



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

光纖懸臂樑整合流場引致振動現象之微流體流量計及

黏度計

Microfluidic Flow Meter and Viscometer Utilizing Flow Induced

Vibration Phenomena on an Optic Fiber Cantilever

研究生：朱伯堯 撰

Po-Yau Ju

指導教授：林哲信 教授

Dr. Che-Hsin Lin

中華民國 100 年 8 月

## 致謝

兩年的日子過得很快，感謝指導教授林哲信老師在研究以及做人處事上的教導，包含在研究的路途上避免學生走歪、走偏、走錯，也謝謝老師擁有廣大的包容心，能包容學生的錯誤並指正。以及感謝口試委員，傅龍明教授、李佳言教授、蔡建雄教授、曾建洲博士對於學生在研究上的指導。

另外，感謝在實驗室的生活跟研究上，BEMS LAB 裡的每一位同伴們，包含謝謝畢業的博士班世偉學長，書銘學長、碩士班俊弘學長、研究助理致戎學長、同學翊航以及目前仍然在學的博士班和政學長、峻維學長、政鴻學長，以及還在研究上努力的學弟妹，最後要謝謝我的家人、以及雅婷，謝謝你一路來的加油跟支持。

# 目錄

致謝.....	i
目錄.....	ii
圖目錄.....	v
表目錄.....	vii
符號表.....	viii
簡寫表.....	x
摘要.....	xi
Abstract.....	xii
第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 封閉環境內的流體行為.....	1
1-3 流速感測原理與流速計.....	3
1-3-1 流速感測原理.....	3
1-3-2 光學式流體感測器.....	3
1-3-3 聲學式流體感測器.....	5
1-3-4 熱力學式流體感測器.....	6
1-3-5 流體力學式流體感測器.....	8
1-4 黏度感測原理與黏度計.....	11
1-5 文獻回顧.....	16
1-6 研究動機與目的.....	22
1-7 論文架構.....	23
第二章 流體引致振動原理.....	24
2-1 不同流體行為引致結構物振動.....	24
2-2 渦流引致振動.....	25

2-3	紊流引致振動流場.....	29
第三章 晶片製作與實驗架設.....		32
3-1	轉能器製作.....	32
3-1-1	光纖.....	32
3-1-2	光纖懸臂樑製作.....	33
3-2	晶片設計與製作.....	35
3-2-1	晶片之光罩設計.....	35
3-2-2	晶片製作流程.....	36
3-3	實驗架設.....	41
3-4	實驗方法.....	43
3-5	訊號處理.....	44
第四章 結果與討論.....		45
4-1	實驗晶片.....	45
4-2	流體引致光纖懸臂樑振動過程.....	45
4-3	振動訊號分析於時域以及頻域.....	46
4-4	DI water 流速與振動頻率之關係.....	50
4-5	空氣流速與振動頻率的關係.....	52
4-6	不同液體黏度與頻率之關係.....	53
4-7	不同氣體黏度與頻率之關係.....	54
4-8	不同氣體流速與頻率之關係.....	55
4-9	第一階振動頻率與第二階振動頻率與流速之關係.....	56
第五章 結論與未來展望.....		58
5-1	結論.....	58
5-2	未來展望.....	59
參考文獻.....		60

Appendix A.....	68
Appendix B.....	70
自述.....	71

## 圖目錄

圖 1.1 管內流之流體行為。[4].....	2
圖 1.2、雷射都普勒速度感測器工作原理示意圖。.....	4
圖 1.3、超音波式流體感測器。.....	5
圖 1.4、熱力式流體感測器示意圖。.....	7
圖 1.5、(a)具有 V 型阻塊之熱力學式流速感測器，聚焦之染料流於 V 型阻塊週期性甩動之現象。[11].....	8
圖 1.6、微懸臂樑壓差式流體感測器。(a)在 XZ 平面，懸臂樑在靜止流場之示意圖，(b)XY 平面，懸臂樑受到來自流場之壓力差影響而偏移。.....	9
圖 1.7、拖曳力式流速感測器。[22].....	10
圖 1.8、渦流式流速感測器。[27].....	11
圖 1.9、流體邊界受到速度影響產生剪切力示意圖。.....	12
圖 1.10、Cannon Instrument 所製作之各式玻璃毛細管黏度計。[33].....	13
圖 1.12、微懸臂樑對於液體黏度量測的原理。[40].....	15
圖 1.13、簡支樑式黏度感測器示意圖。.....	16
圖 1.14、流體衝擊 90 衝平板渦流發生震盪甩動情況。[49].....	18
圖 1.15、微流場渦流生成觀察 (a) $Re=32$ ，(b) $Re=80$ 。[50].....	18
圖 1.16、飄動的旗幟。[48].....	19
圖 1.17、光纖懸臂樑流體感測器。[57].....	21
圖 2.1、馮卡門渦列(von Karman vortex street) 。[61].....	26
圖 2.2、軸向流引致平板振動。上圖為 X-Y 平面，下圖為 X-Z 平面。[62].....	27
圖 2.3、圓柱體後尾流情況隨雷諾數改變[64]。.....	27
圖 2.4、圓柱體後之 Strouhal number 與 Reynolds number 之關係。[1].....	28
圖 2.5、機翼尾後生成紊流。[65].....	29
圖 2.6、懸臂之圓柱體於軸向流場中情況。[67].....	30

圖 2.7、懸臂之圓柱體於軸向流場中的位移改變。[67].....	31
圖 3.1、光纖蝕刻時間與直徑關係圖。.....	32
圖 3.3、光纖蝕刻 SEM 圖。.....	34
圖 3.4、光罩設計圖。(長 76 mm，寬 26 mm).....	35
圖 3.5、管道設計圖。.....	36
圖 3.6、晶片製作流程圖。.....	37
圖 3.7、晶片完成圖。.....	40
圖 3.8、實驗架設圖。.....	41
圖 3.9、氣動式幫浦之氣壓與流量關係圖。.....	42
圖 3.10、光纖裁切過程與熔接。.....	43
圖 4.1、光纖懸臂樑於晶片之中。.....	45
圖 4.2、流體引致光纖振動過程。.....	46
圖 4.3、光纖第一與第二之自然共振頻率。.....	47
圖 4.4、DI water 於時域下的訊號。.....	48
圖 4.5、Air 於時域下的訊號。.....	49
圖 4.6、DI water 於頻域下的訊號。.....	50
圖 4.7、Air 於頻域下的訊號。.....	50
圖 4.8、DI water 於不同流速下與光纖振動頻率的關係。.....	51
圖 4.9、DI water 於 Reynolds number 與 Strouhal number 的關係。.....	52
圖 4.10、Air 於不同流速下與光纖振動頻率的關係。.....	53
圖 4.11、不同黏度液體與光纖振動頻率的關係。.....	54
圖 4.12、不同氣體黏度與光纖振動頻率的關係。.....	55
圖 4.13、不同氣體黏與流速之關係。.....	56
圖 4.14、第一階層與第二階層之振動頻率關係。.....	57

## 表目錄

表 1.1、代表各種液體以及氣體的黏度值。.....	12
表 1.2、不同量測黏度範圍之比較表。.....	21





## 符號表

bar：壓力單位

cP (centipoise)：厘泊

D (diameter)：直徑

$d_a$  (etched depth)：蝕刻深度 ( $\mu\text{m}$ )

dB (decibel)：分貝

$d_b$ ：突擴管後之管道寬度( $\mu\text{m}$ )

$d_h$  (hydraulic diameter)：水力直徑 (m)

f (vibration frequency)：振動頻率

$f_v$  (vortex shedding frequency)：渦流剝離之頻率

h (hour)：小時

Hz (hertz)：赫茲

I (moment of inertia)：轉動慣量

$I^*$  (reduced moment of inertia)：減少之轉動慣量

Kg (kilogram)：公斤

kHz：千赫茲

$L_c$  (characteristic length)：特徵長度(m)

m (meter)：公尺

min (minute)：分鐘

mL (milliliter)：毫升

mm (millimeter)：毫米

mW (milliwatt)：毫瓦

nL (nanoliter)：奈升

nm (nanometer)：奈米

P (Poise)：泊

Pa (Pascal)：壓強單位

Re (Reynolds number)：雷諾數

rpm (revolutions per minute)：每分鐘轉速

s (second)：秒

St (Strouhal number)：史卓赫數

t (time)：時間

u (velocity of shear layer)：剪切層之速度梯度

UV (ultraviolet)：紫外光

V (flow velocity)：瞬時流速 (m/s)

$W_n$ ：噴嘴寬度

y：縱軸的剪切層厚度

Z：噴嘴至平板距離

$\rho$  (density)：流體密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\mu\text{L}$  (microliter)：微升

$\mu\text{m}$  (micrometer)：微米

$\tau$  (shear force)：剪應力

$\eta$  (coefficient of viscosity)：黏滯係數

$^{\circ}\text{C}$ ：攝氏溫度

## 簡寫表

- AFM : Atomic force microscopy ; 原子力顯微鏡。
- APD : Avalanche photo diod ; 雪崩式光電二極體。
- AutoCAD : Autodesk computer aided design ; 電腦輔助設計。
- BOE : Buffer oxide etch ; 犧牲層蝕刻液。
- CCD : Charge-coupled device , 電荷耦合元件影像感測器。
- DAQ : Data acquisition , 資料截取裝置。
- DI : De-ionized ; 去離子化。
- DVD : Digital video disc ; 數位式影音光碟。
- FIV : Flow-induced vibration , 流體引致振動。
- FFT : Fast Fourier transform , 快速傅立葉轉換。
- HMDS : Hexamethyldisilazane ; 六甲基二矽氮烷。
- KOH : Potassium hydroxide ; 氫氧化鉀。
- LDA : Laser-doppler anemometry ; 雷射都普勒氣體速度測定法。
- LDV : Laser Doppler velocimetry , 雷射都普勒測速儀。
- MEMS : Micro-electro-mechanical-system , 微機電系統。
- OBD : Optical beam deflection ; 光束偏移技術。
- PIV : Particle image velocimetry ; 粒子影像測速儀。
- PMMA : Polymethylmethacrylate ; 聚甲基丙烯酸甲酯。
- PSD : Position-sensitive detector ; 位置靈敏感測器。
- SEM : Scanning electron microscope ; 掃描式電子顯微鏡。
- SFM : Scanning force microscope ; 掃描力顯微鏡。
- SMA : Sub miniature A type connector ; 光纖跳接線接頭規格之一。
- TIV : Turbulence induced vibration ; 紊流引致振動。
- VIV : Vortex induced vibration ; 渦流引致振動。

## 摘要

本研究提出了一微流體感測器，目的在於檢測流速和黏度，尤其是超低黏度之量測。在研究中利用流體引致振動現象，驅動光纖於流速以及壓力影響下之位移訊號，透過頻譜分析之後，以其頻率表達不同流體之流速以及黏度。研究上，主要利用化學蝕刻之後之單模光纖，即光纖懸臂樑，因直徑較小便使得其可撓性較大，容易在微流體系統下隨著流體動力行為而改變，藉由光纖將流體特性訊號以光學訊號輸出，並且透過雪崩二極體 (APD, avalanche photodiode) 光強度感測器量測光纖懸臂樑自由端處之訊號。研究中，光纖直徑約為  $9\ \mu\text{m}$  並嵌入在微流體晶片之中，經由綠光雷射耦光至微流體管道之中。本研究透過輸入不同流速時，即產生光纖兩側之不對稱壓力，進而有流體引致振動現象，並帶動光纖振動。在分析上，於 APD 捕捉訊號時可發現其時域下振動之週期性，通過頻譜分析，將收集到的光強度週期性訊號轉換成頻率，而當液體流速越大時光纖懸臂樑振動頻率也越大，另外一方面，也以黏滯係數為二氧化碳(0.0148 cP)，氮氣(0.0174 cP)，空氣(0.0183 cP)，氧氣(0.0202 cP)，氫氣(0.0223)，進行量測，其振動頻率由於流體黏滯力影響降低，故流速越快其振動頻率也隨之增高，且振動頻率約在液體時的 40 倍，故流體動態特性，包括流速和黏度可以以此方式檢測。研究結果可知，本研究演示的感測器能夠感測流體樣品的流速 0.17 m/s 至 68.81 m/s 以及黏度從 0.306 cP 至 1.200 cP。此外，在氣體中之結果為 0.0148 cP 至 0.0223 cP，且於去離子水中之量測靈敏度約為  $3.667\ \text{mm}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ ，即約為  $40\ \mu\text{L}/(\text{min}\cdot\text{Hz})$ ，而在氣體中為  $6.190\ \text{mm}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ 。微流體流速及黏度感測器的研製提供了一個簡單而直接的方法用於在微流體通道之中檢測流體特性，其可以精確的同時量測超低黏滯係數之氣體黏度及流速。

**關鍵字：**微流體晶片、流速計、黏度計、流體引致振動、頻譜分析

## Abstract

This study developed a microfluidic flow sensor for the detections of velocity and viscosity, especially for ultra-low viscosity detection. An etched optic fiber with the diameter of 9  $\mu\text{m}$  is embedded in a microfluidic chip to couple green laser light into the microfluidic channel. The flow induced vibration causes periodic flapping motion of the optic fiber cantilever because of the pressure difference from two sides of fiber cantilever. Through the frequency analysis, the fluidic properties including the flow rate and the viscosity can be detected and identified. Results show that this developed sensor is capable of sensing liquid samples with the flow rates from 0.17 m/s to 68.81 m/s and the viscosities from 0.306 cP to 1.200 cP. In addition, air samples (0.0183 cP) with various flow rates can also be detected using the developed sensor. Although the detectable range for flow rate sensing is not wide, the sensitivity is high of up to around 3.667 mm/(s $\cdot$ Hz) in test liquid in DI water, and when detecting air the sensitivity is 6.190 mm/(s $\cdot$ Hz). The developed flow sensor provides a simple and straight forward method for sensing flow characteristics in a microfluidic channel.

**Keyword :** microfluidic chip, flow meter, viscometer, flow-induced vibration, spectra analysis

# 第一章 緒論

## 1-1 前言

微機電系統(Micro-Electro-Mechanical-System, MEMS)是在近年來在科技上一大進步，此技術立基於半導體製造技術而衍伸，並整合了傳統的電子、電機、機械、光電、材料、控制、生物醫學等技術，發展了微致動器、微感測器、微幫浦、微閥門、微混合器、微流體生物晶片等元件；而微流體生物晶片應用廣泛之原因，在於主要的優點是將一般實驗室所需個別進行實驗過程，藉由晶片的控制、製程、設計將其整合在同一個晶片之中，使其具備方便可攜性、反應迅速、平行處理能力、簡單流程的優勢。然而，受限於元件微型化的關係，流體在微尺寸下會因為尺寸效應(size effect)的關係使毛細作用力(capillary force)、庫倫作用力(Coulomb force)、黏滯力(viscous force)、摩擦力(friction force)、凡德瓦爾力(Van der Waals force)等不能以如同巨觀下做分析跟解釋，故微管道內的流體行為模式儼然成為一個重要的探討方向。

在傳統的工業發展上，流體感測器最常用於河川水庫量測、流體機械、冷凍空調裝置等領域，透過機構運作方式達到量測體積流率、質量流率(mass flow rate)，並製作適合用於民生工業的流量計、流速計、氣速計等，如家庭用的自來水、或者是加油站的油錶。然而，透過 MEMS 技術的應用，進一步運用在核能電廠降溫流速量測[1, 2]、具有腐蝕性的液體/氣體流速、甚至是人體血液流速的監測[3]等，將當初人類所量測不到的環境都藉由 MEMS 技術製作的流速計完成。

## 1-2 封閉環境內的流體行為

在巨觀研究上，於封閉環境中研究動態流體的特性時，首先以知道其流速(flow velocity)或者是質量流率為主要目的，以此可迅速的了解到在此一狀態下流體流動的瞬時情形，並且做及時的處理。

在流體力學的理論上，流體的流動行為會因流體本身黏滯係數和雷諾數

(Reynolds number ; Re)有關。

$$\text{Re} = \frac{\rho V d_h}{\eta} \quad (1.1)$$

Re 為一個無因次化的數值， $\rho$  為流體密度， $V$  為流體之瞬時速度， $L_c$  為管道尺寸之特徵長度，如果指的是封閉環境，則以水力直徑來代表， $\eta$  為黏滯係數。而在描述動態流體行為上，研究上以雷諾數描述其差異性；雷諾數可以以  $\rho V L_c$  項表示流體的慣性力，而以  $\eta$  項表示流體的黏滯力。所以在動態流體量測時，以量測  $V$  以及  $\eta$  居多。如圖 1.1 所示。當流體作用之雷諾數低於 2300 時，流體在此雷諾數下其行為稱為層流(laminar flow)，其邊界層(boundary layer)為一個穩定有序的流線；當雷諾數大於 2300 時，流場會經過一過渡區(transition region)，此時，流體在此區中會漸變成不規則之擾動與震盪情況，且邊界層會逐漸因為雷諾數增大的關係而增大。在此過渡區之後，流場在此處產生多層次的邊界層，包含黏滯層(viscous sublayer)，緩衝層(buffer layer)，以及範圍最大的紊流層(turbulent layer)；而在當雷諾數在增加時，流場會完全轉變成為紊流 (turbulent flow)，也讓流體在此處的壓力分佈、流線等情況都與層流情況有極大差異性。

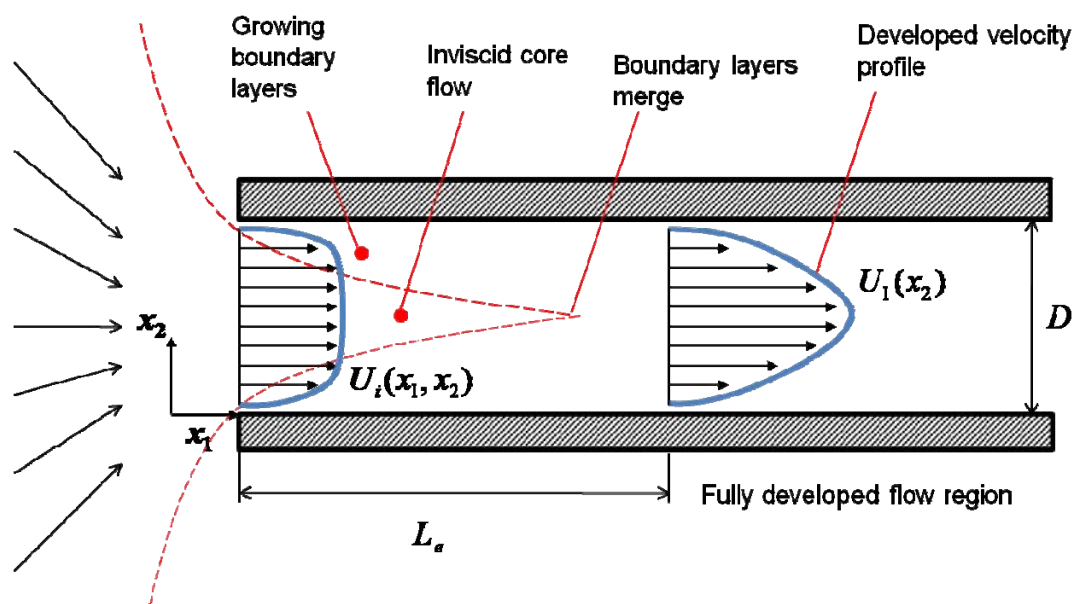


圖 1.1 管內流之流體行為。[4]

在元件微型化後，因尺寸效應的影響下，使得微流場與大型系統產生極大差異，且無法使用簡單的方式產生渦流、擾動或紊流等現象。若要致使微管道內產生擾動、渦流或紊流現象，必以其他機制做為控制變因，如改變管道形狀設計、管道內增加阻塊、外力作用，方能改變一般層流特性。

## 1-3 流速感測原理與流速計

### 1-3-1 流速感測原理

傳統上，觀察落葉於水面上流動的速度便可得知水流速度，但此法並不適用於封閉的管流當中。在大型封閉管道中的流速量測多以風扇葉片式或渦輪葉片以及皮托管(Pitot tube)測定，上述此方法雖然簡單可靠，但其僅適用於開放或是大型流場。對於微流體系統而言，過去方法並不容易實現。雖然在微流體系統具有流量小，可以透過收集一段時間的流體體積後，得知其單位時間之直流量率並算得流速，但此法僅能測得平均流速，無法提供微流體管道中之流體瞬時流速，因此其於微流體系統之應用受限。若欲得知微流體管道中之流體瞬時速度，則需要利用不同的量測方法，或製作出小型的量測元件，以符合量測流場之特徵長度。

因此，本研究回顧了有關於近年來利用傳統技術以及 MEMS 技術製作流速計，並且根據文獻報導之量測的優劣做比較。一般流體感測器(flow sensors)[5]以物理原理可分為光學式、聲學式、熱力學式、流體力學式。

### 1-3-2 光學式流體感測器

在光學式流體感測器中以不同原理可以分為干涉計式、反射式；干涉式以雷射都普勒速度儀為主(LDV)以及粒子影像測速儀(PIV)。早於 1964 年，Yeh 和 Cummins 學者[6]利用 He-Ne Laser Spectrometer 量測流體速度，主要原理可以參考圖 1.2 所示。透過高度聚焦性的光學鏡片，將兩道 He-Ne 雷射光線高度聚焦在隨流場運動之流體粒子上，經由接收到來自粒子的都普勒頻率(Doppler-frequency)



相位差異，可以在被進一步解析出是否為相長性的干涉，亦或者是相消性干涉，以及粒子於流場中的行為，但是其缺點為主要是單點量測。而在2004年，Wei Peng 學者的研究團隊[7]，以改良式之多頻寬式的干涉計，結合兩個位於懸臂樑結構兩側的多模光纖因流體流動所造成的彎曲應變，而將光訊號由反射光纖傳回至訊號控制端，並且可以因環境的溫度和壓力做回饋補償運算，但是訊雜比會因流體中的背景散射光而降低，及便在流體中注入粒子進行量測，雜訊降低的情況仍然有限。另外，在1998年時，粒子影像測速儀(PIV)的發展，將過去LDV的單點量測系統，變成多點量測，且同時可以獲得整張圖面的速度資訊，便為後期研究團隊努力之目標，故文獻中，由Raffel的學者[8]，利用一束雷射並搭配數個稜鏡跟透鏡製造雷射光頁，將粒子於流場的影像做不同時間的取像，並將各個影像的粒子位置逐步分析，進而得到粒子於流場的瞬時流速，在此並開啟了對於量測流體流速新里程碑。但是因為必須額外架設光學裝置以便製造雷射光頁，且在研究中，必須以螢光粒子作為觀察，粒子容易與所處之流體，以及管道之親疏水性相關，皆要改進使其更容易量測。便有了微質點影像測速儀(mico-PIV)系統，相對於PIV，加入顯微光學系統以便量測至微液體行為，但是也遇到PIV下所沒有遇到的問題，如布朗運動以及繞射。

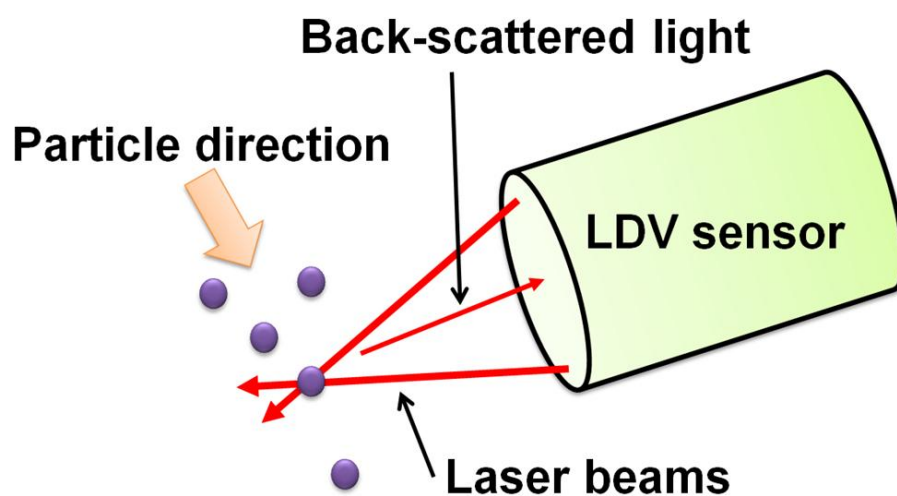


圖 1.2、雷射都普勒速度感測器工作原理示意圖。

在 2004 年，Szekely 學者的研究團隊[9]以觀察表面張力改變液面，透過反射式量測對不同流量之液體表面與探頭距離，進而得知流速，製作非侵入式微流體流量感測器。在原理上以由一束光纖雷射，照射在儲存槽之待測液體表面上，收集反射來自於液體表面的反射光源，而此反射光源強度與光纖雷射探頭至液體表面的距離成正比相關。而實驗結果部分，本文獻的解析度達 0.3 nl/s，量測範圍 1 到 100  $\mu\text{l/h}$ 。即便可以透過非侵入式的量測方法，但此種方式也有缺陷存在，在所量測的液體表面，只能容許某些角度存在，除此之外，液體的液面會因為實驗液體不同，造成液面改變，故以上問題仍存在並且有待解決。

### 1-3-3 聲學式流體感測器

超音波聲學式流體感測器，而以超音波原理使用上最多，一般適用於雜質含量較多的水質，如城市污水、污泥等等。

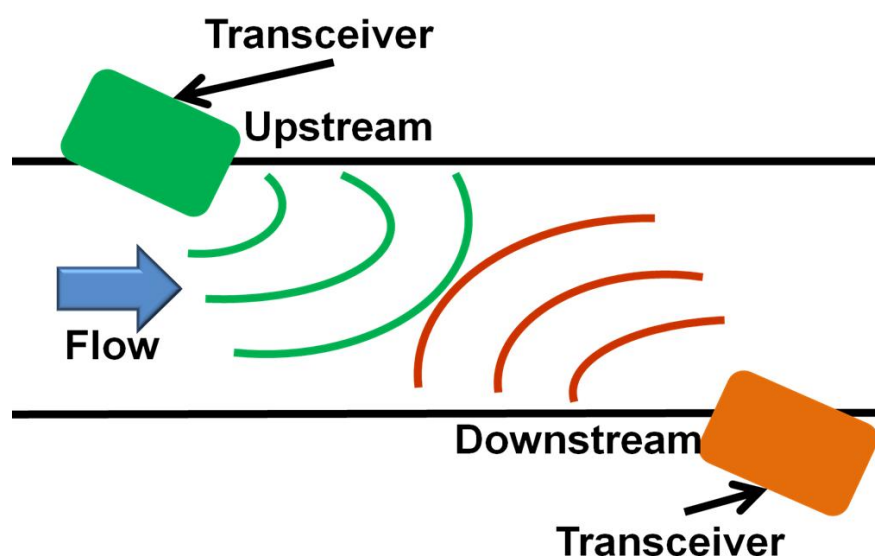


圖 1.3、超音波式流體感測器。

超音波式流體感測器是根據都普勒原理，依靠水中雜質的反射來測量水的流速，並且近年透過微型化後，也利用於人體血液量測。超音波式流體感測器可以透過非侵入式的方式，將時間差下之回傳的超音波形相位做分析，但是通常在使用上會必須使用整流器，避免渦流產生，以及其他的流場效應影響超音波流速計的量測[10]，如圖 1.3 所示。

### 1-3-4 熱力學式流體感測器

一般熱力學式流體感測器，主要透過一個加熱器(heater)，跟兩個溫度感測器(temperature sensor)組合而成，透過對流動中的液體帶走加熱器溫度，使得旁邊設置的熱阻絲或者其他熱感測器量測到溫度變化，此種方式也稱為 time-of-flight 感測器[5]。在一般熱力學式流體感測器透過對熱源感測的裝置不同，可以分為 hot-wire 和 hot-film 形式，因為 hot-wire 式容易將測速儀微小化並且接觸面積較小使得雜訊較低，所以 hot-wire 式流速計在工業上應用廣泛。且當環境流速越快時，於單位時間下會讓感測器偵測到的溫度變化會更大，可知道溫度受到對流的關係而改變，反之，當環境流速越慢時，單位時間下感測器偵測到的溫度變化量會較小。另外，根據圖 1.4 可以知道，流體的速度會影響熱傳的速度，藉此一參數來表達流體流速。但是其缺點在於，當流體極慢或者極快時，反應時間、遲滯時間為主要問題，另外感測範圍會因為不同流體的熱傳導係數的不同，而有所差異，並須另外做校正或者回饋曲線。除此之外，過去研究指出，透過改變感測器電極接觸面積，亦或者是改變加熱器電極於流場中的位置，並且利用溫度變化的特性，並以電訊號輸出，如同市售的熱電偶感測器。以兩端的溫度差現象產生一個熱電動勢，透過這個熱電動勢，所造成的電壓差，稱為席貝克效應(Seebeck effect)。

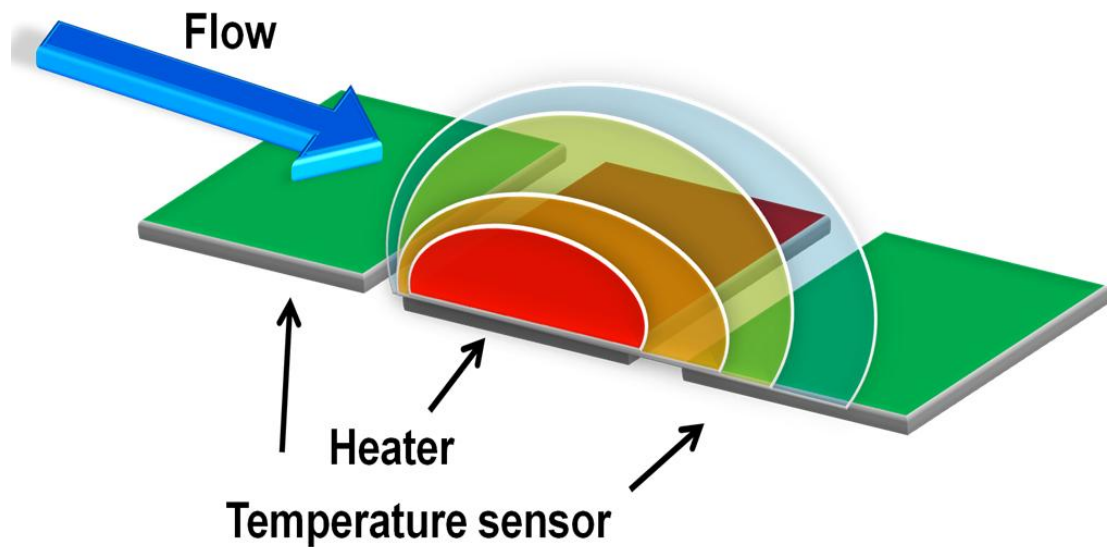


圖 1.4、熱力式流體感測器示意圖。

而在 2002 年，Lee 學者的研究團隊[11]以具有 V 型平板噴流微管道內，在靠近噴嘴處的流道兩側放置熱阻感測器，進行流體流速偵測。其原理利用流場經過噴嘴(nozzle)結構加速流速，在後端以 V 型平阻塊阻擋，讓流體從 V 型阻塊兩側流出；當流體遭遇 V 型阻塊時，會有週期性的擾動現象，並且會讓流體撞擊到 V 型阻塊前隨即往 V 型阻塊之特定一側流出，且因為先流出的一側的邊界層阻力較大，而接著的流體不會重複，此一週期性的現象稱為 Flapping motion，在此篇文獻中，以 Strouhal number 來描述。

$$St = \frac{f_v d_h}{V} \quad (1.2)$$

其中，St 為一無因次項，在雷諾數從  $10^2$  至  $10^5$  時 St 為 0.19 至 0.21[1]， $f_v$  為渦流剝離的頻率(Hz)， $L_c$  為特徵長度(m)， $V$  為瞬時流速(m/s)。由於此一週期性的現象穩定且結構簡單，與本研究要使用的原理相關，在第二章會進一步介紹。如圖 1.5a 所示，其管道深為  $50 \mu\text{m}$ ，V 型平板開口角度為  $70^\circ$  以及  $110^\circ$  分別進行實驗。結果顯示樣本流在雷諾數為 0.2 至 5.4 可以偵測出其解析度為 2 nl/s 以及透過熱阻式感測器偵測的流速範圍 0.15 至 2.5 mm/s。

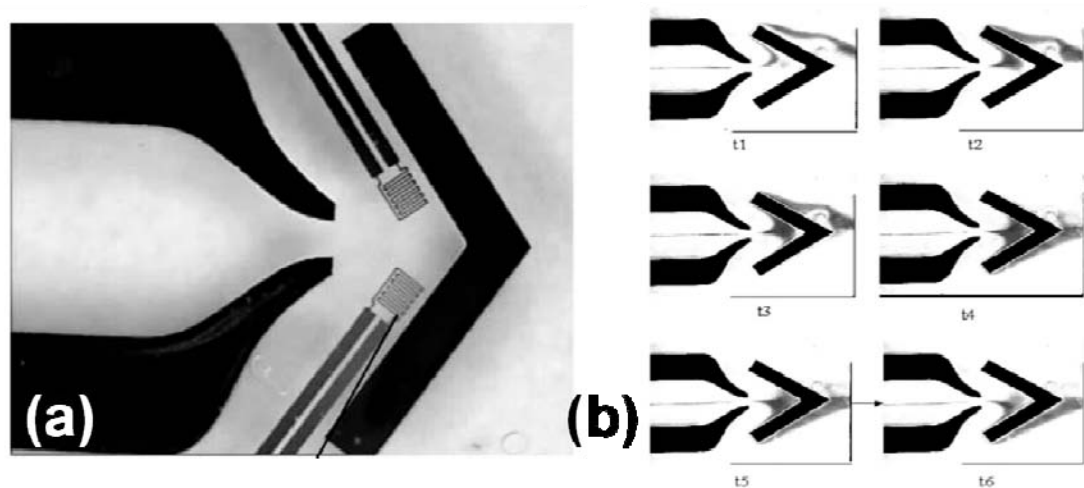


圖 1.5、(a)具有 V 型阻塊之熱力學式流速感測器，聚焦之染料流於 V 型阻塊週期性甩動之現象。[11]

### 1-3-5 流體力學式流體感測器

流體力學式流體感測器，根據使用的感測器工作原理不同可以分為壓差式 (pressure difference)[12, 13]、拖曳力式 (drag force)[14-16]、渦流式 (vortex)[17-19]。且為了要設置在流場中，以侵入方式對流體流速等特性做量測，一般使用懸臂樑結構居多，在懸臂樑的使用上，材料有鎳[13]、SU-8[12]、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ [20]、 $\text{SiO}_2$ [21]。首先在壓差式流體感測器，在 2005 年 Radhakrishnan 學者的研究團隊，利用在 PDMS 微管道內機械力矩式微鎳懸臂樑 (nickel beam)，由初始懸臂樑所分割出不同寬度大小的流道[13]，根據，伯努力原理 (Bernoulli principle) 會形成流場兩側的壓差，如圖 1.6 所示，造成力矩的微小轉動慣量並透過電訊號放大處理，借由此一力矩往下之壓力將壓阻產生改變傳至外部電路結構執行後端處理。另外，在本文獻流場，為層流，並且於流速相當緩慢的情況，可以忽略雷諾數中的慣性力項，在此稱為 Stokes flow，所以透過在 Stokes flow 下的流場特性製作流體感測器。其實驗結果呈現上，其流量偵測的靈敏度為 0.5 ppm。另外當以簡單去離子水量測時，可偵測的流量範圍為 10 當以簡單 in 至 100 以簡單 in 子。由於在此篇文獻中，其微鎳懸臂樑是相當靠近流道底部，並沒有適當的空間給予流體通過，所

以無法減少摩擦力的抵銷且此一空間的流體也會帶來向上的逆壓；另外其壓力來源為被微鏢懸臂樑切割為二個流場，透過不對稱流場壓力來源促使壓力以及拖曳力對為鏢懸臂樑造成向下的扭力，因為其是用金屬鏢做為懸臂樑結構，其楊氏係數(Young's modulus)遠大於聚合物結構的 SU-8。所以在 2007 年，Ezkerra 學者[12]的研究團隊以負型光阻 SU-8 為材料透過半導體製程製作微懸臂樑，尺寸為 200  $\mu\text{m}$ 、300  $\mu\text{m}$  長，寬度為 10  $\mu\text{m}$ 、15  $\mu\text{m}$ ，且懸臂樑放置於與流場方向夾銳角 45 度以及 90 度。SU-8 的楊氏係數約為鏢的 1/50 倍。研究結果顯示，量測的壓差範圍從 0 bar 至 1.8 bar。當壓差促使 SU-8 懸臂樑造成偏移時，透過壓阻受到的力訊號轉換成電訊號並傳送至後端分析。此種壓力差搭配上微懸臂樑結構的方式雖然能夠將流體速度特性量測出來，但由於壓力跟懸臂樑本身的楊氏係數的特性息息相關，且壓力對於結構的偏移量極小，特別是當兩邊流體流速或者壓力差很小的情況下都無法量測。

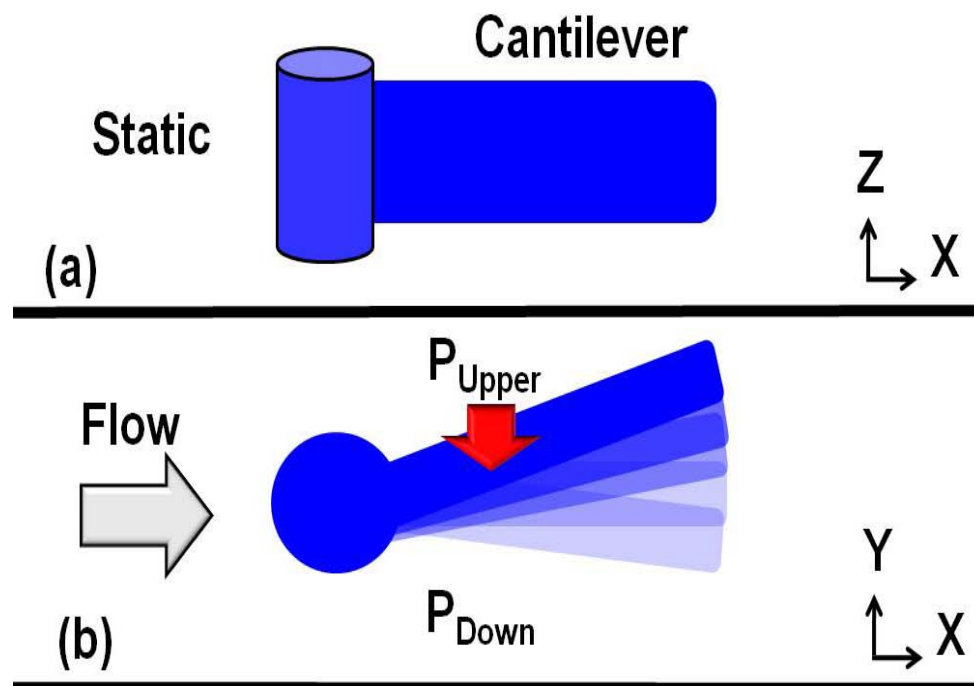


圖 1.6、微懸臂樑壓差式流體感測器。(a)在 XZ 平面，懸臂樑在靜止流場之示意圖，(b)XY 平面，懸臂樑受到來自流場之壓力差影響而偏移。



在拖曳力式流體感測器中，為了達到量測流速的目的，皆必須具備轉能器 (transducers)，才能將拖曳力給予轉能器的位移變化、光學性質變化等[16]，傳遞出去，並且透過分析轉換成與流速有關的訊號。而當流場拖曳力所提供的動量大於轉能器的質量，並且拖曳力大於當時流體與轉能器的剪切力 (shear force) 和黏滯力時，才能將流速推動轉能器的位移訊號轉換成其他訊號輸出，如圖 1.7 所示。但是，拖曳力式的流速感測器會因為施予力於懸臂樑的位置而有不同反應，並且會有殘留應力 (residual stress) 問題，導致懸臂樑受到流速的影響而產生彎曲 (bending)，卻也會因為殘留應力而有回復的情形，且當流速越大時，材料在彎曲之後的殘留應力也會越來越大。

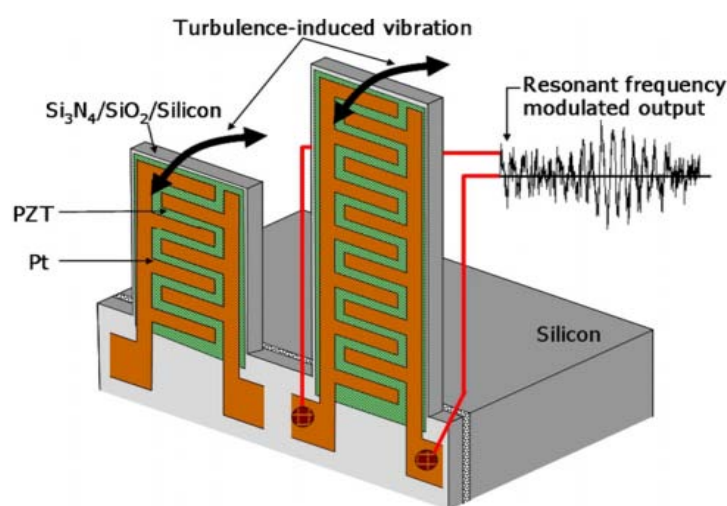


圖 1.7、拖曳力式流速感測器。[22]

而一般渦流流速感測器利用 Von Karman vortex street 渦流原理[17, 23]產生渦流。創造渦流的方式可以透過設置梳狀 (comb) 結構[24, 25] 於重力流場之中、或是透過可調式的微閥門 (valve) 搭配上 LDV 量測經由閥門的狹縫而產生渦流的剝離頻率 (shedding frequency)[26]，並將渦流產生的頻率光纖作量測[19, 27, 28]，並且設置在容易觀察的肥皂膜上[26, 29, 30]。在分析上，利用實驗數值結果套入

Strouhal number 公式，透過公式的運算來確定所量測的結果是否正確。雖然以流體通過類似圓柱結構，如圖 1.8 所示，且流場方向跟圓柱結構軸方向呈 90° 角，並且能夠產生渦流，其剝離頻率透過 Strouhal number 的換算，便可以知道在此流場狀況下的流速。但是，渦流的產生有部分也是來自於紊流，當此情況發生時，其產生的頻率不適用於 Strouhal number 的公式。

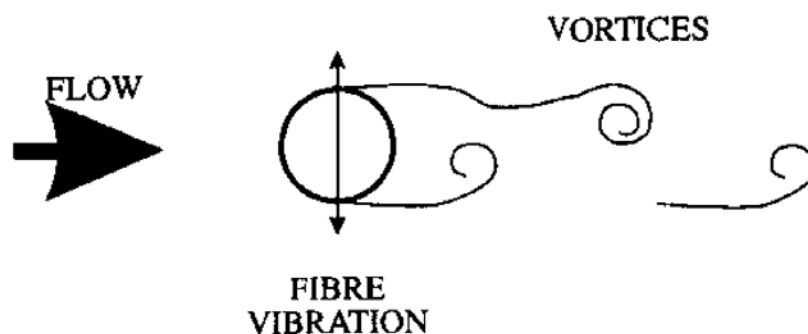


圖 1.8、渦流式流速感測器。[27]

#### 1-4 黏度感測原理與黏度計

黏度(viscosity)為為流體的一種性質，是流體分子間互相移動所產生的剪切力使流體流動產生摩擦損失，一般以黏滯係數  $\nu$  來表示。黏度可以分為動力黏度(kinematic viscosity)、運動黏度(dynamic viscosity)；動力黏度代表的是液體在單位速度梯度下，流動時單位面積上產生的剪切力，單位為  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ，動力黏度一般也稱為絕對黏度(absolute viscosity)，而運動黏度代表的是液體的動力黏度與其密度的比值，單位為  $\text{m}^2/\text{s}$ 。在公式上是表達待測液體的剪應力(shear stress)與剪應變率(shear rate)。如圖 1.9 所示。 $\tau$  為表示剪應力， $\nu$  表黏滯係數， $u$  表剪切流的速度梯度， $y$  表縱軸的剪切層。

$$\tau \equiv \nu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1.3)$$



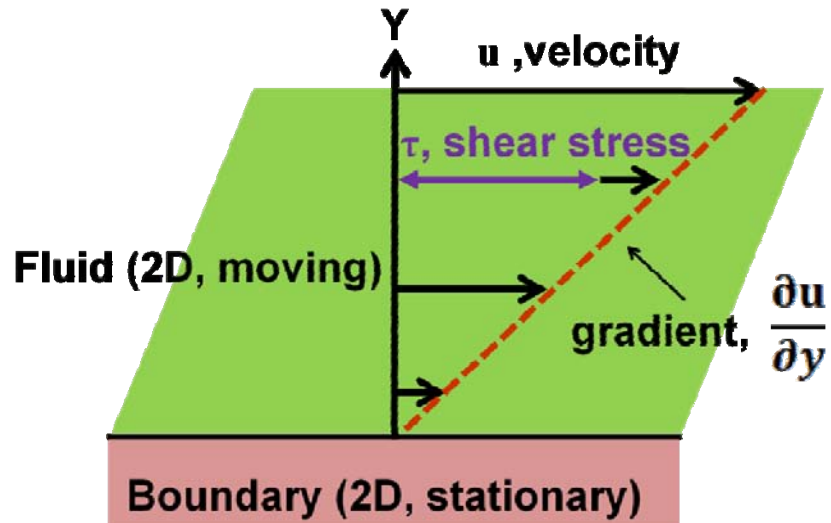


圖 1.9、流體邊界受到速度影響產生剪切力示意圖。

表 1.1、各種液體以及氣體的黏度值。

Liquid/Gases	Viscosity (cP) at 25°C
Air	0.01827
Acetone	0.306
Methanol	0.544
Benzene	0.604
Water	1.000
Ethanol	1.074
Glycerol	1200

傳統的黏度感測器於量測上，以量測動力黏度為主。其透過流體流過一已知表面特性之管道，紀錄流體流過之時間，並由其計算出動黏滯係數。例如，由 Cannon Instrument 以及 Ostwald 公司開發毛細管黏度計[31, 32]，玻璃毛細管如圖

1.10 所示，使用方法是將一定體積的液體在經過溫度控制之後，使其重力流流經毛細管待測區並記錄經過兩次測量刻度之液面的時間差，經由換算可得知其動力黏度值；一般毛細管黏度計，因為不能調節剪應變率，所以無法量測非牛頓流體的黏度，但是在對於低黏度以及高聚合物的量測，可以透過更換適合的黏度管以便量測動力黏度。



圖 1.10、Cannon Instrument 所製作之各式玻璃毛細管黏度計。[33]

另外，有 Brookfield 公司的迴轉式黏度計[34-36]，此類型的黏度計的工作方式為，以馬達帶動轉子同步旋轉，轉子表面與液體之間產生相對剪應變力，透過控制剪應變率，即為轉子的旋轉速率，便可以得待測液體的黏度值。而馬達跟轉子之間最重要的介質是一條經過精密校正的游絲(hairspring)。如圖 1.11 所示。

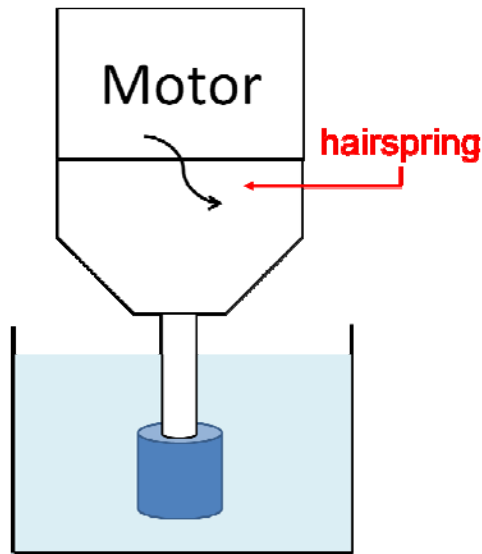


圖 1.11、Brookfield 公司的迴轉式黏度計示意圖。

當液體黏度值大於游絲彈性時，會帶動指針於刻度盤上產生一個偏角，即可以得知樣本的決對黏度；除此之外，現在也發展至透過數位化讀取黏度值，且可以量測微量樣本。但是，由於每個待測樣本的液體其黏度等特性都不一樣，並且會隨著溫度做變化[35]，而轉子、毛細管每個也都有不同表面積、摩擦係數等特性，所以當待測液體黏度範圍沒有落在轉子或毛細管測量範圍時，必須更換轉子後再做量測。

在近期的研究上，透過 MEMS 技術的發展，對於量測流體黏度的方式，有長足的進展。在微流體(microfluidics)[37]的環境中，製作微黏度感測器，首先，由於不同於大尺度下產生剪應變率方式，改採用電驅動所提供的電能，造成轉能器的位移或者是其他微小的改變量，並且透過量測訊號並分析後可知道與黏度的關係。轉能器可以利用微懸臂樑[38]、AFM 懸臂樑[39]等，輔以一些外加的電場或是光學裝置便可以量測。在 1997 年 Berger 學者的研究團隊[40]，對於 MEMS 將壓阻(piezoresistive)、壓電(pizeoelectric)、電容偵測(capacitance detection)等技術整合在實驗室晶片(lab on a chip)之中，基於上述元件量測力學特性，Berger 學者研究以矽基材為主的微懸臂樑，改量測流體特質，並且透過過去不同的作動原

理，如圖 1.12 所示，(a)透過溫度感測器、(b)氣體感測器、(c)光譜、(d)卡氏計 (calorimeter)等原理[40]，造成微懸臂樑於待測液體之中，對於黏度特性而改變。

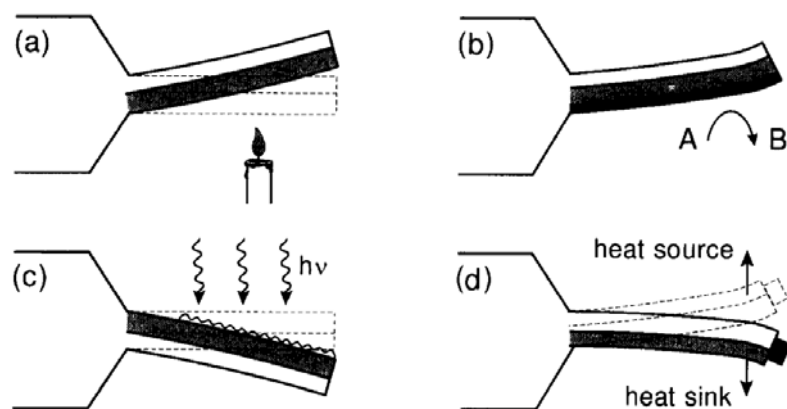


圖 1.12、微懸臂樑對於液體黏度量測的原理。[40]

另外，在 2000 年，Bergaud 學者的研究團隊[41]，使用  $\text{SiO}_2\text{-Au}$  的懸臂樑，並透過長 100、150、200、250、300  $\mu\text{m}$ ，寬為 40  $\mu\text{m}$  的矩形，並以 50  $\mu\text{m}$  區分五種不同長度，並於同一種液體下進行共振頻率量測，量測方式是透過 optical beam deflection(OBD)技術。在其研究結果上，當懸臂樑共振頻率被一個壓電陶瓷致動器(piezoceramic actuator)誘發時，在不同的液體以及空氣下其共振的頻率為不同，並且在固定液體或者是空氣下，每個懸臂樑的共振頻率具備一次以及二次共振頻率，並且透過不同的長度的懸臂樑可以知道，越長的懸臂樑其共振頻率越低。在 2000 年，Patois 學者的研究團隊[42]，利用了長 4.95 cm，寬 0.60 cm，厚為 0.01 cm 的鋼柱，並且在其上附貼上壓電材料 PZT( $\text{PbO}\cdot\text{ZrO}_2\cdot\text{TiO}_2$ )並，且其長度短於鋼柱，透過此一壓電驅動力，量測於不同液體以及空氣之共振頻率。另外在，2002 年，Boskovic 學者的研究團隊[43]，使用 AFM 懸臂樑放置於不同液體以及氣體的環境中，透過對環境加熱產生熱擾動(thermal fluctuation)之驅動方式，量測不同黏度值的共振頻率。在 2008 年，Belmiloud 學者以及 Reichel 學者的研究團隊[44, 45]，提出了跟過去不同的驅動力，改以 Lorentz force 激發微懸臂樑的方式量測黏度，且在微型元件之中提供固定的磁場以及電流，透過改變上述

兩個參數將微懸臂樑於不同液體的共振頻率做分析，並且於理論上也證實不同黏度的液體所影響微懸臂樑結構的共振頻率，會因為週遭黏滯阻尼(viscous damping)變大，而共振頻率變小。以 2007 年至 2008 年，Riesch 的研究團隊[46]，透過將簡支樑放置在不同黏度的液體之中，簡支樑在 Z 軸方向受到 Lorentz force 的作用下而振動，最後以 DVD 光學頭讀出振動訊號，如圖 1.13。

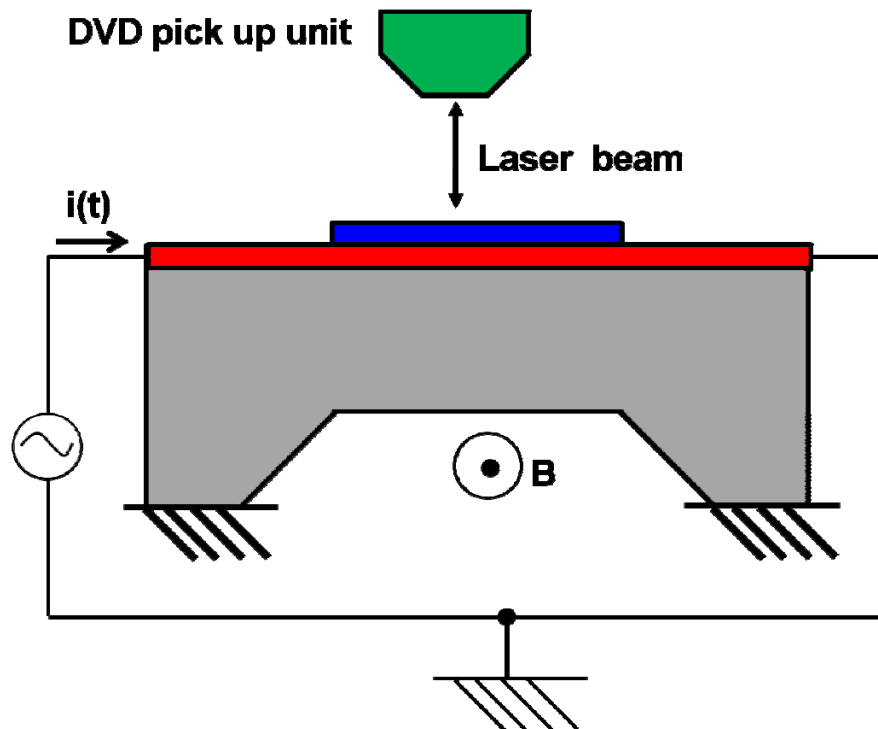


圖 1.13、簡支樑式黏度感測器示意圖。

## 1-5 文獻回顧

首先，在過往研究上基於製作黏度計以及流速計時，對於整合元件以及微型化之元件設計越來越蓬勃。故針對不需要額外驅動元件才能測量黏度，以及在同一元件上量測不同流體參數之優點，選用適當的流體力學行為或現象，適合在微流體中進行量測。所以，本研究原理上先參考 1968 年的 Sadatoshi 學者以及 2010 年 Huang 學者的研究[47, 48]，文獻中對於在空氣中拍動的旗幟進行 3-Dimension 模擬以及分析擺動情況，進一步去了解流體引致振動現象(FIV) 如何善用於本研

究之中。再者，一般在噴流流場之中，其生成之渦流為週期性，且足以誘發本研究安插轉能器光纖之動力來源。在 1993 年 Lin 研究團隊[49]的風洞實驗中，利用煙線法(smoke flow method)將氣流流場表現出來，首先先觀察當氣流經由一噴嘴(nozzle)衝擊到平板阻塊時，會因衝擊到流場中的阻塊而造成邊界層。另外在渦流產生上會有逆時鐘往內自旋，並且在近場情況下有非對稱的渦流結構，而當第二渦流會因感應到來自等勢核崩潰帶來的第一渦流撞擊到平板表面後的邊界層而產生。在此篇文獻上，以噴嘴出口端的特徵長度  $L_{zc}$ ，以及噴嘴寬度  $B$ ，做參數變化，以及討論 V 型平板噴流的周期性渦流振盪情況，並另外以夾角 90 度的 V 型平板做為阻塊，其實驗結果呈現為，當雷諾數偵測範圍為  $8.3 \times 10^2$  到  $2.5 \times 10^4$  時，會有上述所產生的週期性渦流振盪的情況，如圖 1.14 所示。而 1 至 5 圖分別為流場經過噴嘴撞擊致平板的時間分割圖，等勢核由從噴嘴流出後至撞擊到平板前速度遽減，主因是累積在平板前端之邊界層阻擋流場發展，且等勢核與相對較慢之流場摩擦導致渦流產生，且造成左右壓力不對稱之時，渦流便往一側生成，當此側流速較快壓力較小時，會使得此側邊界層黏滯摩擦相對較高，壓力逐漸變大，如圖 1.14 之 1 至 2 圖，故壓大迫使等勢核往另一側，並生成渦流，如圖 1.14 之 2 至 5 圖，便可以形成來回之甩動流場。而在微尺度裡，若非有其外力因素影響，如電滲透流、流場內加置阻塊等，其主要流場仍然為層流。在 2004 年 Shen 的研究團隊[50]，在實驗中也利用煙線法方式觀察近場自由噴流的行為，如圖 1.15 所示。在長約  $2000 \mu\text{m}$ ，噴嘴寬度為  $100 \mu\text{m}$  的自由噴流裡使用  $Re$  為 32 做為低速流場， $Re$  為 80 做為高速流場，分別用  $Z/B$  ( $Z$ ；噴嘴至平板的距離， $B$ ；噴嘴狹縫寬度)為 50，200，400 特徵尺寸進行渦流生成觀察。研究結果可知在高雷諾數時的渦流生成面積大而且二次感應渦流也明顯生成，反而在低雷諾數的情況下，必須在  $Z/B$  為 400 時才有明顯渦流生成，並且在遠場的情況時，渦流並不會明顯呈結構性的對稱。

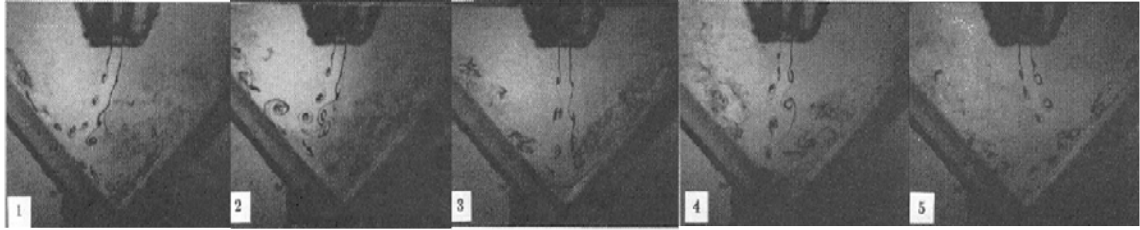


圖 1.14、流體衝擊 90 度角平板渦流發生震盪甩動情況。[49]

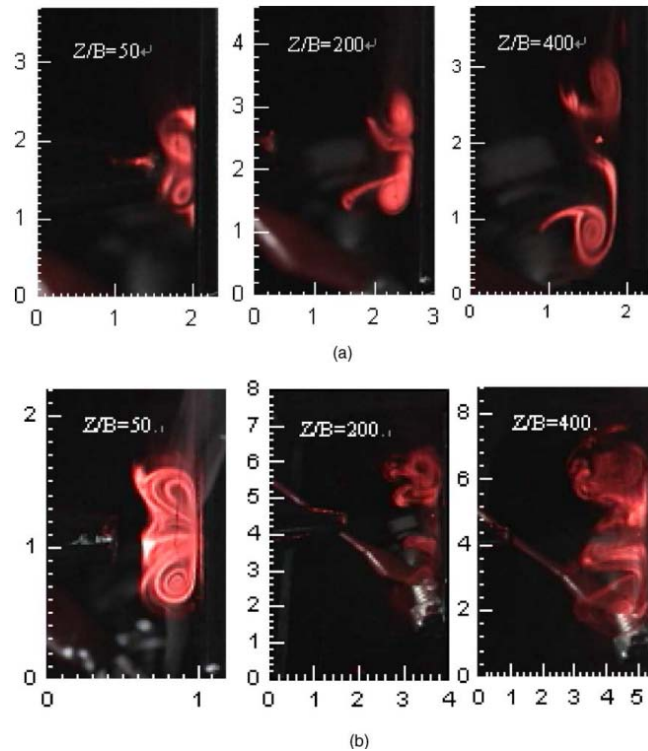


圖 1.15、微流場渦流生成觀察 (a)  $Re = 32$ ，(b)  $Re = 80$ 。[50]

再者，在本研究之中，考慮微流體管道之突擴管渦流之生成，參考 Chen 的研究[51]，發現渦流之生成與其設計之阻塊位置有特定關係，以及雷諾數與流場壓力之影響等因素，本研究亦以一突擴管結構擺置光纖，預計其能因流場中的行為誘發轉能器振動，便以傳遞訊號至外部光接收器。最後，考量到本研究重要的轉能器—光纖，實驗上為了製程方便且整合黏度計以及流速計之功能，原理上採用廣義的流場引致振動。流場引致振動現象可以分為軸向流(axial flow-induced vibration)以及橫向流。軸向流如圖 1.16，旗幟長度為 13 cm，於氣體軸向流場(axial flow)速度為 2.1 m/s 下，引致旗幟尾端振盪現象，且於旗幟兩邊各別產生節點，

節點處為旗幟振盪的邊界，且節點會因為旗幟尾端往振幅方向增加時，而相對於往反方向些微移動或者是不動。且不同於軸向流場引致振動的現象，橫向流場引致振動(cross flow-induced vibration)，雖然會因為流動流體與結構的接觸面積較軸向流大，而引致振動情況相對容易，但因一般結構以圓柱居多，其直徑為  $D$ ，長度為  $L$ ， $L \gg D$ 。當流場為軸向流時，其流體與結構物產生摩擦的距離為  $L$ ；反之，當流場為橫向流時，距離則為  $D$ 。所以當摩擦的距離變長時，有足夠時間讓流體與結構物的邊界層改變，並且容易產生誘發流體引致振動的渦流、紊流等因素[1]。

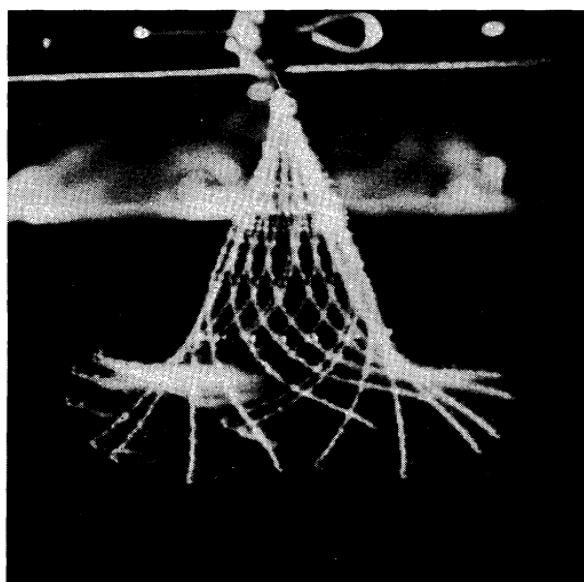


圖 1.16、飄動的旗幟。[48]

在黏度量測上，本研究從過去使用毛細管黏度計、迴轉式黏度計，皆必須透過更換轉子來達成不同黏度的量測，所以回顧文獻在製作黏度感測器時，通常會藉由簡支樑或是懸臂樑做為一個轉能器以取代轉子，且透過元件設計提升量測範圍以及量測靈敏度。另外一方面，因簡支樑會因為被兩邊箝制住而使得自由度變低[52]的關係且根據上述流體引致振動原理，故本研究選用懸臂樑式的黏度感測器，且搭配流體引致振動現象，將流體動態特性透過轉能器描述。在關於懸臂樑式黏度感測器之文獻中，除了對液體量測之外，也對氣體量測。在 1994 年，Chen



學者[53]以 SFM (Scanning force microscope)懸臂樑做為轉能器，材料為  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ，分為矩形懸臂樑以及 V 型懸臂樑，且後者的有效質量粗估為前者的一半，其前三個共振頻率與空氣中的共振頻率相差無異。在 1996 年，Oden 學者[38]以 AFM 懸臂樑做為一個轉能器，透過懸臂樑於含黏度液體中的頻率響應，辨析不同黏度的所代表的頻率，量測範圍為 1 至 104 cP。1998 年，Sader 學者[54]以 AFM 懸臂樑做為其轉能器，模擬以熱源做為驅動力，計算不同黏度下的共振頻率。在 2006 年，BasaK 學者[55]，也以  $\text{Si}_3\text{N}_4$  做懸臂樑，其量測範圍為  $1.86 \times 10^{-2}$  至  $8.59 \times 10^{-1}$  cP。在 2008 年，Ghatkesar 學者[56]，透過 PSD(Position sensitivity detector)量測反射於矽懸臂樑雷射訊號，且透過模態分析，以特徵模態頻率代表液體的黏度。所以在光學訊號上的處理會相對快速許多。

有鑑於 MEMS 技術將元件微型化後，整合兩種感測器於同一元件中，其附加價值以及功能性將會遠遠超越單一感測器的性能。故在 2007 年，Lien 與 Vollmer 學者[57]，利用光纖在經由適當蝕刻時間後，創造的懸臂樑結構與流體方向為 90 度角，如圖 1.17 所示，此文獻中將光纖懸臂樑做為一個轉能器，流體力學中的拖曳力將使光纖偏移，且在偵測端以多模光纖偵測其位移訊號，管道深度為 250  $\mu\text{m}$ ，管到材料為 PDMS (polydimethylsiloxane)，透過流速之不同其光強度訊號也有所差異，其量測範圍為 0 至 1500  $\mu\text{L}/\text{min}$  (約為 0.13 m/s)，並且此流體感測器同時具備量測流速以及黏度功能，黏度範圍為 1.000 至 4.868 cP。

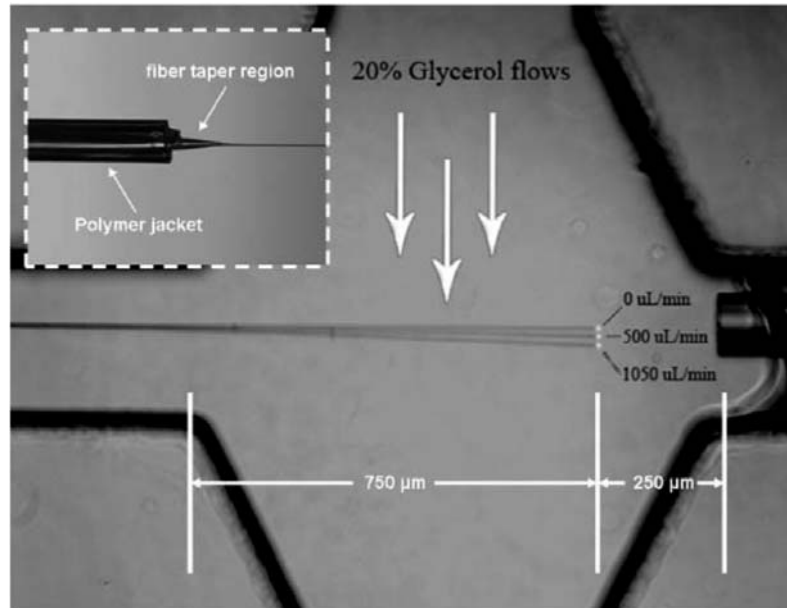


圖 1.17、光纖懸臂樑流體感測器。[57]

本研究中除了利用懸臂樑結構做為轉能器，且在材料上選用單模光學纖維，其楊氏係數(Young's modulus)為 63 GPa，及便 SU-8 的楊氏係數較低於光纖，但透過光纖良好的傳輸性質，且整合在上述所說的突擴管之中，利於誘發光纖振動，除了可以應用於流體速度之外，且兼具量測黏度的功能。

表 1.2、不同量測黏度範圍之比較表。

Measurement range	Tested fluid	Method and materials	Ref.
$1.8 \times 10^{-5}$ to $1.1 \times 10^{-3} \text{ Kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , (0.001 to 1.100 cP)	Air, water, ethanol	pizeoceramic actuator, SiO <sub>2</sub> -Au	[39]
$0.9 \times 10^{-5}$ to $2.5 \times 10^{-3} \text{ Kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , (0.0009 to 2.5 cP)	H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , air, acetone, water, CCl <sub>4</sub> , 1-butanol	thermal fluctuation, AFM	[41]
1.000 to 4.868 cP	Mixture of glycerol/water	Drag force, optical fiber	[57]

## 1-6 研究動機與目的

本研究以流體引致振動現象做為主要驅動力，且透過此一現象可以提供穩定且週期性振動。相對於前面文獻的驅動力，此一驅動力省去了作為一個黏度計或流速計時必須另外加上的電場、磁場、雷射、粒子等額外驅動力。此一驅動元件往往透過微小化後依舊造成感測器上的負擔，在另外一方面，由於是來自於流場注入之流速，除了減少製作時額外的驅動元件，且更及時反應於光纖轉能器上以及高流速、低黏度之量測。有鑑於此一作用力的發生，本研究利用不穩定性渦流帶動流道內光纖的振動，此外也因實驗的流體性質不同，而分別有不同的振動頻率。藉由微管道內嵌入式光纖，光纖做為一轉能器感測微流體流量、流速、黏滯係數並以光學訊號輸出，整合在微流體晶片上，並寄望於未來能結合運用在微機電系統上。

所以，參考過往文獻中，為了減少流體感測器之額外的驅動力，一般以直接接觸流體的方式量測流體性質，因為透過轉能器接觸流體，即可將訊號做直接傳遞。而在以流體接觸式的感測器中，以懸臂樑結構較常被使用，其優點較容易製作，且比簡支樑容易受到流體引致振動之影響。本研究以光纖(optical fiber)做為轉能器(transducer)，將其擺放至微流體管道內成光纖懸臂樑，以流體引致振動之方式做為量測流體流速之驅動力，且透過光纖對光傳輸之優越性，將流體流速以及黏度對於光纖懸臂樑的位移變化，傳達至光強度接受器，經光電效應轉換成電訊號後，再經頻譜分析(spectra analysis)處理，將流體之流速以及黏度以頻率來表達。

本研究目的利用創新方式整合流體引致振動原理於微流體管道內，並且透過此一方式引致光纖振動，且迅速的將流體的特性透過頻率解析、且更省量測時間，並且有效的將低黏度的流體行為以其特徵頻率作描述。

## **1-7 論文架構**

### **第一章 緒論**

首先，對於流體感測器分為兩部分做介紹，一是以流速感測器，另一部分以黏度感測器，並且說明各種不同的感測器對於原理上的應用，且其個別量測成果以及優缺點。接著介紹本研究所參考的參考文獻，透過了解文獻的實驗方法跟過程，也將其他研究團隊所沒有考慮到的實驗方法用在本實驗上。最後在研究動機與目標方面闡述自己研究方向如何一步一步邁向現在所研究的過程。

### **第二章 原理介紹**

對於目前研究使用到的原理，文獻上從流體引致振動種類分為渦流引致振動，以及紊流引致振動等，並進一步解釋在本研究上。

### **第三章 實驗架構與方法**

此章節細部地介紹本研究的光纖懸臂樑流速計與黏度計製作方法。首先從光纖轉能器的製作，再進一步以實驗晶片製作，另外對於本實驗架構、方法輔以更加詳細的說明。

### **第四章 結果與討論**

此章節介紹本實驗的研究成果，每一段文字以及圖片都敘述了本實驗如何運用此一原理所量測到的訊號，並且如何實現量測液體、氣體在不同流速下，其黏度的變化、以及靈敏度等。

### **第五章 未來展望**

此章節對於本實驗所做出的研究成果做統整，用簡單的敘述將本篇論文做個結論，並在最後補上本實驗期望將來能夠克服的缺點，進而能在往後做出更好的微流體流速計以及黏度計。

## 第二章 流體引致振動原理

### 2-1 不同流體行為引致結構物振動

在本研究中，主要利用的原理為流體引致振動(flow-induced vibration)。在過往研究上，因為核電廠內的反應器以及熱交換器(heat exchanger)[58, 59]都有流體通過圓形管件的設計；且在一般核電廠之設計之下，為了讓熱交換器能夠正常運作，其注入流體的速度都相當快速，所以經常會遭遇到流體引致振動問題，而了解此問題之產生以及解決其發生之原因儼然成為一個重要議題。

而流體引致振動的產生，為當圓柱體放置在均勻流場之中，圓柱體的尾端會連續地產生渦流剝離(vortex shedding)，此種逐次性的剝離會有週期性的合力作用於圓柱體上，圓柱體在此刻會產生固定頻率的震盪。而當渦流剝離頻率到達圓柱體的自然共振頻率時，共振就會發生，於是圓柱體會發生劇烈的振動現象。但是在突擴管流場之中，流場型態容易在突擴口後的兩側產生渦流，且此對渦流為兩側對稱，渦流產生的壓力差，於封閉管道內，便會讓其中的渦流相對小，另外，流場型態在中央圓柱體結構尾流亦有可能會產生渦流配對(vortex pairing)行為，渦流根據 Strouhal number 公式，其頻率可由此算出。

於 1990 年由 Blevins[1]對於此現象所產生的來源有不同分類之解釋；在分類上，可概略分為下列三種情況。(1)渦流引致的振動(vortex-induced vibration)，由於在結構物之尾流區形成的周期性渦旋分離(vortex shedding)，對結構物施予不對稱作用力，結構物便會隨之影響而振動，當振動的頻率與結構物之自然共振頻率相同時，振動幅度便會隨之加劇；(2)紊流引致的振動(turbulence-induced vibration)，由紊流對於結構物產生擾動，進而使結構表面的流場壓力分佈不均，此稱為紊流擾動(turbulent fluctuations)；(3)流體—彈性不穩定(fluid-elastic instability)，對結構物而言，受到流體對其的不平衡力影響之下產生變動，當此一變動量大於結構物本身的回復力時，便會對結構物有不穩定的擾動，且一般會延著一橢圓軌跡運動，

並且隨著流體給予的能量增高時，亦會導致其振幅隨之增大。[1]

## 2-2 渦流引致振動

一般渦流引致振動(vortex-induced vibration)，即當圓柱體因擺置於均勻流場之中，因流場方向對其表面產生摩擦，且於圓柱體表面產生停滯點(stagnation point)，當兩側之停滯點處的摩擦力(friction force)、升力(lift force)、拖曳力(drag force)之合力非相同時，會因雷諾數而改變其壓力分佈，壓力分佈不均，便在尾流處產生渦流，一旦第一個渦流在一側產生，由此渦流所引導渦列便開始一連串的誘發，稱為 von Karman street，如圖 2.1 所示。另外，因流場方向與圓柱體軸方向之夾角為 90 度時，流場在渦列之影響下，產生渦列的頻率若到達結構之共振頻率時，便會誘發結構物之振動，此時振動的型態不僅包含渦列產生的頻率，也包含結構物之頻率，便使得流場的穩定性大減，可能造成加強渦列產生之頻率，再者，也可能加強結構物的共振頻率。不過，一般常見的狀況，不僅是改變二者的頻率之相位，並且也會產生渦流之圖形也隨之改變，即稱橫向流引致振動。

在渦流引致振動之中，渦流之形成除了是個很重要議題之外，再者，渦流如何影響在結構上也是相同重要。除了上段所述由停滯點之摩擦，另外在突擴管管中，於雷諾數到達臨界值時，便容易在轉折處或者是轉角處，即壓力場相對較低處，邊界層與流場摩擦所產生渦流。而第一渦流產生處，其流場速度較慢，根據 Euler-Boussinesq Equation 可知，其壓力梯度會較另一側大，則流場會再傾向於另一側產生渦流，並且延續生成而成渦列[60]。而在工業上，為了避免這種情況的發生，通常會利用在圓柱體表上，施加改變光滑表面之結構，如螺旋刻紋表面等，或是往尾流處從圓柱體表面向外加薄板延伸，除了避免產生之渦列頻率接近結構體，也延遲機具工作時，發生渦列的情況。

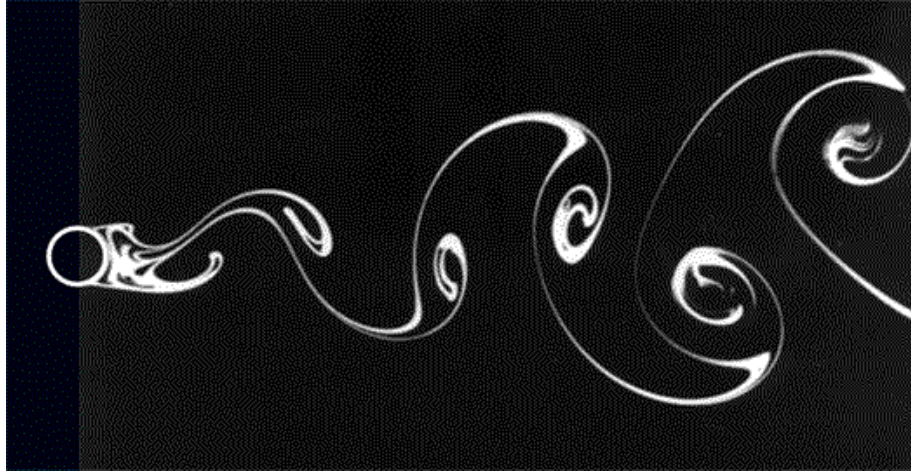


圖 2.1、馮卡門渦列(von Karman vortex street) 。[61]

另外一方面，若是流場方向與圓柱體軸方向之夾角為  $0^\circ$ ，即稱為軸向流。在軸向流引致振動上，除了可以參照上述的橫向流之外，在軸向流的部分上，，如圖 2.2 所示，於 2006 年 Buchholz 學者[62]，研究之中，利用一個剛性平板(平板寬度/平板長度= 0.54 至 2.00)，置於均勻流場之中， $St$  為 0.43，利用流場引致振動的原理，而因雷諾數為，以螢光觀測流場情況。另外，在 2008 年，Camassa 學者的研究團隊[63]，使用 hinged 住的圓柱體，直徑為 0.63 cm，同樣放置於均勻流場之中，跟 Buchholz 學者實驗不同處在於除了改變了雷諾數並且也考慮圓柱體減少之慣性，並且將結果分為四個部分做為探討：(1)在雷諾數為 200、400、600 以下其實驗的圓柱體仍呈現靜止不動，在此處稱為 steady state orientation，(2)流場介於(1)，(3)之間為 random oscillations，(3)在  $Re$  為 1000、1200、2500 時可以發現流場誘發了圓柱體之振動，並且有規律性使其左右搖擺，在此稱為 periodic oscillations，(4) 雷諾數為 4000 至 6000 時，流體流速所誘發的合力矩，不只作用於軸方向且於此時作用於圓柱體之徑向，且周圍流體壓力大於慣性力，讓圓柱體不再受慣性力之束縛，而不斷的接觸流體衝擊力之下，迫使其翻轉。

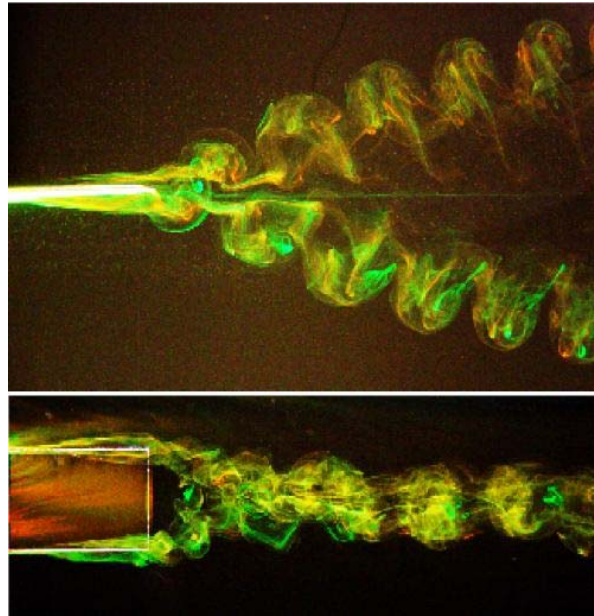


圖 2.2、軸向流引致平板振動。上圖為 X-Y 平面，下圖為 X-Z 平面。[62]

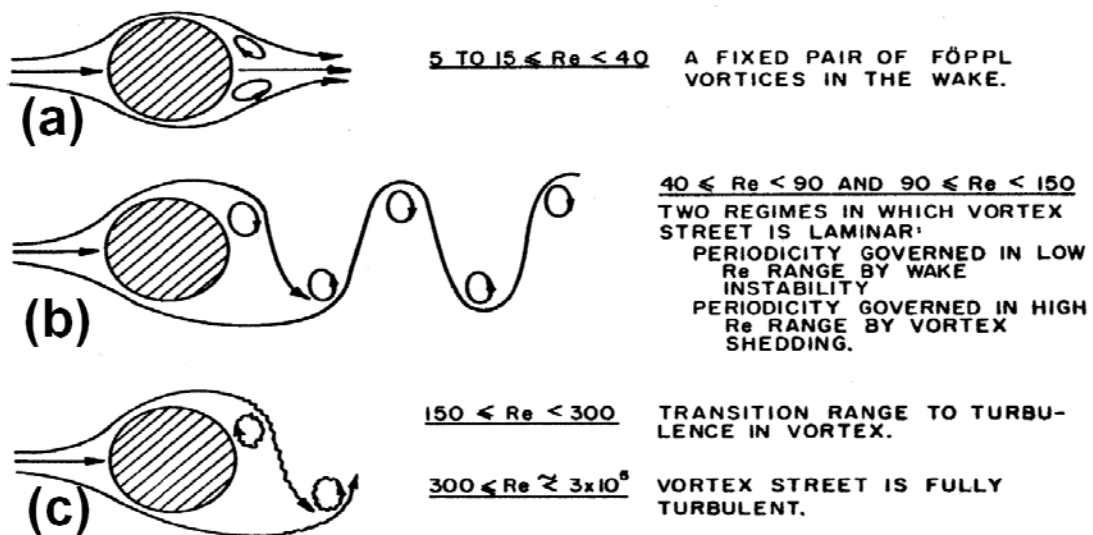


圖 2.3、圓柱體後尾流情況隨雷諾數改變[64]。

根據圖 2.3，由於本研究在測量樣品為 DI water 時，特徵長度為水力直徑  $d_h$ ，透過下列算式計算。

$$d_h = \frac{4d_a d_b}{2(d_a + d_b)} \quad (2.1)$$

其中  $d_a$  為蝕刻深度約  $140 \mu\text{m}$ ， $d_b$  為突擴後之管道寬度約為  $1730 \mu\text{m}$ ， $d_h$  約為  $2.50 \times 10^{-4} \text{m}$ ，當流速為  $0.17 \text{ m/s}$  至  $1.03 \text{ m/s}$  時，故於管道內之雷諾數約為  $43.29$



至 262.85; 而空氣之速度為 11.69 m/s 至 68.81 m/s, 其雷諾數約為 195.55 至 1151.10。且根據圖 2.3(c), 本實驗並無法完全使用 Strouhal number 之渦流剝離頻率解釋, 原因有三, 首先是產生光纖振動的動力源, 不只是因為尾流的渦流, 在突擴管兩側也有渦流產生, 再者是本實驗量測到的頻率訊號, 為光纖受到渦流壓力差的影響以及流體的衝擊力的位移, 而實驗中是透過光偵測器量測位移之光強訊號, 基於上述原因, 此一頻率訊號不單只是跟渦流剝離頻率一致, 也與光纖本身的彈性模數、轉動慣量有關, 故本研究之頻率已經不符合原始公式之原則。另外, 紊流之影響, 也在本研究考慮之範圍之內, 當流體超過臨界雷諾數時, 會將邊界層從層流改變至紊流, 且壓力擾動提供了光纖偏移的初始動量。另外, 以下分別以 DI water 以及空氣為例進行解釋。根據附錄 A 所示, 在 DI water 中, 雷諾數範圍為  $40 < Re < 150$  落在層流之中, 並且在圓柱體之後產生的週期性之渦列, 但是當  $Re$  在 150 至 262 時, 位於流場從層流轉換至紊流之轉換區, 仍舊會有渦流產生。最後, 以  $St$  數值計算之後, 得到 DI water 在雷諾數約為 43.68 至 252.83 時, 其  $St$  值為 0.11 至 0.49, 參考圖 2.4。

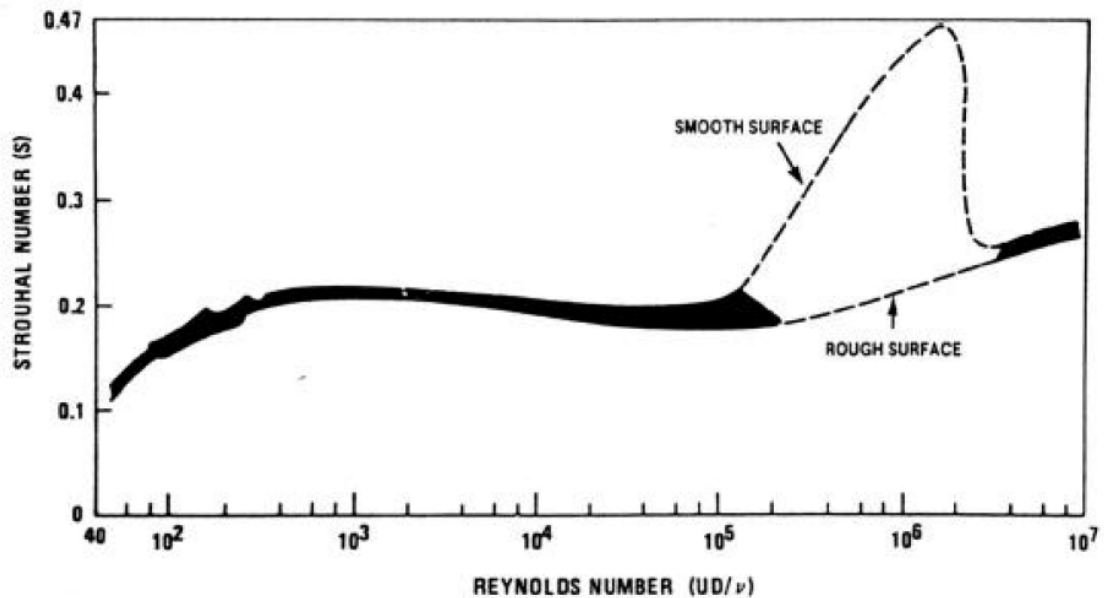


圖 2.4、圓柱體後之 Strouhal number 與 Reynolds number 之關係。[1]

比較結果可以發現，以本實驗之振動頻率，假定為渦流剝離頻率，並不完全符合，可見有其他因素影響。另一方面，在實驗流體於空氣時，其  $Re$  值亦落在上述之轉換區之中，即便會受到紊流之影響，但其程度對於流場之拖曳力(drag force)卻相對較小。

## 2-3 紊流引致振動流場

一般在巨觀流場時之均勻勢流(Potential flow)中，是假設流體為無黏滯力的理想流體，且僅由壓力與慣性力決定流體性質，即透過雷諾數判斷流體為層流、紊流等。但是真實流體卻有黏滯力，而流場由黏滯力影響下，形成一層沿著固體邊界的薄層，稱為邊界層(boundary layer)。而紊流之生成主因為雷諾數增加時，流場因慣性力影響大於黏滯力時，在流場有許多小的渦流，且流線不如層流情況下穩定，即稱之為紊流。在一些例子之中，由壓力梯度影響下的邊界層明顯地左右了整個流場[60]，像是飛機的機翼，其攻角改變，會造成黏滯力在表面形成阻力，阻力來自於翼後的流場速度較慢，其翼後的流場壓力較低，外部流場與邊界層內部流場相遇，且兩者不斷摩擦，故邊界層受到內部壓力往外移動，導致內部壓力擾動的範圍增大，更容易於尾流處使層流轉變為紊流，進而在邊界層以及尾流形成紊流結構，如圖 2.5 所示。

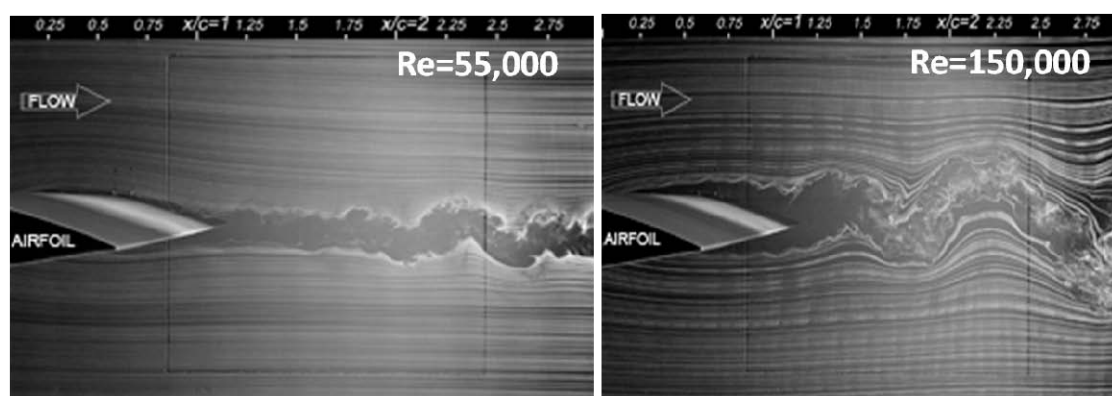


圖 2.5、機翼尾後生成紊流。[65]

在最早的研究，可以發現，於紊流形成之後，結構物之改變往往是由於兩側壓力不均所致[66]。一般在工業上軸向流引致振動的振幅是相當小的，約在  $10^{-3} < A/D < 10^{-2}$ ，其中 A 為平均振幅值，而 D 為圓柱體直徑；但是，在封閉流場之中，直徑約為工業尺寸之  $10^{-5}$  倍。故在對於，早在 1966 年，Paidoussis 的研究團隊[67]即針對軸向流場對於細長結構引致振動，有簡支樑以及懸臂樑之深入的探討。研究以 D/L 值為 0.048，其中 L 長度為 520 mm 之圓柱，D 為圓柱直徑。簡支樑形式如圖 2.6(a)，可以看到振幅相對懸臂樑式小，其行為與壓應力施於簡支樑兩端相同，稱為 buckling；另外對於瞬間較快的震動行為，則稱為 flutter。紊流發生於表面之薄邊界層以及尾流處，並且會因為上述紊流產生，迫使於封閉流場中，圓柱體兩側之壓力不同。尾流的壓力差異使得懸臂樑之自由端處造成振動，如圖 2.6(b)，而表面邊界層之壓力差異，造成更大振幅產生，且使圓柱體有不同的模態。

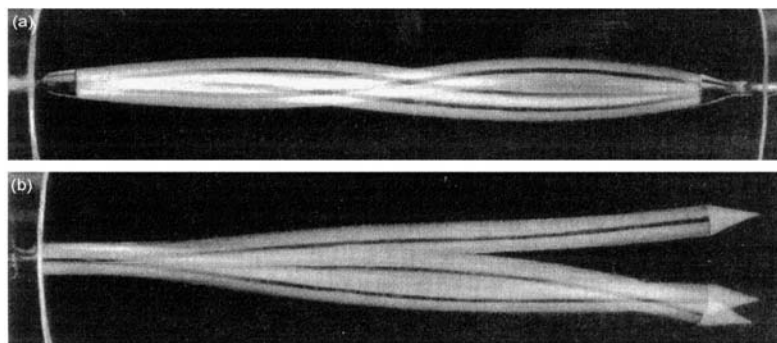


圖 2.6、懸臂之圓柱體於軸向流場中情況。[67]

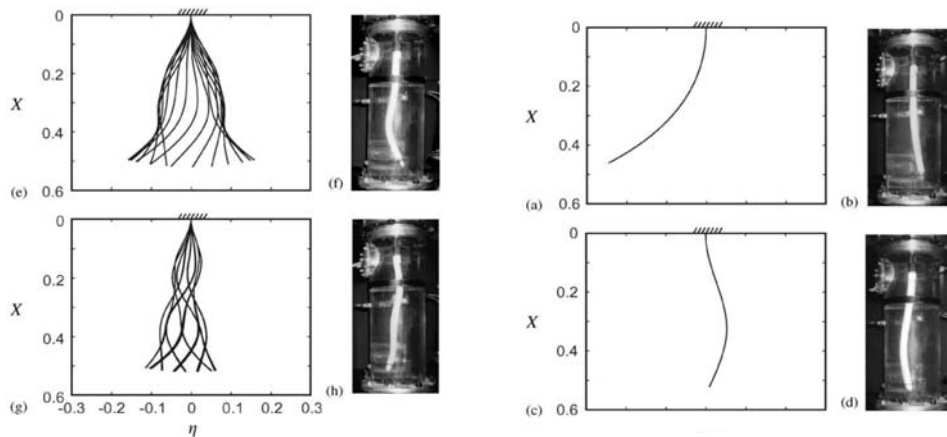


圖 2.7、懸臂之圓柱體於軸向流場中的位移改變。[67]

且在 2002 年 Semler 學者以及 Lopes 學者[68]以無因次之流速，對其位移隨著流速的變大，造成節點增多，但是振幅卻越小；反之，則流速越小，節點越小，但振幅卻變大，如圖 2.7 所示。從圖 2.7(a)為第一模態之 buckling，圖 2.7(b)為第二模態之 buckling，圖 2.7(c)為第二模態之 flutter，圖 2.5(d)為第三模態之 flutter。

在 2003 年，Pittard 學者於研究中[69]提出紊流結構生成之後，其誘發結構物振動主因，為結構物表面黏滯力所形成之非滑移表面，與其高雷諾數摩擦形成壓力擾動(pressure fluctuations)。並且根據文獻所示可分為三種情況，(1)壓差產生，卻不足以導致結構物變形，(2)壓差產生導致結構物變形，卻不足以改變流場，(3)壓差產生導致結構物變形，且足以改變流場。

而在本研究中，光纖於兩側的邊界層之轉變，且光纖位置相對於流場並非於正中心，故造成流場壓力不同。起先壓力擾動為小型不穩定結構，且只有位於表面，隨著流場慣性力之上升，壓力隨之增大，當大於光纖本身慣性時，流場會有足夠動量推動光纖，且光纖偏移時，又會在尾流處形成回壓，將邊界層往外推，而外部流速增大，根據伯努力原理，壓力將光纖往外推，使其更容易受到流體之拖曳力之影響，使光纖受到軸向拖曳力而改向至另一側，於另一側也遇到同樣情況，而當流速越大時，此情況會更頻繁。

## 第三章 晶片製作與實驗架設

### 3-1 轉能器製作

#### 3-1-1 光纖

光纖一般而言是利用內層的纖核(core)以及外層的纖覆(cladding)、緩衝層(buffer)所組成，如圖 3.1。而為了使光源光線能夠在此纖核內傳輸，所以纖覆部分之折射率比纖核要大，才能發生全反射，並且避免光線損失，使光線能夠穩定在光纖內傳輸。而在光纖折射率於直徑下有不同分佈時，有級射率光纖(step index fiber)、斜射率光纖(graded index fiber)兩種類別。級射率光纖為光纖與外殼之折射率呈突然的變化，而光線在光纖內部傳輸有不同模態問題，透過將纖核直徑縮小至數個微米讓單一束光線能在纖核中傳遞，並且會在纖核和纖覆的介面產生全反射，所以開發出單模光纖(single mode fiber)，使得光線經過光纖傳輸後到達定點的時間為一致[70]。

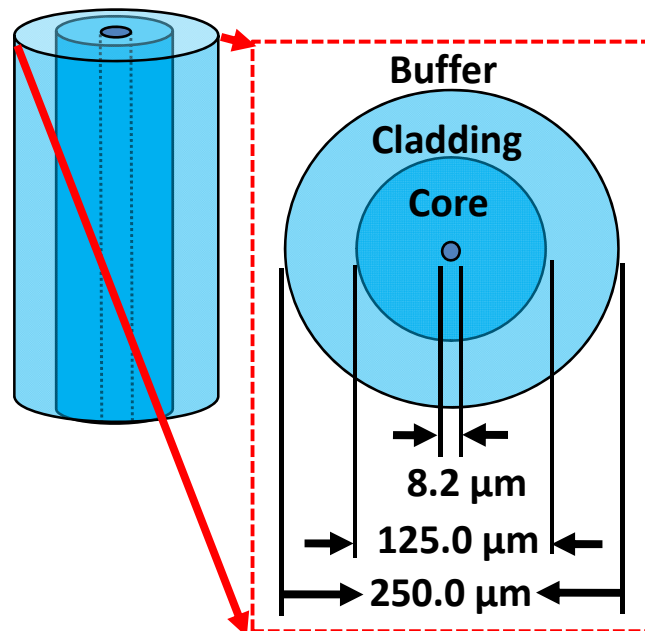


圖 3.1、光纖蝕刻時間與直徑關係圖。

### 3-1-2 光纖懸臂樑製作

本研究使用的光纖為(SMF28e+, Corning, USA)，單模光纖，直徑  $125\ \mu\text{m}$   $\pm 0.7\ \mu\text{m}$ ，其中纖核直徑為  $8.2\ \mu\text{m}$ 。將光纖以光纖纖覆剝除器(Fiber stripper)，剝除 Buffer 層後之長度約為  $2\ \text{mm}$ ，以 95%wt 酒精潤濕擦拭紙，擦拭剝除後之光纖。將上述光纖置於光纖裁切器之上，透過裁切使光纖斷面平整，圖 3.3 左圖為未蝕刻光纖的端面保持平整之 SEM 圖。

再者，將光纖浸潤至 BOE(buffer oxide etchant)緩衝溶液中，經由 BOE 對光纖纖覆層之化學蝕刻過程，可以將光纖直徑有效的縮小，並且可以透過時間以及溫度控制反應速率，且於本研究之中，於室溫下進行化學蝕刻。蝕刻至約 6 小時之後，將光纖於 DI water 下清洗數次，避免有 BOE 殘留，清洗之後再將光纖纖覆剝除長度約  $3\ \text{mm}$ ，將尚未蝕刻的光纖裸露出來，以此光纖做為架構於管道中之支撐物。然後，透過裁切以及酒精、DI water 潤洗後，再度進行蝕刻，此時，待前端已蝕刻之光纖直徑到達可以使用的直徑之後，便可取出使用。

蝕刻過程中，每次浸泡約為 20 根光纖，且將其平整黏貼於經過裁切之 PMMA 上，再將 PMMA 黏貼於裝有 BOE 溶液之鐵氟龍容器中。鐵氟龍容器主要材料為聚四氟乙烯，可抗酸抗鹼。BOE 於容器內體積約為  $50\ \text{ml}$ ，因為此蝕刻溶液體積相對於光纖體積小，故可以避免於長時間蝕刻反應後，而導致蝕刻溶液反應完畢，故尚不至於頻繁的更換蝕刻液。當光纖經由 8 小時化學蝕刻之後，結果如圖 3.3 右圖為蝕刻後之光纖 SEM 圖。

最後，在蝕刻過程結束之後，將光纖置於倒立式顯微鏡之上，並且先用一塑膠光罩，其透光處尺寸為  $50\ \mu\text{m}$  間隔寬，透過 CCD 於 20X 物鏡之下，對各個不同尺寸之光罩拍攝以及經不同時間蝕刻之光纖，記錄下其畫素(Pixel)。接著，將已知之光罩寬度以及兩者畫素，透過換算可知光纖直徑，藉此做為判斷不同時間蝕刻下之光纖直徑，且透過多次量測可以將誤差值降低。當蝕刻至 11.5 h 時，其誤差值約為  $0.7\ \mu\text{m}$ 。整個蝕刻過程於室溫環境  $25^{\circ}\text{C}$  下進行，蝕刻時間與光纖直

徑的關係如圖 3.2，R-square 值為 0.99。

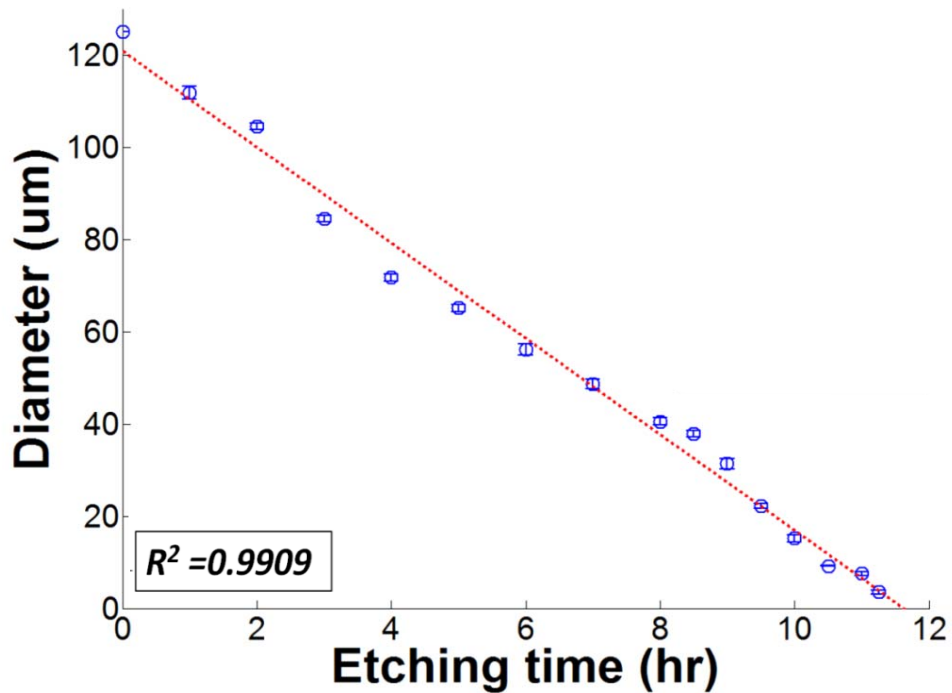


圖 3.2、光纖蝕刻時間與直徑關係圖。

本研究利用時間以及恆溫控制下將光纖蝕刻至直徑為 9  $\mu\text{m}$ ，並且透過藕光結果可知，其光源損失可為最小情況，並且其剛性以及強度皆足以進行實驗，而當光纖直徑小於 9  $\mu\text{m}$  時，會因直徑小於纖核導致光損失過大，進而當在光纖懸臂樑位於晶片之中，透過 APD 會量測不到光強度訊號，

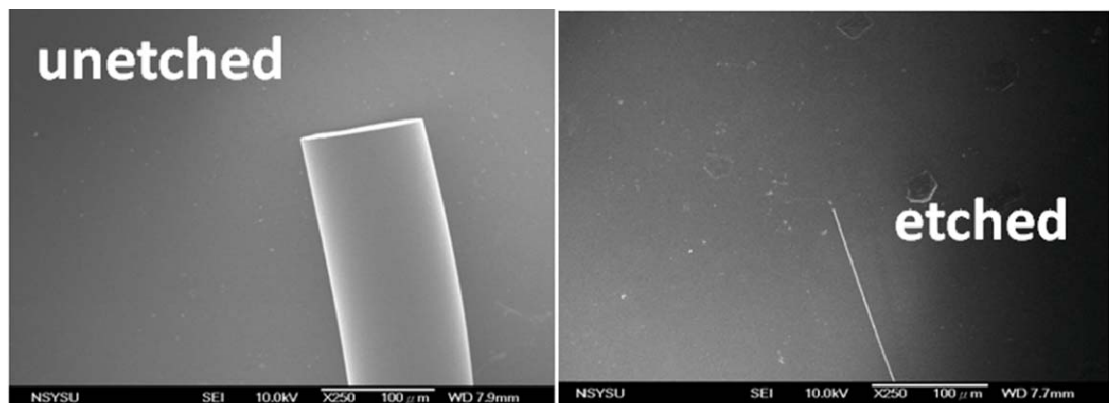


圖 3.3、光纖蝕刻 SEM 圖。

(左)未蝕刻(右)蝕刻約 11.5 h 之後，約得到直徑 3  $\mu\text{m}$ 。

## 3-2 晶片設計與製作

### 3-2-1 晶片之光罩設計

由於微影蝕刻須利用光罩來將所需製作之樣本轉印於晶片上，因此須先進行光罩之設計。一般而言，光罩分為透光區跟不透光區。當進行曝光的過程中，透光區下方的光阻會因為受到光線的刺激而改質，另一方面不透光區的部分會因為都是黑幕阻擋光源，而受到保護；若是選用正光阻做為蝕刻罩幕時，光阻會受到光照射的區域而改質變成容易受到顯影液的作用而易解離，使得受到光照射的部分圖形會被去除，即稱為顯影。

而本研究管道之設計則是以 AutoCAD 軟體來進行光罩繪製。光罩依材質可以分為塑膠光罩、石英玻璃光罩、玻璃光罩三個材質；塑膠光罩是利用高解析度的雷射印表設備將欲設計的圖案轉印在聚合物膠片上，一般適用的線寬為 20  $\mu\text{m}$  以上。在本研究中選用最低成本的塑膠光罩來定義實驗上需要的圖形在載玻璃上。如圖 3.4 所示，繪製完成後再將圖形輸出至製作塑膠光罩廠商，並將製作出來的塑膠光罩，吹氣清潔表面環境粒子，保持清潔後再進行玻璃晶片製程。

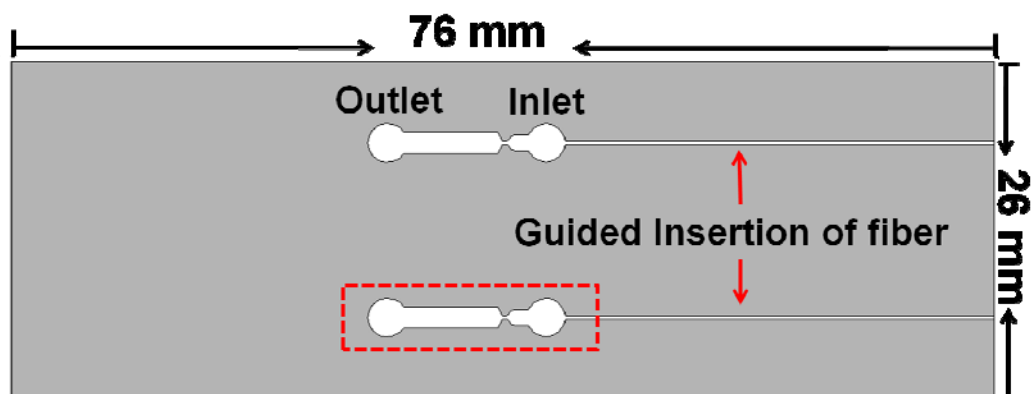


圖 3.4、光罩設計圖。(長 76 mm，寬 26 mm)

本研究設計的光罩，在單一載玻片上設計兩個突擴管道，突擴角度為 60° 角，並設計 25 mm 長的埋藏光纖插槽，設計一流體入口以及出口，以單面管道深度



為  $70\ \mu\text{m}$ ，實施兩面接合，總接合後封閉管道深度為  $140\ \mu\text{m}$ ，如圖 3.5。另一方面，單一突擴管以漸縮管道加強加壓入口速度，在管道緊縮處，寬度從為  $1270\ \mu\text{m}$  緊縮至  $270\ \mu\text{m}$ ，再通過  $60^\circ$  通角的突擴管之後，管道寬度為  $1600\ \mu\text{m}$ ，長度為  $7620\ \mu\text{m}$  之，有足夠的空間創造渦流。上下管道接合以入口處與光纖插槽交界為界，故下管道會較上管道長，此一方便光纖插入後固定。在寬  $270\ \mu\text{m}$  管道突擴管  $60^\circ$  管角之後做  $200\ \mu\text{m}$  為標記，以便在顯微鏡下插入光纖做位置對位，並且將光纖懸臂樑的自由端保持在距離  $60^\circ$  記角突擴管約  $1500\ \mu\text{m}$  處。

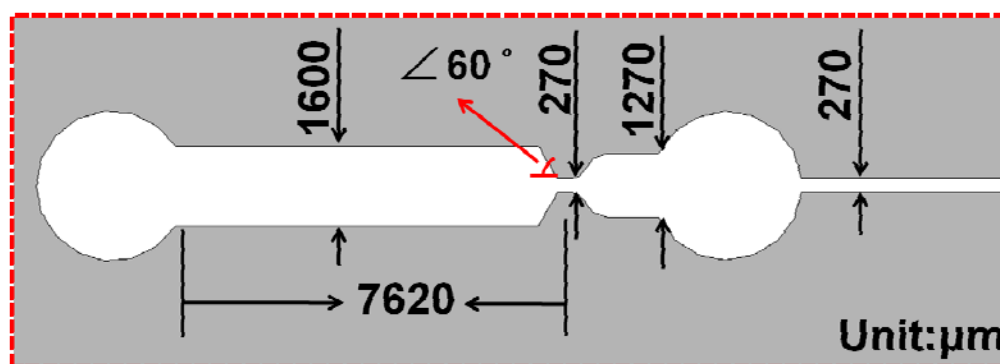


圖 3.5、管道設計圖。

### 3-2-2 晶片製作流程

本研究之晶片製作主要是利用微影濕式蝕刻法來進行，即是利用化學藥劑針對玻璃基材進行蝕刻之化學反應過程，而以下則針對其製作方法進行說明，主要參考，製程過程如圖 3.6 所示。

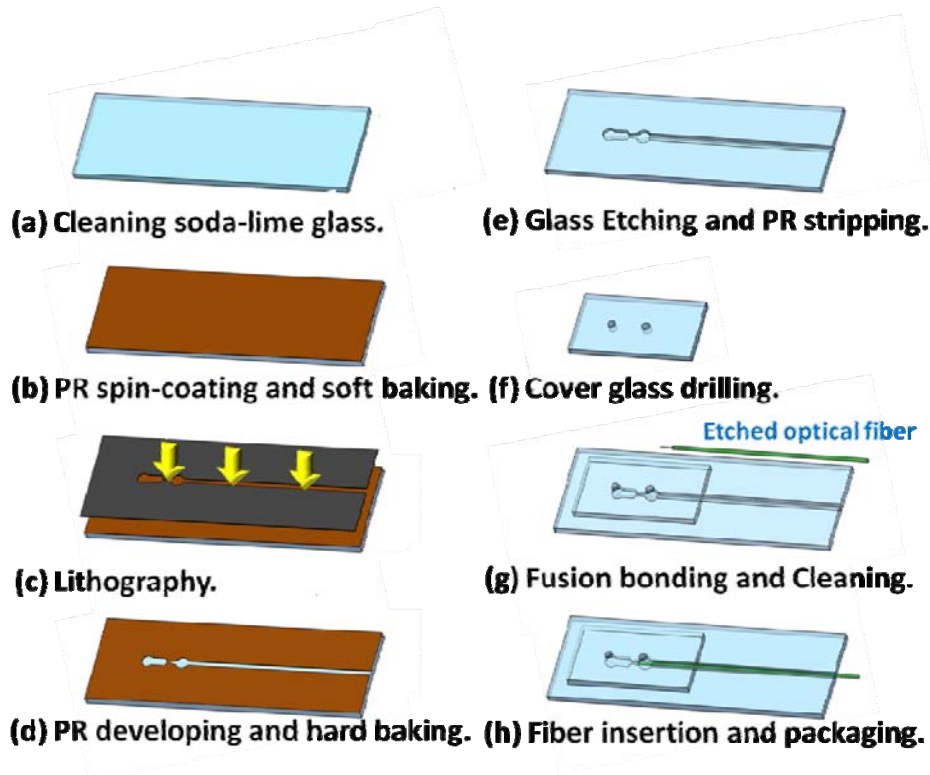


圖 3.6、晶片製作流程圖。(a) 清洗玻璃晶片，(b) 旋塗光阻並且軟烤，(c) 曝光定義圖形，(d) 顯影且硬烤，(e) 玻璃蝕刻後且去除光阻，(f) 上板玻璃裁切並鑽孔，(g) 上下板玻璃晶片熱接合，(h) 插入光纖懸臂樑完成晶片製作。

### 退火處理

本實驗之玻璃晶片製程，參考 2000 年 Lin 學者[71]。在進行玻璃製程之前，先將預製作的玻璃片進行退火處理，將玻璃放至於高溫爐之中，並上升溫度至  $430^{\circ}\text{C}$ ，持溫 4 個小時，在緩慢降溫至  $25^{\circ}\text{C}$ 。透過此處理，將玻璃內之晶格大小可以重新排列並且去除殘留應力，以達到增強其強度目的。

### 晶片清洗

本研究係以一玻璃載玻片為基材，其主要成分為具有 OH 基之鈉玻璃，其尺寸為  $26.0\text{ mm} \times 76.2\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。由於此種玻璃再加工時，表面易有殘留應力，因此在製作前經由上述之退火過程。退火完畢後玻璃上尚留有雜質粒子或油污等有機及無機污染物，故需以硫酸:雙氧水為 3:1 之酸溶液(Piranha solution)加以煮

沸至 200°C 後持續 10 分鐘，將玻璃浸潤清洗。然後，玻璃晶片於 Piranha solution 清洗後若仍有髒汙可以用肉眼看見，以 DI water 沖洗且以氣槍吹拂後，再將玻璃浸潤至 Piranha solution 洗淨，直到沒有任何雜質，便可以至加熱板上升溫 100°C 持溫約 3 min，目的將玻璃烤乾無任何液體之後，即可進行下一步驟。

### **鍍上黏著層**

將上述的晶片移至濺鍍機進行濺鍍，選用鉻(chromium)，主要仿效市面上一般玻璃母模的過程，以一層黏著層，加強玻璃與光阻的黏附能力。在本製作過程中，透過濺鍍機(sputter)鍍上黏著層。在基於後續蝕刻需要相對於之前的深度，故進行此步驟。

### **塗佈光阻**

玻璃基材清洗後，須上一層 HMDS (hexamethyldisilazane) 以增強光阻與基材之附著力，之後再塗佈。滴入適量 AZ4620 正光阻於玻璃表面上，再使用旋轉塗佈機(spin coater)以旋轉離心的方式將光阻均勻的塗佈在玻璃表面上，旋轉的參數為兩步驟，第一步驟 3000 rpm 旋轉 10 s，透過此一步驟將光阻先旋塗至表面，且不會因為轉速過快而導致光阻一開始損失過多，接著第二步驟 5000 rpm 30 s，透過第二步驟，將上一步因為黏滯力而停留在玻璃表面的光阻，加速使其均勻黏附，並透過旋轉參數可以知道光阻厚度約為 3 μm。

### **軟烤**

塗佈完成後之基材再置於加熱板(hot plate)上以 100°C 軟烤 3 分鐘，此一步驟是避免光阻裡面還有剩餘水氣跟其他溶劑，並且固化光阻，等冷卻至室溫後後必可以進行下一步驟

### **曝光**

將軟烤後已涼卻完畢的晶片置於曝光機晶片座上固定好，之後將光罩蓋於晶片上，再以一片乾淨的可透光玻璃覆蓋在光罩上方，這步驟是為了確保光罩與玻璃晶片是緊密結合的，稱為接觸式曝光。開啟曝光機暖機一段時間後即可進行曝光，本實驗室所採用的為波長 365 nm 紫外光(UV Light)，曝光時間為 28 s。過

程中被紫外光照到的地方經過顯影、蝕刻後即可去除掉，就可以在基材上產生本實驗所設計的結構。

### **顯影**

曝光完之後，需使用顯影液(AZ400K)才能將圖案顯現出來，本實驗所使用的顯影劑濃度大概是 AZ400K : DI water = 1: 3，過程中必須避免讓顯影液與含光阻結構的晶片浸泡太久，過度顯影會導致圖案失真。待圖案顯影出來之後，便可以透過清水沖洗至無顯影液殘留，而顯影液可以幫助曝光過程中未被光罩給遮擋處而被紫外光照到的地方進行光化學反應且溶解，如此光阻將可被去除，待完成之後圖案將可清晰顯現至晶片上。

### **硬烤**

顯影之後，將顯影後的玻璃晶片以氣槍吹乾，並將其放置在可程式化控制的加熱板上，從室溫緩慢升溫至 150°C 並且持溫 10 min，接著將將加熱板關閉電源，使玻璃晶片緩慢回到室溫。

### **蝕刻**

濕式蝕刻法須以化學溶劑進行反應，且其蝕刻為等向性蝕刻，而以氫氟酸(HF)之稀釋液 BOE 作為蝕刻液，之後將基材置於蝕刻液中並置於超音波震盪機震盪 5 分鐘，接著再置於鹽酸(HCl):去離子水(DI water)為 1:9 之溶液中約 10 秒，反覆此兩步驟數次直到蝕刻至所需深度為止，而 BOE 之蝕刻速率為 0.9  $\mu\text{m}/\text{min}$ 。本研究所需要的晶片深度約為 70  $\mu\text{m}$ ，目的在於之後插入光纖方便。

### **除去光阻**

將玻璃載玻片放進稀釋後的氫氧化鉀(KOH)中進行去光阻的步驟，數分鐘後就可將玻璃載玻片夾起，用 DI water 洗淨後，用氣槍吹乾。在使用氣槍時切記，吹的方向要一致，並且把水快速吹乾避免留下水痕，再將玻璃晶片放至加熱板上以 100°C 烤 3 至 5 min，將殘留的水氣烤乾即完成指叉電極晶片。

### **對位接合**

當晶片製作完成後，會再利用結構相同之玻片作為上板，且從光纖插槽與入口處為裁切線，上板長度短於下板，使光纖插槽於下板方便固定，並於上板以鑽

孔機鑽出晶片之出入口端。鑽孔後，兩個基板先以酒精以及丙酮清潔，最後以去離子水清潔並氣槍吹乾。最後將上下板於顯微鏡下疊合，並以 UV glue 預先固定位置避免錯位，置入高溫爐並以 4 塊氧化鋁( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )板放置於待接合晶片之上，施予壓力，進行熱接合時，溫度設定為每分鐘升溫  $5^\circ\text{C}$  至  $670^\circ\text{C}$ ， $670^\circ\text{C}$  即為玻璃轉換溫度，並持溫 20 min 後，降至室溫需時 3 小時以上。再取出接合好的晶片，且將熱接合處理後的晶片，至顯微鏡下檢驗，並透過注入液體確保管道的暢通。

### 光纖插入與封裝

將完成的晶片清潔後，置於顯微鏡下進行插入光纖步驟。首先，光纖插入前，必須先使用光纖斷點檢測器(VFL-250A, szfiber, China)，確定光纖的傳輸過程沒有重大損失。再者，先將酒精注入光纖插槽之中，透過酒精改變玻璃表面的親水性，且讓蝕刻後光纖不因表面張力與玻璃晶片接觸，另外也可以使光纖於酒精之中，減少靜電力的影響。蝕刻後之光纖固定於玻璃晶片之中便可以透過一般膠帶預先固定外部裸露之光纖，之後，以 UV glue 於光纖與玻璃晶片交接處滲入，透過毛細現象，將 UV glue 沿著光纖固定於晶片之流體之注入處，最後以 AB 膠對外部再行二次固定，並同時固定入口處的 tubing 管，待藉由注入 DI water 測試後，便製作完成晶片；而完成的晶片如圖 3.7。

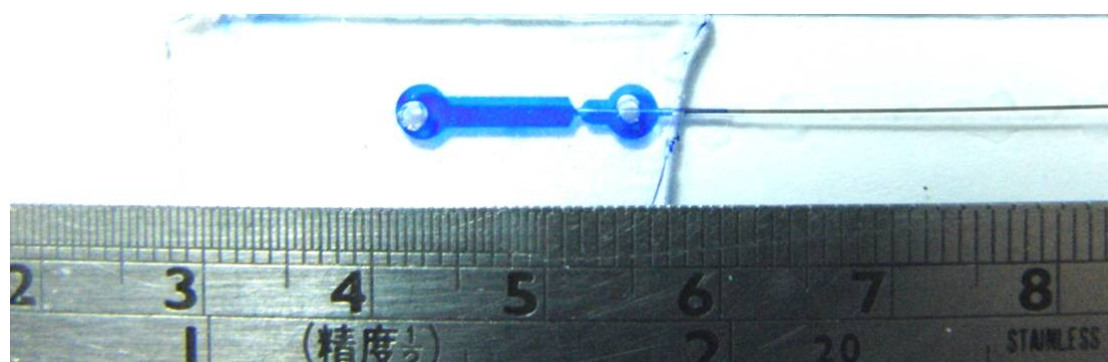


圖 3.7、晶片完成圖。

### 3-3 實驗架設

本研究之實驗架設，如圖 3.8，其系統主要由一光學倒立式顯微鏡(ECLIPSE TE2000-U, Nikon, Japan)，其具備 5 個 ports，實驗分為液體量測以及氣體量測。本研究之液體注入利用本實驗室自己架設的氣動式幫浦(home-made pneumatic pump)，目的在於避免傳統推動式幫浦會產生步進馬達的雜訊，利用氣動式幫浦可以推動本實驗所需要的高流速流場，其氣體壓力由空氣壓縮機提供，氣壓推動市售之往復式滑軌，提供推力至針筒，以達到用氣壓推動流體，其線性如圖 3.9，R-square 值為 0.99。

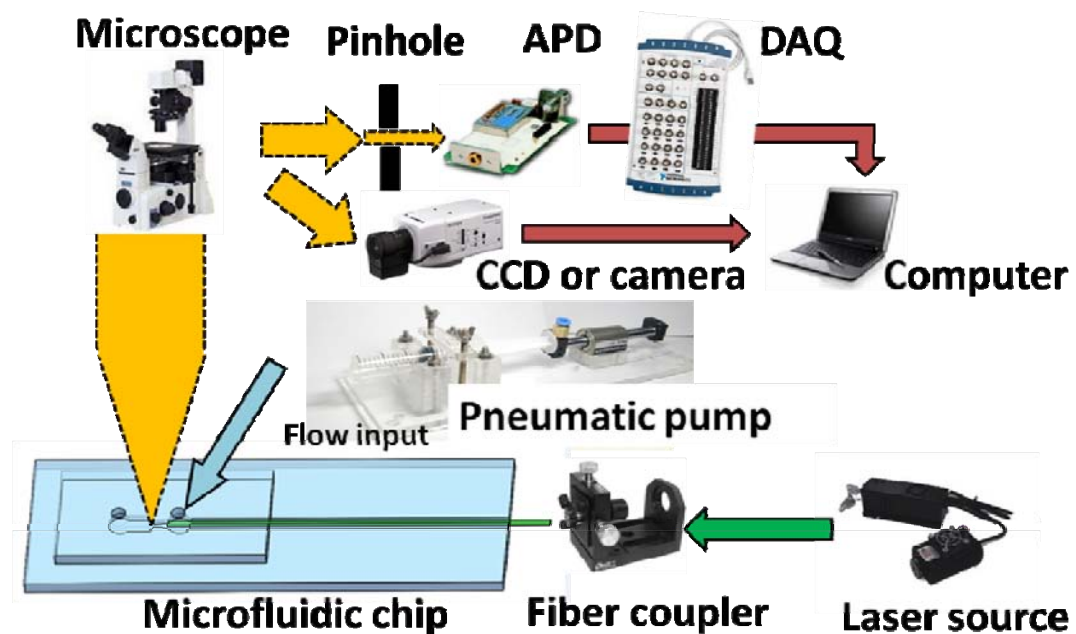


圖 3.8、實驗架設圖。

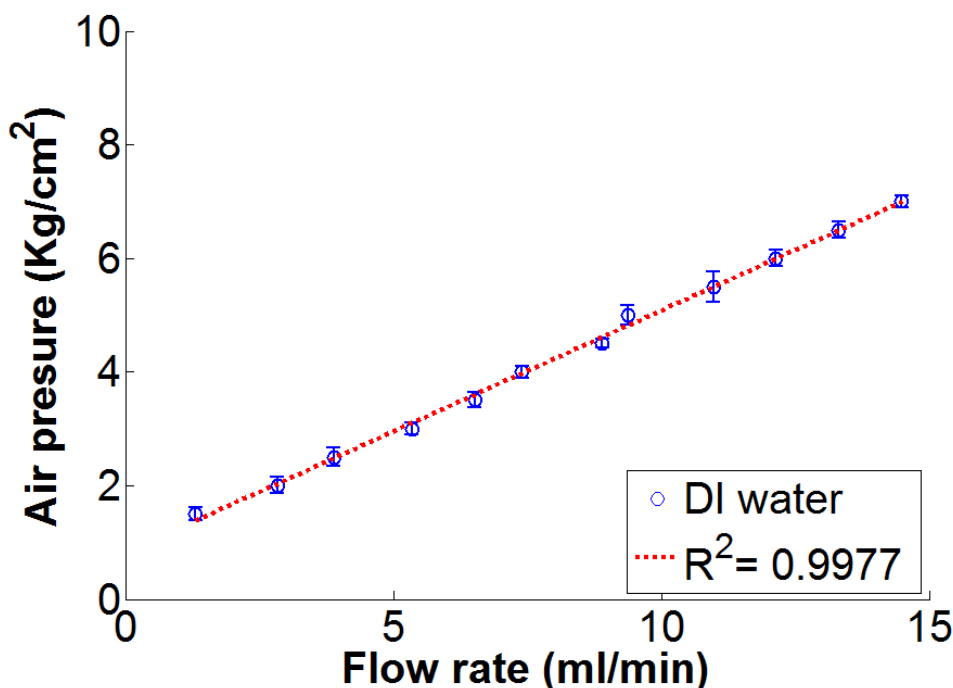


圖 3.9、氣動式幫浦之氣壓與流量關係圖。

本實驗藕光至光纖之光源，為波長 532 nm，功率 10 mW 的 green laser(10 mW, op mount Inc., Taiwan)，並以精密光纖耦合器(precision fiber coupler, EF01A, opto mechanics, Japan)，以及透過 10X 物鏡，藕合綠光雷射進入至光纖之中。在光纖藕光之前必須先確定光纖本身之傳輸性無誤，在此本研究之中，透過光纖熔接機(fusion splicer type-39, Sumitomo electric, Japan)將實驗用光纖以及光纖斷點檢測筆進行熔接。熔接前於置放在熔接機兩邊之光纖，如圖 3.10 (b)所示，透過內部微顯微鏡可以知道兩端光纖其傾斜角度，此一角度之產生來自於裁切過程，如圖 3.10 (a)所示。接著，透過熔接機內電極之放電加工過程，可以將兩光纖熔接成功，損耗小於 0.04 dB 即可使用，如圖 3.10 (c)所示。另外，研究利用 SMA 接頭之光纖跳接線可以透過剝除緩衝層後便可裸露出單模光纖，並且，透過光纖斷點檢測器之紅光雷射輸出，經熔接處至光纖懸臂樑自由端，一步步於傳輸過程之中檢查是否有損失。當損失超過超過 APD 不能偵測之光強度時，即訊雜比小於約 0.5 時，必須考慮重新蝕刻亦或者是熔接處之損失。



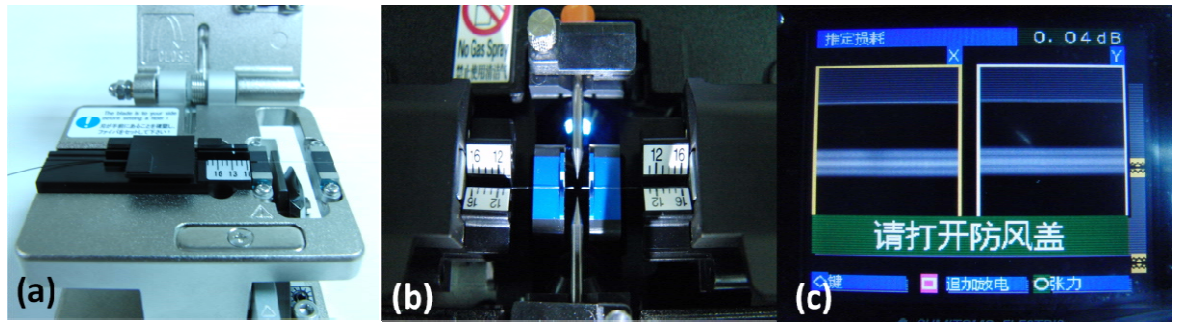


圖 3.10、光纖裁切過程與熔接。

### 3-4 實驗方法

本研究之實驗方法，在上述的準備充分之後，實驗上即可注入實驗流體，然後進行記錄數據以及影像。實驗利用倒立式顯微鏡進行實驗時，需同時使用兩個 ports，一個用於進行光學訊號的蒐集，Pinhole 將光源大小縮小至約 2mm 直徑，利用 APD (C5460-01, Hamamatsu, Japan) 光強度感測器，藉由光電效應將光訊號轉換成電訊號，並且透過雪崩效應將訊號放大，此一光學元件可以接收的波長範圍於可見光，反應較靈敏處為長波長波段。但是必須注意的是需要適當控制增益值(Gain)，才能避免同時將雜訊擴大，導致訊雜比(Signals to noise ratio)降低。另外，在 APD 後端以 BNC 線接上資料截取裝置(DAQ, PCI-6024E, National Instruments, USA)，且在電腦上以 Labview 程式收集，再以 Matlab 整合資料並繪圖。另一方面，用高速相機以及 CCD 做影像記錄，分析光纖振動的頻率的正確性。當流體流到達臨界流速時產生壓力擾動進而引致光纖振動，測試流體為 DI water 流速為 0.17 m/s，測試流體為空氣時流速為 11.69 m/s。在記錄振動時間時，本研究以平均約 20 秒的取樣時間，取樣頻率為 100 kHz。量測單一流速之流體時，平均以量測三次進行分析，再量測三次之後，且記錄影片之後，再調整下一個流速，直到量測流速之訊號無法解析為止。



### 3-5 訊號處理

實驗中，從 APD 收集到的光強度訊號，透過 Labview 程式處理，如附錄 B 所示，並且以設定之 100000 Hz 取樣頻率。在處理訊號時，常藉由離散傅立葉轉換(Discrete Fourier Transform, DFT)來取得訊號所對應的頻譜；再由頻譜來讀取訊號的參數。但由於離散傅立葉所做的計算量過於龐大，當處理大量的資料時，需要快速計算的演算法，MATLAB 處理程式碼如附錄 C 所示，即為快速傅立葉轉換(FFT)。而透過快速的 FFT 便可以提高頻譜的計算速度，但是在限制上，訊號必須是週期性的，且取樣週期必須為訊號週期的整數倍，最後取樣速率(Sampling rate)必須高於訊號最高頻率的 2 倍以上，那是因為奈奎斯特頻率(Nyquist frequency)；奈奎斯特頻率必須大於訊號包含的最高頻，如果訊號中包含的最高頻率恰好為奈奎斯特頻率，那麼在這個頻率分量上的採樣會因為相位模糊而有無窮多種該頻率的正弦波對應於離散採樣，因此不足以重建為原來的連續時間訊號。在實驗中，以 100 kHz 為取樣頻率，而最高訊號頻率約為 14 kHz，故足以解析本實驗之頻率。

## 第四章 結果與討論

### 4-1 實驗晶片

實驗晶片封裝完畢之後，其管道內的情況如，圖 4.1 所示。可以知道光纖懸臂樑之長度亦約為  $1500\ \mu\text{m}$ ，插入之圖為耦光至光纖懸臂樑自由端時的情況，可以看到光纖前端成功耦光，但是在其他部分上仍有些許損失，由於損失於可以控制範圍內，便可以進行實驗，本管道架構藉由 CCD 拍攝。

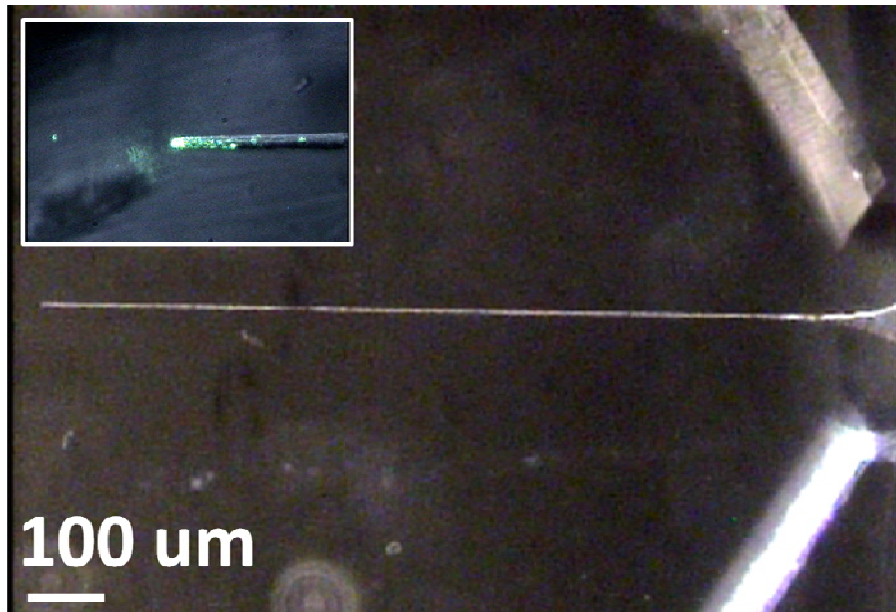


圖 4.1、光纖懸臂樑於晶片之中。

### 4-2 流體引致光纖懸臂樑振動過程

本研究之實驗利用流體引致振動為主要原理。在實驗過程中，本研究中主要選用經由約 10.5 小時之蝕刻，而得到直徑約  $9\ \mu\text{m}$  光纖，將其與晶片封裝完成。利用波長  $532\ \text{nm}$  之雷射耦光至已經蝕刻之光纖之中，如圖 4.2 所示，(a)為尚未注入 DI water 之前的情況，流速為  $0\ \text{m/s}$ ，在光纖懸臂樑自由端處(free-end)，為透過 Pinhole 之後的光偵測區。流場方向為軸向流，圖(b)為光纖受到流速為  $0.6\ \text{m/s}$  的情況，圖為透過 CCD 取像拍攝，

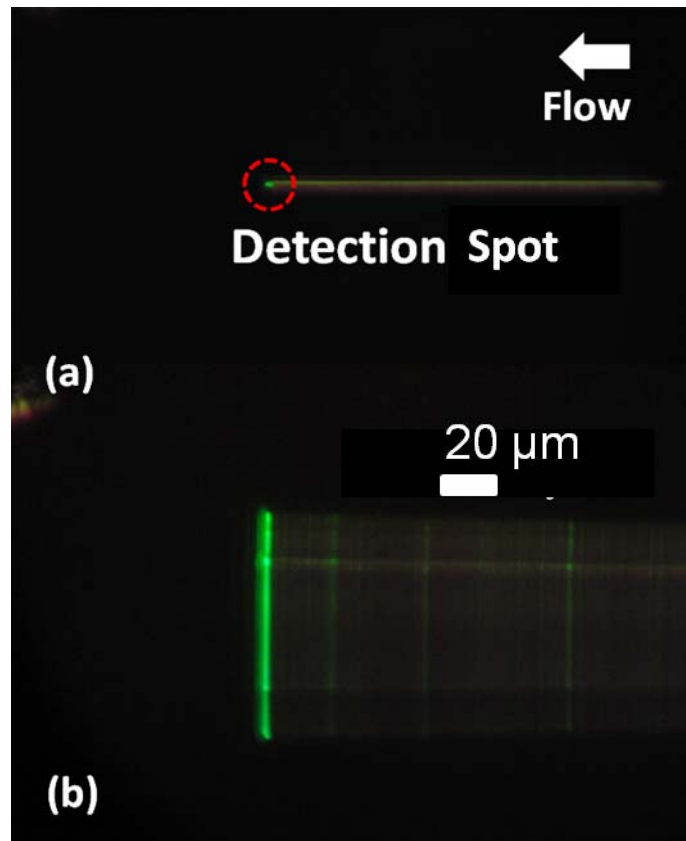


圖 4.2、流體引致光纖振動過程。

### 4-3 振動訊號分析於時域以及頻域

根據流體引致振動導致光纖產生振動現象，為了讓此現象背後代表流體特性的特性，透過訊號處理之中的頻率響應進一步解析。

本研究將光纖之位移訊號，透過 APD 光強度接受器，轉換成電訊號之後，可以發現在偵測點上之光纖振動情況，會因為光纖懸臂樑振動時位不位於偵測點上，所以會有明暗的光強度訊號。而位移訊號透過 APD 感測其變化後，在時域 (Time domain) 中的訊號，透過 FFT 之處理，故時域訊號轉換成頻域 (Frequency domain) 訊號。

### 光纖自然共振頻率

在研究之前，先以 ANSYS 軟體模擬方式計算光纖自然共振頻率，以 beam3 元素，且直徑為  $9\ \mu\text{m}$ ，輸入參數分別為 area moment of inertia 為  $\pi \times D^4/64$ ，D 為直徑，Young's modulus 為 63 GPa，Poisson ratio 為 0.17。結果顯示，其第一自然共振頻為 125.17 Hz，第二為自然共振頻為 783.04 Hz。故本研究在量測時，必然會遭遇第一自然共振頻的影響，故量測之振動頻率便無法做為有效的流速依據，即當測試樣本為 DI water 時，流速約在 0.45 m/s，其振動頻率已經與光纖自然共振頻率相同，但是第二模態之頻率卻不會對振動頻率有影響，故可以改以第二模態對此時的流速進行補償，ANSYS 其結果如圖 4.3 所示。

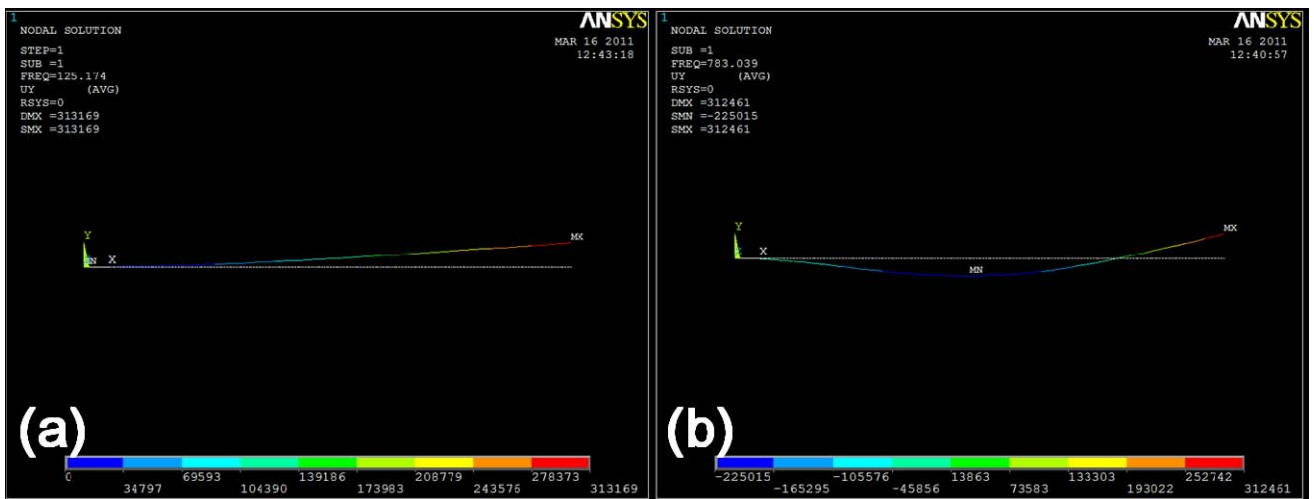


圖 4.3、光纖第一與第二之自然共振頻率。

### 時域下的訊號

測試流體為 DI water 之時域下的訊號，實驗溫度為室溫。當測試 DI water 流速為 0.40 m/s 時，光纖振動的訊號，如圖 4.4 所示，可以看到在 0.1 秒內，APD 所量測到的光強度訊號，約有 8 個峰值，且光強度的位置為一致性較高，可以表

示此流速下，光纖振動時之行為經過偵測區的位置以及強度保持一定水平。

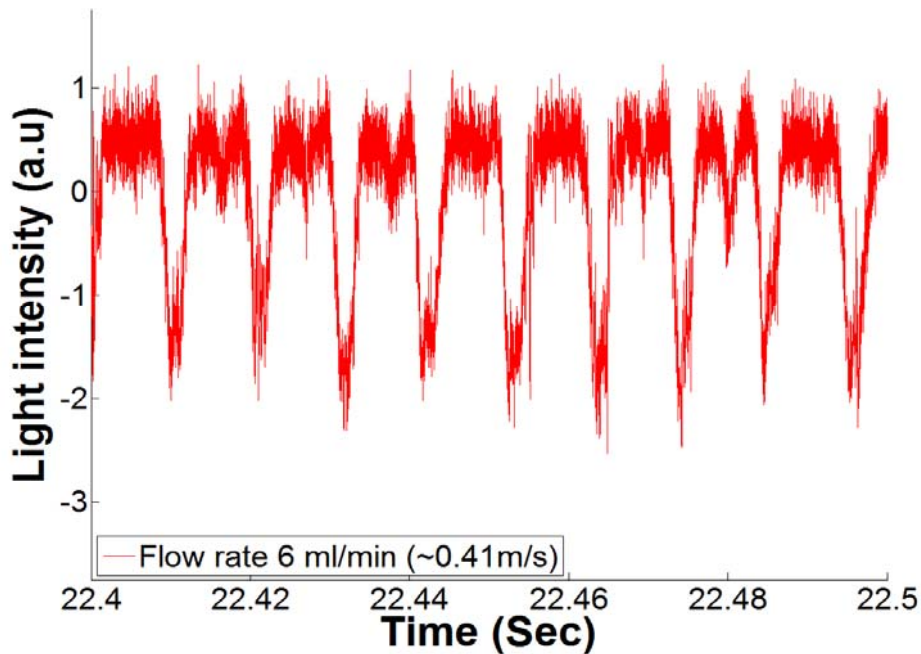


圖 4.4、DI water 於時域下的訊號。

測試流體為空氣時之時域下的訊號，實驗溫度為室溫。當測試常壓乾燥空氣時，當流速為 68.8 m/s 時，其光纖振動的訊號，如圖 4.5 所示，可以看到在 0.01 秒內，APD 所量測到的光強度訊號，約有 130 個峰值，且光強度的位置為一致性相對於 DI water 時低，那是因為在高雷諾數之空氣流場之中，流場壓力梯度給予的擾動相對較大，原因有二，一是其黏滯力約為 DI water 的百分之一倍，且密度約為 DI water 之千分之一倍，黏滯力以及慣性力都小於 DI water，當流體引致振動發生時，氣體之邊界層因黏度關係所以相當狹小，本研究推斷渦流反而不利於在此生成，相對的紊流結構容易在光纖尾流生成，且其形成之回壓，將促使光纖產生偏移，且受到流體衝擊之下，造成在光纖之自由端處有不斷的來回振動。

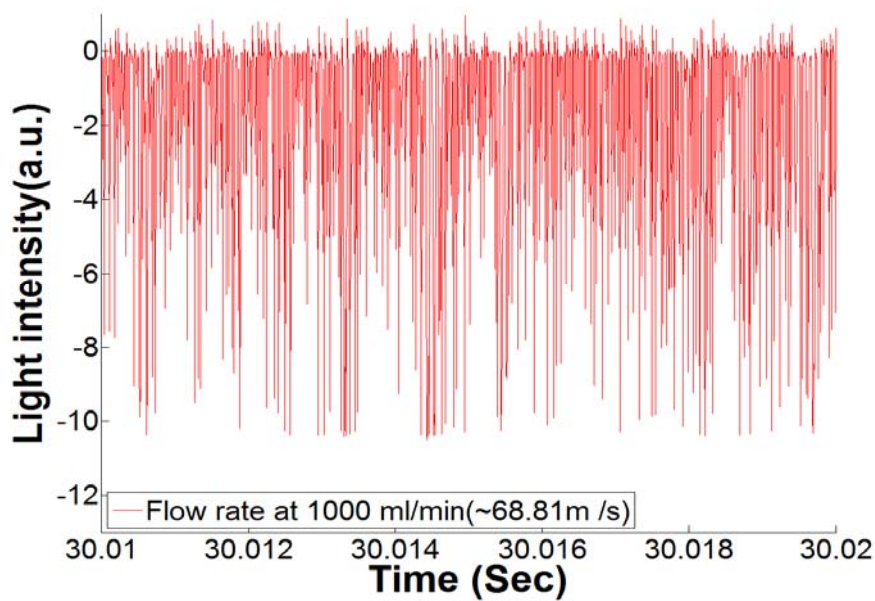


圖 4.5、Air 於時域下的訊號。

### 頻域下的訊號

在測試液體為 DI water 時，流速為 0.41 m/s，而在透過上述所量測到的訊號並且藉由 FFT 轉換後，在頻域下的訊號如圖 4.6 所示，分別有第一階頻率 92.7 kHz，第二階頻率 186.9 kHz，第三階頻率為 281.1 kHz，且縱軸為出現次數的累計值，可以看到在 20 的取樣時間內，光纖以頻率為 92.7 Hz 的次數為最多，約多 10000 多次，其次為 186.9 Hz 約為 5000 多次，最後為 281.1 Hz 約為 500 次

此一量測到的頻率有三個階層，而在頻譜上，是由於光纖在振動時於模態上有個別之差異性，故其頻率也有其差異性存在。根據懸臂樑共振模態分析(Modal analysis)上[72]，在自然共振頻率以前三個模態頻率，在一般的共振頻率其第一跟第二個頻率振型上之差異，是由於圓柱體的共振頻率沒特別的撓曲上的限制，故為不同方向的振型但為同一共振頻率

而在測試流體為氣體時，流速在 68.81 m/s 時，時間域的光強度訊號值透過 FFT 轉換之後，如圖 4.7 所示，光纖振動頻率以 13.2 kHz 為最多，且其積分後之 counts 為 750 次最多，其次是 26.5 kHz，其次數為 26.5kHz，其出現次數為約 300



次，最後為 39.9 kHz，其出現次數為約 200 次。

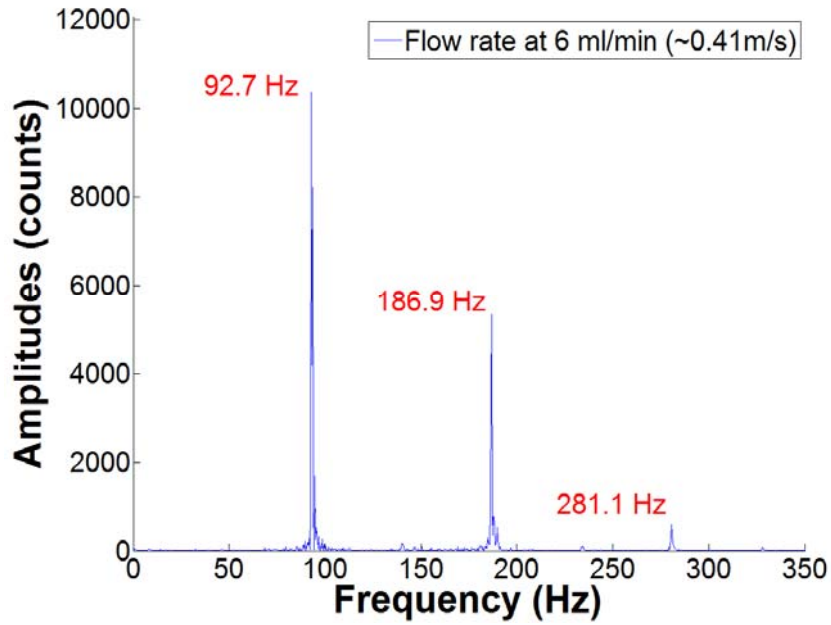


圖 4.6、DI water 於頻域下的訊號。

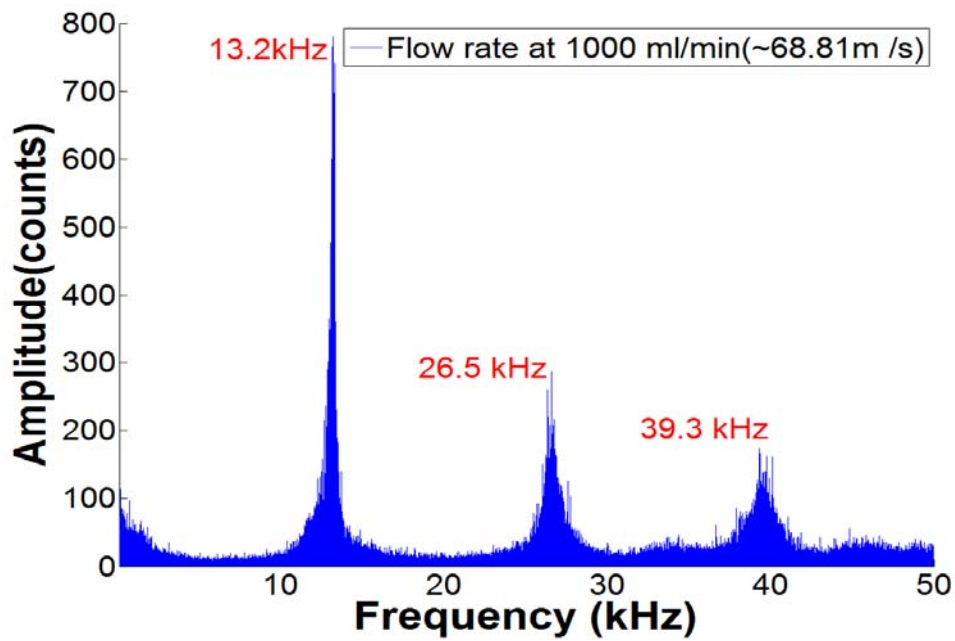


圖 4.7、Air 於頻域下的訊號。

#### 4-4 DI water 流速與振動頻率之關係

在液體量測上利用本實驗是自製的氣動式幫浦推動待測液體。在研究本實驗

製作之流速計時，先利用簡單的液體，進行實驗。流速從 0 m/s 至光纖懸臂樑開始振動時之流速經過換算為 0.17 m/s，其間光纖振動頻率隨著流速增大而跟著增大，當給予光纖懸臂樑之流速增大時，到達其臨界流速時，邊界層之改變會使之開始振動，而其樑兩側本身之流場壓力隨流速增大，且影響光纖振動之範圍變小，直到光纖懸臂樑本身之振動情況改變成非二維振動，故其於流速偵測之範圍為至 1.03 m/s，經由曲線擬合(curve fitting)，R-square 值為 0.9576，如圖 4.8 所示，以第一階的光纖振動頻率繪圖，每個流速皆記錄約 20 秒之取樣時間，取樣頻率為 100000 Hz，每個點記錄次數約為 5 次，結果顯示，光纖懸臂樑之振動頻率從 0.9 Hz 至 326 Hz，且可以知道當測試樣品為 DI water 時，其感測流速之靈敏度約為 3.667 mm/(s·Hz)，即約為 40  $\mu$ L/(min·Hz)。

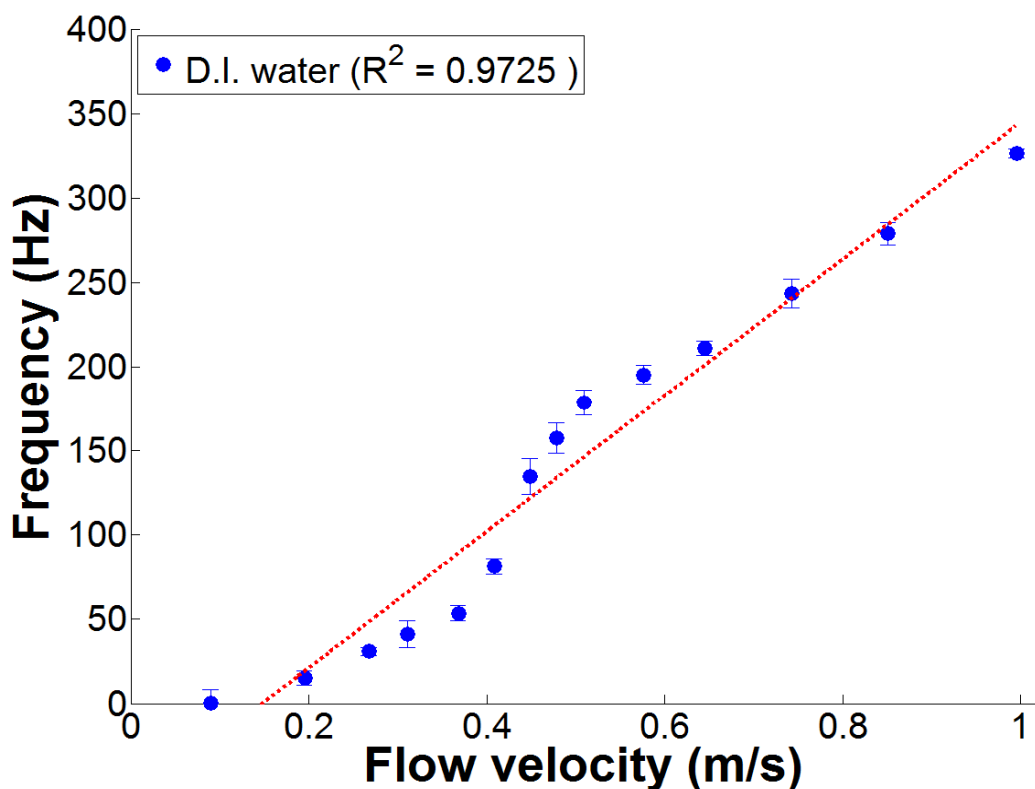


圖 4.8、DI water 於不同流速下與光纖振動頻率的關係。

在本研究中，對測試液體為 DI water 時，若為以光纖振動頻率為渦流剝離的頻率，且以特徵長度為光纖至固定端至自由端之距離約為 1500  $\mu$ m，水力直徑為



$2.59 \times 10^{-4}$  m，密度為  $1000 \text{ kg/m}^3$ ，黏滯係數為  $1.02 \times 10^{-3} \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，並且透過 Reynolds number 以及 Strouhal number 此二者之無因次公式計算後，結果如圖 4.9 所示；雷諾數的範圍為 43.68 至 252.83 之間，且根據文獻所提到的 Re 與 St 的關係中，一般皆落在 0.15 至 0.25 之間，但是本研究同樣於液體之中進行計算的結果約落在 0.11 至 0.49 之間，且在雷諾數於 146.42 之後，St 值約落在 0.49 之間，趨近穩定。主因在於流體誘發了本研究之光纖懸臂樑之振動之後，便使得振動頻率隨著流速成正比趨勢，故其透過 St 計算之結果，會盡可能落在相距不遠的範圍之間。而在低雷諾數的情況底下，光纖之振動頻率不全然是因為流體，本身固體的於低頻振動阻尼會大於流體給予其的能力，故其振動頻率較低，且其 St 也較低。

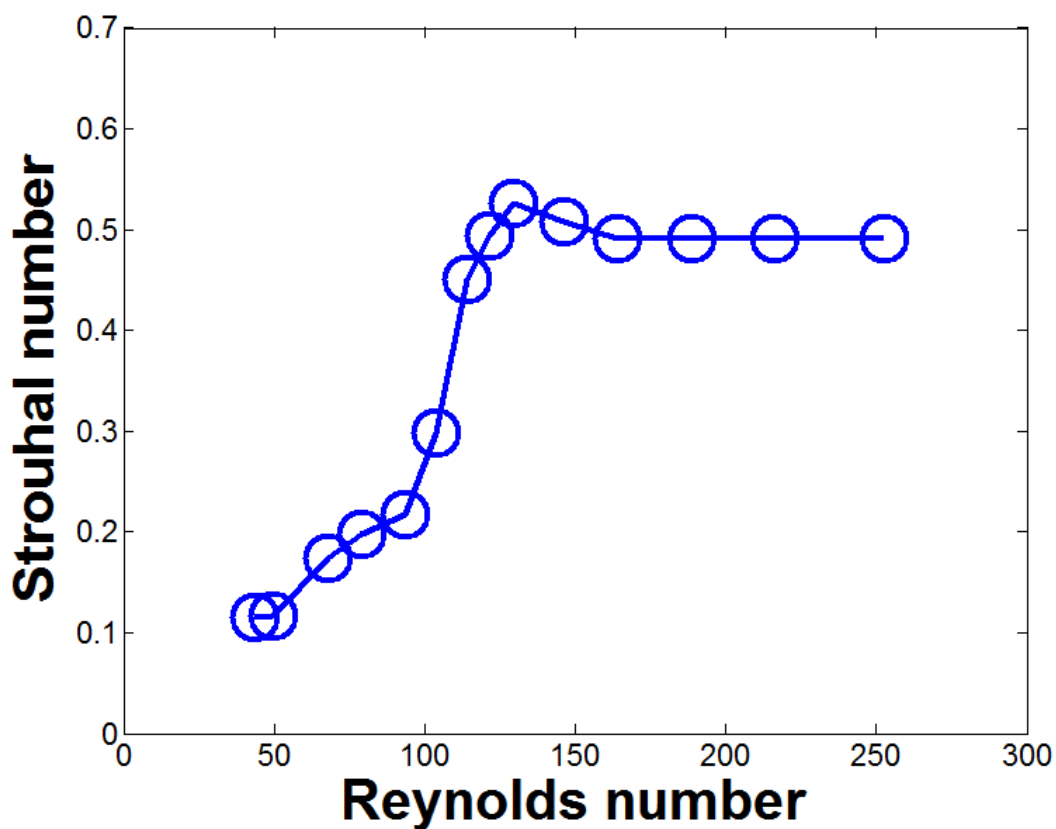


圖 4.9、DI water 於 Reynolds number 與 Strouhal number 的關係。

#### 4-5 空氣流速與振動頻率的關係

在本研究之中，也一併量測乾燥空氣且於常溫下進行實驗。在空氣流速與頻

率的關係中，研究結果顯示，當氣體在高雷諾數時，氣體分子與光纖懸臂樑產生摩擦，而在流場中，光纖兩側之壓力間之消長，導致光纖的偏移，如圖 4.10 所示，平均每點的取樣約 5 次，每個氣速之取樣時間為 20 秒，取樣頻率為 100000 Hz，結果顯示，光纖之振動頻率為 3870 Hz 至 13200 Hz，R-square 值為 0.9725，以此便可以知道當測試流體為空氣時，其光纖懸臂樑感測空氣流速靈敏度約為 6.190 mm/(s·Hz)。

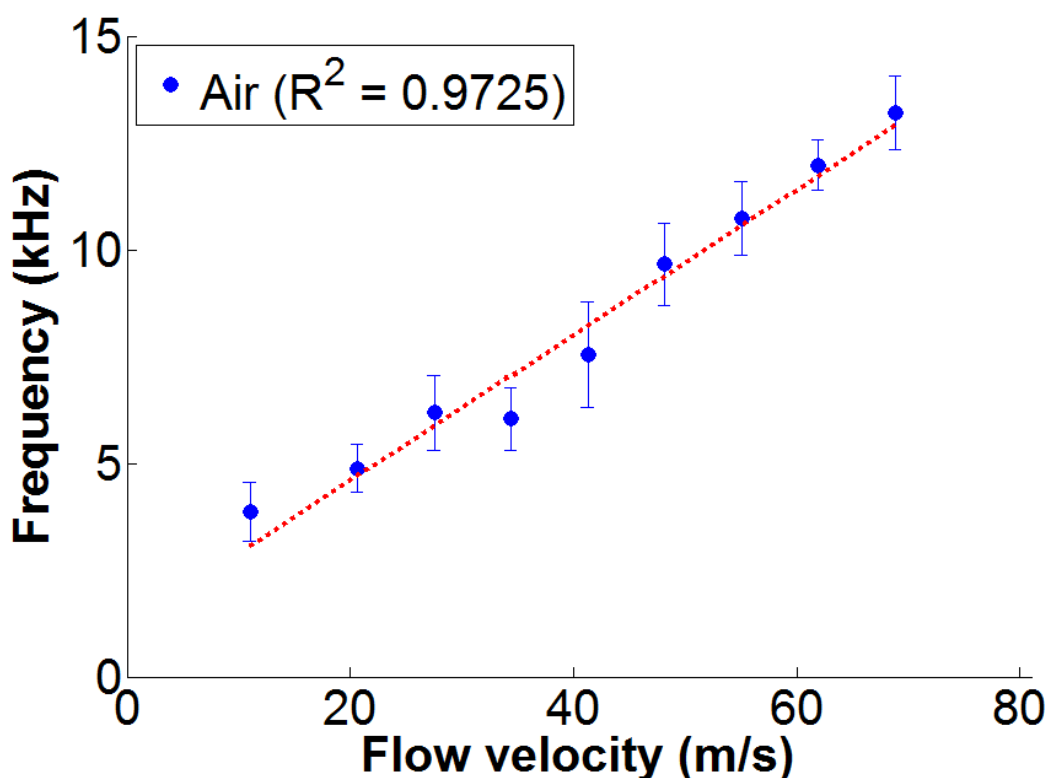


圖 4.10、Air 於不同流速下與光纖振動頻率的關係。

#### 4-6 不同液體黏度與頻率之關係

在上述兩個小節分別用同樣黏度值做流速計之後，相反地，本研究利用同樣流速下，進行不同黏度之量測。本研究除了使用空氣跟水之外，也同時利用其他的純物質如丙酮(acetone)、甲醇(methanol)、DI water、乙醇(ethanol)，進行黏度量測實驗，其黏度值分別為 0.306 cP、0.544 cP、1.000 cP、1.074 cP (cP = mPa·s)。在真實黏度值上，本實驗用毛細管黏度計(Capillary viscometer)進行量測。在實驗

上，以固定流速在 0.3075 m/s，並以此流速之下量測光纖懸臂樑之振動頻率，每個點之取樣時間為約為 20 秒，且每個平均流體以量測 5 次為準，R-square 值為 0.9351，如圖 4.11 所示。

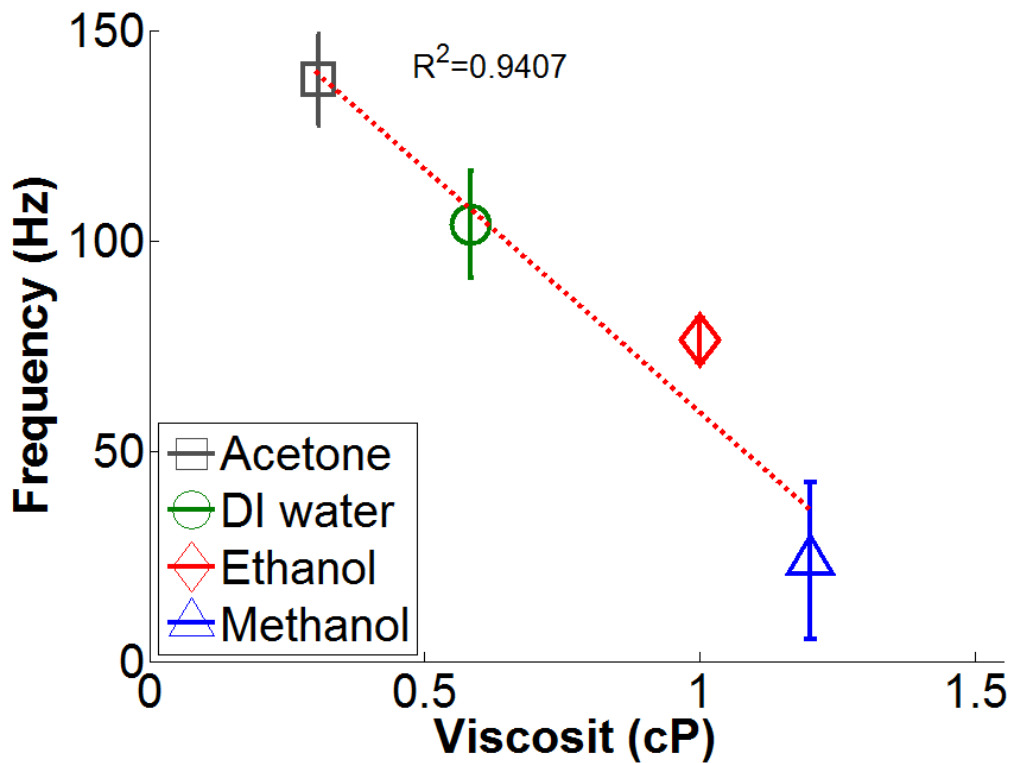


圖 4.11、不同黏度液體與光纖振動頻率的關係。

#### 4-7 不同氣體黏度與頻率之關係

研究也針對不同氣體黏度進行量測，將氣體流速關係與頻率之關係繪圖。在實驗過程中，分別利用黏度分別為二氧化碳(CO<sub>2</sub>)，氮氣(N<sub>2</sub>)，空氣(Air)，氧氣(O<sub>2</sub>)，氬氣(Ar)，其黏度分別為 0.0148 cP，0.0174 cP，0.0183 cP，0.0202 cP，0.0223 cP，每點取樣時間約為 20 秒，取樣頻率為 100000 Hz，其振動頻率於氣體流速在 27.520 m/s 時之情況為 7.5650 kHz，6.4000 kHz，6.1870 kHz，5.2100 kHz，4.708 kHz。在同樣流速下光纖振動頻率的行為仍舊跟黏滯係數相關，在同樣都是 9 μm 光纖，其慣性都一樣，轉動慣量也相同，且當流速一致時，給予流場的動量會因

為給於何種氣體之不同而不同，而光纖振動的頻率跟在不同環境下的黏滯阻尼也相關，當環境黏滯阻尼較高且在同一流速時，也就是黏度較高的氣體，與光纖表面形成比較相對厚之邊界層，當流速為可以產生紊流或者是渦流時，其給予光纖之壓力擾動會較小，故帶給光纖較低自由度的環境；反之，當環境黏滯阻尼較低的氣體，在此實驗中如二氧化碳，其邊界層相對小，當紊流或者渦流在管道內產生時，給予的壓力擾動會較大，且流體給予之拖曳力衝擊，也會使得光纖會隨著流速增大而增大，如圖 4.12 所示。

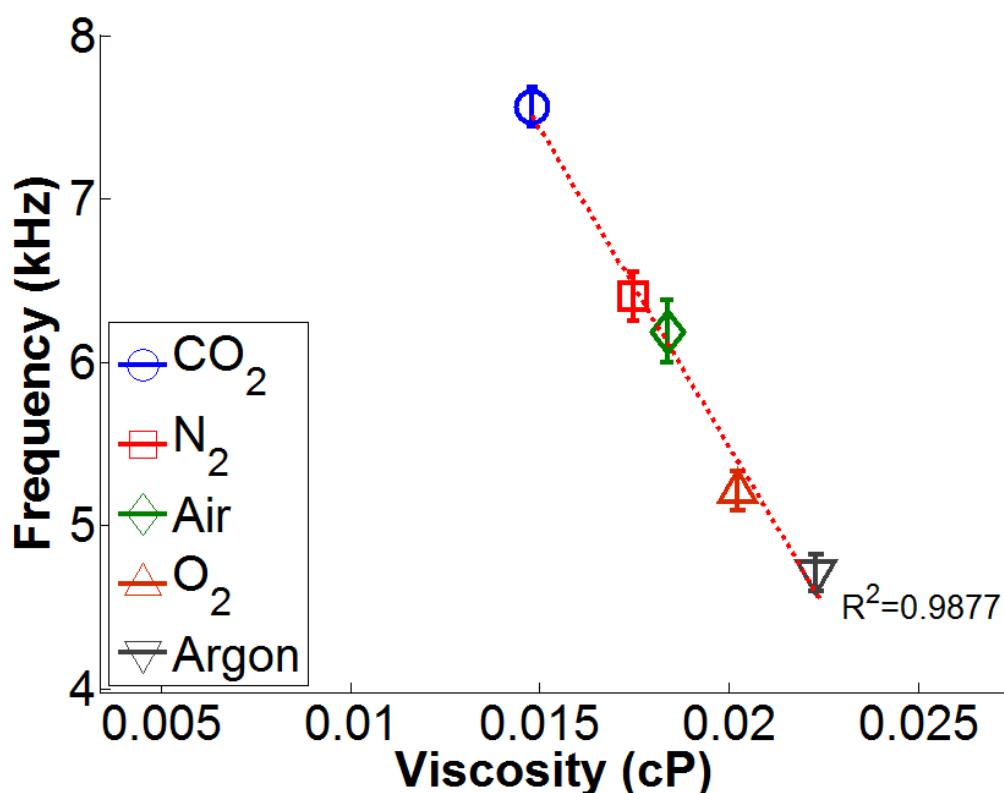


圖 4.12、不同氣體黏度與光纖振動頻率的關係。

#### 4-8 不同氣體流速與頻率之關係

本實驗也特別以不同流速情況下之光纖振動頻率進行分析。分別利用黏度分別為二氧化碳(CO<sub>2</sub>)，氮氣(N<sub>2</sub>)，空氣(Air)，氧氣(O<sub>2</sub>)，氫氣(Ar) 每點取樣時間約

為 20 秒，取樣頻率為 100000 Hz。

結果如圖 4.13 所示，在各個流速下，其中高黏滯係數之氫氣會因為分子給予光纖的環境黏滯阻尼相對於其他氣體較大，另外也因為邊界層之改變量小於環境黏滯阻尼，故其在光纖振動頻率上較小，而另外一方面因為低黏滯係數的二氧化碳會因為環境黏滯阻尼相對於其他氣體較小，所以在光纖振動頻率上，會相對較大，有更多的空間可以使光纖週期性的振動。

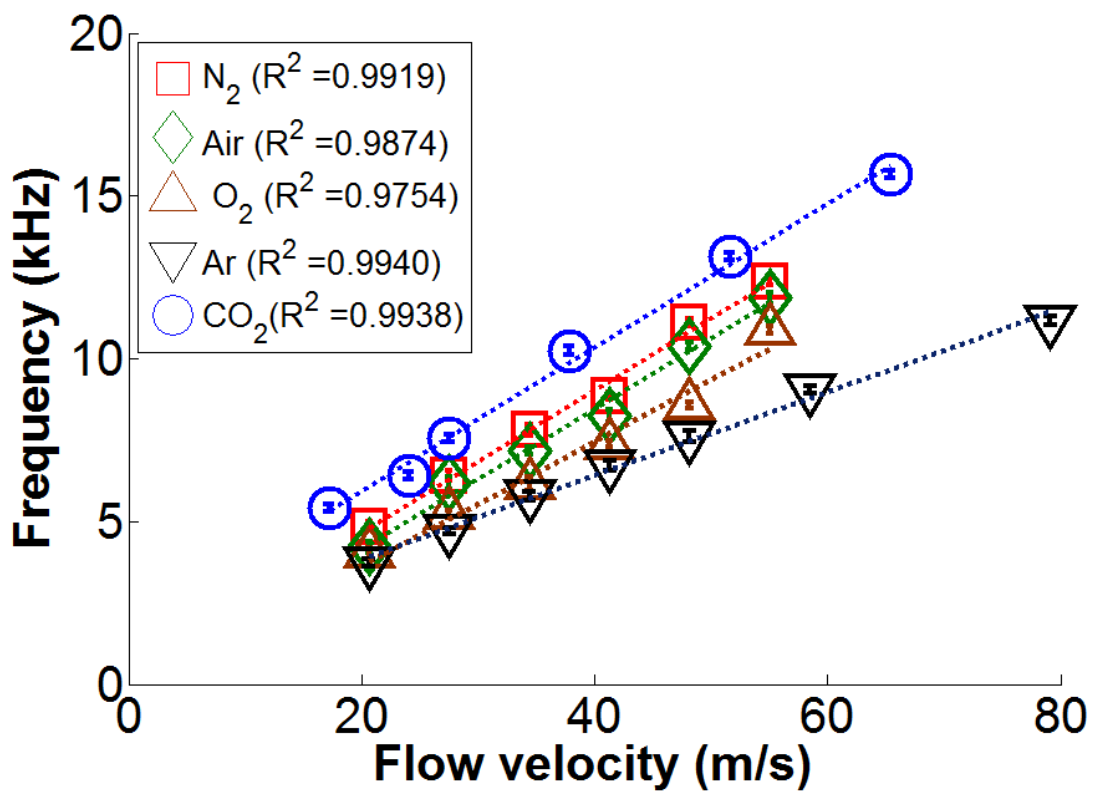


圖 4.13、不同氣體黏與流速之關係。

#### 4-9 第一階振動頻率與第二階振動頻率與流速之關係

在測試液體為 DI water 時，透過量測不同流速下之振動頻率的關係，即將此光纖流速計之振動頻率以非第一階層的頻率，改以第二階層頻率做描述，對此，

可以將光纖流速計之量測靈敏度相對於使用第一階層，因為振動型態改變而上升，其結果如圖 4.14 所示。而第二階層的頻率，其振型上相對第一階層在左右兩邊各多了一個節點[72]，且節點位置於懸臂樑結構中心靠近自由端處。

當光纖之自由端往振幅方向移動時，節點的出現，會使得自由端往振福方向阻力變大，且會相對於第一階層較快折返至感測點，過中心點之後，在往另一處振幅方向移動，也同樣遇到節點，迫使其折返，這樣於節點影響之下，故於同樣流速底下其來回經過 APD 感測點之次數會相對於第一階層多。但是其差異性卻與圖 4.8 相距甚遠，主因是晶片製作過程中差異性問題所致，光纖懸臂樑在管道位置之差異會使得頻率參數而有變異。

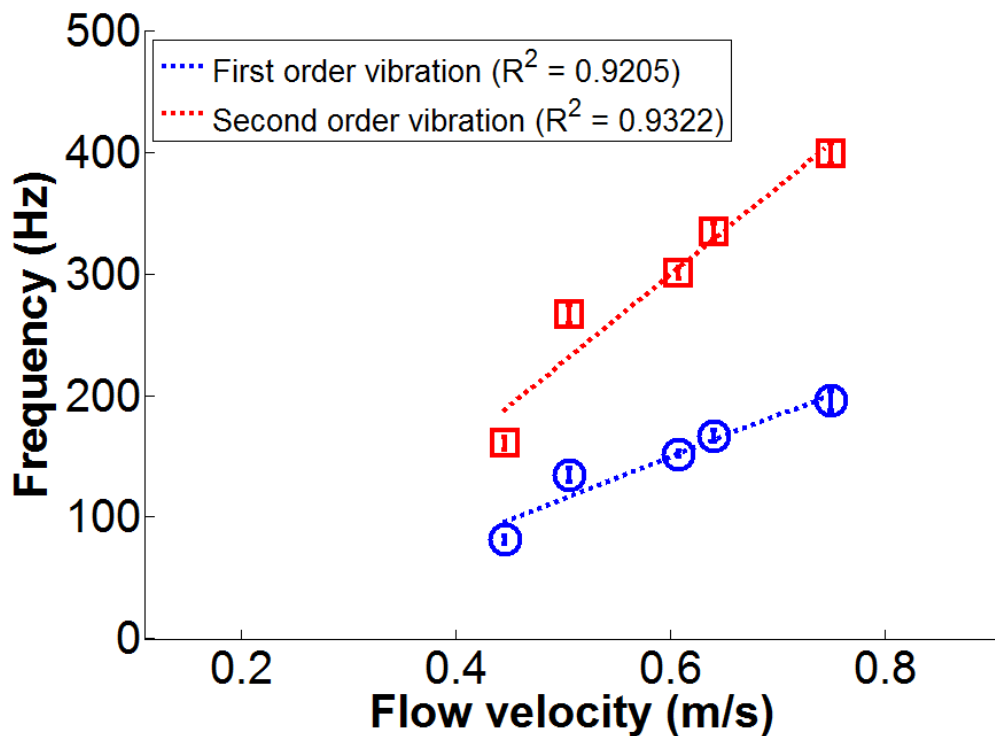


圖 4.14、第一階層與第二階層之振動頻率關係。

# 第五章 結論與未來展望

## 5-1 結論

有鑑於過往研究流速計以及黏度計等研究，皆以額外提供驅動力進行量測，且只能於靜止以及穩態流場下運作，缺點為帶給感測器本身另外的供給元件，並且必須提供額外電場、磁場等方式提供給轉子、轉能器於流體之中，透過其給於的控制變因於流場之中，再執行量測，此種方式除了給予感測器另外的負擔之外，還會使得感測器無法在高速流場下執行。本研究以流體引致振動的方式將轉能器於流體之中。

本研究成功演示了利用流體引致振動方式，製作微流體流速計以及黏度計。且結果顯示，可以知道本研究製作之光纖懸臂樑微流體感測器於流速以及黏度量測，當流速量測之範圍為 0.17 m/s 至 68.81 m/s，而當做黏度計時，黏度量測之範圍為 0.148 cP 至 0.2 cP。並且於此二氧化碳(CO<sub>2</sub>)，氮氣(N<sub>2</sub>)，空氣(Air)，氧氣(O<sub>2</sub>)，氬氣(Ar)等氣體中，依然可以利用本研究提出的黏度計方法，以頻譜解析，並且在流速此控制參數之下，結果可以發現，當流速越大時，光纖懸臂樑之振動頻率會越高，另外，當黏度越低時，光纖懸臂樑之振動頻率會因為週遭黏滯阻尼降低而越高。

本研究已成功開發出利用微流體流量傳感器的原理流引起的振動對光學懸臂。流量傳感器的研製提供了一個簡單而直接的方法來檢測流量和黏度使用流體引致振動現象。結果說明，測量流速之靈敏度於 DI water 中為 3.667 mm/(s·Hz)，而在空氣中為 6.190 mm/(s·Hz)。該檢測黏度範圍可以從超低黏性之二氧化碳(0.0148 cP)中以及低黏性液體—乙醇(1.074 cP)，故本研究開發了一個簡單，低成本的方式來解決流體流速和黏度量測方式。

## 5-2 未來展望

本研究成功的以流體引致振動方式將流速以及黏度量測，且將透過頻譜分析後的訊號，以此辨析各個流體的黏度，以及在高速流動時其流速等。

但是，在本研究是利用實驗室製程方式，製作微流體流速計以及黏度計。在製作過程上，有許多瑕疵處，由於先前無相關以此原理製作微流體光纖懸臂樑黏度計以及流速計，固本研究具備開創性，但是，研究以及實驗中仍有不足之處，也待於改進，條列敘述於下。

- (1) 首先，在製作光纖懸臂樑之過程中，可以將各個步驟以更嚴謹處理，包含蝕刻的恆溫控制，以及蝕刻液定時更換等。另外，於製作黏度計以及流速計過程中，本研究以人工方式於顯微鏡下插入光纖懸臂樑，此一行為間接影響了光纖懸臂樑的位置，並且影響了光纖相對於週遭管壁的距離。若上述過程，以工業標準執行將能夠大幅提高本研究的穩定性，且會大幅縮小晶片與晶片之間之差異性，會使本研究之更有商業化可能性。
- (2) 實驗過程中，可以改善雷射耦光系統，可改以含 pigtail 的雷射二極體，將可以更方便將光源輸入至光纖懸臂樑流速計以及黏度計之中。
- (3) 在量測機制上，若以其他量測方法，如：雷射位移計等方法，可將本實驗脫離顯微鏡系統，使研究所製作感測器具備可攜性，讓本研究更具有在危險環境下偵測之優點，且可大幅降低人員危險性，也是本研究可以修正目標之一。
- (4) 後端訊號處理時，原本從 LabVIEW 軟體收集 APD 之光強度訊號以及 MATLAB 軟體執行 FFT 的處理過程，改以一個人機介面(GUI)方式撰寫程式碼，將會使得後端訊號處理簡單化且更有效率。
- (5) 在量測結果上，研究除了可以架於現有的牛頓流體之外，並以非牛頓流體，進行實驗跟改進，也是本研究改進以及發展方向之一。並且可以搭配模擬軟體對實驗結果做驗證，將會更有理論依據。



## 參考文獻

- [1] R. D. Blevins, Flow-induced vibration: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [2] A. V. Gribok, I. K. Attieh, J. W. Hines and R. E. Uhrig, "Regularization of feedwater flow rate evaluation for venturi meter fouling problem in nuclear power plants", *Nuclear technology*, **134**, 3-14, 2001.
- [3] V. Poirier, "Blood flow meter," WO Patent WO/2010/099,293, 2010.
- [4] M. Nishi, "Laminar to turbulent transition in pipe flow through puffs and slugs," in *Institute of Fluid Mechanics*, vol. PhD. Germany: Friedrich-Alexander University, 2009.
- [5] N. T. Nguyen, "Micromachined flow sensors - a review", *Flow Measurement and Instrumentation*, **8**, 7-16, 1997.
- [6] Y. Yeh and H. Cummins, "Localized fluid flow measurements with an he-ne laser spectrometer", *Applied Physics Letters*, **4**, 176-78, 1964.
- [7] W. Peng, G. R. Pickrell, Z. Huang, J. Xu, D. W. Kim, B. Qi and A. Wang, "Self-compensating fiber optic flow sensor system and its field applications", *Applied Optics*, **43**, 1752-60, 2004.
- [8] M. Raffel, C. E. Willert and J. Kompenhans, Particle image velocimetry: Springer, 1998.
- [9] L. Szekely, J. Reichert and R. Freitag, "Non-invasive nano-flow sensor for application in micro-fluidic systems", *Sensors and Actuators A: Physical*, **113**, 48-53, 2004.
- [10] 楊峯銳, "高精確度超音波流量計流量量測之模擬與實驗," in *應用力學研究所*, vol. 博士. 台北市: 臺灣大學, 76, 2009.
- [11] G. B. Lee, T. Y. Kuo and W. Y. Wu, "A novel micromachined flow sensor

- using periodic flapping motion of a planar jet impinging on a v-shaped plate", *Experimental Thermal and Fluid Science*, **26**, 435-44, 2002.
- [12] A. Ezkerra, L. J. Fernandez, K. Mayora and J. M. Ruano-Lopez, "Fabrication of su-8 free-standing structures embedded in microchannels for microfluidic control", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **17**, 2264-71, 2007.
- [13] S. Radhakrishnan and A. Lal, "Scalable microbeam flowsensors with electronic readout", *Journal of Microelectromechanical Systems*, **14**, 1013-22, 2005.
- [14] L. D. Du, Z. Zhao, C. Pang and Z. Fang, "Drag force micro solid state silicon plate wind velocity sensor", *Sensors and Actuators a-Physical*, **151**, 35-41, 2009.
- [15] D. Taherzadeh, C. Picioreanu, U. Kuttler, A. Simone, W. A. Wall and H. Horn, "Computational study of the drag and oscillatory movement of biofilm streamers in fast flows", *Biotechnology and Bioengineering*, **105**, 600-10, 2010.
- [16] R. P. Hu and X. G. Huang, "A simple fiber-optic flowmeter based on bending loss", *Ieee Sensors Journal*, **9**, 1952-55, 2009.
- [17] J. Lyle and C. Pitt, "Vortex shedding fluid flowmeter using optical fibre sensor", *Electronics Letters*, **17**, 244-45, 1981.
- [18] P. Zylka, P. Modrzynski and P. Janus, "Vortex anemometer using mems cantilever sensor", *Journal of Microelectromechanical Systems*, **19**, 1485-89, 2010.
- [19] J. S. Barton and M. Saoudi, "A fiber optic vortex flowmeter", *Journal of Physics E-Scientific Instruments*, **19**, 64-66, 1986.

- [20] Y. Hlral, H. Kikuta, K. Inoue and Y. Tanaka, "Resonance characteristics of micro cantilever in liquid", *Japanese Journal of Applied Physics*, **37**, 7064-69, 1998.
- [21] C. Bergaud, L. Nicu and A. Martinez, "Multi-mode air damping analysis of composite cantilever beams", *Japanese Journal of Applied Physics*, **38**, 6521-25, 1999.
- [22] Y. H. Seo and B. H. Kim, "A self-resonant micro flow velocity sensor based on a resonant frequency shift by flow-induced vibration", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **20**, 075024, 2010.
- [23] M. Konig, B. R. Noack and H. Eckelmann, "Discrete shedding modes in the von karman vortex street", *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, **5**, 1846-48, 1993.
- [24] H. Kellay, X. Wu and W. Goldburg, "Vorticity measurements in turbulent soap films", *Physical Review Letters*, **80**, 277-80, 1998.
- [25] H. Kellay, X. Wu and W. Goldburg, "Experiments with turbulent soap films", *Physical Review Letters*, **74**, 3975-78, 1995.
- [26] B. K. Martin, X. L. Wu, W. I. Goldburg and M. A. Rutgers, "Spectra of decaying turbulence in a soap film", *Physical Review Letters*, **80**, 3964-67, 1998.
- [27] S. Webster, R. McBride, J. S. Barton and J. D. C. Jones, "Air-flow measurement by vortex shedding from multimode and monomode optical fibers", *Measurement Science & Technology*, **3**, 210-16, 1992.
- [28] J. H. Lyle and C. W. Pitt, "Vortex shedding fluid flowmeter using optical fiber sensor", *Electronics Letters*, **17**, 244-45, 1981.
- [29] Y. Couder, "Two-dimensional grid turbulence in a thin liquid-film", *Journal*

- De Physique Lettres*, **45**, 353-60, 1984.
- [30] P. Vorobieff, M. Rivera and R. E. Ecke, "Soap film flows: Statistics of two-dimensional turbulence", *Physics of Fluids*, **11**, 2167-77, 1999.
- [31] L. S. Tzentsis, "Capillary viscometer," US Patents, 1969.
- [32] J. Kestin, M. Sokolov and W. Wakeham, "Theory of capillary viscometers", *Applied Scientific Research*, **27**, 241-64, 1973.
- [33] C. I. Company, *Cannon instrument company*, Available:  
<http://www.cannoninstrument.com/Home.htm>
- [34] P. Gilinson Jr, C. Dauwalter and E. Merrill, "A rotational viscometer using an ac torque to balance loop and air bearing", *Journal of Rheology*, **7**, 319-32, 1963.
- [35] R. A. Serway and J. W. Jewett, *Physics for scientists and engineers*: Brooks/Cole Pub Co, 2009.
- [36] R. J. Murphy Jr and D. E. Ortman, "Rotational viscometer and plastometer," US Patents, 1977.
- [37] P. Gravesen, J. Branebjerg and O. S. Jensen, "Microfluidics-a review", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **3**, 168-82, 1993.
- [38] P. Oden, G. Chen, R. Steele, R. Warmack and T. Thundat, "Viscous drag measurements utilizing microfabricated cantilevers", *Applied Physics Letters*, **68**, 3814-17, 1996.
- [39] S. Kim, K. D. Kihm and T. Thundat, "Fluidic applications for atomic force microscopy (afm) with microcantilever sensors", *Experiments in Fluids*, **48**, 721-36, 2010.
- [40] R. Berger, C. Gerber, H. P. Lang and J. K. Gimzewski, "Micromechanics: A toolbox for femtoscale science: "Towards a laboratory on a tip"",

- Microelectronic Engineering*, **35**, 373-79, 1997.
- [41] C. Bergaud and L. Nicu, "Viscosity measurements based on experimental investigations of composite cantilever beam eigenfrequencies in viscous media", *Review of Scientific Instruments*, **71**, 2487-92, 2000.
- [42] R. Patois, P. Vairac and B. Cretin, "Near-field acoustic densimeter and viscosimeter", *Review of Scientific Instruments*, **71**, 3860-63, 2000.
- [43] S. Boskovic, J. W. M. Chon, P. Mulvaney and J. Sader, "Rheological measurements using microcantilevers", *Journal of Rheology*, **46**, 891, 2002.
- [44] N. Belmiloud, I. Dufour, A. Colin and L. Nicu, "Rheological behavior probed by vibrating microcantilevers", *Applied Physics Letters*, **92**, 041907-07-3, 2008.
- [45] E. K. Reichel, C. Riesch, F. Keplinger, C. E. A. Kirschhock and B. Jakoby, "Analysis and experimental verification of a metallic suspended plate resonator for viscosity sensing", *Sensors and Actuators A: Physical*, **162**, 418-24, 2010.
- [46] E. K. Reichel, C. Riesch, B. Weiss and B. Jakoby, "A vibrating membrane rheometer utilizing electromagnetic excitation", *Sensors and Actuators a-Physical*, **145**, 349-53, 2008.
- [47] W. X. Huang and H. J. Sung, "Three-dimensional simulation of a flapping flag in a uniform flow", *Journal of Fluid Mechanics*, **653**, 301-36, 2010.
- [48] S. Taneda, "Waving motions of flags", *Journal of the Physical Society of Japan*, **24**, 392-401, 1968.
- [49] C. K. Lin, F. B. Hsiao and S. S. Sheu, "Flapping motion of a planar jet impinging on a v-shaped plate", *Journal of aircraft*, **30**, 320-25, 1993.
- [50] C. Shen and C. Gau, "Thermal chip fabrication with arrays of sensors and

- heaters for micro-scale impingement cooling heat transfer analysis and measurements", *Biosensors and Bioelectronics*, **20**, 103-14, 2004.
- [51] 陳惠君, "具有阻塊結構之微流體突擴管道之渦流生成探討及其於流體整流之應用," in *機械與機電工程學系研究所*, vol. 碩士. 高雄市: 國立中山大學, 95, 2009.
- [52] B. Jakoby, R. Beigelbeck, F. Keplinger, F. Lucklum, A. Niedermayer, E. K. Reichel, C. Riesch, T. Voglhuber-Brunnmaier and B. Weiss, "Miniaturized sensors for the viscosity and density of liquids-performance and issues", *IEEE Transactions Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, **57**, 111-20, 2010.
- [53] G. Chen, R. Warmack, T. Thundat, D. Allison and A. Huang, "Resonance response of scanning force microscopy cantilevers", *Review of Scientific Instruments*, **65**, 2532-37, 1994.
- [54] J. E. Sader, "Frequency response of cantilever beams immersed in viscous fluids with applications to the atomic force microscope", *Journal of applied physics*, **84**, 64, 1998.
- [55] S. Basak, A. Raman and S. V. Garimella, "Hydrodynamic loading of microcantilevers vibrating in viscous fluids", *Journal of applied physics*, **99**, 114906, 2006.
- [56] M. K. Ghatkesar, T. Braun, V. Barwich, J. P. Ramseyer, C. Gerber, M. Hegner and H. P. Lang, "Resonating modes of vibrating microcantilevers in liquid", *Applied Physics Letters*, **92**, 043106, 2008.
- [57] V. Lien and F. Vollmer, "Microfluidic flow rate detection based on integrated optical fiber cantilever", *Lab on a Chip*, **7**, 1352-56, 2007.
- [58] D. J. Gorman, "Experimental development of design criteria to limit liquid

- cross-flow-induced vibration in nuclear-reactor heat-exchange equipment", *Nuclear Science and Engineering*, **61**, 324-36, 1976.
- [59] M. K. Auyang and W. H. Connelly, "Computerized method for flow-induced random vibration analysis of nuclear-reactor internals", *Nuclear Engineering and Design*, **42**, 257-63, 1977.
- [60] F. H. Abernathy and R. E. Kronauer, "The formation of vortex streets", *Journal of Fluid Mechanics*, **13**, 1-20, 1962.
- [61] W. Maas, C. Rindt and A. Van Steenhoven, "The influence of heat on the 3d-transition of the von karman vortex street", *International journal of heat and mass transfer*, **46**, 3069-81, 2003.
- [62] J. H. J. Buchholz and A. J. Smits, "On the evolution of the wake structure produced by a low-aspect-ratio pitching panel", *Journal of Fluid Mechanics*, **546**, 433-43, 2006.
- [63] R. Camassa, B. J. Chung, P. Howard, R. Mclaughlin and A. Vaidya, "Vortex induced oscillations of cylinders at low and intermediate reynolds numbers", *Advances in Mathematical Fluid Mechanics*, 135-45, 2010.
- [64] J. H. Lienhard, W. S. U. T. E. Service and W. S. U. C. O. E. R. Division, Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders: Technical Extension Service, Washington State University, 1966.
- [65] S. Yarusevych, "Airfoil operating at low reynolds numbers.", *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, **46**, 508-16, 2008.
- [66] E. De Langre, M. Paidoussis, O. Doare and Y. Modarres-Sadeghi, "Flutter of long flexible cylinders in axial flow", *Journal of Fluid Mechanics*, **571**, 371-89, 2007.
- [67] M. Paidoussis, "Dynamics of flexible slender cylinders in axial flow part 2.

- Experiments", *Journal of Fluid Mechanics*, **26**, 737-51, 1966.
- [68] C. Semler, J. Lopes, N. Augu and M. Paidoussis, "Linear and nonlinear dynamics of cantilevered cylinders in axial flow. Part 3: Nonlinear dynamics", *Journal of fluids and structures*, **16**, 739-59, 2002.
- [69] M. T. Pittard, "Large eddy simulation based turbulent flow-induced vibration of fully developed pipe flow," Master, Brigham Young University, 2003.
- [70] 吳順正, 光纖特性與應用. Taiwan: 全華科技圖書, 1993.
- [71] C. H. Lin, G. B. Lee, Y. H. Lin and G. L. Chang, "A fast prototyping process for fabrication of microfluidic systems on soda-lime glass", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **11**, 726-32, 2001.
- [72] J. P. Den Hartog, *Mechanical vibrations*: Read Books, 2007.



# Appendix A

## Process of Fast Fourier transforms

Programmed by using MathWorks MATLAB software

```
% =====  
% 2011: Bio-Electro-Mechanical System Lab,  
% Department of Mechanical and Electro-mechanical Engineering,  
% National Sun-Yat-sen University,  
% 70 Lien-hai Rd. Kaohsiung 804, Taiwan  
% =====  
clear all;  
close all  
[filename, pathname] = uigetfile('*.txt', 'Pick an text file'); % select the .txt file  
[header, ReadData_A] = hdrload([pathname, filename]); % clear the header of the files  
disp('Sampling Rate = 100000');  
% rate = input('Please input the sampling rate: ');  
rate = 100000; % set the sampling rate is 100kHz  
time = 0:1/rate:length(ReadData_A)/rate; % set the time length  
% Export the signals of time domain from the above .txt file  
figure(1)  
  
plot(time(1:end-1), ReadData_A)  
xlabel('Time (s)'),('Intensity(a.u)')  
  
% select the analyzed interval  
disp('Please select the analyzed range...');  
[PX, PY] = ginput(2);  
[Temp, index01] = min(abs(time-PX(1)));  
[Temp, index02] = min(abs(time-PX(2)));  
figure(2)  
plot(time(index01:index02), ReadData_A(index01:index02))  
% process of FFT  
DetrendJust = input('Do you want to detrend your data (1)Yes; (2)No: '); % detrend the data  
  
if DetrendJust == 1  
    NewData = detrend(ReadData_A(index01:index02));  
elseif DetrendJust == 2
```

```

        NewData = ReadData_A(index01:index02);
else
    break;
end
figure(2)
plot(time(index01:index02), NewData); %    plot the signals after detrend data

ShiftValue = input('Please input a threshold vlue for amplitude shit: '); %    threshold the signals

NewData = -(NewData - ShiftValue);
figure(2)
figure(2)
h1= plot(time(index01:index02), NewData)
eval(['title("", filename(1:end-4), ' ml/min")']);
xlabel('Time (seconds)','FontSize',45,'FontWeight','bold'),ylabel('Light
intensity(a.u)','FontSize',45,'FontWeight','bold')
get(gcf);
get(gca);
get(h1);
set(gca,'FontSize',30);

pause;
Y = fft(NewData,length(NewData));
Pyy = Y.* conj(Y) / length(NewData); %    imaginary part of fft data
f_A = (rate)*(1:length(NewData)/2)/length(NewData)-1;
Pyy = Pyy(1:length(NewData)/2);
figure(3)

h =plot(f_A(2:end)./1000, Pyy(2:end));
%    plot the signals in frequency domain
eval(['title("", filename(1:end-4), ' ml/min")']);
xlabel('Frequency (kHz)','FontSize',45,'FontWeight','bold'),ylabel('Amplitude
(a.u.),'FontSize',45,'FontWeight','bold')
get(gcf);
get(gca);
get(h);
set(gca,'FontSize',30); pause;;

```

# Appendix B

Process of catching the APD optical singals

Programmed by using NI LabVIEW software

