150°C	180°C	150°C	180°C
QD				
UV				
鹵化鉛前驅物	PbI ₂	PbI ₂	PbBr ₂	PbBr ₂

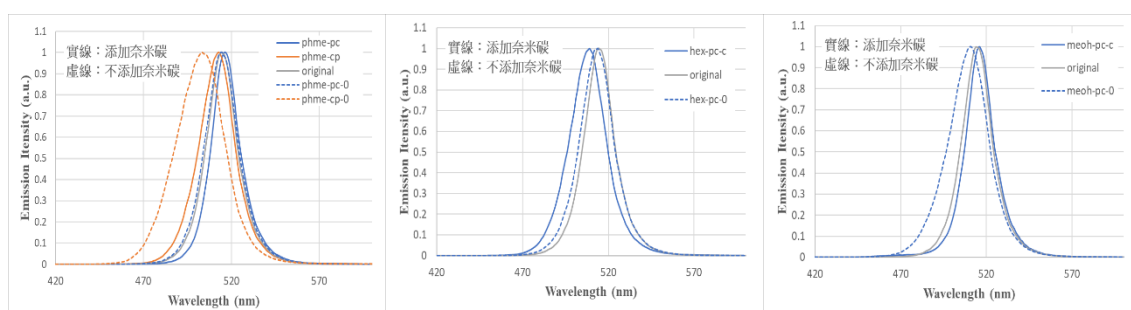
討論：

透過觀察添加不同鹵化鉛前驅物與溫度至 pQD 製程中之放光變化（如表 2），我們發現當以 PbI₂ 作為鹵化鉛前驅物的 pQD 在最高加熱溫度為 180°C 時（樣品編號 2），在 UV 光照射下其放光效果就會大幅減少，而當以 PbBr₂ 作為鹵化鉛前驅物的 pQD 在最高加熱溫度為 180°C 時（樣品編號 4），在 UV 光照射下其放光效果不會有明顯減少，因此我們推論以 PbI₂ 作為前驅物的 pQD 在製程中會比以 PbBr₂ 作為前驅物的 pQD 更不穩定，故在之後加入奈米碳溶液到 pQD 製程的過程中，會以 PbBr₂ 作為鹵化鉛前驅物為主進行測試，待實驗穩定後再進行以 PbI₂ 作為鹵化鉛前驅物的 pQD 合成。

三、在有機溶劑中添加奈米碳與否對鈣鈦礦量子點放光效應的影響

表 3、添加不同 cQD 有機溶液之 pQD 的 PLQY、FWHM、波峰波長

添加有機溶劑	添加奈米碳	實驗方法	PLQY	FWHM	波峰波長
無	X	X	33.29%	20nm	514nm
甲苯(PhMe)	是	PC	47.83%	18nm	516nm
甲苯(PhMe)	否	PC	32.27%	21nm	513nm
甲苯(PhMe)	是	CP	30.68%	23nm	514nm
甲苯(PhMe)	否	CP	26.59%	32nm	503nm
正己烷(HEX)	是	PC	36.48%	24nm	509nm
正己烷(HEX)	否	PC	33.20%	22nm	514nm
甲醇(MeOH)	是	PC	36.67%	18nm	516nm
甲醇(MeOH)	否	PC	31.67%	26nm	511nm



以 400nm 激發光照射添加 cQD 有機溶液之 pQD 的歸一化強度對放光波長之作圖

圖 15、甲苯，圖 16、正己烷，圖 17、甲醇

討論：

(一) 發光效率 (PLQY)

透過比較添加 cQD 與否在不同有機溶液之 pQD 的 PLQY (如表 3)，我們發現雖然並非每個添加 cQD 的有機溶劑均可以增加 pQD 的發光產率，但相較於沒有添加 cQD 的有機溶劑到 pQD 中，其 PLQY 之值均有上升，因此添加奈米碳確實有助於 pQD 的發光效率。

(二) 發射光譜波峰波長位移 (Emission peak spectral shift)

透過觀察其發射光譜圖的波峰波長 (如表 3)，我們發現添加 cQD 亦會對其放光波峰的波長產生位移現象，但是紅移 (如圖 16) 或藍移 (如圖 15 與圖 17) 會隨有機溶劑不同而有所改變。

(三) 半峰全寬 (FWHM)

透過比較添加 cQD 與否在不同有機溶液之 pQD 的半峰全寬 (如表 3)，我們發現添加 cQD 與否會對其產生影響，但不一定是增加 (如 cQD 正己烷溶液) 或減少 (cQD 甲苯溶液、cQD 甲醇溶液)，會因添加之有機溶劑不同而有所改變。

四、以方法 PC 添加不同批次純化後奈米碳甲苯溶液對鈣鈦礦量子點放光效應的影響

表 4、方法 PC 添加不同批次純化後 cQD 甲苯溶液之 pQD 的 PLQY

樣品編號	添加自製溶劑	cQD 製作日期	cQD 離心日期	pQD 合成日期	PLQY
5	無	X	X	2022/12/26	33.29%
6	奈米碳甲苯	2022/12/01	2022/12/08	2022/12/26	47.83%
7	奈米碳甲苯	2022/12/01	2022/12/08	2023/01/05	46.99%
8	奈米碳甲苯	2023/01/04	2023/01/05	2023/01/05	36.90%
9	奈米碳甲苯	2023/01/04	2023/01/06	2023/01/09	36.34%

討論：

(一) 發光效率 (PLQY)

透過比較相同研究方法但添加不同批次純化後 cQD 甲苯溶液之 pQD 的 PLQY (如表 4)，我們發現同一天製造出來的 cQD (樣品編號 6 與樣品編號 7；樣品編號 8 與樣品編號 9) 在發光產率上不會因為離心日期與 pQD 合成日期不同而有顯著差異 (具有再現性)，但當 cQD 製作日期不同時，在發光效率上便會有顯著差異，但相較於未添加 cQD 有機溶液的對照組 (樣品編號 5) 均有所提升。我們推論可能原因為溫度不同，導致 cQD 在甲苯中的溶解度下降進而使溶液濃度下降。由於反應中加入的 cQD 濃度較低，導致 pQD 發光產率降低。而我們也因此證實添加 cQD 在甲苯溶劑中確實可以優化 pQD 的發光產率，且優化程度與 cQD 在甲苯中的濃度成正相關。

五、添加不同奈米碳有機溶液對鈣鈦礦量子點放光效應的影響








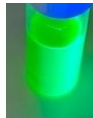




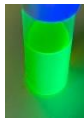


表 5、方法 PC 添加不同 cQD 有機溶液之 pQD 隨時間改變的 PLQY

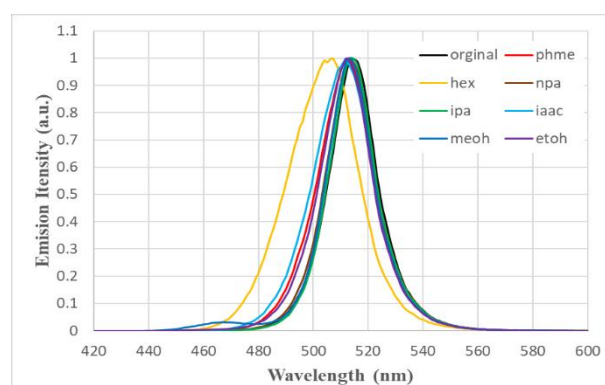
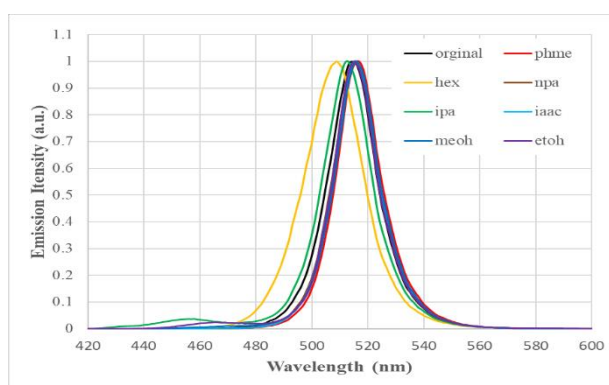
奈米碳溶液	3 天後	10 天後	14 天後
無	33.29%	36.45%	35.21%
甲苯(PhMe)	47.83%	64.88%	56.67%
正己烷(HEX)	36.48%	37.22%	
正丙醇(NPA)	31.34%	29.81%	
異丙醇(IAAC)	29.19%	26.58%	
甲醇(MeOH)	36.67%	37.33%	
乙醇(EtOH)	26.99%	37.30%	

表 6、方法 PC 添加不同 cQD 有機溶液之 pQD 的 PLQY、FWHM、波峰波長

奈米碳溶液	無	甲苯(PhMe)	正己烷(Hex)	正丙醇(NPA)
PLQY	36.45%	64.88%	37.22%	29.81%
FWHM	20nm	18nm	24nm	18nm
波峰波長	514nm	516nm	509nm	516nm
照片(自然光)				
照片(UV 光)				
奈米碳溶液	異丙醇(IPA)	乙酸戊酯(IAAC)	甲醇(MeOH)	乙醇(EtOH)
PLQY	66.54%	26.58%	37.33%	37.30%
FWHM	20nm	18nm	18nm	18nm
波峰波長	513nm	515nm	516nm	515nm
照片(自然光)				
照片(UV 光)				

表 7、方法 CP 添加不同 cQD 有機溶液之 pQD 的 PLQY、FWHM、波峰波長

奈米碳溶液	無	甲苯(PhMe)	正己烷(Hex)	正丙醇(NPA)
PLQY	36.45%	33.98%	27.86%	48.59%
FWHM	20nm	23nm	30nm	20nm
波峰波長	514nm	513nm	507nm	513nm
照片(日光)				
照片(UV 光)				
奈米碳溶液	異丙醇(IPA)	乙酸戊酯(IAAC)	甲醇(MeOH)	乙醇(EtOH)
PLQY	39.92%	34.17%	31.13%	37.65%
FWHM	19nm	24nm	20nm	21nm
波峰波長	514nm	512nm	513nm	512nm
照片(日光)				
照片(UV 光)				



以相同方法添加不同 cQD 有機溶液之 pQD 的歸一化強度對放光波長之作圖

圖 18、方法 PC，圖 19、方法 CP

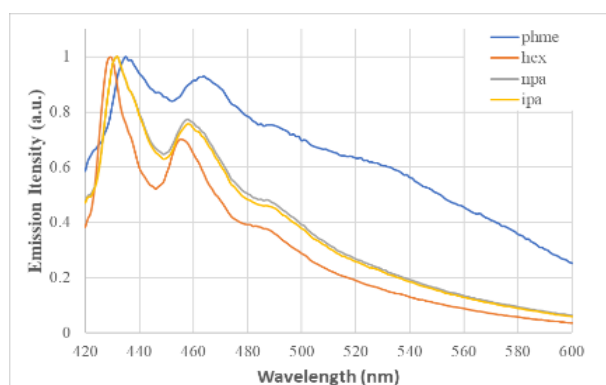


圖 20、以 400nm 激發光照射不同 cQD 有機溶液的歸一化強度對放光波長之作圖

討論：

(一) 發光效率 (PLQY)

經過研究後，我們測量得出了 7 種不同 cQD 有機溶液分別以兩種方法添加進 pQD 製程中的 PLQY 值（如表 6 與表 7），發現以下幾點現象：

1. 以方法 PC 添加 cQD 有機溶液時（如表 6），其 PLQY 值有顯著上升者為 cQD 異丙醇溶液（上升幅度 182.6%）與 cQD 甲苯溶液（上升幅度 178.0%），其次為 cQD 甲醇溶液、cQD 乙醇溶液、cQD 正己烷溶液（上升幅度均在 102% 左右）。
2. 以方法 CP 添加奈米碳有機溶液時（如表 7），其 PLQY 值有顯著上升者為 cQD 正丙醇溶液（上升幅度 133.3%），其次為 cQD 異丙醇溶液（上升幅度 109.5%）、cQD 乙醇溶液（上升幅度 103.3%）。

(二) 發射光譜波峰波長位移 (Emission peak spectral shift)

經過研究後，我們測量得出了 7 種不同 cQD 有機溶液分別以兩種方法添加進 pQD 製程中的發光光譜圖（如表 6、表 7 與圖 18、圖 19），發現以下幾點現象：

1. 以方法 PC 添加奈米碳有機溶液時（如圖 18），可以發現添加 cQD 有機溶液的 pQD 光譜圖（實驗組）與未添加 cQD 有機溶液之 pQD 的光譜圖（對照組）相比，在放光波峰的波長上均有位移的現象，但是藍移或紅移，會隨著添加之有機溶劑不同而有所改變。

2. 以方法 CP 添加 cQD 有機溶液時（如圖 19），可以發現添加 cQD 有機溶液的 pQD 光譜圖（實驗組），不論其添加的有機溶液為何，與未添加 cQD 有機溶液之 pQD 的光譜圖（對照組）相比，在放光波峰的波長上均有藍移的現象，因此我們推論以方法 CP 添加之 cQD 有機溶液可以調控鈣鈦礦量子點之位移。我們認為可能的原因為先添加 cQD 有機溶液時，cQD 便優先附著於鈣鈦礦結晶核外圍，使其在生長過程中所產生之 pQD 粒徑較小，導致整體發射光譜圖藍位移。
3. 比較以方法 PC 與方法 CP 添加之 cQD 正己烷溶液與未添加 cQD 有機溶液之放光光譜圖（如圖 18、圖 19），可以發現其波峰均有顯著的藍位移（5nm 與 7nm）。而在圖 16 時，可發現僅添加正己烷溶劑（不含 cQD）之 pQD 與對照組相比並無位移現象，但在不同有機溶劑中之 cQD 對波峰波長位移所造成之變化又不同，因此推論 cQD 正己烷溶液對 pQD 產生之藍位移應為 cQD 與正己烷共同作用下的結果。

（三）半峰全寬（FWHM）

經過研究後，我們測量得出了 7 種不同 cQD 有機溶液分別以兩種方法添加進 pQD 製程中的 FWHM（如表 6 與表 7），發現以下幾點現象：

1. 以方法 PC 添加奈米碳有機溶液時（如表 6），可以發現除 cQD 正己烷溶液外，其餘 6 種添加 cQD 有機溶液之 pQD 的半峰全寬（實驗組）與未添加 cQD 有機溶液之 pQD 的 FWHM（對照組）相比，皆為持平或減少，因此我們推論以方法 PC 添加 cQD 有機溶液較可能有助於縮小 pQD 之 FWHM，而正己烷之特例，有可能與其在未添加 cQD 有機溶液之時即有的藍位移現象（如圖 16）有關。
2. 以方法 CP 添加奈米碳有機溶液時（如表 7），可以發現添加 cQD 有機溶液之 QD 的 FWHM（實驗組）與未添加 cQD 有機溶液之 pQD 的 FWHM（對照組）相比，除 cQD 異丙醇溶液外，其餘皆為持平或增加。

(四) 穩定度 (lifespan)

經過研究後，我們記錄了 6 種不同有機奈米碳溶液以方法 PC 添加進 pQD 後，在 3 天後、10 天後、14 天後的 PLQY 值（如表 5），觀察其對穩定度所產生的影響，發現有些樣品（包含未添加 cQD 有機溶液的對照組與添加 cQD 有機溶液的實驗組）在放置 10 天後的 PLQY 值比放置 3 天後的 PLQY 值來的更高。我們推論此現象可能源自於 QD 的團聚作用，未來我們也將針對此現象進行進一步的探討。

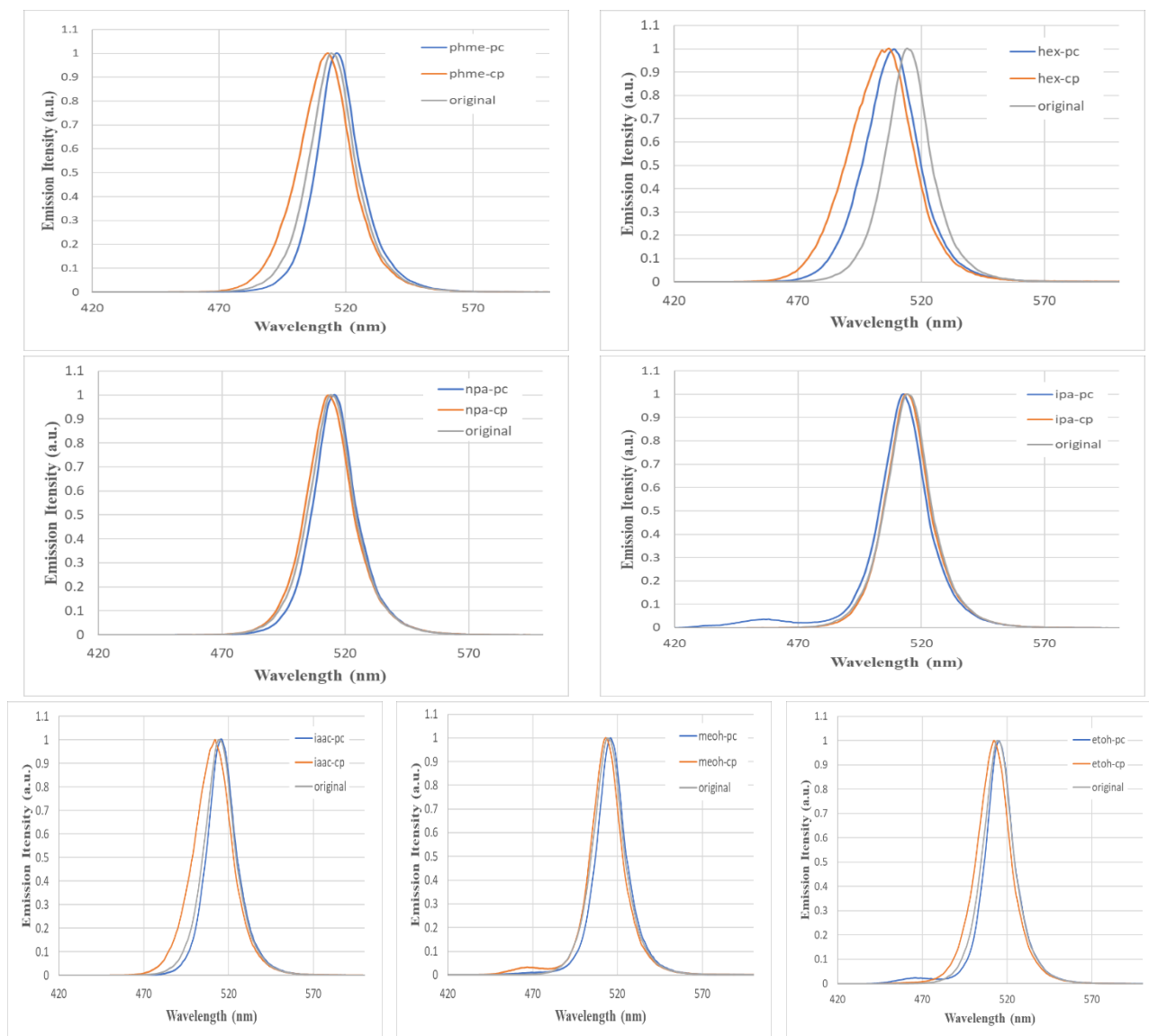
(五) 奈米碳有機溶液之放光光譜圖

綜合上述結論，我們發現當 cQD 溶於甲苯、正己烷、正丙醇、異丙醇這 4 種有機溶劑時，較能對 pQD 產生優化作用。為了進一步探討可能的原因，我們再次測量以上 4 種 cQD 有機溶液的放光光譜圖，並改以與測量 pQD 時相同波長的 400nm 激發光照射，得到圖 20，發現 cQD 甲苯溶液有相較於另外 3 種 cQD 有機溶液具明顯不同的放光效應，因此在後續改變其他變因時，決定先針對添加 cQD 甲苯溶液進行探討。

六、以不同方法添加奈米碳有機溶液對鈣鈦礦量子點放光效應的影響

表 8、以不同方法添加 cQD 有機溶液之 pQD 的 PLQY、FWHM、波峰波長

奈米碳溶液	PLQY		FWHM		波峰波長	
	PC	CP	PC	CP	PC	CP
無	36.45%		20nm		514nm	
甲苯(PhMe)	64.88%	33.98%	18nm	23nm	516nm	513nm
正己烷(Hex)	37.22%	27.86%	24nm	30nm	509nm	507nm
正丙醇(NPA)	29.81%	48.59%	18nm	20nm	516nm	513nm
異丙醇(IPA)	66.54%	39.92%	20nm	19nm	513nm	514nm
乙酸戊酯(IAAC)	26.58%	34.17%	18nm	24nm	515nm	512nm
甲醇(MeOH)	37.33%	31.13%	18nm	20nm	516nm	513nm
乙醇(EtOH)	37.30%	37.65%	18nm	21nm	515nm	512nm



以不同方法添加 cQD 有機溶液之 pQD 的歸一化強度對放光波長之作圖

圖 21、甲苯，圖 22、正己烷，圖 23、正丙醇，圖 24、異丙醇，

圖 25、乙酸戊酯，圖 26、甲醇，圖 27、乙醇

討論：

(一) 發光效率 (PLQY)

比較方法 PC 與方法 CP 之整體 PLQY 值上升情況 (如表 8)，可以發現以方法 PC 添加 cQD 有機溶液相對於以方法 CP 添加 cQD 有機溶液較有可能對 pQD 的發光效率產生較大的優化作用 (cQD 異丙醇溶液上升幅度 182.6%、cQD 甲苯溶液上升幅度 178.0%)，因此在後續實驗中我們將首先針對方法 PC 進行進一步的研究。

(二) 發射光譜波峰波長位移 (Emission peak spectral shift)





























比較方法 PC 與方法 CP 之在相同 cQD 有機溶液下的位移情況 (如表 8 與圖 21~圖 27), 可以發現除 cQD 異丙醇溶液外, 其餘以方法 PC 添加 cQD 有機溶液的 pQD 波峰波長皆大於以方法 CP 添加 cQD 有機溶液及未添加 cQD 有機溶液的 pQD 波峰波長, 而 cQD 異丙醇溶液雖為特例, 但其以方法 CP 添加 cQD 溶液之 pQD 波峰波長與未添加 cQD 之 pQD 波峰波長相同, 因此我們推論若想要使 pQD 之發射光譜波峰波長藍移, 應選擇方法 CP 進行研究。

(三) 半峰全寬 (FWHM)

比較方法 PC 與方法 CP 之 FWHM (如表 8), 可以發現除 cQD 異丙醇溶液外, 其餘以方法 PC 添加 cQD 有機溶液之 pQD 的 FWHM 皆小於以方法 CP 添加 cQD 有機溶液的 pQD 的 FWHM, 因此我們推論方法 PC 相較於方法 CP 更可能有助於縮小 pQD 之 FWHM, 而 cQD 異丙醇溶液雖為特例, 但其方法 CP 與方法 PC 的 FWHM 值其實只相差 1nm, 故在未來我們將針對此部分進行深入探討, 確定此現象為實驗誤差之結果或 cQD 異丙醇溶液之獨特效應。

七、添加不同體積奈米碳有機溶液對鈣鈦礦量子點放光效應的影響

表 9、添加不同劑量 cQD 甲苯溶液之 pQD 的 PLQY (%)



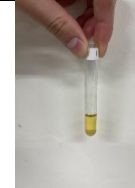
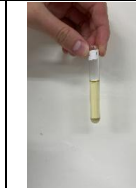
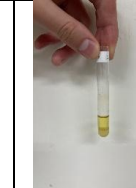
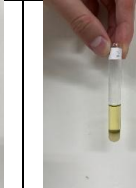

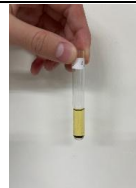
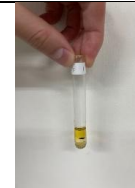
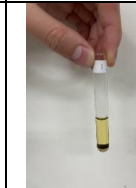

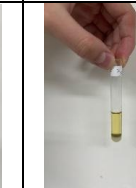
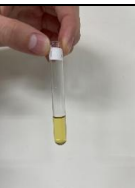
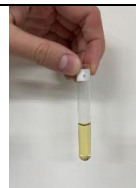
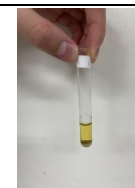
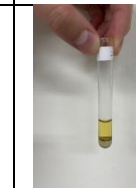
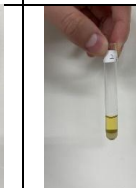
溶液量(ml)	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	1	2	3	4	5
樣品 6	36.01		59.00			46.99	39.66	34.97	39.86	32.87
照片(日光)										
照片(UV 光)										
樣品 8		34.69	35.97	35.49	41.38	36.90				
照片(日光)										
照片(UV 光)										
樣品 9			39.58			36.34				
照片(日光)										
照片(UV 光)										

討論：

從第四點之研究結果，我們可以得知添加 cQD 在有機溶劑中的溶解度會影響 pQD 的發光效率，因此若僅比較同一天產出的 cQD 甲苯溶液之添加劑量不同對 pQD 的 PLQY 的影響，可以發現其最大值皆位於 0.5ml 到 1ml 之間，但因為總體積不固定，因此 pQD 的濃度也會受到影響，可能導致其 PLQY 之改變，故我們將會以此研究結果作為參考，在未來進行定量總體積改變添加 cQD 有機溶液之劑量的研究。

八、以奈米碳與奈米二氧化矽產出碳矽複合物之研究

表 10、以 cQD 與 SiO₂ 產出 CSiX 之研究樣品

樣品編號	a	b	c	d	e	F
清潔劑(ml)	0	0	0	0	0	0
SiO ₂ (平匙)	0	0	1	1	2	2
搖晃	否	是	否	是	否	是
照片						
樣品編號	g	h	i	j	k	L
清潔劑(ml)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
SiO ₂ (平匙)	0	0	1	1	2	2
搖晃	否	是	否	是	否	是
照片						
樣品編號	m	n	o	p	q	R
清潔劑(ml)	1	1	1	1	1	1
SiO ₂ (平匙)	0	0	1	1	2	2
搖晃	否	是	否	是	否	是
照片						

討論：

（一）添加奈米二氧化矽對奈米碳溶液溶解度的影響

在研究中可發現，僅添加二氧化矽時，添加越多則黑色沉澱越多。推測可能原因為：

1. 二氧化矽會減少奈米碳在異丙醇中的溶解度，故析出黑色沉澱。
2. 二氧化矽與奈米碳反應產生 CSiX，二氧化矽越多反應越明顯。

（二）黑色沉澱位置的不同

在研究結果中，我們發現，在不同條件下，不只是黑色的沉澱數量有所改變，沉澱所在的位置也會不同，可簡單分成二氧化矽上、試管底部、漂浮在兩層中間。在經過搖晃後黑色沉澱較不易產生於底部，而是沉澱在二氧化矽上，請見表 10。

可能造成此現象的原因為黑色沉澱的成分不同，其可能成分為奈米碳與 CSiX，奈米碳密度可以 <1 ，故可能存在於 SiO₂ 之上或乙酸戊酯與異丙醇中間；CSiX 的密度目前仍未知，但若是以 SiC 為例密度為 3.21，確實有可能存在於 SiO₂ 之下。

（三）生成於二氧化矽中的氣泡

在研究結果中，我們發現當同時添加清潔劑與二氧化矽到奈米碳溶液中時，二氧化矽內會產生明顯的氣泡，尤其是當添加清潔劑 0.5mL 與二氧化矽 2mL 時，生成在底部沉澱的二氧化矽之中的氣泡最為明顯。我們推測可能化學反應為： $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{CSiX} + \text{CO}$

雖然以 SiO₂ 與奈米碳反應產生 CSiX 的理論溫度要達到攝氏 1600 度，但因為是奈米碳，性質與一般的碳有所差異，且在不添加清潔劑時，便沒有位於 SiO₂ 之下的黑色沉澱（可能為 CSiX），故我們推測清潔劑可能可以產生乳化反應並促使氣泡產生，而這個微泡則會將奈米碳與二氧化矽包住，形成碳矽複合物 CSiX。

肆、結論與應用

一、研究結論

有 2020 年文獻報導以石墨烯氧化物 (GOs) 添加於鈣鈦礦並成功優化發光特性的案例，本研究以高中實驗室常溫條件，用簡便操作燃燒法將乙炔熱裂解獲得多種型態的碳簇，再以簡易方便的溶劑萃取法分離不同型態的碳簇，做成碳量子點 (cQD)。目前發現用自製的碳量子點 (cQD) 優化鈣鈦礦量子點 (pQD) 發光效應結果，已得到三項重要創新且具有重要經濟效應的成果：光致發光量子產率 (PLQY) 可達 182.6% (幾乎兩倍)、形成 pQD 發光藍位移的新現象以取代傳統紅位移現象、以製程調控 pQD 單頻發光與多頻全光譜機制。另一方面，市售碳矽化合物已溶劑萃取法無法形成量子點，也沒有優化 pQD 發光的功能，自製碳矽複合物做成量子點的條件正進行確認。

上述自製的碳量子點 (cQD) 三項重要創新優化成果之重要製程條件如下：

1. 增加 pQD 之 PLQY 的優化條件：以方法 PC 添加 cQD 異丙醇溶液上升幅度 182.6%、cQD 甲苯溶液上升幅度 178.0%。
2. 控制 pQD 之藍位移的優化條件：以方法 CP 添加 cQD 正己烷溶液。
3. 縮小 pQD 之 FWHM 的優化條件：以方法 PC 添加 cQD 有機溶液。

二、未來展望

深入探討添加 cQD 異丙醇溶液、cQD 甲苯溶液、cQD 正己烷溶液對 pQD 放光效應的影響，改變其添加濃度、劑量與時間點，並持續觀察其穩定度之變化，找出優化的最佳條件。

伍、參考文獻













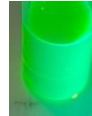












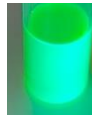
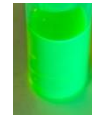

1. Sun, J., Rabouw, F. T., & Yang, X. (2017). Facile Two-Step Synthesis of All-Inorganic Perovskite CsPbX₃ (X = Cl, Br, and I) Zeolite-Y Composite Phosphors for Potential Backlight Display Application. *Advanced Functional Materials*, 27.
2. Pu, Y., Liu, W., & Jiang, Q. (2020). Enhancing Effects of Reduced Graphene Oxide on Photoluminescence of CsPbBr₃ Perovskite Quantum Dots†. *Journal of Materials Chemistry C*, 8.
3. *What Is Quantum Yield?* (n.d.). EDINBURGH INSTRUMENTS.
<https://www.edinst.com/us/blog/what-is-quantum-yield/>
4. Back-Sub Sung, Young-Hoon Yun, (2017). "SiC Conversion Coating Prepared from Silica-Graphite Reaction", *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2017, Article ID 6383084, 8 pages
5. Technical Data Sheet QDot™ Perovskite ABX₃ Quantum Dot. (2022). *Quantum Solutions*.
6. Pham, N. duy, Singh, amandeep , & Chen, weijian . (2021). Self-Assembled Carbon Dot-Wrapped Perovskites Enable Light Trapping and Defect Passivation for Efficient and Stable Perovskite Solar Cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 12.
7. Biernacki, J. J., & Wotzak, G. P. (1989). Stoichiometry of the C + SiO₂ Reaction. *Journal of the American Ceramic Society*, 72(1), 122–129.
8. Chen, M., Hu, H., & Tan, Y. (2018). Controlled Growth of Dodecapod-Branched CsPbBr₃ Nanocrystals and Their Application in White Light Emitting Diodes. *Nano Energy*, 53, 559–566.
9. *The Full Width Half Maximum of Quantum Dots*. (n.d.). Avantama.
[The Full Width Half Maximum of Quantum Dots \(avantama.com\)](https://www.avantama.com/the-full-width-half-maximum-of-quantum-dots/)
10. han, Y., Shang, B., Chen, M., & Wu, L. (2019). One-Step Synthesis of Silica-Coated Carbon Dots with Controllable Solid-State Fluorescence for White Light-Emitting Diodes. *Nano Micro Small*, 15(24).

11. *Application Note: Photoluminescence Spectroscopy of Carbon Dots.* (n.d.). EDINBURGH INSTRUMENTS. <https://www.edinst.com/photoluminescence-spectroscopy-of-carbon-dots/>
12. Di, X., & Shen, L. SPEB. (2017). *Efficient White LEDs with Bright Green-Emitting CsPbBr₃ Perovskite Nanocrystal in Mesoporous Silica Nanoparticles*, 729(1-3), 526-532.
13. Ealia, M. S. anu, & Saravanakumar, M. P. (n.d.). A Review on the Classification, Characterisation, Synthesis of Nanoparticles and Their Application. *IOP Science*, 263(3).
14. Firestone, M. A., Ringstrand, bryan, mogavero, B., & Despard, j tyler. (2018). Aqueous Density Fractionation of Nanocarbons from Colliding-Wave PBX9502 Detonation Soot. *AIP Conference Proceedings*, 160008.
15. Hsu, B., & Chuang, Y. (2021). Very Robust Spray-Synthesized CsPbI₃ Quantum Emitters with Ultrahigh Room-Temperature Cavity-Free Brightness and Self-Healing Ability. *ACS Nano*, 15(7).
16. Dang, Y., Ju, D., & Wang, L. (2016). Recent Progress in the Synthesis of Hybrid Halide Perovskite Single Crystals. *Royal Society of Chemistry*, 18(24).
17. Jiang, Y., Sun, C., Xu, J. *et al.* Synthesis-on-substrate of quantum dot solids. *Nature* **612**, 679–684 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05486-3>
18. Karabela, M. M., & Sideridou, I. d. (n.d.). Synthesis and Study of Properties of Dental Resin Composites with Different Nanosilica Particles Size. *Dental Materials*, 27(8), 825-835.
19. Kumar, P., & Bohidar, H. B. (2010). Aqueous Dispersion Stability of Multi-Carbon Nanoparticles in Anionic, Cationic, Neutral, Bile Salt and Pulmonary Surfactant Solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 361(1-3), 13-24.
20. Li, X., Zhang, G., Ostrovski, O. *et al.* (2016). Effect of gas atmosphere on the formation of silicon by reaction of SiC and SiO₂. *J Mater Sci* **51**, 876–884
21. Li, Z., Li, B., Wu, X., & Sheppard, S. A. (2022). Organometallic-Functionalized Interfaces for Highly Efficient Inverted Perovskite Solar Cells. *Science*, 376(6591), 416-420.

22. Maboudiana , R., & Carraro, C. (2013). Advances in Silicon Carbide Science and Technology at the Micro- and Nanoscales. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 31(5).
23. Park, S. K., Kim, ki Do, & Kim, H. T. (n.d.). Preparation of Silica Nanoparticles: Determination of the Optimal Synthesis Conditions for Small and Uniform Particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 197(1-3), 7-17.
24. Shih C-C. Synthesis and Application of Photoluminescent Silane-carbon Nanodots and Silicon Dioxide Nanocomposite.
25. Si, M., Feng, dan, Qiu, L., & Jia, dingsi. (2013). Free-Standing Highly Ordered Mesoporous Carbon–Silica Composite Thin Films. *Journal of Materials Chemistry A*, 43.
26. Tian, Y., & Shen, Z. B. (2017). Carbon Dot-Silica Composite Nanoparticle: An Excitation-Independent Fluorescence Material with Tunable Fluorescence. *RSC Advances*, 69.
27. Wang, J., Li, M., Shen, W., Su, W., & He, R. (2019). Ultrastable Carbon Quantum Dots-Doped MAPbBr₃ Perovskite with Silica Encapsulation. *ACS Applied Materials & Interfaces*.
28. Wang, T., Wang, A., Wang, R. *et al.* Carbon dots with molecular fluorescence and their application as a “turn-off” fluorescent probe for ferricyanide detection. *Sci Rep* 9, 10723 (2019).
29. Yong-ming YIN, Hong MENG. Progress of Quantum Dots and Perovskite as Color Conversion Materials for Full-color Display[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(4):419-447
30. 周芳妃. (2012). 2012 創意實驗影片-奈米碳來排隊. Taiwan Multimedia Creative Teaching Association. [2012 創意實驗影片 – 奈米碳來排隊 – Taiwan Multimedia Creative Teaching Association \(tmct.org\)](http://tmct.org)
31. 林中冠, 賴敏良, & 李君婷. (n.d.). 新世代鈣鈦礦材料：合成、光電特性及應用. 物理雙月刊. <https://pb.ps-taiwan.org/modules/news/article.php?storyid=28>
32. 曹源, & 馬向東. (2021). 量子點的製備及分散性研究進展. *材料科學*, 11(10)
33. 賴識翔, 鄭皓蓬, 林義鈞, 董福慶, 韓建遠, & 唐謙仁. (2022). 薄膜光學特性之分析模組技術. *機械工業雜誌*.

陸、附件

表 11、於不同時間點添加奈米碳有機溶液對鈣鈦礦量子點放光效應的影響

T(°C)	180	180	180	180	180	180	180
Precursor	PbBr ₂	PbBr ₂	PbBr ₂	PbBr ₂	PbBr ₂	PbBr ₂	PbBr ₂
Solvent	X	PhMe	PhMe	PhMe	PhMe	PhMe	PhMe
Date	X	01/05	01/05	01/05	01/05	01/05	01/05
Approach	X	PC	PC	PC	PC	PC	PC
Dose(ml)	X	1	1	1	1	1	1
Time(s)	X	1	5	7	10	12	15
PLQY(%)	36.23	36.90	35.16	35.68	31.90	31.35	36.96
Picture							
UV							
T(°C)	180	180	180	180	180	180	180
Precursor	PbBr ₂	PbBr ₂	PbBr ₂	PbBr ₂	PbBr ₂	PbBr ₂	PbBr ₂
Solvent	PhMe	PhMe	PhMe	PhMe	PhMe	PhMe	PhMe
Date	01/05	01/05	01/05	01/05	01/05	01/05	01/05
Approach	PC	PC	PC	PC	PC	PC	PC
Dose(ml)	1	1	1	1	1	1	1
Time(s)	20	25	30	40	50	60	last
PLQY(%)	36.40	27.41	38.74	30.20	32.11	31.70	39.00
Picture							
UV							

【評語】 030014

本作品是開發製作奈米碳矽複合物的方法，尋找反應的最佳條件，並測試其發光波長與強度，實驗內容詳盡。

有下列建議提供作參考：

1. 應該對合成出的奈米材料作粒徑、組成分的檢測。
2. 報告中的參考文獻紀錄不完整。
3. 缺少與文獻報導相對應奈米材料資料的比較，提出此次研究的重要成果。
4. 本工作對奈米碳在不同的溶液中的物理發光特性有詳細的探討,包括發光波長在特定溶劑藍移及半波峯窄化現象,但對最終目的之膜特性並未探討研究，如能從溶劑所能獲得的知識轉化到薄膜上，則有助於深化其研究。