

開發共軛焦顯微光譜系統用於微米有機發光材料螢光分析

王順發*

摘要

近年來，有機發光材料廣泛應用於生醫、材料、光電和物理化學等領域，尤其，生物探針和有機發光二極體的開發需要新型有機發光材料。然而，如何精確量測有機發光材料的螢光光譜卻具有相當程度的困難。本文介紹共軛焦顯微光譜系統之開發、設計、架設和功能展示，此自製系統能同步觀察微米樣品和量測螢光光譜，螢光偵測區域僅為一微米大小，此系統的光學設計可避免多種常見的光譜偏差。藉由此系統的開發，能深入探討有機發光材料的光物理性質與發光機制，有助於化學界與業界開發新型的發光材料。

關鍵字：共軛焦顯微光譜技術、有機發光材料、光致發光光譜、顯微影像、雷射激發

王順發(通訊作者)，國立臺東大學應用科學系助理教授。E-mail: wangshunfa@nttu.edu.tw

Invention of Confocal Microspectroscopic System for Fluorescence Analysis of Microscale Organic Materials

Shun-Fa Wang*

Abstract

Organic luminescent materials with highly-tunable luminescence property have been intensively investigated by scientists and engineers due to their remarkable role in diverse research fields, such as biomedicine, photonics, physics, and chemistry. A preliminary and crucial step to characterize the organic luminescent materials in powder is fluorescence spectroscopic analysis utilizing a conventional spectrophotometer. However, this commonly-used approach often results in unignorable distortion in spectrum because of the following reasons: polymorphism, defect emission, and interplays of scattering and absorption between light and materials. In this study, a confocal microspectroscopic system, designed with excitation laser, microscope, camera, and miniature spectrometer, is invented, and employed to obtain the intrinsic fluorescence emission of the organic luminescent materials. This system realizes fluorescence detection in image and spectrum at the same time for a single micrometer-sized luminescent powder, which is impossible by commercially-available photospectrometers. I carefully validate the functions of this system by using a powder solution of tetraphenylethene, an iconic molecule of aggregation-induced emission, and confirm its excellent performance and accuracy. The invention of the confocal microspectroscopic system is highly expected to facilitate the new design of organic luminescent materials and promote our understandings of the luminescence mechanism.

Keywords: Confocal microspectroscopic technique, Organic luminescent materials, Photoluminescence spectrum, Microscopic image, Laser excitation

Shun-Fa Wang (Corresponding Author), Assistant Professor, Department of Applied Science, National Taitung University. E-mail: wangshunfa@nttu.edu.tw

壹、前言

有機分子組成的發光材料具有高附加價值與用途廣泛的優勢，長久以來受到學術界與產業界高度關注。尤其近年來，生物顯微影像(bio-imaging)、光通訊(optical communication)和有機發光二極體(organic light-emitting diode; OLED)等研究領域蓬勃發展(Kikuchi et al., 2010; Tian et al., 2021, Salehi et al., 2019)，對功能性有機發光材料的需求大幅增加，帶動許多化學界與材料界的學者積極開發各式新型有機發光材料，並投入有機螢光分子和螢光奈米粒子的基礎與應用相關研究(Wolfbeis, 2015)。新型有機發光材料的開發與合成，大幅促進生醫與光電產業革新，並推動突破性的基礎科學進展。

舉例來說，特定的有機螢光分子具有獨特光致發光現象—聚集誘導發光(aggregation-induced emission; AIE)，這類型的有機螢光分子，溶在溶液時，也就是分子為單體狀態時，幾乎不發光；但此類型的分子在高濃度液態或固態時，能發出高亮度的螢光(Zhao et al., 2020; Wang et al., 2020)。有趣的是，AIE發光材料還能依據分子上的官能基不同，而具有多種的螢光放光顏色，如圖 1 所示(König et al., 2023)。AIE有機分子可聚集形成高螢光亮度的奈米粒子，常作為超高解析顯微影像技術的生物探針(bio-probe)。2017年，Fang與共同研究學者發表一篇開創性的研究論文(Fang et al., 2017)，他們利用四苯乙烯(tetraphenylethene, TPE)衍生物組成的AIE奈米粒子(粒子大小為15奈米)標記HeLa細胞，藉由STED(stimulated emission depletion)超高解析顯微影像技術成功辨識HeLa細胞上的微管結構，而這些微管結構難以用傳統的共軛焦顯微影像觀察。值得一提的是這類型的AIE有機發光奈米粒子能在生物體複雜的環境中，維持高螢光亮度，這與傳統的螢光染料分子容易受多樣生物分子干擾而減弱螢光強度有所不同，因此，AIE有機螢光分子合成與開發，能深入且微觀地觀察生物體細胞結構和成長動態。

另一種相當熱門的有機發光分子為熱活化延遲螢光(thermal activated delayed fluorescence, TADF)有機分子，TADF有機分子在OLED產業被視為下一世代的光電有機材料，這是因為這類型的有機分子相較於傳統的OLED發光材料，具有更高的螢光發光效率。2012年，Hiroki Uoyama等學者設計一系列的咔唑二氰基苯(carbazolyl dicyanobenzene)分子(Uoyama et al., 2012)，這類分子具有高效的TADF發光特性，值得注意的是，當咔唑分子的取代基改變時，螢光放光波長會大幅度地紅移或藍移，Uoyama等學者以此研究基礎提出TADF的發光機制。至今，化學界深受此研究啟發，吸引眾多化學家投入TADF有機分子的合成與機制探討。

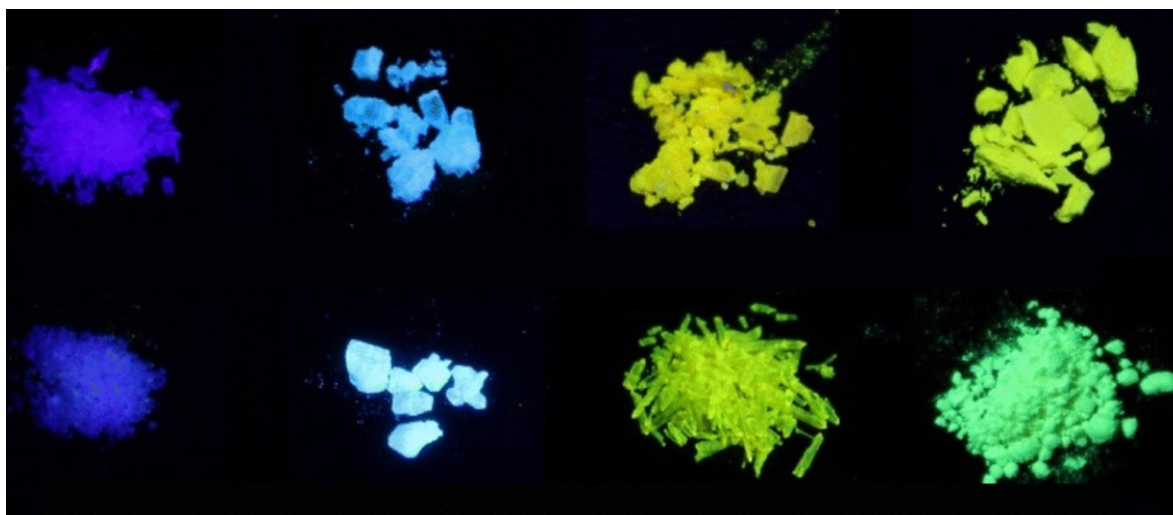


圖1 聚集誘導發光材料的螢光影像，不同分子所組成的粉體能發出多種螢光顏色 (König et al., 2023)。

貳、開發共軛焦顯微光譜技術之目的

現今，新型的有機發光分子已被廣泛利用於多個研究領域與工業界，隨著越來越多發光材料的出現，對其進行精確的光物理性質測量就越來越重要，其中，螢光光譜能提供發光材料電子鬆弛與能階結構的資訊，這在應用與基礎的研究中是不可或缺的重要資訊。然而，現今學界與業界多數的學者和工程師時常忽視一個重要問題—如何得到發光材料精確的螢光光譜？這是個不容忽視且需要特別重視的問題。

傳統上，化學合成得到有機發光分子後，經過分離純化，能得到有機發光分子的粉體，這些粉體在顯微鏡的觀察下，會發現其主要的組成是微米到毫米大小的晶體。當需要測量這些微小粉體的螢光光譜時，常見的作法會將粉體以兩片蓋玻片包覆並固定，直接放入市售的螢光光譜儀樣品槽內進行螢光光譜測量。然而，這樣的量測方式實際上存在許多光譜失真的問題，所測得的光譜往往不是材料真正的螢光。以下我將討論造成光譜失真的各種因素。

新型有機發光材料在螢光顯微鏡下觀察，會時常發現結晶具有不同螢光顏色，這是因為這些結晶具有多晶型(polymorph)或是晶體具有結構缺陷(defect)，導致螢光影像中，同時出現兩種或多種不同顏色的螢光(Anthony et al., 2010; Zhang et al., 2012)。傳統的螢光光譜儀所使用激發光，其光束寬度在毫米尺度，這使得樣品中大量的結晶同時被激發，這些結晶個別發出的螢光同時進入光譜儀的偵測器，因此，傳統螢光光譜儀所測得的光譜會包含兩種或多種螢光帶，光譜寬度比實際螢光寬，如圖 2 所示，所以個別結晶的發光難以用傳統的螢光光譜儀區分。

使用傳統的螢光光譜儀測量有機發光材料還具有多種測量誤差的問題，導致光譜測量誤差的原因主要為以下四種：(1)不同的結晶多晶型具有不同的螢光放光波長，傳

統螢光光譜儀無法局部測量不同晶型的螢光光譜。(2)結晶本身的晶格缺陷會導致放光波長位移，這又稱為缺陷發光(defect emission)，傳統的螢光光譜測量方法無法排除(或單獨偵測)缺陷結晶的發光。(3)自吸收效應(re-absorption)，結晶發出的螢光被結晶本身或周遭結晶吸收，導致短波長範圍的螢光強度下降，使光譜形狀偏移或扭曲。(4)多重光散射(multiple light scattering)，多個緊密堆疊的微米晶體會在晶體表面反覆散射螢光，這導致測量的螢光光譜偏移或扭曲(Müller et al., 2001)。

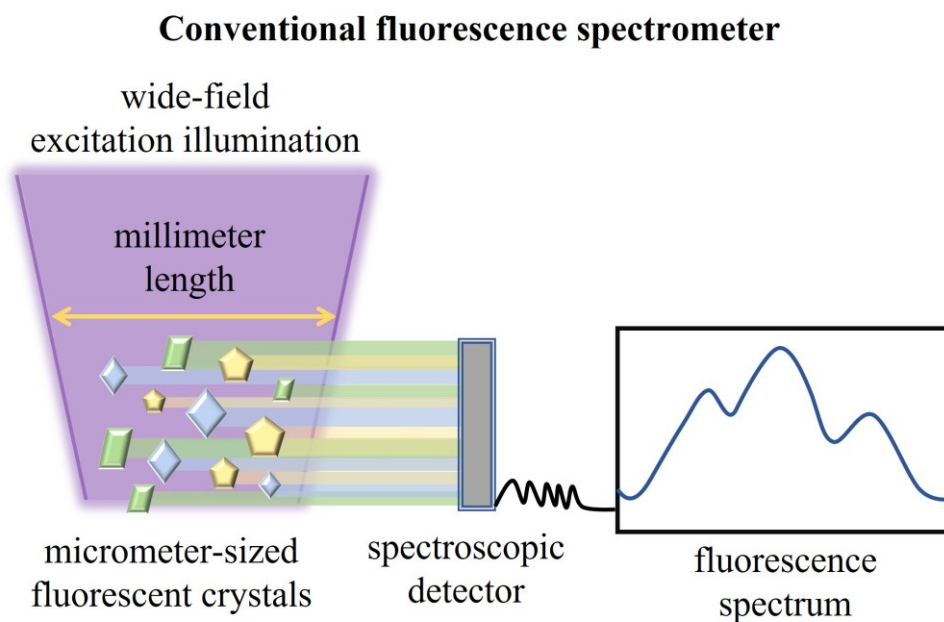


圖2 傳統螢光光譜儀測量有機發光材料示意圖。

以上四種因素導致測量有機發光材料的螢光光譜出現相當程度的偏差，然而，市面上各廠牌的螢光光譜儀都無法有效解決這些問題。因此，為了得到有機發光材料精確的螢光光譜，我自行開發一套新的光譜與成像系統—共軛焦顯微光譜系統。圖3為共軛焦顯微光譜系統的設計概念圖，此系統結合雷射、顯微鏡、相機與微型光譜儀，雷射以聚焦方式激發樣品局部位置，只測量雷射焦點處(約一微米大小)的螢光光譜，搭配顯微影像成像技術，能直接觀察樣品的螢光顯微影像，並同時偵測動態螢光光譜，因此此系統能在有機發光材料粉末中測量特定多晶型的螢光光譜，這與傳統螢光光譜儀以寬場激發方式且沒有影像成像有所不同。此外，使用共軛焦技術能有效降低系統偵測到非聚焦面的螢光與周遭環境的雜光，使收集的螢光訊號僅來自於雷射焦點處(非成像平面與焦點外的光，大部分被軛焦針孔阻擋，無法進入光譜儀)。此系統的光學設計為激發光和螢光偵測在同一方向，這能避免自吸收和多重散射造成光譜失真的問題，確保光譜的準確性。圖4為此系統的特點與傳統螢光光譜儀的比較。

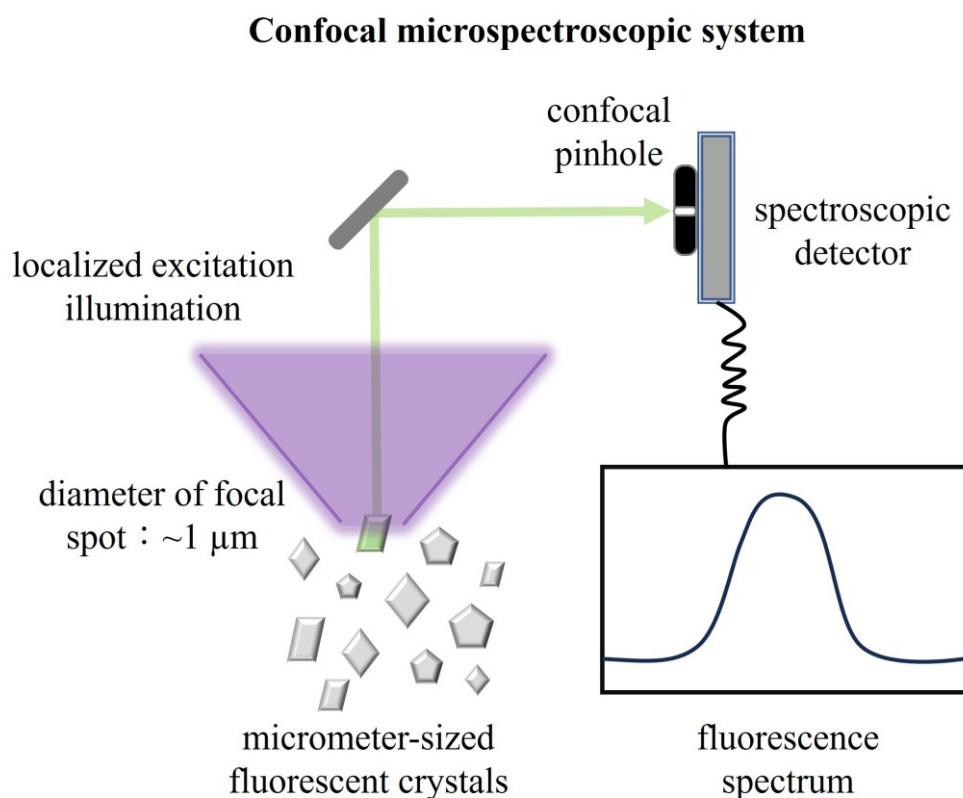


圖3 自行開發的共軛焦顯微光譜系統用於測量有機發光材料概念圖。

Advantages of my microspectroscopic system

1. true fluorescence spectrum of single microcrystals
2. simultaneous imaging and spectroscopic measurements available
3. enable to identify defect emission
4. very little re-absorption effect
5. no multiple light scattering
6. low cost

Disadvantages of conventional spectrometer

1. complicated and distorted fluorescence spectrum from ensemble microcrystals
2. no imaging function
3. hard to identify defect emission
4. significant re-absorption effect
5. strong multiple light scattering
6. expensive

圖4 共軛焦顯微光譜系統與傳統螢光光譜儀之特點比較。

參、共軛焦顯微光譜系統之構造

此自製的共軛焦顯微光譜系統包含雷射、顯微鏡、CCD (charge-coupled device)相機與微型光譜儀。利用接近紫外光波長範圍的 405 奈米雷射作為激發光源，將雷射導入光學籠式系統後進入一台改裝的正立式顯微鏡，雷射經過 40 倍放大倍率的物鏡後，高度聚焦於樣品上，雷射焦點直徑約為一微米，透過移動載台水平方向的位移，可以選擇雷射的照射位置。樣品發出的螢光經由物鏡接收，引導至成像與光譜測量系統，首先，螢光先通過二向色鏡，再經由凸透鏡聚焦螢光，此聚焦螢光由分光鏡分成兩道：一道為相機接收，另一道穿透共軛焦針孔後由微型光譜儀接收。共軛焦針孔能減少非聚焦面的螢光訊號的干擾，讓偵測的光譜只包含雷射焦點處的螢光。此自製系統的設計可避免上述造成光譜失真的四項因素，並能同時進行樣品的顯微觀察與螢光光譜量測。

圖 5 為共軛焦顯微光譜系統之光學裝置圖，本系統可以概分成雷射光路、顯微鏡以及影像與光譜的三大部分，以下為各部分的詳細介紹：

雷射光路：

此系統以波長為 405 奈米的連續波雷射(Shanghai Dream Lasers Technology, SDL-405-RLM-200T)作為激發光源，使用中性密度濾光片(neutral density filter)調整雷射功率，透過滑軌平台上的可調式光圈的前後移動，確認雷射為水平準直的平行光，之後將雷射導入光學牢籠系統中。牢籠中的雷射光束需位於牢籠正中心處，可使用籠式定位板(cage alignment plate)確認，之後以二向色分光鏡(dichroic mirror)將雷射反射至正立式顯微鏡。

顯微鏡：

其基本架構主要是建立於一台低成本、改裝後的正立式顯微鏡(motic)，我們移除顯微鏡的目鏡與觀測頭，讓雷射可以直接導入顯微鏡物鏡中，透過顯微鏡載台與調節輪的操作可三維移動樣品。樣品受到雷射激發後發出的螢光被物鏡接收，沿著雷射前進的相反方向將螢光引導至影像與光譜系統。

影像與光譜系統：

從顯微系統接收到的螢光需以 425 奈米長波通濾光片將 405 奈米雷射散射光移除，避免雷射散射光進入影像與光譜系統。濾光片過濾後的螢光經由凸透鏡聚焦，目的是為了將螢光影像成像於 CCD 相機並透過光纖傳輸到微型光譜儀。光路中安裝一片二向色分光鏡，使聚焦的螢光分成兩道，一道由相機接收，另一道穿透直徑 50 微米的共軛焦針孔後進入光纖，引導至微型光譜儀中。需特別注意的是，共軛焦針孔的裝設位置需在顯微系統的成像平面。

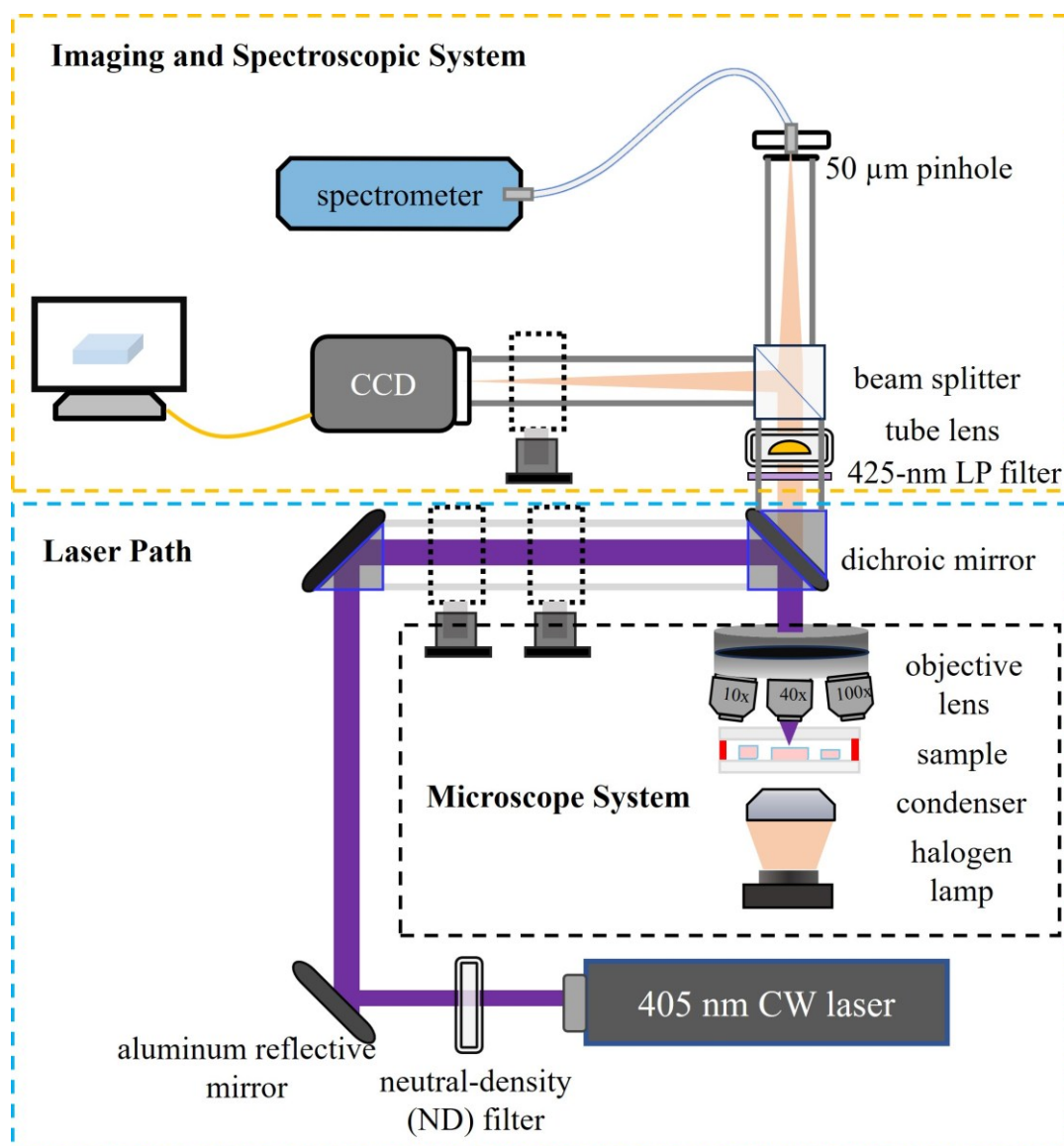


圖 5 共軛焦顯微光譜系統之光學裝置圖。

肆、螢光光譜校正方式

透過此共軛焦顯微光譜系統所測得的光譜需要再經過兩種不同的光譜校正方法，分別為波長精度校正與光譜波形校正，以下為兩種校正方法的介紹：

波長精度：

為了校正微型光譜儀的波長位置，避免出現光譜波長偏移，故需要對光譜儀進行波長精度校正。我們使用市售的波長校正光源—汞氫燈，利用此光源照射共軛焦顯微光譜系統上的物鏡，如圖 6 所示，之後按照以下的步驟操作：

1. 打開光譜儀操作軟體上的快速查看模式，並記錄光源的光譜。
2. 記錄光譜中各個波峰的像素。

3. 使用 Excel 建立像素與光源實際波長的對應表格。
4. 選擇真實波長作為因變數 Y。選擇像素作為自變數 X，執行線性迴歸後可得到線性迴歸的函數。
5. 記錄此函數的截距以及第一、第二和第三係數。
6. 輸入函數的截距與係數於光譜儀的操作軟體，完成波長精度校正。

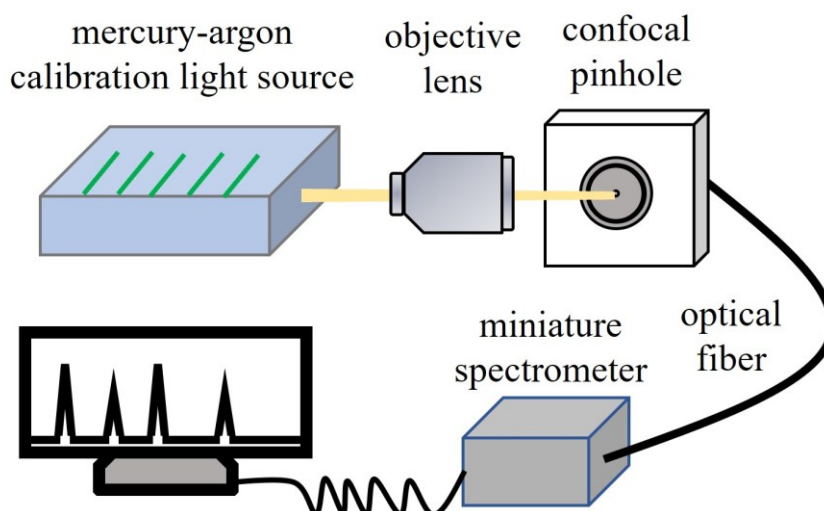


圖6 光譜儀的波長精度校正示意圖。

光譜波形校正：

波長精度校正後，需要再校正光譜波形，這是因為光學系統的光學零件和光譜儀具有波長依賴性。舉例來說，反射鏡對每個波長的反射率皆不相同，而透鏡、濾光片與光纖對各個波長具有不同的穿透率，此外，光譜儀對各波長的感光靈敏度亦不相同，這些因素會導致量測的光譜波形偏移而失真。為了使自製的顯微光譜系統能測到精確的光譜，必須使用標準螢光樣品作校正。我使用兩種不同螢光波長的標準品作為校正樣品，其一為莫耳濃度為 5×10^{-3} M 的硫酸奎寧(quinine sulfate)，溶劑為 0.1 M 的硫酸；另一樣品為 1×10^{-5} M 磺化羅丹明 101(sulforhodamine 101)，以乙醇作為溶劑，透過以下方程式獲得光譜校正函數 $s(\lambda_{Em})$ ：

$$I(\lambda_{Em}) = \frac{I^u(\lambda_{Em})}{s(\lambda_{Em})}$$

$I^u(\lambda_{Em})$ 和 $I(\lambda_{Em})$ 分別為未校正和校正後的光譜。未校正光譜是光譜系統所測量的螢光光譜，而校正後光譜是使用市售具有校正功能螢光光譜儀所量測的光譜，校正後光譜也可使用文獻上的數據。未來使用共軛焦顯微光譜系統量測光譜時，只需將測出的光譜數據除以光譜校正函數，即可獲得樣品真實的光譜圖。

此研究工作中，光譜波形校正利用螢光光譜儀(Horiba, FluoroMax Plus)測量硫酸奎寧和磺化羅丹明 101 標準溶液，所得到的光譜數據與此顯微光譜系統量測的光譜作比較，如圖 7 和圖 8。

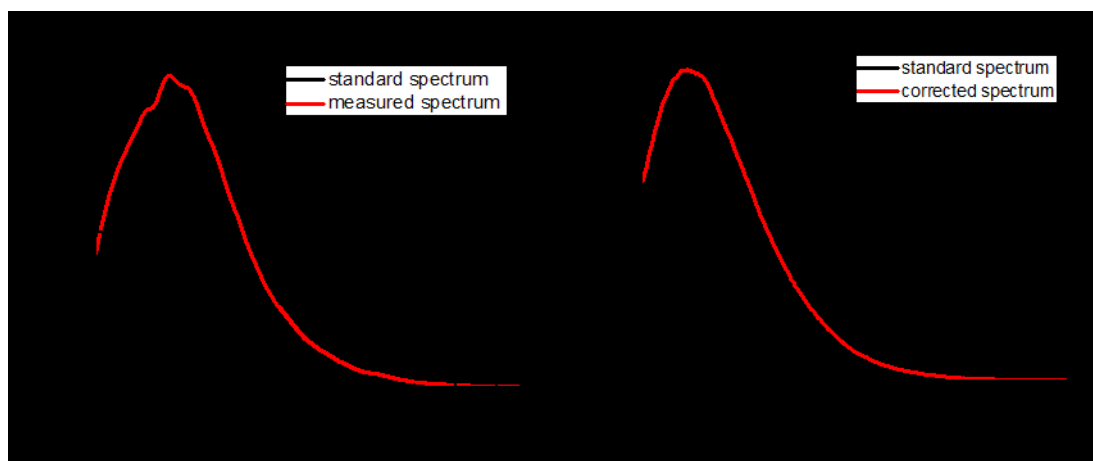


圖 7 硫酸奎寧標準光譜(黑線)與顯微光譜系統測得的光譜(紅線)比較圖(左圖)，標準光譜(黑線)與校正後的顯微光譜(紅線)比較圖(右圖)。

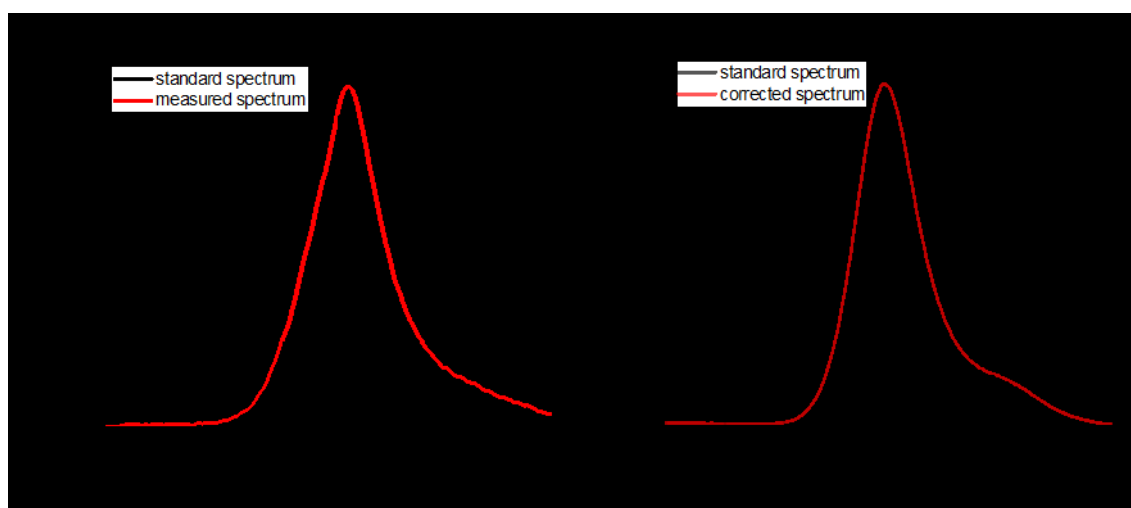


圖 8 磺化羅丹明101標準光譜(黑線)與顯微光譜系統測得的光譜(紅線)比較圖(左圖)，標準光譜(黑線)與校正後的顯微光譜(紅線)比較圖(右圖)。

伍、儀器開發成果與功能展現

圖 9 為按照上述儀器架設步驟所完成的共軛焦顯微光譜系統實際照片，分別從三個不同視角拍攝此共軛焦顯微光譜系統，其中各個主要構造由紅色數字 1 到 8 表示該用途。

- 1、405 奈米連續波雷射：用於激發有機發光材料的激發光源。
- 2、中性密度濾光片：用於調整雷射功率。
- 3、二向色分光鏡：將短波長的激發光反射，其餘波長皆穿透。
- 4、物鏡：將雷射聚焦於待測物表面。
- 5、長波通濾光片與凸透鏡：阻隔雷射散射光並使螢光聚焦於相機與光譜儀。
- 6、共軛焦針孔與光纖：阻擋非聚焦面的光，只收集聚焦面的光。

7、CCD 相機：將螢光轉成影像。

8、微型光譜儀：從光纖接收螢光分光後轉成光譜數據。

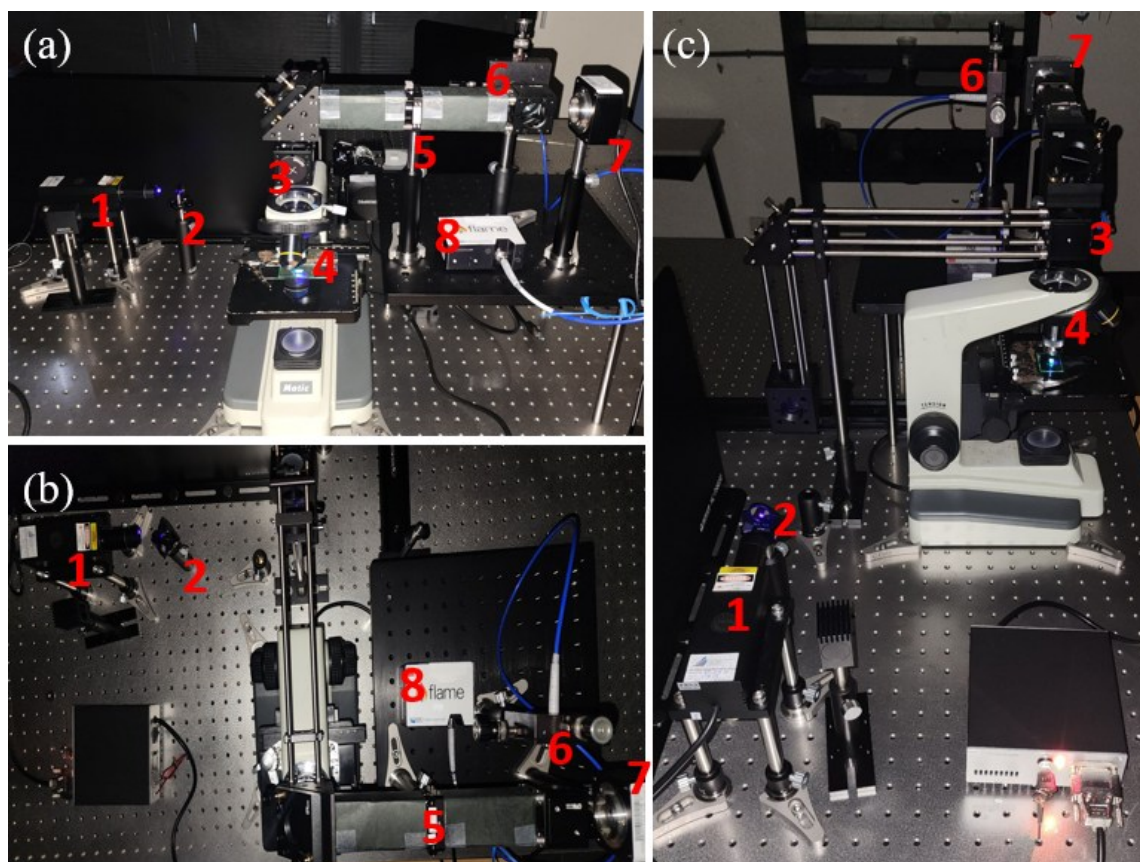


圖 9 共軛焦顯微光譜系統各個視角之照片。

此共軛焦顯微光譜系統能同步觀測樣品的螢光影像與偵測螢光光譜，如圖 10 所示，這樣的功能可判別不同多晶型的螢光並個別進行光譜測量。以下以實際測量案例說明此系統的功能。

我使用著名的聚集誘導發光染料四苯乙烯微米晶體溶液作為螢光樣品，分別以傳統螢光光譜儀和共軛焦顯微光譜系統測量此溶液的螢光光譜，並進行光譜比較。四苯乙烯分子在聚集狀態下具有獨特的發光，這種分子在許多研究領域中展現出巨大的應用潛力，例如在生物成像、光電材料和感測器等領域都有實際應用例子(Zhao et al., 2020)。透過共軛焦顯微光譜系統可以清楚觀察到四苯乙烯樣品溶液中，有兩種不同發光顏色的晶體，如圖 11，這代表四苯乙烯結晶具有兩種多晶型，分別發出綠色和藍色的螢光。這兩種多晶型的螢光能以共軛焦顯微光譜系統個別測量，所得的螢光光譜如圖 12(a)，藍色多晶型的光譜峰值為 430 奈米，綠色多晶型的光譜峰值為 460 奈米。然而，以傳統螢光光譜儀測量同一溶液時，螢光光譜顯示出廣闊的光譜帶寬，如圖 12(b)，代表此光譜圖包含了兩種螢光成份，從此光譜圖難以分辨這兩種多晶型所發出的特定的螢光。

藉由此案例的比較，可得知此自製的共軛焦顯微光譜系統能觀察晶體的螢光影像、測量微米晶體的大小並得到晶體個別的螢光光譜，這是傳統螢光光譜儀達不到的強大顯微光譜技術。

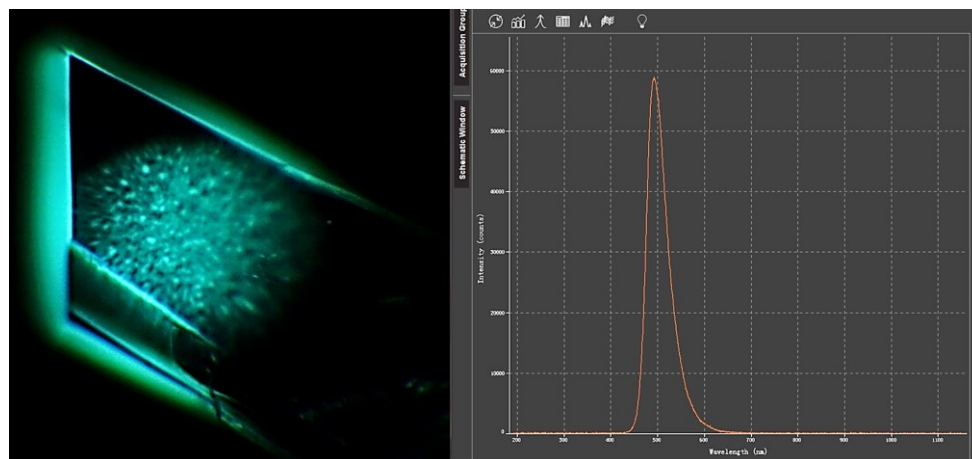


圖 10 同步偵測聚苯乙烯結晶的螢光顯微影像(左圖)和螢光光譜(右圖)。

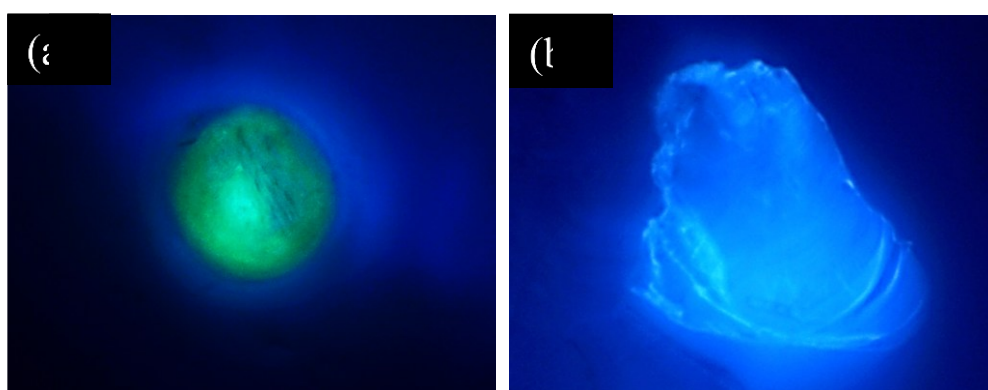


圖 11 聚苯乙烯多晶型的螢光顯微影像，(a)綠色螢光結晶和(b)藍色螢光結晶。

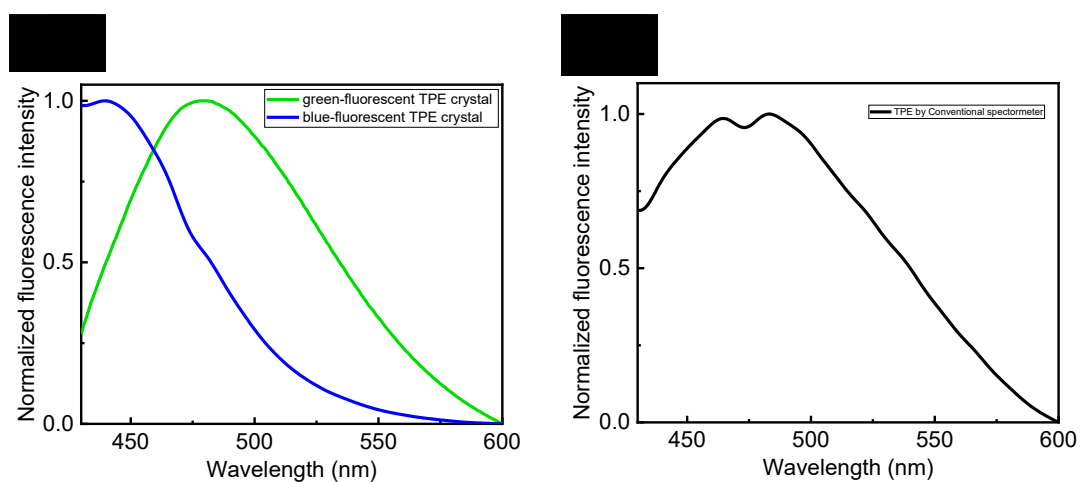


圖 12 (a)共軛焦顯微光譜系統測量聚苯乙烯微米晶體溶液所得的螢光光譜，藍色螢光晶體(藍線)與綠色螢光晶體(綠線)可分別測得。(b)傳統螢光光譜儀測量同一粉體溶液所得的螢光光譜。

陸、結論

本文提出共軛焦顯微光譜系統之開發、設計、架設和功能展示，架設此系統所需的主要設備為激發雷射、顯微鏡、相機和微型光譜儀。此系統的開發目的為精確測量有機發光材料的螢光光譜，解決以下四種傳統螢光光譜儀在量測有機發光材料時遇到的問題：(1)無法區分結晶多晶型的螢光，有機發光材料的不同多晶型所發出的螢光會包含在同一張光譜，難以分辨多晶型個別的螢光光譜、(2)無法區分結晶本身的螢光和結晶晶格缺陷導致的缺陷發光，這兩種發光放光波長不同、(3)自吸收效應，材料發出的螢光被自身或鄰近材料吸收、(4)多重光散射，材料發出的螢光被鄰近材料反覆散射。以上四種因素造成有機發光材料的螢光光譜具有相當程度的偏差，且時常被無意地忽略。本研究開發的共軛焦顯微光譜系統能有效解決上述的問題，並能動態地同步偵測材料的螢光影像以及材料局部的螢光光譜，系統可測量的螢光波長範圍為 430 到 700 奈米，藉由裝設共軛焦針孔於成像平面，可排除非聚焦面的光線，使偵測的材料大小限縮在直徑 1 微米，這樣的光學系統設計能精確地得到微米材料的螢光光譜。經由實際偵測案例—聚集誘導發光的四苯乙烯粉體溶液的螢光光譜測量，確認此系統的強大功能。

有機發光材料在生醫、材料、光電和物理化學等研究領域有著巨大的應用潛力，藉由開發共軛焦顯微光譜系統，能系統性檢測有機發光材料的光物理性質並深入研究發光特性與機制，這有助於化學界設計新型發光分子，對生物探針、感測器、顯示技術、光電元件、生醫材料和結晶學等研究領域具有重大貢獻。未來，我們將使用此系統對更多有機發光材料進行光物理研究與探討，也將拓展此系統到各種的發光材料上，例如：量子點、鈣鈦礦太陽能材料和碳點。

引用文獻

- Anthony, S. P. & Draper, S. M. (2010) Nano/microstructure fabrication of functional organic material: polymorphic structure and tunable luminescence. *The Journal of Physical Chemistry C*, *114*, 11708–11716. <https://doi.org/10.1021/jp100594w>
- Fang, X.; Chen, X.; Li, R.; Liu, Z.; Chen, H.; Sun, Z.; Ju, B.; Liu, Y.; Zhang, S. X.-A.; Ding, D.; Sun, Y. & Wu, C. (2017) Multicolor Photo-Crosslinkable AIEgens toward Compact Nanodots for Subcellular Imaging and STED Nanoscopy. *Small*, *13*, 1702128. <https://doi.org/10.1002/sml.201702128>
- Kikuchi, K. (2010) Design, synthesis and biological application of chemical probes for bio-imaging. *Chemical Society Reviews*, *39*, 2048–2053. <https://doi.org/10.1039/B819316A>
- König, N.; Godínez-Loyola, Y.; Yang, F.; Laube, C.; Laue, M.; Lönnecke, P.; Strassert, C. A. & Hey-Hawkins, E. (2023) Facile modification of phosphole-based aggregation-induced emission luminogens with sulfonyl isocyanates. *Chemical Science*, *14*, 2267–2274. <https://doi.org/10.1039/D3SC00308F>
- Müller, M. G.; Georgakoudi, I.; Zhang, Q.; Wu, J. & Feld, M. S. (2001) Intrinsic fluorescence spectroscopy in turbid media: disentangling effects of scattering and absorption. *Applied Optics*, *40*, 4633–4646.
- Salehi, A.; Fu, X.; Shin, D. H. & So, F. (2019) Recent advances in OLED optical design. *Advanced Functional Materials*, *29*, 1808803. <https://doi.org/10.1002/adfm.201808803>
- Tian, D. & Chen, Y. (2021) Optical waveguides in organic crystals of polycyclic arenes. *Advanced Optical Materials*, *9*, 2002264. <https://doi.org/10.1002/adom.202002264>
- Uoyama, H.; Goushi, K.; Shizu, K.; Nomura, H. & Adachi, C. (2012) Highly efficient organic light-emitting diodes from delayed fluorescence. *Nature*, *492*, 234–238. <https://doi.org/10.1038/nature11687>
- Wang, S.-F.; Lin, J.-R.; Ishiwari, F.; Fukushima, T.; Masuhara, H. & Sugiyama, T. (2020) Spatiotemporal Dynamics of Aggregation-Induced Emission Enhancement Controlled by Optical Manipulation. *Angewandte Chemie International Edition*, *59*, 7063–7068. <https://doi.org/10.1002/anie.201916240>
- Wolfbeis, O. S. (2015) An overview of nanoparticles commonly used in fluorescent bioimaging. *Chemical Society Reviews*, *44*, 4743–4768. <https://doi.org/10.1039/C4CS00392F>
- Zhang, C & Lin, J. (2012) Defect-related luminescent materials: synthesis, emission properties and applications. *Chemical Society Reviews*, *41*, 7938–7961. <https://doi.org/10.1039/C2CS35215J>
- Zhao, Z.; Zhang, H.; Lam, J. W. Y. & Tang, B. Z. (2020) Aggregation-Induced Emission: New Vistas at the Aggregate Level. *Angewandte Chemie International Edition*, *59*, 9888–9907. <https://doi.org/10.1002/anie.201916729>