

高效能整合型光觸媒反應器簡介

Introduction of High Performance Integrated-System Photocatalytic Reactor

黃鴻基

Hung Ji Huang

高效能整合型光觸媒反應器在此泛指整合了現代光學、微流體、反應強化與先進奈米技術概念的新型態光觸媒反應器，是重要的化工環工技術發展方向。其發展上的先天技術優勢使其具有良好的操作效能，為近年來重要的化工反應器技術發展。本文將舉例簡介幾種新式的高效能整合型反應器，其特色是可以獲得有限空間內更大的光觸媒固定面積、更大的流體質傳效率、更寬頻的激發光有效波長範圍、更有效的光使用效率與更大的操作容量。高效能整合型光觸媒反應器通常具備有體積小、低耗能與低廢棄物排放的優點，可以說是因為更快所以更好的綠色化學技術。

High performance integrated-system photocatalytic reactor combined the ideas from modern optics, microfluidics and frontier nano-technology to have enhanced processing efficiency. The inherent technical advantages of integrated-system photocatalytic reactor result in important developments on chemical engineering in the recent years. In this paper, several improvements are discussed in this paper. The surface-area with deposited photocatalyst was increased in limited-volume for chemical reaction. Higher mass transfer rate and higher processing capability was achieved. Excitation with wide-band light and higher light-harvest were also did for enhancing chemical reaction. The integrated-system photocatalytic reactor is a faster and better performance technology in green chemistry.

一、簡介

光觸媒技術發展迅速且成果很多，但大部分的發展是集中在光觸媒材料的改良上，反應器本身的發展並不多。但近年來隨著不同技術領域間整合技術的發展，光觸媒的應用有了一些新的整合性技術發展。本論文將簡介最近關於高效能整合型光觸媒反應器的發展，以幫助有興趣投入相關研發領域的讀者能夠瞭解目前相關技術的發展狀況。高效能化工反應器的運用並不僅僅侷限在執行觸媒或光觸媒

反應上，其在非觸媒化工反應領域同樣逐漸引起重視。近年來該領域開始有一些有趣的成果出現，相關成果接連發表在許多不同領域期刊中，無法一一探討。因此，本論文著重在點出幾篇有趣的論文與發展方向，希望引起讀者對於光觸媒反應器技術發展的興趣與投入。

傳統的觸媒或光觸媒研究集中在材料的改進上。反應器通常使用泥漿床式或固定床式反應器，且一般是調整反應器的溫度、壓力或是透過攪拌與流體流速的控制強化反應速率。在泥漿床式反應器

的光催化還原或氧化反應過程中，通常將光觸媒微粒與反應溶液均勻混合，使懸浮於反應溶液中的光觸媒有效率地進行光催化還原反應。光觸媒微粒混合在待處理溶液中，透過攪拌可以使其接觸到最多的待處理分子。因此，泥漿床反應系統是將光觸媒微粒與待消除污染物質同時混合入反應溶液中的系統，具有高反應效率的優點。但是，泥漿床式反應器在反應處理後需要將奈米或微米及尺寸之光觸媒微粒自溶液中回收，不僅增加處理過程的複雜度，同時也增加處理的時間及成本。並且，奈米或微米及尺寸之光觸媒微粒吸光截面很小，需要增加單位面積內的照光強度，以驅動具量產能量的光催化反應。

根據我們的實驗觀察，由於二氧化鈦微粒、反應物與液體對紫外光的吸收率很高，UV 光在二氧化鈦微粒的懸浮水溶液中射透距離往往只有 1-2 公分；亦即溶液表面 1-2 公分以下更深處的二氧化鈦微粒所照射的激發光強度不足，而使光觸媒反應大幅度衰減，使得激發光使用效率大打折扣。

而在固定床式反應器上，一般觸媒或光觸媒是固定在反應床上進行催化反應。待處理液體流過汙染物表面，汙染物質在流體中運動擴散到光觸媒的表面並進而被氧化反應處理消除。固定床式反應器具有不需要回收光觸媒的優點，但因為汙染物質在流體中的擴散速率不佳，往往會影響到觸媒的工作效率。

此外，一般光觸媒反應消除化學或有機物汙染物後，其反應生成物往往會對二氧化鈦光觸媒有著極佳的親和力而無法輕易將之驅離，並進而大幅度影響到光觸媒材料的反應效率。這樣的問題在泥漿床式與固定床式反應器中都會出現，並使得光觸媒反應的效率大幅度減低。

新一代的高效能光觸媒整合型反應器整合了不同領域的技術發展，在設計上，運用現代光學、微流體、反應強化與先進奈米技術概念的優勢，除了能解決前述泥漿床式反應器與傳統固定床式反應器的缺點，並進一步在有限空間內更加強化光觸媒反應的效率。

以下的討論中，將分成幾個方向分別探討新一代高效能反應器的優點，以及相關設計上的發展。

文中將討論新一代反應器的特點：更大的光觸媒固定面積、更大的流體質傳效率、更寬頻的激發光有效波長範圍、更有效的光使用效率。這些新一代高效能整合型光觸媒反應器的優點相當有趣，形成了「因為更快，所以更好」的綠色化學技術。

二、更大的光觸媒固定面積

增加固定床的表面積，固定更多光觸媒，使待處理氣體或液體流經過更多的光觸媒，待處理污染物質將可因此獲得更高的被處理機率，以及更高的反應效率。為了要獲得更高大的光觸媒附著面積，會採用一些具有更大外觀面積的材料作為固定基礎。陶瓷類多孔性材料、金屬網或是金屬絲絨皆可提供更多的附著面積。本文在此介紹以集束光纖為基礎，大量光纖所堆疊而出的光觸媒光纖介面波導反應器。光纖由玻璃所構成，可以簡單地控制其光觸媒鍍製製程參數，且能更方便地固定與堆疊的系統構成光纖單元。而由許多光纖單元所組成的光觸媒反應器則可稱之為光觸媒光纖介面波導反應器⁽¹⁻³⁾。此處所介紹的是由 117 根光纖所組成的反應器，在極小的空間內等間距塞入長度為 20 公分的光纖，可使得光纖形成一個很大的反應區域。通透而過的待處理污染氣體就能進行減毒光觸媒氧化反應，以消除污染物毒性。若需要獲得更大的處理效率，則在特定空間內增加更多的光觸媒鍍製光纖，就可以增加連續操作下的單次處理效率。此外，增加單位空間內的光觸媒鍍製光纖，可以強迫待處理液體流過更小的截面間隙，增加光觸媒反應操作效率。這部分將留待後面討論。

使用光纖作為基礎，承載反應用的光觸媒具有許多優點。光纖的基本構成材料為高純度玻璃或二氧化矽，可以承受超過 1000 度的高溫，因此可以在各種光觸媒的製程中維持其穩定結構。且由於其基本由二氧化矽組成，因此可以穩定地與具有氧元素化合而成的二氧化鈦或氧化鋅等常用光觸媒材料穩定結合，能夠減低其使用操作過程中的剝蝕損耗，更延長其使用壽命。且由於光纖本身就是一種可以傳導光的材料，因此，更具有傳送激發光的相對優點。這部分也將留待後面討論。

三、更大的流體質傳效率

為了獲得更大的反應效率提升，待處理污染流體內物質質傳效率的提升，可以解決反應生成物附佔據光觸媒活性區域的問題，並進一步提升光觸媒操作的反應效率。光觸媒對於反應生成物通常具有很高的親和吸引力，必需要能提高液體內的質傳效率，以快速帶走反應生成物，光觸媒反應效率才能更加提升。此處將介紹三種不同形式反應器的特點，如同軸管式反應器、旋轉床式反應器與微流道晶片式反應器。這三種反應器皆具有很高的質傳效率，能夠有效地提升光觸媒反應的操作效率。

1. 同軸管式反應器

同軸管式反應器 (或是 Taylor vortex reactor)⁽⁴⁻⁸⁾ 為兩個同軸相對運動的內管與外管所組成的反應器，如圖 1 所示，內管外徑與外管內徑接近。當待處理流體注入內外管之間，會因為兩者的同軸相對運動而形成流體層間的流速差，並造成流體內的許多劇烈攪動渦流。Taylor (1923)^(4, 5) 第一個觀察到當內管轉速超過一個臨界速度時，可以觀察到內外管間液體層的不穩定流動。流體層內的劇烈攪動渦

流可以大大地增加流體層內物質的質傳效率，待處理污染物在流體內更能夠接觸到光觸媒，反應生成物也能夠更快速地被帶離光觸媒，因此大為提升反應器內的化學反應效率。

在同軸管式反應器作為光觸媒反應器操作下，其內管通常是可通透光觸媒激發光的玻璃管，其內容納低壓管式汞燈。外管則通常是可以反射光觸媒反應激發光的金屬管，將激發光再度反射回到反應器內部，以增加光觸媒反應的光在吸收利用效率。光觸媒通常是鍍製在內管外壁或是外管內壁，具有可以高效能處理流體中的污染物，且又無需回收光觸媒的優點。

2. 旋轉床式反應器

旋轉床式反應器⁽⁹⁻²⁰⁾ 通常具有一個圓碟型的反應床，如圖 2 所示，並且在反應床的上方鍍製有反應的光觸媒。當液體流過在旋轉中的反應床，待處理的液體會被旋轉中的反應床帶動而形成液體薄膜。反應床轉速愈快，液體薄膜厚度越低。液體膜厚減低可以減低光觸媒反應激發光穿透待處理液體過程中，待處理液體的吸光損耗。更進一步觀察，液體薄膜內不同高度的位置流體受到旋轉床牽引的

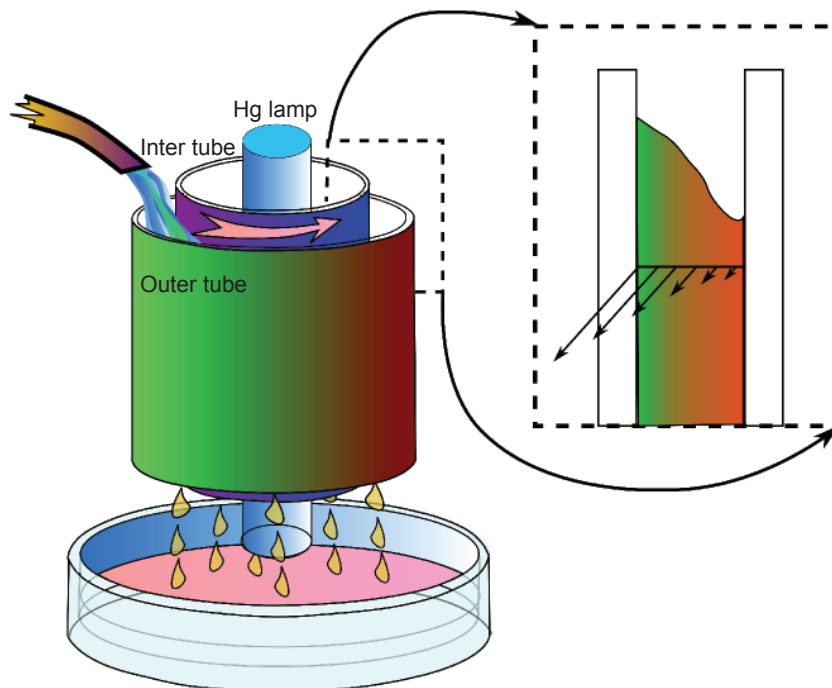


圖 1. 同軸管式反應器示意圖。

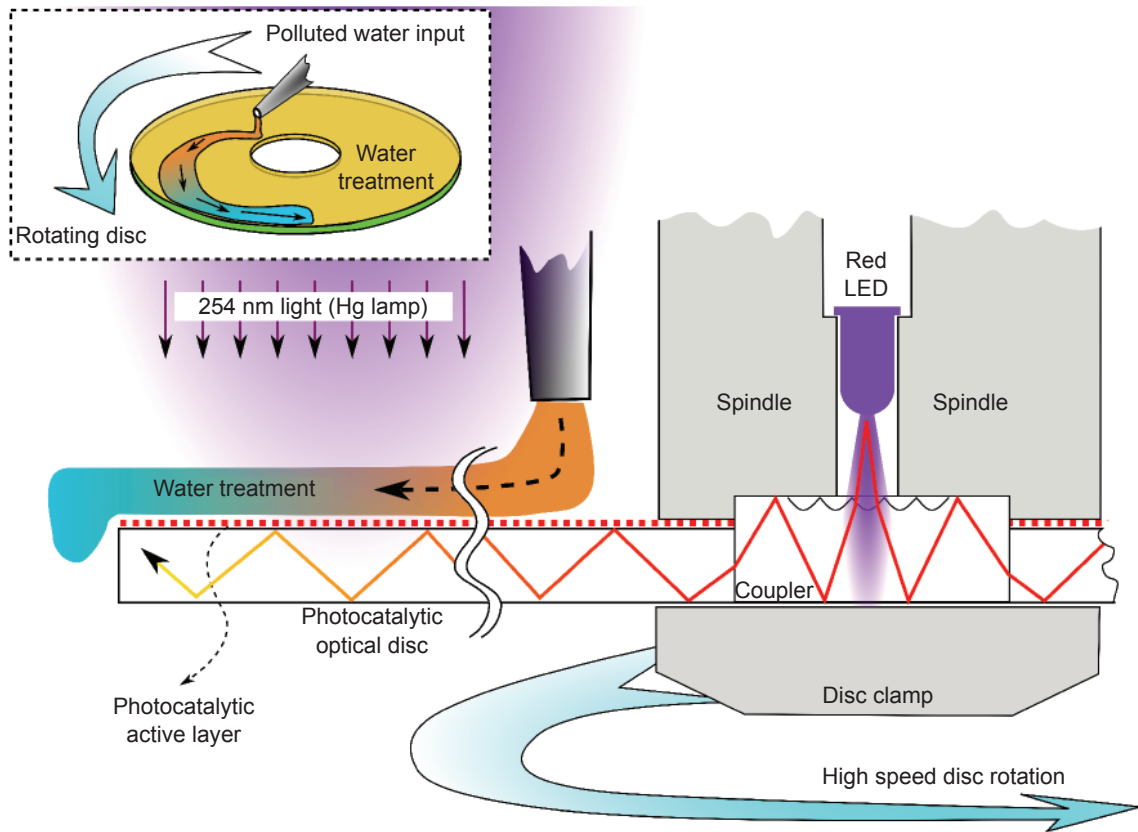


圖 2. 雙光源旋轉床式反應器示意圖^(9, 15)。

力量不同，會產生不同液體層的速度差而相互磨擦擾動。如此會形成不同液體層間擾動的許多微型渦流，這些渦流同樣地會造成待處理液體內的劇烈攪動，與質傳效率的大幅度提升。如此，光觸媒可以接觸到更多的待處理污染物，且反應生成物同樣的可以被快速帶離。旋轉床式反應器操作中，其水溶液中物質之質傳效率極高，因此可以強化與加快化學反應。運用旋轉床式反應器進行二氧化鈦 (TiO_2)^(9, 15)、氧化鋅 (ZnO)⁽¹⁷⁾ 或其他光觸媒材料進行污水處理，同樣具有高效率，而不需回收光觸媒的優點。

目前在一些研究上已經應用旋轉床反應器進行許多研究。運用旋轉床式反應器進行銨氮化合物的消除是一項特別有趣的成果^(12, 21-23)。生物養殖或是人類活動排放廢水中富含的有機物，產生了大量的銨氮化合物，是目前嚴重的水污染問題中重要的有機污染來源⁽²⁴⁻²⁶⁾。一般自然環境中，銨氮有機化合物可以透過微生物或細菌分解的硝化 (nitrification) 與

脫氮 (denitrification) 過程處理消除，如圖 3。其容量大，且單位設置與維護價格相對便宜。然而以細菌為基礎的自然氮循環過程其實非常脆弱，很容易因為銨氮的過度污染而快速增加，酸鹼值 (pH) 的快速大幅度改變，或是水溫的快速變化而迅速崩解。

而在人工氧化消除銨氮類化合物的方法中，往往採用需要高溫高壓封閉系統之濕氧法進行觸媒反應⁽²⁷⁻³⁰⁾。由文獻顯示，濕氧法往往需要在高壓封閉鍋爐 (或是玻璃瓶中) 加溫至超過 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 。高溫高壓鍋爐之操作具有一定程度的危險性，且耗費加熱能量，操作後則需進行降溫。因為僅能執行批次操作，為了提升操作容量往往會使用大型反應槽體，其占用空間大、危險性更高，需要更占空間的槽體防爆設計與更複雜的調控設備。

旋轉床可以使用許多不同的材質作為反應床基板，因此大大地增加了其想像空間與價值。目前已經實現了使用傳統計錄媒體塑膠光碟片作為基板，

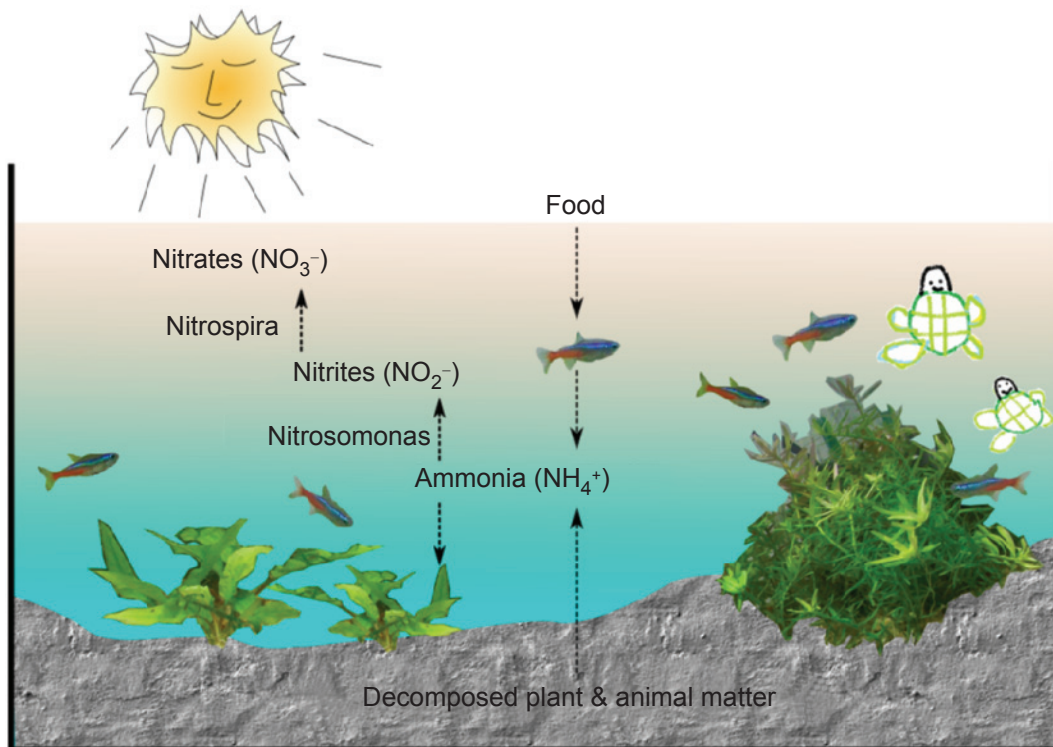


圖 3. 細菌輔助氮化合物消除示意圖。

並在其上鍍製二氧化鈦或氧化鋅的技術^(9, 15, 17)。完成的反應床已經可以運用在光觸媒汙水處理反應上。因此，光觸媒旋轉床反應器技術的發展不只是具有化工的廢水處理能力，更具有再次運用廢棄光碟片的減廢效果。

現今光碟片記錄媒體因為被快閃碟與網路儲存快速取代而逐漸消失，光碟片產業逐漸沒落，大批產能與高額投資逐漸被閒置。很幸運的光觸媒光碟片的製程相容於傳統光碟片的製程，可以活化相關設備的使用率並延長其獲利可能性。因此同樣對於光碟片產業的巨額投資能得到後續回饋。

旋轉床式反應器具有極高的操作質傳效率，目前已經驗證可以運用在銨氮化合物的消除上。其短時間之操作效果佳，且可以在常溫常壓下操作^(12, 21-23)。設備不僅不會有高溫反應槽的危險性，且不需要後續的處理前後的升溫降溫作業。相對於傳統濕氧法操作技術，旋轉床式反應系統危險性低、佔用空間小、能源消耗也低。

3. 微流道晶片型反應器

微流道晶片型反應器^(31, 32) 主要是由微流道所構建而成的反應器。微流道晶片反應器的特色是作為光觸媒反應的作用區域具有至少一維的局限性^(33, 34)，而在有局限性的微流道內進行反應，可以提供數項重要優點。第一，微流道內壁的局限性會限制其內容納的液體數量，可以減低反應確認所需的光觸媒數量與反應確認時間。第二，光觸媒固定在空間狹小的微流道內壁，微流道內的容納液體量與光觸媒的體積比例可減小，光觸媒可以更為接近最多的待處理污染物質，有效提升光觸媒的使用效率。第三，微流道的截面侷限在很小的空間。接近微流道內壁的液體流速，會受留到內壁吸引而形成與液體注入流速的速差。微流道的受侷限截面會導致速差影響比例增大，並進而形成微流道內部因速差所造成的許多非常微小區域內的劇烈攪動渦流，渦流會進而使流體內的質傳效率大幅提高。如此即能強化光觸媒反應物與反應生成物的帶入與帶出效率，提升光觸媒反應效率。微流道晶片型反應器雖然有很多優點，但缺點是其單次操作液體量少，需

要並聯更多的反應器，以提供更大的操作容量。

一般的微流道晶片是運用微機電技術製作完成，也可以簡單地使用具有一維侷限的玻璃夾層或是玻璃微細管構成。其構成結構會因為反應需求而有不同的製作技術需求，其建置價格也有所不同。

4. 光觸媒光纖介面波導反應器

前面提到的光觸媒光纖介面波導反應器，若希望獲得最佳的處理效率，則可以在特定空間內增加更多的光觸媒鍍製光纖，以便增加更大的光觸媒覆蓋面積。此外，還可以強迫待處理液體流過更小的截面間隙，獲得與前面微流道晶片型反應器同樣的好處，增加光觸媒反應操作效率。減小流體傳輸截面，除了可以更大幅度地增加待處理流體的流動距離，使流體接觸更多的光觸媒。更可以藉由減小截面來獲得更大的截面流速變化，從而造成流體內部因流速差所造成的細微渦流擾動微流體。同樣可以加速待處理流體的質傳效率，增加待處理反應物帶往光觸媒的速率以及反應生成物帶離光觸媒的速率。同樣的，光觸媒反應效率也可因此而大幅度提升。

四、更寬頻的激發光有效波長範圍

二氧化鈦為主的光觸媒對於各種水中汗染物之消除具有極佳之操作效果。A. Fujishima 團隊首先在 1972 年提出以二氧化鈦進行水的光觸媒分離⁽³⁵⁾，其後光觸媒的發展日益受到全世界研究學者的關注^(11, 35-39)。經過多年的發展，許多不同形式的光觸媒材料激發光範圍已經可以從紫外光波段延伸到可見光波段。光觸媒可以吸收更多的可見光，並因此而能更有效地運用以可見光為主的太陽光進行光觸媒反應。相關的材料研究成果很多，其中一個分支－電漿子強化光觸媒材料發展非常有趣。

電漿子又可更正式地稱之為量子電漿子，基本上可以定義為金屬內的自由電子的量子化群集震盪現象⁽⁴⁰⁻⁴⁶⁾。因為存在形式的不同，可以概略地區分成體積電漿子、表面電漿子與侷域表面電漿子三種。量子電漿子的存在必要條件，是必須要有高濃度自由電子的材料，因此，可以進行電漿子強化

光觸媒反應^(2, 3, 15, 22, 23, 47-52)的材料往往是金屬與光觸媒的複合材料，或是直接由金屬所構成的光觸媒材料。操作上為了使電漿子效應更加強化，設計上通常會使用具有奈米級侷限尺寸的金屬材料，以透過尺寸侷限來進一步獲得更高效能的強化光觸媒反應。直接完全由金屬所構成的光觸媒具有製作簡便，不必考慮複合材料結構與功函數匹配問題的優點。直接金屬材料容易有氧化的問題，且可能不易固定在承載基板上的缺點。但由於全金屬光觸媒結構簡單，可直接分析量子電漿子效應的影響，仍然具有極佳研究價值。

在量子電漿子的運用上，金屬顆粒與光觸媒複合材料的成果很多，且成效不錯。但更有趣的是，傳統白金觸媒⁽²⁷⁻³⁰⁾作為白金光觸媒使用，也可以獲得很好的效果。由先前的成果顯示，鹵素燈輸出的外加光對於白金 (Pt) 觸媒之水中銨離子 (NH_4^+) 氧化反應具有促進之效果^(12, 22, 23)，直接運用熱能變化計算反應過程中之能量減損差異，更可進而量化表面電漿光觸媒反應能量轉移過程。奈米白金薄膜與光觸媒光波導介面旋轉床反應器結合，更具有提高處理中液體之質傳效率與降低操作消耗能量等優點，可應用於高效能之水污染處理，對於光觸媒與表面電漿輔助光化學反應之發展具有重要意義。

五、更有效的光使用效率

為了更進一步提升激發光的使用效率，可以在多次重複使用的概念下去強化光觸媒對反應激發光的吸收與利用效率。前面的同軸管式反應器運用可反射光線的外壁，將光觸媒反應激發光侷限在反應器內多次反射吸收與運用就是一個很好的例子。然而，多次反射雖然可以提升光觸媒反應激發光的使用效率，但是一般待處理污染物流體往往對激發光的吸收率也很高。此外，若污染物流體混濁具有許多的微小顆粒懸浮其中，則激發光會被進一步散射而溢出侷限區域。下面我們將介紹兩種介面光波導型的反應器，可運用光波導承載反應用的光觸媒與傳輸光觸媒反應驅動用的激發光。如此不僅光觸媒同樣具有不須回收的優點，且更具有反應激發光多次充分利用的優點。

1. 光纖介面光波導反應器

1977 年時，Marinangeli 與 Ollis 提出光纖光觸媒反應器的構想，將二氧化鈦光觸媒附著於光纖表面，讓反應物接觸二氧化鈦薄膜的表面，同時讓反應光源在光纖內傳播，使二氧化鈦光觸媒與入射光進行光催化還原反應，形成新式光觸媒光纖波導介面反應器⁽¹⁻³⁾。更進一步擴大操作容量的光纖介面光波導反應器由許多單獨的光纖所組成。每一根光纖介面光波導除了承載光觸媒外，更負擔傳遞光觸媒反應激發光的角色。激發光由一端耦合進入光纖光波導後，會在其內的傳遞。激發光多次的被光纖光波導表面反射回光波導內部，而每一次反射即會將部分能量提供給附著在光纖光波導表面的光觸媒，並驅使光觸媒反應作用完成。延長光纖的長度就可以有效率的大幅度轉換激發光能量，進而轉換為光觸媒反應所需要的化學反應。光觸媒反應所消耗的激發光能量會減少，且可以有效運用集束光纖的優勢，強化光觸媒反應。此外，光纖波導介面反應器可利用發光二極體或各種燈源作為反應光源，故反應槽體積小，且反應效率佳。

傳統運用陶瓷類多孔性材料、金屬網或是金屬絲絨作為光觸媒的固定基礎，同樣提供更多的附著面積。但由於該類材料的光通透深度淺，傳遞光觸

媒反應激發光的效率因此不佳，無法在更大的深度內有效提供激發光強度。因此，光纖介面光波導更能夠提供單位面積內的大量光觸媒，且更能有效地將反應激發用光均勻傳導給不同深度的光觸媒。

2. 光碟片介面光波導反應器

奈米金屬顆粒在量子電漿子效應作用下，通常具有較為寬廣之吸光光譜範圍⁽⁴⁰⁻⁴⁶⁾，可加大複合光觸媒材料之光吸收範圍，並將額外吸收的能量轉換為化學能，以提升光觸媒反應之效率^(2, 3, 15, 22, 23, 47-52)。但一般的污水會吸收可見光，而金屬奈米粒子卻往往需要可見光照射，以誘發量子電漿子獲得其能量。前述之光纖光波導介面光觸媒反應器，利用光波導傳遞激發用光之概念，即可避免光能量穿透待處理液體而被吸收之問題。但由於光纖作為光波導介面光觸媒反應器時，通常光纖是集束排放，且固定不動。雖然可以獲得更大的光觸媒固定面積，但也同時具有固定床式反應器質傳效率較低的缺點。因此，另外有運用透光玻璃或塑膠基板作為光觸媒承載用的圓碟型介面波導的產生，如圖 4，並且被運用在旋轉床式反應器中。

不同波長激發光耦合進入光碟片介面光波導中，會沿著內部傳遞與擴散，並確保可以經由基板

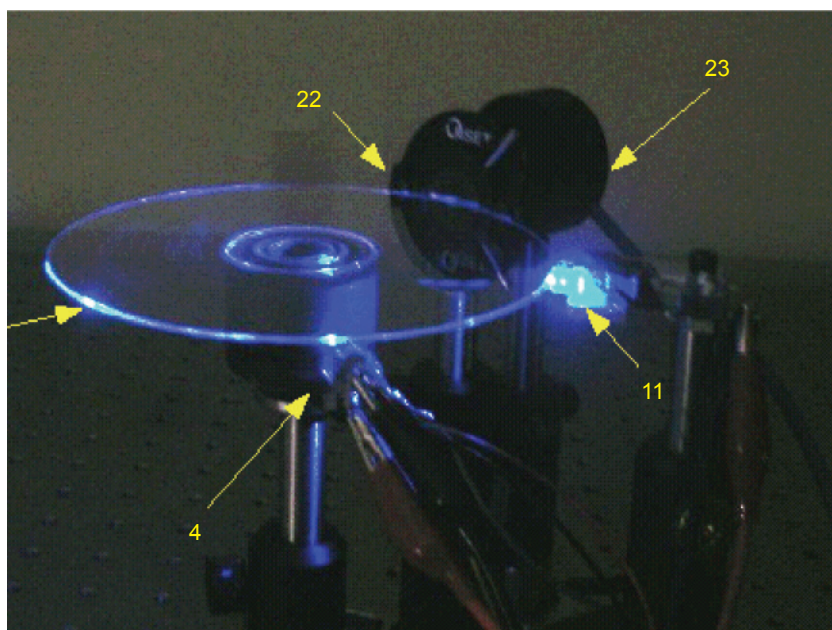


圖 4. 光碟片介面波導在 3000 rpm 高速轉動下的藍光耦光實驗。

提供光觸媒能量。搭配不同照射模式的可見光與外加紫外光光源，可以激發量子電漿作用，強化光觸媒反應之強化。如果附加之光觸媒本身即是可見光光觸媒，更可以直接經由光碟片介面光波導提供光觸媒反應之能量。雙光源旋轉床反應器^(9, 15)之中心旋轉盤轉軸具有一向下垂直照光之光二極體(紅光 LED, 637 ± 8 nm)光源，如圖 2，輸出光經過二次光學光擴散板之調制，激發光可以垂直轉向耦合進入光波導介面光觸媒旋轉床，光傳遞至旋轉床圓形邊界後輸出。

在外加紫外光低壓汞燈與紅光發光二極體輔助下，可驗證表面電漿光觸媒反應能進一步強化光觸媒反應光化學程序之操作效能。光觸媒光碟片波導介面旋轉床反應器可應用於高效能之水污染處理，且對於光觸媒與表面電漿輔助光化學反應之發展具有極大強化效果。

六、更大的操作容量

前面所述的幾種光觸媒反應器皆具有可串聯或並聯操作的便利性，並因此能夠獲得更大的操作容量。其中光碟片介面光波導反應器為薄型化結構，因此其結構在先天上便具有可做堆疊串聯設計的優點⁽¹³⁾。可堆疊式設計可以進一步透過增加反應器模組的設計，來獲得更大的批次污染物消除處理效果。此外，多疊式設計可以允許不同碟片承載不同光觸媒材料的優點，可以藉此在一次消除作業中，針對不同污染化學物質配置合適的光觸媒，俾能在循環操作模式中獲得不同污染物的高效能消除作業。

七、因為更快，所以更好的綠色化學技術

綠色光子學技術是新近重要化工技術的發展方向，提升光觸媒反應器技術之表現，達到減低反應器設置體積、減少廢棄物排放與減低操作過程中能源或資源消耗的減容、減廢及減耗三項目標。而整合型光觸媒反應器整合了現代光學、流體、反應強

化與先進奈米技術概念，是重要的技術發展方向。前面介紹的光觸媒反應器大概都具有下面數項優點中的一至更多項。第一、相較於傳統固定床式反應器，高效能整合型光觸媒反應器通常具有更佳之反應物質傳遞效率，因此能在相對較小的反應系統達到傳統大型固定床式反應器同樣的操作容量，可以更有效地處理液體或氣體形式之污染，並進而大量減少對環境有害廢液。第二、相較於傳統泥漿床式反應器，整合型光觸媒反應系統通常具有不需回收處理過溶液中之微米或奈米及尺寸光觸媒顆粒的優點，因此不需建立額外的微粒回收系統。第三、相對於以化學中和反應的方式，消除廢液或廢氣污染的毒性整合型光觸媒反應器減低了污染物處理時材料上的損耗。第四、相對於直接照光形式的傳統光觸媒反應器系統，利用高效能整合型光觸媒反應器，能更有效地將反應激發光有效地傳導至光觸媒上，激發光能量可以獲得更為有效的運用。

八、結論

高效能整合型光觸媒反應器整合了現代光學、流體、反應強化與先進奈米技術的概念，是重要的技術發展方向。其先天技術優勢，讓其具有良好的操作效能，其在現今光觸媒化工反應器的發展上，是一項因為更快所以更好的綠色化學技術。

致謝

筆者在此感謝國科會計畫 MOST 103-2221-E-492-043 之研究經費支持。

參考文獻

1. J. Wu, et al., *Topics in Catalysis*, **47** (3), 131 (2008).
2. I. H. Tseng, J. C. S. Wu, and H. Y. Chou, *Journal of Catalysis*, **221** (2), 432 (2004).
3. J. J. Chen, et al., *The Journal of Physical Chemistry C*, **115** (1), 210 (2010).
4. P. K. Dutta and A. K. Ray, *Chemical Engineering Science*, **59** (22-23), 5249 (2004).
5. G. I. Taylor, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 289 (1923).
6. K. Kataoka, *Encyclopedia of fluid mechanics*, **1**, 236 (1986).

7. M. F. J. Dijkstra, et al., *Chemical Engineering Science*, **56** (2), 547 (2001).
8. S. Cohen and M. David Moalem, *Chemical Engineering Science*, **46** (1), 123 (1991).
9. 黃鴻基, 科儀新知, **34** (4), 82 (2013).
10. H. C. Yatmaz, C. Wallis, and C. R. Howarth, *Chemosphere*, **42** (4), 397 (2001).
11. T. Van Gerven, et al., *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **46** (9), 781 (2007).
12. B. H. Liu, et al., *Thin Solid Films*, **566** (0), 93 (2014).
13. C. N. Lin, et al., *Environmental Science and Pollution Research*, 2012. (Accepted).
14. C. N. Lin, et al., *Environmental Science and Pollution Research*, **19** (9), 3743 (2012).
15. H. J. Huang, K.-C. Huang, and D. P. Tsai, *Optical Review*, **20**, 236 (2013).
16. D. D. Dionysiou, et al., *Water Research*, **34** (11), 2927 (2000).
17. Y. L. Chen, et al., *Opt. Express*, **21** (6), 7240 (2013).
18. C. Y. Chang and N. L. Wu, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **49** (23), 12173 (2010).
19. J. R. Burns and R. J. J. Jachuck, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **48** (12), 2540 (2005).
20. K. V. K. Boodhoo and R. J. Jachuck, *Applied Thermal Engineering*, **20** (12), 1127 (2000).
21. 黃鴻基, 劉柏亨, 科儀新知, **199**, 88 (2014).
22. H. J. Huang, B. H. Liu, and J. A. Yeh, *Catalysis Communications*, **36** (0), 16 (2013).
23. H. J. Huang and B. H. Liu, *Catalysis Communications*, **43**, 136 (2014).
24. L. Knobeloch, et al., *Environmental health perspectives*, **108** (7), 675 (2000).
25. H. H. Comly, *Journal of the American Medical Association*, **129** (2), 112 (1945).
26. R. J. Goldstein, *Marine Reef Aquarium Handbook.*, (1997).
27. J. Taguchi and T. Okuhara, *Applied Catalysis A: General*, **194-195** (0), 89 (2000).
28. D. K. Lee, J. S. Cho, and W. L. Yoon, *Chemosphere*, **61** (4), 573 (2005).
29. C. M. Hung, J. C. Lou, and C. H. Lin, *Chemosphere*, **52** (6), 989 (2003).
30. S. Cao, et al., *Catalysis Today*, **88** (1-2), 37 (2003).
31. N. Wang, et al., *Lab on a Chip*, **14** (6), 1074 (2014).
32. N. Wang, et al., *Biomicrofluidics*, **8** (5), 054122 (2014).
33. Y. C. Seow, et al., *Applied Physics Letters*, **93** (8), 084101 (2008).
34. X. C. Li, et al., *Applied Physics Letters*, **93** (19), 193901 (2008).
35. A. Fujishima and K. Honda, *Nature*, **238** (5358), 37 (1972).
36. D. F. Ollis, *Environmental Science & Technology*, **19** (6), 480 (1985).
37. R. W. Matthews, *The Journal of Physical Chemistry*, **91** (12), 3328 (1987).
38. I. K. Konstantinou and T. A. Albanis, *Applied Catalysis B: Environmental*, **49** (1), 1 (2004).
39. M. R. Hoffmann, et al., *Chemical Reviews*, **95** (1), 69 (1995).
40. H. J. Huang, et al., *Opt. Express*, **15** (12), 7132 (2007).
41. H. Raether, *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*. (1988).
42. A. Q. Liu, et al., *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, **391** (7), 2443 (2008).
43. Y. H. Lin and D. P. Tsai, *Opt. Express*, **20** (15), 16205 (2012).
44. H. J. Huang, D. P. Tsai, and A. Q. Liu, *A Plasmonic Liquid Waveguide Sensor Using Nanoparticles for Label-Free Measurement Applications in Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences* (2008).
45. E. Hecht, *Optics*. (2002).
46. W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, *Nature*, **424** (6950), 824 (2003).
47. Y. Tian and T. Tatsuma, *Journal of the American Chemical Society*, **127** (20), 7632 (2005).
48. A. E. S. Mostafa, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **221** (2-3), 138 (2011).
49. C. T. Lin, et al., *Microelectronic Engineering*, **88** (8), 2644 (2011).
50. L. Kuai, et al., *Langmuir*, **26** (24), 18723 (2010).
51. K. Awazu, et al., *Journal of the American Chemical Society*, **130** (5), 1676 (2008).
52. R. Abe, et al., *Journal of the American Chemical Society*, **130** (25), 7780 (2008).



黃鴻基先生為國立台灣大學物理博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Hung-Ji Huang received his Ph.D. in physics from National Taiwan University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.