

光學鐳子實驗手冊

國立中正大學物理系

林俊元、蕭建隆、楊宗憲、黃健銘 編著

光學鑷子

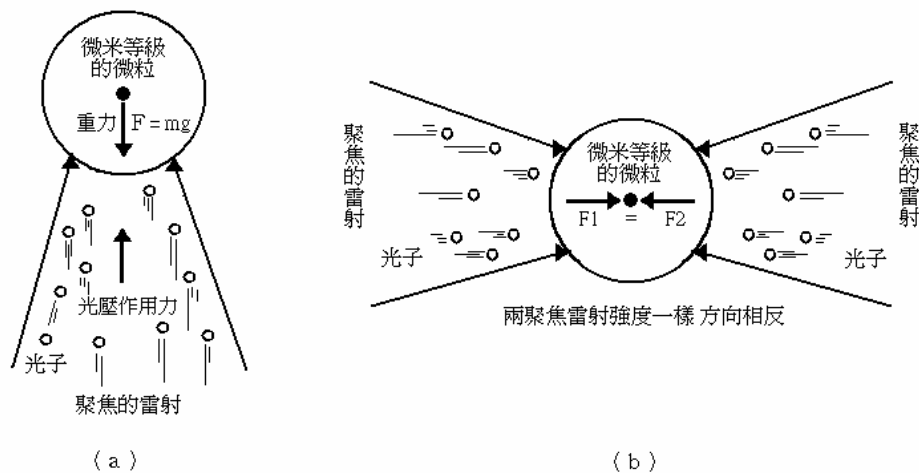
一、目的：

一微米有多小？大約為一根頭髮寬度的百分之一。如何移動微米等級的物體？假設我們直接使用物理接觸的方式去挪動這麼小的物體，任何輕微的外力都會造成微米等級物體的形變，易破壞物體原有的特性，所以「如何挪動並自由操控微米等級的物體」是一項值得開發與學習的技術。

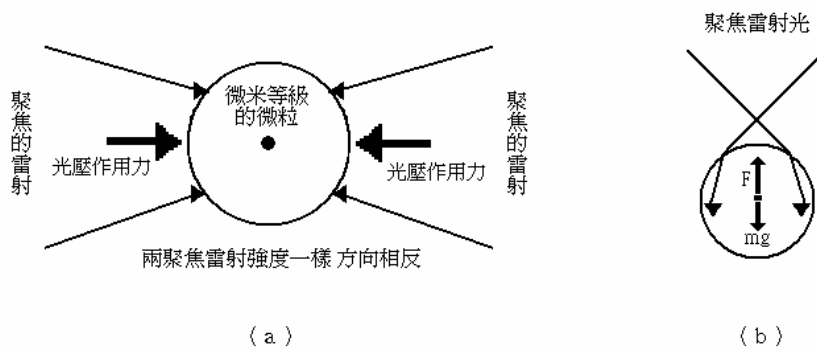
我們可以利用光的非機械接觸特質，在不破壞物體的前提，順利達到挪動微米等級物體的效果，即所謂光的鉗制力。光學鑷子又稱光鉗 (Optical Tweezers)，利用單光束雷射光聚焦和光子動量轉移所產生的反作用力，去操控微米等級物體，如：塑膠微粒、玻璃球、細胞、微生物等等。光學鑷子亦可運用在其他領域，科學家透過光學鑷子的技術，在不穿破細胞膜的前提下，自由操控活細胞，像是：染色體、遺傳基因 (DNA) 等等。如此說來，光學鑷子的技術可被廣泛應用於生物科技、物理、醫學等多方領域，無疑成為未來科技發展的推手。

二、原理：

自雷射光被人類發明以來，人類在光學領域上的發展不只向前邁進了一大步，高強度的雷射光使光與物質作用所產生的各種現象更為明顯。若是將一雷射由下而上入射，並使之聚焦，此時如果在聚焦點處放置一顆微米等級的微粒，此微粒將受到雷射光的光子不斷的撞擊，只要雷射的強度夠強，意即光子流的密度夠大，以及微粒的質量夠輕，那麼此微粒將因為光子對微粒的作用力與微粒所受的重力大小一樣，方向相反，則此微粒將會漂浮在空中。這個光子對微粒的作用力又被稱為「光壓」，如圖一(a)所示。



圖一、光壓對微粒作用示意圖



圖二、雙光束嵌住與單光束光鉗

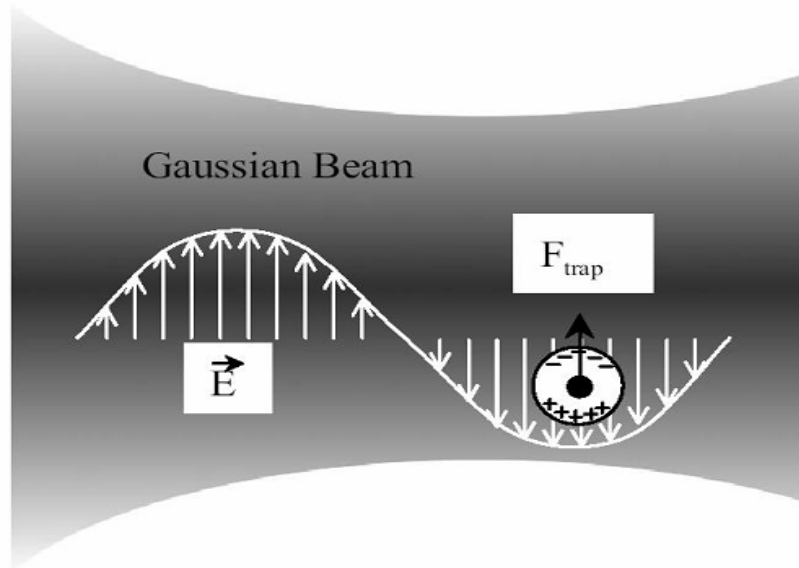
若藉著光壓的物理現象，巧妙的對一顆微粒的左右兩方，各打一道強度相同方向相反的雷射光束，那麼這顆微粒將被雷射光在空中夾住不動。這個巧思即為光鉗的雛型構想，我們簡單的以圖一(b)表示。

相對於雙光束光鉗，我們將介紹利用雷射光束與微粒的交互作用，而產生的鉗住現象，我們稱為單光束光鉗，為方便起見，我們將單光束光鉗簡稱為「光鉗」，其簡單的示意圖如圖二(b)所示。

在解說微粒如何與雷射光交互作用，進而被雷射光鉗住以前，我們必須先了解光鉗物理現象的物理模型，有了物理模型的概念後，我們可以更簡單的了解光鉗的作用機制。在光鉗的物理模型中，最重要的模型有兩個，分別為「EM 模型」及「RO 模型」。

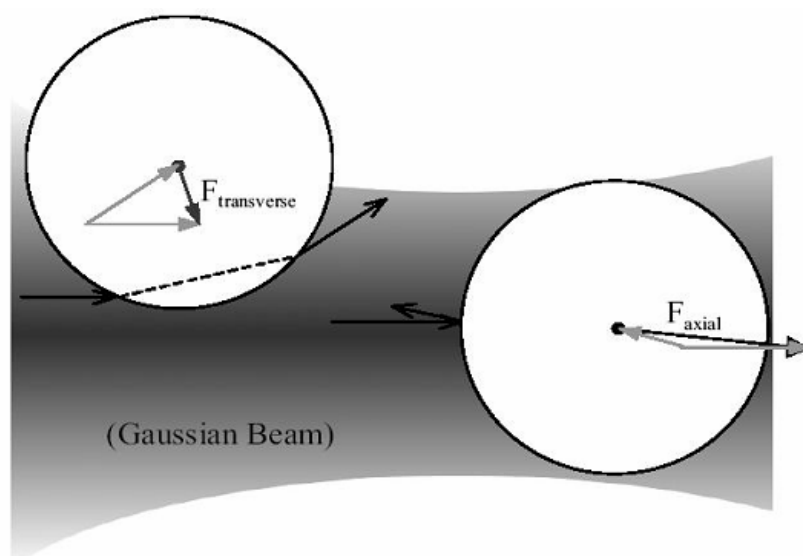
就 EM 模型來說，當雷射光束的光斑直徑比微粒直徑大時，可視為微粒在一非均勻電場中，而非均勻電場來自於雷射光束的強度分佈，一般來說雷射光束的強度呈高斯函數分佈，光束中心最強然後向外減弱，又因為光強與電場的物理關係為 I (光強) 正比於 E^2 (電場的平方)，因此光束中心的電場最強然後向外衰減，回到微粒的觀點，微粒在一均勻電場中會受到電場的分佈而產生極化現象，但若微粒是在一非均勻電場中，不只會產生極化，並且會因為本身的極化與電場分佈作用，而受到電場的電力作用，朝電場較強的方向移動，因此若微粒在雷射光束中，亦會朝電場較強處移動，意即微粒會朝光束中心移動如圖三所示，所以當雷射被聚焦時，其聚焦點強度在整個光束中是最強的，微粒就會朝焦點處移動，進而被鉗住。

就 RO 模型來說，當雷射光束光斑直徑與微粒直徑大小差不多甚至較小時，可視為微粒與雷射光的光子作用。當微粒在雷射光束範圍內時，光子會碰撞微粒，甚至穿透微粒。光子在穿透微粒時，因為微粒的介質折射率與空氣不同，所以會改變光子的運動方向，同時光子的動量也遭到改變。這表示光子受到微粒的

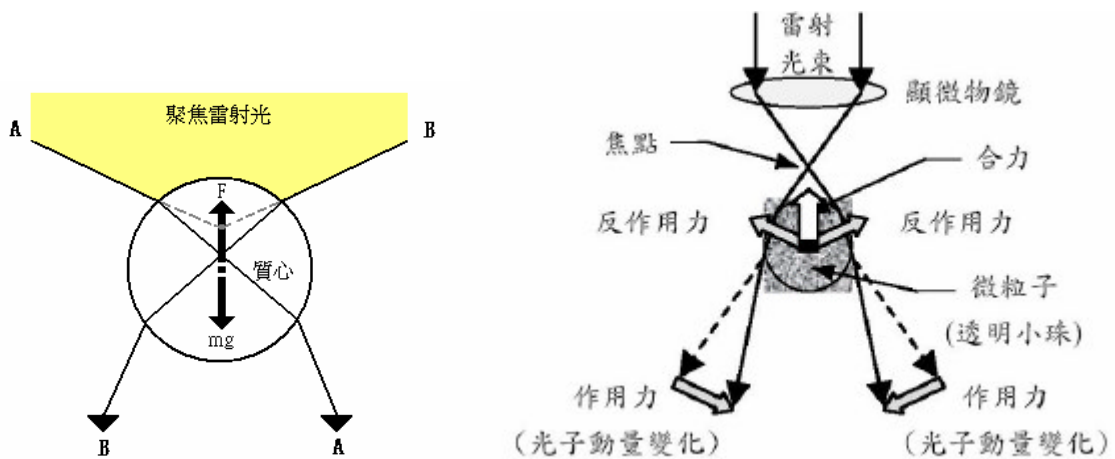


圖三、EM 模型示意圖

作用力，相對的光子也會產生一個反作用力作用在微粒上，如圖四所示，其微粒所受到的反作用力是朝向雷射光束中心的。因為越接近雷射光束中心光強越強，意即光子密度流較大，因此微粒越接近中心，受到雷射光光子的反作用力越大。當微粒接近光束中心時，會有光子與微粒做碰撞的作用，其施於微粒上的反作用力不只會將微粒拉向光束中心，亦會將微粒向前推如圖四所示，但是當雷射以適當的條件聚焦時，雷射聚焦點對微粒的吸引力與微粒的重力加上被光子碰撞向前的力互相抵消對抗，最後的淨力是將微粒吸引至聚焦點處，甚至將微粒鉗住。



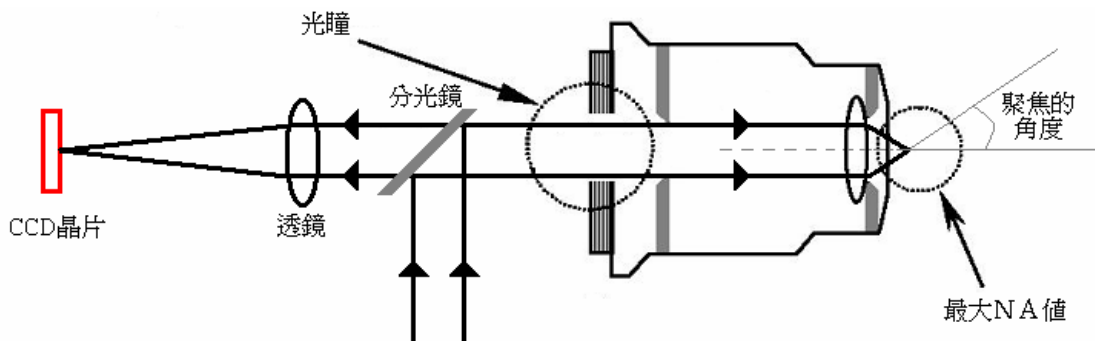
圖四、RO 模型示意圖



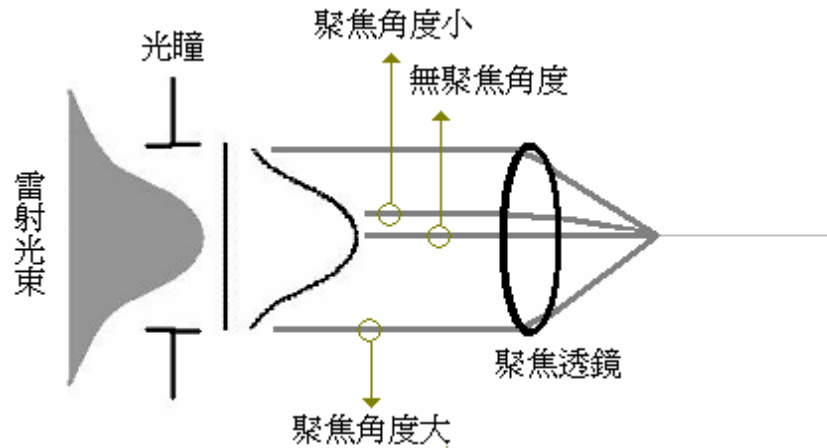
圖五、光學鑷子的工作機制。左圖與右圖分別顯示雷射光聚焦在微粒內與外物體受力之情形。

如圖五所示，將雷射聚焦在微粒中，當聚焦的光束光子進入微粒前跟進入微粒後，因經過不同折射率的介質所造成的折射，使光子的運動方向及動量有著很明顯的改變。這表示光子施予微粒一作用力。依牛頓第三運動定律，此時微粒對光子施與一大小相同方向相反之反作用力。此反作用力合力之方向將朝向雷射聚焦點處，亦即為 F_{trap} 。若 F_{trap} 與微粒受的重力 mg 產生淨力平衡，則可將微粒鉗住在空中。

接著，讓我們仔細了解前面所提到適當的聚焦條件，可以讓雷射光聚焦後鉗住微粒，這個聚焦條件就是要讓雷射光束以大角度聚焦，若聚焦的角度越大，光子動量的改變也就越大，則光鉗的鉗住微粒的力量也就越大。在顯微物鏡（以本實驗室用的 Oil Immersion Objective 作為講解範例）中與聚焦角度有關的參數叫做 NA 值 (numerical aperture)，如圖六所示，NA 值與透鏡的焦距成反比，因此物鏡最大的 NA 值等同於透鏡可達到的最小焦距點，意即光束在最短的光程內就



圖六、顯微物鏡光路解說



圖七、光束聚焦角度關係圖

被聚成一點，因此其聚焦的角度最大。聚焦角度達到最大則光子受微粒折射運動方向改變也就最大，依上面的討論，就會有最大的鉗住力。

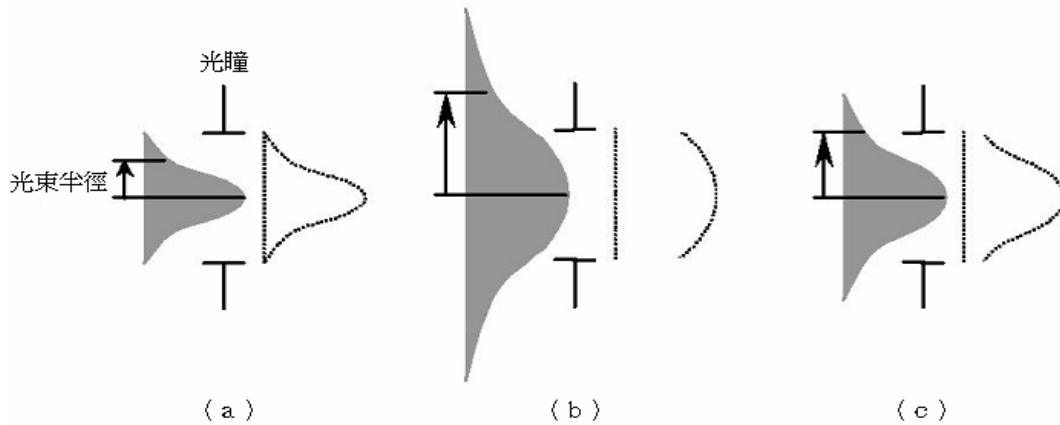
要有最大的鉗住力，就必須讓雷射光束大於等於光瞳使得物鏡的有效 NA 值達到最大。因為當有效 NA 值達到最大，則雷射光被物鏡聚焦所產生的聚焦角度也會達到最大，那麼在入射微小物體時，由於較大的偏折角造成光子在動量變化上也較大，因此也就產生較大的鉗住力。值得注意的是光束在經過透鏡聚焦時，光的聚焦角度隨著越接近光軸會越小，如圖八所示。若假設此時雷射光聚焦方向指向微粒小球質心，則光軸中心光束在入射微粒小球時將不會偏折，亦即無動量之變化。相反的，愈遠離光軸之光，因光偏折角較大，對鉗制力量有較大之貢獻。

就一般雷射而言，其光強多為高斯函數的分佈。所以擁有大聚焦角度的光束其強度決定於入射的雷射光半徑與光瞳半徑大小的比較。在此本手冊定義從光束中心向外至光強衰減為中心光強之 e^{-2} 倍的強度處為光束半徑。以下我們固定雷射尖峰強度，比較光束半徑與光瞳半徑間的關係，如圖八所示。

如圖八(a)：光束半徑較入射光瞳半徑小，此時有效 NA 值將減小，且擁有大聚焦角度的光其光強較低。

如圖八(b)：光束半徑遠大於入射光瞳半徑，此時聚焦之雷射接近均勻分佈，可以獲得最大有效的 NA 值，且擁有大聚焦角度的光其光強較強，但是在光瞳以外的雷射光能量都損失掉了，進而造成雷射能量上不必要的浪費。

如圖八(c)：光束半徑與入射光瞳半徑相等，如此可以獲得最大有效的 NA 值，且擁有大聚焦角度的光其光強較適當，雷射能量獲得較有效之運用。



圖八、不同直徑光束通過顯微物鏡光瞳的情形

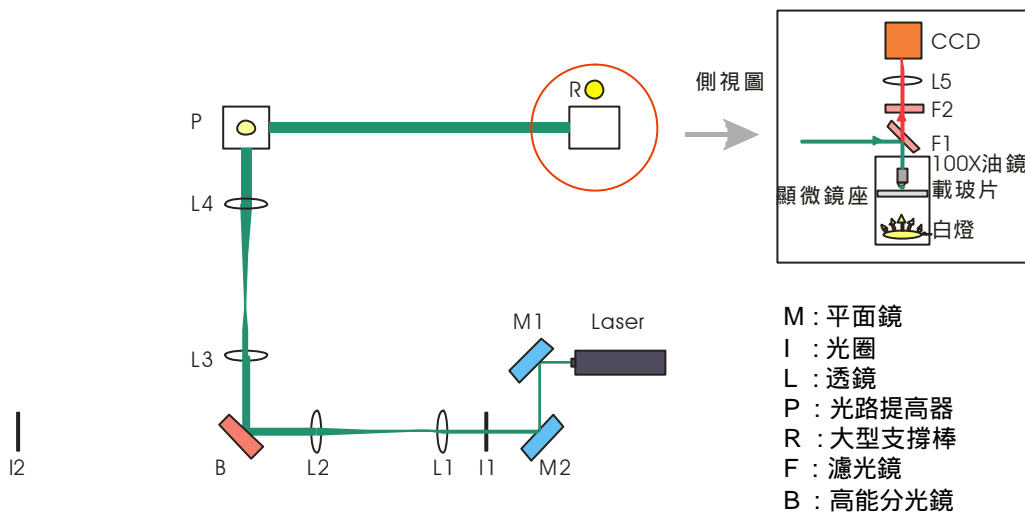
綜合以上光學鐳子物理的原理解說，我們可知道不論 EM 與 RO 模型均告訴我們：微粒會往雷射聚焦點，亦即雷射光強度最強之處移動，因而受到鉗制。巧妙的運用雷射光並結合高倍率的顯微物鏡，即可使我們達成以光自由操縱微小粒子之目的。

三、儀器：

1. 二倍頻固態綠光雷射 (wavelength = 532 nm, power = 25 mW) ×1
2. 雷射電源供應器 ×1
3. 雷射管固定架 ×1
4. 支持桿及桿架 ($\phi = 12$ mm, height = 100 mm) ×15
5. 萬向支持桿 ×1
6. 光圈 ($\phi = 44$ mm, aperture = 0.8 - 18 mm) ×4
 光圈 ($\phi = 65$ mm, aperture = 1.0 - 34 mm) ×2
7. 精密平移台 (Travel Range = 25 mm, resolution = 0.01 mm) ×2
8. 垂直架 (Height = 30 cm) ×1
9. 大型支撐棒 ($\phi = 1.5$ " , Height = 14") ×2
10. 鍍銀反射鏡 ($\phi = 1$ " , $R > 98\%$ for 450 nm ~ 12 μm , flatness = $\lambda/10$) ×4
11. 透鏡 L1, L5 (achromatic, MgF_2 AR coating, $\phi = 25$ mm, $f = 50$ mm) ×2
 L2 (achromatic, MgF_2 AR coating, $\phi = 25$ mm, $f = 200$ mm) ×1
 L3 (high Performance, $\phi = 25$ mm, $f = 100$ mm) ×1
 L4 (DCX , $\phi = 25$ mm, $f = 200$ mm, uncoated) ×1
12. 濾光鏡 (45° dichroic green reflective filter, $\phi = 25$ mm) ×1
 (0° dichroic magenta subtractive filter, $\phi = 25$ mm) ×1
13. 生物顯微鏡座 ×1

- 14. 顯微物鏡 (100X, NA = 1.25, oil immersion infinity corrected objective)
×1
- 15. 塑膠微粒 (Bead Diameter = 3 μm、 11 μm、 100 μm , 5 % inaccuracy)×1
- 16. CCD 攝影機 (GCC-100, chip size = 537 x 505 pixels, pixel size = 9.6 x 7.5 μm²)×1
- 17. 螢幕 ×1
- 18. 電腦及影像擷取卡 (Upmost 301BT)×1
- 19. 去離子水

四、實驗步驟：



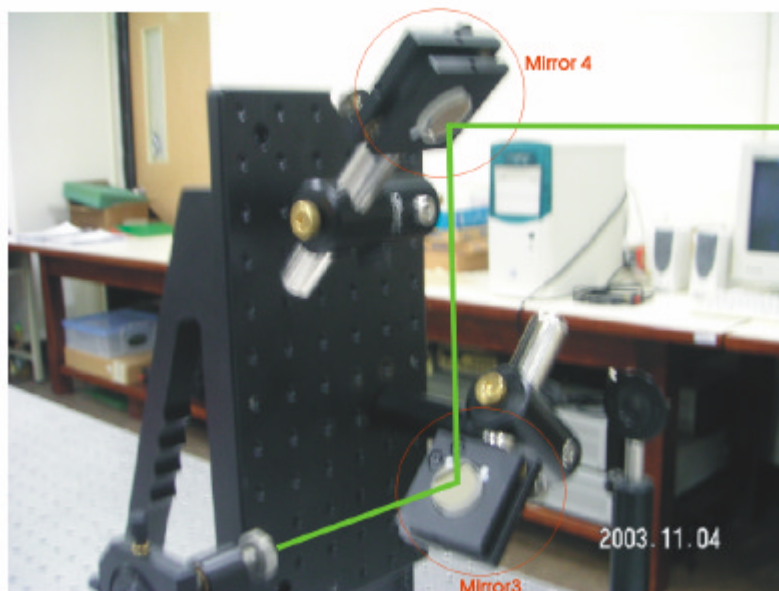
圖九、儀器架設俯視圖

1. 將二倍頻固態雷射 (λ=532 nm) 架設穩固且使其前後水平能讓雷射光大約呈水平輸出。打開電源，在熱機三分鐘後開啟 (turn key) 雷射。
2. 在適當位置架設適當高度的兩個一吋平面鏡 (M1、 M2) 及兩個相同高度的光圈 (I 1、 I 2)，如圖九所示。先將兩面平面鏡大約放置至正確位置使雷射光能大約都通過兩個光圈並且使雷射光皆打在鏡面的中心，再微調兩面平面鏡使雷射光精確的通過兩個光圈，此時雷射光為平行桌面的平行光。架設時，雷射光入射平面鏡的入射角最好是符和平面鏡所設計呈最高反射率之入射角 (在本實驗為 45 度)。詳細資料可以參考基礎光學實驗中實驗二的講義。
3. 架設第一面透鏡 L1 (消像差透鏡，焦距為 50 mm) 使雷射光打在透鏡中心。為了確定雷射光是垂直入射透鏡，必須微調鏡面使反射透鏡的散射光幾乎沿入射光路線回到二倍頻固態雷射，同時檢查透射之雷射光中心是否仍在光軸上。
4. 架設第二面透鏡 L2 (消像差透鏡，焦距為 200 mm) 使雷射光打在透鏡中心

且微調鏡面使雷射光垂直入射透鏡。架設此透鏡時需架設在精密平移台上。微調精密平移台使透鏡前後移動，讓雷射光經過此透鏡後在透鏡後近處和遠處的光點大小一樣大亦即為平行光，即完成了第一組擴束。此時雷射光之光束直徑（full width half maximum, FWHM）約為 3 mm。雷射光擴束之詳細資料可以參考基礎光學實驗中實驗五的講義。

5. 為了節省光學桌空間，以一面平面鏡將光路反射到垂直方向（仍然為平行光，和桌面高度仍不變）。目前此處使用的是一個穿透率 5% 反射率 95% 之分光鏡。目的是利用穿透的雷射光進行差動共焦顯微術實驗。
6. 以步驟 3 相同方法架設第三面透鏡 L3（焦距 100 mm）及和步驟 4 相同方法架設第四面透鏡 L4（焦距 200 mm）。即完成了第二組擴束。此時雷射光之直徑（FWHM）為 6 mm。
7. 以兩個一吋平面鏡（M3、M4）及一個垂直架組成一個光路提高器（如圖十）。先使第一面平面鏡（M3）架設在雷射光能打在其中心點的位置，再轉動此平面鏡之平面使雷射光能垂直桌面向上行進。接者把第二面平面鏡（M4）架設在適當高度且雷射光能打在其鏡心的位置，再轉動此平面鏡（M4）之鏡面使反射後的雷射光大約平行桌面。微調此光路提高器的第一面平面鏡（M3）及第二面平面鏡（M4）使由第二面平面鏡（M4）反射出去的雷射光能平行光學桌面。

註：在此光路的安排下，雷射光的偏極方向因此被旋轉 90 度，如基礎實驗三中之要求。架設圖如圖十所示。



圖十、光路提高器

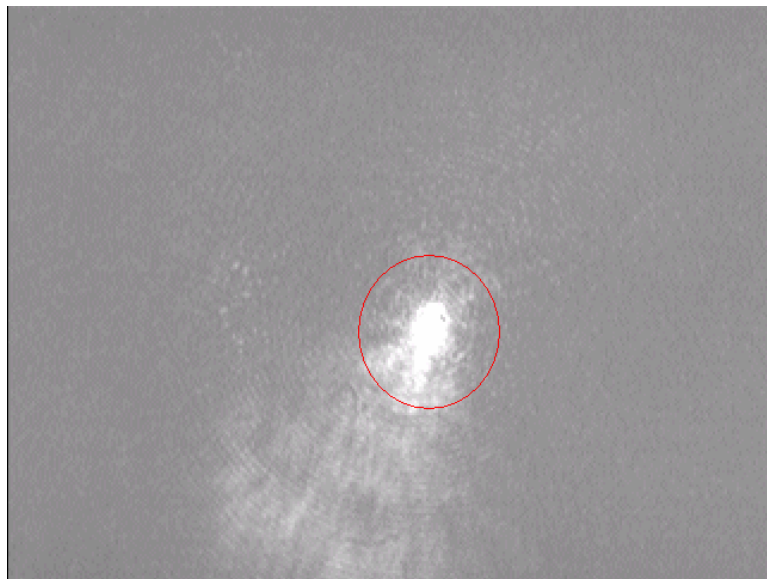
8. 在大型支撐棒 (R) 上架設 45 度 reflective dichroic green filter (F1)，微調 F1 使雷射光能 45 度入射且反射 45 度角向下(垂直光學桌)此濾片可使綠色光反射但其他可見光穿透。因此可用來反射實驗用之雷射光，但可使顯微鏡下發出之白光中(綠光除外)其餘色光通過濾光片而在 CCD 上成像。
9. 為了再濾掉經由載玻片上反射且穿透 F1 的雷射光，我們可以在 F1 上方再加一個 subtractive dichroic magenta filter (F2)，將雷射光對影像的干擾減至最小。
10. 接著在 F2 上方架設一個透鏡 L5 (消像差透鏡 焦距為 50 mm)，在透鏡 L5 上方焦距處 (50 mm) 架設一個攝影機 (CCD)。以 BNC 線連接 CCD 到螢幕及電腦，即可由螢幕觀察及電腦擷取影像。
11. 設定 CCD 之正確成像位置：
以一屏幕擋住雷射光，在顯微鏡座的物件台不放載玻片之下，開啟顯微鏡座下方的白燈，轉動物鏡旋轉台使 100X 油鏡在光軸上。先調整 CCD 的水平位置，使白燈向上光線在 CCD 晶片的中心。再將校正用載玻片放在物件台上。調整物件台前後左右使校正用載玻片之十字對準螢幕中向上光線成像之中心。(若白燈向上的成像遠大於 CCD 的晶片則可不用 CCD 觀察。把 CCD 取下，直接在天花板上觀察，也是要使十字對準向上光線成像的中心)。調整 CCD 的高度，使十字清楚的成像在 CCD 上。接著先轉動物鏡旋轉台使 100X 油鏡不在光軸上且使光軸上沒有任何物鏡。再將屏幕拿開讓雷射光打入，微調 M5 及 F1 使雷射光在校正用在玻片十字的中心，同時檢查經載玻片反射之雷射光是否延原路返回，如此即可確認雷射光垂直入射在載玻片上。
12. 將校正用之載玻片取下，在擦拭乾淨的載玻片上滴上一小滴裝有 3 μm 微粒小珠 (bead) 的去離子水。將蓋玻片以 45 度輕輕蓋在載波片上，以免產生氣泡。在蓋玻片上滴上一小滴淨油，將此載玻片放置至物件台上。
13. 慢慢的上升物件台使 100X 物鏡輕輕的碰到淨油，再將物件台下降至 100X 油鏡焦點處 (大約 2 mm)。
14. 微調物件台確認雷射的聚焦點及 bead 的影象是最清晰的。即雷射聚焦點和 bead 皆在聚焦平面上。
15. 微調 F1 使雷射靠近 bead，由螢幕可以明顯地觀察到雷射光經 100X 油鏡聚焦後有鉗住 bead 的力。
16. 使用程式 UPMOST 301BT 的指令 capture 擷取動態影像及用指令 snapshot 擷取單張影像。至此你已可使用光學鑷子自由的操控微粒小珠。
17. 更換不同尺寸的 bead，試著量測鉗制各種尺寸微粒所需要之最小雷射功率。



圖十一、光學鑷子實驗之實體儀器架設圖

五、預期實驗結果：

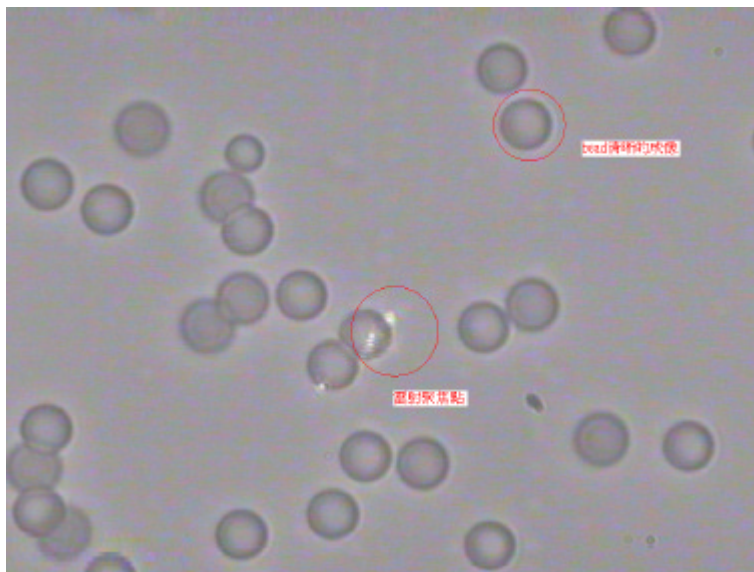
1. 在只架設一個 filter F1 時由螢幕可以觀察雷射聚焦的情形，其圖形如下：



2. 在 F1 上方架設 filter F2 時由螢幕觀察到雷射的強度明顯變弱，衰減至較適當之強度，其圖形如下：



3. 由螢幕觀察放入之 bead，微調物件台使螢幕觀察到的 bead 最清楚，即 bead 在聚焦平面上，其圖形如下：



4. 微調物件台使 bead 接近雷射聚焦點處(或可微調 F1 鏡架), 可以由螢幕觀察到 bead 被雷射鉗住的現象, 其現象如下:



5. 調整 filter F1 使六個 bead 排在一起的圖形如下:



六、預期學習成果

在完成本實驗後，你將學習到：

1. 光學鑷子的基本原理
2. 如何使用簡單光學技巧(光軸設定、平行光、擴束... 等)與光學元件架設一套光學系統
3. 高倍率顯微物鏡的使用與顯微鏡的工作原理
4. 如何利用光學鑷子操縱微小粒子

參考資料：

1. A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, and S. Chu, “ Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles ” *Opt. Lett.* **11**, 288 (1986).
2. 吳崇安、黃鈞正、邱爾德 「光學鉗住之理論探討」, 物理雙月刊 22 卷 494 頁 (2000)
3. 吳崇安、黃鈞正、邱爾德 「光學鉗住之技術簡介」, 物理雙月刊 22 卷 477 頁 (2000)