

使用光鐳夾系統捕捉塑膠微粒

陳韋達、侯孟良、劉世崑

摘要

近幾十年光鐳夾已被廣泛應用於生醫方面之研究。然而，高度聚焦之雷射光所產生之熱效應 (heating effect) 可對被捕捉之微米級活體造成嚴重的傷害。因此，本研究提出兩組具極低補捉功率之光纖式光鐳夾 (fiber-based optical tweezer) 系統，透過光捕捉 (optical trapping) 微米級微粒 (micro-particle) 之實驗來達到改善補捉效率 (trapping efficiency) 之目的。兩組系統在組成結構上是相同的，但有點不同之處在其中的圓錐狀光纖微透鏡：一支具有 104° 之錐角 (taper angle)，另一支具有 110° 。為了優化這兩組光纖式光鐳夾系統，兩組系統分別循序採用 40° 、 50° 、 60° 之工作傾角 (working angle) 進行光捕捉實驗。由實驗結果顯示，兩光鐳夾系統在工作傾角為 40° 時，可得到最佳之捕捉效率：從具 104° 錐角之系統得到之最佳值為 6.02 %，而從具 110° 錐角之系統得到之最佳值為 7.88 %。在所有具備相同工作傾角的實驗條件下，具 110° 錐角之系統所得到之捕捉效率皆優於具 104° 錐角之系統所得到之值。將本研究結果與其它相關文獻所得結果進行比較，也發現工作距離 (working distance) 與捕捉功率 (trapping power) 這兩因子亦能左右光纖式光鐳夾之捕捉效率。綜合以上結果，適當地調配光纖式光鐳夾系統之工作傾角、錐角、工作距離、捕捉功率等重要影響因子，可達到優化含單一光纖微透鏡之光鐳夾系統之補捉效率，以符合生醫應用方面需求。

關鍵字：光纖、光鐳夾、光捕捉、微透鏡、捕捉效率

陳韋達，國立高雄科技大學光電與通訊工程研究所學生。E-mail: 1106319105@nkust.edu.tw

侯孟良，國立高雄科技大學光電與通訊工程研究所學生。E-mail: 1105319115@nkust.edu.tw

劉世崑 (通訊作者)，國立高雄科技大學光電與通訊工程研究所副教授。E-mail: skliu@cc.kuas.edu.tw

Trapping Polystyrene Micro-particle Using Optical Tweezer System

Wei-Da Chen & Meng-Liang Hou & Shih-Kun Liu

Abstract

Optical tweezers have been widely used for decades for biomedical applications. It is important to reduce harmful heating effects due to highly focused laser light onto biological micro-objects. In this study, two fiber-based optical tweezer systems at ultra-low optical trapping power are proposed to improve trapping efficiencies on trapping micro-particles. The two systems are identical in structure. However, a slightly difference between them has to do with the taper angles of the cone-shaped micro-lenses being used: one with an angle of 104° , and another with that of 110° . In order to optimize the two systems, the optical-trapping experiments are conducted at various working angles: 40° , 50° , and 60° . As a result, the best trapping efficiencies for the two systems are obtained at the working angle of 40° : 6.02 % for the system with a taper angle of 104° and 7.88 % for the system with that of 110° . Under the condition of the same working angles, the trapping efficiencies of the system with a taper angle of 110° exceed those of the system with an angle of 104° . The results are compared with those from other researchers. It seems that other factors such as working distance and optical trapping power affect the trapping efficiency of the optical tweezer as well. In summary, it is concluded that working angle, taper angle, working distance, and optical trapping power all together are influential to the optimization of the trapping efficiency of the fiber-based optical tweezer system with one cone-shaped micro-lens to fulfill the requirements for biomedical applications.

Keywords: fiber, optical tweezer, optical trapping, micro-lens, trapping efficiency

Wei-Da Chen, Student, Institute of Photonics and Communications, National Kaohsiung University of Science and Technology. E-mail: 1106319105@nkust.edu.tw

Meng-Liang Hou, Student, Institute of Photonics and Communications, National Kaohsiung University of Science and Technology. E-mail: 1105319115@nkust.edu.tw

Shih-Kun Liu (Corresponding Author), Associate Professor, Institute of Photonics and Communications, National Kaohsiung University of Science and Technology. E-mail: skliu@cc.kuas.edu.tw

一、前言

人類的文明始於製造並利用工具以解決生活上的問題。經考古學家的研究及證據顯示，大約西元前 3000 年左右，在美索不達米亞 (Mesopotamia)、埃及 (Egypt)、印度 (India) 等區域發現工匠所使用的金屬製鑷夾，其構造由兩片長形且有曲度的金屬片所組成，將兩片之一端焊接在一起固定而成，可以用於夾取重量輕或體積小的物品。因此，鑷夾在這 5000 年的歲月中一直伴隨人類文明的演進，已廣泛應用於工藝、醫療、美容、飲食等領域，成為人們日常生活中不可或缺的工具，其重要性自不可言喻。另外一項非常重要的工具是在亞洲地區人們常用的筷子，它源自於古中國，也有約 5000 年的歷史，其結構更為簡單，由兩支長度相仿筆直且細長的木棒或竹條所組成；不同於鑷夾，兩支筷子是獨立的物件，並不相連，多應用於夾取食物。不論是鑷夾或筷子，都是利用物理性接觸力來完成夾取物品的動作。現代是個重視科學研究的時代，研究的對象不是極大(如：地球、太陽、銀河系等)就是極小(如：微米級微粒、細胞、細菌、病毒等)，則不論是傳統的鑷夾或筷子都會一籌莫展。新工具的研發勢在必行。

在西元 1970 年，夾取極小物品的新工具誕生了。美國貝爾實驗室科學家 Ashkin (1970) 將它命名為光鑷夾 (optical tweezer)，顧名思義光鑷夾是使用光場來「夾取」微小物品的工具；也就是利用物理性非接觸力來達成夾取的動作，不會使被夾取的物品產生刮傷或形變。一開始 Ashkin 團隊使用傳統聚光透鏡搭配 Ar^+ 雷射所發射 514.5-nm 綠色之雷射光束，利用光幅射壓作用力 (radiation pressure force)，可將懸浮於水中的微米級透明球 (transparent latex sphere) 沿著光軸推開。接著，使用一對透鏡與雷射光源，組成所謂的雙光束 (dual beam) 光鑷夾，並利用該兩束相向且經聚焦之雷射光束，在兩光束之間的幾何中心處產生光學位能井 (potential well)，因此可用於捕捉懸浮於水中的微米級微粒，這些微粒直徑從 0.59 μm 至 2.68 μm 不等。其中，有明確紀錄的光功率從 19 mW、50 mW 至 128 mW 不等。該雙光束架構必須使兩道獨立的雷射光束相向對齊，除光束對齊之技術難度高外，還會造成兩道雷射光束相互干擾；輕者造成雷射偏離原波長，重者造成雷射損毀。

到了西元 1986 年出現結構更為簡單的單光束 (single beam) 光鑷夾 (Ashkin, Dziedzic, et al., 1986)。該架構只需要單一組雷射光源與聚焦透鏡即可完成捕捉微小物體的工作。該單光束光鑷夾沿用相同的 514.5-nm Ar^+ 雷射作為光源，在其光捕捉實驗

中，利用從 12 mW 至 1.5 W 不等的功率捕捉各式懸浮於水中之微粒，微粒之直徑大小從 10 μm 至 25 nm 都有。此時，捕捉力(trapping force)源自於所謂的梯度力(gradient force)；因該雷射光束經由透鏡入射至水溶液中，由於微粒與水溶液的折射率不同，而使得雷射光束經溶液至微粒內產生折射，造成雷射光之光動量產生變化，進而對微粒產生捕捉力。又過 6 年，Ashkin (1992) 對整個光捕捉現象提出較完整的論述，其中提到捕捉效率(trapping efficiency)的觀念與計算，可以作為日後光鑷夾系統效能評估的重要指標。

光鑷夾用於生醫研究始於西元 1987 年 (Ashkin & Dziedzic, 1987)，Ashkin 團隊利用單光束光鑷夾捕捉及操控病毒與活菌。該光鑷夾使用 Ar^+ 雷射作為光源，其波長為 514.5-nm。當該光鑷夾之雷射輸出功率為 100 mW~300 mW 時，該光鑷夾可順利捕捉煙花草葉病毒 (tobacco mosaic virus, TMV)；其病毒呈圓柱體，其長約 320 nm，其直徑約 20 nm。該光鑷夾系統亦用於捕捉兩種活動的桿狀細菌 (rod-like motile bacteria)，該其長度分別為 0.5 μm 及 1.5 μm 。為方便捕捉細菌，其雷射光源初始值設為 50 mW，待確定捉到活菌後，立即降低其功率為 5 mW，以避免對活菌造成光損害 (optical damage)；若提升光鑷夾之光功率至 100 mW 並持續 10 分鐘，就足以殺死細菌。另有學者研究高度聚焦之雷射光在樣本表面產生之熱效應 (Liu, Cheng, et al., 1995)，此熱效應造成樣本溫度隨著光功率的增長而呈線性上升關係。因此若欲將光鑷夾用於細菌、病毒、微生物、細胞等微小活體之研究，必須適當選配光鑷夾之雷射波長、功率、及照射時間等參數，以降低對活體之光損害。

光纖成為光鑷夾的組件始於西元 1993 年 (Constable, Kim, et al, 1993)。光纖是一種光波導元件，對光線只有傳導但沒有聚焦的功能，然而 Constable 團隊利用兩段光纖分別取代 Ashkin (1970) 在原始設計中的兩個聚焦透鏡，構造較簡單，成本也較低。該新型光鑷夾可被視為第一代的光纖式光鑷夾，也屬於雙光束光鑷夾。該架構可以縮短工作距離，但仍需要對齊兩道分別從兩支端面平整的光纖所輸出之發散雷射光束，在其光捕捉實驗中，兩支光纖之間距設定從 20 μm 至 280 μm 不等。另外，該研究分別採用兩個系列的光源組合：一組採用 514-nm Ar^+ 雷射及 633-nm He-Ne 雷射，另一組採用 831-nm 及 1300-nm 半導體雷射。該光鑷夾可成功捕捉直徑從 0.1 μm 及 10 μm 大小不等的聚苯乙烯球 (polystyrene sphere) 及酵母菌 (yeast)。若調整兩支光纖所在位置或角度可以使聚苯乙烯球受到光場牽引而移動。然而，此架構因需要使兩道光束相向對齊，樣本也必須置於兩相向光纖之間，其操作之自由度受到不小的限制。

稍後 Lyons (1995) 團隊介紹一種雙光纖光捕捉 (dual fiber optical trap) 架構。該研究將一般通訊用單模光纖之端面加工處理, 使其端面形成半球狀, 對光線具有聚焦效果, 使成為透鏡化光纖 (tapered hemispherically lensed optical fiber); 本文統稱之為光纖微透鏡 (fiber microlens)。該光纖式光鐳夾使用 1300-nm 半導體雷射作為光源, 用以局限微米級介電粒子 (dielectric particle)。因該光鐳夾為雙光束架構, 又其上兩支光纖微透鏡相距 350 μm , 使該光鐳夾與眾不同地具有雙穩定捕捉位置 (bistable trapping positions)。

不同於前述的架構, Taguchi (1997) 團隊所建製之光纖式光鐳夾只須使用一只半球狀光纖微透鏡, 並分別利用 1.06- μm 鈮鋁石榴石 (yttrium aluminum garnet, YAG) 雷射及 1.48- μm 半導體雷射作為光源, 企圖以最低之光功率捕捉聚苯乙烯球及酵母。另外, 該光纖夾是可以任意調整光束之水平夾角或工作傾角。在眾多數據中, 有幾個值得注意: 當光纖微透鏡之球半徑為 2 μm 且半導體雷射為光源時, 該光鐳夾僅需使用約 1.3 mW 之光功率即可捕獲 10 μm 聚苯乙烯球; 溶液為乙醇 (ethanol)。另外, 當光纖微透鏡之球半徑為 2 μm 且鈮鋁石榴石雷射為光源時, 該光鐳夾只需使用約 0.7 mW 之光功率即可捕獲酵母菌; 此時溶液為水, 且其工作距離約為 20 μm 。當然, Taguchi 團隊確實將光纖式光鐳夾推展到一個適合生醫應用的工具。若欲進一步降低整個光纖式光鐳夾之建置成本, 對雷射規格之選配及光纖微透鏡之加工方法仍有很大的研究空間。

已知光纖微透鏡的設計與光鐳夾之捕捉效率有密切關係, 故光纖微透鏡之製程成為研究重點之一。為有別於先前只使用通訊用單模光纖製作光纖微透鏡, 本雷射科技實驗室陳國良 (2009) 利用一般通訊用之多模光纖製作半球狀光纖維透鏡, 並組成單光束光纖式光鐳夾。在其光纖微透鏡之製程中, 先使用溼式化學蝕刻方法加工光纖之一端, 接著利用電弧熔燒該蝕刻端, 以形成半球狀光纖微透鏡。此光鐳夾之光源為 635-nm 半導體雷射, 其捕捉功率為 20 mW, 可成功捕獲直徑為 10 μm 與 15 μm 之聚苯乙烯樹酯微粒, 並探討運動方向、工作傾角對捕捉力及加速度之影響。為了解更多光捕捉相關參數, 陳文堡 (2011) 適當選配上述兩種製程方法分別對單模光纖及多模光纖進行加工, 已研製出球狀、半球狀等 4 種具不同曲率半徑 (radius of curvature) 之光纖維透鏡, 並分別組成光纖式光鐳夾, 用以捕捉聚苯乙烯樹酯微粒及酵母菌。其針對工作傾角 (40°、50°、60°) 的研究結果可知, 各組光鐳夾在橫向及縱向所得捕捉力之最大值皆發生在工作傾角為 40° 或 50° 之條件下。其中, 在光鐳夾之光源波長、捕

捉功率、工作傾角分別為 532-nm、5 mW、40°的條件下，其光鐳夾可捕獲 15 μm 聚苯乙烯樹酯微粒，且其光鐳夾之最佳捕捉效率為 22.6%。在光捕捉酵母菌部部份，當光鐳夾之光源波長、捕捉功率、工作傾角分別為 532-nm、1 mW、40°時，其光鐳夾之最佳捕捉效率為 6%；所對應之工作距離為 40 μm 。由此可見，能影響捕捉效率之因子種類眾多；其它如樣本材質及形貌、光纖微透鏡之形貌等亦為影響因子。

若不用前述之半球狀或球狀光纖微透鏡，亦可將通訊用單模光纖製成圓錐狀光纖微透鏡（黃文杰，2012；劉世崑，2015），以組成光纖式光鐳夾，並用以捕捉聚苯乙烯樹酯微粒。由其研究結果發現，當已蝕刻區段之光纖直徑在小於 14 μm 時，則光鐳夾之捕捉效率會明顯下降，不利光捕捉實驗。其中，當光鐳夾之光源波長、捕捉功率、工作傾角、光纖微透鏡之錐角、已蝕刻區段之光纖直徑分別為 532-nm、12 mW、50°、90°、14 μm 的條件下，可捕捉 15 μm 微粒；此時，其光鐳夾之最佳捕捉效率為 6.6%。若在上述條件下，分別更換雷射光源為 650-nm 及 980-nm，則光鐳夾所得之捕捉效率分別為 7.3% 及 9.2%。另外，該研究也分別利用波長 532-nm、650-nm、980-nm 作為光鐳夾之光源，用以捕獲第二期人類膀胱癌細胞株（TSGH-8301），但僅有 980-nm 光源可以讓光鐳夾實現光捕捉直徑 10 μm 的癌細胞，在捕捉功率、工作傾角、光纖微透鏡之錐角、已蝕刻區段之光纖直徑分別為 4 mW、50°、90°、14 μm 的條件下，可得到之捕捉效率為 1.2%。

為挑戰複雜度較高之架構，陳柏融（2013）將兩套光學影像系統配置於原有光纖式光鐳夾架構，使具有三維影像擷取功能，可以觀察樣本經光捕捉在三維空間上之運動情形。其中，在光鐳夾之光源波長、捕捉功率、光纖微透鏡之錐角、已蝕刻區段之光纖直徑分別為 650-nm、12 mW、80°、14 μm 的條件下，其光鐳夾具有之最佳捕捉效率為 6.5%。另外完成一支具 25°錐角的光纖微透鏡，但其所組成之系統不具備光捕捉能力。因此，研製具大錐角（含鈍角）之圓錐狀光纖微透鏡也是一個研究重點（Liu, Tsai, & Hsu, 2014）。

在常溫下，利用濕式化學蝕刻法製作圓錐狀光纖微透鏡需時約 7 至 9 小時。為了縮短製作時間，許豐閔（2014）調配緩衝蝕刻液之溫度及濃度，可研製出錐角從 87° 至 103° 不等之圓錐狀光纖微透鏡，可大幅縮短製作時間到 2 至 3 小時左右。該研究分別使用 532-nm 與 650-nm 雷射作為光鐳夾之光源，在光鐳夾之捕捉功率、工作傾角、光纖微透鏡之錐角、已蝕刻區段之光纖直徑分別為 31 mW、50°、100°、14 μm 的條件下，兩組光鐳夾皆可以捕捉 15 μm 微粒。兩組光鐳夾所得之最佳捕捉效率分別為 18%

及 14.3%，而所對應之工作距離分別為 38.9 μm 及 25.8 μm 。此捕捉效率與雷射波長相依的現象也受到其它的文獻的報導 (Liu, Hsieh, et al., 2015)。

蔡佳憬 (2014) 利用 650-nm 雷射作為光鐳夾之光源，在捕捉功率 23 mW 條件下成功捕獲酵母菌，所得之捕捉效率為 2.8%。此外也利用 980-nm 雷射作為光鐳夾之光源，針對第二期 (TSGH-8301) 及第三期 (T24) 人類膀胱癌細胞株進行光捕捉實驗，藉此找出鑑定癌細胞期別之方法。後續研究 (謝文凱，2015；劉世崑，2017) 也利用光纖式光鐳夾分別對人類膀胱癌細胞株 (TSGH-8301 及 T24) 及人類大腸癌細胞株 (SW480 及 SW620) 進行光捕捉實驗。由所得到的逃脫速度計算相關之逃脫速度比值及捕捉效率比值，以為細胞癌化程度與期別之鑑定。在其研究中使用 980-nm 半導體雷射作為光源，選配合適之圓錐狀光纖微透鏡組成光鐳夾系統。在光捕捉癌細胞過程中，捕捉功率設為 2.5 mW、工作傾角設為 40°。並針對不同期別之大腸癌與膀胱癌進行光捕捉實驗。由實驗結果得知，從癌化程度較低的癌細胞可測得較高之逃脫速度；反之，由癌化程度較高的癌細胞測得較低之逃脫速度。由此重大發現可見，細胞癌化程度可以反應在其光學特性上。

新的球狀或半球狀光纖微透鏡的製作方法在西元 2016 年被提出 (宋威億，2016；劉世崑，2018)，可用 10.6- μm 二氧化碳雷射熔燒法取代陳國良 (2009) 所述的電弧熔燒程序。宋威億 (2016) 分別利用圓錐狀及半球狀光纖微透鏡組成光鐳夾，並用以捕捉酵母菌、聚苯乙烯樹酯微粒、及口腔癌細胞株 (OECM-1)。在光捕捉癌細胞的實驗中，雷射波長為 980-nm，捕捉功率設定為 6.3 mW，兩組光鐳夾分別由半球狀及圓錐狀光纖微透鏡之所組成。其研究結果顯示，前者所測得細胞之逃脫速度較後者高；但兩者的工作距離分別為 19 μm 及 12 μm ，且該半球狀及圓錐狀光纖透鏡之已蝕刻區段直徑分別為 32 μm 及 15 μm 。由於研究的變因有多個，故其結論尚有討論空間。值得注意的是其所使用之圓錐狀光纖透鏡之錐角已達 102°。

沈揚傑 (2016) 的研究主要在探討光纖式光鐳夾系統之工作距離對捕捉效率之影響。此項研究分別使用 650-nm 與 532-nm 雷射作為光源，並分別使用半球狀及圓錐狀光纖微透鏡組成光鐳夾系統，用以捕捉在光鐳夾聚苯乙烯樹酯微粒及酵母菌。由研究結果發現，不論捕捉對象為何者，若具半球狀光纖微透鏡之系統之工作距離在 20-40 μm 範圍內，則其捕捉效率可達最大值。類似結果也出現於其它文章 (Liu, Shen, et al., 2016)。另一方面，若具圓錐狀光纖微透鏡之系統欲達到捕捉效率之最大值，則其工作距離是愈短愈好。此現象應與其光纖微透鏡之形貌所造成之聚焦方式有關：若為圓

錐狀，則與其錐角大小有關；若為半球狀或球狀，則與其曲率半徑或焦距有關。林泓樟（2017）發現圓錐狀光纖微透鏡之錐角的確會影響光纖式光鐳夾之捕捉效率，若錐角為鈍角時，則可以有效提升光纖式光鐳夾之捕捉效率；也就是說，微透鏡之錐角會影響光鐳夾所輸出光場之分布或光學位能井的形態，進而影響效率。當光鐳夾之雷射波長、捕捉功率、工作傾角、光纖微透鏡之錐角、已蝕刻區段之光纖直徑分別為 650-nm、20 mW、50°、100°、14 μm 時，可以捕獲約 15- μm 微粒；其工作距離及捕捉效率分別為 13.2 μm 及 15.6%。

光纖微透鏡之蝕刻長度亦可以影響光纖式光鐳夾之捕捉效率（Liu, Hou, et al., 2017）。在其光捕捉酵母菌實驗中，當光源波長、捕捉功率、錐角、已蝕刻區段之光纖直徑分別為 650-nm、7 mW、113°、14 μm 時，則該光鐳夾可以捕捉 8- μm 酵母菌；此時，光纖微透鏡之蝕刻長度分別為 2.8 mm 及 1.5 mm，則其對應之捕捉效率分別為 6.1% 及 6.9%。由此可知，較短的蝕刻長度可使光鐳夾具有較佳之捕捉效率，但依蝕刻長度的變化比例而言，其對效率的影響相對較小。

綜合上述文獻回顧並依據先期的研究結果（陳韋達、侯孟良、劉世崑，2018），本研究將對現有光纖式光鐳夾系統之工作傾角及錐角等影響捕捉效率的因子做進一步之優化，使之更適用於生醫研究。本實驗樣本為聚苯乙烯樹酯微粒。在本研究中，雷射光源將選用可見光波長，以降低系統組裝之困難度。為降低製程之複雜度，光纖微透鏡將選用適合工作距離較短的圓錐狀結構，且其錐角將被加工為鈍角；大於 90°。在實驗過程中，工作距離須小於 10 μm ，故須設定光鐳夾之捕捉功率小於 10 mW，以避免熱效應對實驗樣本產生之形變與破壞。同時在實驗設計中，加強探討工作傾角對捕捉效率之影響，設定數個工作傾角以進行光捕捉實驗，希望能釐清數個文獻中對工作傾角的不同見解；有些認為 40° 為最佳，而有些認為是 50°。最後，本研究結果將與相關文獻之結果進行分析比較，希望在眾多影響單光束光纖式光鐳夾捕捉效率的因子中找到理想的選配及組合。

二、研究方法

為達到優化單光束光纖式光鐳夾效能以適用生醫應用之目的，本研究將針對圓錐狀光纖微透鏡之錐角及光鐳夾之工作傾角兩項影響光鐳夾捕捉效率的因子進行研究。我們分別利用錐角 104° 及 110° 的光纖微透鏡組成兩組光鐳夾系統，各組光鐳夾系

統再分別以工作傾角 40°、50°、60°的設定進行光捕捉實驗。除工作傾角與錐角兩項因子為變動因子外，其它的因子預設為固定因子：計有樣本種類、樣本直徑、雷射波長、光纖種類、已蝕刻區段之光纖直徑、捕捉功率、工作距離等項目。為找出最佳之光鐳夾系統參數組合以完成系統優化之任務，本研究之光捕捉實驗流程依序可分為 9 個步驟，如圖 1 所示，各步驟簡述如下：

第 1 步：製作光纖微透鏡。本研究將使用濕式化學蝕刻法製作光纖微透鏡。光纖微透鏡是光纖式光鐳夾的主要光學元件之一，對光鐳夾的光捕捉能力具有決定性的影響。具體製程詳見標題「(一) 光纖微透鏡製作」內容。

第 2 步：組裝光鐳夾系統。除了雷射光源、耦光元件、光纖微透鏡外，還需要電腦系統（含顯示器、鍵盤、滑鼠等）、影像擷取系統、電動平移台及控制系統、顯微鏡系統、各式支架等多種物件適當搭配而成。具體組裝方式詳見標題「(二) 光鐳夾系統組裝」之內容。

第 3 步：選定實驗樣本。本研究之樣本為聚苯乙烯樹酯微粒。為了探討工作傾角對捕捉效率之影響，必須選用尺寸相近之微粒（直徑約為 14.3 μm ），以確保實驗的一致性與客觀性。相關準備方法詳見標題「(三) 實驗樣本備製」內容。

第 4 步：開啟雷射光源。本系統使用 650-nm 半導體雷射作為光鐳夾系統之光源，並於調整及設定光鐳夾系統參數（如工作傾角、捕捉功率等）之後，開始進行光捕捉實驗。

第 5 步：判斷實驗樣本是否被光場捕獲。利用即時之顯微顯像觀察，若樣本已被成功捕獲，則進行下一步實驗；若樣本未能被捕獲，則關閉雷射，並回到第 3 步。

第 6 步：測量工作距離。當實驗樣本被光鐳夾系統之光場捕獲後，可藉由影像分析及相關計算，以得到實際之工作距離。相關計算詳見標題「(四) 光捕捉原理」項下「1. 工作距離測定」內容。

第 7 步：測量逃脫速度。當實驗樣本被光鐳夾系統之光場捕獲後，可使用電控平移台控制器面板上的 IPPS 設定，使平移台及其上之樣本進行平移運動，並進一步測定，以得到樣本之逃脫速度。詳細方法見標題「(四) 光捕捉原理」項下「2. 逃脫速度測定」內容。

第 8 步：計算捕捉力與捕捉效率。利用所得樣本之逃脫速度及相關理論公式，可以計算得出光鐳夾系統對特定樣本之捕捉力及捕捉效率。相關公式詳見標題「(四) 光捕捉原理」項下「3. 捕捉力與捕捉效率測定」內容。

第 9 步：紀錄實驗結果。將實驗結果記載於實驗紀錄簿，以利後續之整理與分析。

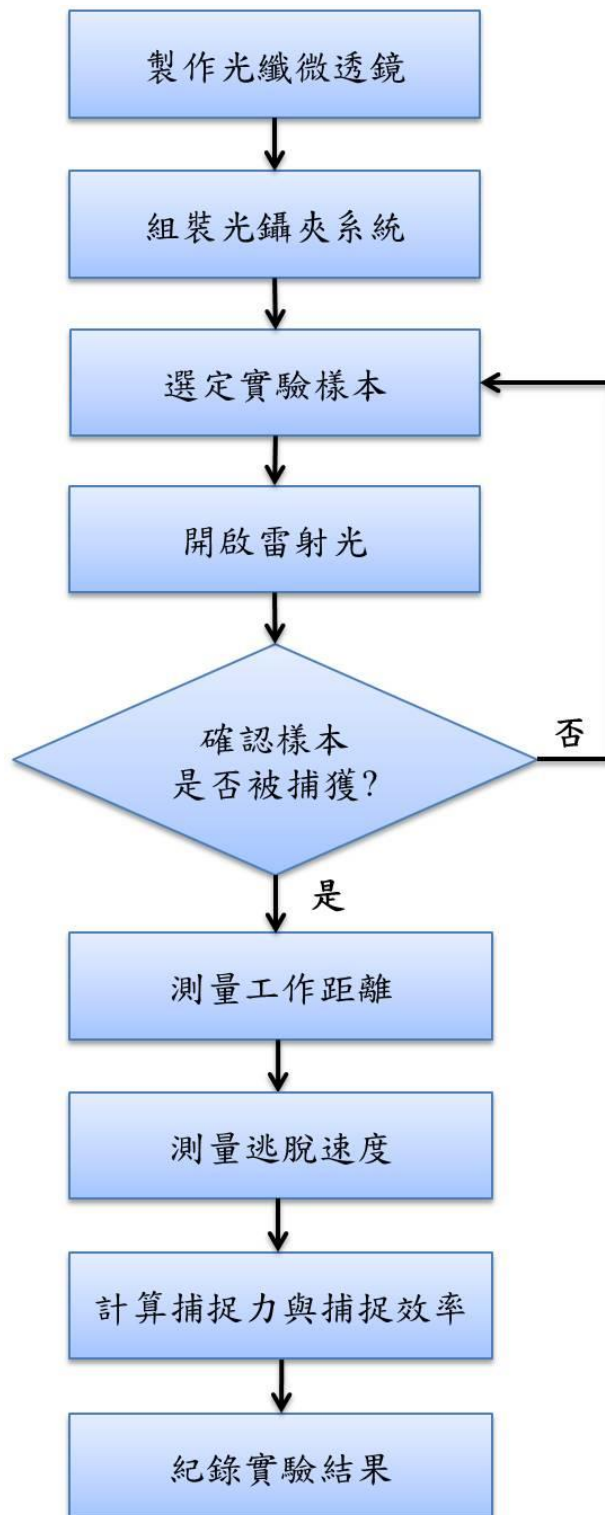


圖 1 本研究之光捕捉實驗流程

(一) 光纖微透鏡製作

在圖 1 之實驗流程的第 1 步是圓錐狀光纖微透鏡之製作，其詳細製作流程依序可細分成 9 個步驟，見如圖 2。概述如下：

第 1 步：剝除光纖保護層。將市售通訊用單模光纖適當裁剪，使光纖之長度約為 55-60 cm，並利用光纖專用剝線鉗剝除光纖外層之保護層。

第 2 步：清潔與裁切光纖。使用拭鏡紙沾取工業酒精，清潔已剝除保護層之裸光纖。進一步利用光纖切割機裁切裸光纖至適當長度。

第 3 步：清潔光纖之端面。再次以拭鏡紙沾取工業酒精，並清潔此裸光纖之兩個端面，以確保其應有之光學特性。

第 4 步：檢查光纖端面是否平整。使用金相顯微鏡檢查光纖端面，若端面平整，則進行下一步製程；若端面不平整，則回收此光纖，並回到第 1 步。

第 5 步：準備與加熱蝕刻液。此處之蝕刻液為緩衝蝕刻液 (buffered oxide etchant, BOE)。加熱至適當溫度可以加速蝕刻之速度。

第 6 步：蝕刻光纖之一端。選取裸光纖之一端，經過適當之濕式化學蝕刻製程及清潔程序，可以得到圓錐狀之光纖微透鏡。詳見標題「1. 濕式化學蝕刻法」內容。

第 7 步：檢查光纖之蝕刻端是否呈現圓錐狀。將完成清潔動作之光纖微透鏡置於金相顯微鏡下檢查，若蝕刻端為完整的圓錐形，則進行下一步動作；若蝕刻端未符合要求，則視為廢品。

第 8 步：記錄蝕刻製程參數。將實驗結果記載於實驗紀錄簿，以利後續在製程調整之參考。

第 9 步：測量與紀錄光纖微透鏡形貌參數。測量與記錄光纖之蝕刻端之蝕刻長度、光纖直徑及錐形體之錐角等形貌參數。詳見標題「2. 圓錐狀光纖微透鏡特性參數」內容。

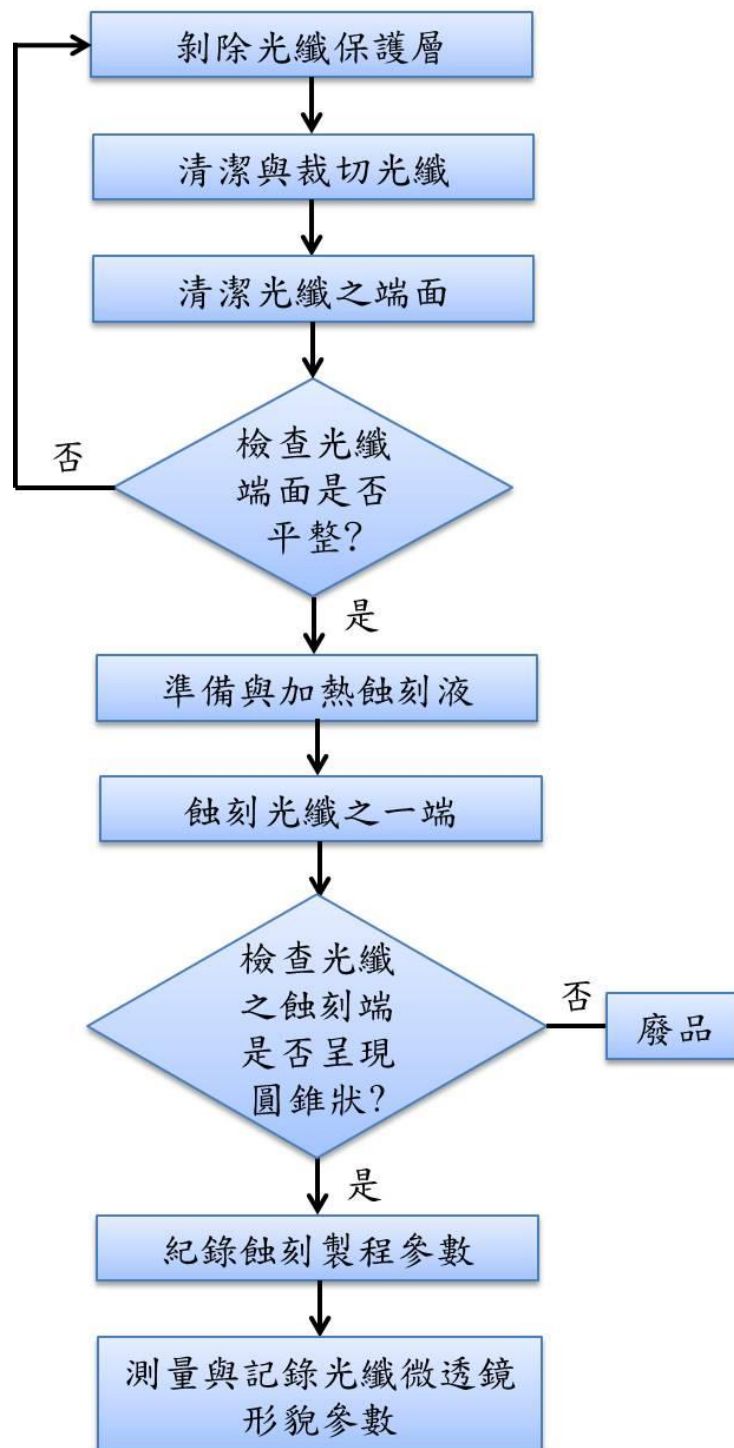


圖 2 圓錐狀光纖微透鏡之製作流程

1. 濕式化學蝕刻法

本濕式化學蝕刻技術（劉世崑，2015）非常適用於製作圓錐狀光纖微透鏡，使其錐角為銳角或鈍角。在製作前須準備一聚苯乙烯容器，以做為緩衝蝕刻液之容器。在

容器頂蓋部分挖洞，並置入光纖固定座。在容器中倒入適量的 BOE，並使用保鮮膜封住容器頂部。接著，將容器放置於加熱平台上，設定加熱溫度為 50°C，並維持 30 分鐘。同時，使用工業酒精清潔預定之光纖端，將清潔完之光纖放置及固定於醫療針頭內，並將針頭置入頂蓋的固定架。當 BOE 加熱完成後，撕去容器上方的保鮮膜，並將備置完成的容器頂蓋蓋回容器之上方。使預定之光纖蝕刻端沒入於 BOE 中，如圖 3 所示。經適當的蝕刻時間後，取出光纖，用去離子水 (deionized water, DI water) 除去殘留在光纖蝕刻端之 BOE，緊接著使用工業酒精清潔蝕刻端，完成光纖微透鏡之製作。若一切蝕刻製程順利無誤，則此裸光纖在已蝕刻區段的尖端為圓錐體，且其錐角可大於 90°；其完整形貌示意如圖 4。在本研究中，此已成功完成蝕刻之光纖被稱為 (圓錐狀) 光纖微透鏡。

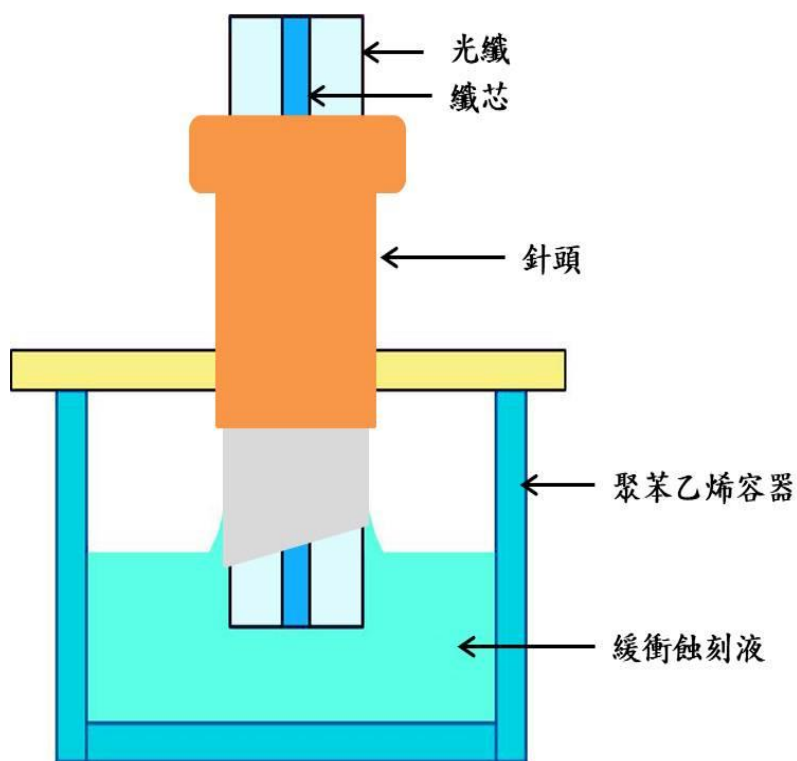


圖 3 濕式化學蝕刻法之示意圖

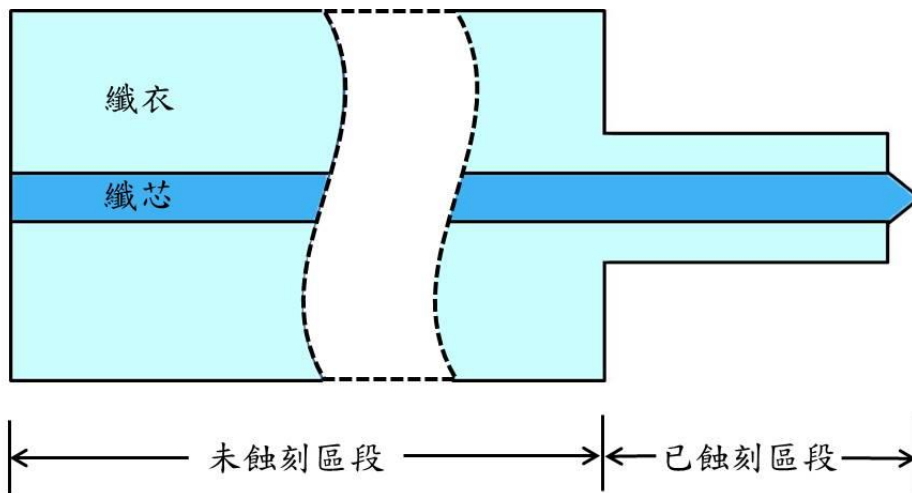


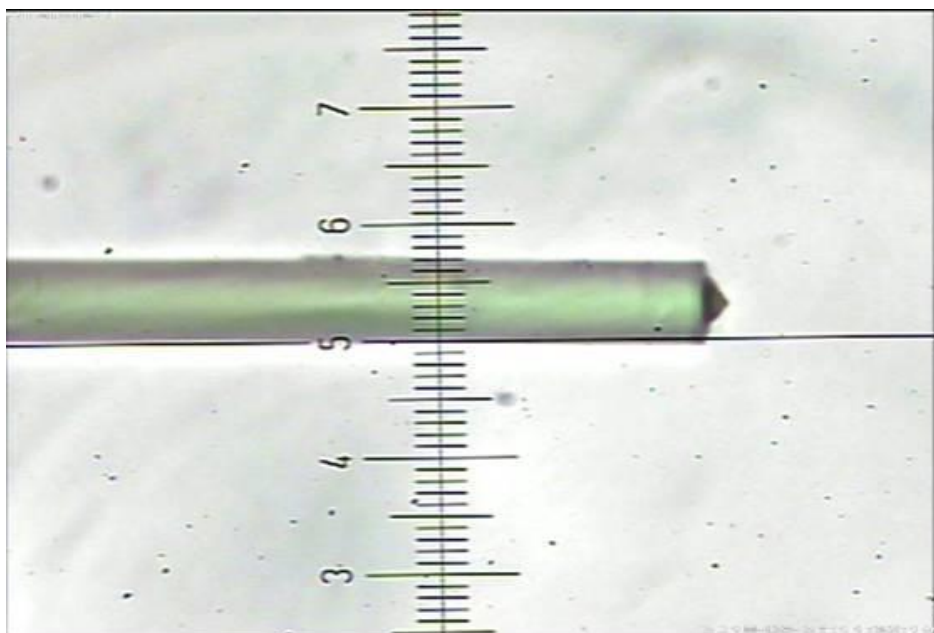
圖 4 完成濕式化學蝕刻後之裸光纖形貌示意圖

2. 圓錐狀光纖微透鏡特性參數

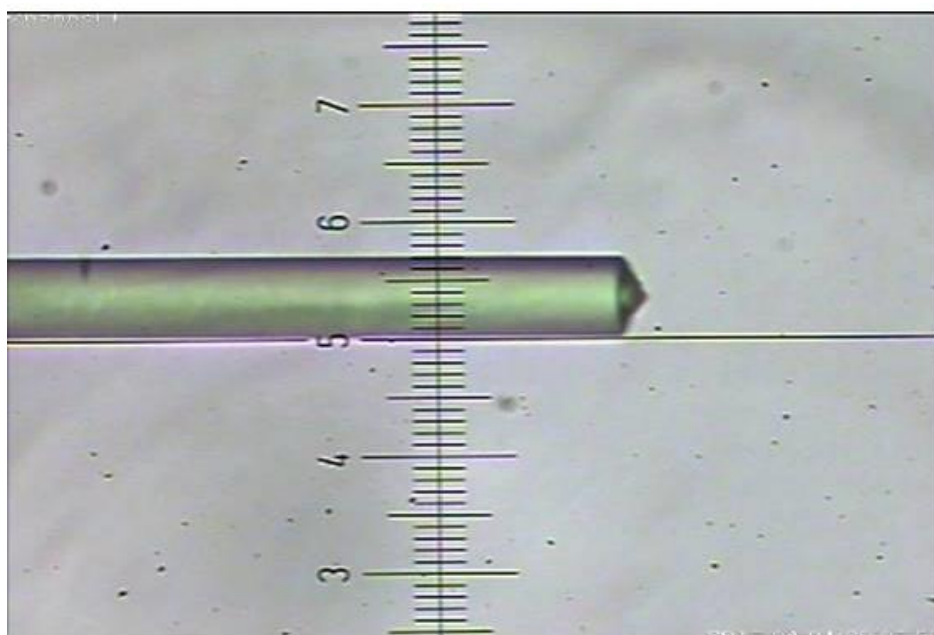
圖 5 為圓錐狀光纖微透鏡之顯微照片。此兩張照片為兩支不同光纖分別經上述濕式化學蝕刻技術處理之結果；其光纖編號分別為 SMF180524-HV4 (圖 5 (a)) 及 SMF180323-HV5 (圖 5 (b))。此兩張照片乃使用金相顯微鏡所拍攝，其倍率為 500 倍。在照片中，刻度尺上最小刻度之間距為 $2\ \mu\text{m}$ 。

緊接著，利用影像擷取系統所擷取之照片進行影像處理及截圖。再將截圖送入透過 Matlab 軟體編寫之程式碼，取得其形貌之輪廓，並利用數值方法進行取樣及分段線性擬合，再計算兩條擬合直線之夾角；此夾角即為圓錐狀光纖微透鏡之錐角，如圖 6 所示。

表 1 所示為兩支圓錐狀光纖微透鏡之特性參數。可參照圖 4 之示意圖，其未蝕刻區段之纖芯直徑為 $8\ \mu\text{m}$ ，而其光纖直徑為 $125\ \mu\text{m}$ 。兩者在已蝕刻區段之光纖直徑皆為 $14\ \mu\text{m}$ ，纖芯直徑為 $8\ \mu\text{m}$ 。然而，兩者在已蝕刻區段之圓錐體的錐角有所不同，分別為 104° 及 110° 。



(a)



(b)

圖 5 圓錐狀光纖微透鏡之顯微照片：(a) 編號 SMF180524-HV4；(b) 編號 SMF180323-HV5

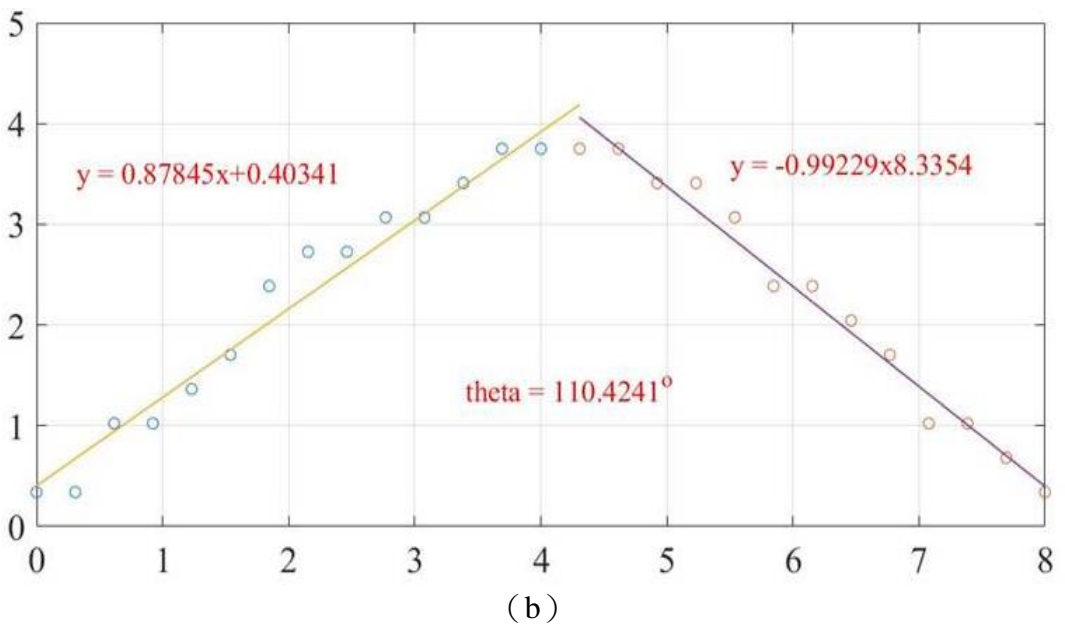
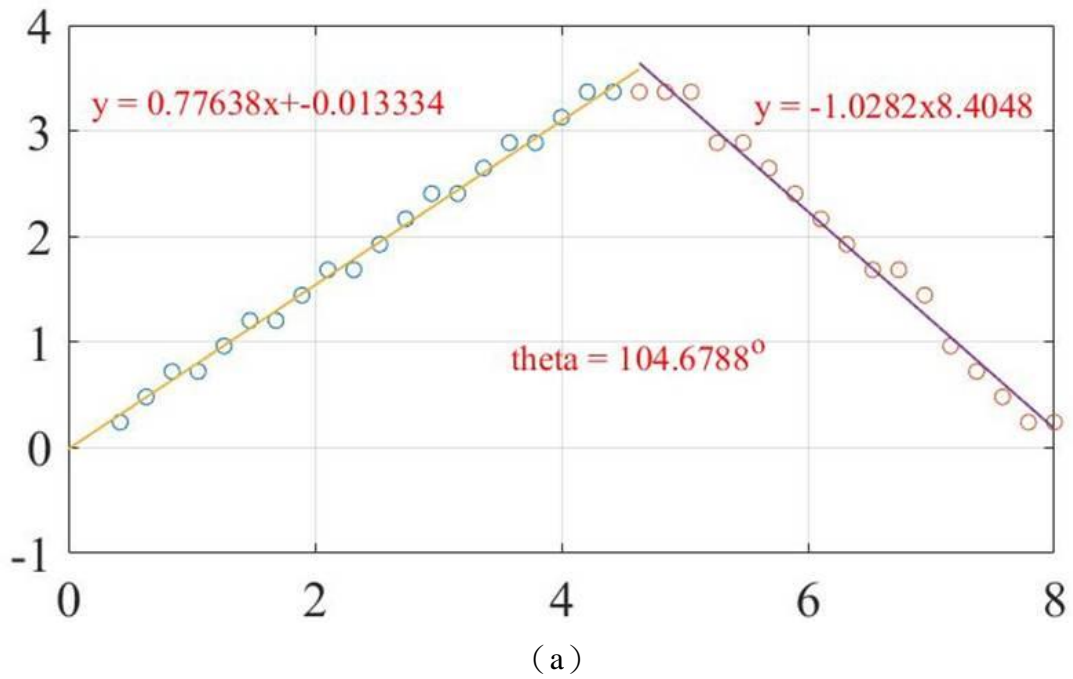


圖 6 圓錐狀光纖微透鏡之錐角測定之數值擬合結果：(a) 編號 SMF180524-HV4；(b) 編號 SMF180323-HV5

表 1 圓錐狀光纖微透鏡之特性參數

| 編號 | 未蝕刻區段之 纖芯 / 光纖直徑 (μm) | 已蝕刻區段之 纖芯 / 光纖直徑 (μm) | 已蝕刻區段之 圓錐體錐角 |
|---------------|--|--|-----------------|
| SMF180524-HV4 | 8 / 125 | 8 / 14 | 104° |
| SMF180323-HV5 | | | 110° |

(二) 光鐳夾系統組裝

圖 7 為本光纖式光鐳夾之系統架構，本系統主要由半導體雷射、光纖耦合器、XYZ 三軸平移台、XY 平移台、電控平移台控制器、濾光片、光纖微透鏡、載物台、LED 光源、工作顯微鏡、影像擷取系統、顯示器、電腦系統等所構成。圖 8 為其實體圖。其中，光纖耦合器負責將來自半導體雷射的雷射光束耦入光纖微透鏡，以產生具光捕捉能力之光場。在實驗前，XYZ 三軸平移台可設定光纖微透鏡的初始位置與角度。實驗所需之樣本及溶液將被放置於載物台上。在實驗中，載物台可透過其下方之電控平移台 (XY 平移台) 進行平移運動；平移台可接受控制器之指令，改變平移速度。LED 光源為白光 LED 陣列，能提供影像觀測所需之光源。濾光片負責濾除或減弱雷射光所對應之波長成份，使位於其上方的工作顯微鏡及影像擷取系統可得到清楚之顯微影像。當然，為了觀察與紀錄顯微影像，顯示器、電腦及相關軟硬體也是不可或缺的。

表 2 所示為本研究之兩組光纖式光鐳夾系統及其主要光學組件參數。兩系統皆使用 650-nm 紅光雷射作為系統光源。因使用相同規格光纖，故兩系統具有相同之未蝕刻區段之纖芯直徑 (8 μm)、光纖直徑 (125 μm)。經適當選配，兩系統在已蝕刻區段之光纖直徑約為 14 μm ，而系統 A 與系統 B 最大不同之處在已蝕刻區段之圓錐體錐角；分別為 104°及 110°。為使實驗具客觀標準，兩者之捕捉功率亦皆調整為 8 mW。

表 2 本研究之光纖式光鐳夾系統及主要光學組件參數

| 系統 編號 | 雷射波長 (nm) | 未蝕刻區段之 纖芯 / 光纖直徑 (μm) | 已蝕刻區段之 纖芯 / 光纖直徑 (μm) | 圓錐體之 錐角 | 捕捉功率 (mW) |
|----------|--------------|--|--|------------|--------------|
| A | 650 | 8 / 125 | 8 / 14 | 104° | 8 |
| B | | | | 110° | |

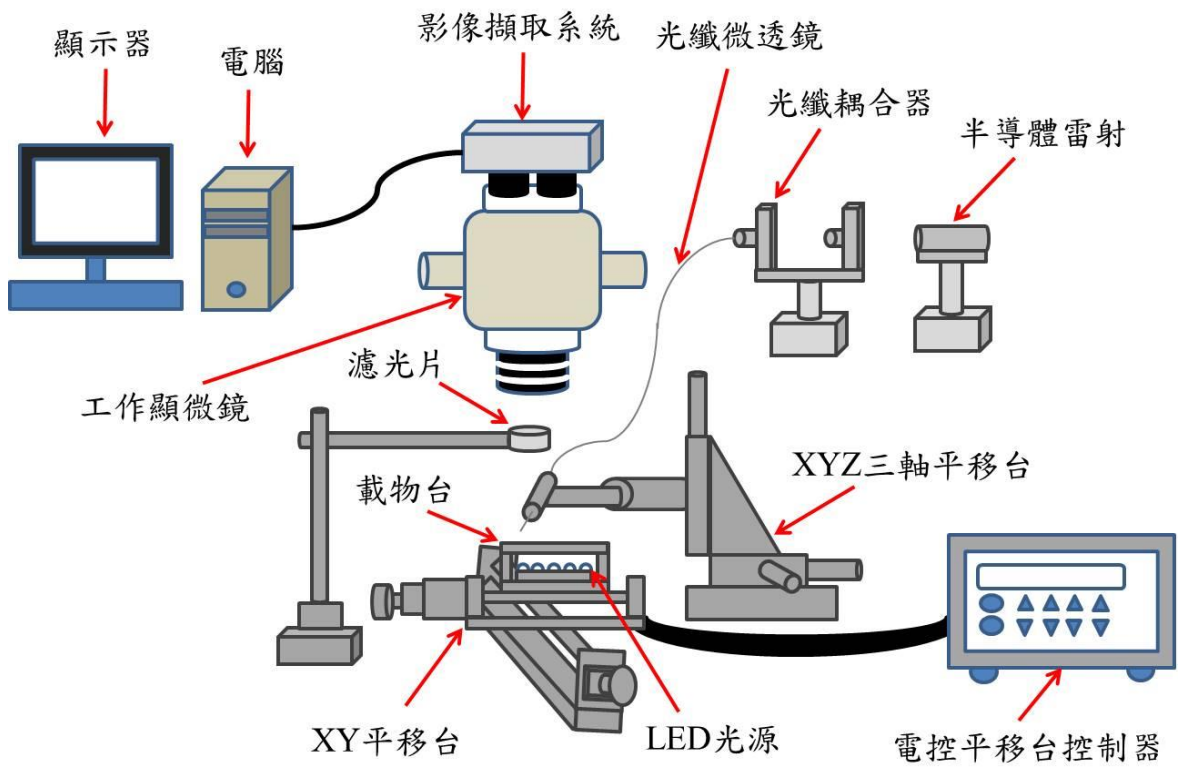


圖 7 本光纖式光鐳夾系統架構示意圖

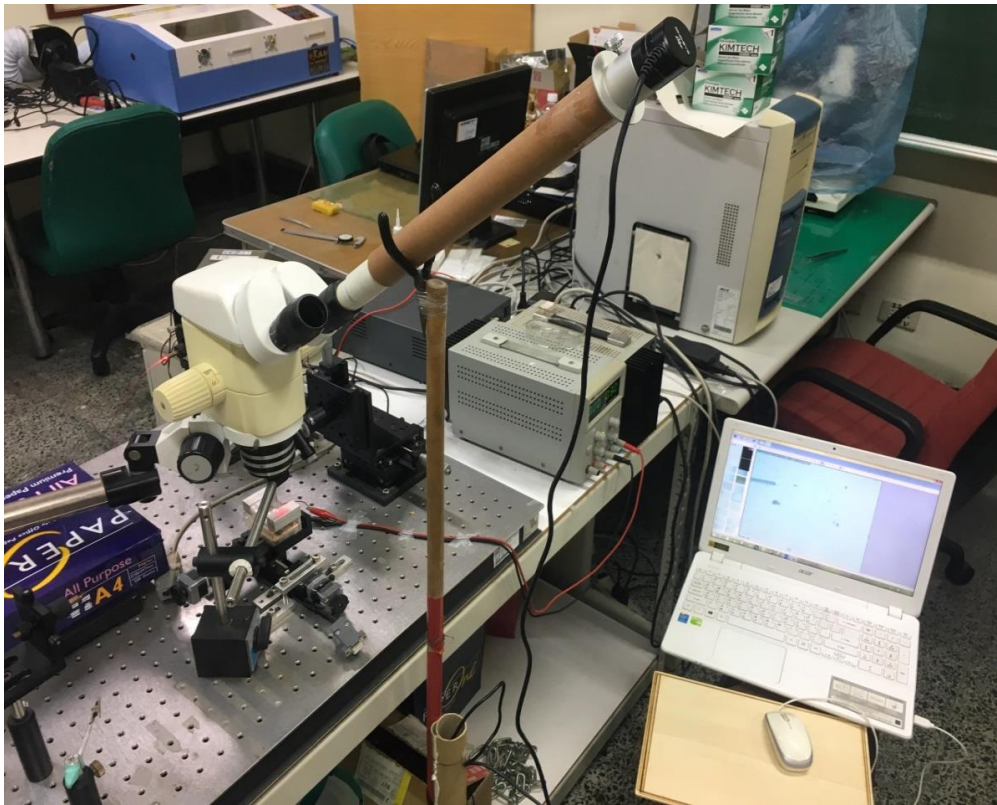


圖 8 本光纖式光鐳夾系統之實體照片

(三) 實驗樣本備製

為優化本研究之光纖式光鐳夾，實驗樣本必須符合下列條件：應接近完美球體，可透光，其直徑大小接近光纖微透鏡之圓錐體大小。因此，本研究之樣本選定為聚苯乙烯樹脂微粒（塑膠微粒），具備球體及半透明等特性。它是一種用於製作液晶銀幕（liquid crystal display, LCD）背光模組之擴散膜的原料。如圖 9 所示，其直徑大小從 $5\ \mu\text{m}$ 至 $15\ \mu\text{m}$ 不等，本研究選擇樣本之直徑大小約為 $14.3\ \mu\text{m}$ 。在圖中，刻度尺上每刻劃之最小間隔為 $2\ \mu\text{m}$ ；此時，金相顯微鏡之放大倍率為 500 倍。由於光捕捉實驗需要樣本在懸浮狀態下進行，但當塑膠微粒懸浮於一般水溶液時，容易糾集成團。為此，在去離子水中加入適當比例界面活性劑 X-100 以做為緩衝液，可有效分離這些塑膠微粒，以利光捕捉實驗之進行。

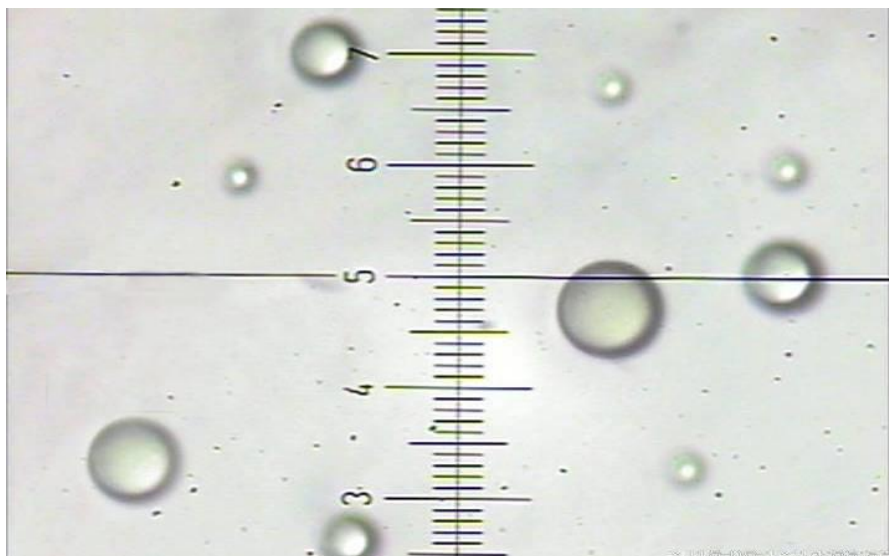


圖 9 塑膠微粒之顯微照片

(四) 光捕捉原理

本研究所述之光纖式光鐳夾系統之捕捉效率會受到為數眾多的因子影響；其因子至少有光鐳夾之錐角（taper angle）、工作傾角（working angle）、工作距離（working distance）、捕捉功率（trapping power）、雷射波長（wavelength）、已蝕刻區段之光纖直徑、蝕刻長度、樣本之直徑（diameter of sample）、材質、形狀等。因整個光捕捉機制與光息息相關，故在解釋此機制前，必須先詳細了解本光鐳夾光學部份之詳細硬體配置與相關影響因子之定義，如圖 10 所示。圖中的工作傾角被定義為光束行進方向

與水平之夾角 θ 。而工作距離被定義為光纖微透鏡之圓錐體尖端至樣本之幾何中心，其值必定大於零。另外，本研究之樣本平移方向為 y 方向，其對應之捕捉力為橫向捕捉力 (transverse trapping force)，簡稱為捕捉力。

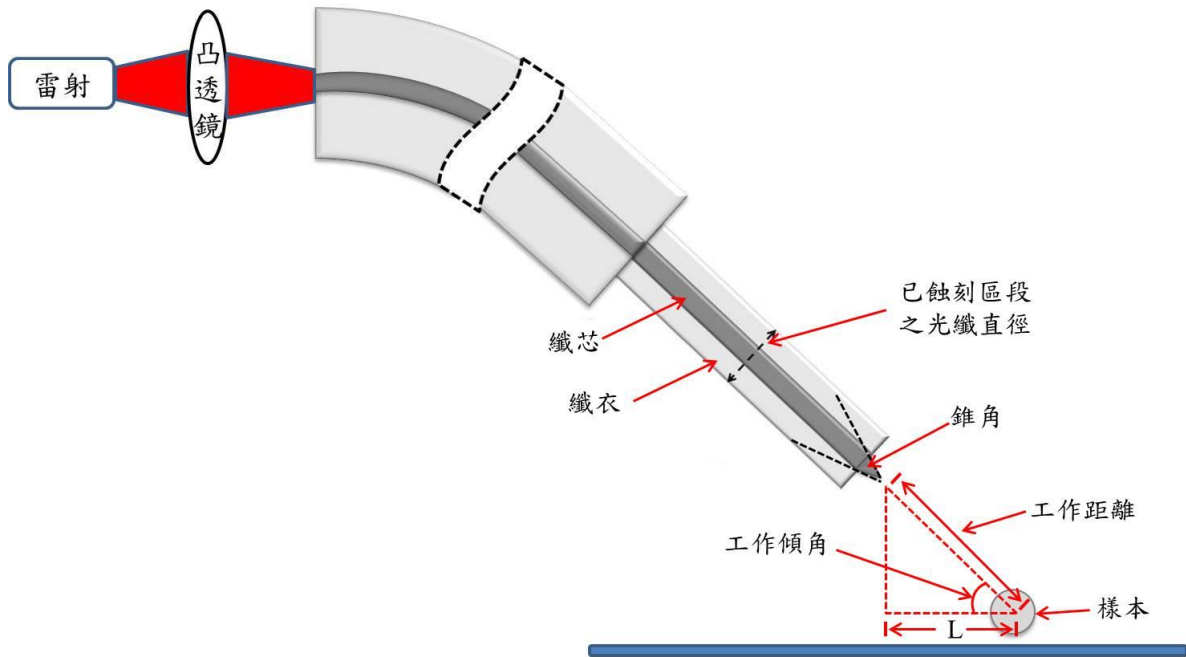


圖 10 本光纖式光鐳夾系統之重要光學組件及專有名詞之示意圖

圖 11 為本研究所述光纖式光鐳夾系統之光捕捉機制。當光鐳夾啟動並用於捕捉樣本時，可透過影像系統監看，操作 XYZ 三軸平移台，將光鐳夾指向樣本所在位置附近。若系統輸出之光束（經適當聚焦之雷射光）能通過樣本，依據折射定律 (law of diffraction)，光束受到偏折，見圖 11 (a)；此代表光子的動量 (momentum) 有變化，因其受到來自該樣本的作用力 F_1 。同時，根據牛頓第三運動定律 (Newton's third law)，作用力與反作用力大小相等，方向相反，作用於不同物體；因此，光子也等同施予該樣本一反作用力 F_2 ，見圖 11 (b)。前述的 F_1 與 F_2 只是取任一橫截面對稱的兩個力做為代表。此兩道對稱的反作用力 F_2 並非大小相同方向相反，故可以產生一個不等於零之合力 F ，見圖 11 (c)；此即為光鐳夾對樣本所產生之捕捉力。當樣本移動至合力為零之處，便不會再移動；此時，樣本已被穩定地捕獲，停在或陷入所謂的光學位能井 (optical potential well) 中 (Ashkin, 1992)。透過適當移動載物台可以操控樣本的位置與速度。

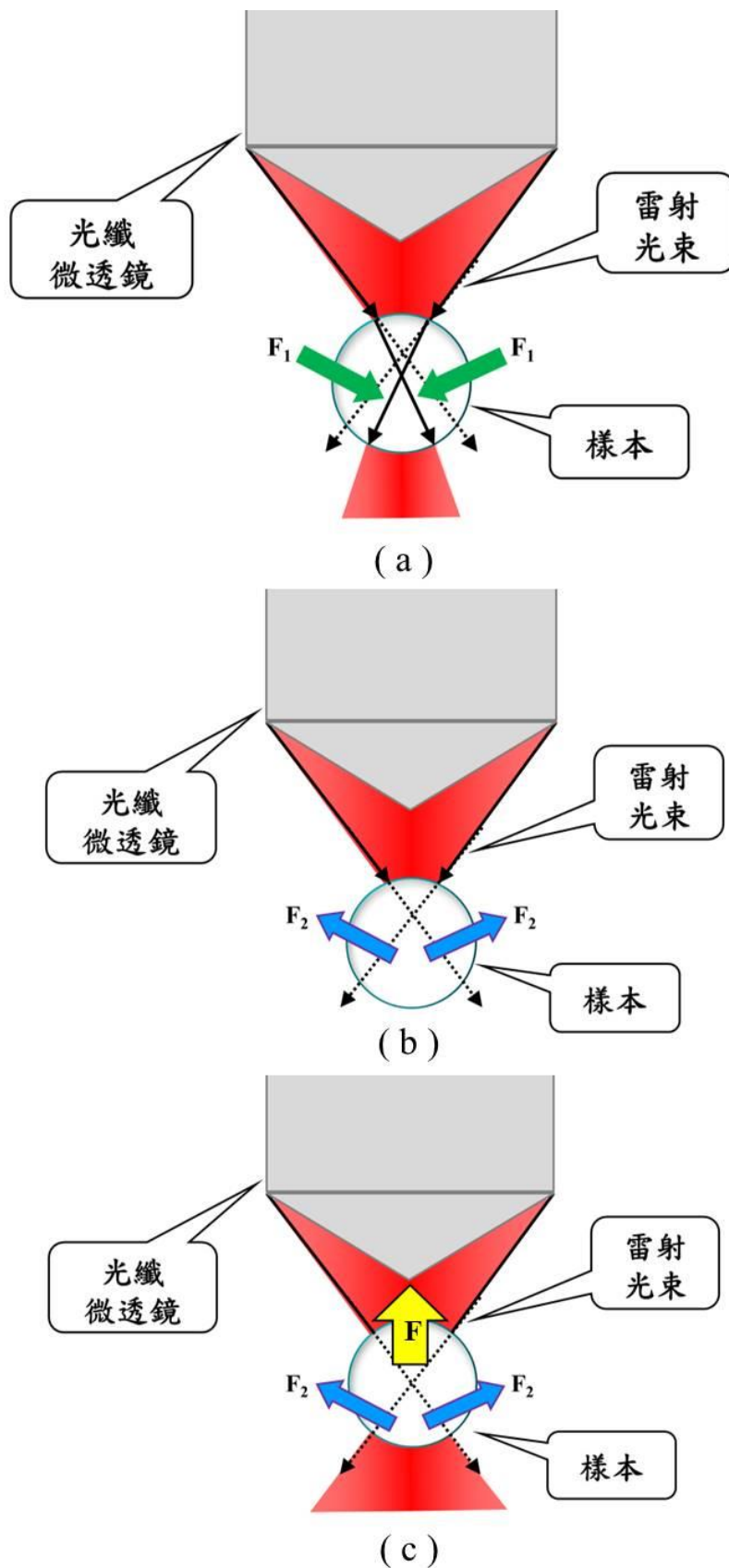


圖 11 本光纖式光鐳夾之光學捕捉力之產生機制示意圖

1. 工作距離測定

在本研究之光鐳夾系統架構中，工作顯微鏡被置於載物台上方，因此利用影像擷取系統取得之影像只含有二維的空間資訊，無法直接觀測實際之工作距離。參照圖 10，在二維影像中可得光纖微透鏡前端與樣本幾何中心之水平距離 L ，運用三角幾何原理，若工作距離為 d ，則 L 與 d 兩者有餘弦之關係。若光纖微透鏡之光軸與載物台所在水平面之夾角（工作傾角）為 θ ，則實際工作距離為（宋威億，2016；沈揚傑，2016）：

$$d = \frac{L}{\cos\theta} \quad (1)$$

2. 逃脫速度測定

根據 Ashkin（1992）的研究，測定逃脫速度的方法可分為動態量測（dynamic measurement method）及靜態量測法（static measurement method）。其中，動態量測法需要具備精密時間測量及位移量計算能力之光鐳夾系統，其系統構造複雜。本系統具備電控平移台，可以控制樣本之移動速度，故適用靜態量測法。當光鐳夾系統成功捕獲樣本時，可藉由電控平移台控制器控制 XY 平移台上之載物台，使得載物台上之樣本進行等速平移運動，方向為圖 10 中之 y 方向；每次增加平移速度，直至樣本剛好脫離光鐳夾之束縛，此時所得速度即為此次實驗樣本之逃脫速度（escape velocity）。

3. 捕捉力與捕捉效率測定

利用前述所得之逃脫速度，可以計算光鐳夾之捕捉力及捕捉效率（Ashkin, 1992）。本光纖式光鐳夾之捕捉力 F 之計算公式為：

$$F = 6\pi\eta r v \quad (2)$$

其中， η 為溶液之黏滯係數， r 為樣本（球體）之半徑， v 為樣本之逃脫速度。另外，相對應之捕捉效率 Q 之計算公式為：

$$Q = \frac{Fc}{nP} \quad (3)$$

其中， c 為真空中的光速， n 為溶液之折射率， P 為光鐳夾之捕捉功率。

這裡要特別注意捕捉功率是不同於雷射輸出功率或雷射功率，一般的論文常將兩者混為一談。在光纖式光鐳夾系統中，雷射光經過耦光機構一定會有耦光損耗

(coupling loss)，能進入光纖中之光束利用光纖之波導結構傳遞到另一端，光在此過程會經歷衰減作用 (attenuation)，最後經光纖微透鏡之聚焦後，其所輸出之光功率才是本研究所謂的補捉功率。因此，所測得之補捉功率一定會小於雷射本身之輸出功率。兩者皆可以使用光功率計測得。

三、結果與討論

(一) 光鑷夾系統 A 結果

圖 12 為光鑷夾系統 A 在工作傾角為 40° 時之光捕捉實驗之影像。其中，圖 12 (a) 為樣本在平移運動前之畫面，而圖 12 (b) 為經平移運動後之畫面。表 3 為光鑷夾系統 A 在工作傾角分別為 40° 、 50° 、 60° 之光捕捉實驗結果。在特定工作傾角的條件下，各選 5 個樣本做光捕捉實驗，每個樣本取得 5 次逃脫速度實驗值。在表中，每個點為每個樣本之逃脫速度之平均值。由表中之捕捉效率數據顯示，在樣本直徑及工作距離接近相等的條件下，當工作傾角在 40° 時，此光鑷夾具有之捕捉效率從 5.68% 至 6.02%。當工作傾角在 50° 時，此光鑷夾具有之捕捉效率從 4.86% 至 5.23%。當工作傾角在 60° 時，此光鑷夾具有之捕捉效率從 4.14% 至 4.49%。圖 13 為利用表 3 之數據所繪製而成，可以清楚顯示光鑷夾系統 A 之工作傾角對捕捉效率之影響；在圖中，每個數據點之右方用圓圈內含數字代表其樣本編號。因此，光鑷夾系統 A 在工作傾角為 40° 時，具有較佳之捕捉效率，其最大值為 6.02 %。

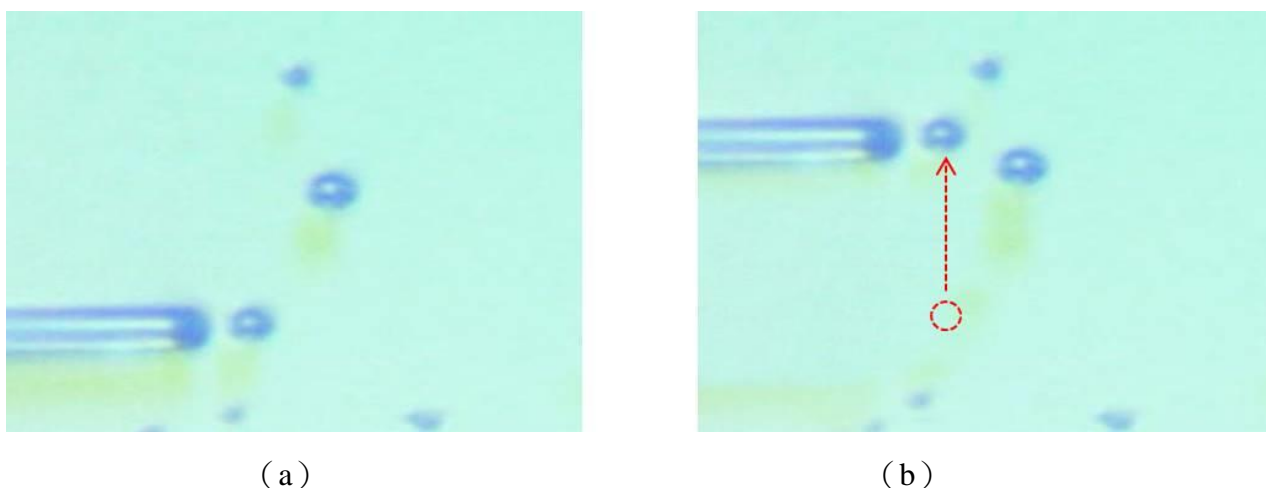


圖 12 光鑷夾系統 A 在工作傾角為 40° 時之光捕捉實驗之影像：(a) 樣本在平移運動前；(b) 樣本經平移運動後

表 3 光鑷夾系統 A 之光捕捉實驗結果

| 樣本編號 | 樣本直徑 (μm) | 工作傾角 | 工作距離 (μm) | 逃脫速度 (μm/s) | 捕捉力 (pN) | 捕捉效率 (%) |
|------|-----------|------|-----------|-------------|----------|----------|
| 1 | 14.4 | 40° | 9.8 | 9.39 | 2.11 | 5.94 |
| 2 | 14.4 | | 9.9 | 9.52 | 2.14 | 6.02 |
| 3 | 14.4 | | 9.8 | 9.26 | 2.08 | 5.85 |
| 4 | 14.3 | | 9.9 | 9.0 | 2.01 | 5.68 |
| 5 | 14.4 | | 9.8 | 9.13 | 2.05 | 5.78 |
| 6 | 14.3 | 50° | 9.9 | 7.72 | 1.73 | 4.86 |
| 7 | 14.4 | | 9.8 | 8.23 | 1.85 | 5.23 |
| 8 | 14.4 | | 9.8 | 8.10 | 1.82 | 5.14 |
| 9 | 14.3 | | 9.8 | 7.85 | 1.76 | 4.95 |
| 10 | 14.4 | | 9.9 | 7.98 | 1.79 | 5.04 |
| 11 | 14.3 | 60° | 9.8 | 6.56 | 1.47 | 4.14 |
| 12 | 14.4 | | 9.9 | 6.59 | 1.56 | 4.40 |
| 13 | 14.4 | | 9.9 | 6.82 | 1.53 | 4.32 |
| 14 | 14.4 | | 9.8 | 7.08 | 1.59 | 4.49 |
| 15 | 14.4 | | 9.8 | 6.69 | 1.50 | 4.23 |

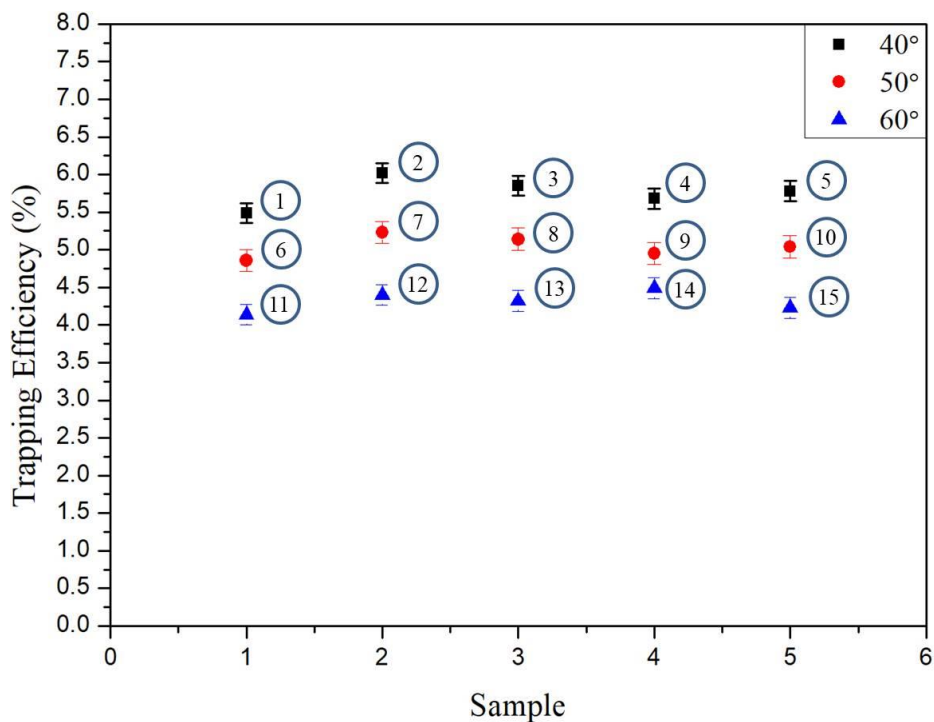


圖 13 光鑷夾系統 A 之工作傾角對捕捉效率之影響

(二) 光鐳夾系統 B 結果

圖 14 為光鐳夾系統 B 在工作傾角為 40° 時之光捕捉實驗之影像。其中，圖 14 (a) 為樣本在平移運動前之畫面，而圖 14 (b) 為經平移運動後之畫面。表 4 為光鐳夾系統 B 在工作傾角分別為 40° 、 50° 、 60° 之光捕捉實驗結果。在特定工作傾角的條件下，各選 5 個樣本做光捕捉實驗，每個樣本取得 5 次逃脫速度實驗值。在表中，每個點為每個樣本之逃脫速度之平均值。由表中之捕捉效率數據顯示，在樣本直徑及工作距離接近相等的條件下，當工作傾角在 40° 時，此光鐳夾具有之捕捉效率從 7.17% 至 7.88%。當工作傾角在 50° 時，此光鐳夾具有之捕捉效率從 6.15% 至 6.60%。當工作傾角在 60° 時，此光鐳夾具有之捕捉效率從 4.95% 至 5.37%。圖 15 為利用表 4 之數據所繪製而成，可以清楚顯示光鐳夾系統 B 之工作傾角對捕捉效率之影響；在圖中，每個數據點之右方用圓圈內含數字代表其樣本編號。因此，光鐳夾系統 B 在工作傾角為 40° 時，具有較佳之捕捉效率，其最大值為 7.88 %。

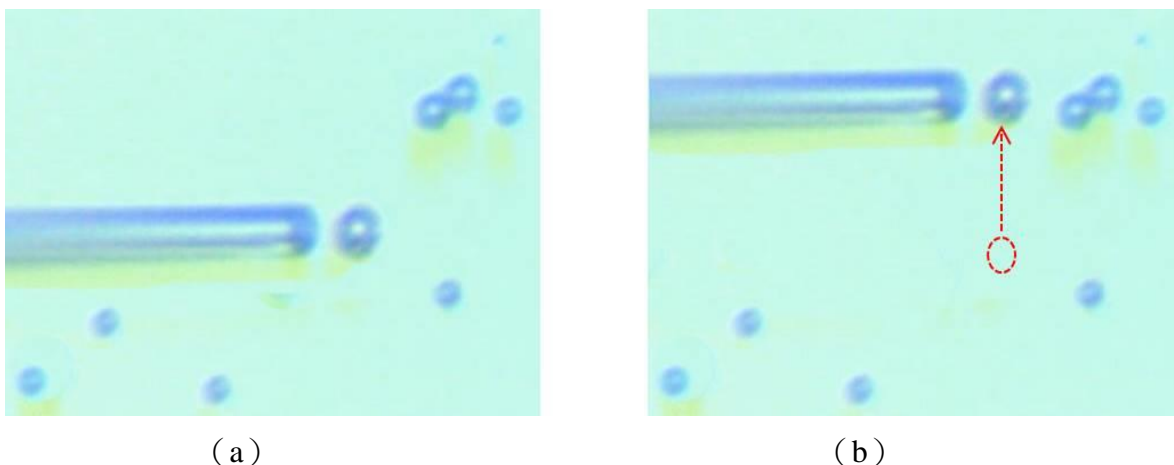


圖 14 光鐳夾系統 B 在工作傾角為 40° 時之光捕捉實驗之影像：(a) 樣本在平移運動前；(b) 樣本經平移運動後

表 4 光鑷夾系統 B 之光捕捉實驗結果

| 樣本編號 | 樣本直徑 (μm) | 工作傾角 | 工作距離 (μm) | 逃脫速度 (μm/s) | 捕捉力 (pN) | 捕捉效率 (%) |
|------|-----------|------|-----------|-------------|----------|----------|
| 1 | 14.3 | 40° | 9.8 | 12.09 | 2.70 | 7.61 |
| 2 | 14.2 | | 9.7 | 11.45 | 2.54 | 7.17 |
| 3 | 14.3 | | 9.7 | 11.83 | 2.64 | 7.44 |
| 4 | 14.4 | | 9.8 | 12.47 | 2.80 | 7.88 |
| 5 | 14.3 | | 9.9 | 11.70 | 2.61 | 7.35 |
| 6 | 14.4 | 50° | 9.9 | 10.03 | 2.25 | 6.34 |
| 7 | 14.3 | | 9.8 | 9.90 | 2.22 | 6.25 |
| 8 | 14.4 | | 9.8 | 10.42 | 2.34 | 6.60 |
| 9 | 14.4 | | 9.8 | 10.16 | 2.28 | 6.43 |
| 10 | 14.3 | | 9.7 | 9.78 | 2.18 | 6.15 |
| 11 | 14.4 | 60° | 9.8 | 8.49 | 1.91 | 5.37 |
| 12 | 14.4 | | 9.8 | 8.23 | 1.85 | 5.21 |
| 13 | 14.3 | | 9.9 | 7.85 | 1.76 | 4.95 |
| 14 | 14.3 | | 9.8 | 7.98 | 1.79 | 5.03 |
| 15 | 14.4 | | 9.9 | 8.10 | 1.82 | 5.12 |

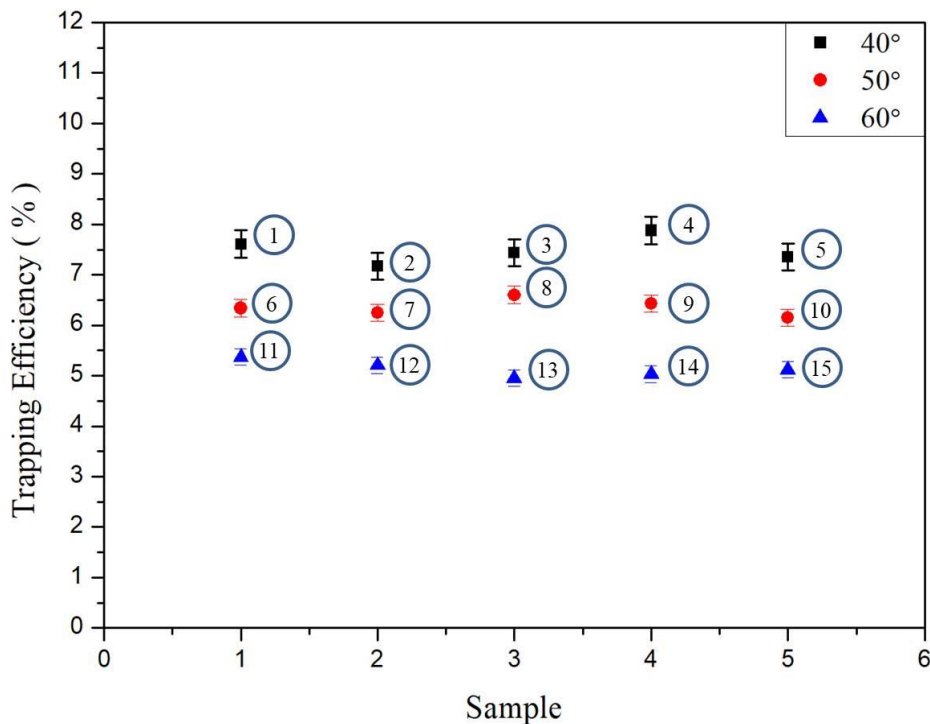


圖 15 光鑷夾系統 B 之工作傾角對捕捉效率之影響

(三) 結果分析與比較

表 5 為最近相關研究結果之比較，表格內容取自各文獻中有關光纖式光鐳夾在工作傾角為 40° 且捕捉功率小於 10 mW 條件下之光捕捉實驗結果，數據之選擇以其最佳值或其最大值為準。本研究在錐角為 104° 時，其光鐳夾系統（光鐳夾系統 A）具有之捕捉效率為 6.02%，而在錐角為 110° 時，其（光鐳夾系統 B）捕捉效率為 7.88%。由此可知，若光鐳夾之錐角為鈍角且為實驗中唯一變數時，較大的錐角有利提升本光鐳夾之捕捉效率。當然，錐角大於 110° 的部份尚有研究與討論的空間。

本研究在樣本直徑與工作距離兩部份數值與林泓樟（2017）較為接近。若在錐角約為 104° 的條件下相比，本研究具有較高的捕捉效率（6.02%），而林泓樟在相近條件下（ 103° 與 105° ）所得之效率分別為 5.5% 與 5.9%。相同的現象發生在錐角約為 110° 的條件下，本研究亦得到較高的捕捉效率（7.88%），而林泓樟所得之效率為 7.1%。再仔細檢視表 5，本研究使用之捕捉功率為 8 mW，而林泓樟之研究使用 6 mW。另外，本研究使用之工作距離約為 9.8./9.9 μm ，亦大於林泓樟之 9.0/9.3/9.1 μm 。由此可知，在光鐳夾系統其它條件相近下，較大之捕捉功率與工作距離有助提升光纖式光鐳夾之捕捉效率。

若只檢視表 5 中錐角為 110° 之實驗結果，共有 3 筆數據。陳韋達（2018）所得之捕捉效率為 8.23%，皆較林泓樟（2017）之 7.1% 及本研究之 7.88% 為高。陳韋達與林泓樟相較之下，陳韋達在樣本直徑（15 μm ）與工作距離（17 μm ）皆有較高數值。依據比例關係，特別針對工作距離，林泓樟之數值為 9.1 μm ；只為陳韋達之 53.5%。相近的情形，本研究之工作距離為 9.8 μm ，亦只為陳韋達之 57.6%。雖然陳韋達所用之捕捉功率只為本研究之 75%，將降低其捕捉效率。但因其工作距離為本研究之 173%，最後反而使得其捕捉功率超過本研究，為本研究之 104%；意即比本研究之結果多 4%。由此分析可知，捕捉功率與工作距離兩者皆對光鐳夾效率之影響顯著。

綜觀之，影響本光纖式光鐳夾捕捉效率之因子包含工作傾角、工作距離、錐角、捕捉功率等項。經由有限之實驗數據及文獻比較可知，較小的工作傾角、較大的工作距離、較大的錐角、及較大的捕捉功率皆有助提升或優化光纖式光鐳夾之捕捉效率。值得注意的是，影響光纖式光鐳夾效能的每項因子都有合理的操作範圍，無法任意設定。以工作距離為例，最佳值應出現在光鐳夾之光纖微透鏡之焦距附近。在某種程度上，也不能完全排除各因子間的連動關係，如此方能客觀地解讀本研究結果。

表 5 近期相關研究結果之比較

| 文獻 | 樣本直徑 (μm) | 工作傾角 | 工作距離 (μm) | 已蝕刻區段之圓錐體錐角 | 捕捉功率 (mW) | 最佳捕捉效率 (%) |
|-------------|-----------|------|-----------|-------------|-----------|------------|
| 林泓樟 2017 | 14.0 | 40° | 9.0 | 103° | 6 | 5.5 |
| | 14.2 | | 9.3 | 105° | | 5.9 |
| | 14.3 | | 9.1 | 110° | | 7.1 |
| 陳韋達 2018 | 15 | | 17 | 110° | 6 | 8.23 |
| 本研究 | 14.2 | | 9.9 | 104° | 8 | 6.02 |
| | | | 9.8 | 110° | | 7.88 |

四、結論

本研究已使用濕式化學蝕刻法研製完成兩支圓錐狀光纖微透鏡，並依其錐角（104°與 110°）之不同，分別組裝完成 A、B 兩組光纖式光鐳夾系統。每組系統皆分別在工作傾角 40°、50°、60°時完成光捕捉實驗。由實驗結果顯示，當光鐳夾系統 A 之工作傾角、捕捉功率、工作距離分別為 40°、8 mW、9.9 μm 時，光鐳夾具有之最佳捕捉效率為 6.02 %；相同地，當光鐳夾系統 B 之工作傾角、捕捉功率、工作距離分別為 40°、8 mW、9.8 μm 時，光鐳夾亦具有最佳之捕捉效率，其值為 7.88 %。這代表兩系統之最佳工作傾角為 40°。再者，兩系統在相同工作傾角的條件下，系統 B 之捕捉效率皆優於系統 A；此代表最佳錐角為 110°。因此，工作傾角與錐角皆為影響本光纖式光鐳夾效能之重要因子。此外，本研究已完成與其它相關文獻之比較。以光纖式光鐳夾之工作傾角為 40°所得結果為主，經過分析與討論可知，若光纖式光鐳夾系統具備較大的工作距離與較大的捕捉功率，則其系統亦可得較高的捕捉效率。因此在本光纖式光鐳夾系統中，透過優化其錐角、工作傾角、工作距離、捕捉功率等因子，可以顯著提升系統之光捕捉能力，有利於生醫方面之應用。

參考文獻

(一) 中文部分

- 宋威億 (2016)。光纖微透鏡製作與光捕捉實驗。碩士論文。國立高雄市應用科技大學光電與通訊工程研究所，高雄市。
- 沈揚傑 (2016)。光捕捉微米級物體之捕捉效率與工作距離之研究。碩士論文。國立高雄市應用科技大學光電與通訊工程研究所，高雄市。
- 林泓樟 (2017)。使用雷射熔燒光纖微透鏡之光鑷夾生技應用。碩士論文。國立高雄市應用科技大學光電與通訊工程研究所，高雄市。
- 陳國良 (2009)。光纖光學鑷夾之研製。碩士論文。國立高雄市應用科技大學光電與通訊工程研究所，高雄市。
- 陳文堡 (2011)。光纖光學鑷夾應用於捕捉微粒與酵母菌之研究。碩士論文。國立高雄市應用科技大學光電與通訊工程研究所，高雄市。
- 陳柏融 (2013)。三維光纖光學捕捉系統之研製。碩士論文。國立高雄市應用科技大學光電與通訊工程研究所，高雄市。
- 陳韋達、侯孟良、劉世崑 (2018)。光鑷夾系統捕捉塑膠微粒。資訊管理暨電子商務經營管理研討會，臺東市。
- 許豐閔 (2014)。應用於光學捕捉系統之化學蝕刻光纖研究。碩士論文。國立高雄市應用科技大學光電與通訊工程研究所，高雄市。
- 黃文杰 (2012)。生醫適用光纖光學鑷夾之研製。碩士論文。國立高雄市應用科技大學光電與通訊工程研究所，高雄市。
- 劉世崑、黃文杰、陳柏融、陳文堡、陳國良 (2015)。光纖光學鑷夾之製作方法。中華民國發明專利第 I474061 號。
- 劉世崑、陳麗琴、蔡佳憬、謝文凱、許豐閔、沈揚傑、宋威億 (2017)。光捕捉癌細胞期別鑑定方法。中華民國發明專利第 I569016 號。
- 劉世崑、宋威億、林泓樟、蔡易成 (2018)。光鑷夾之光纖微透鏡構造及其製造方法。中華民國發明專利第 I611228 號。
- 蔡佳憬 (2014)。光纖式光鑷夾應用於人類膀胱癌細胞期別之鑑別。碩士論文，國立高雄市應用科技大學光電與通訊工程研究所，高雄市。
- 謝文凱 (2015)。光捕捉技術應用於人類大腸癌及膀胱癌之期別鑑定。碩士論文。國立高雄市應用科技大學光電與通訊工程研究所，高雄市。

(二) 外文部分

- Ashkin, A. (1970). *Acceleration and trapping of particles by radiation pressure*. *Physical Review Letters*, 24(4), 156-159.
- Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E., & Chu, S. (1986). *Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles*. *Optics Letter*, 11(5), 288-290.
- Ashkin, A., & Dziedzic, J. M. (1987). *Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria*. *Science*, 235(4795), 1517-1520.
- Ashkin, A. (1992). *Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime*. *Biophysical Journal*, 61(2), 569-582.
- Constable, A., Kim, J., Mervis J., Zarinetchi, F., & Prentiss, M. (1993). *Demonstration of a fiber-optical light-force trap*. *Optics Express*, 18(21), 1867-1869.
- Lyons, E. R., & Sonek, G. J. (1995). *Confinement and bistability in a tapered hemispherically lensed optical fiber trap*. *Applied Physics Letters*, 66, 1584-1586.
- Liu, S. K., Tsai, C. C., & Hsu, F. M. (2014). *Chemically etched optical fiber used for optical trapping*. *International Symposium on Next-Generation Electronics*, Taoyuan, Taiwan.
- Liu, S. K., Hsieh, W. K., Sung, W. Y., Shen, Y. J., Tsai, C. C., & Hsu, F. M. (2015). *Wavelength dependence of trapping efficiency in optical tweezers*. *International Symposium on Next-Generation Electronics*, Taipei, Taiwan.
- Liu, S. K., Shen, Y. J., Sung, W. Y., & Lin, H. Z. (2016). *Working distance dependence of trapping efficiency in fiber optical tweezers*. *International Symposium on Next-Generation Electronics*, Hsinchu, Taiwan.
- Liu, S. K., Hou, M. L., Chen, W. D., & Lin, H. Z. (2017). *Effect of Etched Length of the Fiber Microlens on Trapping Efficiency for Fiber Optical Tweezer*. *Electron Devices and Solid-State Circuits*, Hsinchu, Taiwan.
- Liu, Y., Cheng, D. K., Sonek, G. J., Berns, M. W., Chapman, C. F., & Tromberg, B. J. (1995). *Evidence for Localized Cell Heating Induced by Infrared Optical Tweezers*. *Biophysical Journal*, 68, 2137-2144.
- Taguchi, K., Ueno, H., Hiramatsu, T., & Ikeda, M. (1997). *Optical trapping of dielectric particle and biological cell using optical fibre*. *Electronics Letters*, 33(5), 413-414.