



國立中山大學機械與機電工程研究所

碩士論文

Department of Mechanical and Electro-Mechanical Engineering

National Sun Yat-sen University

Master Thesis

精密機械研磨結合旋塗玻璃靜電拉伸技術製作雙曲面  
微透鏡光纖

Precision Mechanical Grinding Integrated with Spin-on-Glass  
Electrostatic Pulling Method for Producing Micro-hyperboloid  
Lensed Optical Fibers

研究生：雷世勤 撰

Szu-Chin Lei

指導教授：林哲信 教授

Dr. Che-Hsin Lin

中華民國 105 年 7 月

July 2016

# 論文審定書

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

研究生雷世勤（學號：M033020035）所提論文

精密機械研磨結合旋塗玻璃靜電拉伸技術製作雙曲面微透鏡光纖  
Precision Mechanical Grinding Integrated with Spin-on-Glass Electrostatic  
Pulling Method for Producing Micro-hyperboloid Lensed Optical Fibers

於中華民國 105 年 07 月 13 日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：

召集人 鄭木海 鄭木海 委員 林哲信 林哲信

委員 蔡穎堅 蔡穎堅 委員 許益誠 許益誠

委員 于欽平 于欽平 委員 \_\_\_\_\_

指導教授(林哲信) 林哲信 (簽名)

# 論文授權書

2016/7/20

國立中山大學博碩士論文公開授權書

國立中山大學博碩士論文公開授權書



etd-0620116-231528

2016-07-20 23:30:32

本授權書所授權之論文為授權人雷世勤在國立中山大學 機械與機電工程學系研究所 104學年度第2學期取得碩士學位之論文。

論文題目：精密機械研磨結合旋塗玻璃靜電拉伸技術製作雙曲面微透鏡光纖

指導教授：林哲信 教授

### 注意事項：

1. 依本校102年1月9日101學年度第1學期第10次行政會議通過，研究所畢業生可於上傳電子論文時自行選擇紙本及電子檔開放年限。
2. 因專利申請涉及論文公開時間，為避免因喪失新穎性而無法申請專利，請各位老師及同學上網參考「專利各項申請案件處理時限表」（網址路徑：經濟部智慧財產局→專利→專利情報通→專利處理時限）後再選定論文公開時間。  
另有關著作權相關資訊，請參考「經濟部著作權專區」（網址路徑：經濟部智慧財產局→著作權）。  
若尚有任何專利申請與著作權等相關問題，歡迎洽詢本校產學營運中心智財技轉組，分機2626。
3. 授權書一式兩份，經本人及指導教授共同簽名後，將論文公開授權書裝訂於審定書之後，辦理畢業離校時，除繳交一本論文至圖書館外，另一本繳交至教務處註冊組。

• 電子檔：此項授權同意以非專屬、無償方式授權予本校圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或數位化方式將論文全文(含摘要)進行重製，及公開傳輸。亦提供讀者非營利使用線上檢索、閱覽、下載或列印。

立即公開傳輸數位檔案。

因特殊原因，校內請於5年後公開、校外(含國家圖書館)請於5年後將論文公開或上載網路公開閱覽。

※ 論文電子檔公開日期：校內民國110年07月20日，校外(含國家圖書館)民國110年07月20日。

• 紙本論文：此項授權同意以非專屬、無償方式授權予本校圖書館，不限地域、時間與次數，以紙本方式將論文全文(含摘要)進行收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行閱覽或列印。

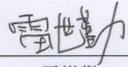
同意立即公開。

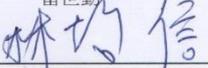
因特殊原因，欲延後公開，請於5年後公開陳覽

※ 紙本論文公開日期：民國110年07月20日。

授權人：雷世勤

學 號：M033020035

授權人：  (簽章)

指導教授：  (簽章)

林哲信

中華民國 105 年 08 月 02 日

※ 此授權書嚴禁塗改

- 若欲修改權限，請登入系統修改後重新列印此授權書。
- 若論文已審核通過，請聯繫etd@mail.nsysu.edu.tw或校內分機2452，修改後重新列印並簽章。
- 授權書將自動列印兩份。請於圖書館和教務處辦理離校手續時，各別與紙本論文一併繳交。

## 致謝

俯仰之間，兩年的時間一下就過了，在碩士論文完成的同時，也代表著我學生生涯暫時畫下休止符。未來的人生中還是需要不斷的學習增長，但無法再以學生的身分進行，必須離開學校的保護，利用在學校所學讓自己茁壯。得知自己錄取中山大學，能夠回到家鄉讀書，這樣喜悅與光榮彷彿還在昨日，那時的我或許對自己感到擔心，懷疑自己是否有能力拿取這樣的學歷。但也對自己說，絕對不能讓大家失望，也許資質能力不如人，但有了這樣的機會，我知道自己必須更加努力，以免落於人後，希望在完成學業時回首看看自己，不會覺得虛度了光陰。

從論文研究起草到付梓完成，這過程要感謝太多的人。首先我要感謝我的指導教授林哲信老師，在兩年的碩士學業中，老師的教育與領導方式，給予學生自由思考空間，鼓勵學生實現所想發揮專長，但在困惑時也會適時導正，老師也讓實驗室擁有充分的資源支持學生，不管是設備或資金，都能讓我們無後顧之憂地進行研究。其次，也非常感謝口試委員鄭木海老師、蔡穎堅老師、許益誠老師、于欽平老師，給予學生研究上的提點與指正，並提供研究儀器使用上的支持，讓學生學位論文能更加完整。感謝文軒學長，在剛開始研究時期，不厭其煩的解答我各式的疑惑，給我研究上的指導，更是使我獲益良多。感謝學長李和政、蘇殷寬、高毅、王育翔、陳俊邑、李政樺，學姊蘇佩宇，助理黃鈺珊，在實驗室儀器操作和實驗遇到困難時提供協助，使研究的進行更佳順利。感謝同屆的仲祥、識傑、承毅、哲緯，讓可能煩悶的研究生活增添色彩，生活也變得豐富，能夠一起修課、運動和討論研究，一起經歷的過程相信大家是不會忘的。感謝學弟妹大白、瑋星、君敏、岱恩、尉馨、琳凱，在我正值碩二忙碌之際，幫忙打理實驗室事務，讓我能專心的完成碩論。

最後感謝我的家人，我的父母、妹妹、親戚朋友，在人生中任何階段，總是給予我支持與鼓勵，讓我能夠往自己的目標無所顧慮地邁進。這兩年的時間發生很多事，有得到也有失去，相信自己成長了許多，新的挑戰即將來到，期盼自己一直保有求知若渴的心，莫忘初衷，有能力時回報所有的感謝。

## 中文摘要

本研究提出創新雙曲面微透鏡光纖製程，結合旋塗玻璃靜電拉伸技術，與自動化精密光纖研磨機，開發高效能低成本雙曲面光纖微透鏡。光纖耦合技術傳統上有體積龐大、組裝困難等問題，雖有許多光纖透鏡製造技術的發展，可有效降低光學模組的複雜性與體積，並減少能量的損失提高耦合效率，但也有著不易量產、設備昂貴、製作不易等缺點。因此本研究提出一個低成本、時間短、再現性高且可重覆製作的創新製程製作光纖微透鏡，不僅能夠改變光纖模態使其與雷射達到匹配實現高耦合效率，且與傳統熔燒法相比，能夠大幅減少製作微透鏡的時間與成本。研究使用 980 nm 極化保持光纖研製光纖微透鏡，首先將切平的裸光纖置入研磨機台後，接著利用數位攝影機對位應力集中區與研磨端面之相對角度，定位後利用電腦程式控制研磨參數，研磨出具有雙曲面結構之光纖端面。研磨完成之光纖端面短軸曲率半徑平均為  $3.3\ \mu\text{m}$ ，若此時將其直接與雷射二極體耦合，耦光效率不到 20%，低於平端光纖的 40% 耦光效率。這是由於光纖端面在研磨後表面相當粗糙，且曲率半徑遠低於達到模態匹配所需的  $4\ \mu\text{m}$  至  $5\ \mu\text{m}$  範圍，故造成耦光效率較差。為了製作與雷射模態匹配之微透鏡，本研究在研磨完成之光纖端面沾塗旋塗玻璃，且對其施加均勻電場產生靜電力拉伸作用，藉由靜電力拉伸改變旋塗玻璃液滴形貌，製作出特定曲率半徑之光纖微透鏡。本研究不僅可一次性達到預期之曲率半徑，另外如果微透鏡在製作過程失敗或是曲率半徑並未達所求，僅需以酒精或丙酮將旋塗玻璃剝除，便能重新製作微透鏡製程，不會破壞精密研磨的雙曲面結構光纖端面。故本研究不僅能創造出光滑平整的微透鏡結構，並可藉由改變電場強度有效地調整微透鏡曲率半徑。不同於以往以熔燒等製程形成微透鏡，本研究製程不會傷害光纖端面，且可一次性地製作完成節省大量分析時間，並減少光纖在製程中損壞風險。最後為評估微透鏡效能，本研究進行微透鏡遠場光場分布實驗，結果能看見雙曲面微透鏡具有與雷射二極體光場相近之高寬比，故在兩者之間耦合時能夠實現模態匹配，達到高耦光效率的表現。在耦合效率實驗中可以得知，當微透鏡曲率半徑在

約 4  $\mu\text{m}$  至 5  $\mu\text{m}$  之間時，本研究製作之 30 根微透鏡光纖具有約 81% 以上的高平均耦光效率，且最高達到 86.42%。接著利用五根耦光效率高於 80% 之雙曲面微透鏡光纖，進行長時間高能量耦合的穩定性測試，在五分鐘的量測中，五根光纖樣本皆能維持高耦光效率，且變異係數最高不超過 0.17% 的。顯示本研究所製作之微透鏡具有極佳的穩定性，且證明本研究所使用之旋塗玻璃，在形成微透鏡結構後，不會因為長時間高能量聚集，產生形變或是其他變化影響效能。最後本研究也利用傳統熔燒法製作微透鏡光纖，並與本研究製程做比較。結果中可發現，本研究不僅在耦合效率的表現上較佳，並且對偏心量具有較大容忍度。另外也發現，由於熔燒法屬於放電熔融加工，對於極化保持光纖的應力集中區，因為摻雜成分的不同，會使得光纖端面產生凹陷，且當微透鏡端面與應力集中區在同一軸向時，應力集中區凹陷更為明顯，於此狀況下耦光效率遠低於 5%。相較於本研究，不僅不會對光纖端面產生破壞，且能夠創造出平滑的表面，提升光纖耦光效率，並能夠製作各種角度之微透鏡於各種光纖上。本研究所提出結合旋塗玻璃與靜電拉伸的創新微透鏡製作技術，不僅改善光纖微透鏡製作步驟繁雜、耗時、破壞樣本、無法量產等缺點，並且有效的降低製作成本與時間。在微透鏡光學性質上，可實現雷射光源與光纖之間的高效率耦合，並可證實可實際應用於產業中相當具有潛力。

關鍵字：雙曲面、微透鏡光纖、旋塗玻璃、靜電力拉伸、曲率半徑、耦光效率。

# Abstract

A novel approach is presented for producing hyperboloid microlens structure directly on an optical single-mode fiber for enhancing the coupling efficiency between high-power laser diodes and single-mode fiber. The hyperboloid lens structure was directly produced with a flat-end single-mode fiber with the core diameter of 6.6  $\mu\text{m}$ . The production has three-step process, including a precision mechanical grinding, a spin-on-glass coating and an electrostatic pulling process. After a single-mode fiber was grinded into hyperboloid shape, trace amount of spin-on-glass is attached to the grinded fiber tip and then an electrostatic pulling is used to adjust the radius of curvature of around 4-5  $\mu\text{m}$  for the single-mode fiber endface. The hyperboloid microlens structure is manufactured for matching with the rectangular outlet of the semiconductor laser diode. A high average coupling efficiency around 81% is obtained, and highest reaches 86.42% for 20 produced lensed fibers. While using the produced hyperboloid fibers, which is doubled efficiency compared to the flat end fiber. The approach was saving time with a simple way of making a microlens structure, so that we testing the microlenses stability to confirm the feasibility. The coupling stability in five minutes for 5 individual hyperboloid fibers not more than 0.17%, express the good stability for the produced hyperboloid microlensed fibers. Unlike previous with melting or other processes to forming a microlens structure, this method does not damage the fiber endface and can be re-produced. So that, the developed method provides a solution for producing hyperboloid microlensed fibers for high performance coupling between the single mode fiber and the semiconductor diode laser.

Keywords: single-mode fiber, spin-on-glass, microlensed, electrostatic pulling, radius of curvature, coupling efficiency.

# 目錄

論文審定書 .....	i
論文授權書 .....	ii
致謝 .....	iii
中文摘要 .....	iv
Abstract.....	vi
目錄 .....	vii
圖目錄 .....	x
表目錄 .....	xiii
符號表 .....	xiv
簡寫表 .....	xvi
第一章 緒論 .....	1
1.1 前言 .....	1
1.2 光纖的分類 .....	4
1.2.1 光纖依模態區分 .....	4
1.2.2 光纖依材料區分 .....	6
1.2.3 極化保持光纖 .....	7
1.3 微透鏡光纖介紹 .....	9
1.3.1 模態分析 .....	9
1.3.2 微透鏡工作原理 .....	10
1.4 光纖微透鏡製作與發展 .....	11
1.4.1 軸對稱光纖微透鏡製作技術 .....	11
1.4.2 非軸對稱光纖微透鏡製作技術 .....	15
1.5 研究動機與目的 .....	21
1.6 論文架構 .....	22

第二章 理論分析 .....	23
2.1 雷射光源簡介 .....	23
2.2 模態匹配理論 .....	25
2.2.1 高斯光束 .....	25
2.2.2 模態匹配 .....	26
2.2.3 耦合效率 .....	27
2.3 靜電力拉伸介紹 .....	29
2.3.1 庫倫定律與電場強度 .....	29
2.3.2 泰勒錐效應 .....	30
第三章 雙曲面光纖微透鏡研製與特性分析 .....	32
3.1 旋塗玻璃簡介 .....	32
3.2 雙曲面光纖微透鏡製程 .....	35
3.2.1 微透鏡製作架構與步驟 .....	35
3.2.2 研磨系統介紹 .....	37
3.3 微透鏡物理特性量測 .....	39
3.3.1 光纖微透鏡之偏心率分析 .....	40
3.3.2 光纖微透鏡之曲率半徑分析 .....	41
3.4 光纖微透鏡光學性質量測架構 .....	43
3.4.1 耦光效率量測架構 .....	43
3.4.2 遠場光場量測架構 .....	46
3.4.3 熔燒製作微透鏡架構 .....	48
第四章 實驗結果與討論 .....	50
4.1 微透鏡之曲率半徑與電場強度關係分析 .....	50
4.2 微透鏡光纖之耦光效率量測 .....	53
4.3 微透鏡穩定度量測 .....	56
4.4 微透鏡之遠場光場量測 .....	58

4.5	旋塗玻璃結合靜電力拉伸法與熔燒法製程比較 .....	60
4.6	光纖 SEM 觀察 .....	62
第五章	結論與未來展望 .....	65
5.1	結論 .....	65
5.2	未來展望 .....	67
參考文獻	.....	68
自述	.....	75

# 圖目錄

圖 1-1 司乃耳定律示意圖 .....	2
圖 1-2 EDFA 元件示意圖 .....	3
圖 1-4 多模階躍折射率光纖光傳遞路徑示意圖 .....	5
圖 1-5 多模漸變折射率光纖光傳遞路徑示意圖 .....	5
圖 1-6 極化保持光纖線偏振態示意圖 .....	7
圖 1-7 極化保持光纖內部結構設計示意圖 .....	8
圖 1-8 單模光纖與雷射二極體模態示意圖 .....	9
圖 1-9 光纖微透鏡工作原理示意圖 .....	10
圖 1-10 Cohen 和 Schneider 所提出微影技術製作微透鏡示意圖 .....	11
圖 1-11 Kuwahara 等人所提出楔型光纖微透鏡圖 .....	12
圖 1-12 Shah 等人所提出外漸擴楔型微透鏡圖 .....	12
圖 1-13 Kotsas 等人所提出軸對稱微透鏡圖 .....	13
圖 1-14 Yang 等人所提出雙曲線微透鏡圖 .....	14
圖 1-15 Kim 等人所提出 UV 膠點膠法示意圖 .....	14
圖 1-16 Wu 等人所提出靜電力拉伸法示意圖 .....	15
圖 1-17 Presby 等人所提出 CO <sub>2</sub> 雷射加工製作圖 .....	16
圖 1-18 Modavis 等人所提出雙楔型光纖微透鏡示意圖 .....	17
圖 1-19 Yeh 等人所提出四角錐型微透鏡光纖圖 .....	17
圖 1-20 Yeh 等人所提出錐式楔型光纖微透鏡圖 .....	18
圖 1-21 Lu 等人所提出周期性變扭矩研磨機台示意圖 .....	19

圖 1-22 Liu 等人所提出自動化研磨機台示意圖 .....	19
圖 1-23 論文架構枝狀圖 .....	22
圖 2-1 邊射型 980 nm 雷射二極體示意圖與規格圖 .....	23
圖 2-2 雷射二極體遠場光場示意圖 .....	24
圖 2-3 高斯分布示意圖 .....	25
圖 2-4 高斯光束示意圖與重要參數 .....	26
圖 2-6 均勻電場對電荷作功示意圖 .....	30
圖 2-7 泰勒錐示意圖 .....	31
圖 2-8 電紡織現象示意圖 .....	31
圖 3-1 旋塗玻璃(SOG-400F)光穿透率與折射率分布圖 .....	33
圖 3-2 雙變曲率光纖微透鏡製程示意圖 .....	37
圖 3-3 熊貓形光纖研磨機示意圖 .....	38
圖 3-4 SAP 定位示意圖 .....	38
圖 3-5 微透鏡光纖之物理參數示意圖 .....	39
圖 3-6 微透鏡光纖影像處理示意圖 .....	40
圖 3-7 光纖微透鏡偏心率分析示意圖 .....	41
圖 3-8 光纖微透鏡曲率半徑分析示意圖 .....	41
圖 3-9 耦光效率量測架構圖 .....	43
圖 3-10 微透鏡光纖移動平台架構圖 .....	44
圖 3-11 耦光效率量測架構圖 .....	45
圖 3-12 光纖微透鏡遠場光場量測架構示意圖 .....	46

圖 3-13 遠場光場量測圖 .....	47
圖 3-14 本研究製程結合熔燒法比較流程圖 .....	48
圖 4-1 靜電力拉伸製作光纖微透鏡之數位顯微鏡影像圖 .....	51
圖 4-2 曲率半徑與電場強度關係圖 .....	52
圖 4-3 耦光效率量測架構局部顯微放大圖 .....	53
圖 4-4 耦光效率與曲率半徑關係圖 .....	54
圖 4-5 長時間維持高耦合效率之穩定度量測結果圖 .....	56
圖 4-6 旋塗玻璃微透鏡光纖之光場分布圖 .....	58
圖 4-7 平端光纖與熔燒法製作微透鏡之遠場光場分布圖 .....	59
圖 4-8 980 nm 單模雷射二極體環境掃描式電子顯微鏡拍攝圖 .....	62
圖 4-9 環境掃描式電子顯微鏡拍攝光纖端面圖 .....	63
圖 4-10 環境掃描式電子顯微鏡拍攝 0 度微透鏡光纖端面圖。 .....	64
圖 5-1 未磨尖光纖端面示意圖 .....	67

# 表目錄

表 1-1 研磨法製作光纖微透鏡比較表.....	20
表 2-1 二極體雷射與單模光纖內部之模態性質表.....	27
表 3-1 旋塗玻璃溶液基本特性表.....	33
表 3-2 旋塗玻璃塗膜基本特性表.....	34
表 4-1 本研究製作與熔燒法製作之微透鏡光纖數據表.....	55

# 符號表

C: 常數

$c$ : 光速

$d$ : 兩極板間距離

E: 電場

F: 靜電力

$H_m$ : 研磨旋轉平台高度

$I(z)$ :  $Z$  處光強度

$k$ : 庫倫常數

$\vec{k}$ : 笛卡兒坐標系中波數

$k_0$ : 真空下波數

L: 模場高度

$L_0$ : 雷射出光口至微透鏡距離

$L_{LD}$ : 雷射二極體出光口高度

$M_1^x$ : X 方向線偏振態

$M_1^y$ : Y 方向線偏振態

$n_1$ : 介質 1 折射率

$n_2$ : 介質 2 折射率

$N_F$ : 光纖核心之折射率

$N_L$ : 微透鏡之折射率

$P_F$ : 微透鏡光纖輸出功率

$P_{LD}$ : 雷射二極體原始輸出功率

$q'$ : 任意一個電荷

$r$ : 兩電荷間距離

$r_a$ : 雷射模場高寬比

R: 曲率半徑

$R_L$ : 微透鏡之曲率半徑

$R_m$ : 微透鏡曲率半徑

$R_x$ : X 方向曲率半徑

$R_y$ : Y 方向曲率半徑

$R_g$ : 研磨光纖曲率半徑

$R(Z)$ : 波前曲率半徑

T: 表面張力

W: 模場寬度

$W_0$ : 光腰大小

$W_E$ : 電場對此電荷作功

$W_{LD}$ : 雷射二極體出光口寬度

$W(z)$ : Z 處光束寬度

$W(Z)$ : 高斯光束寬度

$\theta$ : 光束發散角

$\theta_1$ : 入射角

$\theta'_1$ : 反射角

$\theta_2$ : 折射角

$\theta_L$ : 垂直方向發散角

$\theta_m$ : 光纖與研磨平台夾角

$\theta_p$ : SAP 定位角度

$\theta_W$ : 水平方向發散角

$\theta_x$ : X 軸傾斜角度

$\theta_y$ : Y 軸傾斜角度

$\theta_z$ : Z 軸傾斜角度

$\phi_m$ : 光纖自轉角度

## 簡寫表

BHF:	Buffered hydrofluoric acid, 緩衝氫氟酸
C.E.:	Coupling efficiency, 耦光效率
C.V.:	Coefficient of variance, 變異係數
EDFA:	Er-doped fiber amplifier, 摻鉺離子光纖放大器
EMI:	Electromagnetic interference, 電磁波干擾
ESEM:	Environmental scanning electron microscope, 環境掃描式電子顯微鏡
FWHM:	Half maximum full width, 半高全寬
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-emitting diode, 發光二極體
MMF:	Multi-mode fiber, 多模光纖
NIH:	National institutes of health, 美國國立衛生研究院
PMF:	Polarization maintaining fiber, 極化保持光纖
PMMA:	Polymethylmethacrylate, 聚甲基丙烯酸甲酯
POF:	Plastic optical fiber, 塑膠光纖
ROC:	Radius of curvature, 曲率半徑
SAP:	Stress applying part, 應力施加區
SIF:	Step-index fiber, 階躍折射率光纖
SMF:	Single-mode fiber, 單模光纖
SOG:	Spin-on glass, 旋塗玻璃
TEC:	Thermoelectric cooler, 熱電致冷器
WDM:	Wavelength division multiplexing, 多波複用器

# 第一章 緒論

## 1.1 前言

自人類開始傳遞訊息以來，傳輸的內容與媒介就不斷的演進，傳輸的介質從有線的電線、纜線、塑膠光纖及玻璃光纖。無線的介質有空氣、短波、微波、紅外線以及直接以光作為傳輸[1, 2]。環境的影響如電磁波干擾(Electromagnetic interference, EMI)，一直是決定通訊品質的主要因素，以光纖作為傳輸媒介受環境影響將大幅降低，傳輸的內容也相當多樣，無論是數據、音源、影像等多媒體，都能夠以光纖做到高速傳輸，故光纖傳輸等光電通訊的發展是必然的趨勢。

光電產業與網路通訊的蓬勃發展與進步，使得資料傳輸量也日漸增長，網路通訊的使用也日與劇增，相關的研究也不斷創新與發展，隨著資料傳輸量與速度的需求增加，光纖通訊的使用也日漸重要。光纖通訊傳輸的使用有著快速及距離長等優點，所以成為許多學者研究的重點項目。光纖傳輸具有大容量、高速度及高品質等優點，所以目前已經被普遍使用於網路、媒體等傳輸用途，取代傳統電纜傳輸的方式被廣為應用於生活中。在長距離的光纖傳輸組要使用單模的玻璃光纖，因為玻璃具有低損失以及高頻寬的特性，所以相當適合作為光波導元件。另外也有塑膠光纖的使用，相對於玻璃光纖具有價格便宜以及可撓性佳等優點，但單位長度的損失較大，主要用於短距離的傳輸[3]。

光束傳播時若經過兩個不同的介質，光束來源會被分成兩束不同的光線，其中一束為反射光(Reflected ray)反射回原介質 1，另一束為折射光(Refracted ray)折射到介質 2。入射角與反射角的關係滿足司乃耳定律(Snell's law):

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \dots\dots\dots(1.1)$$

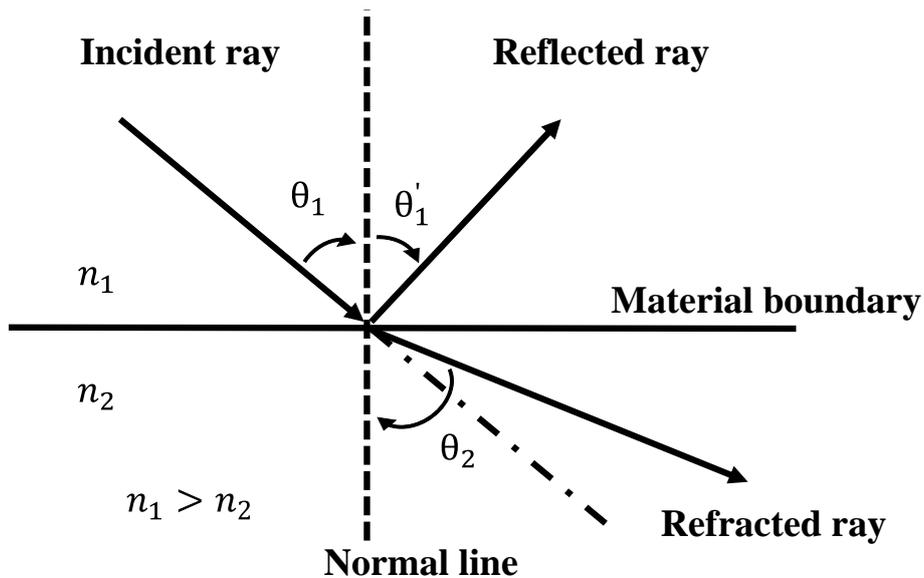


圖 1-1 司乃耳定律示意圖。

其中介質 1 與介質 2 折射率分別為  $n_1$  與  $n_2$ ，入射角  $\theta_1$  等於反射角  $\theta'_1$ 。如圖 1-1 所示，當  $n_1 > n_2$  時，光束由介質密處射向介質疏處， $\theta_2 > \theta_1$ ，光束會向法線偏離；相反地，當  $n_2 > n_1$  時，光束由介質疏處射向介質密處， $\theta_1 > \theta_2$ ，光束會向法線偏折。

由司乃耳定律可以知道，當光束由折射率高的介質射入折射率低的介質時，折射角會因為入射角地增加而非等比例地增加，一到入射角到達臨界角  $\theta_c$  時，折射角會達到  $90^\circ$ 。此時光束無法穿透介面，故無折射現象發生，反而在介面產生全反射 (Total internal reflection)。光纖的傳導便是利用此現象，藉由光纖的核心(Core)以及披覆層(Cladding)之間產生全反射，使得光源得以在核心內傳遞[4]。

光纖通訊與一般傳統通訊同樣，訊號傳遞受到距離長度影響，導致衰退而無法傳遞，故在通訊系統中需要有一個放大器來放大訊號才得以繼續傳送。傳統光訊號放大器架構，是先由光訊號轉換成電訊號，在經過電訊號放大模組放大訊號，最後再將放大後的電訊號轉換回光訊號傳輸，這樣的光電或電光轉換模組設計不僅複雜昂貴且浪費能量。在 1980 年間，英國與美國研究相繼提出摻雜「鉕」離子進入光纖中提供光增益[5]，進而出現摻鉕離子光纖放大器 (Er-doped fiber amplifier; EDFA)，此發明也使得光通訊技術產生巨大躍進，數年的研究後也逐漸商業化。EDFA 的應用大幅度增加了通訊的距離，因為能夠直接對光訊號放大，所以能夠降

低轉換的次數與訊號損失，這樣的應用不僅減少了大容量訊號傳輸成本，也使得遠距離有效光通訊傳輸得以實現。EDFA 的基本組成如圖 1-2 表示，主要包含泵浦雷射光源(Pumping laser source)、摻鉺光纖(Er-doped fiber)、多波複用器(Wavelength division multiplexing, WDM)、光隔離裝置(Isolator) 及光耦合器(Coupler)等部分，其中泵浦雷射用來激發摻鉺光纖中的鉺離子，使其由基態能階躍升到高能階達到居量反轉(Population inversion)的狀態。當訊號通過摻鉺離子光纖時會被誘發，而由高能階降回基態能階，且放出與訊號相同之受激輻射(Stimulates emission)，進而產生光訊號放大的作用。一般常見泵浦雷射有 980 nm 和 1480 nm 兩種，因具有高增益低雜訊的特性，其中以 980 nm 高功率泵浦雷射最常使用[6]。

在泵浦雷射模組內部，主要有一個雷射二極體光源與光纖作為傳遞介質，然而雷射與光纖中存在模態不匹配的問題，使得光傳遞到光纖時會產生很大的耦光損失[7]，為減少耦光損失使雷射和光纖達到模態匹配(Mode match)。常見做法有改變雷射結構進而改變模場，加入微透鏡模組在雷射與光纖中間，在光纖端面製作微透鏡，而光纖端面微透鏡製作[8-10]，有低成本、高效率、減少模組體積等優點故被廣泛研究。

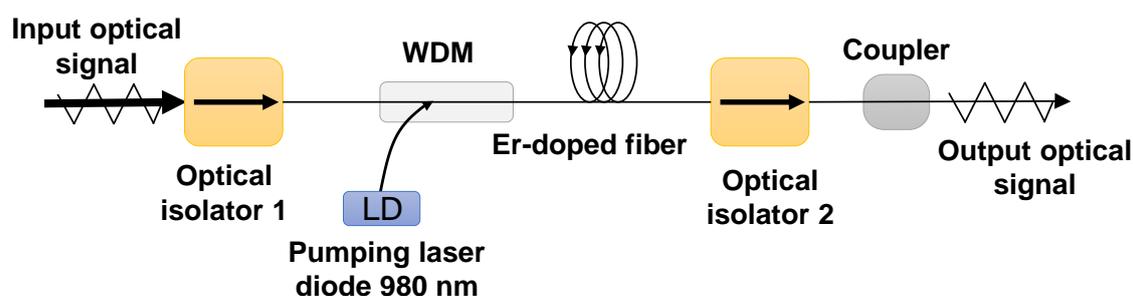


圖 1-2 EDFA 元件示意圖。其中以 980 nm 高功率泵浦雷射為光源，藉由摻鉺離子光纖作用產生光訊號放大效果。

## 1.2 光纖的分類

光纖自 1960 年代發展至今已逾半個世紀，光纖種類繁多，製作與材料使用皆不相同。一般而言，光纖分類能夠以傳導模態的不同作為區分，另外也能以製作材料的不同做區分。亦有特殊光纖在不同應用，藉由不同的複合式材料應用達到極化保持的特性。

### 1.2.1 光纖依模態區分

雷射二極體光源與光纖耦合時，光束會以特定角度耦合進入光纖核心，此特定角度的光束稱為模態光。光纖能夠擁有一個至多個模態光，依照光纖的性質及尺寸的不同所分類[11, 12]。

#### (一) 單模光纖:

單模光纖(Single-mode fiber, SMF)的核心直徑通常較小，約 6~10  $\mu\text{m}$ ，光在單模光纖內傳遞時，沒有折射也沒有反射，只容許單一模態光在核心中傳遞如圖 1-3 所示。此種光纖模間色散很小，能夠適用於長距離、大容量的遠端通訊。但對於光源的要求較高，需有較窄的頻譜寬和良好穩定性，並且需大於單模光纖的截止波長(Cutoff wavelength)，否則會出現第二種以上的模態光。

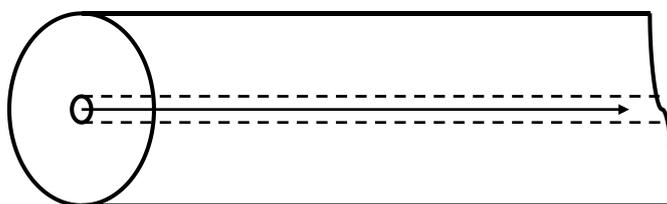


圖 1-3 單模光纖光傳遞路徑示意圖。

#### (二) 多模光纖:

多模光纖(Multi-mode fiber, MMF)可傳輸多個模態光，通常核心直徑較大，基本上以折射率分布可分為階躍折射率型與漸變折射率型。

**i. 階躍折射率光纖:**

階躍折射率光纖(Step-index fiber, SIF)形式簡單，能夠容許多種模態光在光纖內傳遞，如圖 1-4 所示。不同的模態光在傳遞時，光的折射角不同造成不同的傳遞路徑長度，因此靠近核心中心線傳遞的光會首先離開光纖，其他的光則依序離開，這樣的時間差現象會造成光脈波的分散，而影響光纖的頻寬，此現象稱之為模態間色散(Modal dispersion)。雖然此型的光纖損耗較大，但因為價格便宜故也常用在短距離與低頻寬的應用上。

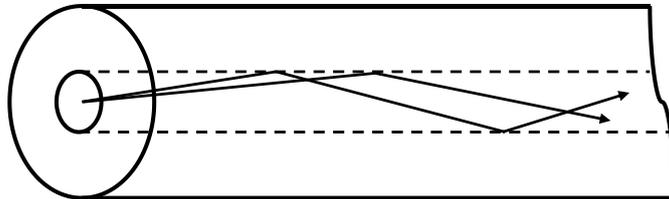


圖 1-4 多模階躍折射率光纖光傳遞路徑示意圖。

**ii. 漸變折射率光纖:**

漸變折射率光纖(Graded-index fiber, GIF)與 SIF 相同，能夠容許多種模態光在光纖內傳遞，但差別在於核心折射率分布為拋物線狀，核心中心有最大的折射率，向外逐漸遞減，形成一類似正弦圖形的光傳遞路徑，如圖片 1-5 所示。光束入射角度越大，則全反射發生的位置就在越內層；反之，光束入射角度越小，則全反射發生的位置就在越外層。這樣的設計能夠使得不同模態光到達終點的時間被相同化，因而減少模態間的色散，進而提高傳輸的效率。

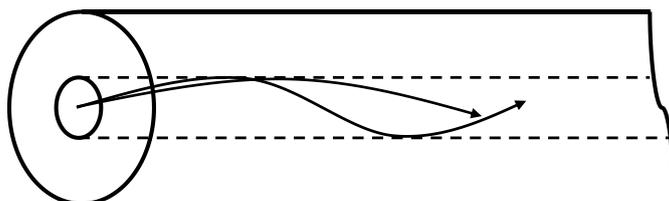


圖 1-5 多模漸變折射率光纖光傳遞路徑示意圖。

## 1.2.2 光纖依材料區分

光纖若依材料分類，主要有石英玻璃光纖、塑膠光纖及多成分玻璃。因為特性的差異被應用於不同的地方，其中以石英玻璃最適用於長距離、大容量的傳輸[1]。

### (一) 玻璃光纖：

玻璃光纖(Glass optical fiber, GOF)為使用最廣泛的光纖，主要由玻璃組成光纖核心與披覆層，另外也藉由添加不同的雜質控制折射率，例如加入鍺(Germanium, Ge)或磷(Phosphorum, P)能夠使折射率增加，加入硼(Boron, B)或氟(Fluorine, F)能使折射率降低。

#### i. 石英玻璃：

石英玻璃(Silica glass)熔點高達 1700°C，故其化學特性非常好，具有高度的穩定性與耐久性，在可視光到紫外光的波段中具有良好的透明度，因此被廣泛用於化學與光學領域。石英玻璃光纖的高度穩定性使其適用於長距離、高容量的光訊號傳輸，且在傳輸時訊號損失最小。但由於原料與製作技術要求較高，故售價較高，且無法承受高度彎曲。

#### ii. 多成分玻璃：

多成分玻璃(Mulicomponent glass)軟化溫度約 1000°C，遠低於石英玻璃(約 1600°C)，故製造過程較為容易而使得價格便宜許多。但由於材料內部的金屬物質不易去除，故純度較石英玻璃低，而使得折射率的分布不均且難以控制，不適用於長距離且高品質的傳輸。

### (二) 塑膠光纖：

塑膠光纖(Plastic optical fiber, POF)的發展時間與玻璃光纖相近，但其在應用的重要程度一直不若玻璃光纖。這是由於其訊號損失大，且光纖長期使用時可靠性低。但相對於玻璃光纖，塑膠光纖具有可撓性佳、價格低廉及加工容易等優點。早期塑膠光纖材料多為俗稱壓克力(Acrylic)的聚甲基丙烯酸甲

酯(Polymethylmethacrylate, PMMA)。新型態塑膠光纖發展出以氟化樹脂(Fluoropolymers)為材料，相較於傳統材料能使光纖具有更多的匹配波長，另外也發展出折射率分布相關技術，由階躍式(Step index)改進為漸變式(Graded index)。塑膠光纖的進步使其在應用上逐漸受到矚目，但在近代長距離通訊中，最大的挑戰仍在於頻寬不足與衰減大的缺點。

### 1.2.3 極化保持光纖

極化保持光纖(Polarization maintaining fiber, PMF)，因為形貌又稱熊貓光纖(Panda fiber)，是一種能夠保持入射光之極化光狀態並傳送的光纖。一般來說，極化保持光纖也是單模光纖的一種，在傳輸一個某波長的光束時，單模光纖波導內雖然只有一個基本模態( $M_1$ )能夠傳輸，但此模態會有兩個正相交的線偏振態( $M_1^x$ 、 $M_1^y$ )組成，如圖 1-6 所示。

一般單模光纖在傳輸訊號時，光纖內部的兩正交線偏振態，會因為受到光纖內部的擾動產生能量轉換(Cross-couple)。這是由於光纖內部的缺陷或形變，使得在內部兩偏振方向的傳遞速度改變，此現象有稱為雙折射現象(Fiber birefringence)。理想狀態的單模光纖內部無瑕疵，且呈現完全旋轉對稱沒有任何的殘留應力存在，使得進入光纖的兩正交線偏振態簡並(Degeneracy)無法區分，而能夠保持進入光束之線偏振態，故理想完全旋轉對稱之單模光纖也是一種保偏光纖[13, 14]。

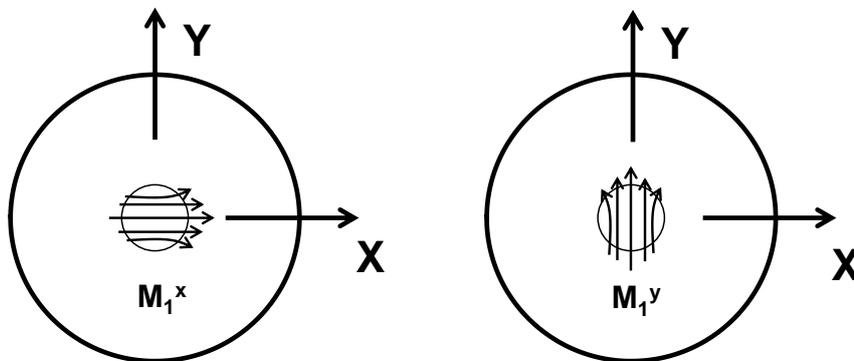


圖 1-6 極化保持光纖線偏振態示意圖。兩正交線偏振態受 SAP 影響，產生傳遞速度改變，進而保持其極化現象。

極化保持光纖的工作原理，藉由改變光纖內部的應力分布，造成兩互為正交的偏極化態能以不同的速度傳遞，使得所傳遞的能量不易發生能量轉換，進而保持其偏極化態。這樣的應力分布是利用在光纖披覆層內部加入應力施加區(Stress applying part, SAP)，應力施加區設計通常會以核心為中心呈現軸對稱狀，如圖 1-7。材料通常為石英摻雜硼(Boron, B)元素，由於相對於光纖具有較大的熱膨脹係數( $3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )，在光纖製作過程的抽絲冷卻步驟時會有較大的收縮，使得光纖核心產生在 X 軸上的張力拉伸，相對地壓縮到 Y 軸而發生雙折射效應。

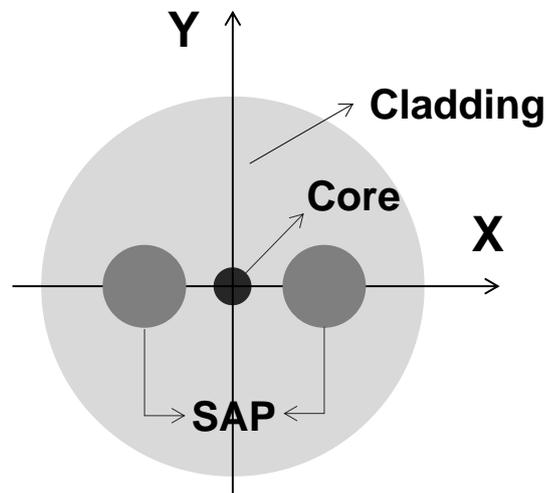


圖 1-7 極化保持光纖內部結構設計示意圖。SAP 位置對稱於光纖核心，並且三者在同一水平線上。

### 1.3 微透鏡光纖介紹

微透鏡光纖(Microlensed fiber)的製作與概念約在 1974 年被提出[8]，有別於以往使用透鏡模組與光纖對位等方式，能夠有效的減少損失，並能夠減少封裝與架構的體積，本節將介紹微透鏡光纖模態與工作原理。

#### 1.3.1 模態分析

一般光纖通訊常見的泵浦雷射有 980 nm 和 1480 nm 兩種，因為 980 nm 高功率泵浦雷射具有高增益及低雜訊的特性被廣泛使用[15]。泵浦雷射模組內有一個雷射二極體(Laser diode, LD)光源，並以光纖作為傳遞的介質。然而雷射二極體出光口形狀多為長軸位於水平方向的長方形，形成一個長寬比約 1:4 的橢圓形光場，且因為發光角的不同形成曲面的波前曲率( $R$ )；相對於光纖核心的圓形光場與平面波前有很大差異。這樣的差異使得雷射光源耦合進入光纖核心時，因為模態不匹配(Mode mismatch)的緣故產生超過一半的耦光效率損失[16, 17]，如圖 1-8 所示。

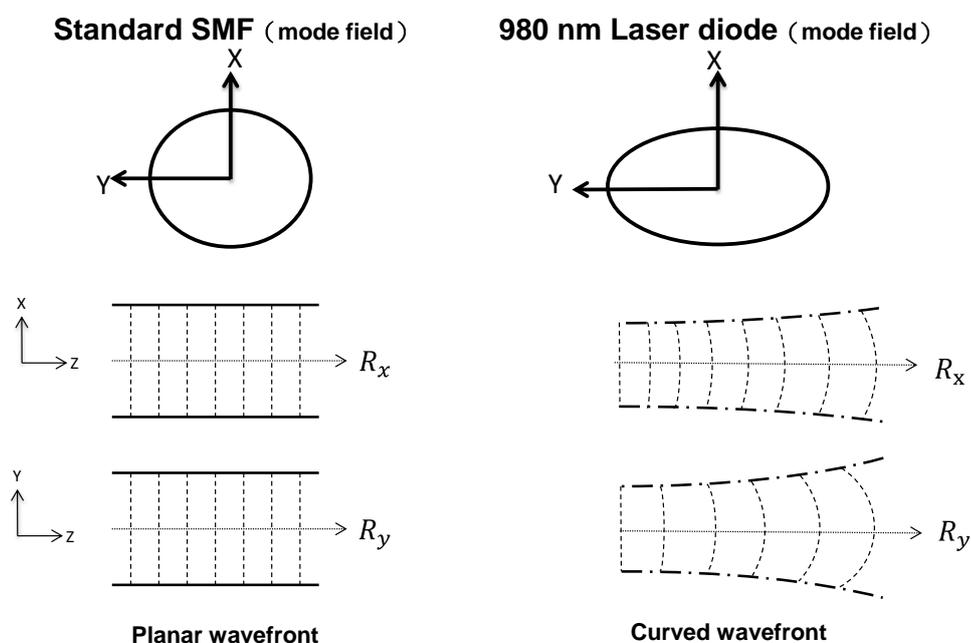


圖 1-8 單模光纖與雷射二極體模態示意圖。圖中包含端光纖之模態與 980 nm 雷射之模態，兩者因為光場分布與波前曲率( $R_x, R_y$ )不同，存在模態差異[18, 19]。

### 1.3.2 微透鏡工作原理

為減少耦光效率損失，促進雷射光源和光纖達到模態匹配(Mode match)，常見做法有改變雷射二極體出光口結構進而改變雷射光的模場[7, 20]、在雷射與光纖中間加入微透鏡來改變雷射光模場[21]、直接在光纖端面加工製作出微透鏡[8]等方法。而光纖微透鏡(Microlens fibers)的製作，有低成本、高效率、低組裝成本等優點故被廣泛研究。

如圖 1-9 所示，光纖微透鏡工作原理是利用雷射光源經過微透鏡時，由於光程差的影響改變雷射光模場，使光源在進入光纖核心時達到模態匹配以實現高耦合效率。

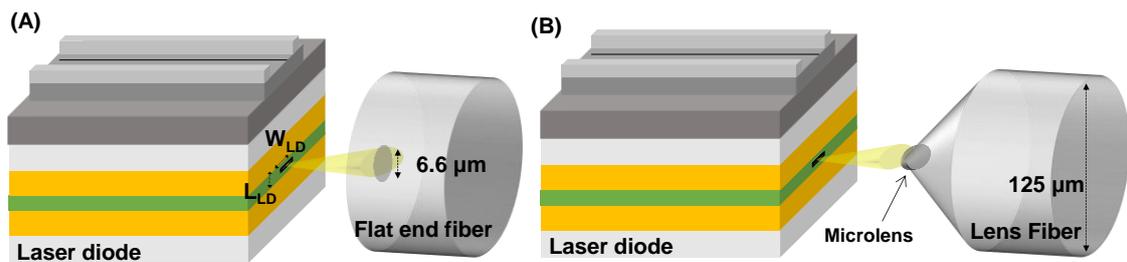


圖 1-9 光纖微透鏡工作原理示意圖。圖中(A)為雷射二極體與平端光纖耦合示意圖，其中  $W_{LD}$  與  $L_{LD}$  分別為雷射二極體出光口寬度與高度，圖中(B)為微透鏡與雷射光源耦合情形示意圖。

## 1.4 光纖微透鏡製作與發展

光纖微透鏡的製作主要分為軸對稱與非軸對稱兩種，因為使用的差別需要使用不同的微透鏡，以利光纖與光源達到模態匹配實現高耦光效率，進而減少能量傳遞損失降低傳輸成本。

### 1.4.1 軸對稱光纖微透鏡製作技術

軸對稱光纖微透鏡一般用於光纖與光纖之間，或是光纖與通訊用發光二極體 (Light-emitting diode, LED) 間的耦合。一般而言，軸對稱光纖製作上較簡便，對設備要求較低具有量產特性，其製作技術發展也較早。

在 1974 年，Cohen 和 Schneider 首先提出，在光纖上直接製作微透鏡來提升耦光效率的構想[8]。藉由半導體製程中基本的微影(Photo lithography)技術，在光纖前端製作出半球或半圓柱狀的微透鏡結構，如圖 1-10 所示。

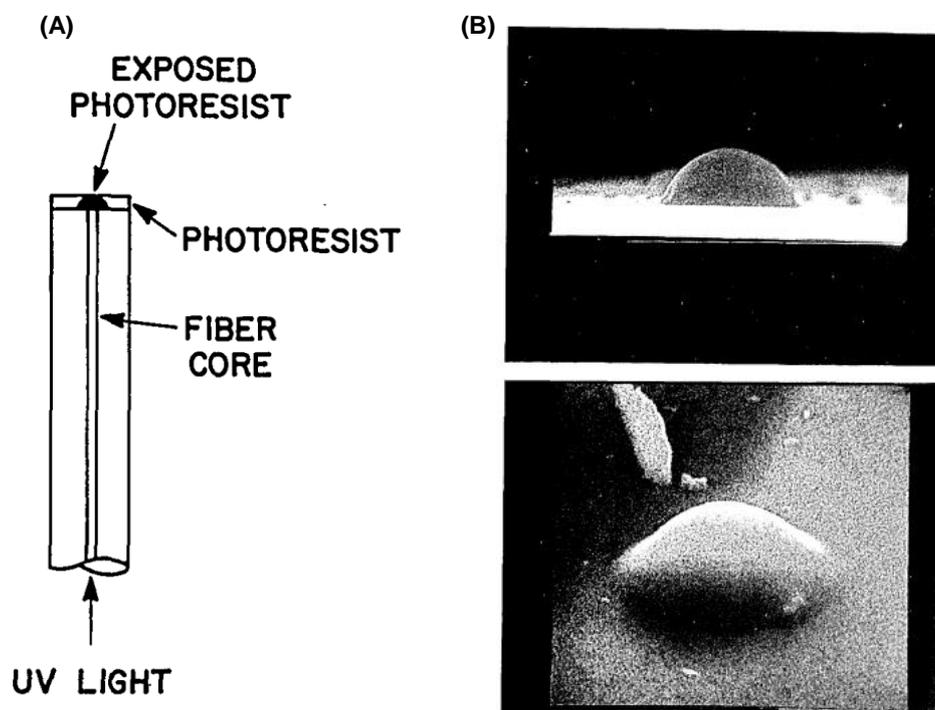


圖 1-10 Cohen 和 Schneider 所提出微影技術製作微透鏡示意圖。圖中(A)為微影技術裝置示意圖，(B)為此研究所製作之半球微透鏡 SEM 圖[8]。

在 1980 年，Kuwahara 等人提出熔融拉伸的製程製作微透鏡[22]。將光纖放置於光纖熔接機中，藉由控制電弧放電時間、放電距離與電流大小等參數，將光纖加熱達熔融態後，由於表面張力作用其端面會形成半球形微透鏡結構，如圖 1-11 所示。此種製程的成本低且重複性高，可製作出曲率半徑約 10-30  $\mu\text{m}$  半球形微透鏡，但最高耦光效率不到 40%，故實用價值不高。雖然電弧放電製程因為大量熔融光纖使得耦光效率不佳，但其電弧放電的製作開啟許多相關研究。在 1990 年，Shah 等人提出以電弧放電軟化光纖端面，將其擠壓形成外徑逐漸擴大的端面結構，在研磨後形成楔型光纖微透鏡，其耦光效率最高達到約 50%，如圖 1-12 所示[23]。

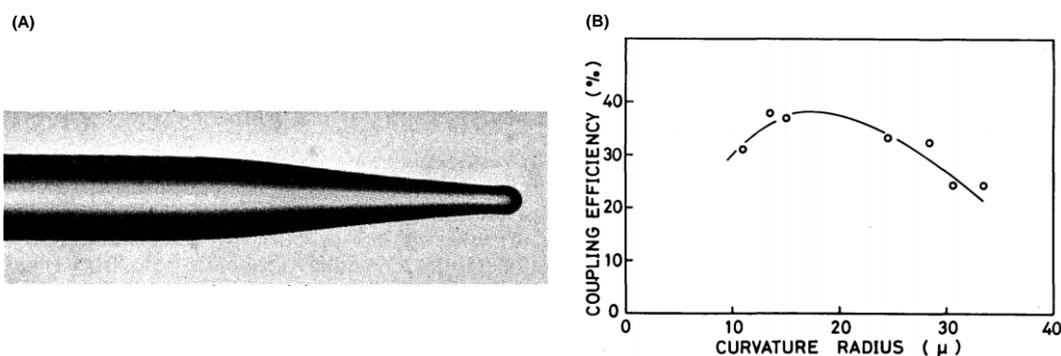


圖 1-11 Kuwahara 等人所提出楔型光纖微透鏡圖。圖中(A)此研究所製作微透鏡實際圖，(B)為耦光效率與曲率半徑關係圖[22]。

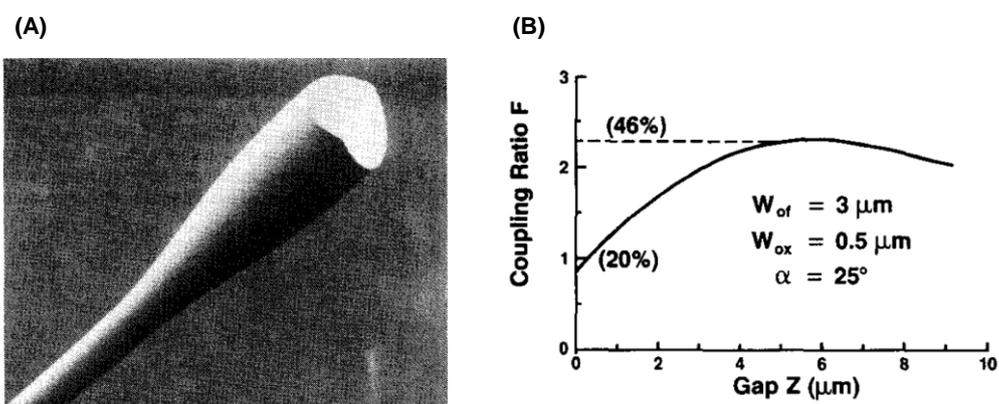


圖 1-12 Shah 等人所提出外漸擴楔型微透鏡圖。圖中(A)此研究所製作微透鏡實際圖，(B)為耦光效率與間距關係圖[23]。

在 1991 年，Kotsas 等人提出以蝕刻法製作光纖微透鏡[9]。將氫氟酸(HF)與氟化銨(NH<sub>4</sub>F)以 1:10 比例混合，形成緩衝氫氟酸(Buffered hydrofluoric acid, BHF)，將固定長度光纖浸入其中。由於光纖核心與外包層成份摻雜濃度不同，在蝕刻時會產生選擇性蝕刻，基本上會依照折射率分布，形成中間微凸的結構，如圖 1-13 所示。此方法重複性高，可大量產軸對稱光纖微透鏡，但耦光最高僅達到 57%，效率不佳，故應用層面不大。

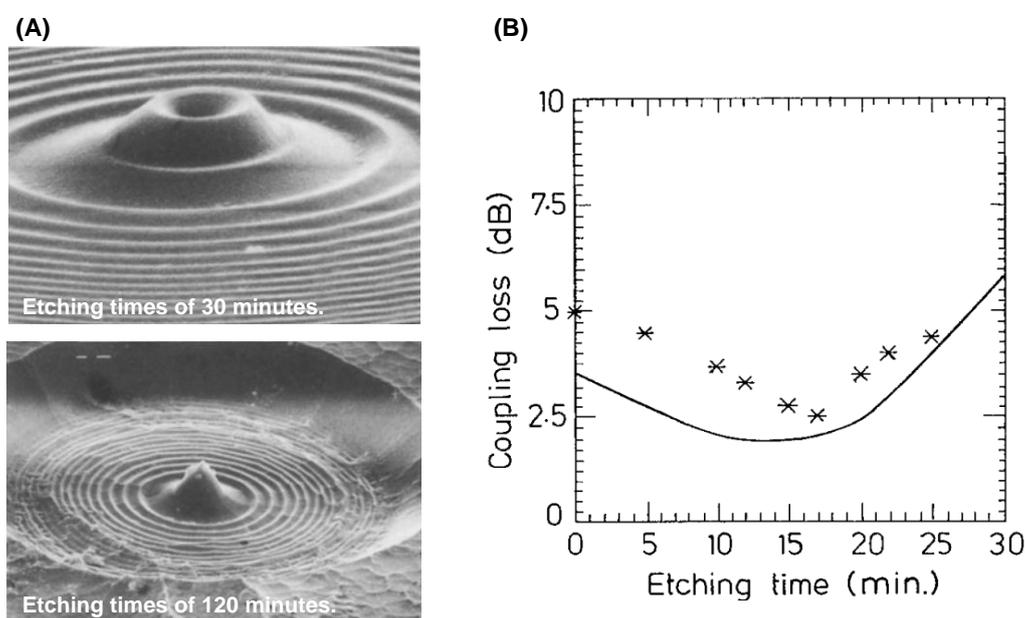


圖 1-13 Kotsas 等人所提出軸對稱微透鏡圖。圖中(A)為本研究所製作微透鏡實際圖，(B)為耦光效率與蝕刻時間關係圖[9]。

相較於電弧放電製程，蝕刻法之類的方式在量產上具有相對高的優勢，在商業上也較有價值。故 Yang 等人在 2004 年[24]，提出將蝕刻結合熔燒的研究。藉由蝕刻後再熔燒，減少光纖熔融程度，蝕刻液以機油與氫氟酸形成混和層，故能夠將光纖蝕刻成圓錐狀結構。蝕刻後再將光纖經電弧放電熔燒，使光纖端面形成雙曲線微透鏡，如圖 1-14 所示。這樣的雙曲線光纖微透鏡，能夠達到 80% 的高耦光效率，但熔燒與蝕刻的控制不易仍然難達量產。

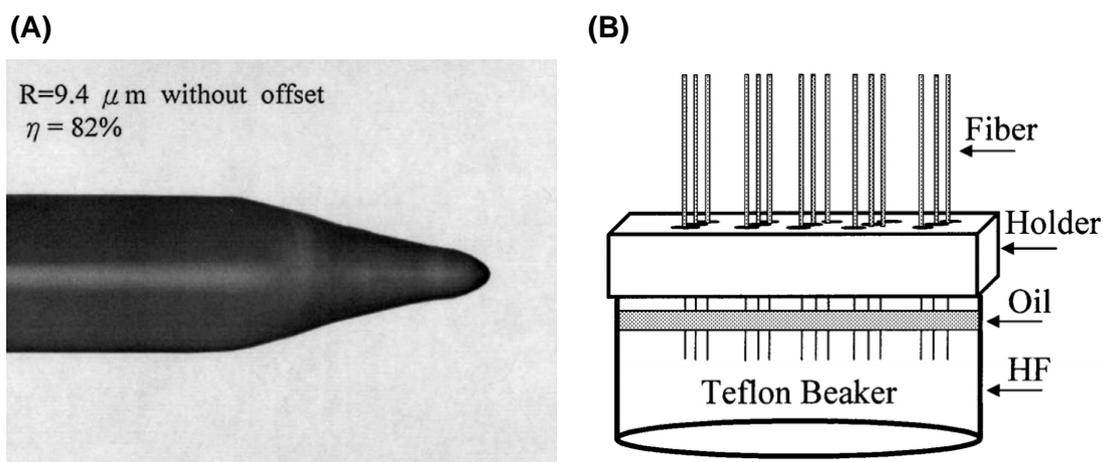


圖 1-14 Yang 等人所提出雙曲線微透鏡圖。圖中(A)為本研究所製作微透鏡實際圖，(B)蝕刻溶液分層與光纖架設架示意圖[24]。

前述的蝕刻或熔燒等方式，皆是以破壞性方式將光纖端面形成微透鏡結構，這樣的方法對設備成本要求較高且不易控制。在 2003 年，Kim 等人提出點膠法製作光纖微透鏡[25]。利用 UV 膠照射 UV 光會固化的特性，在平端的光纖端面上沾塗液態 UV 膠，因為表面張力的作用，沾塗上的液體會形成半球狀結構，在照射 UV 光後得到一半球狀微透鏡結構，如圖 1-15 所示。由於製作出半球型微透鏡曲率半徑非常大，故無法用於雷射二極體耦光，主要應用於光纖對光纖耦合。

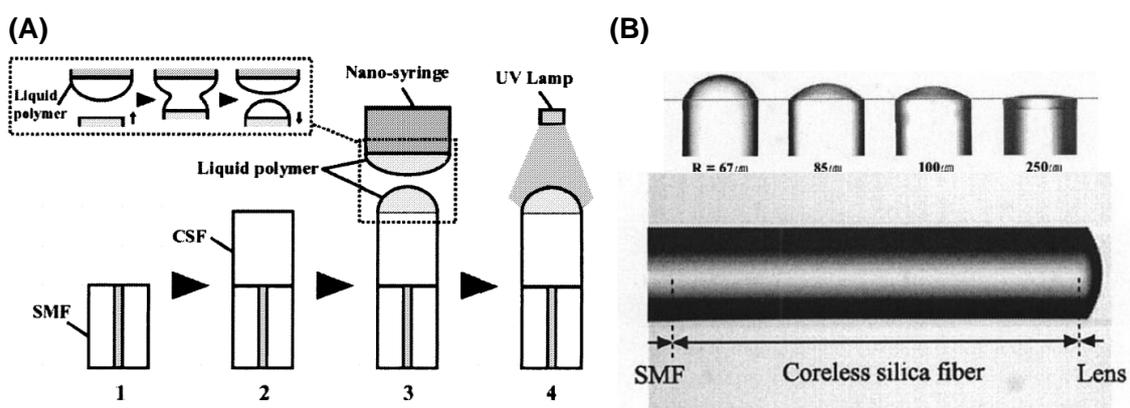


圖 1-15 Kim 等人所提出 UV 膠點膠法示意圖。圖中(A)為點膠法製程示意圖，(B)為半球形軸對稱光纖微透鏡圖[25]。

為改善點膠法只能製作軸對稱半球形微透鏡的缺點，有學者提出結合 UV 膠與微影技術製作非球面微透鏡[26]，但耦光效率受限於製程始終不佳。在 2011 年，Wu 等人提出以靜電力拉伸 SU-8 光阻製作非球面光纖透鏡[27]。以 SU-8 光阻劑 (Photoresist) 為材料，將其沾塗於光纖端面，透過外部加熱使光阻劑維持液態流動性，並給予一個均勻電場，產生靜電力拉伸改變其曲率半徑，如圖 1-16 所示。所製作微透鏡為軸對稱非球面狀，在與雷射二極體之間耦合效率能達到 78%，此方法能透過調整電場在拉伸過程調整微透鏡曲率半徑，但由於沾塗上的光阻劑量大，僅能用於光纖核心與曲率半徑較大的多模光纖。

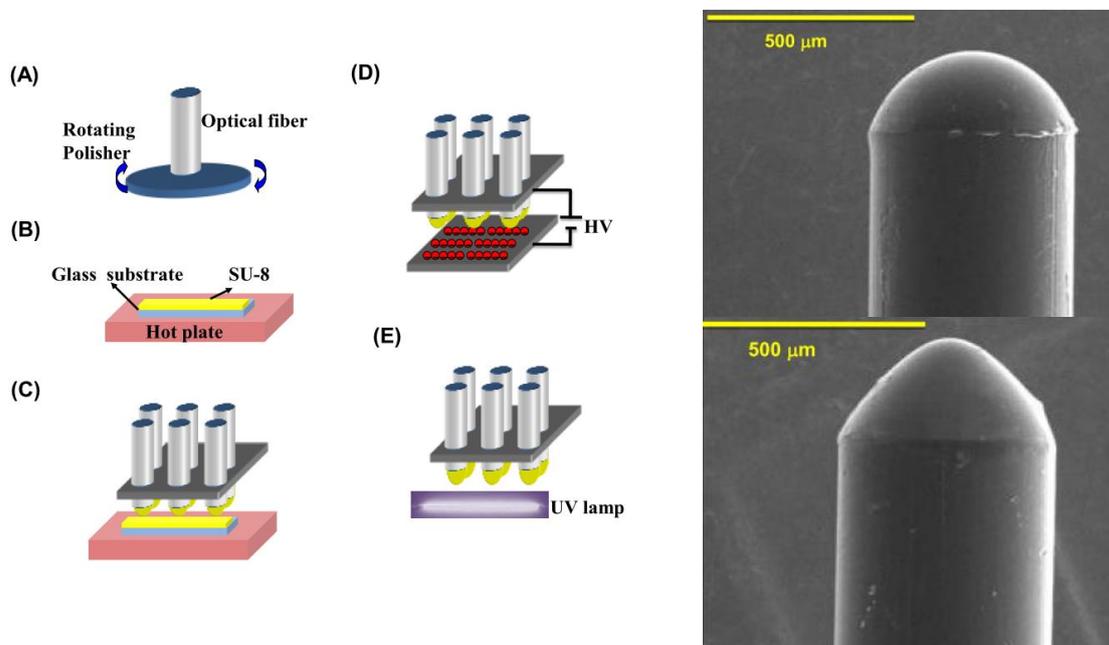


圖 1-16 Wu 等人所提出靜電力拉伸法示意圖。其中左圖為靜電力拉伸 SU-8 光阻製作非球面光纖透鏡製程示意圖，右圖為非半球面軸對稱光纖微透鏡 SEM 圖[27]。

#### 1.4.2 非軸對稱光纖微透鏡製作技術

非軸對稱光纖微透鏡，製作上較為複雜，不能以簡單的物理原理如表面張力製作，故相對地對設備要求較高，但為了得到與雷射二極體達到模態匹配之光纖微透

鏡，非軸對稱光纖的製作也被廣為研究。一般而言，常見的製作方法有雷射加工法與研磨加工法兩種。

在 1992 年，Presby 等人提出以 CO<sub>2</sub> 雷射加工[28]，直接在光纖端面製作出非軸對稱雙曲線光纖微透鏡。固定 CO<sub>2</sub> 雷射作為加工工具，放置光纖於精密電腦控制平台上，藉由電腦控制光纖與 CO<sub>2</sub> 雷射相對位置對其加工，如圖 1-17 所示。藉由 CO<sub>2</sub> 雷射高能量，將光纖端面熔融塑形，形成雙曲線光纖微透鏡，耦光效率能達到 78%，但加工工具昂貴，且重複性不佳。另外在準分子雷射(Excimer laser)與離子束加工技術的發展帶動下，也衍生許多雷射加工技術製作微透鏡的研究[29, 30]

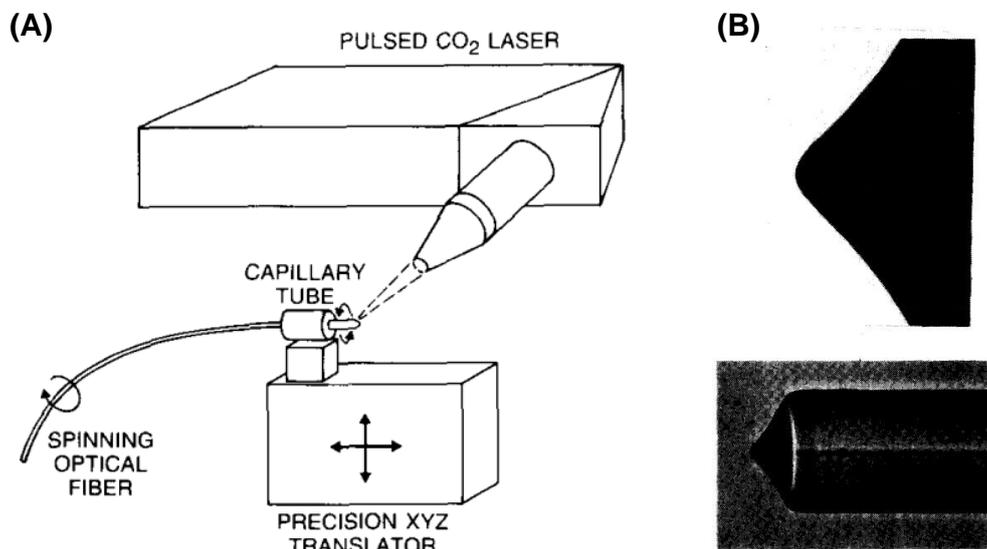


圖 1-17 Presby 等人所提出 CO<sub>2</sub> 雷射加工製作圖。圖中(A)為 CO<sub>2</sub> 雷射加工架構示意圖，(B)雙曲線光纖微透鏡實際圖[28]。

在 1995 年，Modavis 等人提出雙楔型光纖微透鏡[31]。以研磨的方式對光纖端面加工，藉由在每間隔 180° 的位置研磨，製作出具有楔型結構的光纖尖端，之後再以相同位置再一次研磨，但第二次研磨使用更陡的角度研磨，形成更尖的楔型尖端而成為雙楔型光纖微透鏡，如圖 1-18 所示。此研究能夠實現最高 78% 的耦光效率，但由於需要多次的轉換研磨，使得微透鏡容易形成過大的偏心量(Offset)，不僅影響耦光效率且重複性低。

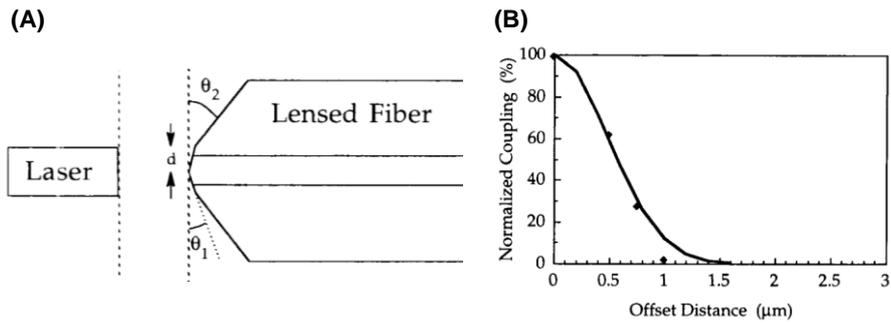


圖 1-18 Modavis 等人所提出雙楔型光纖微透鏡示意圖。圖中(A)為雙楔型光纖微透鏡與雷射耦合示意圖，(B)為耦光效率與偏心率關係圖[31]。

在 2004 年，Yeh 等人提出四角錐型光纖微透鏡[32]。在每間隔 90 度的位置對光纖端面研磨，總共研磨四次使光纖端面形成四角錐型，再熔燒形成光纖微透鏡。此方法能夠藉由不同角度的研磨，形成不同高寬比的光纖端面，以利達到與雷射模態匹配之微透鏡模態，如圖 1-19 所示。最高能實 83% 的耦光效率，但由於研磨步驟多偏心率不易控制，且在熔燒將端面形成微透鏡時，因為光纖核心的熔點低於外包層而會形成凸起。故在研磨時最後還須預先去除尖點，使得偏心率難以控制，製程良率不佳而耗時。

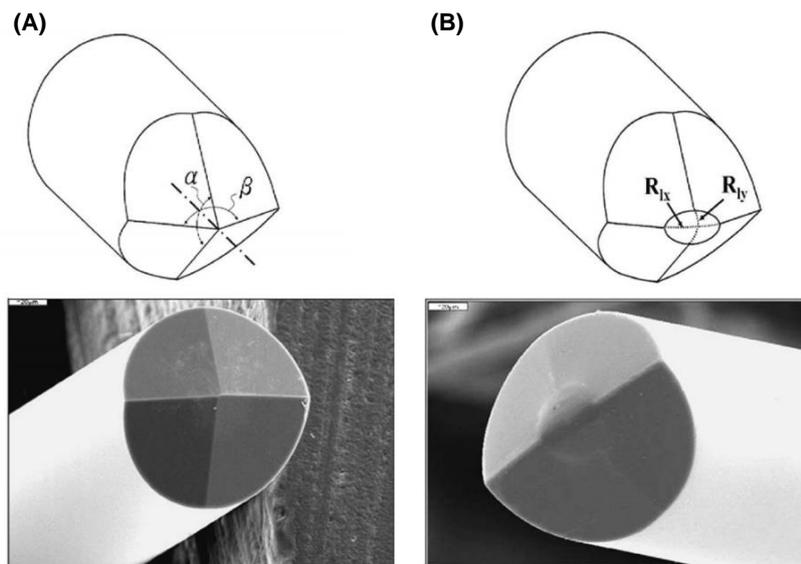


圖 1-19 Yeh 等人所提出四角錐型微透鏡光纖圖。圖中(A)為四角錐型端面示意圖，(B)為四角錐型光纖微透鏡示意圖與 SEM 圖[32]。

在 2005 年，Yeh 等人改良四角錐型製程，提出錐式楔型光纖微透鏡[33]。以光纖持續自轉的方式研磨，先研磨出圓錐狀端面後，在每間隔  $180^\circ$  位置研磨出兩楔型面，如圖 1-20 所示。由於研磨步驟的減少降低微透鏡的偏心率，此方法能夠實現 84% 的高耦光效率。但仍然需要重度的熔燒形成透鏡，故在熔燒前亦須去除尖點避免凸起，使得製程重複性低且耗時。

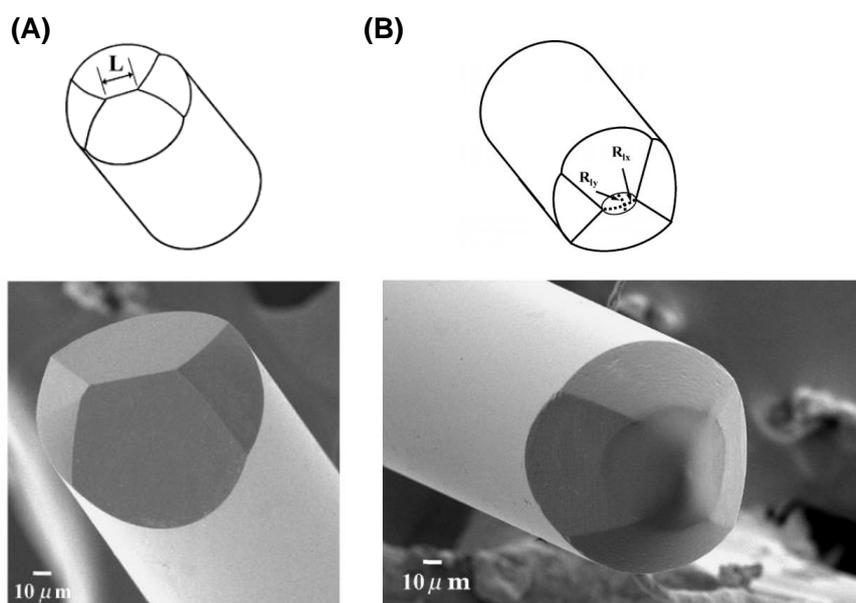


圖 1-20 Yeh 等人所提出錐式楔型光纖微透鏡圖。圖中(A)與(B)分別為微透鏡熔燒前後示意圖與 SEM 圖[33]。

雖能透過設計不同角度與研磨方式，製作出不同結構的光纖微透鏡結構，但研磨步驟的繁多與人為控制的差異，使得製程的產量與良率皆不彰。在 2007 年 Lu 等人，改良研磨方式提出橢圓錐型光纖微透鏡製程[34]。藉由在研磨過程中給予周期性下壓力變化，在一次性的研磨中製作出具有橢圓錐型之光纖端面，如圖 1-21 所示。這樣的製程不僅減少人為因素影響良率，也不需要預先去除尖點的研磨，不僅能實現高耦光效率，亦能具有 71% 的平均耦光效率。接著在 2011 年，Liu 等人提出雙變曲率光纖微透鏡製作[35]。如圖 1-22 所示，此研究使用改良後的自動研磨機台，以機械控制給予光纖研磨時的下壓力，以全自動化的研磨步驟，製作出具有

雙變曲率之光纖端面。以自動化機械控制研磨，不僅能更精準研磨出所需的微透鏡型狀，也能更有效的控制曲率半徑，使得研磨能達到 80% 以上的高平均耦光效率。

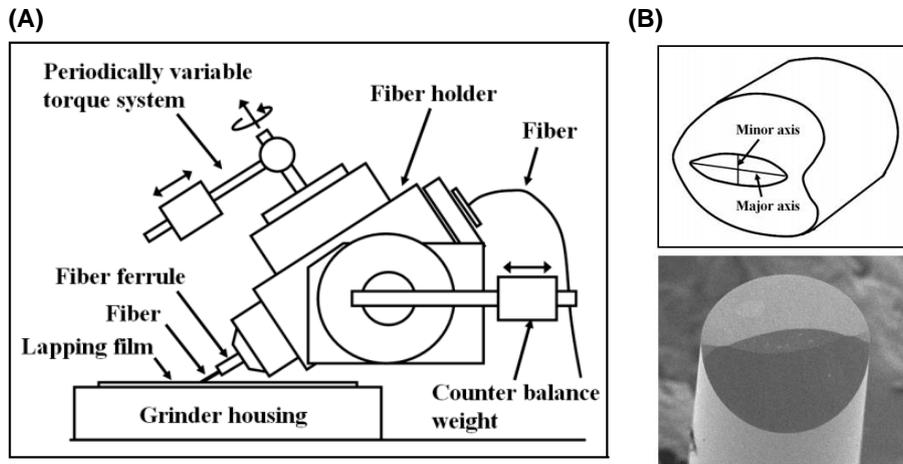


圖 1-21 Lu 等人所提出周期性變扭矩研磨機台示意圖。圖中(A)可看見研磨機利用重物旋轉產生變週期性扭矩，(B)為橢圓錐型光纖微透鏡示意圖與 SEM 圖[34]。

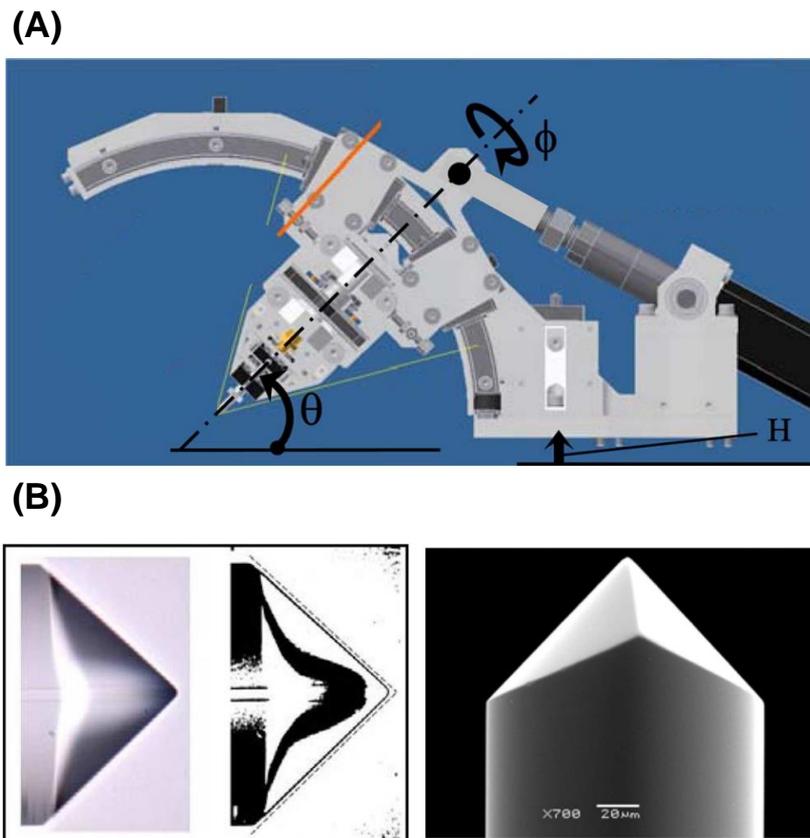
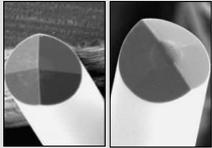
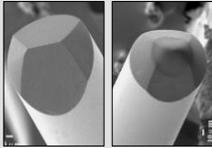
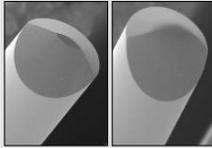
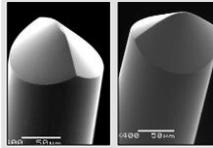


圖 1-22 Liu 等人所提出自動化研磨機台示意圖。圖中(A)可看見研磨機台以機械式控制研磨參數，(B)為雙變曲率光纖微透鏡短軸側視圖與 SEM 圖[35]。

由於研磨法為機械式加工，能夠穩定創造不同高寬比之光纖端面結構，能藉由設計不同研磨機構或參數，實現與雷射二極體模態匹配之光纖端面結構。研磨成型後端面粗糙且曲率半徑小，常須配合電弧放點法對光纖端面進行拋光與曲率半徑調整。在熔燒過程中，由於光纖核心與包覆層材料參雜差異，使得光纖核心因為熔點差異而凸起，故在熔燒法製程中常需加入去除尖點的程序，這使得研磨步驟繁雜而難控制良率。在表 1-1 中，列舉四種研磨法所製作之光纖微透鏡製程，比較不同製程在耦光效率表現與其製程步驟數量。

表 1-1 研磨法製作光纖微透鏡比較表。比較四種不同製作光纖微透鏡研磨製程，包含光纖微透鏡圖、製作過程控制軸向數、進給量給予方式、耦光效率與研磨步驟量(+1 為熔燒前去除尖點之步驟)[32-35]。

Structure	QPSM	CWSM	AECSM	DVCM
	[Yeh et al., 2004]	[Yeh et al., 2005]	[Lu et al., 2007]	[Liu et al., 2011]
Fiber diagram				
Parameter control	One-axis machining	One-axis machining	Two-axis machining	Three-axis machining
Feeding	Manually	Manually	Manually	Automatic
Grinding step	4+1	3+1	1+1	1
Average C.E.	NA	71%	71%	83%

## 1.5 研究動機與目的

目前常見製作非軸對稱微透鏡光纖方法，大多為破壞性加工，由電弧放電方式對光纖進行熔融形成微透鏡，或是以高能量雷射直接對微透鏡進行熔融加工。此類在光纖端面產生加熱熔融的方式，為不可逆的製程，製作失敗就會失去費時研磨出的光纖。然而熔燒法製作時，電弧放電的距離、放電時間、放電的電流與放電次數都會影響熔燒結果，這使得在研磨時對偏心率要求高，影響整個製程的良率，造成生產重複性低且耗時。另外熔融加工的方式，對光纖的選擇要求高，需要光纖本身材質均勻且對稱，許多特殊摻雜光纖，如極化保持光纖或是摻鉕光纖等。由於摻雜部分熔點與光纖本身差異很大，故無法以熔融方式有效加工。

本研究發展一種創新製程，結合雙變曲率光纖研磨法與靜電力拉伸法，製作非軸對稱微透鏡光纖。首先在研磨完成之光纖端面沾附旋塗玻璃，接著配合靜電力拉伸法，改變旋塗玻璃薄膜之曲率半徑(Radius of curvature, ROC)，製作出高效能光纖微透鏡。相較於傳統方法，捨去電弧放電形成微透鏡的製程，配合旋塗玻璃在沾塗後使用靜電力拉伸的方法，不僅能有效地控制微透鏡之曲率半徑，且相較於點膠法僅能製作大曲率半徑之微透鏡，本製程能在小光纖核心且曲率半徑小的單模光纖上實現。使用旋塗玻璃不僅考慮材料在製作上簡便，相較於光阻劑等，無須對材料進行加熱等額外條件。旋塗玻璃在半導體製程常用於表面平坦化製程，在塗布時可填補進入極小的縫隙，使其表面平坦猶如拋光步驟。而旋塗玻璃在固化後特性與玻璃相近，適合用於玻璃光纖的製作。在製程上本研究與電弧放電熔燒法，最大差別在於可重新製作，若遇到所製作之微透鏡曲率半徑不佳或是有瑕疵，本製程僅需將旋塗玻璃以丙酮拭去，即可重新製作微透鏡製程。在製程上不會浪費長時間精密研磨完成之光纖樣本，且製程為一次性加工，大幅降低損壞樣本之風險。

故本研究提出一種創新製程，製作雙曲面微透鏡光纖，其曲率半徑及高寬比可與雷射二極體達到模態匹配，兩者耦合時可實現高耦合效率，且在製程的良率與時間都能夠大幅提升，在產業上極具競爭力。

## 1.6 論文架構

本論文共分五章節，包含緒論、理論分析、實驗設計與架構、實驗結果與討論、結論與未來展望，如圖 1-23 所示。

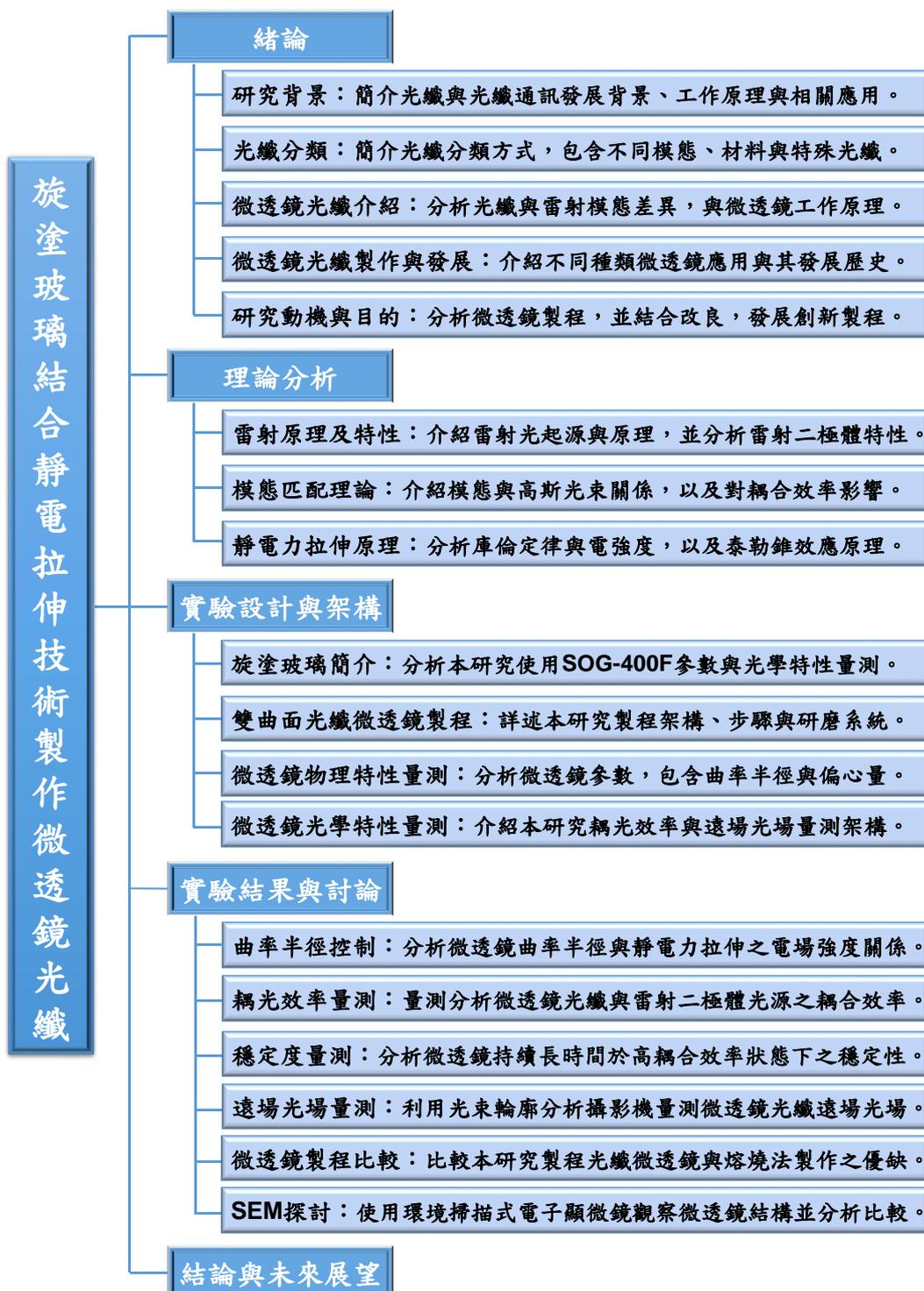


圖 1-23 論文架構枝狀圖。

## 第二章 理論分析

### 2.1 雷射光源簡介

在 1960 年，利用共振腔產生雷射光的原理率先被美國物理學家 Theodore Malman 提出。雷射在各領域皆具有重要應用，可以用來定位對準、量測距離及加工切割等作業，另外在醫療、娛樂與光纖通訊上的應用更是廣為研究[36, 37]。

二極體雷射與一般二極體有類似的 P-N 接面構造形成主動層，其差異在於二極體雷射具有一對鏡面反射層形成共振腔。雷射二極體依據波長與應用，大致上分為短波長雷射與長波長雷射兩類。短波長雷射的發光波長由 390 nm 到 950 nm，主要應用於印表機、光碟機、掃描器與顯示器等應用上；長波長雷射波長由 980 nm 一直到 1550 nm，主要應用於光纖通訊上。雷射二極體的光波場須滿足馬克斯威爾(Maxwell)方程式，波導結構之邊界條件為電磁場之本徵態(Eigenstate)。不同的本徵態，會呈現不同的光場分佈，也稱為模態(Mode)。一般而言，模態分為縱模與橫模，不同的縱模或橫模會有不同的共振頻率，使得光場在垂直方向中呈現不同的分佈。為研究雷射二極體與光纖之間耦合關係，主要關心橫模的分佈，因為其影響著光束發散角、光點大小(Spot size)及能量的分佈，故被討論研究。

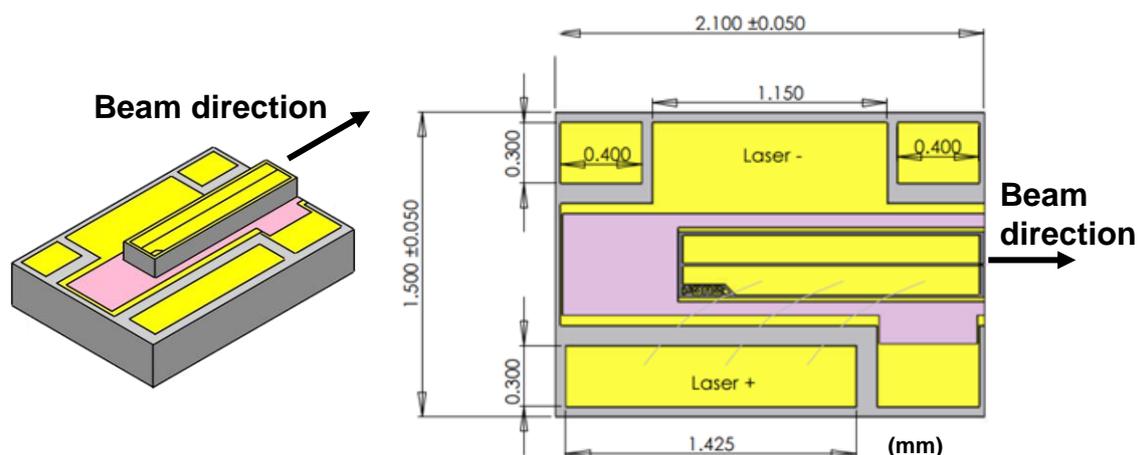


圖 2-1 邊射型 980 nm 雷射二極體示意圖與規格圖。圖中單位為毫米(mm)，雷射二極體底座大小為 2.1 mm×1.5 mm[38]。

本研究使用邊射型 980 nm 單模雷射二極體，如圖 2-1 所示。雷射二極體中心波長為 983 nm，在半高全寬(Half maximum full width, FWHM)的定義量測中[39]，具有垂直軸向 26° 與水平軸向 7° 的發散角。具有這樣的發散角是因為雷射二極體出光口會聚集能量，為避免熱能影響雷射光束設計具有較寬的出光口。由於出光口設計影響，光源會逐漸發散，呈橢圓狀光場且具有曲面波前相位。在近場光場中，橢圓狀光場長軸會呈現於水平軸向，而逐漸發散到遠場光場時，橢圓狀光場長軸會呈現於垂直軸向。而雷射模場的高寬比  $r_a$ ，能夠以遠場光場之長軸與短軸強度分佈半高寬比值定義。當垂直方向與水平方向發散角為  $\theta_L$  與  $\theta_W$  時，高寬比公式如下：

$$r_a = \frac{\tan\left(\frac{\theta_L}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\theta_W}{2}\right)} = \frac{L}{W} \dots\dots\dots(2.1)$$

將邊射型 980 nm 單模二極體雷射發散角帶入上式，可得到雷射模場高寬比  $r_a=3.775$ ，如圖 2-2 所示，其中 L 與 W 為模場高度與寬度。

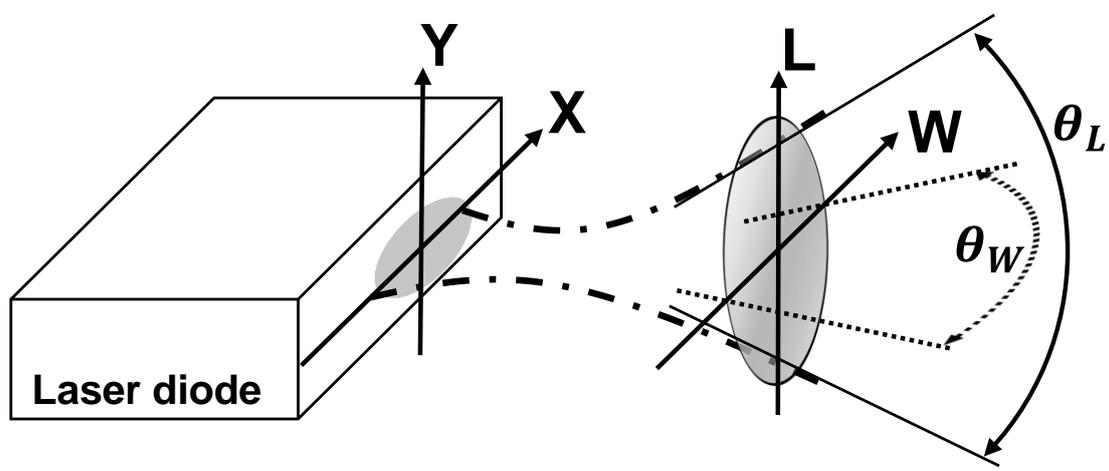


圖 2-2 雷射二極體遠場光場示意圖。圖中雷射二極體為邊射形，光源離開出光口後，會由長軸位於水平方向之橢圓形轉變成垂直方向之橢圓形。

## 2.2 模態匹配理論

一般而言，二極體雷射模態與單模光纖模態無法匹配，在兩者之間的耦合會有超過一半以上的能量會因此流失，不僅增加工作成本也造成應用上的問題。本節將介紹兩者之間的差異，以及如何實現模態匹配達到高耦合效率的傳輸。

### 2.2.1 高斯光束

高斯光束(Gaussian beam)的數學函數，為亥姆霍茲方程(Helmholtz equation)的一個近軸近似解，此特解能描述理想雷射光束與光纖模態的性質。大多雷射都能夠近似高斯光束的條件描述，而雷射在光諧振腔內以橫向波模傳播。當波模在滿足繞射極限的鏡片中發生折射時，高斯光束會轉變為不同參數之高斯光束，因此在雷射光學中，高斯光束是一種便利、廣泛應用的模型[40]。

#### (一) 高斯光束特性:

一般在光學分析中，假設光源為一均勻分布光點之總和。然而，雷射具有高度指向性，在空間中呈現不均勻分布，如圖 2-3 所示。依高斯光束傳播理論，設雷射光為  $Z$  軸方向傳遞之近光軸平面波，將條件帶入波動方程式(Wave equation)中，可得到一個高斯函數特解。在理想狀態，即能以高斯光束表示雷射光束之傳播[41]。

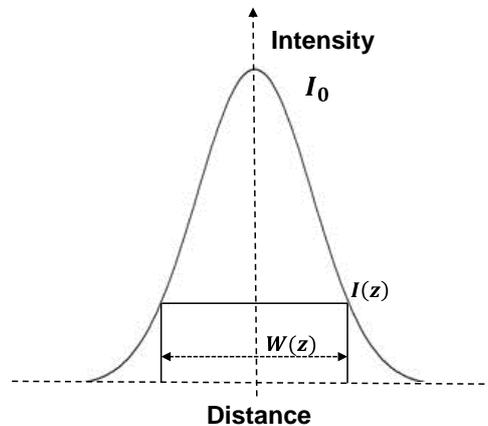


圖 2-3 高斯分布示意圖。其中 $W(z)$ 為光束大小，其光強度為 $I(z)$ 。

## (二) 高斯光束之重要參數:

理論上，理想條件下高斯光束能夠描述雷射光場之模態，如圖 2-4，假設高斯光束沿 Z 軸方向傳遞之，其中雷射光波長為  $\lambda$ ，則高斯光束具有某些重要參數如下:

(一) 高斯光束寬度  $W(Z)$ : 距離光腰 Z 處之光點大小(Spot size)，公式如下:

$$W = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi W_0^2}\right)^2} \dots\dots\dots(2.11)$$

(二) 光腰(Beam waist)  $W_0$ : 光場中高斯光束之寬度最小處。

(三) 光束發散角  $\theta$ : 高斯光束之光場發散角，公式如下:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\lambda}{\pi W_0}\right) \dots\dots\dots(2.12)$$

(四) 波前曲率半徑  $R(Z)$ : 距離光腰 Z 處之波前曲率半徑，公式如下:

$$R(Z) = Z \left[ 1 + \left(\frac{\pi W_0^2}{\lambda Z}\right)^2 \right] \dots\dots\dots(2.13)$$

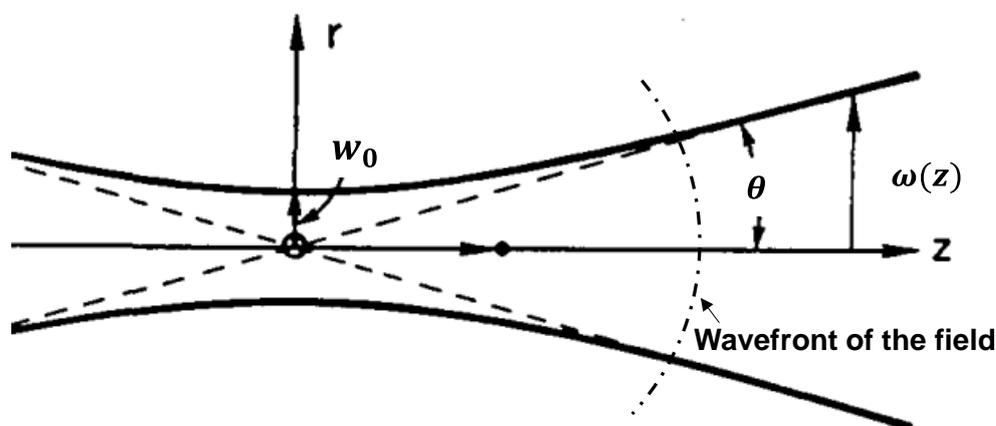


圖 2-4 高斯光束示意圖與重要參數。圖中曲線部分為雷射光之波前示意圖[42]。

### 2.2.2 模態匹配

光纖通訊中，雷射二極體與光纖兩者之間，耦合效率取決於兩者間模態是否匹配，其中模態包含兩部分，能量分布(光場)與相位分布(波前)。單模光纖與雷射二極體模態如表 2-1:

表 2-1 二極體雷射與單模光纖內部之模態性質表。包含波前曲率與光場分布情形。

	波前曲率	光場分布
單模光纖內部	平面波前( $R = \infty$ )	圓形光場
二極體雷射	曲面波前( $R_x, R_y$ )	橢圓形光場

由於雷射與光纖模態的差異造成不匹配，使得兩者之間耦合效率非常差。為了達到完全匹配(Mode match)，即兩者之光場分布與波前形狀需要一致，能透過微透鏡改變雷射光模態達到此目的。當雷射光行經微透鏡時，光束會因為光程差的影響，使得波前曲率半徑由曲面波轉平面波。此時，經過微透鏡之光束與光纖內部模場達到匹配，便能實現高耦合效率；反之，若光束行經微透鏡時，波前曲率半徑尚為曲面波前，則會造成模態不匹配，而使得耦合效率降低。

### 2.2.3 耦合效率

探討雷射與微透鏡光纖之間耦合效率時，在近軸條件下，可透過光學矩陣 ABCD 定律(ABCD law)描述之間光學行為，而此 $2 \times 2$ 矩陣作用於入射光之複數曲率半徑得到的光學性質[43, 44]。如圖 2-5 所示，當兩者之光跡交平面(Reference plane)位於光纖微透鏡頂部時，雷射光束與光纖微透鏡之矩陣如下：

$$M_{LD} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.14)$$

$$M_{Lensed} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-N_L}{R_L} & N_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{N_F}{N_L} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.15)$$

其中， $R_L$ 為微透鏡之曲率半徑， $L_0$ 為雷射出光口至微透鏡距離， $N_L$ 與 $N_F$ 分別表示微透鏡與光纖核心之折射率。而當雷射光束經過微透鏡，耦合入光纖核心時光纖傳輸矩陣可寫成：

$$M_T = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-N_L}{R_L} & N_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{N_F}{N_L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \frac{N_F}{N_L} \\ \frac{1-N_L}{R_L} & \frac{N_F}{N_L} \left[ \frac{L_1(1-N_L)}{R_L} \right] + N_L \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.16)$$

原理上，在不考慮材料、吸收、形變、彎曲及反射等效應，雷射與光纖之間達到完全匹配，則耦光效率可達到 100%。然而在實際上兩者之間存在模態差異，加上對位時的誤差與介質影響，使得耦合效率降低。

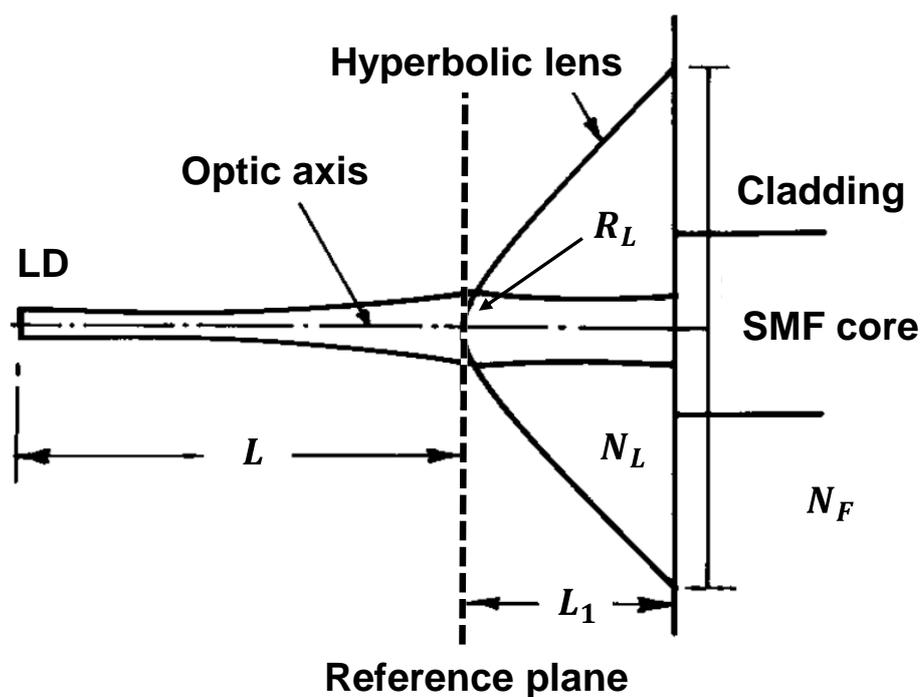


圖 2-5 雷射光束與微透鏡光纖之間耦合分析示意圖。圖中左端為雷射光源，光源傳遞至光纖微透鏡時，會改變其模態，並傳遞至光纖核心中[44]。

## 2.3 靜電力拉伸介紹

利用靜電力拉伸，改變液滴曲率半徑的理論與實驗，在 1964 年首先被 Taylor 提出研究[45, 46]。將液滴至於一對平行導電板中，產生均勻電場進而對液滴產生拉伸現象，而改變其曲率半徑。

### 2.3.1 庫倫定律與電場強度

(一) 庫倫定律:

庫倫定律(Coulomb's law)在 1785 由法國物理學家查爾斯·庫倫(Charles coulomb) 提出而命名，是首條在電學中的定量規律，就此人類對電學的研究邁入定量階段[47]。此定律主要表示兩靜止電荷間的交互作用力，此作用力與電量的乘積成正比，與距離的平方成反比，且作用在兩電荷連線方向上，同性相斥異性相吸，其公式如下:

$$F = k \frac{|q||q'|}{r^2} \dots\dots\dots(2.17)$$

其中，F 為靜電力(Electrostatic force)大小， $q$ 與 $q'$ 為兩靜止電荷所帶電量， $r$ 為兩電荷間距離， $k$ 為庫倫常數， $k = 8.99 \times 10^9(N \cdot m^2/C^2)$ 。

(二) 電場強度:

電場(Electric, E)為一電荷產生，作用於另一電荷上使其受到作用力，在概念上為庫倫定律之延伸。在均勻電場作用下，電場方向可以是任意方向，而電位差與兩平行極板間距離有關如圖 2-6 所式。而電場定義為空間中某一點每單位正電荷所受的靜電力，其公式如下:

$$E = \frac{F}{q'} \dots\dots\dots(2.18)$$

其中 E 為電場大小，F 為靜電力大小。另外在兩平行極板形成的均勻電場中，正電荷 $q'$ 由極板 I 移動至極板 II 受一力 F 作用，如下式:

$$F = q'E \dots\dots\dots(2.19)$$

當此靜電力乘上移動距離，可得到電場對此電荷所作的功 $W_E$ 寫為：

$$W_E = Fd = q'Ed \dots\dots\dots(2.20)$$

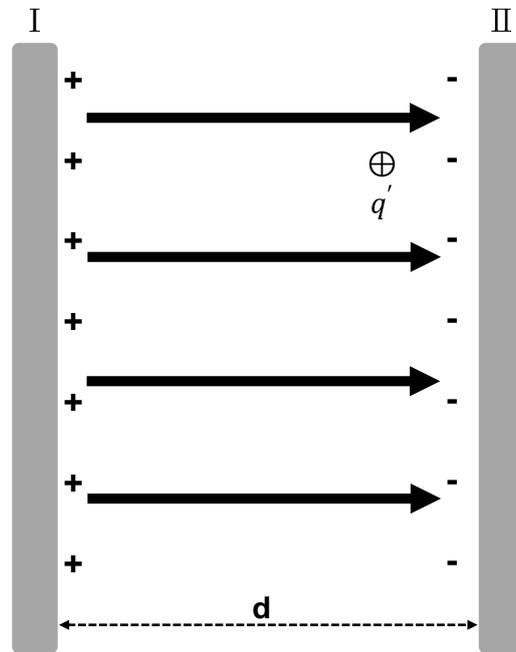


圖 2-6 均勻電場對電荷做功示意圖。其中 $q'$ 為電場中任一電荷， $d$ 為兩極板間距離。

### 2.3.2 泰勒錐效應

將一液滴置於一對平行導電板中，給予一高電壓使液滴內負電荷被下板正電壓吸引，使得液滴表面帶有較多的正電荷。另外，由於下板帶有正高壓，使得液滴內正電荷與其相斥，而往液滴中心集中累積，形成液滴帶電特性。當帶電液滴持續累積正電荷，直到正電荷所產生之庫倫力與液滴表面張力形成平衡，液滴中心會形成一個錐狀體，此錐體稱之為泰勒錐(Taylor cone)[48]，如圖 2-7 所示。

在液滴形成泰勒錐時，液滴的曲率半徑能夠透過電場強度控制，此時電場強度與液滴曲率半徑會有一關係式為：

$$C = E \sqrt{\frac{R}{T}} \dots\dots\dots(2.17)$$

其中  $C$  為常數， $E$  為電場強度， $R$  為液滴曲率半徑以及  $T$  為液滴之表面張力。由此方程式可以得知，由於表面張力為常數，故電場強度成反比關係。置一液滴於均

勻電場中，液滴表面受到靜電力拉伸，當電場強度越大時，液滴曲率半徑會越小，逐漸由原本半球面狀(Hemispherical shape)形成非半球面狀(Non-spherical shape)[49]。而當電場強度大於表面張力達到臨界值時，液滴會在泰勒錐前端突破表面張力，形成電紡織現象(Electrospinning)，如圖 2-8 所示。

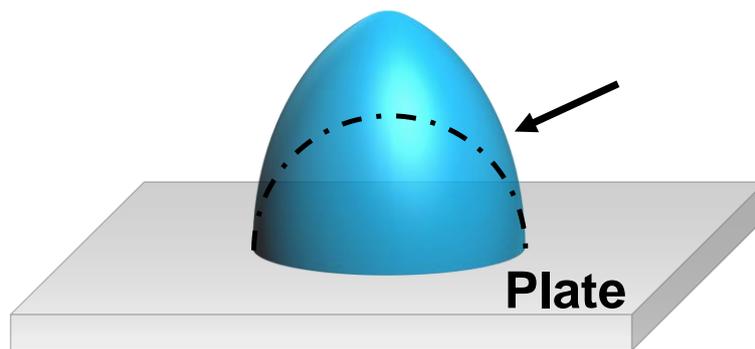


圖 2-7 泰勒錐示意圖。圖中虛線部分為原始半球形狀，經拉伸後形成泰勒錐。

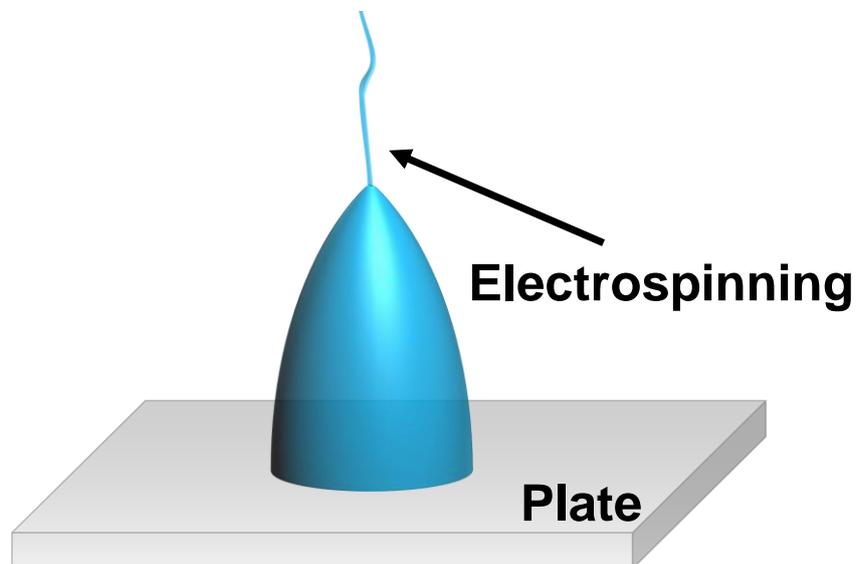


圖 2-8 電紡織現象示意圖。當電場強度突破臨界強度，液滴會突破表面張力，形成電紡織現象。

## 第三章 雙曲面光纖微透鏡研製與特性分析

在本章節中，第一小節將先介紹本研究所使用製作微透鏡之材料旋塗玻璃，主要包含其特性與量測之光學性質。第二小節介紹本研究製作微透鏡之製程步驟與結構設計，並介紹實驗中所使用儀器。最後在第三節將介紹本研究所製作微透鏡之特性量測，包含物理特性與光學特性的量測方式與架構。

### 3.1 旋塗玻璃簡介

旋塗玻璃(Spin-on glass, SOG)為液態二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )，在半導體製程中主要用於局部表面平坦化與表面改質[50]。一般而言，製程以旋轉塗布(Spin coating)方式均勻塗布於晶圓表面，藉由旋塗玻璃特性填補凹陷孔洞。塗布完成後經過熱處理去除溶劑，使晶圓表片上留下固化(Curing)後的旋塗玻璃，其性質為近似二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )的介電材料[51-53]。

本研究所使用旋塗玻璃(SOG-400F, Filmtronics Inc., USA)為疏水性介電質，主要成份為 Methylsilsesquioxane polymers ( $(\text{H}_3\text{CSiO}_{3/2})_n$ )，在進行表面平坦化處理時，能夠流入寬度  $0.1 \mu\text{m}$  以下的縫隙內。旋塗玻璃溶液的基本特性列於表 3-1 中，另外旋塗玻璃固化後形成塗膜之特性列於表 3-2 中。另外為了瞭解旋塗玻璃在作為光傳遞介質時特性，我們將旋塗玻璃旋塗於玻璃基板後，以  $100^\circ\text{C}$  的溫度充分固化，再將基板置於分光光度計(SP-880, Metertech Inc., USA)，量測其在可見光至近紅外線波段(400 nm 至 1100 nm)之光穿透率，並以折射率計(PAL-RI, Atago CO., JAPAN)量測旋塗玻璃在固化過程之折射率變化，結果顯示於圖 3-1。結果顯示實驗使用之 SOG-400F 在量測波段皆具有極佳的光穿透性，在本研究使用之 980 nm 雷射波段處有高於 99% 的光穿透性。另外在折射率量測結果顯示，在 SOG-400F 固化過程中折射率會持續上升，最終固化時折射率約為 1.42，其值略小於光纖核心，故本研究所製作之微透鏡具有相似於抗反射層之作用。綜合以上光學量測，顯示 SOG-400F 相當適合應用於光纖微透鏡製作，且適用於本研究所使用雷射二極體。

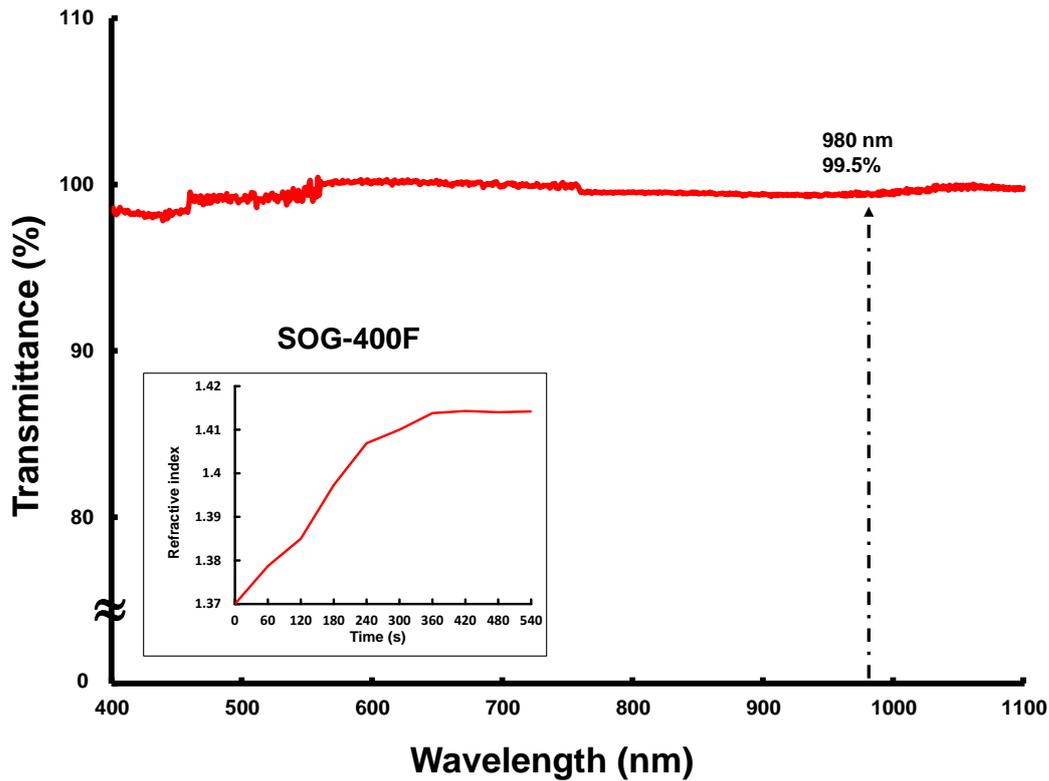


圖 3-1 旋塗玻璃(SOG-400F)光穿透率與折射率分布圖。圖中顯示本實驗所用旋塗玻璃在 400 nm 至 1100 nm 波段中光穿透率與折射率變化。

表 3-1 旋塗玻璃溶液基本特性表。包含水含量、黏滯度(常溫 25°C 狀態下)以及非揮發性溶液含量[54]。

<b>旋塗玻璃溶液特性</b> <b>SOG solution properties</b>	
水含量(Water content)	<b>0.0 wt/wt%</b>
黏滯度(Viscosity @ 25°C)	<b>1.70 cP</b>
非揮發性含量(Non-volatile content)	<b>12.5 wt/wt%</b>

表 3-2 旋塗玻璃塗膜基本特性表。包含水含量、黏滯度(常溫 25°C 狀態下)以及非揮發性溶液含量[54]。

<b>旋塗玻璃塗膜特性 SOG film properties</b>	
<b>膜厚(Thickness)</b>	<b>400 nm</b>
<b>收縮率(Shrinkage)</b>	<b>4%</b>
<b>有機含量(Organic content)</b>	<b>16%</b>
<b>折射率(Refractive index)</b>	<b>1.37</b>
<b>熱膨脹係數(Coefficient of thermal expansion)</b>	<b>3 ppm/K</b>
<b>在晶圓的非均勻性(Within wafer non-uniformity)</b>	<b>&lt; 2.0%RSD</b>
<b>殘留應力(Intrinsic stress )</b>	<b>60 MPa</b>
<b>蝕刻速度(Etch rate)</b>	<b>1.4 nm/min</b>
<b>相對介電常數(Relative permittivity)</b>	<b>2.6 MHz</b>

## 3.2 雙曲面光纖微透鏡製程

在本研究中，採用 980 nm 單模極化保持光纖(SM98-PS-U25A, Fujikura, Japan)，其外徑長 125  $\mu\text{m}$ ，核心直徑為 6.6  $\mu\text{m}$ (誤差值 $\pm 0.7 \mu\text{m}$ )，主要材料為二氧化矽。

### 3.2.1 微透鏡製作架構與步驟

本研究所提出雙曲面光纖微透鏡製程架構如圖 3-2 所示，以下將對製程的步驟詳細的解說：

#### (A) 光纖研磨：

首先將光纖前端以光纖剝除器(FO 103-S, Ripley, USA)將外包層剝除，之後將光纖裁切為 40 cm 每支，並利用光纖切割器(S325A, Furukawa electric CO., Japan)將裸光纖(Bare fiber)切平。接著將平端光纖以酒精擦拭乾淨後放入熊貓型光纖研磨機[55]，並利用 CCD 觀察將極化保持光纖應力集中區位置與研磨端面角度定位，最後固定光纖傾斜 45° 研磨。研磨時使用鑽石研磨片(Diamond lapping film 662XW, 3M Company., USA)，並設定研磨盤轉速為 930 rpm。利用電腦控制 Labview 程式給予研磨機參數研磨[56]，最終得到具有雙變曲率之光纖端面。

#### (B) 旋塗玻璃沾塗：

將研磨完成光纖擦拭乾淨，將光纖穿過一圓型金屬環(直徑 0.6 mm)，並將其固定於精密平台上且光纖端面垂直向下。在光纖下方放置玻璃基板，以微量注射器滴上微量(6  $\mu\text{L}$ )旋塗玻璃形成液滴。藉由 CCD 觀察，移動平台將光纖緩慢靠近液滴，在光纖端面碰到液滴時停止。此時由於表面張力的作用，旋塗玻璃會攀附上光纖端面，形成一層薄膜(Film)結構，最後移動平台將光纖離開液滴，完成沾塗步驟。

#### (C) 架構定位施加電場：

完成沾塗之光纖，將會具有雙變曲率之端面且表面上沾附一層旋塗玻璃薄膜，此時在光纖上的金屬環接上高壓電源供應器(Series 230, Spellman CO, USA)，並給予高壓正電，另外在光纖端面下方放置一片導電極板並接上接地端(Ground)，並調

整金屬環及光纖端面與導電極板至適當距離。在施加高壓電後，金屬環與電極板間會形成一個均勻垂直向下的電場，由於旋塗玻璃為介電質材料，薄膜內的負電荷會被金屬環上的正高壓吸引，加上薄膜內正電荷與正高壓相斥，故正電荷會不斷往薄膜尖端累積，使得旋塗玻璃薄膜逐漸成為尖狀。直到旋塗玻璃薄膜的表面張力，與薄膜前端累積之電荷達到平衡時，便會在光纖端面形成泰勒錐。

#### **(D) 電紡織現象:**

當上述之靜電力拉伸現象維持時，電荷會持續累積在旋塗玻璃薄膜尖端，當累積的正電荷產生之庫倫力大於表面張力時，旋塗玻璃會在薄膜尖端突破形成電紡織現象。此現象也能透過給予電壓進行調整，當給予電壓大於臨界值時，也能及時產生電紡織現象。由於旋塗玻璃薄膜暴露在空氣中會隨時間逐漸固化，本研究利用剛沾塗上光纖的旋塗玻璃流動性較高時，以電紡織現象對旋塗玻璃薄膜進行減量的動作。因為沾塗時旋塗玻璃會藉由表面張力攀附上光纖端面，實際攀附上的液體量大於實驗形成微透鏡所需，故藉由減量以達到更有效率的曲率半徑控制。

#### **(E) 靜電力拉伸:**

在電紡織現象持續一段時間後，由於旋塗玻璃薄膜會逐漸風乾固化，使得流動性降低，要突破表面張力形成電紡織越趨困難。此時靜電力與薄膜之表面張力達到平衡，而持續維持為泰勒錐的形狀。因此藉由調整高壓電源，產生不同的電場強度，就能對光纖端面上之旋塗玻璃薄膜，進行不同程度的靜電力拉伸。本研究藉由此靜電力拉伸現象，對旋塗玻璃微透鏡進行曲率半徑調整，直接且高效率地製作出研究所需之特定曲率半徑光纖微透鏡。

#### **(F) 固化:**

經過約五分鐘的靜電力拉伸，旋塗玻璃薄膜基本上已風乾固化不再形變，此時已固定此微透鏡之曲率半徑不再改變。在本步驟或製作流程中若發現微透鏡光纖之曲率半徑或形貌非實驗所需，可以將光纖浸入酒精或丙酮，利用超音波震洗將旋塗玻璃去除，並從(B)步驟重新製作微透鏡即可。本製程不僅能夠有效及時的製作出特定曲率半徑之微透鏡，且製程具可重複性不破壞精密研磨出的光纖樣本。

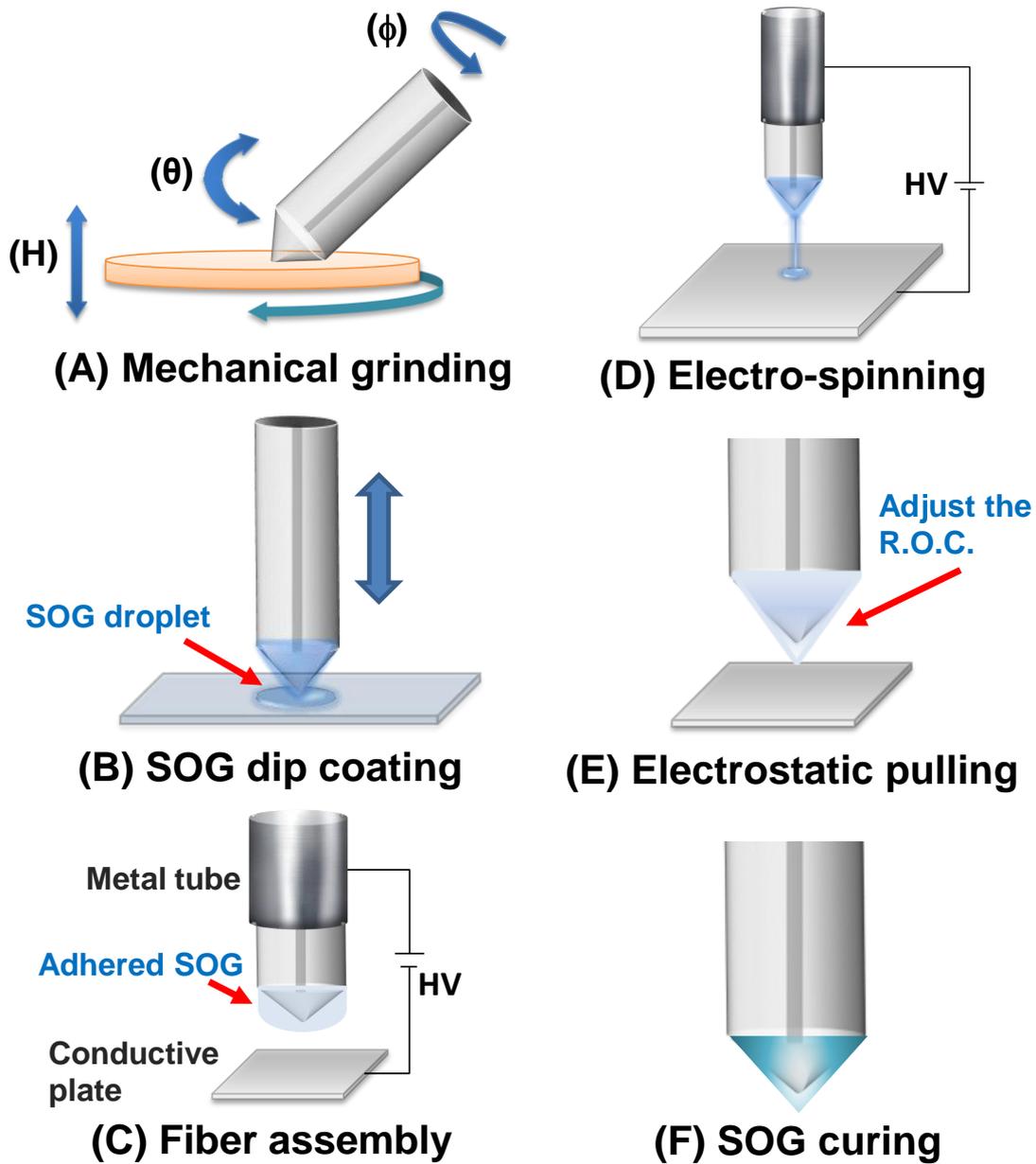


圖 3-2 雙變曲率光纖微透鏡製程示意圖。

### 3.2.2 研磨系統介紹

本研究所使用之光纖研磨機，為正修科技大學機電系蔡穎堅教授所開發，許正安同學所建構熊貓型光纖研磨機[55]，如圖 3-3 所示。有別於以往研究以人工方式或不同的裝置，改變研磨盤與光纖之間相對角度、速度與位置，來達到光纖端面上不同位置的不同材料移除率。此研磨機為全自動研磨系統，將切平後的裸光纖放入

機器後，調整好露出陶瓷套管長度後便能以電腦控制研磨。由於本研究所使用光纖為極化保持光纖，故在研磨前必須先對 SAP 角度( $\theta_p$ )進行定位，藉由 CCD 觀察定位完成後便能執行自動化研磨，如圖 3-4 所示。研磨過程中，研磨參數以電腦 Labview 程式進行控制，主要控制研磨旋轉平台高度( $H_m$ )、光纖自轉角度( $\phi_m$ )以及光纖與研磨平台夾角( $\theta_m$ )，並透過設計在不同時間給予不同研磨參數達到雙變曲率光纖端面之研磨。

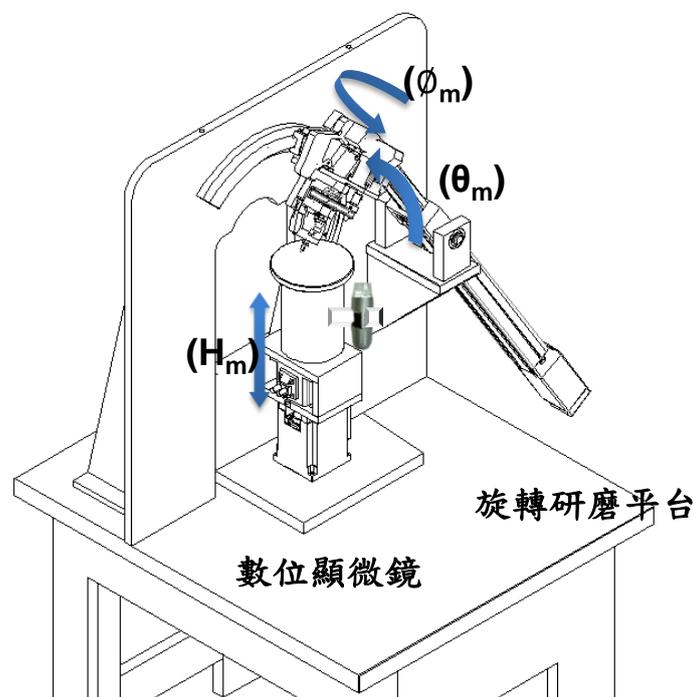


圖 3-3 熊貓形光纖研磨機示意圖。其中  $H_m$ 、 $\phi_m$  以及  $\theta_m$  為研磨時可控制軸向，另外以數位顯微鏡觀察定位 SAP 位置[55]。

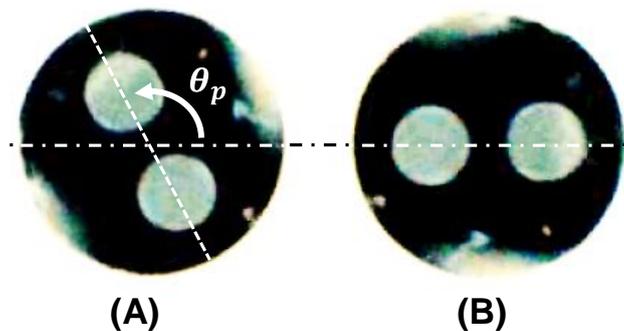


圖 3-4 SAP 定位示意圖。其中  $\theta_p$  為定位角度，圖中(A)、(B)分別為水平校正前後[55]。

### 3.3 微透鏡物理特性量測

完成本研究提出光纖微透鏡製程後，將先量測微透鏡之物理特性，以確認是否為本研究所需並設計之結構。先以高倍率顯微鏡觀察微透鏡光纖並擷取影像，之後將影像檔案載入電腦，再以影像處理軟體 ImageJ 做影像處理分析[57, 58]。藉由二值化處理得到清晰邊界後分析微透鏡之物理參數。ImageJ 為美國國立衛生研究院 (National institutes of health, NIH)所開發之免費開放程式，被廣泛用於生物、醫學等研究中做影像處理及分析。在微透鏡的應用中，主要關心短軸曲率半徑與偏心率，如圖 3-5 所示。在文獻研究中得知短軸曲率半徑需要大於約  $4\ \mu\text{m}$  以上可得到較佳耦光效率，而在長軸曲率半徑的影響，在大於一定值後便不影響耦光效率表現，而研磨完成之微透鏡結構，所形成之長軸曲率半徑遠大於其值，故不探討微透鏡長軸曲率半徑參數。在偏心率的部分期望得到越小之偏移量，將光源能藉由微透鏡完整導入光纖之核心中傳遞，藉以得到最佳耦合效率[59]。

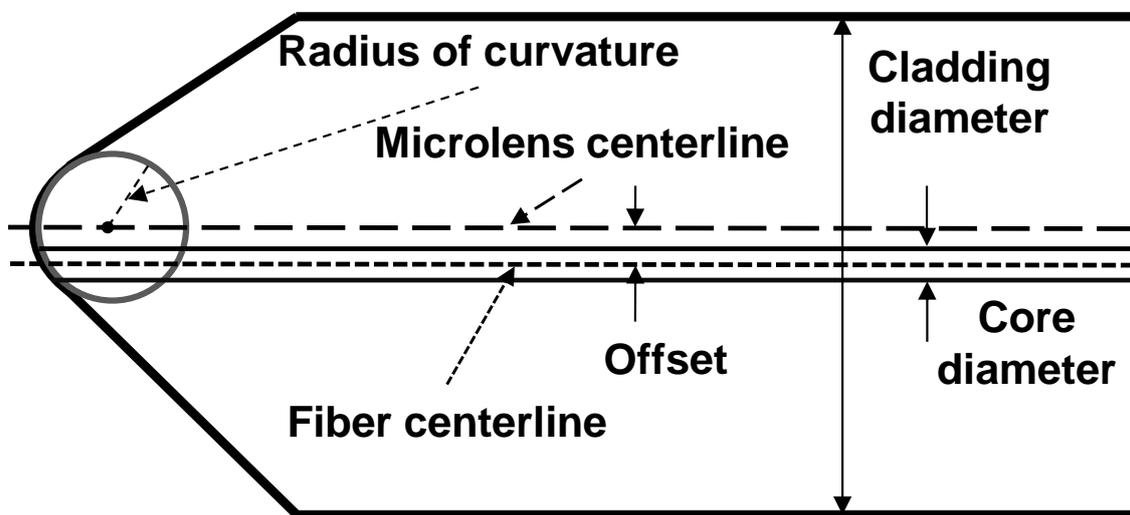


圖 3-5 微透鏡光纖之物理參數示意圖。圖中包含曲率半徑與偏心率，而虛線分別為微透鏡中心與光纖中心。

### 3.3.1 光纖微透鏡之偏心率分析

將影像載入 ImageJ 軟體後，我們先將圖片類型調整為 8 位元(8 bit)灰階圖像，接著以色彩平衡(Color balance)選項調整影像對比度，調整至光纖邊界能夠清楚辨識。之後便能以臨界值(Threshold)選項對影像進行二值化，調整出光纖影像邊界最佳之灰階值，使光纖輪廓能明顯被辨識，如圖 3-6 所示。

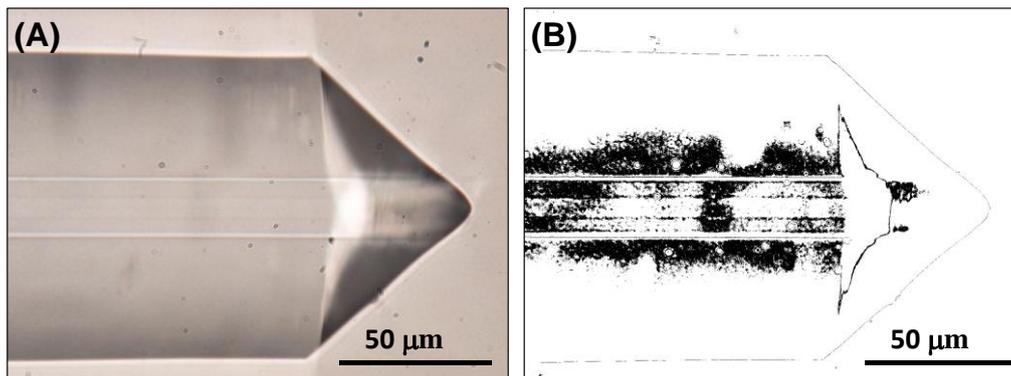


圖 3-6 微透鏡光纖影像處理示意圖。圖中(A)為顯微鏡 500 倍率放大下光學影像，(B)為經影像處理後二值化影像圖。

如圖 3-7 所示，完成影像二值化處理後便能清楚辨識光纖輪廓，此時將光纖包覆層(Cladding)外徑在軟體中定義為實際長度  $125\ \mu\text{m}$ ，這樣便能在軟體中得到與實際相符之比例尺。得到實際尺度後我們便能在光纖外徑的一半，即為  $62.5\ \mu\text{m}$  處畫出一條與外徑平行的直線，此線即為光纖實際中心線(Fiber centerline)。另外在光纖微透鏡兩邊畫出漸進線，再以漸進線相交點為基準點畫出與光纖外徑平行之直線，此線即為微透鏡中心線(Microlens centerline)。在畫出微透鏡中心線後，我們便能以此線與光纖中心線畫出光纖微透鏡之軸偏移量，代表微透鏡之中心軸與光纖實際中心軸之偏移量，即為偏心率(Offset)。

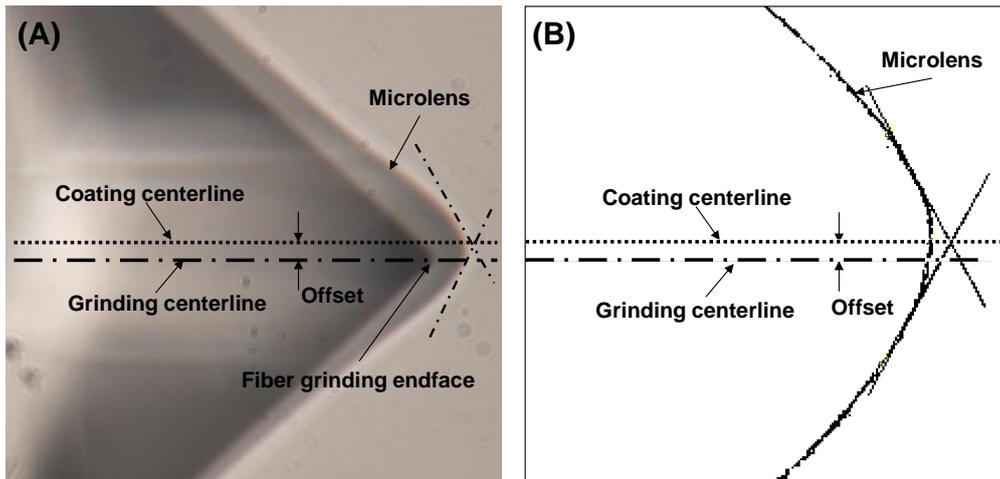


圖 3-7 光纖微透鏡偏心率分析示意圖。圖中(A)為光纖研磨完成端面圖與微透鏡製作完成圖之疊圖影像，可看見兩中心線差異及為偏心率，(B)為影像處理分析圖。

### 3.3.2 光纖微透鏡之曲率半徑分析

在完成偏心率分析後，由於光纖核心直徑(Core diameter)為  $6.6 \mu\text{m}$ ，因此以光纖中心線與微透鏡相交點為中心，在向上距離  $3.3 \mu\text{m}$  處畫出與中心線平行之直線，也在向下距離  $3.3 \mu\text{m}$  處劃出與中心線平行之直線。上下兩直線與微透鏡微會有兩相交點，加上微透鏡中心點，三點所構成一圓之半徑即為我們欲知之微透鏡曲率半徑( $R_m$ )，如圖 3-8 所示。

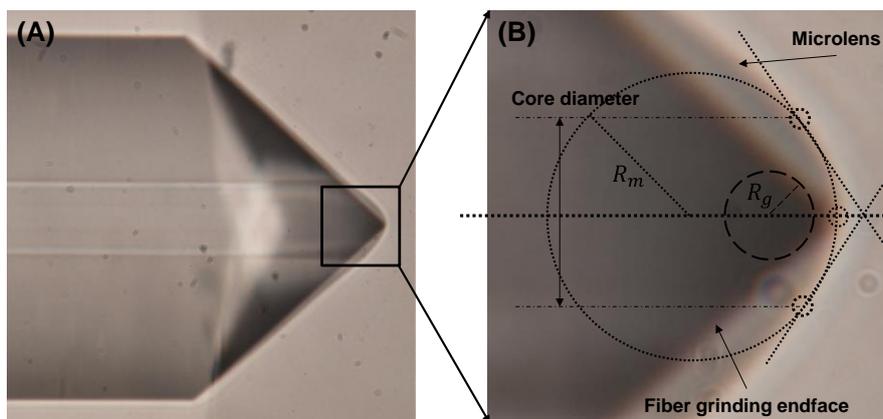


圖 3-8 光纖微透鏡曲率半徑分析示意圖。圖中(A)為研磨完成光纖端面影像與微透鏡光纖端面影像之疊圖，可看出微透鏡製作前後之曲率半徑差異，(B)為局部放大圖，並標示不同虛線分別代表研磨完成端面與完成微透鏡製作之曲率半徑。

利用平面上不共線三點可任意形成一個三角形，並且任一個三角形可形成一個外接圓。故在分析完成微透鏡之參數後，取得微透鏡上欲分析之三點座標參數，便透過計算得到光纖微透鏡之曲率半徑[60]。假設此圓一般式為：

$$x^2 + y^2 + Ax + By + C = 0 \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\sqrt{\left(x + \frac{A}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{B}{2}\right)^2} = \frac{\sqrt{A^2+B^2-4C}}{2} = r \dots\dots\dots(3.2)$$

其中 A、B、C 為常數，將三點座標分別帶入方程式(3.1)可得到三個二元一次聯立方程式，以加減消去法計算後得到三個常數項。將常數帶入方程式(3.1)即可得到此圓之方程式，帶入方程式(3.2)可得到此圓之半徑(r)。

### 3.4 光纖微透鏡光學性質量測架構

為瞭解本研究所製作之旋塗玻璃光纖微透鏡的光學特性，本研究設計多個光學量測架構，藉以了解微透鏡之光學特性與是否能夠實際應用於產業中。其中包含耦光效率、微透鏡穩定性量測、微透鏡光場與極化保持特性量測。

#### 3.4.1 耦光效率量測架構

本實驗耦光效率量測架構，如圖 3-9 所示。將待測微透鏡光纖放入光纖夾持器 (Fiber holder)，而夾持器固定於一個精密電控移動平台 (Stage) 上，並連接電腦以程式控制平台移動，另外在上方架設顯微鏡並連結 CCD 作為觀察使用，以便即時調整光纖位置，使其對雷射光源精準耦合，最後在光纖末端以光纖光功率計 (FPM-8220 fiber optic power meter, Newport, USA) 量測微透鏡光纖之光功率大小。

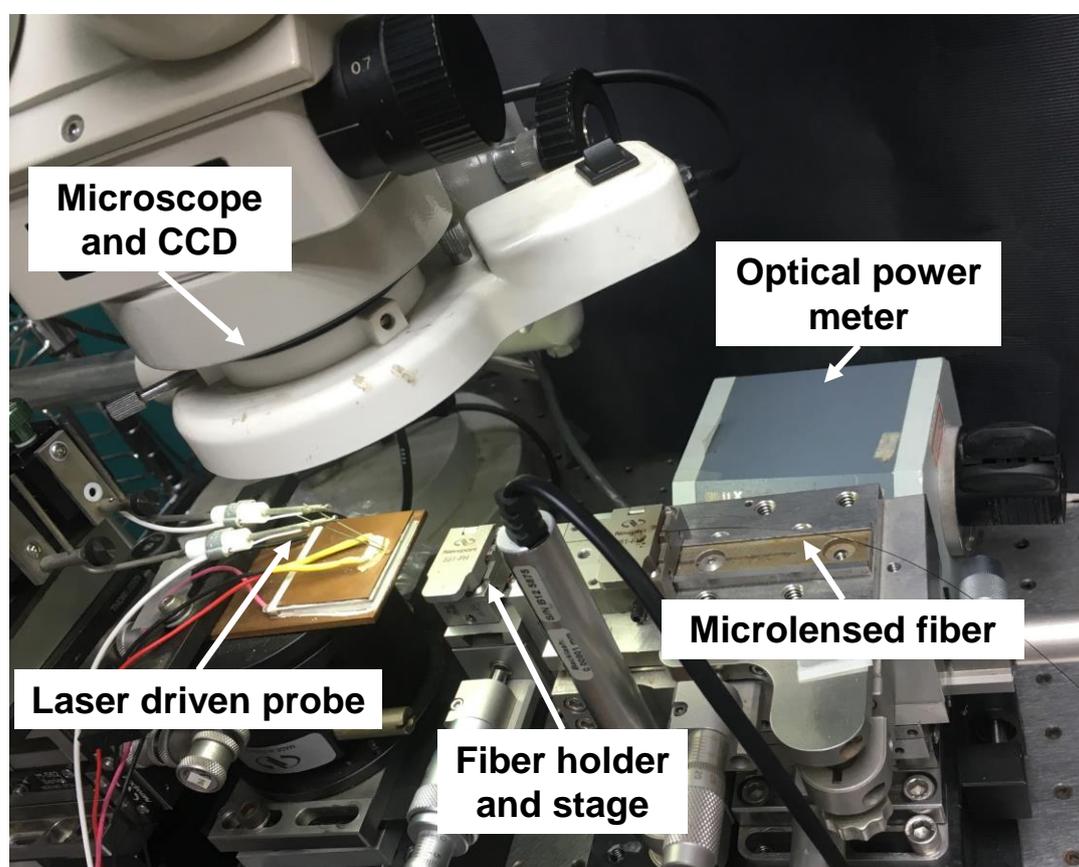


圖 3-9 耦光效率量測架構圖。包含雷射二極體光源與光功率計收光。

實驗所用為六軸精密移動平台，除了 X、Y、Z 軸向的三軸平移平台(M-562F-XYZ-LH, Newport, USA)外，加上 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 兩個軸向的傾斜平台(M-562F-TILT-LH, Newport, USA)，與光纖夾持器(561-FH, Newport, USA)自轉軸 $\theta_z$ 共六軸，其中三軸平移平台利用微型電動作動器(TRA12CC, Newport, USA)連結電腦控制，最小步進位移量為 0.2  $\mu\text{m}$ ，其架構如圖 3-10 所示。

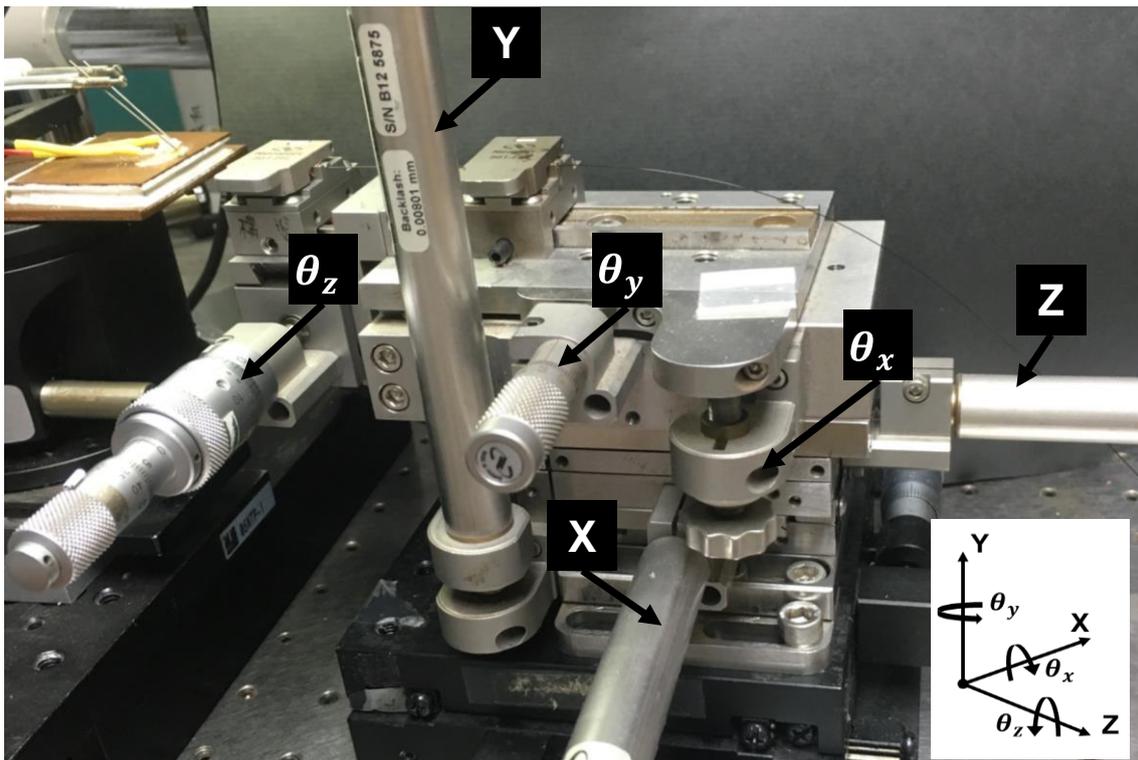


圖 3-10 微透鏡光纖移動平台架構圖。小圖為各軸向移動方向示意圖。

雷射光源部分，如圖 3-11 所示。將雷射二極體(Laser diode)放置於熱電致冷器(Thermoelectric cooler, TEC)上，連結溫度控制器(Model 325 temperature controller, Newport, USA)調整溫度。本實驗使用 980 nm 單模雷射二極體(C2-980-0250-S50, Axcel photonics Inc, USA)作為光源，其啟動電流(Starting current)為 50 mA。以顯微鏡觀察，將雷射二極體放置定位後，以探針接觸雷射二極體給電位置，探針連接雷射電源供應器(Model 505b laser diode driver, Newport, USA)給予電流啟動雷射。

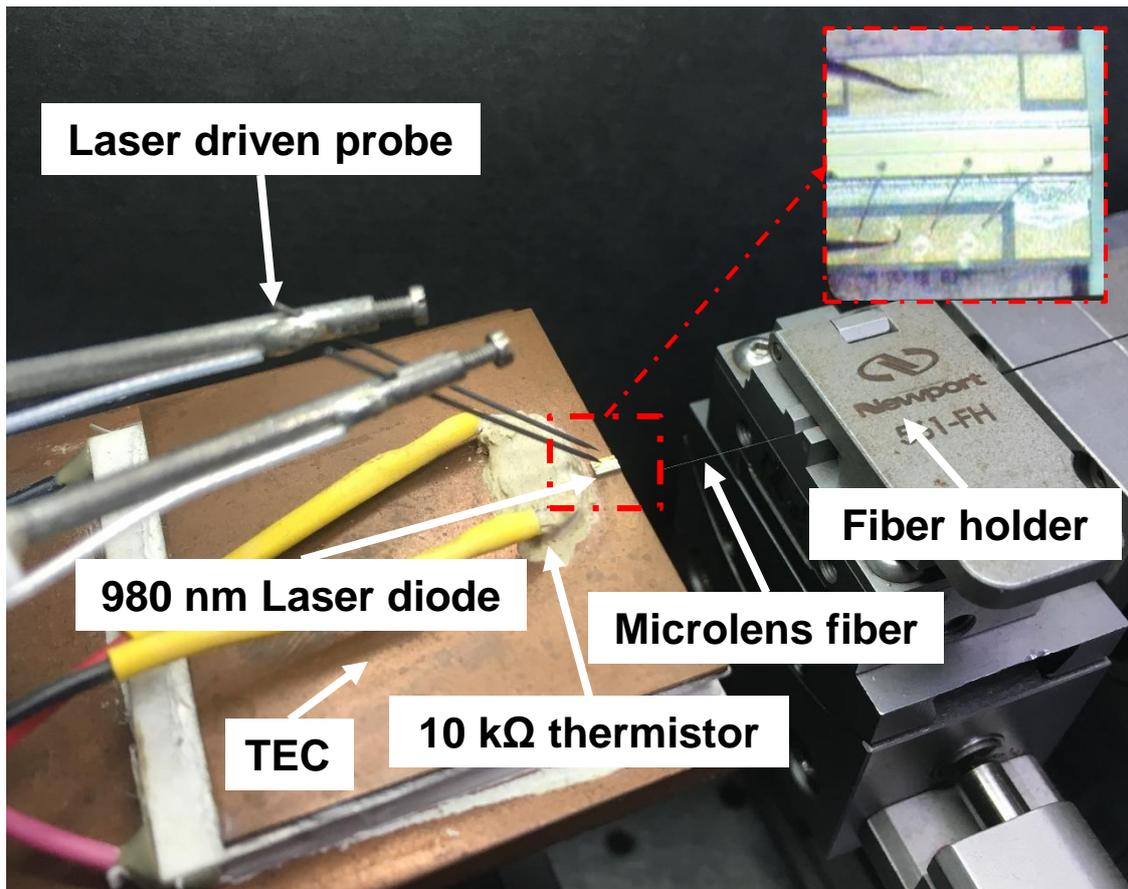


圖 3-11 耦光效率量測架構圖。其中小圖為探針驅動雷射二極體局部放大圖。

量測耦光效率前，須將溫度恆溫於 25°C，並施予 60 mA 的工作電流(Working current)，在此狀態下維持 30 分鐘使雷射二極體穩定輸出功率。在雷射輸出穩定後，以光功率計(818-ST2-IR, Newport, USA)量測雷射二極體原始輸出功率( $P_{LD}$ )。另外將光纖末端剝除外包層後切平，放入光纖光功率計量測微透鏡之光功率( $P_F$ )，兩功率相除即可得到此微透鏡光纖之耦光效率(Coupling efficiency, C.E.)。

$$C.E. = \frac{P_{LD}}{P_F} \times 100\% \dots\dots\dots(3.3)$$

由上式可得知， $P_F$ 在定溫定電流工作條件下為定值，故 $P_{LD}$ 值越大便會得到越大之耦光效率。為達到此目的我們將持續調整移動平台，同時記錄能量直到得到微透鏡光纖之最大功率，並換算為其耦光效率值。另外本研究也以此架構量測微透鏡之穩定性，在得到微透鏡光纖之最大功率後，維持工作條件一段時間，並持續記錄微透鏡之功率，藉以分析光纖微透鏡之穩定性。

### 3.4.2 遠場光場量測架構

為解本研究所製作之雙曲面光纖微透鏡是否與雷射光源達到模態匹配，設計遠場光場(Far-field emission)量測實驗架構，量測雙曲面光纖微透鏡之遠場光場分布，如圖 3-12 所示。為了觀察微透鏡之遠場光場分布，實驗設計由光纖微透鏡端為出光端，而由光纖末端給予光源，這樣的設計類似於耦光效率量測之相反架構。為了避免光源部分因為耦光差異影響結果，本研究利用 980 nm 二極體雷射模組 (Model 740 telecom laser diode mounts, Newport, USA )做為光源，並以雷射模組控制器 (Model 6100 combo laser diode and temperature controller, Newport, USA) 控制工作溫度與工作電流。將光源以光纖接頭 (Ferrule connector) 連接待測光纖，透過電控平移平台控制微透鏡光纖位置，並以光束輪廓分析攝影機 (SP620U beam profiling camera, Ophir, USA) 擷取光場。本研究所使用之光束輪廓分析攝影機，可量測 190 nm 至 1100 nm 之波長範圍，感光元件感測單位像素 (Pixel) 大小為  $4.40\ \mu\text{m} \times 4.40\ \mu\text{m}$ 。為避免因為工作電流過大而造成影像過顯無法辨識，故在光纖與光源中加入可調變式光衰減器 (Variable optical attenuator)，這樣便能夠統一工作電流以固定實驗基準，並且能夠有效截取光場影像。

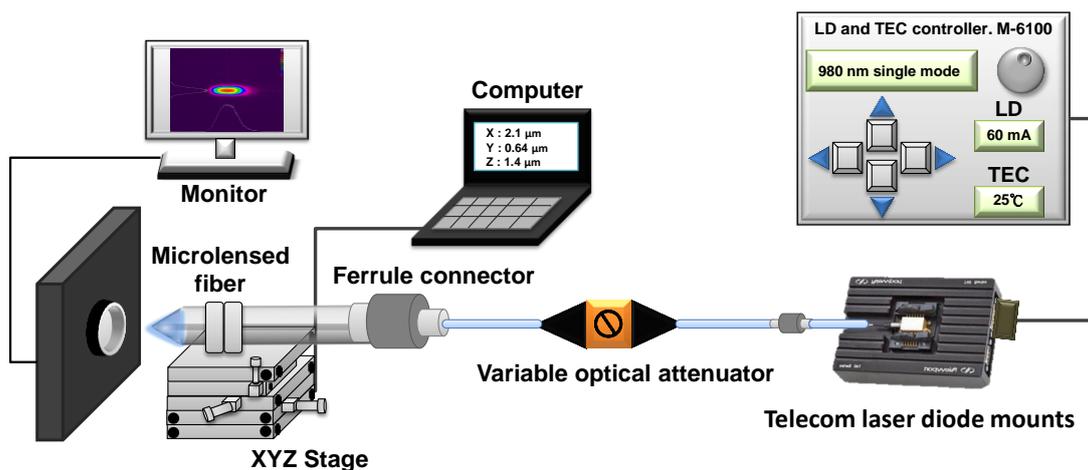


圖 3-12 光纖微透鏡遠場光場量測架構示意圖。包含二極體雷射模組光源與光束輪廓分析攝影機擷取遠場光場，利用可調式衰減器調整光源強度，便於攝影機擷取光場，避免調整雷射工作電流而改變光學特性。

實驗時，首先將光纖末端外包層剝除後切平，並將其熔接上光纖跳線，藉由光纖接頭連接可調變式光衰減器，另一端接上二極體雷射模組做為光輸出源。本實驗使用與耦光效率量測架構相同的 980 nm 單模二極體雷射之封裝模組。為了取得與耦光效率量測時相同之光場分佈，故將工作條件設定於相同的 25°C 與 60 mA，並在量測前維持 30 分鐘使雷射達到穩定。量測時以顯微鏡觀察將光纖微透鏡對位固定，以電腦控制移動平台將微透鏡靠近攝影機感測器，如圖 3-13 所示。由於本實驗所使用的工作電流所具備之光能量遠大於感測器最大值，故在實驗時必須調整光衰變器，藉由螢幕即時監控光場分布圖，調整至適當光強度。調整完成後利用電控平台以每一次退 0.1 mm 之步進，逐漸將微透鏡遠離並持續記錄光場能量分布圖與數據。藉由光場能量分布數據，可計算微透鏡之遠場光場高寬比，其定義為能量分布之半高全寬的比值，與雷射光源之高寬比分析比較，了解是否符合模態匹配。

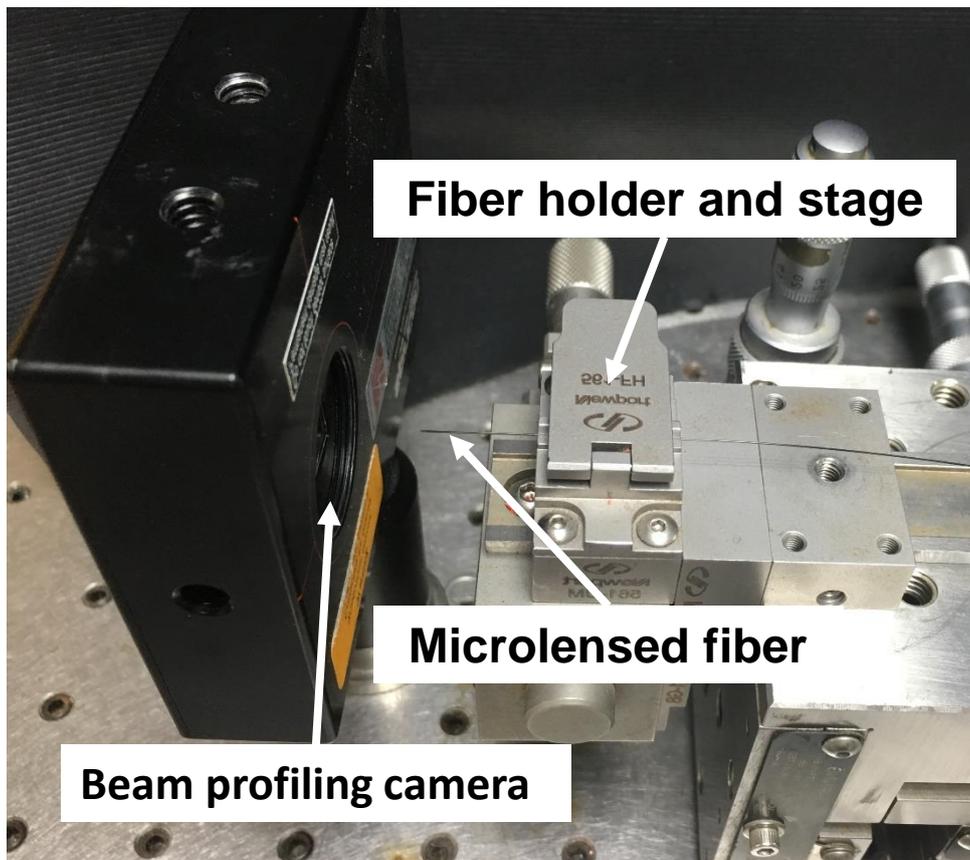


圖 3-13 遠場光場量測圖。藉由光纖夾持器固定光纖，並以電控平台調整光纖微透鏡與攝影機感測面相對位置。

### 3.4.3 熔燒製作微透鏡架構

本研究先以旋塗玻璃結合靜電力拉伸製作微透鏡，之後對其微透鏡進行分析與耦光效率量測，若結果不如預期，僅需將旋塗玻璃微透鏡結構移除，再重新製作微透鏡即可，這樣的方式可大幅減少研磨光纖的成本與時間。另外在研究最後，為分析本研究以旋塗玻璃結合靜電力拉伸法之製程與傳統熔燒製程製作微透鏡之差異，故利用旋塗玻璃微透鏡可移除的特性，設計實驗以同一根光纖，分別透過兩個製程製作微透鏡，並量測分析以便比較兩者差異，實驗流程如圖 3-14 所示。

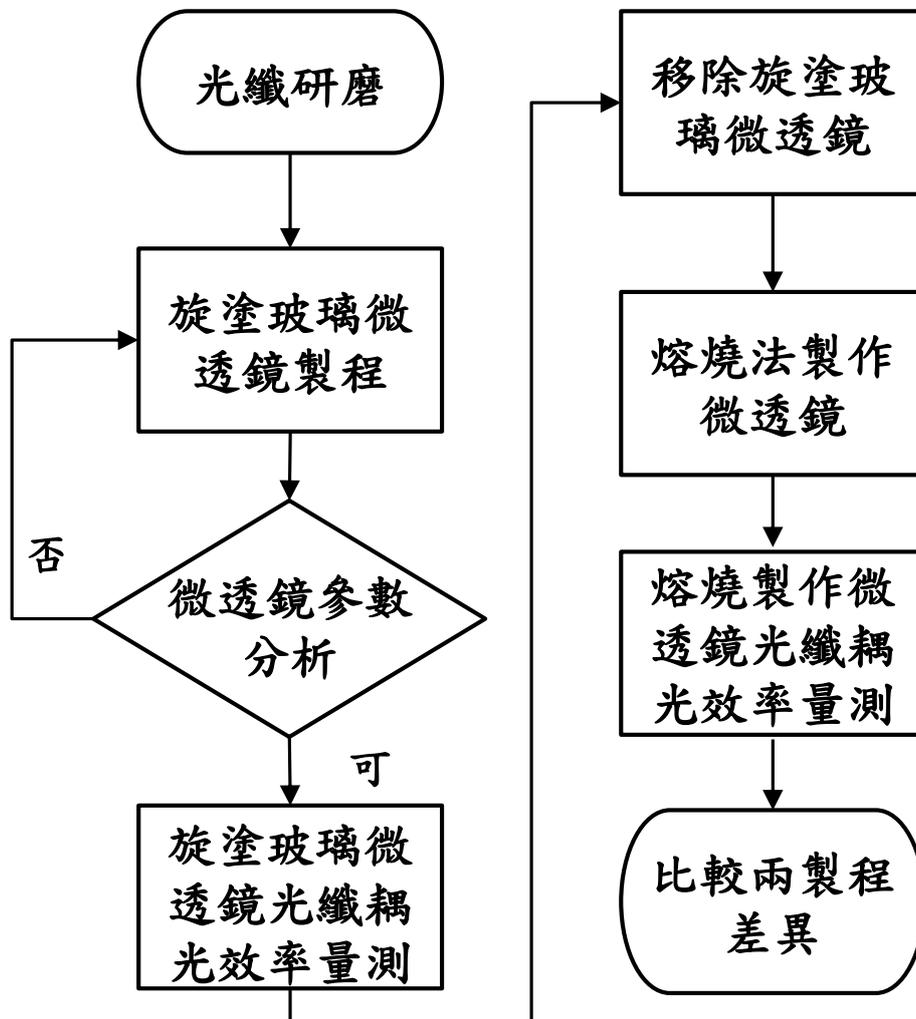


圖 3-14 本研究製程結合熔燒法比較流程圖。在研磨完成光纖端面以本研究之製程製作旋塗玻璃微透鏡，並對其進行量測分析。本製程中若結果不符預期規格可剝除旋塗玻璃重新製作，並利用本研究可重複製作特性，結合熔燒法製程比較兩者。

實驗時，先以前述 3.2 章節所介紹之雙曲面微透鏡製程製作旋塗玻璃微透鏡，接著量測分析旋塗玻璃微透鏡之特性與耦光效率。由於每根光纖樣本存在製作生產誤差上的差異，為了不因為光纖樣本之差異，影響兩個不同製程之比較結果。本研究利用旋塗玻璃微透鏡可重覆製作之特性，將量測分析完成之旋塗玻璃微透鏡剝除，使光纖端面回到如同研磨完成之狀態，接著直接以熔燒法製作光纖微透鏡 [61-63]，並分析量測其特性與本研究製程比較。以熔燒法製作微透鏡前，將量測完成之旋塗玻璃微透鏡光纖，浸泡於丙酮(二甲基酮, Propanone)溶液中，並放入超音波震洗機(D150H, Delta, Taiwan)震洗五分鐘徹底剝除微透鏡結構。結束後以清水沖洗光纖端面並擦拭乾淨，之後利用顯微鏡觀察是否剝除乾淨並確認光纖無受到損害。最後利用熔燒法對光纖端面加工，製作光纖微透鏡使其曲率半徑達到研究所需，另外製作與極化保持光纖內應力集中區不同相對角度之光纖端面分析比較。

## 第四章 實驗結果與討論

本研究所進行之實驗分析與內容，主要包含靜電力拉伸現象調整曲率半徑分析，了解微透鏡之曲率半徑與產生靜電力拉伸之電場強度關係(4.1 節)；量測本研究製程所製作之微透鏡光纖與雷射二極體之間的耦合效率，分析微透鏡在不同曲率半徑下之耦光效率(4.2 節)；微透鏡結構與雷射光源耦合之穩定性量測(4.3 節)，量測微透鏡持續長時間在高耦合效率狀態下之穩定性，並觀察旋塗玻璃微透鏡之結構是否會受影響而產生變化；微透鏡之遠場光場量測(4.4 節)，利用光束輪廓分析攝影機量測微透鏡之遠場光場，分析是否能夠與雷射二極體光源模態匹配；比較本研究製程所製作之光纖微透鏡與熔燒法製作之微透鏡(4.5 節)，藉由比較兩製程之製作過程與結果，了解本研究所具備之優勢與特色；最後，使用環境掃描式電子顯微鏡觀察微透鏡之結構，比較微透鏡製作前後、不同角度之微透鏡與不同製程所製作之微透鏡(4.6 節)。

### 4.1 微透鏡之曲率半徑與電場強度關係分析

本節對靜電力拉伸調整曲率半徑現象進行分析，了解微透鏡之曲率半徑受電場強度影響之關係。在本研究製程製作微透鏡時皆在數位顯微鏡下執行，故能藉由即時影像觀察微透鏡受靜電力拉伸之影響，如圖 4-1 所示。實驗時固定金屬環與導電極版之間距離，調整高壓電源供應器給予 1 至 2.5 kV 之高壓直流電，藉由不同電場強度製作不同曲率半徑之光纖微透鏡。首先在光纖端面沾塗上旋塗玻璃時，由於表面張力的影響，故會呈現近似半球面狀之結構，如圖 4-1(A)。在施加電壓形成電場後產生靜電力拉伸現象，由於製作初期旋塗玻璃溶液具有高度流動性，當施加大於  $7 \times 10^6$  V/m 的電場強度時，在微透鏡尖端旋塗玻璃會突破表面張力而形成電紡織現象，如圖 4-1(B)所示。隨著實驗持續施加電場，旋塗玻璃逐漸失去流動性而固化，使得電紡織現象不再產生，取而代之的是與表面張力平衡的靜電力拉伸現象，如圖 4-1(C)所示。此時微透鏡之曲率半徑將會受靜電力拉伸而調整，並且旋塗玻璃

薄膜將逐漸固化而不再移動，可藉由數位顯微鏡觀察發現微透鏡之曲率半徑不再改變，便能結束靜電拉伸製程，將微透鏡固化使其穩定並實驗分析。

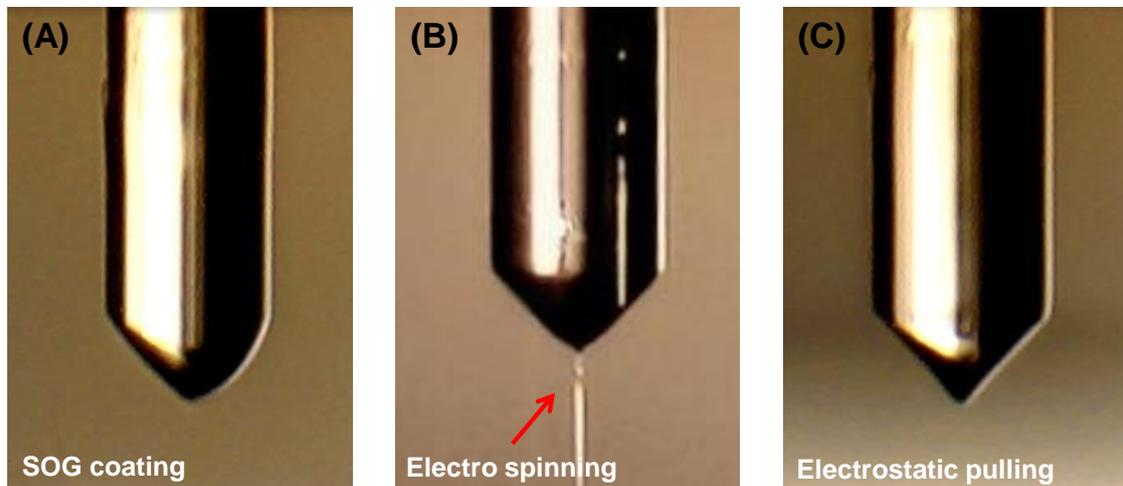


圖 4-1 靜電力拉伸製作光纖微透鏡之數位顯微鏡影像圖。(A)為旋塗玻璃剛沾塗上光纖端面，(B)為電紡織現象產生之影像，(C)為靜電力拉伸與表面張力達到平衡。

本研究使用約 $4 \times 10^6$  V/m 至 $10 \times 10^6$  V/m 的電場調整微透鏡，可一次性地製作出曲率半徑約 $4 \mu\text{m}$  至 $5.5 \mu\text{m}$  的微透鏡光纖，如圖 4-2 所示。在圖中可以看見，光纖研磨完成時，平均曲率半徑為 $3.3 \mu\text{m}$ ，距離與雷射二極體模態匹配之曲率半徑至少 $1 \mu\text{m}$ 。本研究能透過調整電場強度，有效的控制光纖微透鏡之曲率半徑在研究所需要的範圍。另外可看見在電場強度小於約 $7 \times 10^6$  V/m 時，微透鏡之曲率半徑會隨著電場強度增加而上升。這是因為光纖端面上的旋塗玻璃溶液，受到電場的作用而向尖端聚集。這樣的聚集現象使得施加的電場強度越大時，便會聚集越多的溶液於微透鏡尖端，進而產生越大的曲率半徑。當電場強度大於約 $7 \times 10^6$  V/m 時，旋塗玻璃將會突破泰勒錐形成電紡織現象，這樣的現象不僅會對光纖端面上的旋塗玻璃進行減量，也能夠大幅縮短微透鏡固化所需的時間。而當旋塗玻璃黏滯度使得電紡織現象不再發生時，靜電力拉伸將會與表面張力平衡，此時便能夠固定微透鏡之曲率半徑，使其達到風乾固化而不再改變曲率半徑。

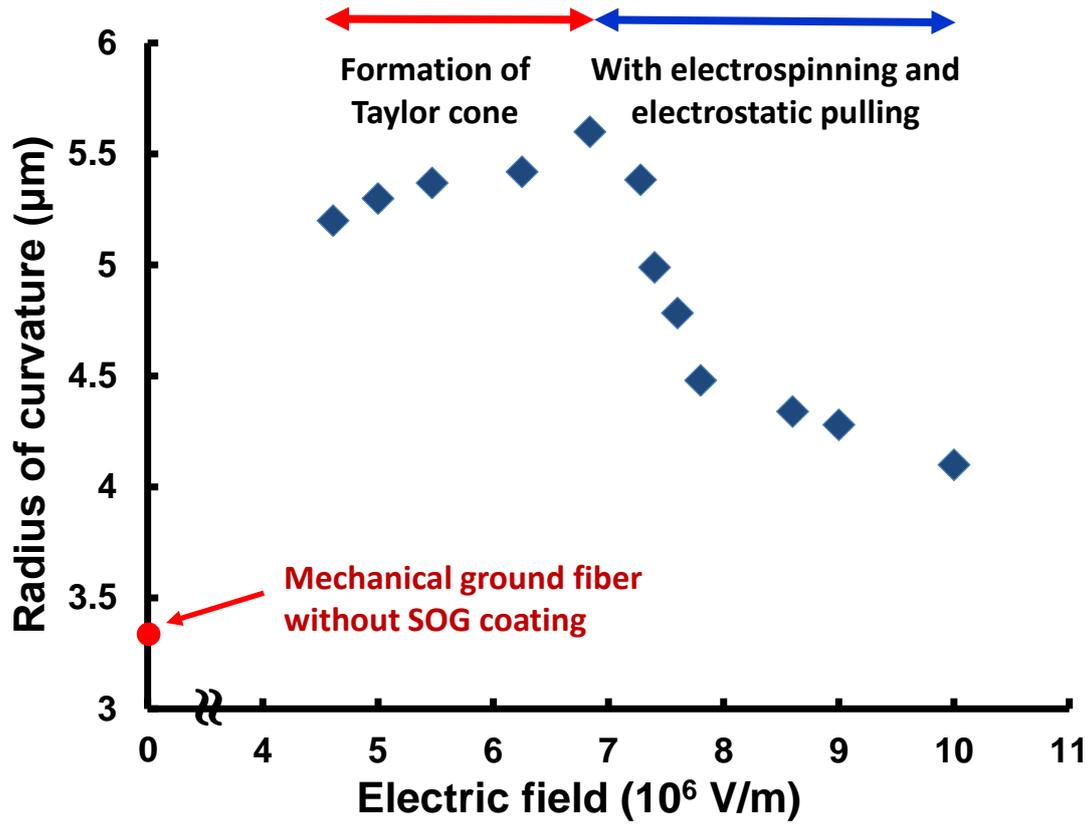


圖 4-2 曲率半徑與電場強度關係圖。圖中顯示本研究可透過靜電力拉伸法，一次性地研磨完成之端面形成微透鏡，並能調整至符合研究所需之曲率半徑。

## 4.2 微透鏡光纖之耦光效率量測

本小節開始將詳述本研究主要量測內容，以 980 nm 單模雷射二極體為光源，量測不同曲率之光纖微透鏡的耦光效率。為了維持實驗系統穩定，必須在密閉無震動之環境進行，盡量降低環境對實驗的干擾。故實驗時以懸浮式光學桌進行實驗，將工作溫度設定於 25°C，給予工作電流 60 mA，並在實驗前開啟雷射二極體，持續工作狀態超過 30 分鐘，使雷射光源穩定方能進行實驗。將製作完成之微透鏡光纖，放置於裸光纖固定器上後，利用顯微鏡調整微透鏡角度，使其長軸位於水平位置，之後利用電腦控制移動平台將微透鏡與雷射二極體出光口靠近，同時以顯微鏡連結 CCD 觀察，如圖 4-3 所示。由於雷射光源強度過高時，會在光纖上產生反射，使得在顯微鏡上無法觀察，如圖 4-3(A)所示。故在微透鏡非常接近雷射出光口時，須將工作電流暫時降低，使其能夠觀察，以避免微透鏡撞上雷射出光口而造成雷射損壞，如圖 4-3(B)。在微透鏡非常接近雷射出光口時，利用移動平台最小移動步進 (0.2  $\mu\text{m}$ ) 分別移動 X、Y、Z 各軸向。藉由在功率最大值附近來回掃描，同時以光功率計觀察能量最大值，嘗試達到光纖最大光功率。將其值除以雷射二極體原始輸出功率，便能得到個別光纖之耦光效率。

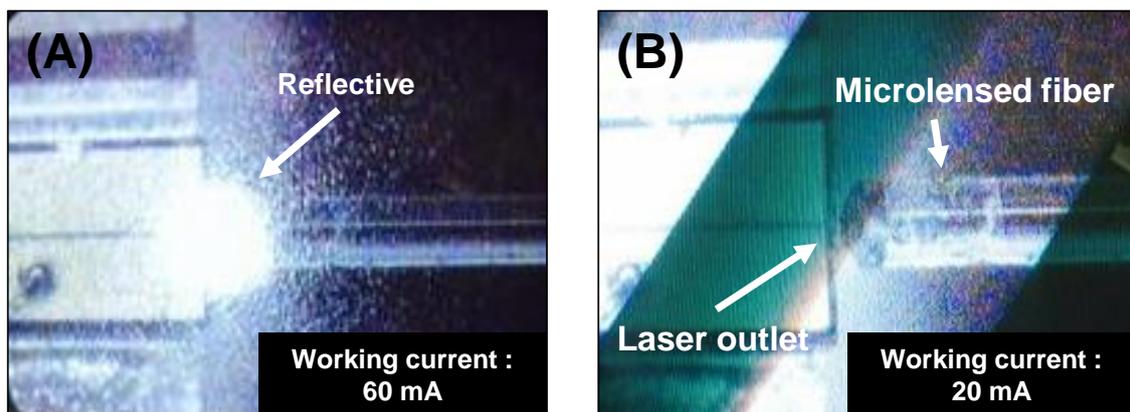


圖 4-3 耦光效率量測架構局部顯微放大圖。圖中(A)雷射工作電流為 60 mA，可見雷射光會在光纖端面產生反射使得影像無法辨識，(B)為小工作電流下之影像。

本研究以旋塗玻璃結合靜電力拉伸製程製作 20 根微透鏡光纖樣本進行實驗，其耦光效率分布如圖 4-4 所示。其中取五根耦光效率高於 80% 之微透鏡進行後續穩定度實驗，並將其標示於圖內以不同符號與顏色標記。圖中可看見，當光纖經過研磨後，不進行額外後製程曲率半徑平均為 3.3  $\mu\text{m}$ ，將其直接進行耦光效率的量測，其效率不佳僅有不到 20%，這是由於研磨完成端面非常粗糙且與雷射二極體模態不匹配而造成。另外在圖中最右側標記平端光纖之耦光效率，平端光纖曲率半徑為無限大，其耦光效率不到 40%，並且會受到切面平整度影響，在模態匹配上也有很大的差異。最後在耦光效率的量測結果中可得知，本研究所製作 20 根光纖微透鏡，具有 80.95% 的高平均耦合效率，其中最高達到 86.42%。相較於平端光纖之耦光效率，平均提升近一倍的耦合效率。另外將本研究所製作 20 根微透鏡光纖數據顯示於表 4-1 中，其中包含耦光效率、曲率半徑與偏心率。

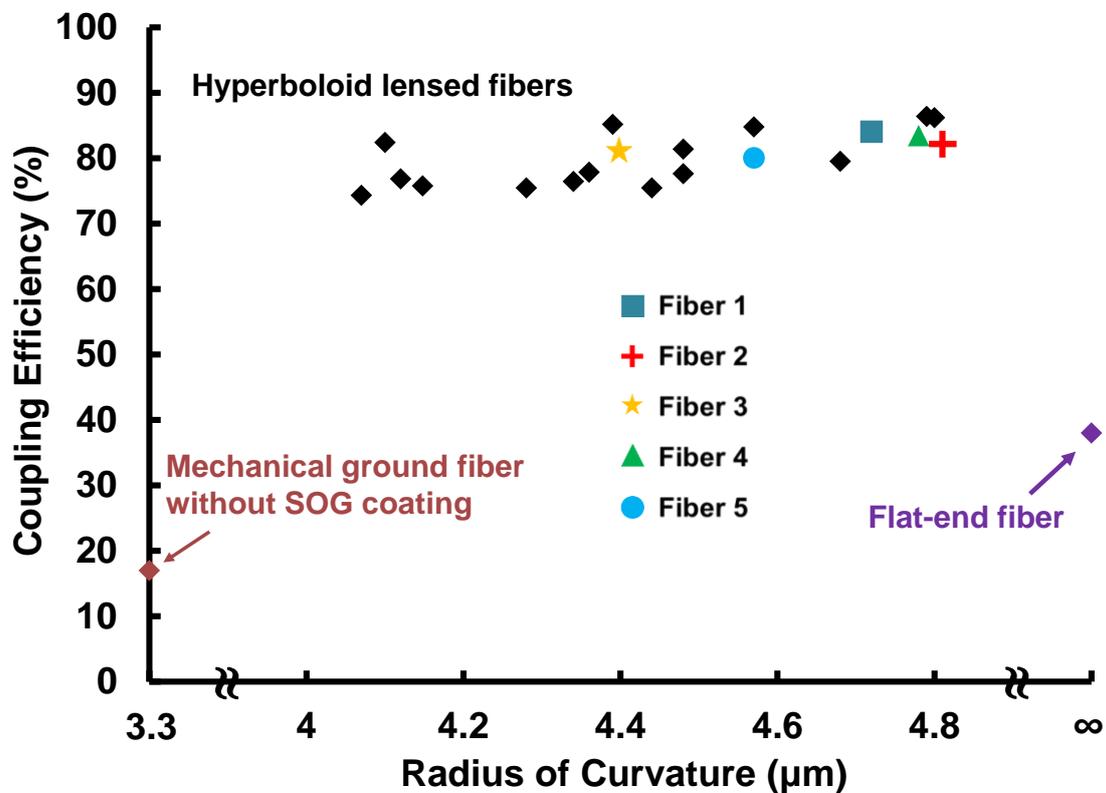


圖 4-4 耦光效率與曲率半徑關係圖。圖中特殊符號標點為後續穩定度量測之樣本並將其編號。另外於圖中亦標記平端光纖與研磨完成之光纖耦光效率數據點。

表 4-1 本研究製作與熔燒法製作之微透鏡光纖數據表。表中包含研磨完成之光纖端面數據與本研究製程完成後之光纖端面數據，數據分為曲率半徑與偏心率，最後顯示微透鏡光纖之耦光效率。

No.	Grinding endface		Electrostatic pulling		C.E.
	Radius of curvature ( $\mu\text{m}$ )	Offset ( $\mu\text{m}$ )	Radius of curvature ( $\mu\text{m}$ )	Offset ( $\mu\text{m}$ )	
1	3.39	0.68	4.14	0.89	75.78%
2	3.33	0.45	4.39	0.36	81.38%
3	3.30	0.08	4.34	0.37	76.48%
4	3.30	0.57	4.81	0.27	82.20%
5	3.31	0.26	4.28	1.08	75.48%
6	3.21	0.32	4.78	0.16	83.46%
7	3.31	0.67	4.72	0.18	84.06%
8	3.30	0.08	4.57	0.55	80.08%
9	3.47	0.08	4.68	0.63	81.27%
10	3.31	0.42	4.48	0.67	77.65%
11	3.34	0.08	4.57	0.68	84.81%
12	3.31	0.42	4.44	0.22	75.49%
13	3.34	0.67	4.80	0.78	86.22%
14	3.39	0.86	4.07	0.84	77.28%
15	3.39	0.10	4.79	0.06	86.42%
16	3.35	0.89	4.12	0.74	76.87%
17	3.33	0.83	4.36	1.03	77.87%
18	3.37	0.38	4.39	0.38	85.21%
19	3.34	0.48	4.48	0.42	80.71%
20	3.32	0.45	4.10	0.68	82.44%

### 4.3 微透鏡穩定度量測

本小節將針對微透鏡之穩定性進行討論，將上述耦光校率量測中，取其中五根高耦光效率之微透鏡光纖，實驗檢測旋塗玻璃微透鏡實際應用時的穩定性。進行長時間持續高耦合效率量測，藉以檢測本研究所製作之雙曲面微透鏡光纖，在實際光學應用中之穩定性。

由於本研究以旋塗玻璃在光纖端面形成微透鏡，有別於傳統熔燒法或蝕刻法，對光纖本身加工改變其結構形成微透鏡，本研究屬於非破壞性加工，在光纖端面表面形成微結構，加工範圍小而精密。故本實驗針對微透鏡進行穩定性量測，利用高能量雷射光源與微透鏡光纖長時間耦合，觀察微透鏡是否因為高能量聚集而受熱產生形變或其他變化，以確認能實際應用。實驗時首先量測微透鏡光纖之耦光效率，在得到最高耦光效率值後，固定實驗參數與微透鏡位置，持續五分鐘時間並持續記錄耦光效率，實驗結果如圖 4-5 所示。

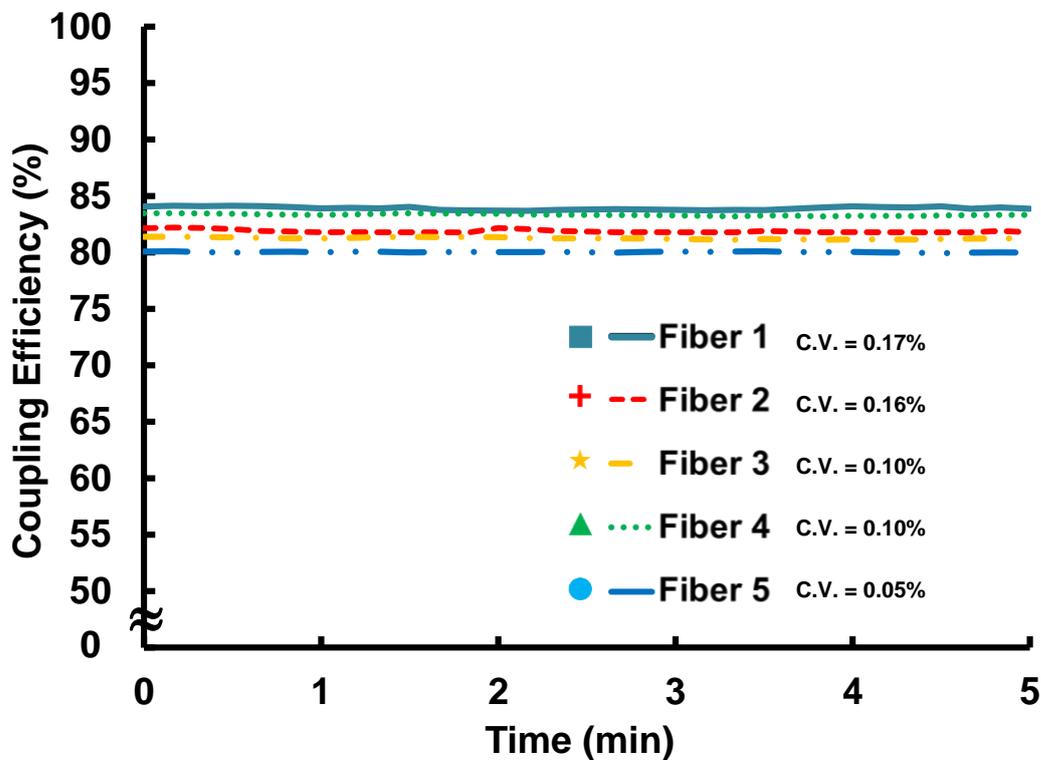


圖 4-5 長時間維持高耦合效率之穩定度量測結果圖。其中標示五根光纖之編號與個別之變異係數。

實驗結果圖中可看見，經過五分鐘長時間耦光後，微透鏡光纖仍可維持高耦光效率，並且五根微透鏡樣本中變異係數(Coefficient of variance, C.V.) 最高為微透鏡光纖樣本一(Fiber 1)的 0.17%，最低具有微透鏡光纖樣本五(Fiber 5)的 0.05%，證明本研究所開發之旋塗玻璃微透鏡結構具有相當好的穩定性。另外能夠發現變異係數大小主要與耦光效率大小呈現正關係，這是由於實驗結果之變異性主要來自於架構與環境的影響，耦合效率越高代表雷射光源與微透鏡之耦合狀態越精準，此時容易因為環境因素如震動影響產生變化。最後實驗證明，即便微透鏡與雷射光源處於最大能量之耦合狀態，並且在此狀態長時間工作，本研究所製作之旋塗玻璃微透鏡亦不受長時間的高能量影響而產生形變或是化學變化，能夠實際應用於泵浦雷射封裝模組等光能量傳遞應用中。

#### 4.4 微透鏡之遠場光場量測

本小節針對微透鏡光纖之遠場光場進行量測，對於微透鏡光纖與雷射二極體光源之模態匹配進行探討。光場分布為模態是否匹配的重要指標，模態差異會造成雷射光源與微透鏡光纖耦合時產生極大的損失，其中可藉由光場之高寬比，比較兩者之間是否匹配。光場高寬比定義為橢圓形遠場光場在長軸和短軸方向能量分布之半高全寬的比值，其中光場能量分布之半高全寬即為其光束大小。

實驗時利用光束輪廓分析攝影機，直接量測紀錄本研究製作之微透鏡光纖光場強度，並且將長軸與短軸光場強度，利用半高全寬計算換算為光束大小，便可計算其高寬比，其中受限於攝影機解析度，僅能量測微透鏡與攝影機距離 0.5 mm 以上之光場，實驗結果顯示於圖 4-6。

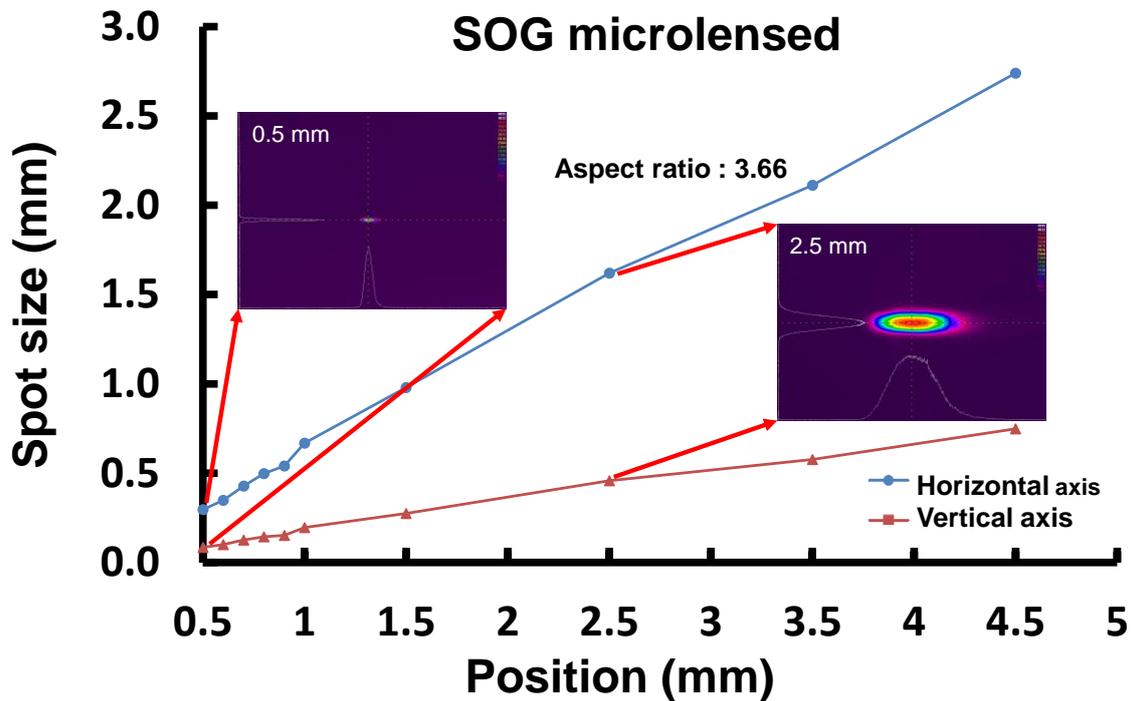


圖 4-6 旋塗玻璃微透鏡光纖之光場分布圖。圖中包含微透鏡遠場光場之高寬比，其中小圖為遠場光場能量分布圖。

在圖中可看見光束大小分布與能量強度分布之影像，其光束大小隨著微透鏡與攝影機距離漸遠而逐漸發散，但維持等比例之橢圓形分布，將其經由能量分布換算後高寬比為 3.66。而本研究所使用之 980 nm 單模雷射二極體之光場高寬比約為 3.7，其值會因為各別雷射二極體製作之差異而有所不同，其比值約為 3 至 4，故本研究所製作之微透鏡光纖能符合其需求。另外在本實驗中可得知，雖然本研究製程為研磨完成後在光纖端面上進行加工，藉由在端面上形成薄膜而形成微透鏡未對光纖本體加工，但本製程不會破壞研磨步驟所設計光纖端面，保有其雙曲面結構高寬比，並可對其進行微調。另外本研究也對平端光纖與熔燒法製程所製作之微透鏡光纖進行量測比較，結果顯示於圖 4-7。

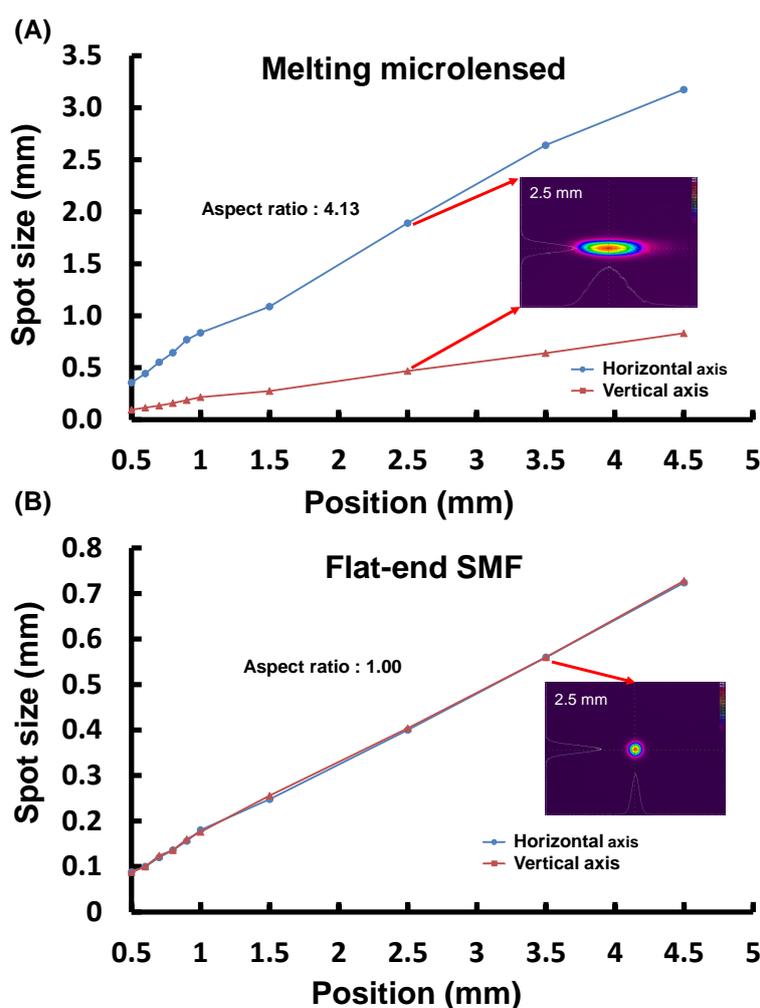


圖 4-7 平端光纖與熔燒法製作微透鏡之遠場光場分布圖。圖中(A)為平端之光場高寬比為 1，(B)為熔燒法製作微透鏡光場分布，其高寬比為 3.77。

## 4.5 旋塗玻璃結合靜電力拉伸法與熔燒法製程比較

在本節實驗中，將比較本研究所開發之旋塗玻璃結合靜電拉伸法與傳統熔燒法，針對兩方法製作光纖微透鏡進行比較。藉由同一根光纖，分別以兩種製程製作微透鏡，藉以比較兩者差異，使其不受不同光纖之差異而影響結果。實驗比較結果主要包含耦光效率、曲率半徑調整、偏心率控制與製作流程之加工次數與時間，實驗結果顯示於表 4-2 中。

首先比較兩者在耦光效率上的效能，十根研磨完成之光纖樣本，以本研究製程所製作之微透鏡光纖平均耦光效率為 81.69%，將相同光纖樣本以熔燒法製作，平均耦光效率則為 80.14%。兩方法之平均耦合效率較低，是由於實驗中加入較高偏心率之光纖樣本，藉以分析製程對於光纖偏心率之容忍度差異。從實驗結果中可看出，本研究製程對於光纖端面之偏心率具有較大容忍度，即便偏心率大於  $1\ \mu\text{m}$  以上，仍可具有高於 75% 以上之耦光效率。另外可見本研究製程對偏心率亦有修正的效果，最大可修正約  $0.25\ \mu\text{m}$  之偏移量。故相對於熔燒法，本研究對於光纖端面研磨產生之偏心率，對於製程具有較高之容忍度，能夠在偏心率容忍範圍較大的條件下製作高效能微透鏡光纖。另外可實驗中得知，本研究可製作曲率半徑分布範圍約  $4\ \mu\text{m}$  至  $4.9\ \mu\text{m}$  之光纖微透鏡，而熔燒法受限於其製作方式，可製作最大曲率半徑極限約  $4.2\ \mu\text{m}$ ，故本製程可對應不同應用製作合適之微透鏡。

由於本製程為一次性加工完成，在製作上能夠大幅降低作業時間，且不須多次移動光纖造成其損壞風險，並且可重複性製作，無須浪費珍貴研磨完成光纖樣本；相對於熔燒法，其加工方式為電弧熔融光纖端面，其參數不易控制，且容易受到放電端損耗影響結果。在本實驗中熔燒法平均加工次數為 23.6 次，不僅相當不易控制且耗時，且需在熔燒後拍照分析在繼續熔燒，持續此步驟直到微透鏡曲率半徑達到目標，這樣的製程不僅費時，且再移動光纖時增加光纖損壞的風險。故本研究不僅在製作成果上優於熔燒法，可製作曲率半徑範圍較大之微透鏡，並大幅降低製作成本與時間，在產業應用中具有相當大的競爭力。

表 4-2 本研究製程與熔燒製程比較。表中列舉包含曲率半徑、偏心率、耦光效率與加工次數。

No.	Grinding endface		Electrostatic pulling			Melting method			
	Radius of curvature (μm)	Offset (μm)	Radius of curvature (μm)	Offset (μm)	C.E.	Radius of curvature (μm)	Offset (μm)	No. spark melting	C.E.
1	3.30	0.06	4.41	0.16	81.24%	4.08	0.14	24	79.43%
2	3.31	0.45	4.08	0.39	78.77%	4.18	0.35	30	80.81%
3	3.36	0.11	4.79	0.13	85.33%	4.03	0.16	20	83.17%
4	3.32	0.67	4.23	0.42	84.81%	4.01	0.88	20	78.14%
5	3.37	0.39	4.64	0.31	85.04%	4.16	0.54	26	83.31%
6	3.36	0.83	4.13	0.80	79.48%	4.03	0.62	24	80.04%
7	3.37	1.08	4.03	0.92	76.54%	4.14	1.21	28	74.71%
8	3.37	0.53	4.82	0.48	83.17%	4.10	0.61	22	84.64%
9	3.35	0.14	4.64	0.07	85.74%	4.15	0.14	20	82.84%
10	3.29	1.24	4.21	1.04	77.17%	4.04	1.27	22	74.34%

## 4.6 光纖 SEM 觀察

在經過以上小節實驗量測，能夠瞭解本研究製程所製作微透鏡之效能，包含耦合效率、穩定性與遠場光場分布。為了能夠更精細的觀察本研究製程在製作前後的差異，及製作後平整度等，在此節將本研究所使用雷射二極體、旋塗玻璃微透鏡光纖、研磨完成之光纖端面與熔燒法製作之微透鏡光纖，送入環境掃描式電子顯微鏡 (Environmental scanning electron microscope, ESEM)，觀察微透鏡表面結構，分析製程製作前後之差異。

首先將本研究使用之 980 nm 單模雷射二極體送入拍攝電子顯微鏡，其結果顯示於圖 4-8。由圖中可看見，本研究所使用 980 nm 雷射二極體出光口為長方形，且長軸位於水平方向。由 SEM 圖觀察分析，其在水平與垂直方向大小約為  $3.35\ \mu\text{m}$  與  $0.95\ \mu\text{m}$ ，高寬比約為 3.53。

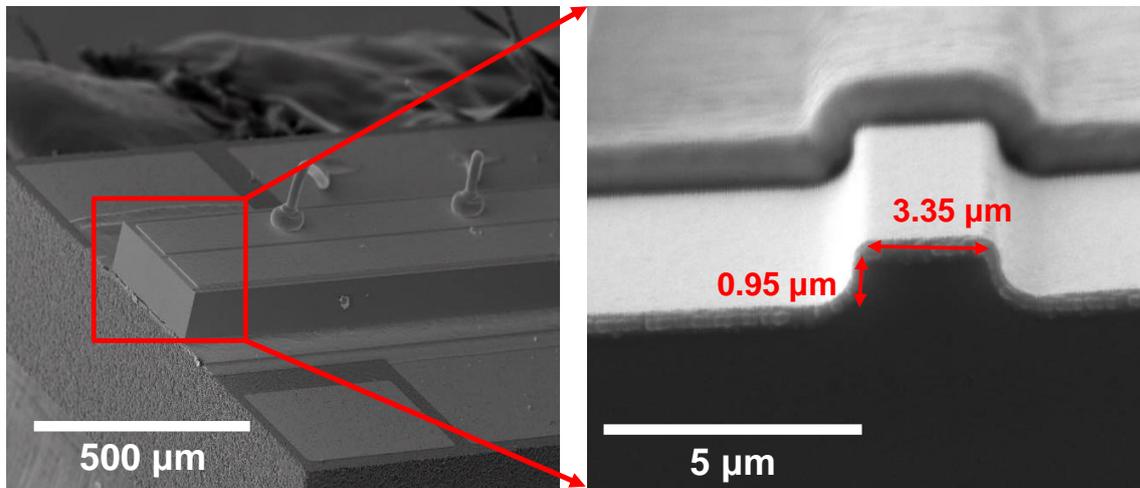


圖 4-8 980 nm 單模雷射二極體環境掃描式電子顯微鏡拍攝圖。圖中包含雷射二極體巨觀圖與局部放大圖，藉由兩拍攝角度分析垂直大小與水平大小。

在圖 4-9 中可看見，顯示本研究所製作且量測各種光纖端面，其中圖 4-9(A)為本研究所使用 980 nm 極化保持光纖切平後端面，能看見光纖中心兩側具有兩個 SAP，本研究主要製作與 SAP 夾角 90 度之光纖微透鏡，如示意圖中表示。而圖 4-

8(B)微研磨完成之光纖端面，能從 SEM 圖中發現，在研磨完成時光纖端面極不平整，且擁有許多凹陷，此時耦光效率不到 40%。在圖 4-9(D)可見本研究製程所製作之微透鏡光纖，在經過旋塗玻璃製程後猶如拋光作用，可使表面相當平滑且無凹痕，另外也不會因為靜電力拉伸現象破壞研磨成形之雙曲線結構，此時可達超過 80% 之高平均耦光效率。另外在圖 4-9(C)顯示熔燒法製作微透鏡之 SEM 圖，可看到由於 SAP 參雜硼等元素，使得其熔點低於光纖核心，造成在放電熔燒時產生凹陷。

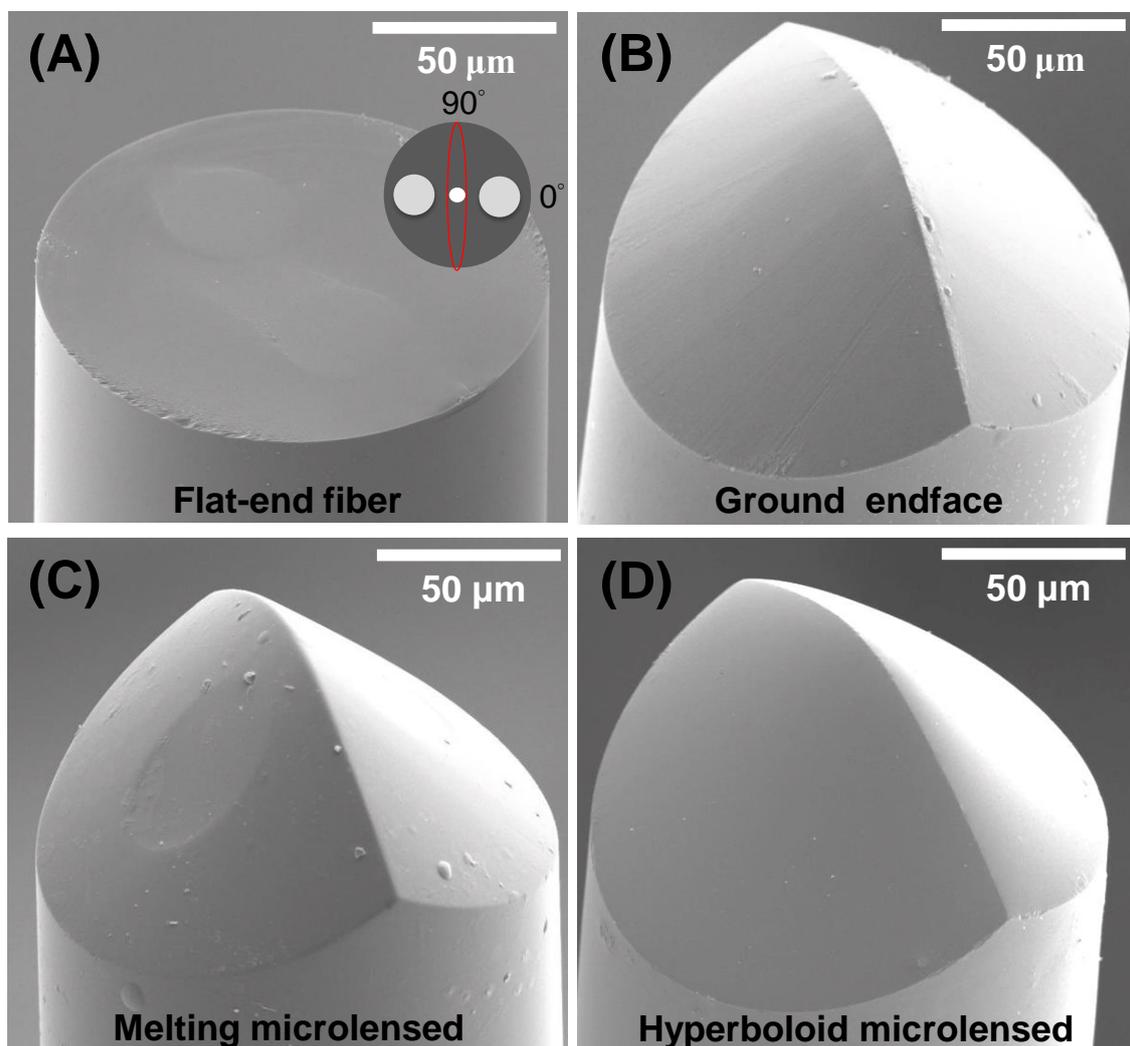


圖 4-9 環境掃描式電子顯微鏡拍攝光纖端面圖。圖中樣本分別為平端光纖、研磨完成端面、熔燒法製作與本研究製程製作之微透鏡光纖。圖中(A)包含本研究製作之微透鏡與 SAP 角度示意圖。

在圖 4-10(A)中可看見熔燒法所製作之 0 度微透鏡，SAP 塌陷非常嚴重，其耦光效率遠低於 5%。這是由於此角度端面進行熔燒時，放電探針與 SAP 相對距離較 90 度微透鏡接近，因此即便已將放電參數調至最低，依然會直接造成嚴重塌陷現象，如圖 4-10(A)所示。在圖 4-10(B)中可見，本研究製程不受到光纖端面角度影響，可製作出特定曲率半徑之光纖微透鏡，並且其耦光效率表現也與 90 度端面無所差別。故本研究所開發之製程相較於熔燒法等破壞性製程，不僅可製作與 SAP 不同相對角度之極化保持光纖微透鏡，亦可應用於各種特殊型光纖微透鏡製作，如特殊形狀極化保持光纖或塑膠光纖等，不會對光纖樣本產生破壞，並能夠製作出高效能之光纖微透鏡。

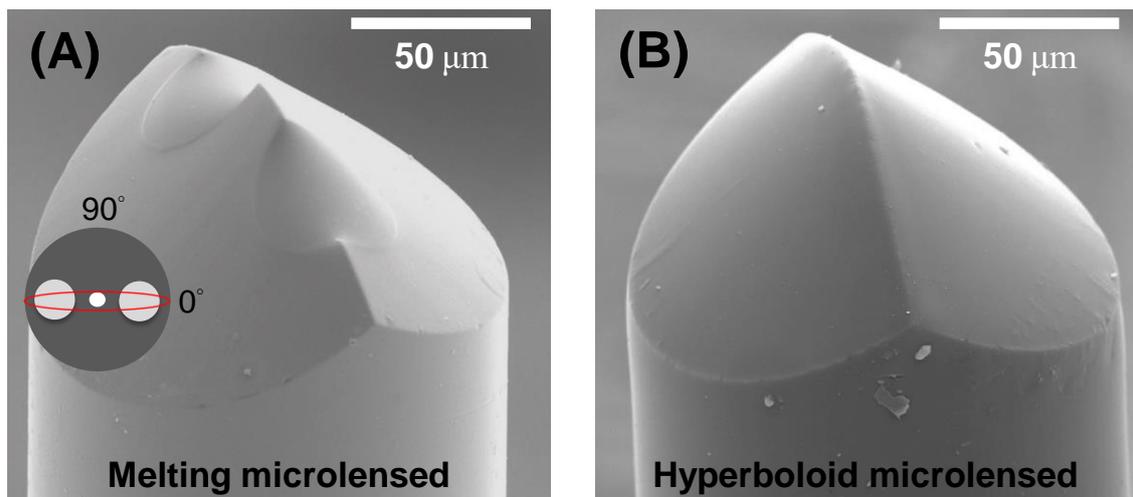


圖 4-10 環境掃描式電子顯微鏡拍攝 0 度微透鏡光纖端面圖。圖中(A)為熔燒法所製作之微透鏡光纖，圖中小圖為微透鏡端面與 SAP 夾角示意圖，圖中(B)為本研究製程製作之 0 度微透鏡光纖。

## 第五章 結論與未來展望

### 5.1 結論

本研究成功以旋塗玻璃，結合靜電力拉伸技術，開發出雙曲面光纖微透鏡製程，且本製程可藉由施加不同的電場強度，製作出不同曲率半徑之雙曲面微透鏡，最大可至約  $5.5\ \mu\text{m}$ 。實驗結果證明，本研究製程製作之雙曲面光纖微透鏡具有相當好的表面平整度，能夠修飾研磨所造成端面缺陷。另外微透鏡成形時受均勻電場的作用拉伸，故微透鏡成形時尖端會朝中心集中，使得本製程對研磨偏心率容忍度提高，具有微幅修飾的作用，最高可修飾約  $0.25\ \mu\text{m}$  的偏心率，有助於耦光效率。有別於傳統點膠製程，在點膠後進行靜電拉伸，雖可製作非球面微透鏡結構，但仍然為軸對稱光纖並不適用於雷射光源耦合。本研究可利用靜電力拉伸法結合精密研磨，製作出高效能之非軸對稱光纖，與雷射二極體達到模態匹配實現高耦合效率。在耦光效率量測實驗中，本研究所製作之 30 根光纖微透鏡，具有約 81% 以上的高平均耦合效率，其中最高達到 86.42%，相較於平端光纖約 40% 耦光效率，平均提升將近一倍。在微透鏡穩定性實驗中得知，旋塗玻璃固化後成形之雙曲面微透鏡，具有高度的穩定性，在持續長時間高耦光效率的量測中變異係數最低僅有 0.05%，最高不超過 0.17%。證實本製程所使用旋塗玻璃，固化後不會因為高能量聚集，對其結構產生形變或是光學特性變化，可實際應用於雷射光耦合中。最後在遠場光場的實驗中證實，本研究製作之雙曲面微透鏡，具備與雷射二極體模態匹配之光場，不會因為在光纖端面上形成薄膜的製作方式，改變微透鏡之光場。

最後為了比較本研究所開發旋塗玻璃靜電拉伸製程與傳統熔燒製程，故本研究也以電弧放電製作光纖微透鏡，並實驗比較兩者製作效能，結果如下：

- (一) 在調整曲率半徑的部分，本研究最大可將曲率半徑調整至約  $5.5\ \mu\text{m}$ ，且在調整曲率半徑時，僅需調整適當電場強度，便能一次性直接完成製作，不僅製作快速且製程穩定；相反地，熔燒法利用電弧放電對光纖端面產生熔融的方式製作，在曲率半徑的調整範圍，最高僅能調整至約  $4.2\ \mu\text{m}$ ，之後再對光纖熔燒也

無法增加其曲率半徑，甚至會出現回縮的現象。而為了達到有效的控制熔融程度，放電時皆以系統最低能量執行，包含最低電流與最短時間。故在製作時需要多次的放電步驟，並且每根光纖的製作次數皆不盡相同。在十根樣本的製作中，平均需要執行 23.6 次的放電熔燒，最高需要高達 30 次，加上每次放電完需分析檢驗結果，其製作上非常耗時且製程穩定性低。

- (二) 在環境掃描式電子顯微鏡拍攝結果中可以看出，本研究製作之透鏡表面相當平滑，並且適用於不同微透鏡角度之製作，代表本研究製程不論光纖材質，皆能在光纖端面有效的製作微透鏡結構；相反地，熔燒法在製作微透鏡時，會在 SAP 位置產生凹陷，並且在微透鏡與 SAP 夾角 0 度時，SAP 會塌陷非常嚴重，導致其耦光效率遠低於 5%。代表熔燒法在光纖的選擇上相對於本研究非常少，僅適用於一般單模玻璃光纖。
- (三) 在製作特性上，由於電拉伸法是對沾塗於光纖端面之旋塗玻璃作用，製程中不會對光纖樣本進行作用與破壞，如遇到製作失誤或曲率半徑不符合實驗所需，僅需將旋塗玻璃剝除便能重新製作；相反地，熔燒法製作方式為熔融光纖端面結構，進而改變曲率半徑。是為不可逆製作，一旦對光纖端面放電失誤，便損失珍貴研磨完成之光纖樣本，使得製程上時間與成本相對提高。

總結以上所有實驗，可得知本研究所開發之旋塗玻璃靜電拉伸製程，具有可製作大範圍曲率半徑、偏心量容忍度高、製程穩定性高、可重複製作、設備成本低與不限光纖種類等優點。並且在光學實驗中證實，本研究製作之雙曲面微透鏡，能與雷射二極體達到模態匹配，能有超過 80% 的高平均耦光效率，另外微透鏡結構也具有高穩定性，證實能夠實際應用於光纖通訊產業中。最後將本研究製程與熔燒製程比較，不論在製作成本、系統維護、製作時間、光纖種類要求與微透鏡效能等，均優於熔燒製程。這樣的優勢能突顯本研究所開發之製程，商業化可行性之優勢。

## 5.2 未來展望

本研究所製作之微透鏡擁有良好的光學特性，能夠與雷射二極體達到模態匹配，實驗高耦光效率，可實際應用於光纖通訊產業中。在製程上，可快速且穩定的製作光纖微透鏡，並對研磨完成之端面進行調整與修正，提升微透鏡效能。在耦光效率的表現上，主要影響因素來至於研磨步驟中所造成之偏心率。由於本研究所使用光纖為單模玻璃光纖，其光纖核心直徑相當小，在研磨時偏心率控制不易，使得研磨步驟耗時且良率不彰。在未來的研究中，可嘗試將光纖研磨步驟簡化，使其研磨時不完全形成尖端的端面結構，增加光纖頂端之表面，減少研磨對於偏心率的影響，如圖 5-1 所示。

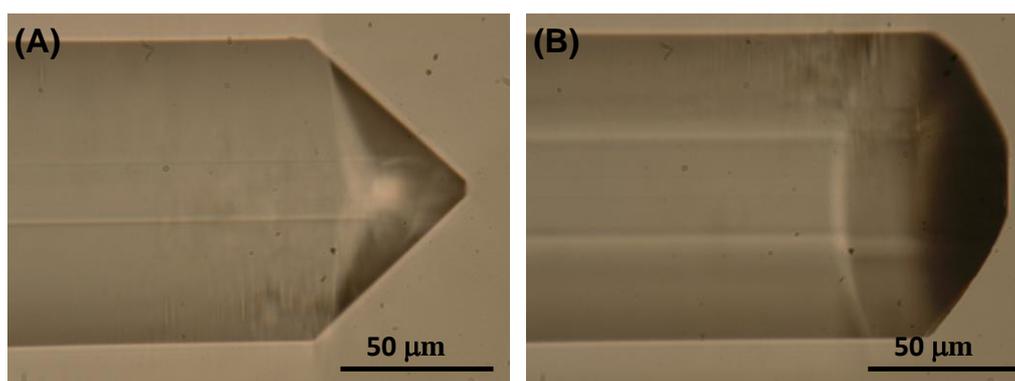


圖 5-1 未磨尖光纖端面示意圖。圖中(A)為光纖短軸方向影像，(B)為長軸之影像。

預期不僅減少研磨步驟時間，且可提高研磨製程良率。亦或是藉由蝕刻技術，將研磨完成之端面微量蝕刻。最後在形成微透鏡的後製程中，藉由沾附旋塗玻璃於未磨尖區域表面，形成少量旋塗玻璃薄膜。利用靜電力拉伸自動對中的特性，控制偏心率的表現。捨去機械研磨對偏心率之影響，改為靜電力拉伸技術對其進行控制。期望可改善研磨步驟良率不佳問題，能夠提升微透鏡光纖製程良率。最後由於本實驗使用光纖為極化保持光纖，在未來研究中也建議探討極化保持現象的特性，並利用本製程可於不同微透鏡端面與 SAP 夾角製作的特性，對不同角度的微透鏡進行分析量測其光學特性。

## 參考文獻

- [1] 黃胤年, "簡易光纖通信," 五南圖書出版股份有限公司, 2002.
- [2] G. Keiser, "Optical fiber communications," *Wiley Online Library*, 2003.
- [3] 李冠卿, "近代光學," 聯經出版事業公司, 1988.
- [4] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction," *Science*, vol. 292, pp. 77-79, 2001.
- [5] S. B. Poole, D. N. Payne, R. J. Mears, M. E. Fermann, and R. Laming, "Fabrication and characterization of low-loss optical fibers containing rare-earth ions," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 4, pp. 870-876, 1986.
- [6] M. Okayasu, T. Takeshita, M. Yamada, O. Kogure, M. Horiguchi, M. Fukuda, *et al.*, "High-power 0.98  $\mu\text{m}$  GaInAs strained quantum well lasers for Er<sup>3+</sup>-doped fibre amplifier," *Electronics Letters*, vol. 25, pp. 1563-1565, 1989.
- [7] R. Smith, C. Sullivan, G. Vawter, G. Hadley, J. Wendt, M. Snipes, *et al.*, "Reduced coupling loss using a tapered-rib adiabatic-following fiber coupler," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, pp. 1052-1054, 1996.
- [8] L. Cohen and M. Schneider, "Microlenses for coupling junction lasers to optical fibers," *Applied Optics*, vol. 13, pp. 89-94, 1974.
- [9] A. Kotsas, H. Ghafouri-Shiraz, and T. Maclean, "Microlens fabrication on single-mode fibres for efficient coupling from laser diodes," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 23, pp. 367-378, 1991.
- [10] Y. Fu, N. K. A. Bryan, and O. N. Shing, "Integrated micro-cylindrical lens with laser diode for single-mode fiber coupling," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, pp. 1213-1215, 2000.

- [11] R. A. Soref, J. Schmidtchen, and K. Petermann, "Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO<sub>2</sub>," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 27, pp. 1971-1974, 1991.
- [12] Y. Murakami, A. Kawana, and H. Tsuchiya, "Cut-off wavelength measurements for single-mode optical fibers," *Applied Optics*, vol. 18, pp. 1101-1105, 1979.
- [13] I. P. Kaminow, "Polarization in optical fibers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 17, pp. 15-22, 1981.
- [14] J. Noda, K. Okamoto, and Y. Sasaki, "Polarization-maintaining fibers and their applications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 4, pp. 1071-1089, 1986.
- [15] M. Yamada, M. Shimizu, T. Takeshita, M. Okayasu, M. Horiguchi, S. Uehara, *et al.*, "Er<sup>3+</sup>-doped fiber amplifier pumped by 0.98  $\mu$ m laser diodes," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 1, pp. 422-424, 1989.
- [16] 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.
- [17] D. Dai, Y. Tang, and J. E. Bowers, "Mode conversion in tapered submicron silicon ridge optical waveguides," *Optics Express*, vol. 20, pp. 13425-13439, 2012.
- [18] B. E. Saleh, M. C. Teich, and B. E. Saleh, "Fundamentals of Photonics," *Wiley New York*, vol. 22, 1991.
- [19] 楊舒雲, "單模光纖干涉儀應用於近場微透鏡光纖光場及波前之量測," *中山大學光電工程研究所學位論文*, 2015.
- [20] G. Vawter, R. Smith, H. Hou, and J. Wendt, "Semiconductor laser with tapered-rib adiabatic-following fiber coupler for expanded output-mode diameter," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9, pp. 425-427, 1997.
- [21] S.-Y. Huang, C. Gaehe, 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.

- [22] 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.
- [23] V. S. Shah, L. Curtis, R. S. Vodhanel, D. P. Bour, and W. C. Young, "Efficient power coupling from a 980-nm, broad-area laser to a single-mode fiber using a wedge-shaped fiber endface," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 8, pp. 1313-1318, 1990.
- [24] 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, p. 1395, 2004.
- [25] K.-R. Kim, S. 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.
- [26] H. Zou, H. Huang, S. Chen, Q. Li, J. Fu, F. Lin, *et al.*, "Laser printed fiber microlens for fiber-diode coupling by direct laser writing," *Applied Optics*, vol. 53, pp. 8444-8448, 2014.
- [27] C.-C. Wu, Y.-D. Tseng, S.-M. Kuo, and C.-H. Lin, "Fabrication of aspherical lensed optical fibers with an electro-static pulling of SU-8 photoresist," *Optics Express*, vol. 19, pp. 22993-22998, 2011.
- [28] H. Presby and C. Giles, "Asymmetric fiber microlenses for efficient coupling to elliptical laser beams," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, pp. 184-186, 1993.
- [29] Y.-Q. Fu, N. Kok, and A. Bryan, "Microfabrication of microlens array by focused ion beam technology," *Microelectronic Engineering*, vol. 54, pp. 211-221, 2000.

- [30] Y.-C. Lee, Y.-C. Lin, and C.-H. Tsai, "A novel method for fabricating aspheric fiber lens and its applications," *IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, pp. 775-778, 2009.
- [31] R. Modavis and T. Webb, "Anamorphic microlens for laser diode to single-mode fiber coupling," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 7, pp. 798-800, 1995.
- [32] S.-M. Yeh, Y.-K. Lu, S.-Y. Huang, H.-H. Lin, C.-H. Hsieh, and W.-H. Cheng, "A novel scheme of lensed fiber employing a quadrangular-pyramid-shaped fiber endface for coupling between high-power laser diodes and single-mode fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, p. 1374, 2004.
- [33] 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, p. 1781, 2005.
- [34] Y.-K. Lu, Y.-C. Tsai, Y.-D. Liu, S.-M. Yeh, C.-C. Lin, and W.-H. Cheng, "Asymmetric elliptic-cone-shaped microlens for efficient coupling to high-power laser diodes," *Optics Express*, vol. 15, pp. 1434-1442, 2007.
- [35] Y.-D. Liu, Y.-C. Tsai, Y.-K. Lu, L.-J. Wang, M.-C. Hsieh, S.-M. Yeh, *et al.*, "New scheme of double-variable-curvature microlens for efficient coupling high-power lasers to single-mode fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, pp. 898-904, 2011.
- [36] B. Chu, "Laser Light Scattering," *Elsevier Science*, 1974.
- [37] 郭燦輝, "光通訊主動元件之應用趨勢," *Photonics Industry & Technology Development Association*, pp. 17-24, 1998.
- [38] <http://www.axcelphotonics.com/975SM.php>.
- [39] J. Walpole, "Semiconductor amplifiers and lasers with tapered gain regions," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 28, pp. 623-645, 1996.

- [40] H. Kogelnik and T. Li, "Laser beams and resonators," *Applied Optics*, vol. 5, pp. 1550-1567, 1966.
- [41] L. C. Andrews and R. L. Phillips, "Laser beam propagation through random media," *SPIE Press Bellingham*, vol. 52, 2005.
- [42] S. A. Self, "Focusing of spherical Gaussian beams," *Applied Optics*, vol. 22, pp. 658-661, 1983.
- [43] V. Magni, G. Cerullo, and S. De Silvestri, "ABCD matrix analysis of propagation of gaussian beams through kerr media," *Optics Communications*, vol. 96, pp. 348-355, 1993.
- [44] 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.
- [45] G. Taylor, "Disintegration of water drops in an electric field," *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 280, pp. 383-397, 1964.
- [46] G. Taylor, "Electrically driven jets," *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 313, pp. 453-475, 1969.
- [47] J. Priestley, "The history and present state of electricity: with original experiments," *University of Michigan*, p. 712, 1769.
- [48] M. S. Wilm and M. Mann, "Electrospray and Taylor-Cone theory, Dole's beam of macromolecules at last?," *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, vol. 136, pp. 167-180, 1994.
- [49] 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.

- [50] W. S. Yoo, T. Fukada, Y. Hiraga, K. Kang, and J. Yamamoto, "Spin-on-glass bake and cure using a resistively heated batch annealing oven," *Proceedings of the Electrochemical Society*, vol. 2001, p. 9, 2001.
- [51] T. E. Wood and H. G. Hughes, "Spin-on glass for use in semiconductor processing," U.S. Patent, 1989.
- [52] L. Ouellet, "Spin-on glass processing technique for the fabrication of semiconductor devices," U.S. Patent, 1994.
- [53] R. Dawson and K. J. Ponder, "Method for planarizing a semiconductor topography using a spin-on glass material with a variable chemical-mechanical polish rate," U.S. Patent, 1996.
- [54] <http://www.filmtronics.com/>.
- [55] 許正安, "熊貓型光纖端面研磨機設計與製造 " 正修科技大學機電工程研究所學位論文, 2014.
- [56] G. M. Huang, "A study of the process parameters in grinding a glass fiber," 中山大學機械與機電工程學系學位論文, 2014.
- [57] C. A. Schneider, W. S. Rasband, and K. W. Eliceiri, "NIH image to imageJ: 25 years of image analysis," *Nature America*, vol. 9, pp. 671-675, 2012.
- [58] J. Schindelin, C. T. Rueden, M. C. Hiner, and K. W. Eliceiri, "The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis," *Molecular Reproduction and Development*, vol. 82, pp. 518-529, 2015.
- [59] W.-H. Hsieh, C.-N. Liu, Y.-C. Huang, C.-A. Hsu, S.-C. Lei, Y.-C. Hsu, *et al.*, "A new scheme of oriented hyperboloid microlens for passive alignment lasers to polarization maintaining fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, pp. 4187-4192, 2015.

- [60] I. M. Yaglom, "A simple non-Euclidean geometry and its physical basis: An elementary account of Galilean geometry and the Galilean principle of relativity," *Springer Science & Business Media*, 2012.
- [61] Y. S. Lin, "A study of radii of curvature by fusing process and improvement of coupling efficiency in hyperbola fiber microlens," *中山大學光電工程研究所學位論文*, 2012.
- [62] L. J. Wang, "Effect of curvature radius and offset on coupling efficiency in double-variable-curvature fiber microlens," *中山大學光電工程研究所學位論文*, 2011.
- [63] Y.-C. Huang, W.-H. Hsieh, Y.-C. Hsu, M.-T. Sheen, Y.-S. Lin, J.-L. Chen, *et al.*, "New scheme of hyperboloid microlens for high-average and high-yield coupling high-power lasers to single-mode fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, pp. 1681-1686, 2013.

# 自述

姓名：雷世勤

出生日期：1992/05/05

性別：男

出生地：高雄市

電子信箱：m033020035@student.nsysu.edu.tw

學歷：

國立中山大學 機械與機電工程研究所 碩士 2014/09~2016/06

國立嘉義大學 生物機電工程學系 學士 2010/09~2014/06

高雄市私立立志高中 普通科 2008/09~20010/06

發表著作：

國際學術期刊

1. W.-H. Hsieh, C.-N. Liu, Y.-C. Huang, C.-A. Hsu, **S.-C. Lei**, Y.-C. Hsu, et al., "A new scheme of oriented hyperboloid microlens for passive alignment lasers to polarization maintaining fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, pp. 4187-4192, 2015

國際研討會

1. **Szu-Chin Lei**, Wen-Hsuan Hsieh, Wood-Hi Cheng, Ying-Chien Tsai, Che-Hsin Lin\* "Micro-hyperboloid lensed optical fibers for laser chip coupling" in *Nano/Micro Engineered And Molecular Systems (NEMS)*, 2016 IEEE 11th International Conference. Japan, Miyagi, Apr 17-20

國內研討會

1. **雷世勤** 林哲信, "以靜電力拉伸 SOG 製作非軸對稱光纖微透鏡之研究" 第 19 屆奈米工程暨微系統技術研討會(19th Nano Engineering and Microsystem



*Technology Conference –NMC*), 台北, 台灣, 八月, 2015

2. **雷世勤** 林哲信, “以靜電力拉伸 SOG 製作雙變曲率光纖微透鏡之研究” 第 39 屆全國力學會議(*Conference on Theoretical and Applied Mechanics-CTAM*), 台北, 台灣, 十一月, 2015 (論文海報優等)

Parent:

1. 林哲信, **雷世勤**, 鄭木海, 蔡穎堅, 雙變曲率光纖微透鏡的製造方法/ Method of manufacturing hyperboloid fiber microlens, 申請號: 105104083, 中華民國專利申請中