



國立中山大學 機械與機電工程研究所

碩士論文

以靜電力拉伸 SU-8 光阻製作非球面光纖透鏡

及其特性之量測

Manufacture and Performance Evaluation of SU-8-based

Non-spherical Lensed Fibers Fabricated Using

Electrostatic Pulling Method

研究生：吳俊慶 撰

指導教授：林哲信 博士

中華民國 九十七年 七月

國立中山大學研究生學位論文審定書

本校機械與機電工程學系碩士班

研究生吳俊慶（學號：M953020077）所提論文

以靜電力拉伸SU-8光阻製作非球面光纖透鏡及其特性之量測
Manufacture and Performance Evaluation of SU-8-based Non-spherical Lensed Fibers Fabricated Using Electrostatic Pulling Method

經本委員會審查並舉行口試，符合碩士學位論文標準。

學位考試委員簽章：

林柏信

李廷言

楊浩榮

曾添如

傅慧明

指導教授(可免)

林柏信

系主任/所長(可免)

邱添成

致謝

兩年的研究生生涯轉眼即過，首先誠摯的感謝我的指導教授 林哲信老師，在學生的求學期間，不厭其煩地細心指導，以及研究上嚴謹的態度，使我的生活相當充實且豐富。然而老師在為人處事上的基本禮節以及態度也相當要求，且再三叮嚀，使我不僅在學識上收穫良多，在生活態度上也有更深一層的體悟。而實驗室也提供了相當豐富的資源，讓我在研究上能更加順遂。也感謝生醫機電研究室的所有成員，兩年來的陪伴與幫忙，特別是學長們經驗的分享、以及研究上的批評與指教，使我能更快地進入狀況。在我失意氣餒的時候，感謝同窗好友逸杰及靖惠的相互勉勵，使我能更堅定的向前邁進。在此特別感謝本系控制組子瑜及宏益學長、以及光電所 鄭木海教授實驗室的學長們，在實驗及量測上的協助，沒有你們，本論文可能無法順利完成。亦感謝本系 曾逸敦教授、臺師大 楊啟榮教授、屏科大 傅龍明教授、及大葉大學 李佳言教授，在百忙之中抽空參加學生的口試，提供寶貴的意見，使學生的論文內容能更加完善。感謝家人及好友的鼓勵，你們才是支持我最大的原動力。感謝中山大學提供如此優美的學習環境，碩士班生涯，將是我人生中難忘的一個片段。

俊慶 于高雄西子灣

July, 2008

目錄

| | |
|-------------------------|------|
| 目錄..... | I |
| 圖目錄..... | IV |
| 表目錄..... | VII |
| 簡寫表..... | VIII |
| 符號表..... | X |
| 摘要..... | XI |
| Abstract..... | XIII |
| 第一章 緒論..... | 1 |
| 1.1 前言..... | 1 |
| 1.2 光纖的分類..... | 4 |
| 1.2.1 依材料區分..... | 4 |
| 1.2.2 依模態區分..... | 5 |
| 1.3 光纖透鏡結構..... | 8 |
| 1.4 文獻回顧..... | 9 |
| 1.4.1 透鏡組裝式之光纖耦合技術..... | 10 |
| 1.4.2 光纖透鏡式之光纖耦合技術..... | 11 |
| 1.5 研究動機與目的..... | 19 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 1.6 論文架構..... | 20 |
| 第二章 理論分析 | 22 |
| 2.1 光纖通信用光源簡介..... | 22 |
| 2.2 模態匹配與耦合理論..... | 23 |
| 2.2.1 高斯光束(Gaussian beam)..... | 23 |
| 2.2.2 模態匹配(Mode matching)..... | 24 |
| 2.2.3 耦合效率分析..... | 26 |
| 2.3 庫侖定律與靜電力 | 29 |
| 2.3.1 庫侖定律與電場強度 | 29 |
| 2.3.2 靜電力拉伸理論..... | 31 |
| 2.3.3 實驗操作概念..... | 33 |
| 第三章 光纖微透鏡之製作及其特性量測 | 35 |
| 3.1 SU-8 光阻簡介..... | 35 |
| 3.2 光纖透鏡製程..... | 37 |
| 3.4 光學性質之量測..... | 44 |
| 3.4.1 光纖聚焦之量測架構 | 44 |
| 3.4.2 光束路徑傳播之量測架構 | 45 |
| 3.4.3 光束路徑傳播之模擬方法 | 46 |

| | |
|--------------------------|----|
| 3.4.4 耦合效率之量測架構 | 47 |
| 第四章 結果與討論 | 49 |
| 4.1 SEM 探討 | 49 |
| 4.2 透鏡曲率與電場關係 | 50 |
| 4.3 光纖聚焦之量測結果 | 53 |
| 4.4 光束路徑傳播之量測與模擬結果 | 55 |
| 4.5 耦合效率之量測結果 | 56 |
| 第五章 結論與未來展望 | 61 |
| 5.1 結論 | 61 |
| 5.2 未來展望 | 62 |
| 參考文獻 | 63 |
| 自述 | 67 |

圖目錄

| | |
|----------------------------------|----|
| 圖 1.1 司乃耳定律示意圖 | 2 |
| 圖 1.2 光之全反射示意圖 | 3 |
| 圖 1.3 光纖的受光角示意圖 | 4 |
| 圖 1.4 多模級射率光纖之導光行為示意圖 | 5 |
| 圖 1.5 多模漸變折射率光纖之折射率分佈示意圖 | 6 |
| 圖 1.6 多模漸變折射率光纖之導光行為示意圖 | 7 |
| 圖 1.7 單模光纖之導光行為示意圖 | 7 |
| 圖 1.8 以微影技術製作光纖透鏡示意圖 | 9 |
| 圖 1.9 外加球面透鏡之耦光系統示意圖 | 10 |
| 圖 1.10 以多種透鏡組合之耦光系統示意圖 | 11 |
| 圖 1.11 以電弧熔融法製作之光纖透鏡示意圖 | 11 |
| 圖 1.12 以兩段式光纖接合法製作光纖透鏡示意圖 | 12 |
| 圖 1.13 以三段式光纖接合法製作光纖透鏡示意圖 | 13 |
| 圖 1.14 光纖接合及研磨法製作楔型光纖透鏡示意圖 | 14 |
| 圖 1.15 以研磨法製作之錐式楔型光纖透鏡 | 14 |
| 圖 1.16 以蝕刻法製作之光纖透鏡 | 15 |
| 圖 1.17 以蝕刻及熔融法製作之光纖透鏡 | 16 |
| 圖 1.18 以雷射加工法製作雙曲面光纖透鏡示意圖 | 17 |

| | |
|---|----|
| 圖 1.19 以熱壓法製作雙曲面光纖透鏡示意圖 | 18 |
| 圖 1.20 以點膠法製作光纖透鏡示意圖 | 18 |
| 圖 2.1 Fabry-Perot 雷射光場示意圖 | 22 |
| 圖 2.2 高斯光束示意圖 | 24 |
| 圖 2.3 分析雷射與光纖之模態匹配示意圖 | 25 |
| 圖 2.4 分析雷射與光纖透鏡之耦合行為示意圖 | 27 |
| 圖 2.5 以兩個高斯光束分析雷射與平端光纖之耦合行為示意圖 | 29 |
| 圖 2.6 均勻電場對電荷做功示意圖 | 31 |
| 圖 2.7 以靜電力拉伸產生之泰勒錐 | 32 |
| 圖 2.8 電場強度過高產生之電紡織現象 | 33 |
| 圖 2.9 以靜電力拉伸 SU-8 光阻之實驗操作概念 | 34 |
| 圖 3.1 厚度為 50 μm 之 SU-8-50 光阻在可見光至近紅外線波段的光 穿透率 | 37 |
| 圖 3.2 光纖微透鏡製程示意圖 | 40 |
| 圖 3.3 光纖點膠體積計算示意圖 | 43 |
| 圖 3.4 光纖聚焦量測架構示意圖 | 45 |
| 圖 3.5 光纖耦光量測對位系統架設 | 48 |
| 圖 3.6 光纖與雷射晶片相對位置之放大圖 | 48 |

| | |
|---|----|
| 圖 4.1 (A)為未經靜電力拉伸之球面光纖透鏡($R=260\ \mu\text{m}$)，(B)為經靜電力拉伸之非球面光纖透鏡($R=90\ \mu\text{m}$)..... | 49 |
| 圖 4.2 光纖微透鏡曲率半徑計算示意圖 | 50 |
| 圖 4.3 塑膠光纖透鏡之電場強度與曲率半徑關係 | 52 |
| 圖 4.4 玻璃光纖透鏡之電場強度與曲率半徑關係 | 53 |
| 圖 4.5 平端光纖、球面光纖透鏡、非球面光纖透鏡之聚焦量測結果 | 54 |
| 圖 4.6 正規化後之光纖聚焦強度分析 | 54 |
| 圖 4.7 塑膠及玻璃光纖透鏡之光束路徑傳播與模擬 | 56 |
| 圖 4.8 塑膠光纖透鏡之耦合效率與曲率半徑關係 | 58 |
| 圖 4.9 塑膠光纖透鏡之耦合效率與距離關係 | 58 |
| 圖 4.10 玻璃光纖透鏡之耦合效率與曲率半徑關係 | 60 |
| 圖 4.11 玻璃光纖透鏡之耦合效率與距離關係 | 60 |

表目錄

| | |
|--|----|
| 表 2- 1 Fabry-Perot 雷射與光纖內部光場模態之比較..... | 24 |
|--|----|

簡寫表

BHF : Buffered hydrofluoric acid ; 緩衝氫氟酸

CAD : Computer-aided design ; 電腦輔助設計

CCD : Charge coupled device ; 電荷耦合元件影像感測器

CE : Coupling efficiency ; 耦合效率

GIF : Graded-index fiber ; 漸變折射率光纖

GOF : Glass optical fiber ; 玻璃光纖

LD : Laser diode ; 雷射二極體

LED : Light emission diode ; 發光二極體

M : Molarity ; 莫耳濃度

NA : Numerical aperture ; 數值孔徑

NIR : Near infrared ; 近紅外線

O.D. : Out-diameter ; 外徑

PEB : Post exposure bake ; 曝光後烘烤

PMMA : Polymethyl methacrylate ; 聚甲基丙烯酸甲脂

POF : Plastic optical fiber ; 塑膠光纖

SEM : Scanning electron microscope ; 掃描式電子顯微鏡

SIF : Step-index fiber ; 級射率光纖

SMF : Single mode fiber ; 單模光纖

UV : Ultraviolet ; 紫外的

VIS : Visible light ; 可見光

c.c. : Cubic centimeter ; 立方毫升

cm : Centimeter ; 公分

m : Meter ; 公尺

mA : Milliampere ; 毫安培

mW : Milliwatt ; 毫瓦特

nm : Nanometer ; 奈米

rpm : Revolutions per minute ; 每分鐘轉速

μm : Micrometer ; 微米

符號表

C：庫侖

D：距離

E：電場強度

F：靜電力

R：曲率半徑

P_F ：雷射光耦合入光纖後之光功率

P_S ：雷射晶片輸出之光功率

T_g ：Glass transition temperature；玻璃轉換溫度

V：電壓

η ：耦合效率

$^{\circ}\text{C}$ ：溫度

%：百分比

Δ ：折射率差比

ϕ_c ：臨界角

θ_1 ：入射角

θ'_1 ：反射角

θ_2 ：折射角

$\theta_{0,\max}$ ：光纖最大受光角

摘要

在傳統的光纖耦合技術上，光纖耦合器有著體積龐大、組裝不易等問題，而部分的光纖透鏡製造技術，雖然可以有效地降低光學系統的複雜性，並提高光纖與光源間的耦合效率，但也面臨無法量產、設備昂貴、製作耗時等缺點。有鑑於此，本研究提出一套低成本、可大量生產的光纖透鏡製程，其利用 SU-8 光阻為透鏡材料，藉由表面張力在漸變折射率的塑膠光纖(外徑=500 μm)及單模玻璃光纖上(外徑=125 μm)，形成一個半球狀的微透鏡結構。再將此半球狀微透鏡的溫度維持在 SU-8 的玻璃轉換溫度(T_g)以上，在均勻電場的作用下，透過靜電力的拉伸而形成非球面狀的微透鏡。微透鏡的曲率半徑可在靜電力拉伸的過程中，透過施加不同電場強度予以控制。本研究並量測 SU-8 光阻的光譜特性，以驗證 SU-8 材料適合光學透鏡製作。量測結果顯示，SU-8 在可見光至近紅外光波段(380 nm 至 1600 nm)的光穿透特性極佳。此外，SEM 顯示成型後之微透鏡具有良好的表面平滑度，其有利於光纖光學性能的提升。本研究亦透過光學軟體 ZEMAX[®]，來模擬光纖透鏡之光束傳播路徑，模擬結果顯示與利用雷射光在螢光染劑中所激發之實驗光束路徑一致。

為評估所製作之光纖透鏡效能，本研究以波長為 1310 nm 的 Fabry-Perot 雷射晶片，與光纖透鏡進行耦光。量測結果顯示，塑膠光

纖透鏡的耦合效率，在工作距離為 $90\ \mu\text{m}$ 時，有效地提高至 78% ($R=48\ \mu\text{m}$)，相較於平端光纖高出近 2 倍。玻璃光纖透鏡的耦合效率在工作距離為 $24\ \mu\text{m}$ 時，提高至 72% ($R=23\ \mu\text{m}$)，相較於平端光纖高出 2.3 倍。本研究提出以靜電力拉伸製作光纖透鏡的技術，不僅改善了部分光纖耦合技術的製程複雜、無法量產等缺點，並能有效地降低成本，且達到提升光纖耦合效率的目的，相當具商業化的潛力。

關鍵字：SU-8、靜電力、電場、光纖透鏡、耦合效率。

Abstract

This paper proposed a low-cost and high-throughput method to fabricate lensed optical fibers. SU-8 Photoresist is used as the material for fabricating the proposed lens structure and is directly applied on two kinds of optical fiber tip, single mode glass fibers (O.D.=125 μm) and plastic graded-index plastic fiber (O.D.=500 μm), utilizing surface tension force to form a hemi-circular shape lens structure. The hemi-circular shape SU-8 lens is then electrostatically pulled to form non-spherical shape in an uniform electric field at a temperature higher than the glass temperature (T_g) of SU-8. Microlens with various radius of curvature can be easily produced by tuning the applied electric fields during the electrostatic pulling process. In addition, this study also measures the UV-Vis-NIR spectrum SU-8 photoresist to confirm the optical property of SU-8. Results indicate the SU-8 has high optical transmittance from the wavelength range of 380-1600 nm. SEM observation also indicates the fabricated SU-8 microlens has excellent surface smoothness which is essential for optical applications. A commercial optical simulation software of ZEMAX[®] is used to predict the light path of the fabricated lensed fiber. The numerical results show good agreement with the experimental test obtained by projecting laser light into a diluted fluorescence solution.

Furthermore, a Fabry-Perot laser chip with the wavelength of 1310 nm is used for light coupling test for the fabricated lensed fibers. Results show the coupling efficiency is up to 78% at working distance of 90 μm while using the plastic lensed fiber ($R = 48 \mu\text{m}$), which is around 2 fold

higher than that of a flat-end fiber. The coupling efficiency of glass lensed fiber ($R = 23 \mu\text{m}$) is up to 72% at working distance of $24 \mu\text{m}$, which is around 2.3 fold higher than that of a flat-end fiber. The proposed method is feasible of producing high-quality lensed optical fiber in a high throughput and low-cost way. The method proposed in the current study may give substantial impacts on fabricating lensed fiber in the future.

Keywords : SU-8, electrostatic force, electric field, lensed fiber, coupling efficiency.

第一章 緒論

1.1 前言

有鑑於近年來光電產業的蓬勃發展，網路通訊技術不斷地創新與進步，而資料的傳輸流量也與日俱增，人們對高速網路頻寬及快速傳輸的需求也越來越大。光纖網路有著快速傳輸資訊及傳輸距離長等優點，所以光纖通訊成為許多學者致力投入的研究之一。光纖是目前最佳的光波導元件，用以傳輸圖片、聲音、影像等資料，由於光纖通訊具有高品質、高容量及傳輸速率快等優點，目前已逐漸取代傳統通訊電纜的傳輸方式，廣泛的運用在日常生活當中。在目前光纖傳輸的應用上，長距離的傳輸一般是使用單模的玻璃光纖，因玻璃光纖具有高頻寬及低傳輸損失的特性，而塑膠光纖雖然單位長度的傳輸損失較大，但卻有著較能承受彎曲及價格低廉等優點，目前也廣泛被應用於較短距離的傳輸。

當光束傳播時，若經過兩個不同介質的介面，會將原來的光束分成兩束光線，其一為反射光(Reflected ray)，此光線仍然反射回介質 1；另一束光線為折射光(Refracted ray)進入介質 2。其中，介質 1 之折射率為 n_1 ，介質 2 之折射率為 n_2 ，且經實驗發現，入射角 θ_1 等於反射角 θ_1' ，而入射角與折射角的關係滿足下列方程式[1, 2]：

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-1)$$

此式稱為司乃耳定律(Snell's law)。如圖 1.1 所示，入射光、反射光、折射光及法線都在同一平面上，其中 $n_1 > n_2$ 時，則 $\theta_2 > \theta_1$ ，光由密介質射向疏介質，光則向介面偏折；反之，當 $n_2 > n_1$ 時，則 $\theta_1 > \theta_2$ ，光由疏介質射向密介質，光則向法線偏折。

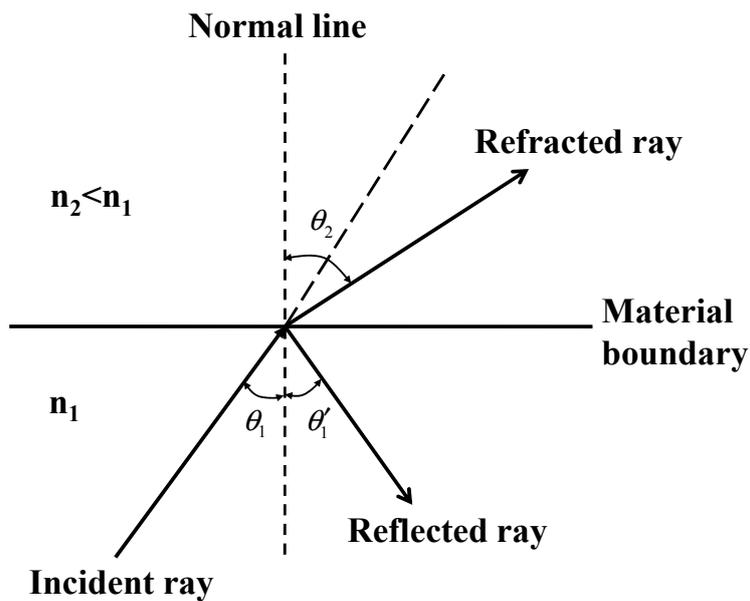


圖 1.1 司乃耳定律示意圖

由司乃耳定律知：光線由折射率高之介質射入折射率低之介質時，折射角會隨著入射角的漸增而依比例增加，如圖 1.2 之 b、c、d 所示，直到入射角等於 ϕ_c 時，折射角為 90° ，此時沒有光線射入介質 2， ϕ_c 稱為臨界角，折射光沿介面行進，如光線 e 所示。當入射角大於 ϕ_c 時，光不能穿透介面，而在介面發生全反射(Total internal reflection)，如光線 f、g 所示。在 1-1 式中，當 $\theta_2 = 90^\circ$ 時， $\theta_1 = \phi_c$ ，因此可得：

$$\frac{\sin \phi_c}{\sin 90^\circ} = \sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-2)$$

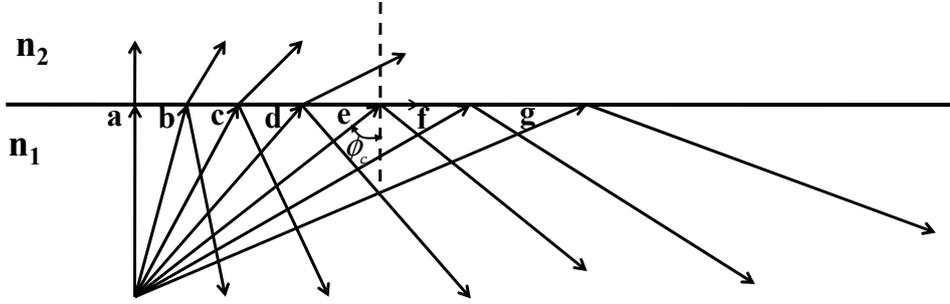


圖 1.2 光之全反射示意圖

光纖的傳導是利用光線在光纖的核心(Core)及披覆層(Cladding)間產生全反射來達成光線的傳遞。光耦合進入光纖之後，與核心及披覆層的介面之法線夾角，必須大於臨界角，才能完成全反射的行為，由此特性，可求出光纖的受光角，如圖 1.3 所示，並由(1-2)式可定義光纖的最大受光角 $\theta_{0,\max}$ ：

$$n \sin \theta_{0,\max} = n_1 \sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (1-3)$$

其中 $\theta_c = \pi/2 - \phi_c$ ，意即任意入射光之角度 θ_0 只要小於 $\theta_{0,\max}$ ，即可在光纖中發生全反射，由(1-3)式可定義出光纖的數值孔徑(Numerical aperture, NA)為：

$$NA = n \sin \theta_{0,\max} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1-4)$$

又 $n_2 = n_1(1-\Delta)$ 、 Δ 為光纖核心與披覆層之折射率差比。一般而言， Δ 在多模光纖中為 1%至 3%左右，在單模光纖為 0.2%至 1%左右。而較

大的數值孔徑通常代表有著較高的光接收角及耦合效率，多模光纖之數值孔徑一般為 0.14 至 0.5 之間。

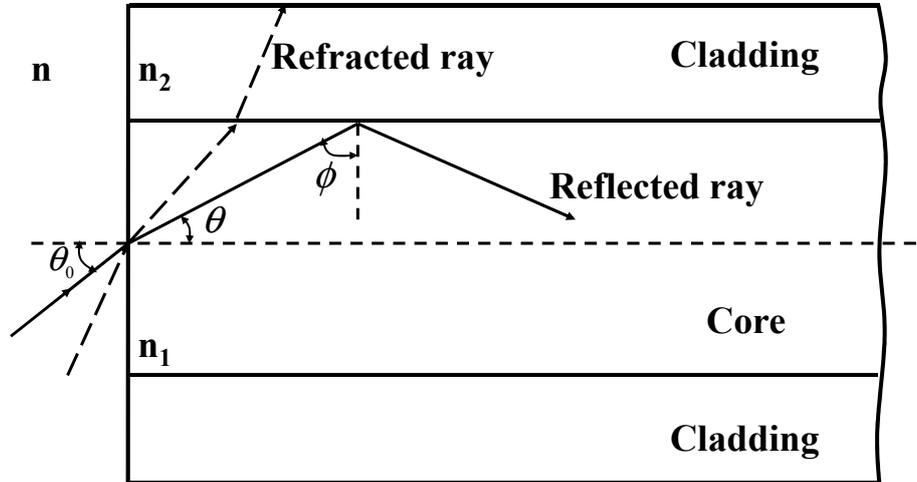


圖 1.3 光纖的受光角示意圖

1.2 光纖的分類

一般而言，光纖可依照兩個方式來分類，其一為依照材料的組成來分；另一種分類方式則依照光纖的傳導模態。

1.2.1 依材料區分

1. 玻璃光纖(Glass optical fiber, GOF)

玻璃光纖是由玻璃成分的核心及披覆層所組成，為目前使用最廣的光纖材質。利用雜質添加到純玻璃中，來達成所需要的折射率，例如，硼或氟可減少折射率，鋳或磷則可增加折射率。

2. 塑膠光纖(Plastic optical fiber, POF)

塑膠光纖是由高分子成分(PMMA 或 Fluoropolymers)的核心及披

覆層所組成，相較於玻璃光纖，傳統的塑膠光纖因為損耗較大，所以被使用於對高頻寬及低損耗不是很要求的應用上，但隨著含氟塑膠光纖的產生，有效地降低傳輸損耗，及價格低廉、能承受較大彎曲等優點，塑膠光纖的應用也漸漸受到重視[3]。

1.2.2 依模態區分

一個光束以一特定角度耦合入光纖，此一角度的光束稱為一個模態光。依照光纖的尺寸及性質的不同，能提供一個至多個模態光不等，分類如下：

1. 多模級射率光纖(Multimode step-index fiber, SIF)

多模級射率光纖是最簡單的型式，此型的光纖容許多個模態的進行，傳導方式如圖 1.4 所示。對不同模態而言，光的反射角度及路徑長也不同，因此光行進時，沿核心中心直線前進之光線將首先抵達出口端，其他模態之光線則依次抵達，此到達終點時間延遲不等的現象，造成光脈波分散，稱為模態間色散(Modal dispersion)，此現象會嚴重影響光纖頻寬。雖然此型的光纖損耗較大，但是價格便宜，所以也廣泛使用在對頻寬不是很要求的應用上。

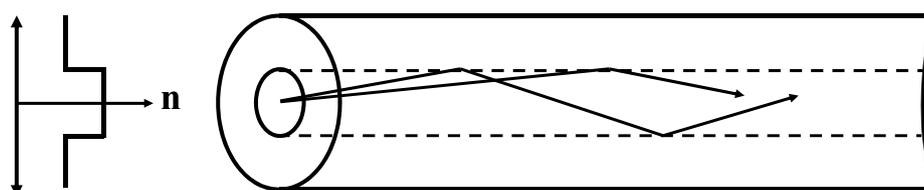


圖 1.4 多模級射率光纖之導光行為示意圖

2. 多模漸變折射率光纖(Multimode graded-index fiber, GIF)

漸變折射率光纖也容許多個模態光的行進，但其核心折射率的分布呈拋物線狀，中心的折射率最大，逐漸向外遞減。如圖 1.5 所示，假設光由核心入射到 a 點處，因入射角小於臨界角，光向界面偏折，行經 b 點時，折射角漸擴大，直至 d 點，入射角大於臨界角而產生全反射，而到 e 點時因為 $n_4 < n_3$ ，光向法線偏折，f、g 點的情況亦同，到 h 點後又與 a 點相同，如此光近似於正弦圖形不斷地往前行進，傳導方式如圖 1.6 所示。光之入射角越大，全反射的點在越內層，入射角越小，則在越外層，此種設計可等化各種模態到達終點的時間，減少模態間色散。而漸變折射率光纖的模態數，則與光纖核心的折射率分佈有關。

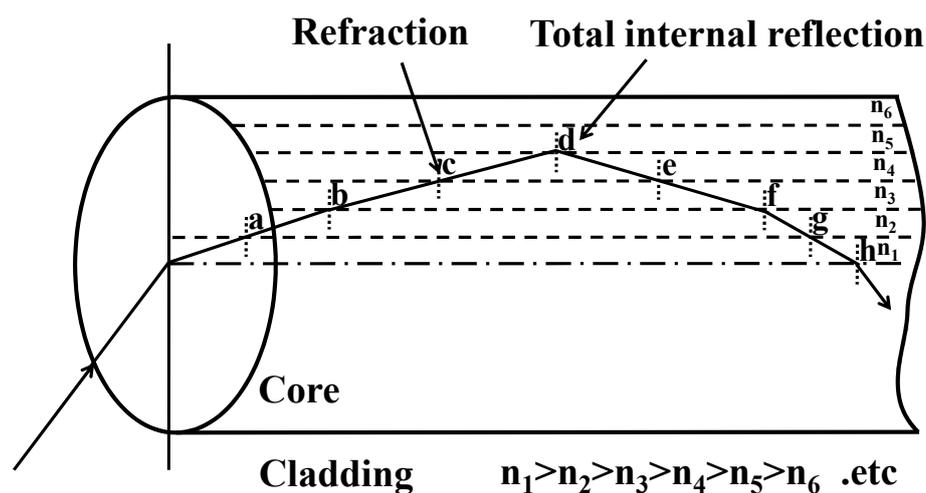


圖 1.5 多模漸變折射率光纖之折射率分佈示意圖

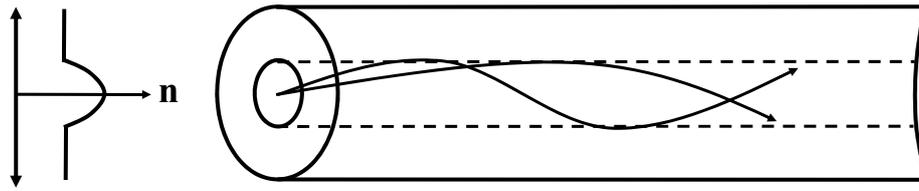


圖 1.6 多模漸變折射率光纖之導光行為示意圖

3. 單模光纖(Single-mode fiber, SMF)

單模光纖只容許單一模式光在核心中行進，其傳導方式如圖 1.7 所示，此型的光纖可完全免除上述多模光纖產生模式間色散的問題，所以傳輸頻寬較大，適用於大容量、長距離的傳輸。單模光纖存在一截止波長(Cutoff wavelength)在 1200 nm 左右，而工作波長必須大於截止波長，才能滿足單模光纖的傳導條件，否則會有第二種以上的模式光出現[4]。一般並不會對單模光纖的數值孔徑訂出規格(數值孔徑約 0.11)，因為光在單模光纖內傳遞時，沒有反射也沒有折射，所以光在出射時並沒有角度，而光纖接收到的光若不在數值孔徑內的角度時，則無法以全反射來傳播，單模光纖沒有接受光線的角度，因此，雖然可以定義其數值孔徑，但實際上不是一個很有用的參數。

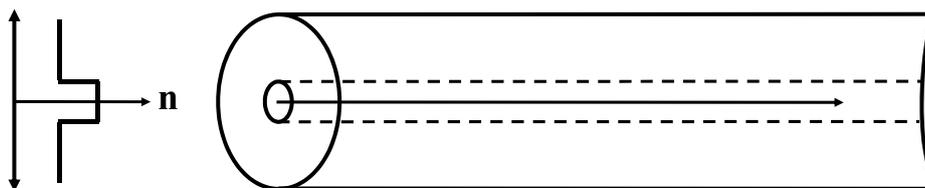


圖 1.7 單模光纖之導光行為示意圖

1.3 光纖透鏡結構

在光纖通訊系統中，目前應用在訊號輸出的光源大都為雷射二極體，而雷射的發光區域多呈橢圓型，具有約 10° 至 40° 的發散角，輸出之光場形狀為橢圓光場，而光纖本身的光場模態則為圓柱形，此外，雷射之光點大小也與光纖之核心大小不同。因此，光模態與光點大小的不匹配，會造成雷射與光纖之間耦合產生相當程度的損失，造成耦合效率的降低，有鑑於此，從 1970 年代開始，就開始有光纖透鏡(Lensed fiber)的相關研究，目的是直接在光纖端面上製作微透鏡，以期獲得良好的耦合效率。

在 1974 年，Cohen 與 Schneider 兩人[5]第一次提出在光纖端面製作微透鏡之研究，他們使用微影(Photo lithography)的技術，在光纖端面附著上高折射係數的負型光阻(Negative Photoresist)，並烤乾硬化，將端面曝光、顯影，顯影後已曝光部分會在光纖端面形成一透鏡，之後重複上述步驟即可製作出所需的半球狀或圓柱形微透鏡。如圖 1.8 所示，此法有效將耦合效率提高 26%，且直接在光纖端面製作微透鏡，可免除外加透鏡需要對位、及體積龐大等問題，並且降低光學系統元件的複雜度，因此，光纖透鏡的製作，成為光纖通訊領域的研究重點之一。目前常見的製作方法包括研磨、蝕刻、熔融、雷射加工等技術皆相當成熟，也均能有效地提高耦合效率。

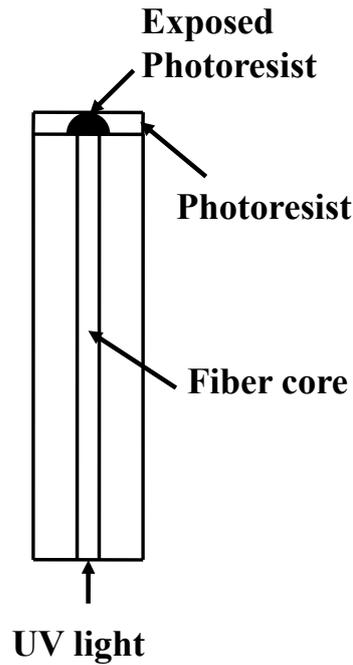


圖 1.8 以微影技術製作光纖透鏡示意圖

1.4 文獻回顧

一般而言，增加光纖與光源間的耦合效率，常用的方法有兩種：其一為製作微透鏡組，再經由光纖與微透鏡及光源的精密對位，使光源透過微透鏡的折射，將光線聚焦，改變光點大小，然後耦合進入光纖，來增加光纖與光源的耦合效率；第二種方式為：直接在光纖的端面上製作微透鏡，例如熔融法、研磨法、蝕刻法等技術，可藉由實驗參數的改變，來製作出不同曲率之微透鏡，再藉由與光源的精密對位，達成提高耦合效率的目的。以下針對目前文獻上所提及的主要製程技術，分別為透鏡組裝式之光纖耦合技術，與光纖透鏡式之光纖耦合技術，作詳細介紹。

1.4.1 透鏡組裝式之光纖耦合技術

1. 單鏡片之組裝

在光纖的耦合技術當中，外加透鏡的方法因為製造容易、成本低廉，且又可達到提升相當程度的耦合效率等優點，常被用於與光纖及光源進行對位、來增加耦合效率[6]。在 1998 年，Wilson[7]提出利用單鏡片製作出球面狀微透鏡，如圖 1.9 所示，將發散之光源經由鏡片的聚焦，耦合進入光纖，並有效提升耦合效率至 88%以上。

2. 多鏡片之組裝

多種微透鏡之組合，能將光源經過多次的聚焦，將光點縮得更小，耦合進入光纖[8]。圖 1.10 為 2000 年 Huang 等人[9]提出先設計適當曲率之球面及非球面透鏡，再經由調整光源、透鏡、與光纖間之相對位置來提高耦合效率，經實驗結果得知，耦合效率最高可提升到 90%以上。透鏡組裝式的光纖耦合技術，雖然可有效提升光纖的耦合效率，但也有鏡片體積龐大、對位較耗時、光學系統複雜等缺點。

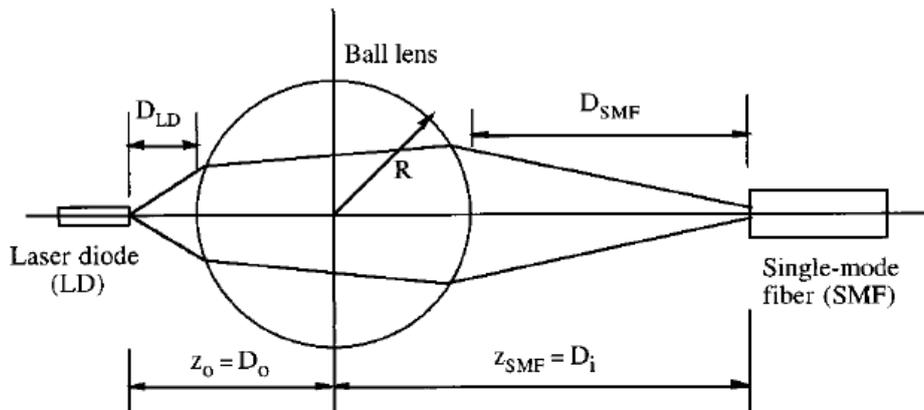


圖 1.9 外加球面透鏡之耦光系統示意圖[7]

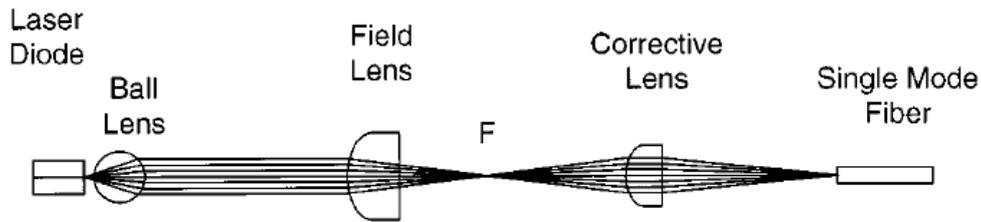


圖 1.10 以多種透鏡組合之耦光系統示意圖[9]

1.4.2 光纖透鏡式之光纖耦合技術

1. 熔融法製作光纖透鏡

1980 年，Kuwahara 等人[10]提出了熔融法製作光纖透鏡的技術。將玻璃裸光纖架在精密移動平台上，利用控制電弧放電之電流及放電時間，將光纖加熱熔融，並依照需求漸漸移動平台，當光纖加熱處漸漸變細拉斷後，電弧仍持續加熱被拉斷之端點，使其熔融成為一個圓型透鏡，如圖 1.11 所示，此法只可得約 40%的耦合效率。

以熔融法所製作之光纖透鏡，耦合效率無法達到非常高，因為在熔融拉伸的過程當中，不僅光纖外型漸漸變細，也會使光纖的核心產生變形，進而影響其耦光效能，而且製作耗時，較無量產的潛力。

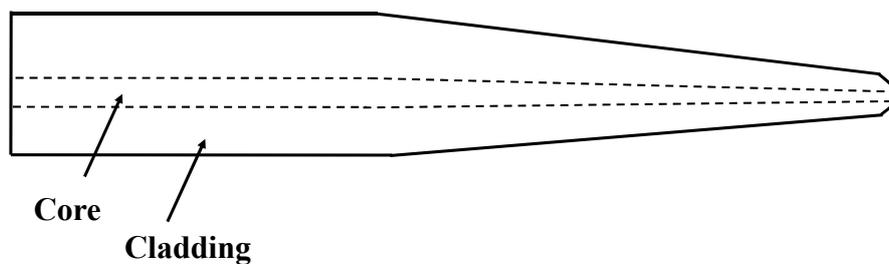


圖 1.11 以電弧熔融法製作之光纖透鏡示意圖

2. 光纖接合式光纖透鏡

2001 年，Ogura 等人[11]提出兩段式光纖接合法之光纖透鏡，如圖 1.12 所示。在光纖的耦光系統中，利用橢圓核心之漸變折射率光纖，熔融接合在單模光纖上，作為模態間的轉換，再加上所製作的透鏡組，經過精密的組裝與對位，可得到約 87%的耦合效率。

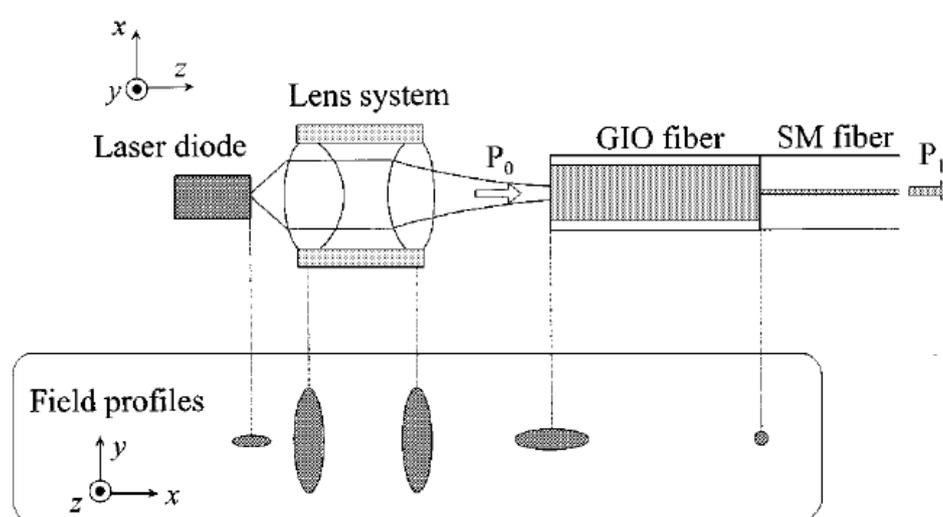


圖 1.12 以兩段式光纖接合法製作光纖透鏡示意圖[11]

2004 年，Shiraishi 等人[12]提出三段式接合法之光纖透鏡，作法是先經過理論的計算，利用無核心光纖(Coreless fiber)製作出適當曲率之微透鏡，再與漸變折射率光纖作接合，最後再接合到單模光纖上。如圖 1.13 所示，透過微透鏡及漸變折射率光纖的聚焦及模態轉換，可有效提升耦合效率至 74%。

接合式光纖透鏡，在製作上較為耗時，且無法大量生產，再配合透鏡組進行耦光也會使系統更為複雜。

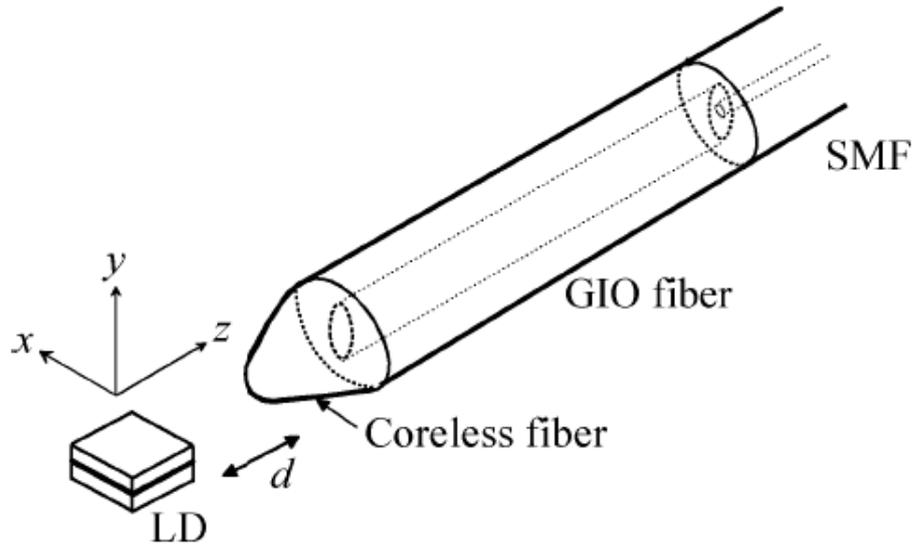


圖 1.13 以三段式光纖接合法製作光纖透鏡示意圖[12]

3. 研磨法製作光纖透鏡

研磨法是將光纖精準定位於研磨平台上，將光纖以研磨的方式製作出所需之幾何形狀或曲率半徑，藉由光纖前端所形成之微透鏡，來達成提升耦合效率之目的。2001 年 Yoda 與 Shiraishi 兩人[13]提出光纖接合配合研磨法製作楔型光纖透鏡，先將一段適當長度的漸變折射率光纖與單模光纖接合，然後在漸變折射率光纖上研磨成楔型，再經由二次研磨將頭端研磨成所需之曲率半徑，如圖 1.14 所示，此法能有效提升耦合效率至 95% 以上。2005 年，Yeh 等人[14] 為了製作出高長寬比(Aspect ratio)的微透鏡，與 980 nm 高功率雷射的長寬比相匹配，提出了錐式楔型光纖微透鏡，如圖 1.15 所示，將光纖經過三次的研磨，形成非軸對稱的結構後，再利用電弧放電熔燒而成型，經實驗證明最高耦光效率可達 84%。

研磨法雖然可製作出高耦合效率之光纖透鏡，但缺點是需要極為精密的自動控制設備、研磨的步驟繁雜耗時、良率不高、且每次僅能針對一支光纖作加工，面臨無法大量生產的問題。

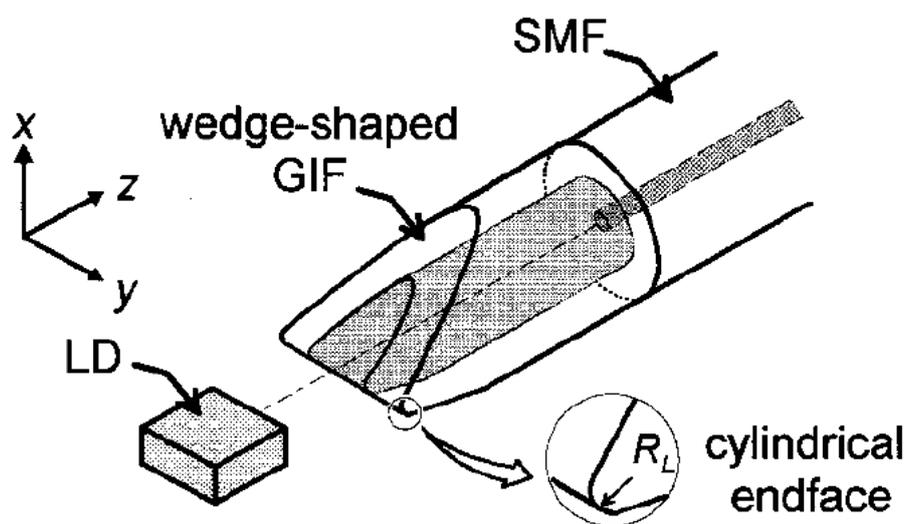


圖 1.14 光纖接合及研磨法製作楔型光纖透鏡示意圖[13]

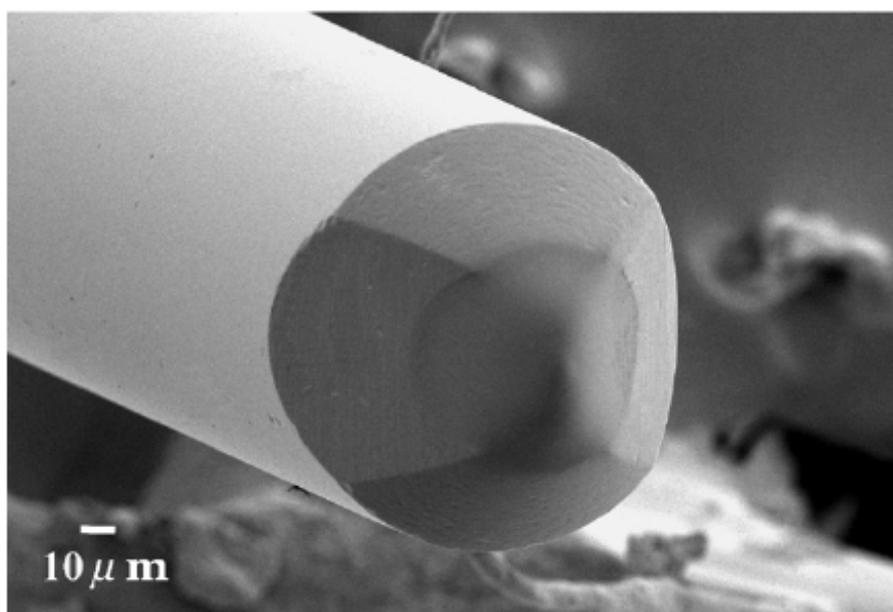


圖 1.15 以研磨法製作之錐式楔型光纖透鏡[14]

4. 蝕刻法製作光纖透鏡

在1982年，Eisenstein與Vitello兩人[15]提出利用緩衝氫氟酸(Buffered hydrofluoric acid, BHF)直接蝕刻的製程。將光纖浸泡於調配好的BHF中，由於光纖的核心與披覆層材料上的差異，BHF會對光纖造成選擇性蝕刻，使光纖斷面之中心點形成微凸出之錐狀透鏡結構，如圖1.16所示，而錐角的大小可透過蝕刻液濃度、蝕刻時間等參數加以控制，此法可有效將耦合效率提升至75%以上。2000年，Alder等人[16]，以蝕刻法製作出曲率半徑 $0.7\ \mu\text{m}$ 的光纖透鏡，可有效提升耦合效率至78%，蝕刻法之優點為重複性高、具大量生產的優勢。

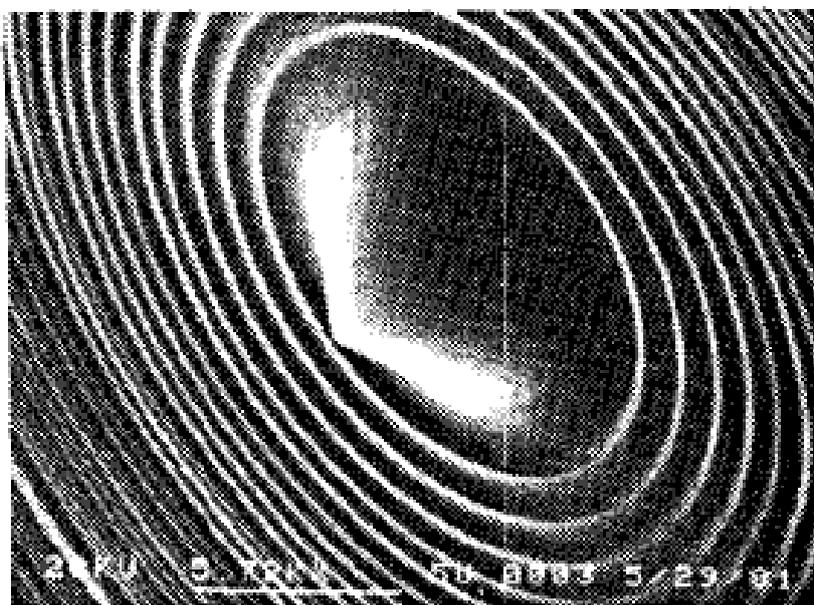


圖 1.16 以蝕刻法製作之光纖透鏡[15]

此外，在2004年，Yang等人[17]提出了光纖蝕刻配合熔融法製作雙曲線光纖透鏡，如圖1.17所示，作法是將蝕刻完成之光纖，再

加熱熔融其尖端，而形成所需之透鏡曲率，此法製作之光纖透鏡最高耦合效率可達 82%。但透過光纖蝕刻及熔融兩個步驟製作光纖透鏡，不僅製作上較耗時，也不具量產的優勢。

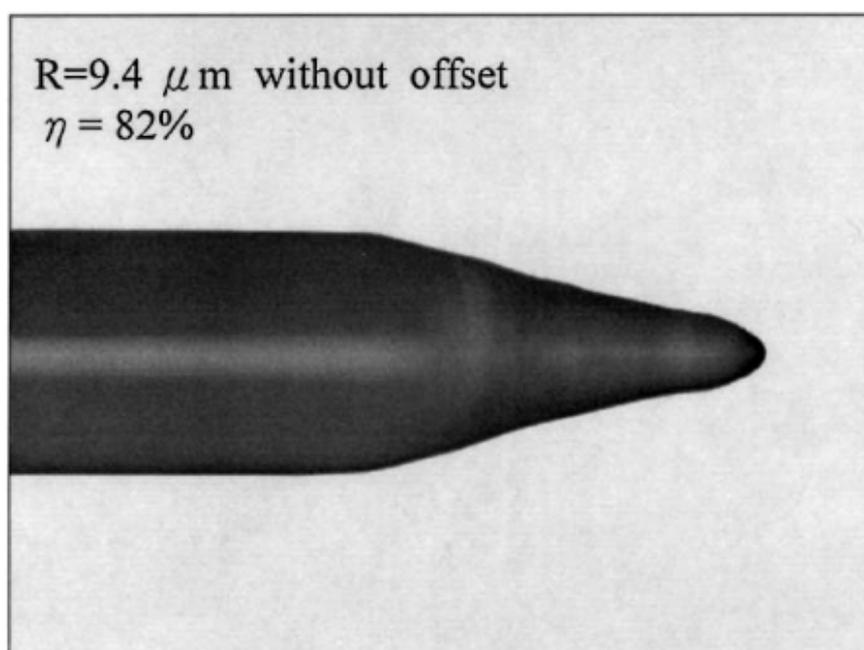


圖 1.17 以蝕刻及熔融法製作之光纖透鏡[17]

5. 雷射微加工法製作光纖透鏡

在 1993 年，Presby 與 Giles 兩人[18]提出了以 CO₂ 雷射加工法製作雙曲面光纖透鏡的技術，製作流程如圖 1.18 所示，將光纖固定在精密的三軸平台上，利用脈衝 CO₂ 雷射從光纖的側面加工，再經過拉伸，製作出雙曲線的光纖透鏡，經實驗結果，最高耦合效率可高達 90%以上。但製作時移動精度要求較高，須到達微米等級，且設備昂貴，所以不太適合用在大量生產。

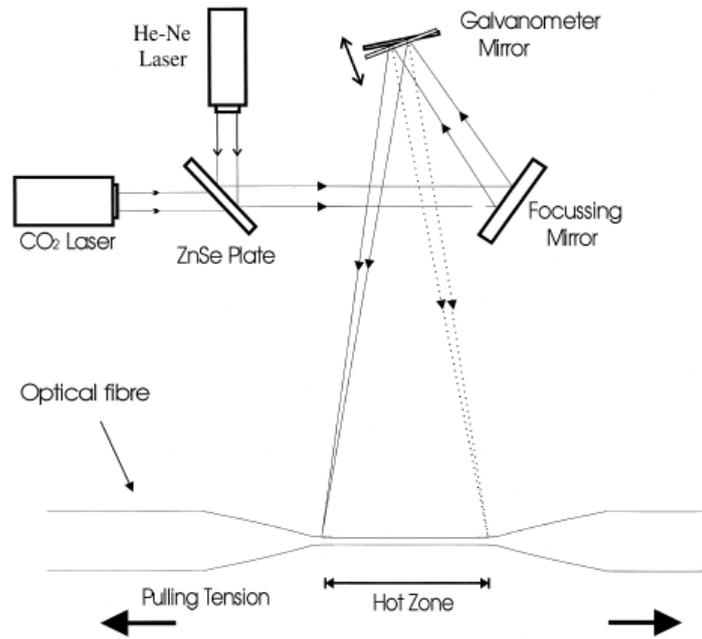


圖 1.18 以雷射加工法製作雙曲面光纖透鏡示意圖[19]

6. 點膠法製作光纖透鏡

在上述各種製程技術當中，大部分僅適用於玻璃光纖透鏡的製作，在 2002 年，Sakata 與 Imada 兩人[20]提出了一種塑膠光纖透鏡的製程技術，利用熱壓法在漸變折射率光纖上製作雙曲面透鏡。作法是先製作一個半球狀之熱壓模，將其加熱後，再把光纖端面壓入熱壓模，使光纖端面形成一個半球狀的凹槽後，填入高折射係數之 UV 膠體，再以 UV 光源曝光將其固化，形成雙曲面之光纖微透鏡，如圖 1.19 所示。此法證實可有效增加光纖之接受角達 15°左右，並有效的縮小雷射光點直徑，增加耦合效率。

2003 年，Kim 等人[21]提出了以點膠機在光纖端面點上高折射係數的 UV 膠，使光纖端面形成一個半球狀的液滴，再以 UV 光源曝光，

進而固化形成所需之微透鏡，如圖 1.20 所示。並藉由控制不同的點膠量，來形成不同曲率之微透鏡。點膠法應用在漸變折射率之玻璃光纖，在透鏡曲率半徑為 $71\ \mu\text{m}$ 時，可得最高的耦合效率為 91.2%[22]。

點膠法最大特色為成本低廉、製作快速、可應用在塑膠及玻璃光纖上，但利用點膠法製作光纖透鏡，其透鏡曲率半徑受限於點膠量與液滴自身的表面張力，所以並無法製作出曲率半徑相當小之微透鏡。

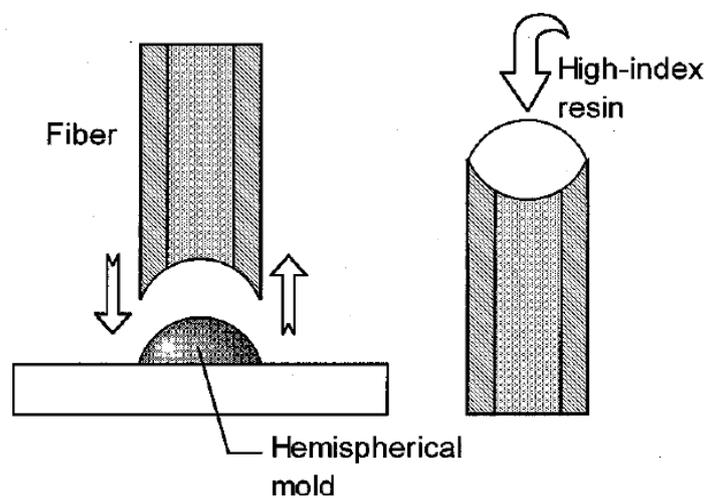


圖 1.19 以熱壓法製作雙曲面光纖透鏡示意圖[20]

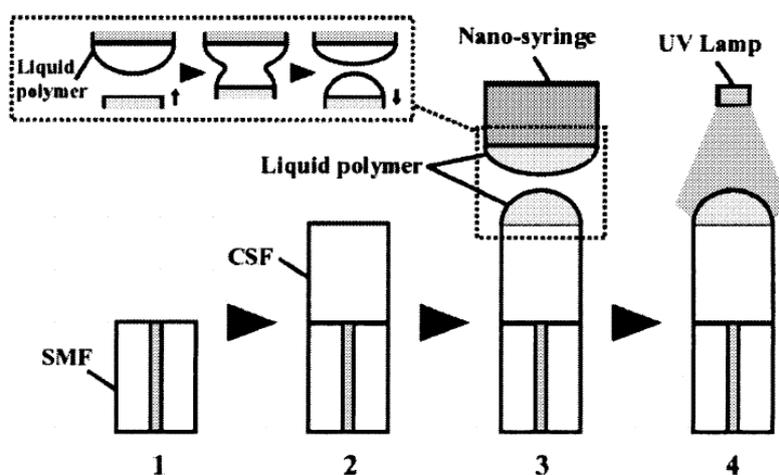


圖 1.20 以點膠法製作光纖透鏡示意圖[21]

1.5 研究動機與目的

光在光纖中傳遞時會因為彎曲、散射、連接與耦合等多種因素產生損失。由光纖本身產生的材料吸收、散射等內在因素的損失，可透過採用適當波長的光源來改善；漸變折射率光纖的發展與應用，也改善了傳統的級射率光纖產生之模態間色散的問題。然而，光纖與光源之間的耦合損失，才是影響光纖傳輸品質的最大關鍵。通訊用雷射光源是具有特定長寬比之橢圓光場，而光纖本身是圓形光場，兩者的模態不匹配，光點大小也不一，所以會造成耦合效率的降低。傳統改善光纖耦合損失的方法是：利用微透鏡整合在光學系統中，透過微透鏡將光源聚焦，改變光源的光點大小，耦合進入光纖，一般而言，使用非球面透鏡較球面透鏡為佳[23]，但由於耦合元件的製作複雜且光學系統對位耗時，於是眾多學者投入於光纖透鏡的研究。

光纖透鏡的製作方法眾多，部分文獻上提出的製造技術，雖能有效地提高耦合效率，但卻有成本過高、製作耗時、無法大量生產、光纖種類受到限制等缺點。有鑑於此，本研究欲提出一套低成本、可快速製造、製程穩定、適合大量生產、並適用於塑膠及玻璃光纖的光纖微透鏡製程。藉由在均勻電場中，對帶電液滴產生靜電力拉伸的概念，將 SU-8 光阻因自身表面張力在光纖斷面上形成之球面狀液滴，進行拉伸，製作非球面微透鏡，並可利用不同的電場強度，來製作不

同曲率半徑之微透鏡。此製程直接在光纖斷面上製作微透鏡，可降低光學系統的複雜性，也達到了系統微小化的目的，且免除傳統的透鏡與光纖之間須對位、組裝等問題，並可有效提高光纖的傳輸性能及耦合效率。

1.6 論文架構

本論文架構如下所列：

第一章 緒論

本章節介紹光纖傳導的基本原理與光纖的分類，並提出光纖透鏡的概念，以及光纖透鏡的文獻回顧，介紹過去各種應用在光纖耦合上的微透鏡製作方法，包含透鏡組裝式以及光纖透鏡式耦合技術，並提出研究動機與目的，最後簡述本論文各章節之概要。

第二章 理論分析

本章節先提出光纖通信用光源簡介，並說明光纖耦合的理論，內容包含高斯光束與模態匹配，之後提出庫侖定律與靜電力拉伸理論，並詳述帶電液滴的形成、泰勒錐的產生以及電紡織現象，最後利用上述理論提出本實驗的操作概念。

第三章 光纖微透鏡之製作及其特性量測

本章節先簡介 SU-8 光阻的光學特性，之後詳述光纖微透鏡的製

程步驟，並介紹光學量測的實驗架構及量測方法，內容包含光纖聚焦之量測、光束傳播路徑之量測及模擬、光纖耦合效率之量測等。

第四章 結果與討論

本章節提出本製程的實驗數據量測結果，包含 SEM 探討、光纖透鏡曲率分析以及第三章提及之各種光學性能的量測結果及模擬。

第五章 結論與未來展望

本章節呈現本論文之重要的量化成果，以及具體貢獻，並對未來光纖透鏡的發展提出相關建言。

第二章 理論分析

2.1 光纖通信用光源簡介

在光纖通訊系統中，所使用之光源必須具有良好的聚光性和指向性，以及輸出穩定、價格低廉等特性。一般而言，短距離的通訊光源以發光二極體(Light emission diode, LED)為主，其結構較簡單且價格便宜，但輸出功率較小，常用的為 850 nm 之 LED 光源；而使用在長距離的通訊輸出光源以雷射二極體(Laser diode, LD)為主，其聚光性較 LED 為佳，但輸出功率受溫度影響甚大，使用時須特別注意散熱問題，另外，因考慮到光纖的材料吸收及色散等問題，雷射光源的波長以 1.3 μm 及 1.55 μm 為主。本研究所採用之雷射光源為典型的通訊波長 1310 nm 之 Fabry-Perot 雷射二極體，其遠場圖案(Far-field pattern)如圖 2.1 所示，為一橢圓光場，X 軸方向之發散角為 $\theta_x=32^\circ$ 、Y 軸之發散角為 $\theta_y=40^\circ$ 。

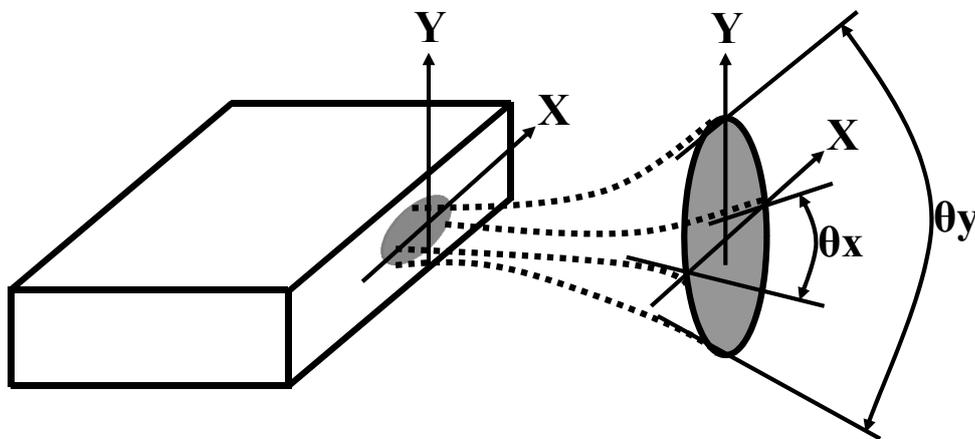


圖 2.1 Fabry-Perot 雷射光場示意圖

2.2 模態匹配與耦合理論

2.2.1 高斯光束(Gaussian beam)

高斯函數為純量波方程式(Helmholtz equation)的其中一個解，其函數分佈特性與雷射光束極為接近，所以在理論上常以高斯光束來描述雷射光場的行為[24]。如圖 2.2 所示。假設高斯光束在 Z 軸方向傳遞，其中 λ 為雷射光波長，則高斯光束有幾個重要參數分別敘述如下：

1. 光腰 W_0 (Beam waist)：高斯光束寬度最小處。
2. 高斯光束寬度 $W(z)$ ：距離光腰 Z 處之光點大小(Spot size)，定義如方程式(2-1)所示。
3. 波前半徑 $R(z)$ ：距離光腰 Z 處之波前曲率半徑(Wavefront radius of curvature)，定義如方程式(2-2)所示。
4. 光束發散角 θ ：高斯光束之發散角，定義如方程式(2-3)所示。

$$W(z)^2 = W_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi W_0^2} \right)^2 \right] \quad (2-1)$$

$$R(z) = Z \left[1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi W_0^2} \right)^2 \right] \quad (2-2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda}{\pi W_0} \right) \quad (2-3)$$

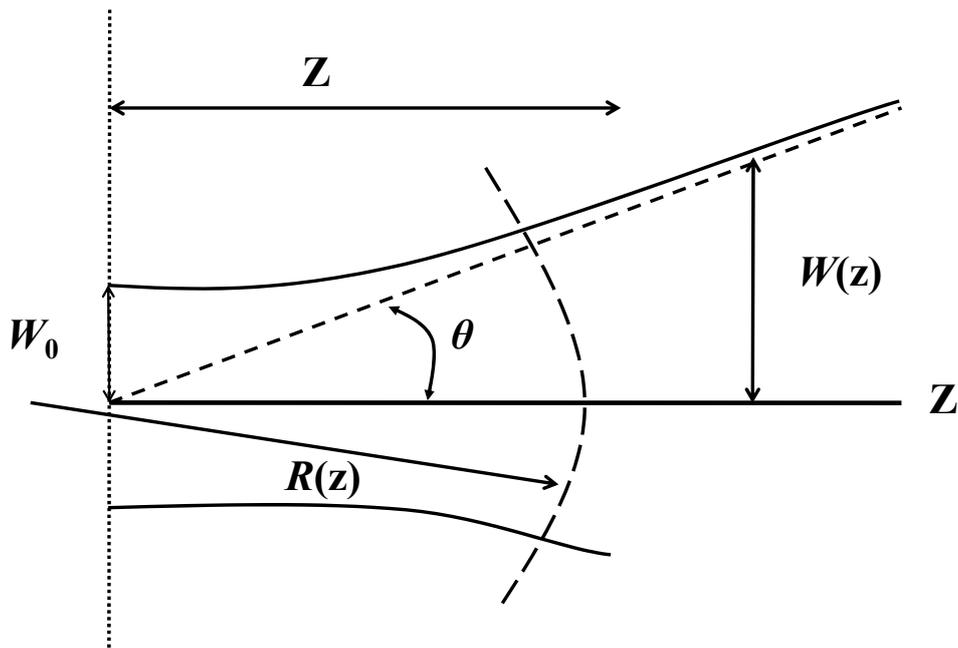


圖 2.2 高斯光束示意圖

2.2.2 模態匹配(Mode matching)

在光纖通訊系統中，光纖與雷射光源的耦合效率，主要取決於光纖與雷射光場的模態匹配與否，光場模態則分成波前及光場形狀來探討，其比較如表 2-1：

表 2-1 Fabry-Perot 雷射與光纖內部光場模態之比較

| | 波前半徑 | 光場形狀 |
|----------------|-----------------------|------|
| Fabry-Perot 雷射 | 半徑為 R_x 、 R_y 之波前 | 橢圓場型 |
| 光纖內部 | 平面波前($R=\infty$) | 圓形場型 |

由於雷射具有橢圓光場與曲面波前，而光纖的模態為圓形光場及平面波前，在模態匹配理論當中，光纖與雷射兩者的模場匹配，取決

於波前形狀以及光場光點大小是否一致，即兩者的波前半徑與光點大小要一致，才能達到完全匹配[25]。為了促進模態匹配來提升耦合效率，可透過微透鏡來改變雷射的模態。

以一維方向來探討雷射與光纖之間的耦合效率[26]，如圖 2.3 所示，當雷射光束在空間中行走距離為 d 時，此時波前分佈 $R(d)$ 等於 R_d ，當光束經過曲率 R_l 之透鏡之後，則波前由曲率為 R_d 之波前轉變成平面波前，此時，經光纖透鏡後之光場模態與光纖內部光場模態一致，達到完全匹配。而若是以平端光纖耦合，則具 R_d 波前的雷射光進入光纖中波前仍為具曲率之波前，和光纖之模態不匹配，造成耦合效率的降低。

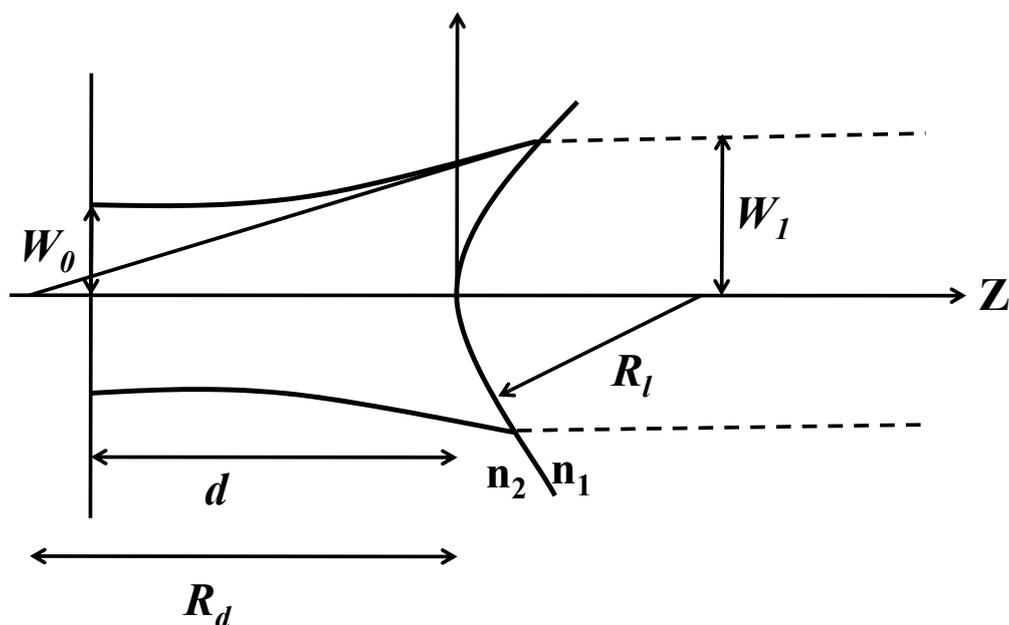


圖 2.3 分析雷射與光纖之模態匹配示意圖

2.2.3 耦合效率分析

在探討雷射與光纖透鏡之耦合效率時，可利用光學矩陣的 ABCD 定律(ABCD law)來描述此光學行為[20, 27]。如圖 2.4 所示，假設兩光跡交面(Reference plane)在光纖透鏡的頂點，則左右兩側的光矩陣可表示為 M_{LD} 及 M_{lensed} ，如(2-4)及(2-5)式所示：

$$M_{LD} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

$$M_{lensed} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-N_L}{R_L} & N_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{N_F}{N_L} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

其中， L 為雷射光源到光纖透鏡頂點的距離， R_L 為透鏡的曲率半徑，而 N_L 及 N_F 則分別表示透鏡及光纖的折射率。由雷射光源經過微透鏡，耦合進入光纖核心的光線傳輸矩陣 M_T 可以寫成：

$$\begin{aligned} M_T &= \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-N_L}{R_L} & N_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{N_F}{N_L} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & L_1 \frac{N_F}{N_L} \\ \frac{1-N_L}{R_L} & \frac{N_F}{N_L} \left(\frac{(1-N_L)L_1}{R_L} \right) + N_L \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-6)$$

光線經由微透鏡進入光纖核心的傳導行為可用(2-7)式表示，其中 x_1 及 x'_1 分別表示最初雷射光束發散之位置及其角度，而 x_2 及 x'_2 則分別表示光線耦合進入光纖核心後之位置及角度。

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{bmatrix} = M_T \begin{bmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

$$\theta_c = \tan^{-1}(x'_1) \quad (2-8)$$

光纖核心可接受的光束角度範圍如(2-8)式所示，理論上，若光源的發散角度為 θ ，且滿足 $\theta \leq \theta_c$ ，則光束可完全耦合進入光纖核心內，但由於雷射的發散角相當大，且與光纖的模態不匹配，所以造成相當大的耦合損失，而光纖微透鏡的製作，可有利於增加光纖對於光源的接收角度，來達到提升耦合效率的目的。

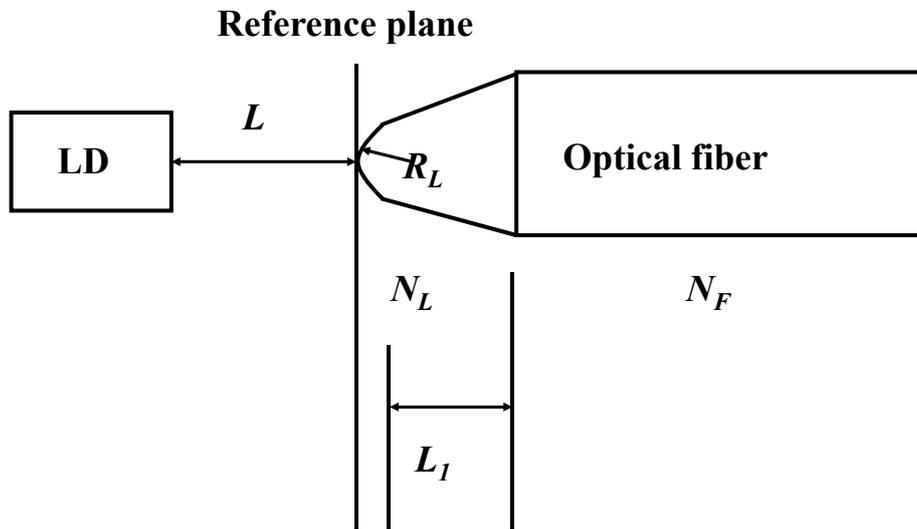


圖 2.4 分析雷射與光纖透鏡之耦合行為示意圖

由於雷射光源所發出的光源是近理想的高斯分佈，而光纖所發出的光源也是高斯分佈的模態，因此，若是光纖的平端式耦合(Butt coupling)，我們可用兩個高斯光束，去分析此耦合行為[28, 29]。

如圖 2.5 所示，圖中 W_{l0} 代表 X 方向的腰寬半徑，而雷射光束的橫向模態 $E_l(x, y)$ 可以寫成：

$$E_l(x, y) = E_{lx}(x)E_{ly}(y) \quad (2-9)$$

$$E_{lx}(x) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} (W_{lx})^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp\left[-\frac{x^2}{W_{lx}^2} - ik\left(\frac{x^2}{2R_{lx}} + \theta_{lx}x\right)\right] \quad (2-10)$$

$$E_{ly}(y) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} (W_{ly})^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{W_{ly}^2} - ik\left(\frac{y^2}{2R_{ly}} + \theta_{ly}y\right)\right] \quad (2-11)$$

其中， W_{lx} 及 W_{ly} 為雷射光束在 X 和 Y 方向的光點半徑； R_{lx} 及 R_{ly} 則為 X 和 Y 方向的波前曲率半徑，而這些參數都可由(2-1)及(2-2)式來求得。另外，光纖的光源分佈為一個對稱的高斯光束，所以在 X 及 Y 方向的腰寬皆為 W_{f0} 。而 θ 及 d 則分別表示光纖的傾斜角度和偏移量。

光纖的模態 $E_f(x, y)$ 可以寫成：

$$E_f(x, y) = E_{fx}(x)E_{fy}(y) \quad (2-12)$$

$$E_{fx}(x) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} W_f^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp\left[-\frac{(x-d_x)^2}{W_f^2} - ik\left(\frac{(x-d_x)^2}{2R_f} + \theta_{fx}(x-d_x)\right)\right] \quad (2-13)$$

$$E_{fy}(y) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} W_f^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp\left[-\frac{(y-d_y)^2}{W_f^2} - ik\left(\frac{(y-d_y)^2}{2R_f} + \theta_{fy}(y-d_y)\right)\right] \quad (2-14)$$

其中， W_f 為光纖端面的光點半徑； R_f 為波前曲率半徑。我們可利用重疊積分(Overlap integration)的方法，來計算出光纖的耦合效率 η ，如(2-15)式所示：

$$\eta = \frac{\left|\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_l \cdot E_f^* dx dy\right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_l \cdot E_l^* dx dy \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_f \cdot E_f^* dx dy} \quad (2-15)$$

理論上，在不考慮如介面反射、彎曲、及材料吸收等效應，若雷射與光源之模態完全匹配，則可達到 100% 的耦合效率，然而實際上雷射和光纖的模態不同，在加上對準的誤差也會改變匹配程度，所以造成耦合效率的降低。

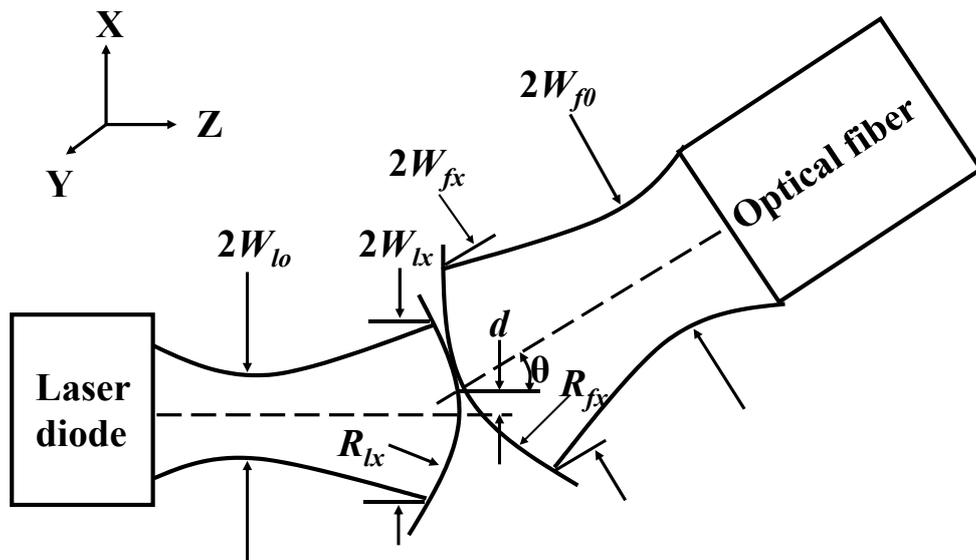


圖 2.5 以兩個高斯光束分析雷射與平端光纖之耦合行為示意圖

2.3 庫倫定律與靜電力

2.3.1 庫倫定律與電場強度

在 1785 年，庫倫(Charles Coulomb)提出了兩靜止點電荷 q (C) 及 q' (C) 之間相互作用的基礎定律[30]。分別敘述如下：

1. 在真空中的兩個靜止點電荷間，作用力的方向是沿著它們的連線方向，同性電荷為相斥力，異性電荷為相吸力。

2. 兩個靜止點電荷間，靜電力的大小 $F(N)$ ，與兩靜止點電荷所帶的電量 $q(C)$ 及 $q'(C)$ 的乘積成正比，與它們之間的距離 $r(m)$ 的平方成反比。意即：

$$F = k \frac{|q||q'|}{r^2} \quad (2-16)$$

上式中， k 為庫倫常數，其值為 $k = 8.99 \times 10^9 (N \cdot m^2 / C^2)$ 。

電場(Electric field, E)的概念實際上是一個庫倫定律觀念的延伸。一個電荷所受的作用力，可被認為是受到另一電荷產生的電場所造成。在空間中某一點的電場 E 的定義為該點的每單位正電荷 q' 所受之靜電力 F ，即：

$$E = \frac{F}{q'} \quad (2-17)$$

在兩平行極板間形成的均勻電場，計算電位是相當容易的，如圖 2.6 所示，一個正電荷 q' 於均勻電場中由 a 移動至 b ，並受一定力 $F = q'E$ 的作用，應用功的定義可知：電場對電荷 q' 所作的功，可利用系統的電位能變化來表示，此觀念與均勻重力場中質量 m 的位置改變互相對應。因此，電場對電荷所作的功 W_E 為：

$$W_E = U_{E,a} - U_{E,b} = q'Ed \quad (2-18)$$

由電位的定義知，電荷 q' 由 a 到 b 的電位差可以寫成：

$$V_a - V_b = Ed \quad (2-19)$$

上述結果僅適用在均勻電場中任兩點的電位差，而在均勻電場中，電場方向可以是空間中的任意方向，而電位差則與兩平行極板間的距離有關。

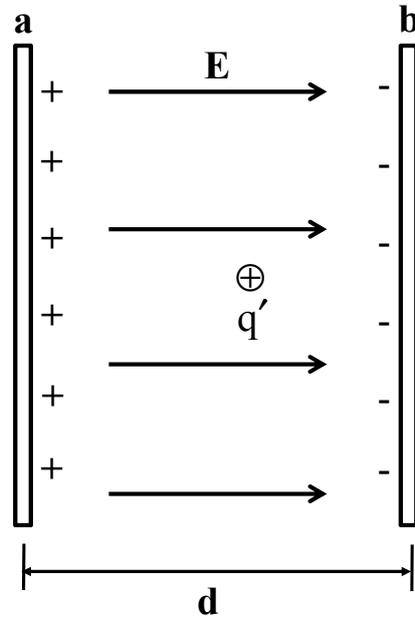


圖 2.6 均勻電場對電荷做功示意圖

2.3.2 靜電力拉伸理論

在 1964 年，Taylor[31]提出一個利用靜電力的拉伸，來改變液滴表面曲率半徑的實驗。將一個半球狀的液滴置於一對平行的導電極板中，並給予電壓，液滴內的負電荷會被下極板處的正電壓所吸引，使得液滴表面帶有較多的正電荷，此外，因為下極板帶有正高壓，同性相斥，會驅使液滴內的正電荷更往液滴中心集中，此即為帶電液滴的形成。當帶電液滴的正電荷持續累積，直到液滴的表面張力與正電荷所產生的庫倫斥力達到平衡時，液滴會形成一錐狀體，稱之為泰勒錐

(Taylor cone)，如圖 2.7 所示。而由此實驗結果推導出電場強度與液滴曲率的關係為：

$$E\sqrt{\frac{r}{T}} = C \quad (2-20)$$

其中，E 為電場強度，r 為液滴的曲率半徑，T 為液滴的表面張力，C 為常數。由(2-20)式可知，電場強度與液滴的曲率半徑成反比的關係，意即電場強度越大時，液滴的曲率半徑則越小。當一個半球狀液滴置於電場中，液滴表面受到電場強度的作用，會由原本的半球狀逐漸拉伸成為非球面狀(Non-spherical shape)[32]，但是當電場強度過高時，泰勒錐的前端會因突破液體的表面張力，而產生液滴噴射的現象，此一作用即為所謂的電紡織(Electro-spinning)現象[31, 33]，如圖 2.8 所示。

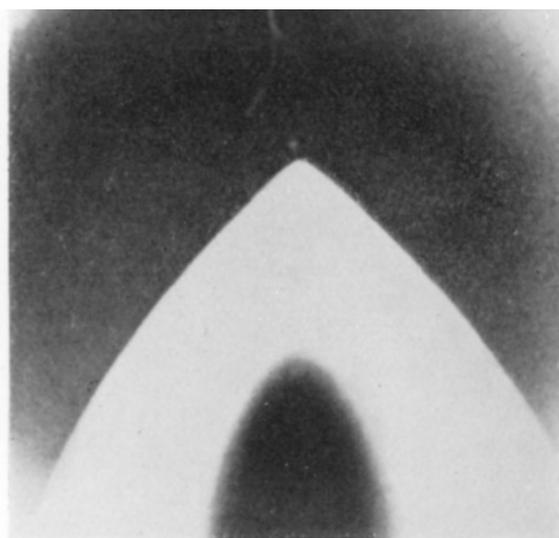


圖 2.7 以靜電力拉伸產生之泰勒錐[31]

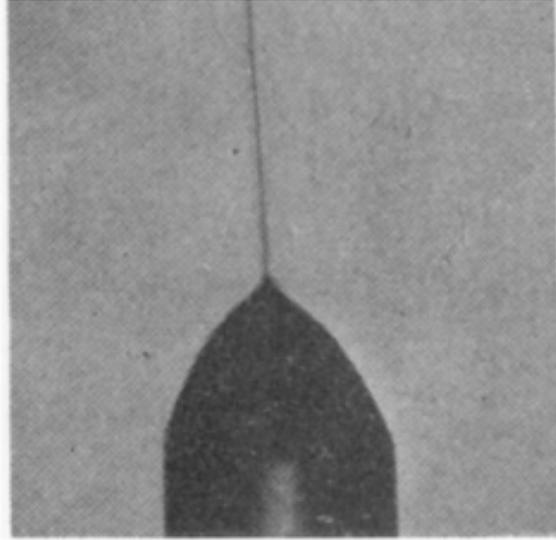


圖 2.8 電場強度過高產生之電紡織現象[31]

2.3.3 實驗操作概念

本研究依據上述的理論，提出一套以靜電力拉伸 SU-8 光阻，來製作光纖透鏡的製程技術，實驗的操作是將光纖固定於兩平行極板之間，鎖定於精密平台上，並直接於光纖斷面上，附著高折射係數的 SU-8 光阻，此時利用光阻自身的表面張力，在光纖斷面上形成一個半球狀的液滴，然後對兩個平行極板施加電壓，此時在兩極板間形成一個均勻電場，利用此電場所產生的靜電力拉伸，來改變液滴的曲率半徑(Radius of curvature, R)，實驗操作概念如圖 2.9 所示，並隨著施加的電場強度不同，來形成各種不同曲率之非球面微透鏡，進而利用 UV 曝光來固化成型。由於本實驗操作是在兩極板之間的均勻電場下所進行，所以電場強度 $E(V/m)$ 之計算，則可直接以電位差與兩極板間的距離相除，即可求得。

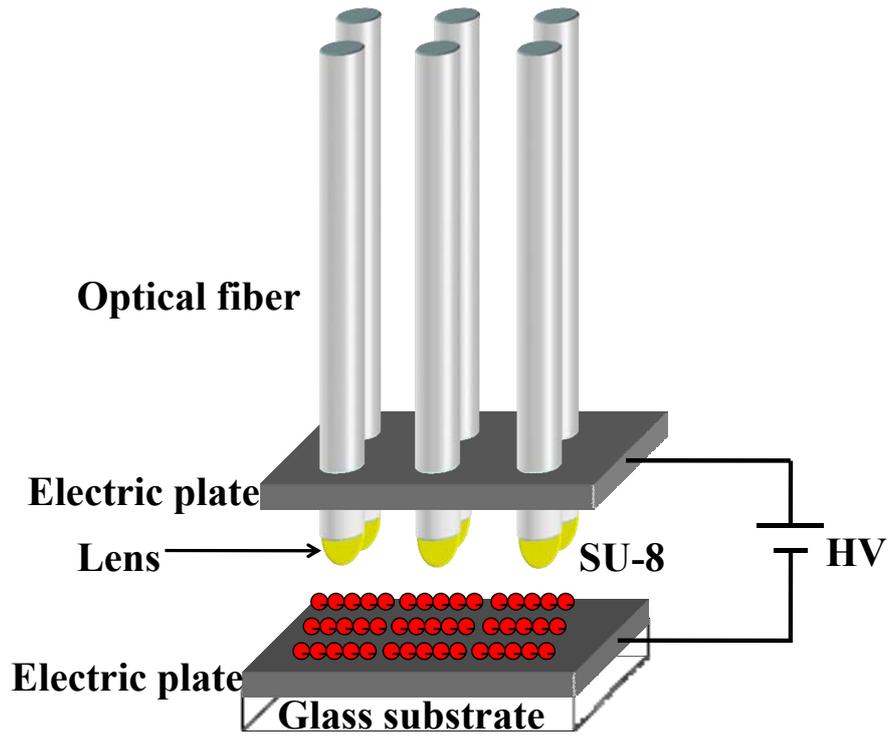


圖 2.9 以靜電力拉伸 SU-8 光阻之實驗操作概念

第三章 光纖微透鏡之製作及其特性量測

3.1 SU-8 光阻簡介

SU-8是屬於負型光阻，它是由三種主要成分所構成，1. 高分子：Epoxy novolak resin；2. 溶劑：GBL (γ -butyrolactone)；3. 感光劑：Triaryl sulfonium salt (HSbF_6)。溶劑含量的多寡會改變光阻黏度，進而影響到光阻的塗佈厚度[34]。SU-8為一種良好的光學材料，其折射係數在硬烤(hard-bake)後高達1.8[35]，而光阻在曝光後烘烤前的玻璃轉換溫度(Glass transition temperature, T_g)為55°C，且在經過UV光固化之後，具有極佳的結構強度、熱穩定性、以及化學穩定性，在可見光的波段下光穿透率極高，所以SU-8常作為光波導元件使用在光學系統中[36]。在光纖透鏡的應用上，透鏡材料必須具有高折射係數及高透光性等特點，才能有效提升其光學性質，而光纖除了應用在可見光源外，一般而言，在通訊上常用的雷射波段為近紅外線光源(1310 nm及1550 nm)，所以本研究實際量測SU-8光阻，在可見光至近紅外線波段(350 nm至1600 nm)的光穿透率。我們先將SU-8光阻以旋轉塗佈的方式，旋塗在乾淨且去除水分的玻璃基板上，在給定適當的光阻劑量後，必須以慢、快兩階段旋轉的方式進行塗佈，慢速旋轉目的是讓光阻慢慢地旋開至基板邊緣，第二階段的快速旋轉，則可增加光阻塗佈的均勻性。

實驗時，以透明玻璃當作基板，塗佈50 μm 厚度之光阻作量測，光阻型號為SU-8-50(MicroChem Corp., MA, USA)。將第一階段的轉速設定為500 rpm，持續旋塗30秒，第二階段設定轉速為2000 rpm，持續旋塗30秒[37]。然後將旋塗完成之SU-8經過20分鐘、90°C的充分軟烤，軟烤的目的在於去除光阻內的溶劑，使光阻由液態變成固態薄膜，並增加對基板的附著能力。此外，在軟烤的過程中，光阻受熱流動會達到自我平坦化(Self-Planarize)，可去除旋塗過程中所產生的邊緣突起現象。經過軟烤程序後，利用UV光進行10分鐘的曝光固化，再將基板置於可見光的光譜儀(HR4000, Ocean Optics, USA)，以及近紅外線光譜儀(DTS-1700, Polychromix, USA)作量測，所用之光源，是利用可見光波段專用光源(DT-Mini-2, Ocean Optics, USA)，以及鹵素燈光源(Light Source, L-150W, Optima)之近紅外線波段。

圖 3.1 為 SU-8-50 在可見光至近紅外線波段的光穿透性量測結果，在近 UV 波段中，有極佳的光穿透性，此特性可讓 SU-8 光阻得到均勻的曝光劑量(Exposure dose)，有助於獲得結構的垂直側壁，使其適合於厚膜製程的應用。而在近紅外線波段的光穿透率也都在 95% 以上，因此由量測結果證實，SU-8-50 在可見光至近紅外線波段，具有相當高的穿透力，相當適合作為應用在光纖微透鏡的材料，並且適用波長為 1310 nm 之 Fabry-Perot 雷射晶片作為光源。

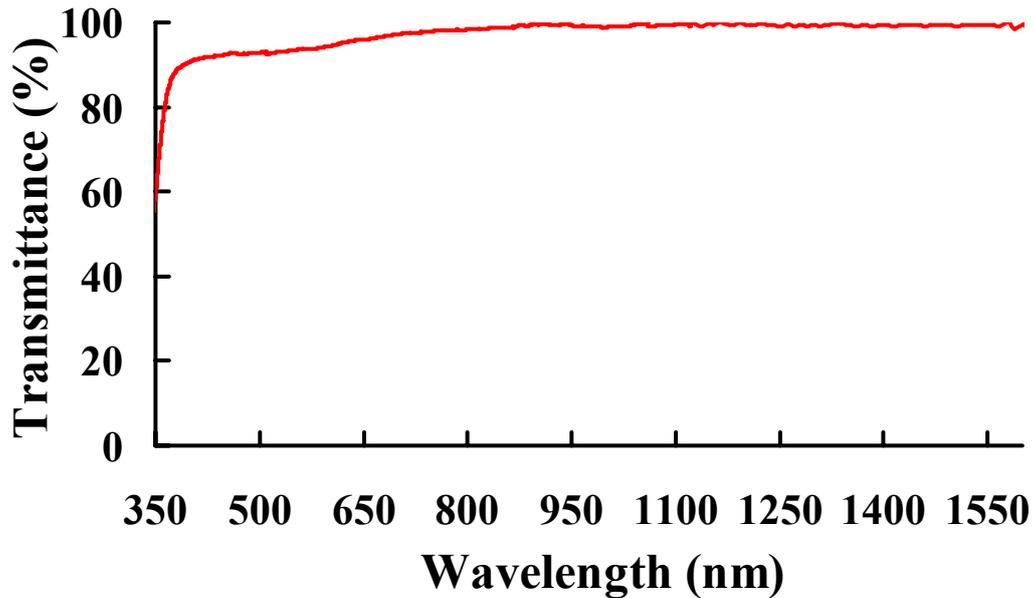


圖 3. 1 厚度為 50 μm 之 SU-8-50 光阻在可見光至近紅外線波段的光
 穿透率

3.2 光纖透鏡製程

本研究所使用之塑膠光纖為外徑 500 μm 、核心直徑為 120 μm 之多模漸變折射率光纖(LGR01A012L, Asahi Glass, Japan)，其材質為氟化樹脂(Fluoropolymers)，折射係數為 1.5，數值孔徑為 0.17，傳輸損耗在 1.3 μm 及 1.55 μm 的波段，較傳統的 PMMA 材質為低[38]；玻璃光纖為外徑 125 μm 、核心 9 μm 之單模光纖(SM/125, POFC, Taiwan)，折射係數為 1.467。

1. 塑膠光纖透鏡

本研究所提出之塑膠光纖透鏡製程架構如圖 3.2 所示，而製程步驟如下所示：

A. 光纖之研磨

利用光纖切斷器，裁剪數支長度為50 cm之塑膠光纖，並將光纖的兩個端面研磨平整，首先利用#2000之砂紙，作光纖端面的第一次研磨，然後用酒精擦拭端面，再利用#3000之砂紙進行第二次的研磨修整，然後將光纖置入超音波震盪機，用酒精震盪1分鐘，最後擦拭光纖端面及本體，完成後置於顯微鏡底下觀察，觀察光纖端面是否平整與潔淨。

B. SU-8光阻的塗佈及軟烤

先準備乾淨之玻璃基板，將其置於旋轉塗佈機(Spin coater)上，並將SU-8光阻適量的滴在玻璃基板中間，以旋轉離心的方式，利用兩段式的旋塗，將光阻均勻塗佈在玻璃表面，第一階段設定轉速為500 rpm，持續旋塗30秒，第二階段利用1000 rpm之轉速持續旋塗30秒，使玻璃基板表面上形成100 μm 厚度之SU-8光阻，然後將玻璃基板至於加熱板上進行軟烤，充分去除光阻層內的溶劑(Solvent)，軟烤溫度為90°C，時間為20分鐘。

C. 光纖固定及SU-8沾附

將光纖置入預先製作好的導電極板中固定，並鎖定於精密移動平台上，利用CCD(DXC-190, Sony, Japan)作側面取像，將光纖頭端露出適當長度，此外，將經軟烤過後的SU-8光阻放置在與光纖垂直之下基

板上，然後操作平台向下移動，使光纖端面與SU-8表面接觸，利用光纖表面對SU-8光阻的附著力，附著些許SU-8在光纖端面，再移動平台向上，將SU-8拉起，因SU-8自身的表面張力，會在光纖端面形成一個半球狀的液滴，在光纖沾附的過程中，必須持續利用高熱度之鹵素燈(200W, 60°C)照射，使SU-8光阻的溫度始終保持在 T_g 點以上，避免SU-8在基板上形成固態薄膜。

D. 靜電力拉伸

以上述點膠之架構，將玻璃基板置換成一個導電極板，並將上下極板接上高壓電源供應器(MP3500, Major Science, Taiwan)，下極板給予接地(Ground)，上極板給予正高壓，在極板間形成一均勻電場，此時，液滴內的負電荷會被上極板處的正電壓所吸引，使得液滴表面帶有較多的正電荷，在電場的作用下，會驅使液滴內的正電荷更往液滴中心集中，而使SU-8逐漸被拉伸成為非球面狀，在靜電力拉伸的過程當中，我們也持續利用鹵素燈來照射SU-8光阻。本製程利用電源供應器提供不同之電壓，來形成不同的電場強度，可製作出各種不同曲率的光纖透鏡。

E. 微透鏡的固化

SU-8光阻經過靜電力拉伸後，先將鹵素燈源關閉，再利用UV光源(350 nm~400 nm)照射15分鐘，使光纖頭端之SU-8逐漸固化成型。

一般而言，SU-8光阻在製程中經UV曝光後，在光阻顯影前必須經過曝光後烘烤(Post exposure bake, PEB)的程序，其目的是藉由熱量來加速已曝光光阻的鏈結，以利獲得垂直側壁的結構，而PEB的程序是在溫度為95°C、水平的加熱板上進行，烘烤時間遠短於軟烤時間。但因為PEB的不足與過量，會對微結構的品質產生不良的影響，例如顯影不乾淨、深寬比變小、結構變形或破裂等等，且本製程並無後續的顯影程序，故在本製程中，省略了曝光後烘烤的動作。

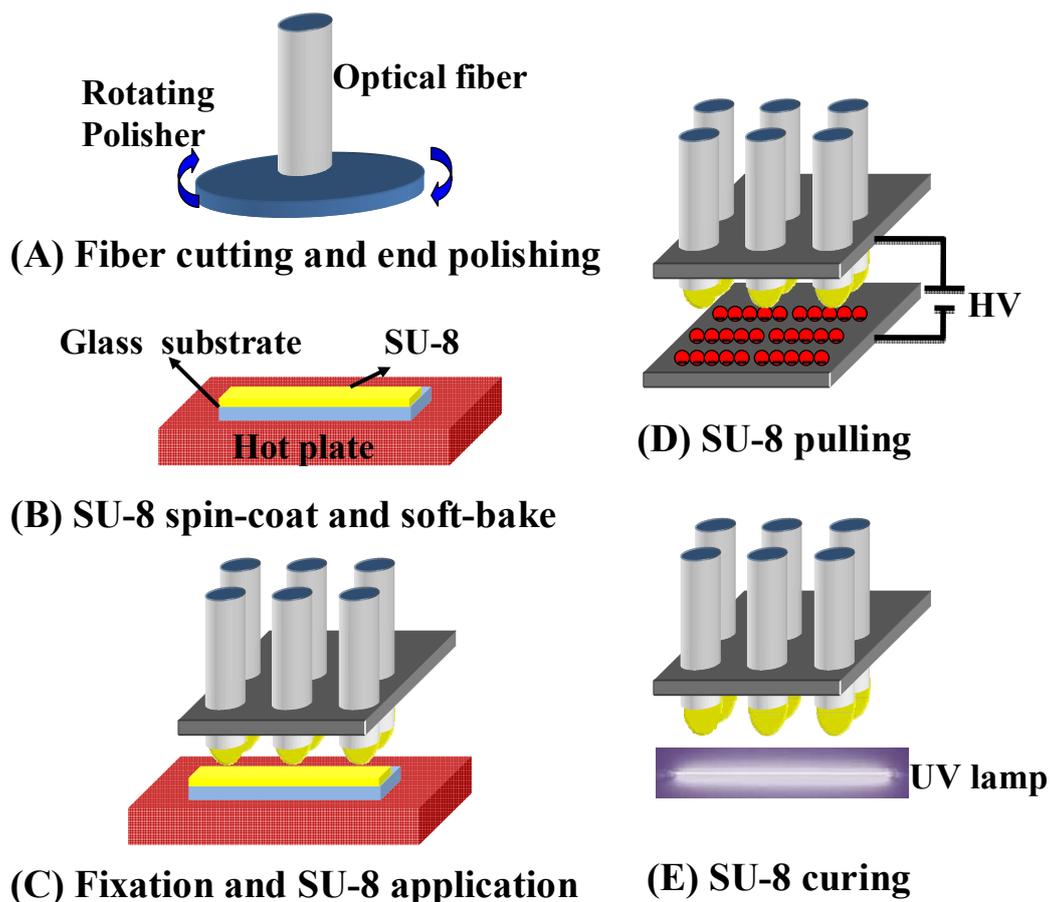


圖 3.2 光纖微透鏡製程示意圖

經由施加電壓產生之均勻電場，對 SU-8 進行靜電力拉伸及固化後，可在塑膠光纖端面上形成一個非球面的微透鏡，此製程在穩定的狀態下，可製作出最小曲率半徑為 $62\ \mu\text{m}$ ($E=2.25\times 10^6\ \text{V/m}$) 之光纖透鏡，而詳細的電場強度與透鏡曲率關係，將在第四章作討論。當電場強度 E 大於 $2.25\times 10^6\ \text{V/m}$ 時，在靜電力拉伸的過程，SU-8 的前端會因為突破液體的表面張力，進而產生液滴噴射的情況，此現象稱為電紡織，使製程無法被穩定控制，所以微透鏡的製作將受到此現象的產生所影響。

文獻上所提出高耦合效率的光纖透鏡，透鏡的曲率半徑皆相當小，因此，本研究為了製作出更小曲率半徑的光纖透鏡，所以對光纖作第二次點膠及靜電力拉伸的實驗。我們將第一次拉伸，所產生最小曲率半徑為 $62\ \mu\text{m}$ ($E=2.25\times 10^6\ \text{V/m}$) 的光纖透鏡，再利用如實驗架構圖 3.2 中的(B)至(E)步驟，作第二次的光阻沾附及拉伸，把 SU-8 光阻附著在一個非球面的表面上，再進行靜電力拉伸及 UV 光固化。而經由第二次拉伸所製作之光纖透鏡，最小之曲率半徑可達 $40\ \mu\text{m}$ ($E=2.375\times 10^6\ \text{V/m}$)。

2. 玻璃光纖透鏡

塑膠光纖可廣泛應用在短距離的傳輸及感測器上，但由於傳輸損耗較大，所以目前在長距離傳輸的應用上，仍以玻璃光纖為主流，而

且本製程並不受限於應用在塑膠光纖上，所以，我們將本實驗架構沿伸至玻璃光纖透鏡的製作。玻璃光纖透鏡的製作流程以及步驟，都與塑膠光纖相同，如圖 3.2 所示，但由於玻璃光纖的表面能(Surface energy)較高，所以對 SU-8 的附著性較強，造成 SU-8 在玻璃光纖斷面上表面張力較大，在進行靜電力拉伸時，要施以較大之電場強度。經由第一次靜電力拉伸，所產生之玻璃光纖透鏡，固化後的最小曲率半徑為 $40\ \mu\text{m}$ ($E=3.5\times 10^6\ \text{V/m}$)，而以曲率半徑為 $40\ \mu\text{m}$ 的光纖透鏡作第二次的光阻沾附及拉伸後，固化後的最小曲率半徑可達 $18\ \mu\text{m}$ ($E=3.95\times 10^6\ \text{V/m}$)。

3.3 點膠體積分析

利用靜電力拉伸的原理來製作光纖透鏡，光阻沾附時，點膠量的控制對於透鏡的成形影響非常大，因此，我們必須確定每次的點膠量都在容許的誤差範圍內，才能確保每一支光纖在相同條件下可製作出相同曲率半徑之微透鏡，以確保此製程之可行性。進行 SU-8 光阻沾附時，為了維持光阻的穩定性，我們將光阻軟烤後，溫度保持在 T_g 點以上進行實驗，由於實驗中是使用 CCD 作側面取像，點膠後也成軸對稱關係，因此，可由點膠後之側視圖來求得點膠體積，計算原理如圖 3.3 所示：

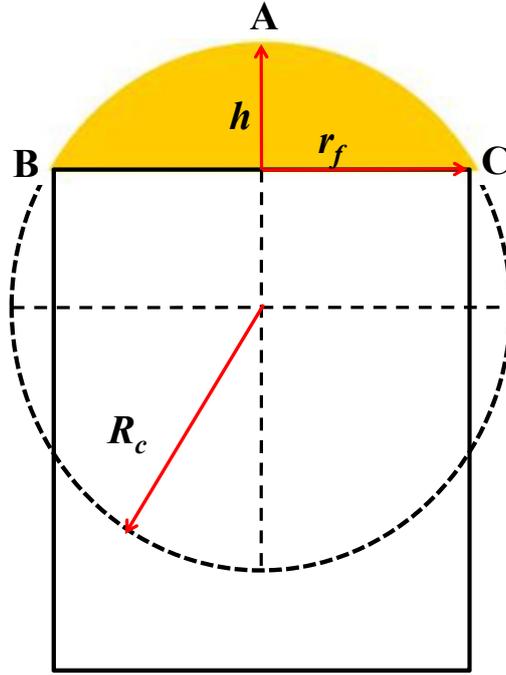


圖 3.3 光纖點膠體積計算示意圖

圖中，A、B、C 三點為點膠部分的球面頂點以及與光纖端面之接觸點，由幾何關係可知道任意三點可決定一個圓，因此，可透過圖中 A、B、C 三個點來求得點膠體積[21]。相關公式如下：

$$R_c = \frac{1}{2h}(h^2 + r_f^2) \quad (3-1)$$

$$h = \alpha - \frac{r_f^2}{\alpha} \quad (3-2)$$

$$\alpha = \left(\frac{3V_l + \sqrt{\pi^2 r_f^6 + 9V_l^2}}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3-3)$$

$$V_l = \frac{\pi(\alpha^6 - r_f^6)}{6\alpha^3} \quad (3-4)$$

其中 R_c 為曲率半徑、 h 為液滴高度、 r_f 為光纖半徑。我們已知塑膠光纖半徑為 250 μm ，而再由取像之圖片可以求得液滴高度，因此可透

過(3-2)式求得 α ，再透過(3-4)式便可求得實際液滴體積 V_l 。我們實際量測數支光纖之點膠量，經過公式換算之後，液滴體積約為 1.77×10^{-5} c.c.，且誤差範圍均保持在 3% 以內，所以此分析可驗證本實驗的點膠量誤差極小，影響本實驗製程非常有限。

3.4 光學性質之量測

本研究提出光纖透鏡製程架構之後，將實際量測微透鏡的光學性質，來彰顯其光學性能，主要分為光纖聚焦效率之量測、光束路徑傳播之量測及模擬、及光纖耦合效率之量測。

3.4.1 光纖聚焦之量測架構

光纖聚焦量測的目的，在於觀察光纖透鏡的光場能量分佈及對稱性，並可以突顯光纖透鏡的聚焦能力。我們實際架設一個光學實驗，比較雷射光通過平端光纖與光纖透鏡的差異，而對於本研究而言，所製作的光纖透鏡是軸對稱的非球面透鏡，所以理想的光場形狀為圓形的高斯分佈。圖3.4為所架設之光纖聚焦檢測系統示意圖，將光纖透鏡固定於顯微鏡的物鏡底下，而光纖尾端則固定於雷射準直儀(Laser collimator, ES01T, ONSET, Optic Ltd., Taiwan)，並打入鹵素燈光源，顯微鏡上則放置數片衰減片，防止CCD過度飽和，藉由調整物鏡與光纖透鏡之間的距離，可取得光纖透鏡在聚焦平面上的光強度分佈圖，

再利用MATLAB[®]撰寫一影像分析程式，將所擷取之影像轉換成以色階表示的光強度分析。

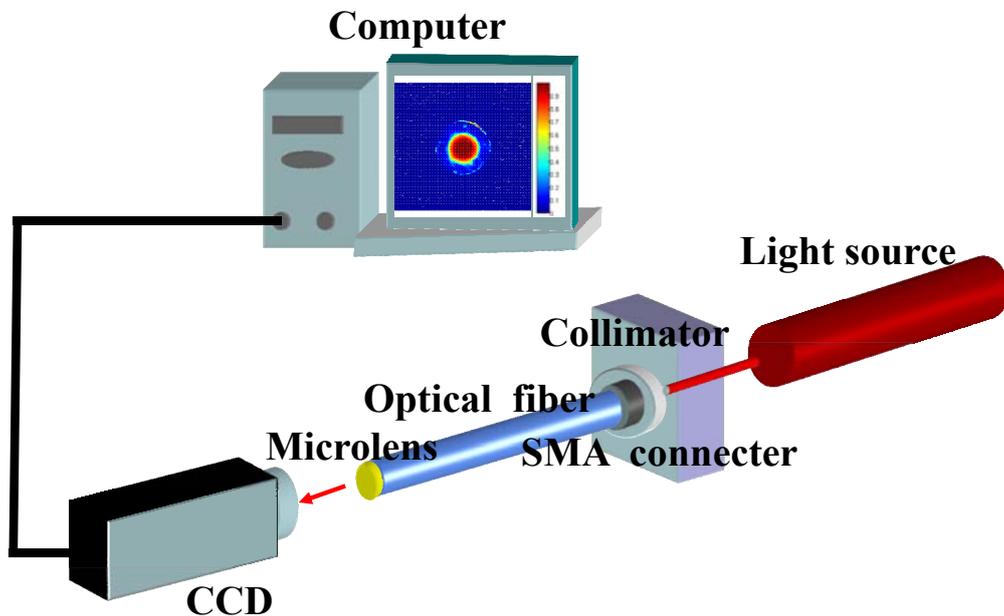


圖 3.4 光纖聚焦量測架構示意圖

3.4.2 光束路徑傳播之量測架構

光束路徑傳播量測的實驗，可以觀察到透鏡的聚焦行為，也可藉此觀察SU-8與光纖端面的接合狀況。實驗時，準備了平端光纖與光纖透鏡，光纖長度各為50 cm，來拍攝其光束路徑傳播圖。實驗方法為：先調配適當濃度(10^{-4} M)之螢光染劑(Rhodamine B, Acros Organics, USA)，將準備好之光纖平放至容器中固定，然後將螢光染劑倒入容器中，使光纖浸入稀釋後之螢光染劑中，將容器放置在顯微鏡(E400, Nikon, Japan)底下觀察，光纖尾端則打入綠光雷射(530 nm, 100mW, UNICE, Optic Ltd., Taiwan)，由於光纖內光束通過螢光物體會放射出

螢光，因而顯現出光束路徑，此時利用CCD取像，再將其轉換成灰階影像，即可透過此光束路徑傳播圖，觀察到光束被成功聚焦之情形。

3.4.3 光束路徑傳播之模擬方法

為了解光纖透鏡的聚焦特性，並與實驗所實際拍攝的光束路徑作比對，我們自光研科學(台灣)有限公司的軟體下載區，下載免費的ZEMAX[®]軟體學習版本，對製作完成之透鏡，作簡單的聚焦特性模擬，並可與實驗作為比對，以下針對ZEMAX[®]模擬之參數設定及步驟作簡單的說明。本實驗採用綠光雷射作為光束路徑檢測之光源，以及利用光纖作為光波導，因此我們在視窗中的波長資料(Wavelength Data)選項中，將波長設定為0.53 μm ，而光纖內部的傳導模態較為複雜，我們利用一個發散的點光源來代替，並將點光源的數值孔徑大小設定與光纖相同，使其發散角度相同，入射光源的直徑設定為與光纖的核心直徑大小相同(塑膠光纖為120 μm ，玻璃光纖為9 μm)，再由公式(1-4)之定義可求得點光源之位置。接著輸入光纖的折射係數為1.5、SU-8之折射係數為1.66、水中為1.33，然後於透鏡資料編輯器(Lens Data Editor)中，輸入微透鏡的曲率半徑(Radius)、中心厚度(Thickness)、材質(Glass)等參數。最後在分析光纖透鏡的光束傳導行為時，可先用分析功能(Analysis)中，2D Layout的功能，來觀察所建立的模型是否正確，確認無誤後即可得到理論的光束傳導模型。

3.4.4 耦合效率之量測架構

本實驗之耦光量測對位系統架設如圖 3.5 所示，先將欲量測之樣品以光纖夾持器夾持後，固定於精密移動平台上，並以通訊波長 1310 nm 之 Fabry-Perot 雷射晶片作為光源，將正負極的探針與雷射晶片的金屬層接觸，透過雷射電流供應器(Model 6000 Laser Diode Controller, Newport)來驅動，為了使雷射晶片的輸出功率穩定，所以將操作溫度保持在 25°C，驅動電流則為 50 mA，在功率的量測方面，將光纖尾端接上光偵測器(Model 818-IR Low-Power Detector, Newport)，再接上光功率計(Model 2832-C Dual-Channel Power meter, Newport)作量測。經過耦光量測設備架設完成後，須實際進行光纖與雷射晶片之對位，雷射晶片與光纖之相對位置如圖 3.6 所示，將 CCD 1 與 CCD 2 分別架設於雷射晶片之後方與側面，方便作對位的調整，並以精密平台驅動系統(Model ESP-300 Universal Motion Controller/Drover, Newport)來做微調。在實驗前，先以光功率計量測雷射晶片的原始輸出功率大小，然後再與光纖透鏡所量測的功率值做比較，以求得耦合效率。雷射與光纖之耦合效率的定義為[1]：

$$\eta = \frac{P_F}{P_S} \quad (3-5)$$

其中 P_F 為雷射光耦合進入光纖後，實際量測到之光功率， P_S 為雷射晶片原始輸出之光功率。

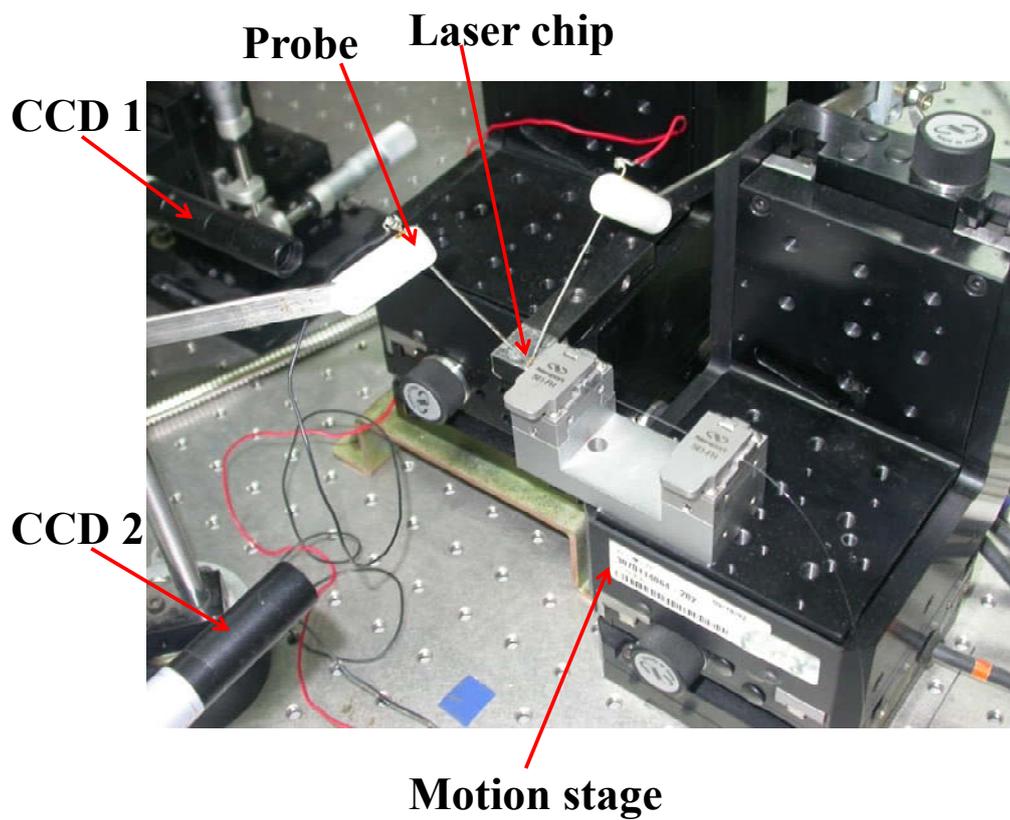


圖 3.5 光纖耦光量測對位系統架設

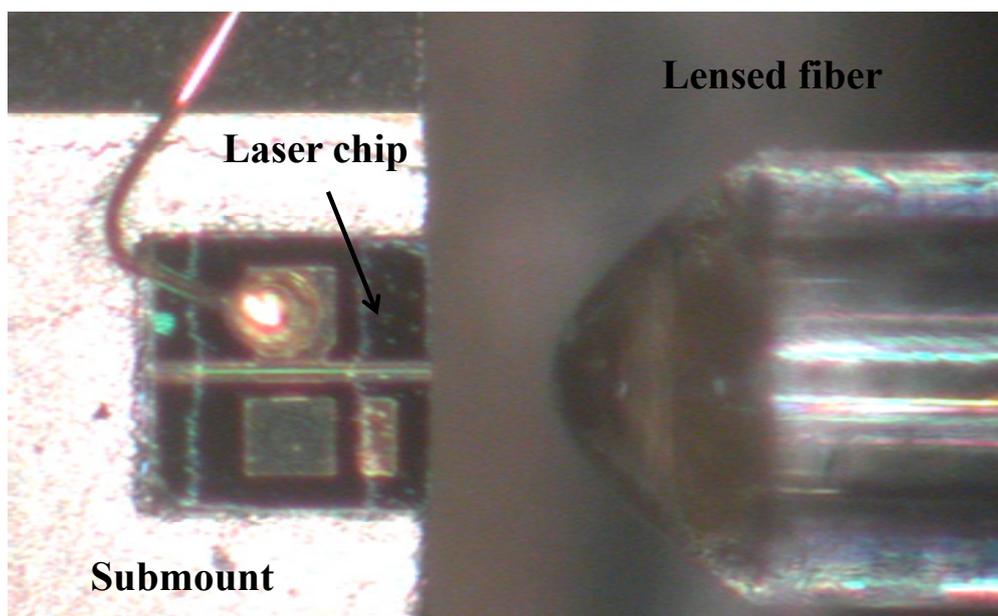


圖 3.6 光纖與雷射晶片相對位置之放大圖

第四章 結果與討論

4.1 SEM 探討

光纖透鏡的表面性質，會影響其光學性能，一般來說，微透鏡需要有平滑及潔淨的表面，才不會阻礙光束的傳輸，而將光纖透鏡放在一般的光學顯微鏡之下觀察，只可看出其表面輪廓及，對於表面之潔淨度則須利用掃描式電子顯微鏡(Scanning electron microscope, SEM)來觀察。我們將附著SU-8光阻後，未經靜電力拉伸之球面光纖透鏡，以及經過靜電力拉伸之非球面光纖透鏡，放入電子顯微鏡觀察，藉此觀察透鏡的表面性質。

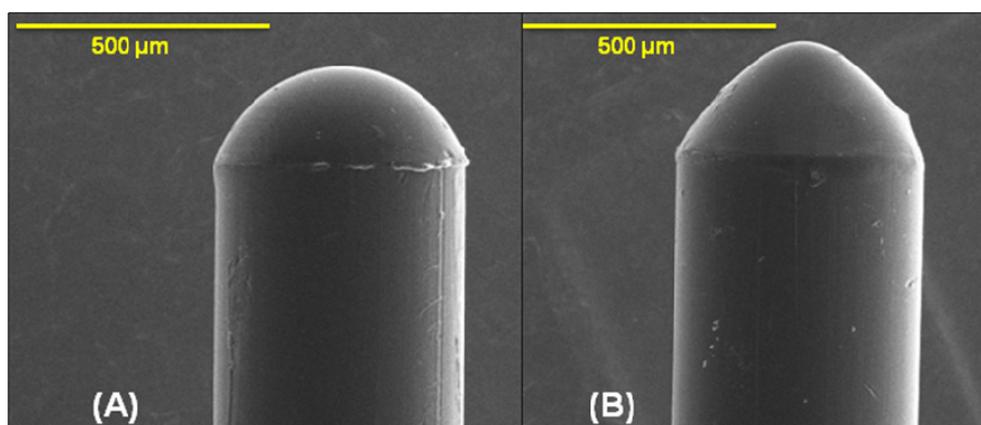


圖 4.1 (A)為未經靜電力拉伸之球面光纖透鏡($R=260 \mu\text{m}$)，(B)為經靜電力拉伸之非球面光纖透鏡($R=90 \mu\text{m}$)

圖 4.1 為塑膠光纖透鏡的 SEM 圖，其中(A)為未經靜電力拉伸之球面光纖透鏡($R=260 \mu\text{m}$)，(B)為經過靜電力拉伸之非球面光纖透鏡($R=90 \mu\text{m}$)。如圖所示，可以很清楚的看到透鏡經過靜電力拉伸後的

曲率變化，且透鏡表面具有相當高的平整度，相當有利於光纖與雷射光源之耦合，以及其它光學性能上的提升，且經本實驗在均勻電場下，所製作之光纖透鏡，固化成型後直接可達中心軸對稱的效果，可免除在過去的光學系統中，後續的對位及組裝等問題，也提升了其經濟效益。

4.2 透鏡曲率與電場關係

光纖透鏡曲率半徑的量測，是先利用光學顯微鏡拍下光纖透鏡之外型，然後將照片匯入電腦，以 CAD 軟體分析。首先利用軟體內建的尺寸標註功能，標示出光纖外徑的尺寸大小，再於照片中的透鏡前端繪製圓形的輪廓曲線，然後標註尺寸，如圖 4.2 所示，以此輪廓曲線量測微透鏡之曲率半徑，量測參數以已知的光纖外徑大小為相對比例尺，如此可計算出所求之微透鏡的曲率半徑。

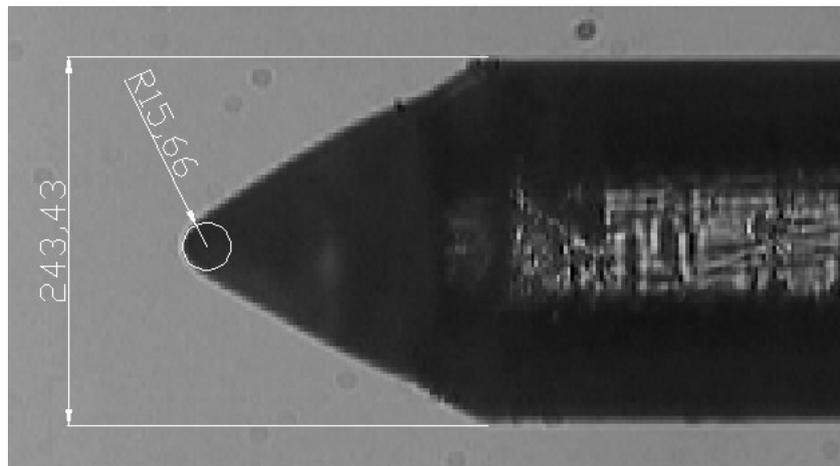


圖 4.2 光纖微透鏡曲率半徑計算示意圖

1. 塑膠光纖透鏡

塑膠光纖在經過 SU-8 光阻沾附後，形成的球面透鏡之曲率半徑為 260 μm ，經過靜電力拉伸後，透鏡之曲率半徑隨著電場強度的增加而減小，兩者關係如圖 4.3 所示。本實驗中，使球面微透鏡產生曲率變化之起始電場強度為 $1.62 \times 10^6 \text{ V/m}$ ，曲率半徑由 260 μm 變化至 226 μm ，而電場強度高達 $2.25 \times 10^6 \text{ V/m}$ 時，固化後之微透鏡曲率半徑為 62 μm ，當電場強度大於 $2.25 \times 10^6 \text{ V/m}$ 時，微透鏡在靜電力拉伸的過程中，會產生電紡織的現象，所以，塑膠光纖透鏡的第一次靜電力拉伸，所產生的最小曲率半徑為 62 μm 。我們利用曲率半徑為 62 μm 之光纖透鏡，進行第二次的光阻沾附及拉伸，第二次拉伸所應用的電場大小範圍為 $1.875 \times 10^6 \text{ V/m}$ 至 $2.375 \times 10^6 \text{ V/m}$ ，而電場強度高達 $2.25 \times 10^6 \text{ V/m}$ 以上時，透鏡曲率半徑的變化變趨於平緩，最終在電場強度為 $2.375 \times 10^6 \text{ V/m}$ 時，得到最小的透鏡曲率半徑為 40 μm 。

2. 玻璃光纖透鏡

玻璃光纖經過 SU-8 光阻沾附後，形成的球面透鏡之曲率半徑為 62 μm ，在經過施加電場後，透鏡之曲率半徑隨著電場強度增加而減小，兩者關係如圖 4.4 所示，要使球面微透鏡產生曲率變化之起始電場強度為 $3 \times 10^6 \text{ V/m}$ ，此時曲率半徑由 62 μm 變化至 55 μm ，當電場強度高達 $3.5 \times 10^6 \text{ V/m}$ 時，固化後之微透鏡曲率半徑為 40 μm ，當電

場強度大於 3.5×10^6 V/m 時，則微透鏡會產生電紡織的現象，所以，玻璃光纖透鏡的第一次靜電力拉伸，所產生的最小曲率半徑為 40 μm 。我們利用曲率半徑為 40 μm 之光纖透鏡，進行第二次光阻的沾附及拉伸，第二次拉伸所應用的電場大小範圍為 3.17×10^6 V/m 至 3.95×10^6 V/m，當電場強度高達 3.9×10^6 V/m 以上時，透鏡曲率半徑的變化變趨於平緩，最終在電場強度為 3.95×10^6 V/m 時，得到固化後最小透鏡曲率半徑為 18 μm 。

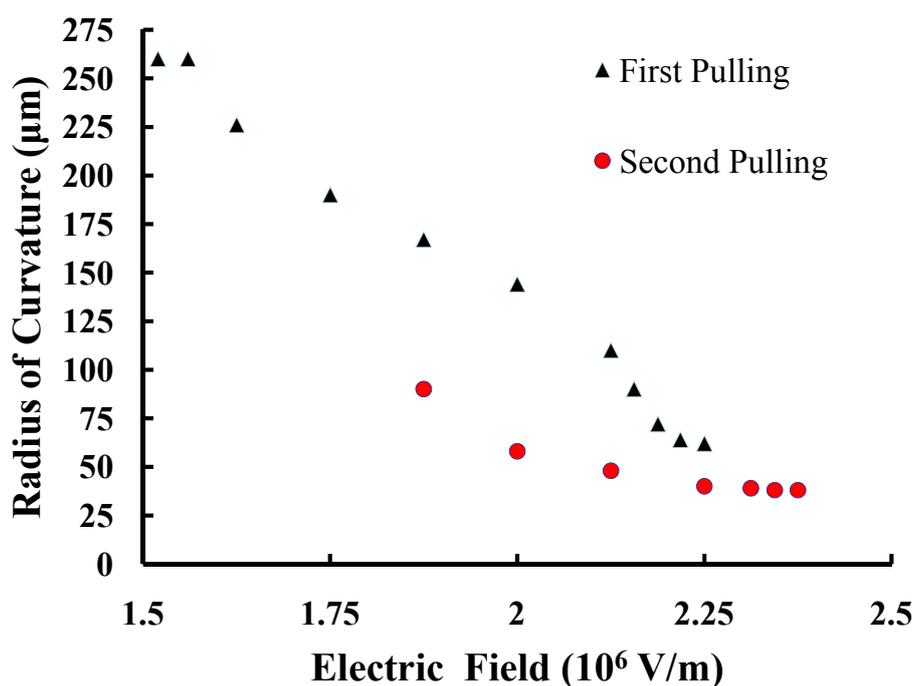


圖 4.3 塑膠光纖透鏡之電場強度與曲率半徑關係

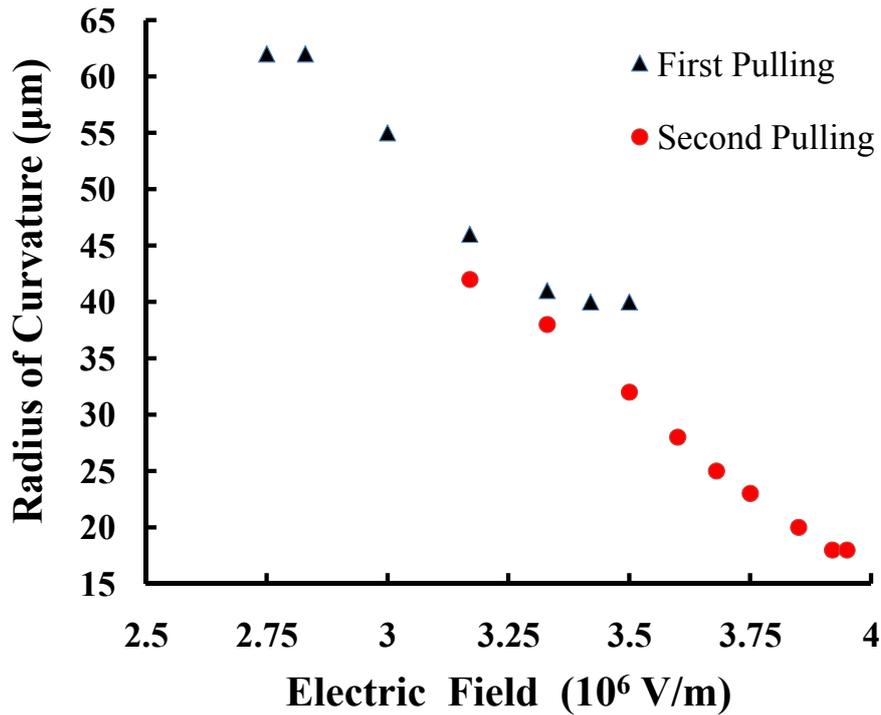


圖 4.4 玻璃光纖透鏡之電場強度與曲率半徑關係

4.3 光纖聚焦之量測結果

光纖聚焦之量測，是在光纖尾端的斷面打入可見光源，並利用 CCD 來取像，進而利用程式來分析其強度分佈。為了觀察光纖透鏡的聚焦性能，所以利用核心與外徑大小相當接近之多模級射率塑膠光纖來製作微透鏡，光纖外徑為 $500 \mu\text{m}$ ，分別量測平端光纖(Flat end)、球面光纖透鏡(Spherical end, $R=260 \mu\text{m}$)、以及非球面光纖透鏡(Non-Spherical end, $R=62 \mu\text{m}$)之聚焦行為。如圖 4.5 所示，平端光纖的整個斷面，光強度呈均勻分布的狀態；而球面光纖透鏡可將光源集中在透鏡中心，能量分佈則呈同心圓分佈；非球面光纖透鏡則能將光點縮得更小、更為集中，強度分佈則以色階表示。

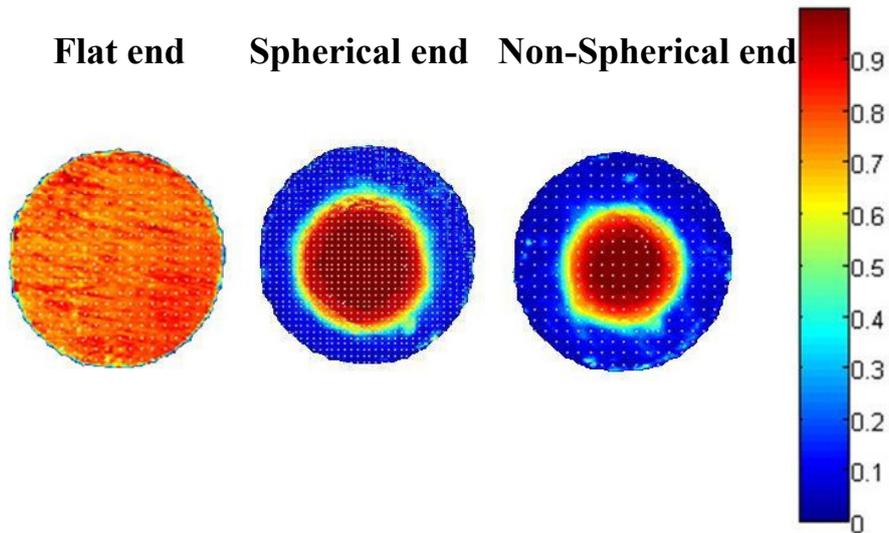


圖 4.5 平端光纖、球面光纖透鏡、非球面光纖透鏡之聚焦量測結果

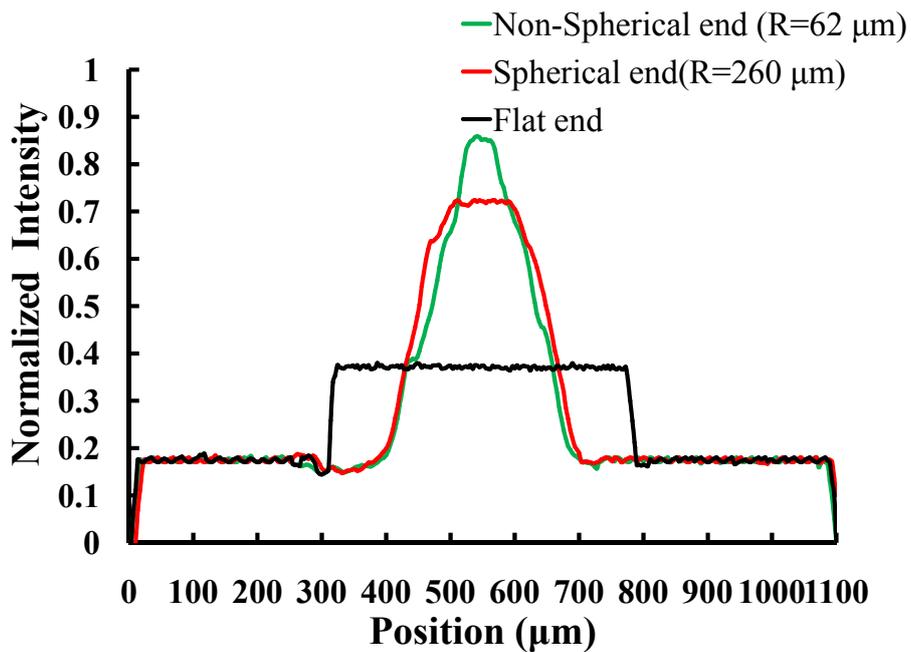


圖 4.6 正規化後之光纖聚焦強度分析

圖 4.6 為利用圖 4.5 所量測之平端光纖、球面光纖、及非球面光纖之聚焦結果，來做正規化(Normalize)的強度分析，由此圖可知：光纖傳輸之光源經由球面透鏡的聚焦，光強度往中心集中，而非球面之

光纖透鏡則有效將光點更為集中，中心的光強度更大。

4.4 光束路徑傳播之量測與模擬結果

圖 4.7 為光纖的光束路徑傳播量測及模擬結果，其中(A)為平端的塑膠光纖，由於本實驗是在光纖尾端的整個端面打入雷射光源，所以光纖披覆層及核心的部分都會有導光，由圖中可看出平端光纖之光束分布均勻且向外發散。(B)為曲率半徑 90 μm 的塑膠光纖透鏡，由此圖可突顯出光束經由透鏡的聚焦行為。(C)為利用 ZEMAX[®] 軟體所模擬的塑膠光纖透鏡聚焦圖，參數設定上，我們利用一個發散的點光源通過微透鏡去做模擬，設定光源的數值孔徑為 0.17，透鏡中心受光區域大小為 120 μm ，曲率半徑為 90 μm ，此圖可與(B)之實驗結果作比較。圖 4.7(D)為平端的玻璃光纖之光束路徑傳播圖，實驗時在光纖端面打入強光，使得光纖披覆層有部分導光，所以圖中光束直徑較光纖核心直徑 9 μm 為大，光束也呈發散的現象。(E)圖為曲率半徑 25 μm 之玻璃光纖透鏡，圖中顯示光束經過透鏡的聚焦之後，光束的直徑被大量的縮小。(F)圖則為模擬之光纖透鏡聚焦圖，模擬之條件與實驗的圖(E)相同，可與其作比較。

本實驗可觀察到光纖經由透鏡的聚焦行為，且由實驗結果得知 SU-8 與光纖的接合相當完整，能有效避免光源從接合面遺漏所造成的損失，並利用軟體模擬加以驗證光纖透鏡的聚焦行為。

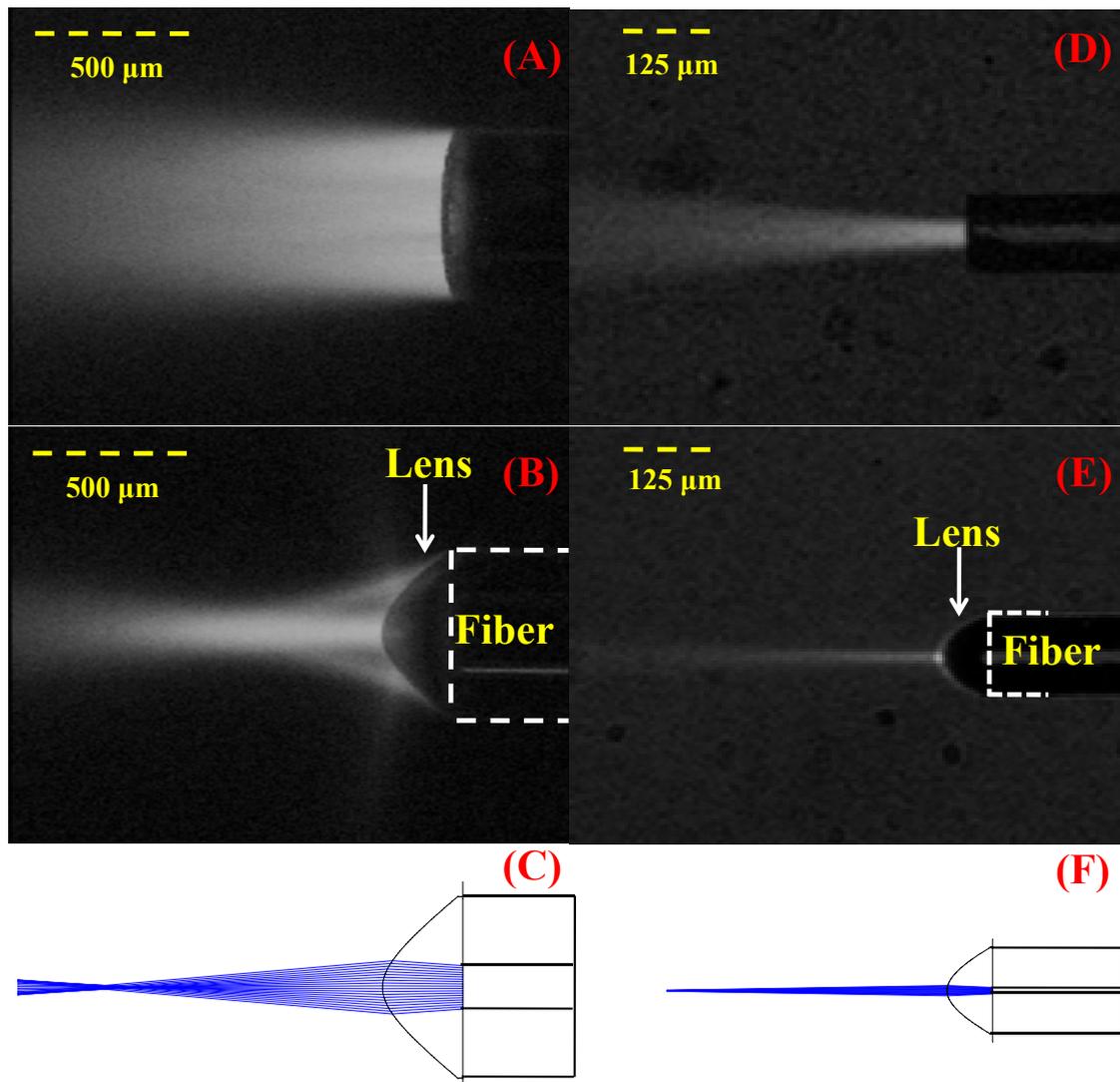


圖 4.7 塑膠及玻璃光纖透鏡之光束路徑傳播與模擬

4.5 耦合效率之量測結果

1. 塑膠光纖透鏡

塑膠光纖透鏡耦合效率的量測，是將光纖與光源經過精密對位之後，從光纖與光源間的距離為零開始量測，而光纖每次移動之橫向距離為 $10\ \mu\text{m}$ ，並記錄光纖透鏡之曲率半徑、耦合效率(Coupling

efficiency, CE)、及工作距離(Distance, D)的關係。其耦合效率與透鏡曲率半徑之關係，整理如圖 4.8 所示，在平端光纖的耦光實驗中，量得的最高耦合效率為 40%，未經靜電力拉伸的球面光纖透鏡($R=260\ \mu\text{m}$)，所量測之最高耦合效率為 42.5%，由量測結果顯示，隨著微透鏡曲率半徑漸漸變小，耦合效率也逐漸向上提升，在微透鏡曲率半徑為 $48\ \mu\text{m}$ 時，有最高的耦合效率為 78%，高出平端光纖近 2 倍，為塑膠光纖最佳的耦光曲率半徑，然而，曲率半徑小於 $48\ \mu\text{m}$ 時，耦合效率開始向下遞減，在最小的曲率半徑為 $40\ \mu\text{m}$ 時，耦合效率只有 62%。在上述討論過光纖透鏡的最佳耦合效率之後，我們整理出平端光纖(Flat end)、球面光纖透鏡(Spherical end, $R=260\ \mu\text{m}$)，以及非球面光纖透鏡(Non-spherical end, $R=48\ \mu\text{m}$)之耦合效率與距離的關係，如圖 4.9 所示。由量測結果得知：平端光纖的耦合因為沒有經過透鏡的聚焦，所以光纖需在非常靠近雷射晶片發光區域時，才有最高之耦合效率為 40%，然而隨著工作距離的增加而耦合效率逐漸遞減；球面光纖透鏡因為未經靜電力拉伸，所以透鏡本身的曲率半徑較大，聚焦性質較為不佳，量測之最高耦合效率為 42.5%，工作距離為 $70\ \mu\text{m}$ ；非球面光纖透鏡在工作距離為零時，耦合效率只有 28%，隨著距離的增加，耦合效率也幾乎呈線性增加，直到距離為 $90\ \mu\text{m}$ 時，有最佳的耦合效率為 78%，之後隨著距離而遞減。文獻上所提出，經過最佳化設

計的微透鏡，熔接在塑膠光纖的端面上，所量得的最高耦合效率為 80%[39]，而本研究所提出之光纖透鏡的最高耦合效率達 78%，與其相較之下，較具大量生產的特性。

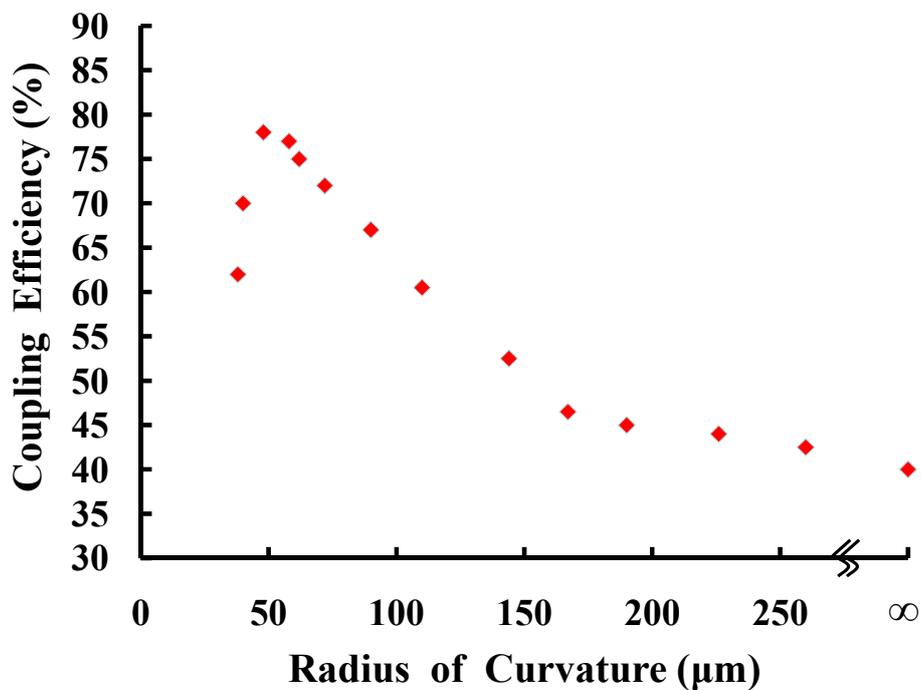


圖 4.8 塑膠光纖透鏡之耦合效率與曲率半徑關係

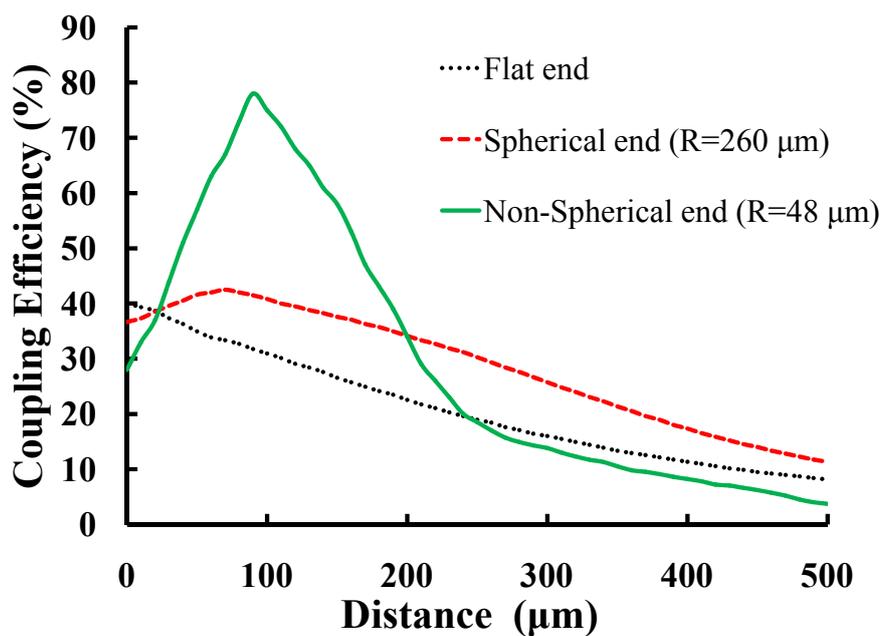


圖 4.9 塑膠光纖透鏡之耦合效率與距離關係

2. 玻璃光纖透鏡

玻璃光纖的耦合效率量測，在光纖與光源對準後，每次移動之橫向距離為 $2\ \mu\text{m}$ 。玻璃光纖透鏡的耦合效率與透鏡曲率半徑之關係整理如圖 4.10 所示。在平端光纖之耦光實驗中，量得之最高耦合效率為 31%，球面光纖透鏡所量測之最高耦合效率為 33%。而隨著微透鏡曲率半徑漸漸變小，耦合效率也逐漸向上提升，在透鏡曲率半徑為 $23\ \mu\text{m}$ 時，有最高的耦合效率為 72%，高出平端光纖 2.3 倍，為玻璃光纖最佳的耦光曲率半徑，然而，曲率半徑小於 $23\ \mu\text{m}$ 時，耦合效率開始向下遞減，在最小的曲率半徑 $18\ \mu\text{m}$ 時，耦合效率為 69%。圖 4.11 為平端光纖、球面狀光纖透鏡($R=62\ \mu\text{m}$)，以及非球面狀光纖透鏡($R=23\ \mu\text{m}$)之耦合效率與距離的關係。由量測結果得知：平端光纖的耦光，光纖在非常靠近雷射晶片的發光區域，有最高之耦光效率 31%，然而隨著工作距離的增加而逐漸遞減。球面光纖透鏡最高耦合效率為 33%，工作距離為 $20\ \mu\text{m}$ 。非球面狀光纖透鏡在距離為零時，耦合效率只有 28%，隨著距離的增加，耦合效率也線性增加，直到距離為 $24\ \mu\text{m}$ 時，有最佳的耦合效率為 72%，之後隨著距離而遞減。經最佳化設計後的非球面透鏡，接合到單模光纖上時，所量測的耦合效率可達到近 90%[40]，而本研究若先將單模光纖與漸變折射率光纖作結合，再製作透鏡，耦合效率可望再向上提高。

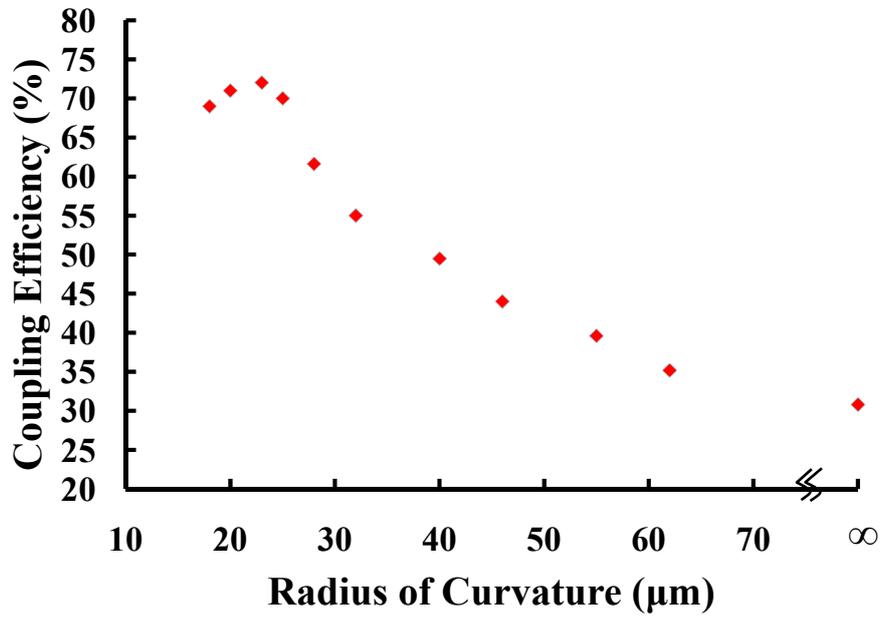


圖 4.10 玻璃光纖透鏡之耦合效率與曲率半徑關係

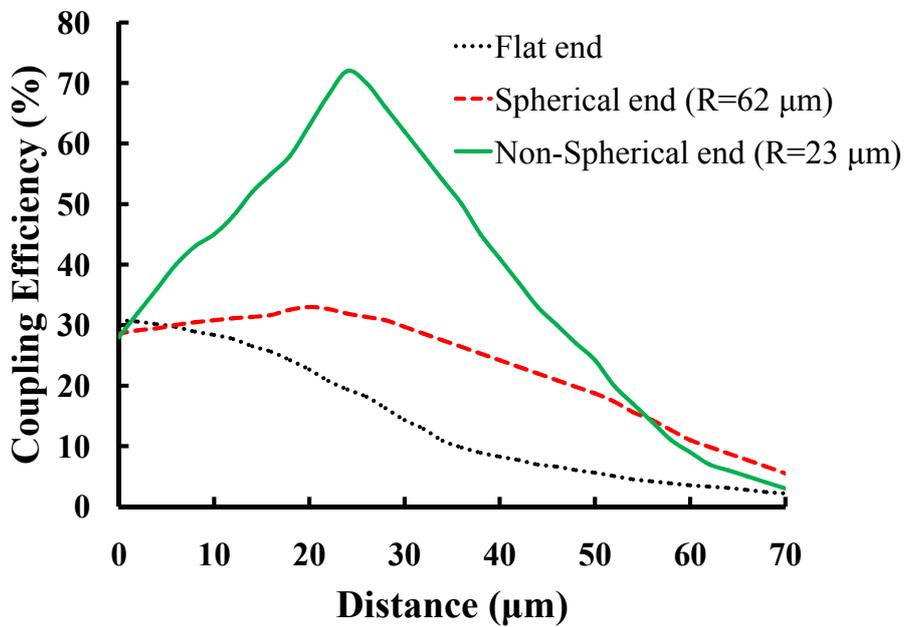


圖 4.11 玻璃光纖透鏡之耦合效率與距離關係

第五章 結論與未來展望

5.1 結論

本研究成功地驗證利用靜電力拉伸 SU-8 光阻，來製作光纖透鏡的製程技術，此製程可利用施加不同的電場強度，製作出不同曲率半徑之微透鏡。實驗結果並證實，光纖透鏡具有相當好之表面平整度，且在均勻電場的作用下，透鏡能直接達到中心對稱的效果，有助於光纖的聚焦以及耦合等性能的提升。在利用雷射激發液相螢光染料之光束路徑傳播實驗中，成功地觀察到光纖透鏡的聚焦效果，其結果與光學模擬軟體 ZEMAX[®]之預測相同。光纖耦合實驗結果得知，外徑為 500 μm 漸變折射率之塑膠光纖在其前端直接製作光纖透鏡後，其耦合效率從無透鏡平端光纖的 40% 提升至 78% ($R=48 \mu\text{m}$)，最佳的工作距離為 90 μm 。外徑為 125 μm 單模玻璃光纖則由 31% 提升至 72% ($R=23 \mu\text{m}$)，最佳的工作距離為 24 μm 。

本研究與其它 UV 點膠固化成型之光纖透鏡相較，SU-8 固化後表面非常堅硬，機械性質佳，且可經由不同的電場大小來改變透鏡曲率。部分 UV 膠經固化後仍呈軟化現象，較易變形，且受限於液滴的表面張力，點膠法並無法製作出曲率非常小之透鏡。而與傳統的熔燒、蝕刻、研磨等光纖透鏡製造技術相較，雖無極高之耦合效率，但本製程有著低成本、快速製作、製程穩定、大量生產且不限光纖種類

等特色，並可免除傳統利用光纖耦合器，所需的透鏡組裝、對位等後加工製程，大量簡化了光學系統的複雜性，相當具商業化的潛力。

5.2 未來展望

本研究提出之實驗架構，在塑膠光纖及單模光纖上，可快速及穩定的製作光纖透鏡，且大幅提升其耦合效率，未來的研究上，可先將光纖作適當的表面形狀加工，例如研磨成楔形，或其它幾何形狀，使光纖斷面之表面積更小，以利於製作出曲率半徑更小或非對稱形之光纖透鏡，單模光纖也可先行與漸變折射率光纖作熔融結合，在進行光阻沾附及靜電力拉伸的製程，另一方面，也可設計不同的電極形狀，例如製作針狀電極或移動式電極，改變電場及電力線的分佈，利於控制光纖透鏡的幾何形狀，以期得到更高的耦合效率。然而，在光學模擬方面，希望透過光學模型的建立、或程式的撰寫，由目前簡單的光束聚焦模擬，延伸至光纖耦合效率的模擬，使本研究內容更為深入且完整。此外，光纖本身也是一種良好的感測元件，光纖透鏡的應用方面，可將微透鏡的部分視為一個共振腔體，應用在生醫檢測上。

參考文獻

- [1] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, third ed, McGraw-Hill, 2000.
- [2] 李銘淵, *光纖通信概論*, 全華科技圖書股份有限公司, 2005.
- [3] T. Ishigure, E. Nihei, and Y. Koike, "Graded-Index Polymer Optical-Fiber for High-Speed Data Communication," *Applied Optics*, vol. 33, pp. 4261-4266, 1994.
- [4] D. L. Franzen, "Determining the Effective Cutoff Wavelength of Single-Mode Fibers - an Interlaboratory Comparison," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 3, pp. 128-134, 1985.
- [5] L. G. Cohen and M. V. Schneider, "Microlenses for Coupling Junction Lasers to Optical Fibers," *Applied Optics*, vol. 13, pp. 89-94, 1974.
- [6] M. Sumida and K. Takemoto, "Lens Coupling of Laser-Diodes to Single-Mode Fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 2, pp. 305-311, 1984.
- [7] R. G. Wilson, "Ball-lens coupling efficiency for laser-diode to single-mode fiber: comparison of independent studies by distinct methods," *Applied Optics*, vol. 37, pp. 3201-3205, 1998.
- [8] M. He, J. Bu, B. H. Ong, and X. Yuan, "Two-microlens coupling scheme with revolved hyperboloid sol-gel microlens arrays for high-power-efficiency optical coupling," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, pp. 2940-2945, 2006.
- [9] S. Y. Huang, C. E. Gaebe, K. A. Miller, G. T. Wiand, and T. S. Stakelon, "High coupling optical design for laser diodes with large aspect ratio," *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 23, pp. 165-169, 2000.
- [10] H. Kuwahara, M. Sasaki, and N. Tokoyo, "Efficient Coupling from Semiconductor-Lasers into Single-Mode Fibers with Tapered Hemispherical Ends," *Applied Optics*, vol. 19, pp. 2578-2583, 1980.
- [11] A. Ogura, S. Kuchiki, K. Shiraishi, K. Ohta, and I. Oishi, "Efficient coupling between laser diodes with a highly elliptic field and single-mode fibers by means of GIO fibers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, pp. 1191-1193, 2001.

- [12] K. Shiraishi, H. Yoda, T. Endo, and I. Tomita, "A lensed GIO fiber with a long working distance for the coupling between laser diodes with elliptical fields and single-mode fibers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, pp. 1104-1106, 2004.
- [13] H. Yoda and K. Shiraishi, "A new scheme of a lensed fiber employing a wedge-shaped graded-index fiber tip for the coupling between high-power laser diodes and single-mode fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, pp. 1910-1917, 2001.
- [14] S. M. Yeh, S. Y. Huang, and W. H. Cheng, "A new scheme of conical-wedge-shaped fiber endface for coupling between high-power laser diodes and single-mode fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, pp. 1781-1786, 2005.
- [15] G. Eisenstein and D. Vitello, "Chemically Etched Conical Microlenses for Coupling Single-Mode Lasers into Single-Mode Fibers," *Applied Optics*, vol. 21, pp. 3470-3474, 1982.
- [16] T. Alder, A. Stohr, R. Heinzelmann, and D. Jager, "High-efficiency fiber-to-chip coupling using low-loss tapered single-mode fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, pp. 1016-1018, 2000.
- [17] H. M. Yang, S. Y. Huang, C. W. Lee, T. S. Lay, and W. H. Cheng, "High-coupling tapered hyperbolic fiber microlens and taper asymmetry effect," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, pp. 1395-1401, 2004.
- [18] H. M. Presby and C. R. Giles, "Asymmetric Fiber Microlenses for Efficient Coupling to Elliptic Laser-Beams," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, pp. 184-186, 1993.
- [19] A. J. C. Grellier, N. K. Zayer, and C. N. Pannell, "Heat transfer modelling in CO₂ laser processing of optical fibres," *Optics Communications*, vol. 152, pp. 324-328, 1998.
- [20] H. Sakata and A. Imada, "Lensed plastic optical fiber employing concave end filled with high-index resin," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, pp. 638-642, 2002.
- [21] K. R. Kim, S. L. Chang, and K. Oh, "Refractive microlens on fiber using UV-curable fluorinated acrylate polymer by surface-tension," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, pp. 1100-1102, 2003.
- [22] J. K. Kim, D. U. Kim, B. H. Lee, and K. Oh, "Arrayed multimode fiber to VCSEL coupling for short reach communications using hybrid polymer-fiber lens," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, pp. 951-953, 2007.

- [23] K. Sambanthan and F. A. Rahman, "Method to improve the coupling efficiency of a hemispherically lensed asymmetric tapered-core fiber," *Optics Communications*, vol. 254, pp. 112-118, 2005.
- [24] J. T. Horng and D. C. Chang, "Coupling an Elliptical Gaussian-Beam into a Multimode Step-Index Fiber," *Applied Optics*, vol. 22, pp. 3887-3891, 1983.
- [25] W. B. Joyce and B. C. Deloach, "Alignment-Tolerant Optical-Fiber Tips for Laser Transmitters," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 3, pp. 755-757, 1985.
- [26] C. A. Edwards, H. M. Presby, and C. Dragone, "Ideal Microlenses for Laser to Fiber Coupling," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 11, pp. 252-257, 1993.
- [27] S. Gangopadhyay and S. Sarkar, "ABCD matrix for reflection and refraction of Gaussian light beams at surfaces of hyperboloid of revolution and efficiency computation for laser diode to single-mode fiber coupling by way of a hyperbolic lens on the fiber tip," *Applied Optics*, vol. 36, pp. 8582-8586, 1997.
- [28] L. A. Wang and C. D. Su, "Tolerance analysis of aligning an astigmatic laser diode with a single-mode optical fiber," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, pp. 2757-2762, 1996.
- [29] W. T. Chen and L. A. Wang, "Out-of-plane optical coupling between an elliptical Gaussian beam and an angled single-mode fiber," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, pp. 1589-1595, 1998.
- [30] V. P. Coleta, *College Physics*, McGraw-Hill, 1996.
- [31] G. Taylor, "Disintegration of Water Drops in an Electric Field," *Mathematical and Physical Sciences* vol. 280, pp. 383-397, 1964.
- [32] O. Sandre, L. Gorre-Talini, A. Ajdari, J. Prost, and P. Silberzan, "Moving droplets on asymmetrically structured surfaces," *Physical Review E*, vol. 60, pp. 2964-2972, 1999.
- [33] A. L. Yarin, S. Koombhongse, and D. H. Reneker, "Taylor cone and jetting from liquid droplets in electrospinning of nanofibers," *Journal of Applied Physics*, vol. 90, pp. 4836-4846, 2001.
- [34] 楊啟榮, 羅國軒, 黃奇聲, 強玲英, "SU-8 厚膜光阻於微系統 UV-LIGA 製程的應用", *科儀新知*, 第 20 卷, pp. 45-56, 1999.

- [35] S. Arscott, F. Garet, P. Mounaix, L. Duvillaret, J. L. Coutaz, and D. Lippens, "Terahertz time-domain spectroscopy of films fabricated from SU-8," *Electronics Letters*, vol. 35, pp. 243-244, 1999.
- [36] J. Hsieh, C. J. Weng, H. L. Yin, H. H. Lin, and H. Y. Chou, "Realization and characterization of SU-8 micro cylindrical lenses for in-plane micro optical systems," *Microsystem Technologies-Micro-and Nanosystems-Information Storage and Processing Systems*, vol. 11, pp. 429-437, 2005.
- [37] "Data sheet of SU-8 (<http://www.microchem.com/>)."
- [38] Y. Koike, T. Ishigure, and E. Nihei, "High-Bandwidth Graded-Index Polymer Optical-Fiber," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, pp. 1475-1489, 1995.
- [39] 王聖禾, "塑膠透鏡光纖之新型構裝方式," 國立中山大學 機械與機電工程研究所, 碩士, 2005.
- [40] Y. Z. He and F. G. Shi, "A graded-index fiber taper design for laser diode to single-mode fiber coupling," *Optics Communications*, vol. 260, pp. 127-130, 2006.

自述

姓名：吳俊慶 (Wu, Chun-Ching)

出生日期：1984.03.26

性別：男

出生地：台灣、雲林

電子信箱：f88101001@hotmail.com

學歷：

國立中山大學 機械與機電研究所 碩士 2006.9~2008.6

國立高雄應用科技大學 機械工程系 學士 2004.9~2006.6

聖約翰科技大學 機械工程科 副學士 1999.9~2004.6

發表著作：

<International Conference>

1. C. H. Lin, Y. T. Tseng, **C. C. Wu**, "A Novel Method to Fabricate Lensed Optical Fiber with SU-8 Photoresist for Efficient Coupling to High-power Laser Diodes," The 21st International IEEE Micro Electro Mechanical Systems 2008 Conference, January 13-17, Tucson, Arizona, USA.

<國內研討會>

1. **吳俊慶**, 曾逸敦, 林哲信, "新型非球面光纖微透鏡之製造與其耦光效率之分析," 第二十四屆中國機械工程學會全國學術研討會, 台灣、中壢, 23-24, 十一月, 2007.

榮譽與獎勵：

1. 96 學年度工學院論文優等獎

論文題目：

A Novel Method to Fabricate Lensed Optical Fiber with SU-8 Photoresist for Efficient Coupling to High-power Laser Diodes.