

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

液體性質與加熱器操作參數對微小加熱器熱汽泡成長  
行為影響之研究

An Analysis on Thermal Bubble Behavior under Various Viscosity  
of Liquids and Pulse Power of Microheater

研究生：鄭守焜

指導教授：林振德 教授

中華民國九十七年七月

液體性質與加熱器操作參數對微小加熱器熱汽泡成長行為影響之研究

An Analysis on Thermal Bubble Behavior under Various Viscosity  
of Liquids and Pulse Power of Microheater

研究生：鄭守焜

Student : Shou-Kun Zheng

指導教授：林振德

Advisor : Jenn-Der Lin

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Mechanical Engineering

June 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年六月

# 液體性質與加熱器操作參數對微小加熱器熱汽泡成長行為影響之研究

研究生：鄭守焜

指導教授：林振德

## 摘要

本研究的目的是在於應用實驗方法分析汽泡受液體性質、表面親疏水性與操作參數的影響。研究中我們利用攝影機進行現象之可視化，分析藉由改變液體黏滯性、加熱器表面親疏水性，以及功率大小其熱汽泡成長隨時間變化的狀態，並界定使氣泡驅動的可行範圍與以上參數之間的關係；本研究中我們確定一些重要的物理參數，並針對這些物理參數其在不同設定值下，深入探討汽泡之熱力行為。

實驗分析結果顯示在增加液體黏度、不同表面親疏水性均會使汽泡驅動的可行範圍有明顯影響；在不同表面親疏水性中，均會有汽泡生長不穩定現象；在增加液體黏度時會使汽泡體積明顯縮小。在表面親水性時會使熱汽泡頂端高度有明顯的增加，而在表面疏水性時會使熱汽泡汽固界面接觸直徑有明顯的增加。不同表面親疏水性下，改變功率會使體積變化有明顯的影響。

An Analysis on Thermal Bubble Behavior under Various Viscosity  
of Liquids and Pulse Power of Microheater

Student: Shou-Kun Zheng

Advisor: Jenn-Der Lin

Abstract

The present study purposes to experimentally examine the influence of liquid properties, hydrophilic conditions, and power on thermal bubble behavior. The CCD camera connected to a video recorder is utilized to visualize thermal bubble formation and growth process, and defined the advisable range for the application of bubble actuation for various viscosity of liquids, hydrophilic conditions, and power. Some significant physical parameters are define, and the thermodynamic behavior of thermal bubble is discussed in detail at various viscosity of liquids, hydrophilic conditions, power and various of the physical parameters.

Experimental results show obvious influences of viscosity, hydrophilic conditions on the advisable range for application of bubble actuation. The instability of bubble formation and growth process take place for various hydrophilic conditions.

Experimental results show the obvious influences of viscosity, hydrophilic conditions, and power on contact diameter between bubble and surface, height of the thermal bubble, and volume of the thermal bubble.



## 誌謝

感謝吾師林振德教授在兩年來課業上的教導及在論文上的適切引導。也感謝國家同步輻射研究中心林劉恭博士，提供許多製程上的寶貴的建議與觀念。同時對口試委員吳志陽教授、洪勵吾教授、陳志堅教授和林劉恭博士對於論文的指正與建議，才使得本文更加充實以及完善。

在交大的每一個日子，感謝好友順隆、偉民的相互砥礪，也感謝學長文福、志銘、昌彥、志豪、光倫對於我的照顧，學弟泰碩、文錚的幫忙，同時也要感謝國家同步輻射研究中心元浩、益群在實驗的過程中給予許多指導，這一段短暫但值得回味的實驗室時光，我將銘記於心，謝謝大家。

再來我要感謝我的家人，讓我可以無後顧之憂的專心致力於學業；最後，僅以本論文獻給所有關心我的人。

# 目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	IV
目錄.....	V
表目錄.....	VIII
圖目錄.....	IX
符號說明.....	XVIII
1.1 背景.....	1
1.2 文獻回顧.....	5
1.3 研究動機與目的.....	8
第二章 實驗設計與製程步驟.....	10
2.1 實驗設計.....	10
2.2 加熱器操作參數.....	10
2.3 微機電製程.....	11
2.3.1 去水烘烤(Dehydration Bake).....	11
2.3.2 光阻塗佈(Photoresist Coating).....	12



2.3.3 軟烤(Soft Bake).....	12
2.3.4 曝光(Exposure).....	13
2.3.5 顯影(Development).....	14
2.3.6 硬烤(Hard Bake).....	14
2.3.7 濺鍍(Sputter).....	15
2.4 微小加熱器製程步驟 .....	15
2.5 表面親疏水性處理 .....	16
<b>第三章 實驗觀測系統與量測步驟</b> .....	<b>18</b>
3.1 觀測系統 .....	18
3.1.1 實驗設備儀器 .....	18
3.2 實驗量測與步驟 .....	19
3.2.1 接觸角之量測.....	20
3.2.2 實驗步驟.....	20
<b>第四章 實驗結果與討論</b> .....	<b>22</b>
4.1 液體黏度量測結果.....	22
4.2 加熱器表面靜態接觸角量測結果.....	22
4.3 漸縮式加熱器熱汽泡成長結果與討論.....	23
4.4 漸縮式加熱器可行範圍的界定與汽泡飛濺現象 .....	27





4.5 漸縮式加熱器可行範圍的幾何參數討論.....	30
4.6 無因次參數討論.....	32
第五章 結論.....	36
參考文獻.....	37



## 表目錄

表 4.1 Pr 數、 $Gr_l$ 數和 $Ra_l$ 數在不同黏度下的值.....	41
表 4.2 Bo 數在不同黏度下的值 .....	41



## 圖目錄

圖 1.1 熱汽泡式噴墨頭剖面圖.....	42
圖 1.2 池沸騰時汽泡的脫離與力量平衡.....	42
圖 1.3 熱汽泡的成長行為過程.....	43
圖 1.4 加熱器中飛濺現象.....	43
圖 1.5 ssDNA 溶液中添加蔗糖改變它的黏度觀察汽泡初始成核所需功 率 .....	44
圖 1.6 不同脈衝時間與功率的汽泡驅動可行範圍.....	44
圖 2.1 光阻剝離法(Lift-off method).....	45
圖 2.2 光阻塗佈過程.....	45
圖 2.3 接觸式曝光.....	46
圖 2.4 正負光阻顯影後的差異圖 .....	46
圖 2.5 漸縮式加熱器在光學顯微鏡下的上視圖(圖上方為加熱器尺 寸，加熱器中心寬為 $6\mu\text{m}$ ，加熱器底部為 $16\mu\text{m}$ )，下圖為 剖面圖，非真實尺寸(not to scale).....	47
圖 2.6 為漸縮式加熱器的SEM圖.....	47

圖 2.7 為Teflon薄膜厚度所示.....	48
圖 2.8 未經任何處理的Ta-Al合金表面的表面粗糙度示意圖.....	49
圖 2.9 未經任何處理的Ta-Al合金表面的表面粗糙度量測示意圖.	49
圖 2.10 利用離子蝕刻系統進行表面改質的Ta-Al合金表面的表面粗 糙度示意圖 .....	50
圖 2.11 利用離子蝕刻系統進行表面改質的Ta-Al合金表面的表面粗 糙度量測示意圖 .....	50
圖 2.12 塗佈鐵氟龍液體的Ta-Al合金表面的表面粗糙度示意圖..	51
圖 2.13 塗佈鐵氟龍液體的Ta-Al合金表面的表面粗糙度量測示意	51
圖 3.1 側向拍攝式系統.....	52
圖 3.2 上方與側向同步拍攝式系統.....	52
圖 3.3 奧士瓦黏度計.....	53
圖 4.1 幾何參數示意圖.....	54
圖 4.2 未經任何處理的Ta-Al合金表面靜態接觸角量測.....	55
圖 4.3 未經任何處理的Ta-Al合金表面不同黏度所量測的靜態接	55
圖 4.4 利用離子蝕刻系統進行表面改質的Ta-Al合金表面靜態接觸角 量測 .....	56

圖 4.5 利用離子蝕刻系統進行表面改質的Ta-Al合金表面在不同黏度 所量測的靜態接觸角 .....	56
圖 4.6 塗佈鐵氟龍液體的Ta-Al合金表面靜態接觸角量測.....	57
圖 4.7 塗佈鐵氟龍液體的Ta-Al合金表面在不同黏度所量測的靜態接 觸角 .....	57
圖 4.8 工作液體為去離子水，接觸角為 53 度，輸入功率為 0.55W熱 汽泡成長過程側像拍攝視點 .....	58
圖 4.9 未經任何處理的Ta-Al合金表面在不同黏度下使汽泡初始成核 的輸入功率變化圖 .....	59
圖 4.10 工作液體為去離子水，接觸角為 53 度，輸入功率為 0.8W熱 汽泡成長過程側像拍攝視點 .....	60
圖 4.11 工作液體為 1.29cp，接觸角為 32 度，輸入功率為 0.8W熱汽 泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	61
圖 4.12 工作液體為 2.2cp，接觸角為 37 度，輸入功率為 0.8W熱汽泡 成長過程側像拍攝視點 .....	62
圖 4.13 工作液體為 2.76cp，接觸角為 42 度，輸入功率為 0.8W熱汽 泡成長過程側像拍攝視點 .....	63
圖 4.14 工作液體為 5.16cp，接觸角為 45 度，輸入功率為 0.8W熱汽	

泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	64
圖 4.15 工作液體為 11.46cp，接觸角為 68 度，輸入功率為 0.8W 熱汽	
泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	65
圖 4.16 為 Barthes[19] 等人觀察在連續固定功率面向下的加熱器表	
面 Marangoni 對流與冷凝現象的側視圖 .....	66
圖 4.17 工作液體為 5.16cp，接觸角為 45 度，輸入功率為 0.8W 熱汽	
泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	67
圖 4.18 工作液體為 1cp，接觸角為 49 度，輸入功率為 0.45W 熱汽泡	
成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	68
圖 4.19 利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面在不同黏	
度下使汽泡初始成核的輸入功率變化圖 .....	69
圖 4.20 工作液體為 1cp，接觸角為 49 度，輸入功率為 0.8W 熱汽泡成	
長過程側像拍攝視點 .....	70
圖 4.21 工作液體為 1.29cp，接觸角為 37 度，輸入功率為 0.8W 熱汽	
泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	71
圖 4.22 工作液體為 1cp，接觸角為 113 度，輸入功率為 0.6W 熱汽泡	
成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	72
圖 4.23 塗佈鐵氟龍液體的加熱器表面在不同黏度下使汽泡初始成核	

的輸入功率變化圖 .....	73
圖 4.26 工作液體為 2.2cp，接觸角為 114 度，輸入功率為 0.8W 熱汽 泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	76
圖 4.27 工作液體為 2.76cp，接觸角為 114 度，輸入功率為 0.8W 熱汽 泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	77
圖 4.28 工作液體為 5.16cp，接觸角為 115 度，輸入功率為 0.8W 熱汽 泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	78
圖 4.29 工作液體為 8.31cp，接觸角為 113 度，輸入功率為 0.8W 熱汽 泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	79
圖 4.30 工作液體為 11.46cp，接觸角為 111 度，輸入功率為 0.8W 熱 汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	80
圖 4.31 左上方為 Deng[15] 在 ssDNA 溶液中添加蔗糖改變它的黏度觀 察汽泡初始成核所需功率與右方與左下方的本文實驗結果比 較 .....	81
圖 4.32 工作液體為 1.29cp，接觸角為 53 度，汽泡飛濺的最低輸入 功率為 1.2W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測	82
圖 4.33 工作液體為 2.2cp，接觸角為 37 度，汽泡飛濺的最低輸入功 率為 1W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 ...	83

- 圖 4.34 工作液體為 2.76cp，接觸角為 42 度，汽泡飛濺的最低輸入  
功率為 1W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測. 84
- 圖 4.35 工作液體為 5.16cp，接觸角為 45 度，汽泡飛濺的最低輸入  
功率為 0.95W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀85
- 圖 4.36 工作液體為 11.46cp，接觸角為 68 度，汽泡飛濺的最低輸入  
功率為 0.95W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀86
- 圖 4.37 工作液體為 1.29cp，接觸角為 37 度，汽泡飛濺的最低輸入  
功率為 1.2W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測87
- 圖 4.38 工作液體為 2.2cp，接觸角為 40 度，汽泡飛濺的最低輸入功  
率為 0.8W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測. 88
- 圖 4.39 工作液體為 2.76cp，接觸角為 40 度，汽泡飛濺的最低輸入  
功率為 0.8W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測89
- 圖 4.40 工作液體為 5.16cp，接觸角為 44 度，汽泡飛濺的最低輸入  
功率為 0.72W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀90
- 圖 4.41 工作液體為 11.46cp，接觸角為 49 度，汽泡飛濺的最低輸入  
功率為 0.7W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測91
- 圖 4.42 界定未經任何處理的 Ta-Al 合金表面使汽泡驅動的可行功率  
範圍在不同黏度下的變化圖 ..... 92



圖 4.43 界定利用離子蝕刻系統進行表面改質的Ta-Al合金表面使	
汽泡驅動的可行功率範圍在不同黏度下的變化圖.....	92
圖 4.44 工作液體為 1.29cp，接觸角為 113 度，輸入功率為 1.2W熱汽	
泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	93
圖 4.45 工作液體為 2.2cp，接觸角為 111 度，輸入功率為 1W熱汽泡	
成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	94
圖 4.46 工作液體為 2.76cp，接觸角為 114 度，輸入功率為 1W熱汽泡	
成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	95
圖 4.47 工作液體為 5.16cp，接觸角為 115 度，輸入功率為 0.95W熱	
汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	96
圖 4.48 工作液體為 8.31cp，接觸角為 113 度，輸入功率為 0.95W熱	
汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	97
圖 4.49 工作液體為 11.46cp，接觸角為 111 度，輸入功率為 0.95W	
熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測 .....	98
圖 4.50 界定塗佈鐵氟龍液體的Ta-Al合金表面使汽泡驅動的可行	
範圍在不同黏度下的變化圖 .....	99
圖 4.51 界定未經任何處理的Ta-Al合金表面汽泡振盪與飛濺現象	100
圖 4.52 界定利用離子蝕刻系統進行表面改質的Ta-Al合金表面汽泡	

振盪與飛濺現象 .....	100
圖 4.53 輸入功率為 0.6W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性 表面熱汽泡汽固界面接觸直徑隨時間的變化圖 .....	101
圖 4.54 輸入功率為 0.8W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性 表面熱汽泡汽固界面接觸直徑隨時間的變化圖 .....	101
圖 4.55 輸入功率為 1W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性表 面熱汽泡汽固界面接觸直徑隨時間的變化圖 .....	102
圖 4.56 輸入功率為 0.6W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性 表面熱汽泡頂端高度隨時間的變化圖 .....	103
圖 4.57 輸入功率為 0.8W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性 表面熱汽泡頂端高度隨時間的變化圖 .....	103
圖 4.58 輸入功率為 1W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性表 面熱汽泡頂端高度隨時間的變化圖 .....	104
圖 4.59 球蓋體體積公式 .....	104
圖 4.60 輸入功率為 0.6W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性 表面熱汽泡體積隨時間的變化圖 .....	105
圖 4.61 輸入功率為 0.8W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性 表面熱汽泡體積隨時間的變化圖 .....	105

圖 4.62 輸入功率為 1W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性表面熱汽泡體積隨時間的變化圖 ..... 106



## 符號說明

a 熱汽泡汽固界面接觸直徑

D 直徑

g 重力加速度

h 熱汽泡頂端高度

P 壓力

Q 輸入功率

R 加熱器電阻值

t 時間

V 熱汽泡體積

$\rho$  密度

$\mu$  液體黏滯係數

$\sigma$  表面張力

下標

b 汽泡

l 液體

v 汽體

0 待側液體



# 第一章 緒論

## 1.1 背景

近來微系統相關應用產品已在生活上隨處可見，其可見的明顯趨勢是往小、快、精確方向演進。微機電系統是一種結合機械、電子、材料、控制、物理、生醫、化學、光學等多重技術整合的研發領域，其特色為兼具微小化、可量產之新製造技術，不僅可以有效協助製造業改造製程，使產品提高品質、性能與可靠度，進而提高附加價值，同時可以降低製造成本及能源消耗[1-2]。故相關研究人員近年來汲汲對於這具有廣大發展潛力的領域發展其新的研究方向。

由於個人電腦的普及所帶來噴墨型印表機的快速發展，以及對於噴墨品質的要求與低價格，發展出壓電致動式(Piezoelectric actuated type)、熱汽泡致動式(Thermal bubble actuated type)、靜電致動式(Static electricity actuated type)、音波致動式(Acoustic actuated type)等的噴墨頭。目前市面上主要以壓電式噴墨頭(piezoelectric ink jet head)以及熱汽泡式噴墨頭(thermal bubble ink jet head)為主流。本研究針對熱汽泡式噴墨頭，而熱汽泡噴墨頭結構主要分為 Heater、Ink chamber、Nozzle base 和 Nozzle Plate 組成，如圖 1.1 所示。其中的微小加熱器是以 MEMS 製程並且

操作原理為平列在充滿液體的微流道中藉由高脈衝加熱並且快速產生沸騰汽泡膨脹從噴嘴頂端噴出液滴。汽泡行為是關連到液滴噴出的特徵[3]。

在文獻中分析微小加熱器時採用池沸騰裝置。池沸騰是一種沒有強制對流的沸騰現象，其加熱壁面浸置於一個原來靜止的液體容器裡，此盛裝液體的容器對加熱壁面而言，宛如一個水池一樣，故稱這種沸騰稱池沸騰。

在分析池沸騰時作用於汽泡的作用力，包括慣性力、浮力、表面張力及阻力。慣性力及浮力促使汽泡脫離表面，表面張力及阻力則使汽泡附著於表面。以下分別做說明：

(1)慣性力與浮力(Inertia force and buoyancy)：慣性力導源於汽泡的成長推動鄰近液體的運動。而慣性力隨著汽泡半徑及其變化率之增加而增加。通常，慣性力只有在汽泡快速成長才重要。作用於汽泡的浮力與汽泡的體積成正比：公式為  $F_b \propto D_b^3(\rho_l - \rho_v)g$

其中 $D_b$ 為汽泡直徑， $\rho_l$ 為液體密度， $\rho_v$ 為汽體密度， $g$ 為重力加速度。在地表重力下，若汽泡成長的速率不是很快，則浮力為促使汽泡離開熱表面的主要力量。

(2)表面張力與阻力(surface tension and drag force)：表面張力與汽泡在熱表面的三相接觸線之圓周長成正比，亦即與  $R_b \sin \theta$  成

正比，如圖 1.2 所示。真正阻止汽泡脫離的力量為表面張力在垂直表面的分力，其表示為

$$F_s \propto D_b \sin^2 \theta \sigma。$$

其中  $\sigma$  為表面張力。而表面張力是使汽泡附著於表面的主要力量。在池沸騰的情況中，氣泡成長速率相當於氣泡與鄰近液體有一相對速率而形成液體給汽泡的阻力。其公式為

$$F_D \propto \mu_l D_b \frac{dD_b}{dt}，其中 \mu_l 為液體黏滯係數。$$

在微小加熱器加熱時，汽泡的成長行為過程，如圖 1.3，分為(a)成核和(b)成長，(c)蒸氣層形成，(d)汽泡最大尺寸，(e)氣泡萎縮，和(f)彈回[3]。而其一開始的成核即發生在液體裡的汽液介面上，開始即為一微小汽核。汽核就像汽泡胚胎，汽核的順利產生與成長才有汽泡出現。液體裡汽核的產生結合就是所謂成核。沒有外加物質影響的成核稱為均質成核(homogeneous nucleation)，相反的當有外加物質影響的成核現象，稱為非均質成核(heterogeneous nucleation)。這些外加物質的影響可能來自於加熱表面或溶解於液體的外來氣體。一般常見的沸騰源自於非均質成核，因為沸騰的發生受到加熱表面不平滑的影響或液體殘存有非凝結的氣體[4]。在 Li[5]的研究中，他便比較在光滑與一微小  $5 \mu\text{m}$  直徑凹穴的微小加熱器( $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ )中在擬穩態與脈衝加熱下，在含氣體與去除氣體的水中汽泡半徑



的變化。

由文獻中說明，我們知道加熱器在低功率時只有少數汽泡生長並且只會在加熱器內部的固定位置，原因為加熱器在非平滑表面中的凹坑因液體接觸角的限制而殘留工作液體的非凝結氣體，這些氣體就成為成核所需要的胚胎。當加熱器在高功率時，汽泡內的蒸氣壓過高，向上動力會導致汽泡脫離加熱器表面和無法結合，使微小汽泡會飛濺於加熱器外部，如圖 1.4 所示。

在汽泡動力描述方面，其統御方程為 Rayleigh-Plesset 方程式，其可以寫成以下形式：


$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{\Delta P_v(t)}{\rho_l} \quad (1)$$

其中  $\dot{R} = \frac{dR}{dt}$  是界面速度， $\rho_l$  是液體密度， $\Delta P_v(t)$  是汽泡內瞬間過壓。汽泡的過壓是汽泡裡的蒸氣壓與液體壓力、汽泡界面的毛細壓及粘性液體流動導致的垂直方向應力的瞬間相差值，可以展開為：

$$\Delta P_v(t) = P_v(t) - P_l(t) - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R}\dot{R} \quad (2)$$

式中  $P_v$  是汽泡內瞬間蒸氣壓力， $P_l$  是液體側的壓力， $\frac{2\sigma}{R}$  為汽泡界面毛細壓並且  $\frac{4\mu}{R}\dot{R}$  為粘性液體流動導致的垂直方向應力。其

結合為：

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + 4\nu\frac{\dot{R}}{R} = \frac{1}{\rho_l} \left[ P_v - P_l - \frac{2\sigma}{R} \right] \quad (3)$$



此方程式能運用以分析汽泡內生長。

脈衝式加熱器產生的成核汽泡已經廣泛運用在例如熱汽泡噴墨印表機，汽泡制動幫浦，微小陣列裝置，汽泡制動式微小混和器等。

## 1.2 文獻回顧

針對平坦表面 (plain surface) 微小加熱器上熱汽泡之形成與成長的相關研究文獻：給定一連續固定熱通量，熱汽泡最初是在微米尺度的孔穴 (microscale cavity) 中生成[6]；當熱汽泡的半徑成長至微米孔穴半徑，此時熱汽泡的浮力 (buoyancy force) 並不足以使熱汽泡離開平坦表面，因此熱汽泡會繼續向微米孔穴外來延伸擴張與成長，並且在熱汽泡與平坦表面交界處形成一液體薄層 (liquid microlayer) [7]。在 Van Stralen[8]等人的研究中，他量測熱汽泡在連續固定熱通量平坦表面上，熱汽泡成長之接觸半徑 (contact radius) 的變化，並由量測結果發現接觸半徑均會大於微米孔穴半徑。在平坦表面上給定一連續固定熱通量，熱汽泡的成長主要是靠液體薄層中的液體汽化成汽體[6]；隨著熱汽泡的成長，此液體薄層會迅速沿著表面往外方向移動，當熱汽泡與表面的接觸角 (contact angle) 隨著汽泡的成長而有所變化時，此液體薄層也會有所變化，進而影響熱汽泡的成長速率，體積與形狀；也就是說，整個熱汽泡成

長過程主要受靠近表面的熱邊界層 (thermal boundary layer) 所影響。依文獻[9]和[10]針對在平坦表面上給定一連續固定熱量之研究結果，熱汽泡的成長可分為二個階段：第一階段為慣性主導階段 (inertia controlled growth) --當熱汽泡在成長初期，也就是接觸半徑非常小的時候，熱汽泡的成長擴張必須抵抗流體慣性阻力，隨著熱汽泡的快速成長，流體慣性阻力也急劇地降低。第二階段為熱傳主導階段 (heat transfer controlled growth) --熱汽泡成長末期，隨著液體薄層中液體的減少，液體汽化成汽體的速率降低，熱汽泡成長的速率也跟著降低。由上所述，平坦表面的潤濕性 (wettability) 程度，會影響固-液界面與汽-液界面接觸角 (contact angle) 的大小，進而影響熱汽泡成長過程中液體薄層的大小，因此間接影響熱汽泡成長速率，體積與形狀。

Shin 等人[11]利用實驗的方式探討不同親疏水性的表面沉浸在水中，其上鑽以一孔洞，經由孔洞內往水中吹一低流速的空氣氣流，觀察由此孔洞所產生氣泡成長的變化。文中顯示氣泡的體積會受表面親疏性的影響，當表面由親水變成疏水時，氣泡的體積在同一成長時間下會增加超過一半。

在 Li[12]的研究中，他比對在單一微小加熱器( $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ )不同脈衝時間與功率的汽泡行為。其結果顯示：給定一有效脈衝，在

低功率時，沒有汽泡成核，在適當功率時，將會有單一汽泡產生結合成較大汽泡，當高功率時，微小單獨汽泡將不會結合進入一大型汽泡，由於較高非平衡蒸汽壓力在汽泡內部，而使有汽泡飛濺產生。

Yang 等人[13]比較不同的長寬比微小加熱器在高熱通量下觀察汽泡生長的變化，包含汽泡生長過程的體積、在汽泡生長過程的動力接觸角變化，與加熱器的三軸氣泡尺寸的生長速率在加熱器長寬比加上不同熱通量的影響。Tsai 等人[14]研究在長  $95\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$  與  $10\ \mu\text{m}$  寬的微小加熱器下不同等電流輸入中觀察汽泡的型態。當輸入電流在 25 到 30mA 時，加熱器溫度在初始增加而汽泡形成後溫度迅速下降，到達穩態時再上升；在高輸入電流(40mA)時，加熱器溫度急速增加和汽泡立即有成核現象發生。

在液體性質對熱汽泡形成影響的研究方面，以單一尺寸微小加熱器上，Hong 等人[3]在改變液體的初始溫度並觀察熱汽泡行為，結果顯示在不同條件下，汽泡生長到蒸氣層的速率是相同。但在最大體積方面，初始溫度越高，汽泡最大體積越大。Deng[15]在 2004 年研究在單一尺寸脈衝式微小加熱器添加蔗糖改變它的黏性，在 ssDNA 溶液中觀察汽泡行為。由於黏性在汽泡動能上的消散效果，使單一脈衝結束時汽泡體積急速下降。另外 Deng[16]在 2004 年時研究在脈衝式

微小加熱器中改變 ssDNA 濃度對比去離子水觀察汽泡存在時間變化。發現濃度越高汽泡存在時間越短，在去離子水中其存在時間最長，而汽泡直徑隨濃度增加而減小。在一固定加熱脈衝時間結束時，在低濃度液體的汽泡仍然持續增加。濃度上升時，汽泡成長週期是與加熱脈衝時間是幾乎相對應。而在高濃度中，其汽泡成長停止時間在早於加熱脈衝時間。

### 1.3 研究動機與目的

由 Deng[15]發表在 ssDNA 溶液中添加蔗糖改變它的黏度觀察汽泡初始成核所需功率，如圖 1.5 所示，發現當液體黏度升高時，使汽泡初始成核所需要的功率也隨著升高。而 Li[12]研究不同脈衝時間與功率的汽泡過程，他界定出可行汽泡驅動的範圍如圖 1.6 所示，汽泡在給定一有效脈衝，在低熱通量下會有汽泡無法成核或結合的區域，在高熱通量下有汽泡飛濺區域。在汽泡制動的 MEMS 運用上，氣泡無法成核或氣泡飛濺將沒有足夠驅動力，以噴墨頭來說，會導致無法噴出液滴。

藉由上述研究中，在探討不同液體性質時並沒有明確界定其可行的汽泡驅動工作範圍，並僅考量平坦表面上熱汽泡生成與成長過程，僅文獻[11]探討在一氣體填充入液體過程中所形成之氣泡(非熱汽泡)

其成長過程與平坦表面親疏水性的關係，所以在本文中，我要探討的是在不同液體黏度下藉由改變加熱器表面親疏水性與加熱器功率，觀察汽泡驅動的可行範圍。

實驗中在加熱器大小為一致時先觀察以 Ta-Al 合金表面在未經任何處理時以去離子水與不同液體黏度下，使汽泡成核所需要的功率，藉由重複實驗並增加電壓觀察汽泡驅動的可行範圍，往上增加電壓來界定汽泡飛濺發生區域，再改變不同表面親疏水性觀察熱汽泡行為。

增加黏性是研究能在脈衝加熱的汽泡驅動下產生週期和穩定單一蒸氣汽泡。適當脈衝參數能幫助有效汽泡驅動。希望藉此歸納出相關參數，能夠提供後續汽泡研究上的參考依據。

## 第二章 實驗設計與製程步驟

### 2.1 實驗設計

實驗的設計是利用 MEMS 技術來製程微小加熱器，在上方加入去離子水與加入不同濃度的蔗糖來探討黏度，以及離子蝕刻系統(Reactive Ion Etching System, RIE)蝕刻表面與 Teflon 溶液塗佈表面來探討不同親疏水表面。液體溫度設定為常溫，在一大氣壓下觀察。在此加熱區域是以 Ta-Al 當加熱材料，微小加熱器製作過程採用光阻剝離法(Lift-off method)。所謂光阻剝離法(Lift-off method)是先塗佈一層薄光阻，曝光出圖案，在以濺鍍方式沉積金屬層，最後在以丙酮等清洗液去除光阻，如圖 2.1 所示。加熱器採用一類似極長脈衝之連續式電壓輸入來加熱，並且計算加熱器輸入的功率  $Q(W)$ 。

### 2.2 加熱器操作參數

在商業噴墨頭的 Ta-Al 加熱器中脈衝寬度設定為 250、166 和 125  $\mu s$  並有文獻探討以 Ta-Al 加熱器的最大加熱速率與最高成核溫度為  $0.25 \times 10^9 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1}$  和 556K。當固定脈衝寬度時電壓



運用在16V的成核溫度為555.6K，在7V時加熱器的低表面溫度會有振盪現象是由於在一或多個成核位置的蒸汽汽泡所造成的非均質成核[12]。本次實驗電壓採用一類似極長脈衝之連續電壓輸入在8V~16V之間，觀察汽泡初始成核的值，並增加電壓觀察汽泡飛濺的臨界值，再以 $\frac{V^2}{R}$ 換算為功率Q(W)，V為輸入電壓，R為加熱器電阻值。

在液體方面，有文獻探討噴墨方向性與墨水本身物理特性的關係，觀察黏度在1.3~11.6cp之中。本實驗藉由加入蔗糖(Sucrose)來改變溶液的黏度並與去離子水做比較，在10%、20%、30%、40%、45%與50%蔗糖濃度時在攝影機(CCD camera)下觀察黏度對汽泡影響。



## 2.3 微機電製程

關於微小加熱器的製程，因屬於微小結構，所以又可以稱作微影製程。而製程上主要可分為塗佈、軟烤、曝光、顯影、硬烤、濺鍍，以下分別作個別的介紹[17, 18]：

### 2.3.1 去水烘烤(Dehydration Bake)

晶片表面通常含有從空氣中所吸附的水分子，這將影響光阻在晶

片上的附著性，因此在塗佈光阻之前需做清除水分子的動作。把晶片置於加溫的烤箱內數分鐘，則可將晶片表面上的水分子蒸發，這步驟即是去水烘烤。

### 2.3.2 光阻塗佈(Photoresist Coating)

首先將晶片放置於旋轉塗佈機的轉軸上，藉著軸心抽取真空將晶片吸附住。接著將光阻適量的滴加在晶片中間，滴入光阻前須確認滴管內並無氣泡混於光阻中，若有應先將氣泡排除，避免光阻中夾雜氣泡影響光阻結構，造成圖案的缺陷。一般而言，塗佈過程需經快慢兩種轉速，在進行高轉速之前需先以慢轉速將光阻完整塗佈在整個晶片表面，因假使一開始即用過高轉速，光阻易因過大離心力而飛離無法完整覆蓋在晶片表面，接著再使用高轉速將光阻均勻分布在表面且控制在所需厚度。而光阻的厚度則受到本身黏性和轉速的影響，控制轉速快慢來獲得需厚度，基本上，轉速越快光阻厚度將越薄，操作過程如圖 2.2 所示。


### 2.3.3 軟烤(Soft Bake)

光阻塗佈在晶片表面後，仍為原先含有許多溶劑的液態，其附著性較差且因仍是流體，曝光動作後無法準確呈現出圖案，因此需經軟



烤將光阻層內的溶劑趕出，使其成為固態的薄膜，且對晶片表面附著能力加強。若軟烤溫度太低則軟烤時間需加長，而當溫度太高時，光阻外層溶劑將揮發過快，使得內部溶劑仍未去除但表面已硬化，導致光阻層表面產生皺摺。假使溫度太低時間太短，光阻尚未完全硬化，則附著力不足且曝光準確度下降，且易黏於光罩上，而當溫度太高或時間過長，光阻將變脆且對光源的敏感度(Sensitivity)變差，造成顯影效果變差不易完整呈現圖案。

#### 2.3.4 曝光(Exposure)



本實驗曝光所使用的光源為波長 365nm 的 UV 光汞燈，其光源強度為固定值，藉由控制曝光時間長短來調整光阻受光能量，曝光時間可精準至小數點下一位。本實驗光阻為正光阻，曝光劑量如不足，則部分光阻因未完全受到光照進而發生性質上的改變，將溶解於顯影劑，發生顯影過量的情形，圖案產生差異。而假使曝光劑量過高，光將侵入不需照光的部位圖案，使其難溶於顯影劑，出現殘留顯影不清的情形。

本實驗使用接觸式(Contact)曝光技術，執行此方法時，光罩與晶片間是彼此接觸的，光罩上的圖案以 1:1 的尺吋比例轉移至光阻上，因此解析度非常好，參考圖 2.3。但因曝光時光罩需與光阻接觸，

因此光罩常沾染上雜質，影響後續曝光動作，故需時常做清洗動作。

### 2.3.5 顯影(Development)

實驗所用光阻 AZ1500 為正光阻，因此顯影時將會把照射到 UV 光源的部分溶解洗去，而留下未曝光的光阻結構，即是所要的微結構，如圖 2.4 所示。實驗時將顯影液(AZ400K)和去離子水以一比五比例混合，再把曝光完成的試片放入顯影，待顯影完成後取出試片以去離子水沖洗乾淨，再用氮氣吹乾。當在顯影時，如適當的搖晃，可以加速顯影速度，避免顯影完之光阻停留在試片表面阻擋顯影液繼續反應，但如結構附著性不佳或微結構過小，則不適合搖晃，易造成光阻結構脫落或變形，因此如需搖晃時應輕微，避免實驗上的誤差。而在顯影時間方面，如顯影時間過長，將使顯影液易侵蝕到不應溶解的結構，破壞原先設計之圖案。而顯影時間不足，則殘留許多光阻未清洗乾淨，而呈現不出所要之圖案。

### 2.3.6 硬烤(Hard Bake)

光阻經過顯影後，進行下一個製程之前，必須經過的最後一次的烘烤，除了可以更進一步將光阻內的殘留溶劑含量，藉著蒸發而降到低，也可以藉以強化光阻的強度，增加對於蝕刻的阻擋能力 (Resistance)。

### 2.3.7 濺鍍(Sputter)

濺鍍原理乃是在輝光放電(Glow Discharge)的環境下，利用動量傳遞的方式，荷能正離子( $\text{Ar}^+$ )飛向陰極轟擊陰極的靶材表面，使得靶材的原子或分子被轟擊出，沉積在上方的基板上形成薄膜。在低真空度及高電壓下，如持續供給能量給工作氣體，將導致氣體離子化，形成電漿(Plasma)態。而當氣體分子被電子激發至不穩定高階能態，基於能量平衡原理，將隨之降階至基本態，而降階所產生的能量將以光之形式放出，產生發光現象，稱為輝光。因此濺鍍時，將欲鍍的材料靶材置於陰極，利用電極間的高電位差將真空腔內的氬氣游離，氬氣離子即向陰極撞極，將靶材原子撞擊出來，沉積在陽極的樣品上形成薄膜。



### 2.4 微小加熱器製程步驟

本實驗選用四吋(直徑約 100mm)矽晶片作為測試基板。光阻則是選擇 Hoechst 公司生產的正型薄光阻 AZ1500，是一種正型光阻，欲製造厚度小於 5 $\mu\text{m}$  之結構。加熱器詳細製作過程描述如下：

(1) 將一 4 吋<100>矽晶片表面沉積一層氧化層，接著再依照 RCA Clean 程序將晶片清洗乾淨，上面塗上一層 primer80/20，以增

加附著性，之後再將矽晶片放進光阻旋佈機中塗佈正光阻 AZ1500。

其中 RCA Clean 為一般矽晶片清潔的前置工作，我們是使用硫酸加雙氧水，以 3:1 的比例在 130°C 的溫度下加熱 15 分鐘，主要應用於有機物之去除。primer80/20 的功能是增加光阻的附著性，其主要成分為 20% 的 HMDS 和 80% 的 PM Acetate，HMDS 對於光阻附著於氧化層、玻璃、石英是具有很好的預處理效果，PM Acetate 可把表面預濕。

(2) 利用光罩將所需圖形呈現於塗佈過後的晶片上，以適當的顯影液，把加熱器圖案顯出來，接著將晶片置入真空濺鍍機，沈積 Ta-Al 合金。

(3) 將已沉積 Ta-Al 的晶片放入專用光阻剝離溶液(lift-off solution)中，將不要的部份掀離，只留下加熱器部分。加熱器結構與厚度如圖 2.5、2.6 所示。



## 2.5 表面親疏水性處理

針對表面改質，我們利用離子蝕刻系統 (Reactive Ion Etching System, RIE) 蝕刻晶片表面達到表面改質；為了使矽晶片表面能夠改質成疏水性表面，本實驗中我們在晶片表面塗佈聚四氟乙烯 (Polytetra-fluoroethylene, PTFE)，又稱鐵氟龍(Teflon)，其熔融溫度 (melting temperature) 為 327~342°C。PTFE 塗佈程序為使

用塗佈機轉速為 500R. P. M、30 秒的方式將聚四氟乙烯覆蓋於晶片表面上，並以 160°C 的高溫烘烤五分鐘。Teflon 薄膜厚度如圖 2.7 所示。圖 2.8、2.10、2.12 為不同親疏水性表面粗糙度示意圖，圖 2.9、2.11、2.13 為不同親疏水性表面粗糙度量測示意圖。



## 第三章 實驗觀測系統與量測步驟

### 3.1 觀測系統

本實驗針對一表面上的功率大小、液體黏度，不同表面親疏水性，觀察對熱汽泡生成與成長過程的影響，實驗系統架設如圖 3.1 與圖 3.2 所示。本實驗採用兩種不同視點來觀察熱汽泡之生成與成長，分別為側向拍攝式如圖 3.1 所示，與上方與側向同步拍攝式如圖 3.2 所示。利用一攝影機連接可變焦顯微放大鏡筒與適當之顯微物鏡，再將攝影機置於薄膜加熱器之上方或側向方向。加熱器的接點以探針接觸，以直流電源供應器輸入電壓，視不同觀察視點而定，詳細記錄熱汽泡成長過程。在光源的部分，上方拍攝視點時，採用同軸光源，入射光源與攝影機在同一方向；在側向拍攝視點時，入射光源與攝影機則在相反的方向上。透過與電腦系統的連接，可將所拍攝熱汽泡成長過程之影像儲存下來並作進一步的分析。

#### 3.1.1 實驗設備儀器

a. CCD camera(X-stream VISION High speed camera)：

此 CCD 照相機型號為 XS-4，感光 pixel 數為  $512 \times 512$ ，其記憶體大小為 4G，頻率在  $512 \times 512$  的條件下可達 5000Hz，最高

速率為一秒鐘拍攝 100000 張。

b. 質點影像分析軟體：

此軟體為 IDT 公司發展，可用作於控制雷射 Q-switch 延遲時間和 camera 曝光量、快門等。另可存取影像，擷取影像中質點計算流場中的速度向量。

c. 曝光機(UV/DUV Mask Aligner)：

對於晶片與光罩採用接觸式曝光，使用 500W 的汞燈炮，並使用雙筒顯微物鏡作為對準微結構之用。

d. 濺鍍機(Sputter Machine)：

本次實驗中所需沉積的金屬皆使用物理氣相沉積方法，使用雙槍式濺鍍機，分別為 DC 式與 RF 式。

e. 離子蝕刻系統：型號為 SAMCO 10-NR，主要使用 CF<sub>4</sub>、SF<sub>6</sub>、O<sub>2</sub> 等氣體作為蝕刻用途，最大可裝入 8 inch 的晶片，最大輸出功率為 300W。

f. 比重計：測量待測樣品液體與水在 4°C 時密度的比值。

g. 奧士瓦黏度計：如圖 3.3 所示，測量時分別測量標準液與待測樣品液體流經起始線 b 至終止線 d 所需時間。

### 3.2 實驗量測與步驟



### 3.2.1 接觸角之量測

在製作薄膜熱阻加熱器的過程中，將一約 2 公分見方的測試晶片與完成加熱器圖形曝光與顯影之晶片，一同至入真空濺鍍機沈積 Ta-Al 合金，俾使測試晶片表面與加熱器表面為同一狀況，接著滴一適當大小之液滴在測試晶片上，置於側向拍攝視點觀測系統。調整背景之清晰度，一般調整明暗度及對比度要到水珠之邊界與空氣界面是清楚而不是朦朧的。接著利用繪圖軟體拉出液固介面與液氣介面直線，進而量測出接觸角大小。本實驗中將測試晶片與加熱器晶片同時進行 RIE，量測測試晶片之靜態接觸角大小；或將測試晶片塗佈 PTFE，接著量測其靜態接觸角之大小。



### 3.2.2 實驗步驟

首先先進行上方拍攝視點對焦，將製作完成之薄膜熱阻加熱器至於實驗平台上，先選擇較低倍率之顯微物鏡以利電壓訊號接腳之探測。選定欲觀測之加熱器位置，將透明蓋玻片所製作之玻璃擋牆圍住所要觀測之加熱器，盡量使加熱器位置於中心點，確保熱汽泡之生成與成長不受擋牆之影響。接著滴入約 1000 微升之工作流體使其充滿於加熱器之上，然後再以側向拍攝視點觀測，最後輸入電壓訊號並同步啟動高速攝影機詳細記錄熱汽泡成長過程。

在上方與側向同步拍攝視點觀測方面，其實驗步驟與側向拍攝視



點相同，唯在上方與側向同步觀測熱汽泡成長時，要使用 PRO-VISION 軟體。此軟體也可用作於控制雷射 Q-switch 延遲時間和同步控制 camera 曝光量、快門等，拍攝方式可用 2D 和 3D 呈現。另可存取影像，擷取影像中質點計算流場中的速度向量。



## 第四章 實驗結果與討論

為了探討給定一功率，不同表面親疏水性與液體性質對熱汽泡成長速率、體積與形狀的影響，關鍵幾何參數的選取是非常重要的。本實驗預計選取的參數有：輸入功率、加熱器表面靜態接觸角、液體黏度、熱汽泡體積、熱汽泡頂端高度、熱汽泡與加熱表面接觸直徑，如圖 4.1 所示。

### 4.1 液體黏度量測結果

在液體黏度方面，利用奧士瓦黏度計觀察去離子水和不同蔗糖濃度液體如 10%、20%、30%、40%、45%與 50%流經固定體積的時間，再使用比重計量測去離子水和不同蔗糖濃度液體與水在 4°C 時密度比值，以相對黏度公式  $\eta = \eta_0 \times \frac{\rho t}{\rho_0 t_0}$ ，算出待測液體的黏度。其中  $\eta_0$ 、 $\rho_0$ 、 $t_0$  為標準液體的黏度、密度、流經時間， $\eta$ 、 $\rho$ 、 $t$  為待測液體黏度、密度、流經時間。量測結果以去離子水而言，其密度比值為 1 當作  $\rho_0$ ，又以流經奧士瓦黏度計固定體積的時間當作  $t_0$ ，並且黏度假設為 1cp，求得 10%、20%、30%、40%、45%與 50%蔗糖濃度分別為 1.29、2.2、2.76、5.16、8.31cp與 11.46 cp。

### 4.2 加熱器表面靜態接觸角量測結果

在靜態接觸角方面，以Ta-Al合金表面在未經任何處理時，去離子水在其表面之靜態接觸角約為53度，屬於親水性表面，如圖4.2所示，而以不同黏度所量測的靜態接觸角如圖4.3所示。針對表面改質，利用離子蝕刻系統以氧為工作氣體，壓力控制在26.7 Pa，流量為30 sccm，功率為70 W，蝕刻時間為3分鐘時，可得靜態接觸角為49度之表面，如圖4.4所示，而以不同黏度所量測的靜態接觸角如圖4.5所示。而以塗佈鐵氟龍液體的加熱器表面，可得靜態接觸角為113度之表面，如圖4.6所示，而以不同黏度所量測的靜態接觸角如圖4.7所示。我們可以發現，在未經任何處理的Ta-Al合金表面與利用離子蝕刻系統進行表面改質的Ta-Al合金表面當低黏度時，其靜態接觸角最小，而隨著黏度增加靜態接觸角也跟著增加。而塗佈鐵氟龍液體的Ta-Al合金表面在不同黏度下所量測的靜態接觸角並無明顯的變化。在經過氧氣處理過的表面其靜態接觸角最高為49度，而以Ta-Al合金表面在未經任何處理的表面其靜態接觸角最高約為68度，以塗佈鐵氟龍液體的加熱器表面其靜態接觸角最高為115度。

#### 4.3 漸縮式加熱器熱汽泡成長結果與討論

本實驗觀測在加熱器大小為一致時採用一類似極長脈衝之連續式電壓輸入及給定一固定熱通量下，探討不同液體黏

度與不同表面親疏水性對熱汽泡生成與成長過程的影響，並界定使汽泡驅動的可行範圍。圖 4.8 為漸縮式加熱器在工作液體為 1cp，靜態接觸角為 53 度，使汽泡初始成核的熱汽泡生成過程側向拍攝視點之隨時間變化圖，輸入功率固定為 0.55W，圖中箭頭的方向為重力方向。圖 4.9 為在不同黏度下使汽泡初始成核的輸入功率變化圖。從圖中可以發現，汽泡初始成核過程在 1cp 到 2.76cp 時會受到液體黏度的影響。當黏度越高時，要使汽泡初始成核的輸入功率相對也要越高，而在 2.76cp 到 11.46cp 時，要使汽泡初始成核的輸入功率並無明顯增加。圖 4.10 至 4.15 為加熱器表面在 1cp、1.29cp、2.2cp、2.76cp、5.16cp、11.46cp 液體，輸入功率固定為 0.8W，熱汽泡生成過程側向和上方與側向同步拍攝視點之隨時間變化圖。從熱汽泡生長過程可以發現，當改變液體黏度時，熱汽泡上方有明顯的薄膜產生，此現象為汽泡上方液體的冷凝作用，而在加熱器表面與熱汽泡附近會有 Marangoni 對流現象。當汽泡持續生長而冷凝現象與 Marangoni 對流會逐漸消失。圖 4.16 為 Barthes 等人[19]觀察熱汽泡在連續固定功率面向下的加熱器表面，熱汽泡成長隨時間變化圖。由觀察結果發現，加熱器表面與熱汽泡附近有 Marangoni 對流現象，然後振盪現象發生並在液體與汽泡而的界面會產生冷凝現象，與本文所觀察到的現象是相似的。在黏度為 5.16cp 和 11.46cp 時，在持續

輸入電壓的情況下，汽泡上方的冷凝現象與 Marangoni 對流現象會持續發生，導致無法分析熱汽泡頂端高度、熱汽泡與加熱表面接觸直徑。在圖 4.17 中，使 CCD camera 的拍攝時間拉長觀察持續輸入電壓與圖 4.14 是同樣的時間，之後把電壓輸入訊號關掉並持續觀察對熱汽泡生長行為的影響。從熱汽泡生長過程可以發現當電壓訊號關掉後其汽泡上方的冷凝現象與 Marangoni 對流現象會逐漸消失，並使汽泡整體形狀可以明顯的觀察。

圖 4.18 為漸縮式加熱器在工作液體為 1cp，靜態接觸角為 49 度，使汽泡初始成核的熱汽泡生成過程側向拍攝視點之隨時間變化圖，輸入功率固定為 0.45W。圖 4.18 的箭頭方向代表為移動的方向，從熱汽泡生長過程可以發現，在生長初期汽泡會有持續的振盪現象發生，之後停止振盪並穩定的生長，並在 1.29、2.2cp 的汽泡初始成核中也有發生。此振盪現象是相似圖 4.16 為 Barthes 等人[19]觀察的結果。圖 4.19 為利用離子蝕刻系統以氧為工作氣體，蝕刻時間為 3 分鐘時的 Ta-Al 合金表面在不同黏度下使汽泡初始成核的輸入功率變化圖。從圖中可以發現，汽泡初始成核過程也會受到液體黏度的影響。並與未處理的表面比較時，其所需功率會下降。圖 4.20 和 4.21 為利用離子蝕刻系統以氧為工作氣體，蝕刻時間為 3 分鐘時的 Ta-Al 表面在 1cp、1.29cp 液體，輸入功率固定為 0.8W，熱汽泡生成過程

側向和上方與側向同步拍攝視點之隨時間變化圖。從熱汽泡生長過程中發現，在工作液體為 1cp 時，生長初期汽泡也會有持續的振盪現象發生。而在改變液體黏度時，熱汽泡上方和加熱器表面與汽泡附近也會有 Marangoni 對流現象。當汽泡持續生長，冷凝現象與 Marangoni 對流也會逐漸消失，此現象是相似圖 4.16 為 Barthes 等人[19]觀察的結果。

圖 4.22 為漸縮式加熱器在工作液體為 1cp，靜態接觸角為 113 度，使汽泡初始成核的熱汽泡生成過程側向拍攝視點之隨時間變化圖，輸入功率固定為 0.6W。圖 4.23 為塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面在不同黏度下使汽泡初始成核的輸入功率變化圖。從圖中可以發現，汽泡初始成核過程在改變液體黏度時影響不是很大。當黏度增加，要使汽泡初始成核的輸入功率並沒有明顯變化。圖 4.24 至 4.30 為塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面在 1cp、1.29cp、2.2cp、2.76cp、5.16cp、8.31cp、11.46cp 液體，輸入功率固定為 0.8W，熱汽泡生成過程上方與側向同步拍攝視點之隨時間變化圖。在實驗過程中，當輸入一類似極長脈衝之連續式電壓時，發現汽泡有位移現象。其原因可能為塗佈 Teflon 溶液時的不均勻性所導致，並且在加熱器中心附近產生汽泡與加熱器中心汽泡有聚集現象而呈現長方形形狀。而從熱汽泡生長過程可以發現，當改變液體黏度時，熱汽泡上方有明顯的薄膜



產生，此現象是相似圖 4.16 為 Barthes 等人[19]觀察的結果。

圖 4.31 左上方為 Deng[15]研究在 ssDNA 溶液中添加蔗糖改變它的黏度觀察汽泡初始成核所需功率與右方和左下方的本文實驗結果比較。從圖中可以發現，在利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面和塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面在相對黏度為 1.29 的相對功率與文獻中比對是一致的。而在相對黏度為 2.76 之前，其未經任何處理的 Ta-Al 合金表面的相對功率變化最大，而在塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面在不同黏度下的相對功率沒有明顯變化。而在 5.16 與 11.46 的相對黏度中，其初始成核功率在不同親疏水性表面下沒有明顯變化。

#### 4.4 漸縮式加熱器可行範圍的界定與汽泡飛濺現象

在未經任何處理的 Ta-Al 合金表面上，黏度為 1cp 液體，往上增加輸入電壓觀察熱汽泡生長過程，發現在 1.6W 時其加熱器因功率過大會燒掉的現象，而使加熱器無法重複使用。而在改變液體黏度時，發現在輸入 1.6W 之前會有氣泡飛濺產生，此現象為作用於汽泡的作用力不平衡而產生。圖 4.31 至 4.35 為加熱器表面在 1.29cp、2.2cp、2.76cp、5.16cp、11.46cp 液體，使汽泡飛濺的最低輸入功率，熱汽泡生成過程上方與側向同步拍攝視點之隨時間變化圖。從圖中可以發現，在黏



度為 1.29cp 時，生成初期會有汽泡往旁邊飛濺，因在加熱器表面有一 Marangoni 對流現象使飛濺汽泡往加熱器部分聚集成汽泡。而當黏度增加到 2.2cp 時，因密度差值增加而有浮力的運動。

由圖 4.33 中顯示汽泡會受浮力運動與 Marangoni 對流現象影響使汽泡漂浮在液體中，當左右汽泡越靠近時，最後會使汽泡在加熱器表面聚集和生長。而在 2.76cp 時，汽泡飛濺的方向都往加熱器左右並有比較大顆汽泡產生，而汽泡並不會在加熱器部分聚集。5.16、11.46cp 時，汽泡飛濺的方向都在加熱器的上方並且飛濺的汽泡體積比較小。

在利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面上，黏度為 1cp 液體，往上增加輸入電壓觀察熱汽泡生長過程，發現在生長過程都有振盪現象。圖 4.37 至 4.41 為利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面在 1.29cp、2.2cp、2.76cp、5.16cp、11.46cp 液體，使汽泡飛濺的最低輸入功率，熱汽泡生成過程上方與側向同步拍攝視點之隨時間變化圖。從圖中可以發現，在黏度為 1.29cp 時，生成初期會有汽泡往旁邊飛濺，因在加熱器表面有一 Marangoni 對流現象使飛濺汽泡往加熱器部分聚集成汽泡並在生長過程中有振盪的現象。在 2.2、2.76cp 時，汽泡飛濺的方向都往加熱器左右並有比較大顆汽泡產生，而汽泡並不會在加熱器部分聚集。而在 5.16、11.46cp 時，汽泡飛濺的方向都在加熱器的上方並且飛濺

的汽泡體積比較小。

圖 4.42 和 4.43 分別為界定未經任何處理的 Ta-Al 合金表面與利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面使汽泡驅動的可行功率範圍在不同黏度下的變化圖。從圖中可以發現，隨著黏度增加可行的範圍會減小，其原因為黏度增加時汽泡生長阻力增加與浮力增加的影響。而在比較同一黏度下未經任何處理的 Ta-Al 合金表面與利用離子蝕刻系統進行表面改質 Ta-Al 合金表面功率的可行範圍時，發現其值差異不大。圖 4.44 至 4.49 為在未經任何處理的 Ta-Al 合金表面與利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面上不同黏度下都會有飛濺現象的功率，使用於塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面熱汽泡生成過程上方與側向同步拍攝視點之隨時間變化圖。從圖中可以發現，汽泡生長過程飛濺現象較少發生，但在不同黏度下幾乎都有會冷凝和汽泡位移現象。而在黏度 11.46cp 時，功率在 0.95W 時無明顯位移。在熱汽泡式噴墨頭的應用中，汽泡行為是關連到液滴噴出的特徵，而汽泡位移會影響液滴噴出的準直性。圖 4.50 為塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面使汽泡驅動的可行功率範圍在不同黏度下的變化圖。從圖中可以發現，疏水性表面的在 1cp、1.29、2.2、2.76、5.16cp 時的可行範圍都比親水性表面小，而在高黏度 11.46cp 時，親水性表面比疏

水性表面可行範圍小。

圖 4.51 和 4.52 分別為界定未經任何處理的 Ta-Al 合金表面與利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面的汽泡振盪與飛濺現象。從圖中可以發現，汽泡振盪現象只發生在經過表面改質的 Ta-Al 合金表面，並只在黏度為 1、1.29、2.2cp 時。而在圖中黑色圈部分為汽泡有飛濺現象而之後在加熱器部分會有汽泡聚集，紅色圈部分為汽泡有飛濺現象而之後在加熱器部分沒有汽泡聚集。從圖中可以發現，汽泡的聚集現象只發生在未經任何處理的 Ta-Al 合金表面黏度為 1.29、2.2cp 時和利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面黏度為 1.29cp 時。

#### 4.5 漸縮式加熱器可行範圍的幾何參數討論

圖 4.53 至 4.55 分別為輸入功率為 0.6W、0.8W、1W 時，在可行汽泡驅動的範圍中，未經任何處理的 Ta-Al 合金表面、利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面與塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面，熱汽泡汽固界面接觸直徑隨時間的變化圖。其中不同顏色的點代表不同親疏水性的加熱器，不同顏色的虛線代表不同黏度。從圖中可以發現，疏水性表面的接觸直徑最長，越親水則接觸直徑越短。在同一個功率下，不同黏度的液體會影響使長度明顯縮短，以 0.6W 為例，當黏度由 1cp 到 1.29cp

時，疏水性表面接觸直徑縮短 3 倍，親水性表面的變化分別為 1.9 與 1.3 倍。當增加功率從 0.6W 到 1W 時，在 1cp 和 1.29cp 液體中未經任何處理 Ta-Al 合金表面接觸直徑變化分別增加為 1.47 與 1.7 倍比利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面接觸直徑變化分別增加為 1.1 與 1.3 倍大。

圖 4.56 至 4.58 分別為輸入功率為 0.6W、0.8W、1W 時，在可行汽泡驅動的範圍中，未經任何處理的 Ta-Al 合金表面、利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面與塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面，熱汽泡頂端高度隨時間的變化圖。從圖中可以發現，親水性表面的熱汽泡頂端最高，越疏水則熱汽泡頂端高度越低。在同一功率如 0.6W 時，當黏度由 1cp 到 1.29cp 時，利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面的熱汽泡頂端高度變化縮短 1.16 倍，而未經任何處理 Ta-Al 合金表面與塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面縮短為 2.55 倍。當增加功率從 0.6W 到 1W 時，在 1cp 液體中利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面的熱汽泡頂端高度變化增加為 1.21 倍比未經任何處理 Ta-Al 合金表面熱氣泡頂端高度變化增加為 1.13 倍大。

為了計算熱汽泡成長過程體積之變化，熱汽泡之體積採用球蓋

體積計算公式來近似，球蓋體如圖 4.59 所示體積公式為：

$$V_{cap} = \frac{1}{6}\pi h(3a^2 + h^2)。$$

其中 a 為熱汽泡固界面接觸半徑，h 為熱汽泡頂端高度。

圖 4.60 至 4.62 分別為輸入功率為 0.6W、0.8W、1W 時，在可行汽泡驅動的範圍中，未經任何處理的 Ta-Al 合金表面、利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面與塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面，熱汽泡體積隨時間的變化圖。從圖中可以發現，親水性表面的熱汽泡體積大於疏水性表面。在同一功率如 0.6W 時，當黏度由 1cp 到 1.29cp 時，利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面的熱汽泡體積變化縮小 1.11 倍，而未經任何處理 Ta-Al 合金表面的熱汽泡體積變化縮小 14 倍，塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面縮小為 23.3 倍。當增加功率從 0.6W 到 1W 時，在 1cp 液體時利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面的體積變化為 1.76 倍比未經任何處理 Ta-Al 合金表面的體積變化為 1.72 倍大。

#### 4.6 無因次參數討論

實驗中，我們討論無因次參數來描述作用於液體中汽泡的作用力。其中雷諾數(Reynolds number)的公式為  $\frac{VL}{\nu_l} = \frac{\text{慣性力}}{\text{黏滯力}}$ ， $\nu_l = \frac{\mu_l}{\rho_l}$  為動量擴散率，L 為加熱器長度，V 為汽泡成長的速度。在此我們先



算出在可行功率範圍的 1W，未經任何處理的 Ta-Al 合金表面在去離子水中汽泡生長速度為  $14.15 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ， $\nu_1$  為  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，加熱器長度為  $80 \mu\text{m}$ ，代入算出  $Re_i$  數為  $1.132 \times 10^{-3}$ 。而在 1.29cp 汽泡生長速度為  $4.875 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ， $\nu_1$  為  $1.24 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，代入算出  $Re_i$  數為  $0.39 \times 10^{-3}$ 。由結果我們可知  $Re_i$  數遠小於 1，表示在液體中作用於汽泡上的慣性力遠小於黏滯力。

普蘭度數(Prandtl number)的公式為  $\frac{\nu_1}{\alpha} = \frac{\text{動量擴散率}}{\text{熱擴散率}}$ ，其中  $\alpha = \frac{k}{\rho C}$ ，k 為熱傳遞係數、C 為比熱。 $\nu_1$  從 1cp 到 11.46cp 為  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  到  $9.31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，代入算出 Pr 數為 7.1 到 78.8。由結果我們可知 Pr 數大於 1，表示動量擴散率大於熱擴散率，液體中主要藉由液體的流動來傳遞熱量。

革拉秀夫數(Grashof number)的公式為  $\frac{gL^3\beta(T_w - T_\infty)}{\nu_1^2} = \frac{\text{浮力}}{\text{黏滯力}}$ ，其中  $\beta$  為體積膨脹性(volume expansivity)，表示為  $\beta = \frac{1}{T_f}$ ，在計算時液體以薄膜溫度為  $T_f$ ，而  $T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2}$ ，其中  $T_w$  為加熱器溫度， $T_\infty$  為液體溫度，在此我們假設加熱器溫度為 556K，液體溫度為 300K。 $\nu_1$  從 1cp 到 11.46cp 為  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  到  $9.31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，代入算出  $Gr_i$  數為 2.99 到 0.0345。 $Gr_i$  數為主導自由對流之無因次參數，

由結果我們可以知道浮力在此液體中的影響隨黏度上升而下降。

瑞里數(Rayleigh number)的公式為  $Gr_l \cdot Pr = \frac{gL^3\beta(T_w - T_\infty)}{\nu\alpha}$ ，通

常用於區分自由對流為層流或紊流。由上述兩個無因次參數的相乘可得到  $Ra_l$  數在 1cp 到 11.46cp 為 21.23 到 2.71。表 4.1 為 Pr 數、 $Gr_l$  數和  $Ra_l$  數在不同黏度下的值。

邦德數(Bond number)的公式為  $\frac{s}{L} = \frac{\text{重力}}{\text{表面張力}}$ ，其中 s 為加熱器

上液體的高度為 2mm。  $L = \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_V)} \right]^{1/2}$  為毛細長度，其中  $\sigma$  為表面

張力，我們在此使用水在溫度 300K 的表面張力為 0.073N/m。  $\rho_V$  使用水在溫度 556K 的密度為 3.57kg/m<sup>3</sup>，  $\rho_L$  使用 1cp 到 11.46cp 的密度為 1000kg/m<sup>3</sup> 到 1230 kg/m<sup>3</sup>。代入算出 Bo 數為 0.73 到 0.81。由文獻顯示，在微流道中 Bo 數假設小於 0.05，重力效應可以忽略；Bo 數在 0.05 到 3 之間，表面張力為主導並且重力效應小；Bo 數在 3 以上表面張力相較於重力效應是小的。由實驗結果我們可得知在此液體中的表面張力為主導。表 4.2 為 Bo 數在不同黏度下的值。

Capillary number 的公式為  $\frac{\mu V}{\sigma} = \frac{\text{黏滯力}}{\text{表面張力}}$ ，代入在可行功率範圍

圍的 0.6W，不同親疏水性表面在去離子水中的汽泡成長速度。在未經任何處理的 Ta-Al 合金表面成長速度為 3.785×10<sup>-6</sup>m/s，利用離子蝕



刻系統進行表面改質的Ta-Al合金表面成長速度為  $3.99 \times 10^{-6} \text{m/s}$ ，塗佈鐵氟龍液體的Ta-Al合金表面成長速度為  $6.53 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 。代入算出Ca數在未經任何處理的Ta-Al合金表面為  $51 \times 10^{-9}$ ，利用離子蝕刻系統進行表面改質的Ta-Al合金表面為  $54 \times 10^{-9}$ ，塗佈鐵氟龍液體的Ta-Al合金表面為  $89 \times 10^{-9}$ 。而由文獻顯示一低Ca數，Ca數小於  $10^{-5}$ 時，在表面的流動是由毛細力主導。

馬諾哥尼數(Marangoni number)普遍用來表示熱張力對流的強度可由  $Re \cdot Pr$ 來計算，經由計算可得知在未經任何處理的Ta-Al合金表面  $1 \text{cp}$ 時為  $8.03 \times 10^{-3}$ ， $1.29 \text{cp}$ 為  $3.432 \times 10^{-3}$ 。由文獻顯示穩定的Marangoni對流只發生在當Ma數低於臨界Ma數時，若自由表面溫度差擾動增加，使Ma數超過臨界值，液體將由穩態熱張力對流轉為非穩態之振盪性熱張力對流。並且臨界Ma數會隨Pr數增加而提高，也就是說，在其他條件都固定的情況下，Pr數越高，越不容易產生非穩態之振盪性熱張力對流。由Pr數顯示黏度越高則值越大，則越不容易生非穩態之振盪性熱張力對流，與實驗結果比對是一致的。

## 第五章 結論

在微小加熱器熱汽泡生長過程的實驗中，我可以得到以下的結論：1. 當增加黏度時，汽泡會有冷凝現象與 Marangoni 對流現象發生，而塗佈 Teflon 溶液的加熱器表面，會有汽泡位移現象。2. 在界定汽泡的可行功率範圍時，1cp、1.29cp、2.2cp、2.76cp、5.16cp 下親水性表面均會大於疏水性表面，但在 11.46cp 時，疏水性表面會大於親水性表面。3. 在經過離子系統表面改質的加熱器中，1cp、1.29cp、2.2cp 時會有汽泡振盪的現象；在未經處理的加熱器表面黏度為 1.29cp、2.2cp 和利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面黏度為 1.29cp 中汽泡飛濺並有汽泡聚集現象。4. 在可行的汽泡驅動範圍中，在同一功率下改變液體黏度時，疏水性表面的熱汽泡汽固界面接觸直徑與熱汽泡頂端高度的變化比親水性表面大。在熱汽泡體積方面，親水性表面熱汽泡體積均會大於疏水性表面熱汽泡體積。在同一功率下，改變黏度的液體中，疏水性表面熱汽泡體積變化比親水性表面大。當增加輸入功率從 0.6W 到 1W 時，親水性表面的熱汽泡體積變化會大於疏水性表面熱汽泡體積；增加液體黏度時，因冷凝現象與作用於汽泡的阻力使汽泡體積有明顯縮小。

## 參考文獻

- [1]張志誠, 微機電技術, 商周出版社, 台北市, 2002年.
- [2]T.R.Hsu, MEMS and Microsystem: design and manufacture, McGraw-Hill, 2002年.
- [3]Y.Hong, N.Ashgriz, J.Andrews, “Experimental study of bubble dynamics on a micro heater induced by pulse Heating,” Journal of Heat Transfer 126, 259-271, (2004).
- [4]潘欽, 沸騰熱傳與雙相流, 俊傑書局股份有限公司, 台北市, 2001年.
- [5]J.Li, G.P.Peterson, “Microscale heterogeneous boiling on smooth surfaces—from bubble nucleation to bubble dynamics,” International Journal of Heat and Mass Transfer 48, 4316 - 4332, (2005).
- [6]L.H.Chien, R.L.Webb, “A parametric study of nucleate boiling on structured surfaces, part II: effect of pore diameter and pore pitch,” Experimental Thermal and Fluid Science 16, 177-186, (1998).

- [7] M. G. Cooper, A. J. P. Lloyd, “Microlayer in nucleate pool boiling,” International Journal of Heat and Mass Transfer 12, 895–913, (1969).
- [8] S. J. D. Van Stralen, R. Cole, W. M. Sluyter, and M. S. Sohal, “Bubble growth rates in pure and binary systems. Combined effect of relaxation and evaporation microlayers,” International Journal of Heat and Mass Transfer 18, 655–669, (1975).
- [9] V. P. Carey, “Liquid–Vapor Phase–Change Phenomena” , Hemisphere Publishing Corp, ” Washington, DC, 1992.
- [10] H. J. Ivey, “Relationships between bubble frequency, departure diameter, and rise velocity in nucleate boiling,” International Journal of Heat and Mass Transfer 10, 1023–1040, (1967).
- [11] S. V. Gnyloskurenko, A. V. Byakova, O. I. Raychenko, and T. Nakamura. “Influence of hydrophilic conditions on bubble formation at orifice in an inviscid liquid. Transformation of bubble shape and size,” Colloid and

- Surfaces A: physicochem. Eng. Aspects, 218, 73-87, (2003).
- [12] J. Li, G.P. Peterson, P. Cheng, "Dynamic characteristics of transient boiling on a square platinum," International Journal of Heat and Mass Transfer 51, 273-282, (2008).
- [13] I. D. Yang, F. Tseng, C. M. Chang, C. C. Chieng, "Microbubble formation dynamics under high heat flux on heaters with different aspect ratios," Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering 10, 1-28 (2005).
- [14] J. H. Tsai, L. Lin, "Transient thermal bubble formation on polysilicon micro-resistors," Journal of Heat Transfer 124, 375-382 (2002).
- [15] P. Deng, Y. K. Lee, and P. Cheng, "Viscosity effects on micro bubble actuator in ssDNA solutions," IEEE MEMS 17, 292-295 (2004).
- [16] P. Deng, Y. K. Lee, and P. Cheng, "Micro bubble dynamics in DNA solutions," Journal of Micromechanics and Microengineering 14, 693-701 (2004).
- [17] 殷孟雲, 噴墨印表機設計原理, 全華科技圖書股份有限公司,

台北市, 2001 年.

- [18] H. Reinecke, N. Unal, R. P. Peters, F. Bartels, F. F. Noker, “Nozzle plate for a liquid jet print head,” United States Patent, Patent number: 5818479, Date of Patent: Oct. 6, 1998.
- [19] M. Barthes, C. Reynard, R. Santini and L. Tadriss, “Non-condensable gas influence on the Marangoni convection during a single vapor bubble growth in a subcooled liquid,” *A Letter Journal Exploring the Frontiers of Physics* 77, 1-5, (2007).
- [20] C. T. Avedisian, W. S. Osborne, F. D. McLeod, and C. M. Curley, “Measuring bubble nucleation temperature on the surface of a rapidly heated thermal ink-jet heater immersed in a pool of water,” *The Royal Society* 455, 3875-3899 (1999).
- [21] D. S. Wu, C. C. Chan, R. H. Horng, W. C. Lin, S. L. Chiu, Y. Y. Wu, “Structural and electrical properties of Ta-Al thin films by magnetron sputtering,” *Applied Surface Science* 144, 315 - 318 (1999).
- [22] 莊達人, VLSI製造技術, 高立圖書有限公司, 台北縣, 2005年.

表 4.1 Pr 數、 $Gr_i$  數和  $Ra_i$  數在不同黏度下的值

	1cp	1.29cp	2.2cp	2.76cp	5.16cp	11.46cp
Pr 數	7.1	8.8	15	19	35.4	78.8
$Gr_i$ 數	2.99	1.96	1.25	0.5	0.15	0.0345
$Ra_i$ 數	21.23	17.2	18.75	9.5	5.31	2.71



表 4.2 Bo 數在不同黏度下的值

	1cp	1.29cp	2.2cp	2.76cp	5.16cp	11.46cp
Bo 數	0.73	0.74	0.76	0.77	0.79	0.81



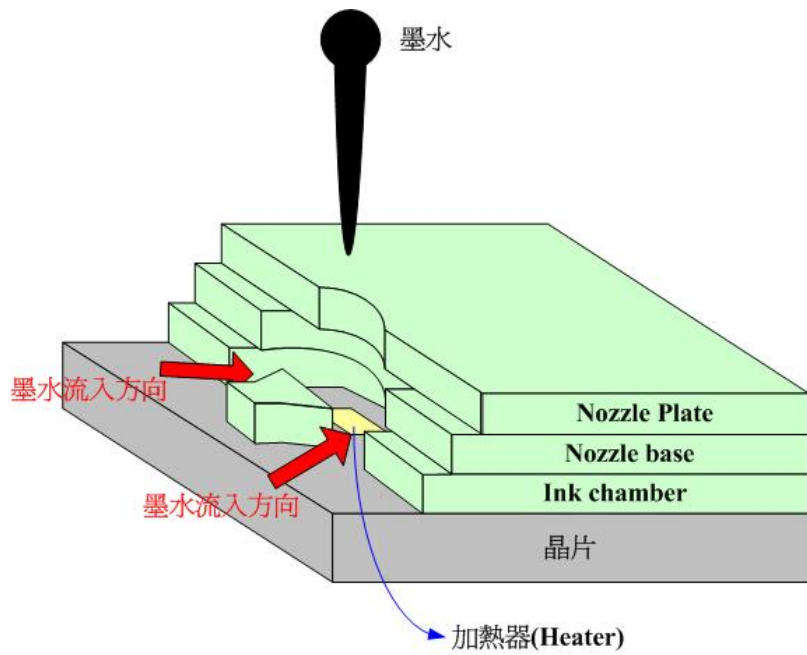


圖 1.1 熱汽泡式噴墨頭剖面圖[17]

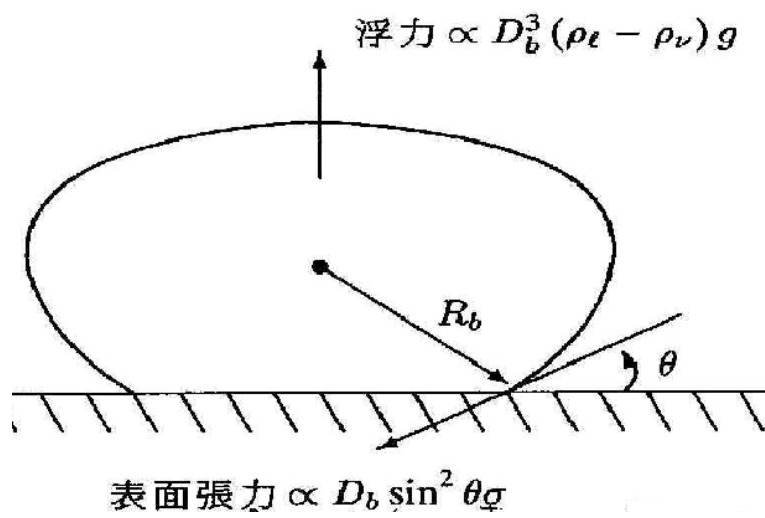


圖 1.2 池沸騰時汽泡的脫離與力量平衡[4]

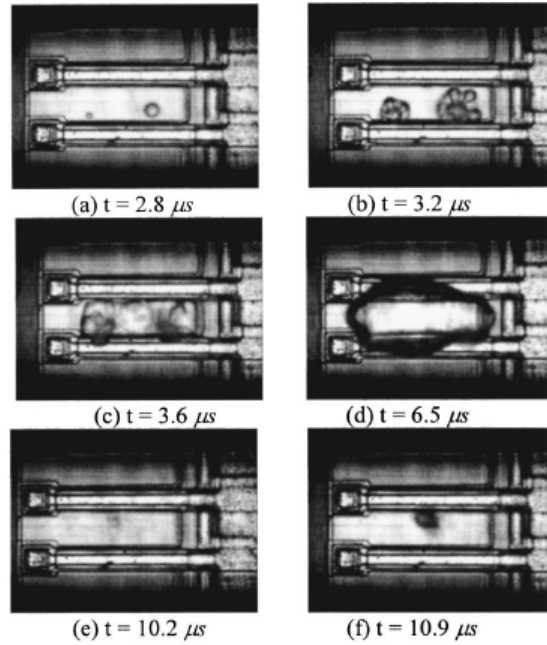


圖 1.3 Hong[3] 等人在 35V 與脈衝時間 4.4  $\mu\text{s}$  在大氣溫度 19°C 的上

視圖，加熱器尺寸為 25  $\mu\text{m}$  × 80  $\mu\text{m}$

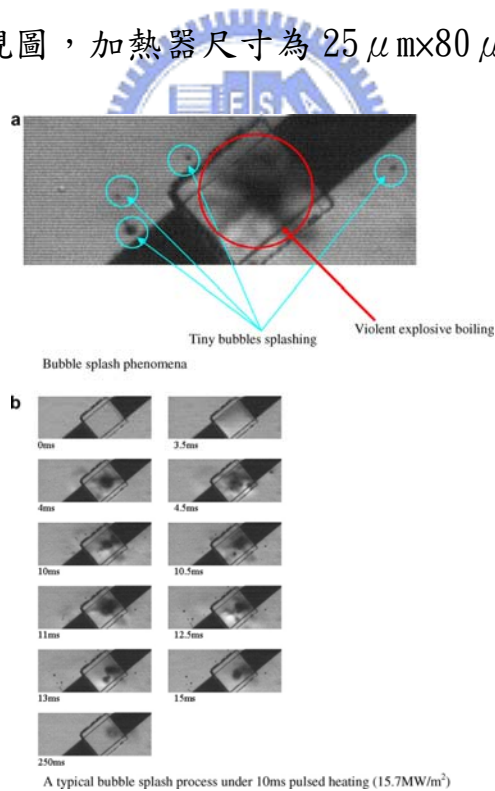


圖 1.4 Li[12] 等人在觀察單一微小加熱器 (100  $\mu\text{m}$  × 100  $\mu\text{m}$ ) 汽泡飛濺

的現象，脈衝寬度為 10ms，功率在 15.7  $\text{MW}/\text{m}^2$

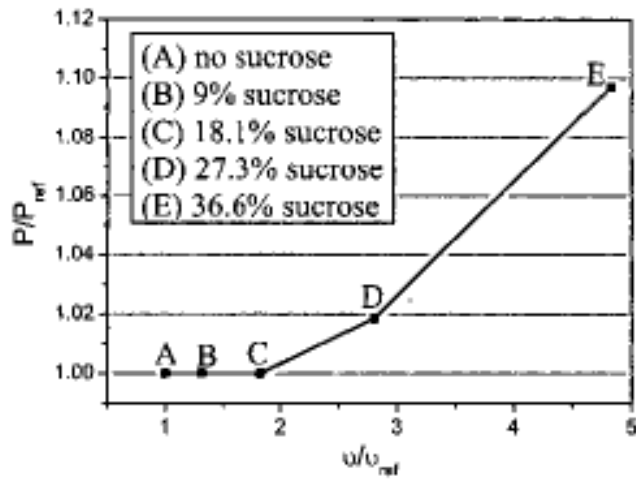


圖 1.5 Deng 等人[15] 等人觀察不同 ssDNA 濃度下觀察汽泡初始成核所

需功率

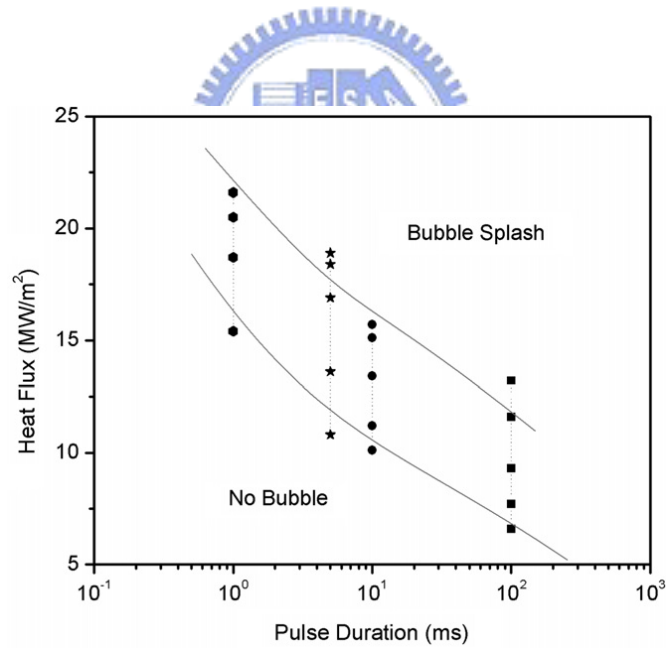


圖 1.6 Li [12] 等人研究界定在不同脈衝時間與功率的汽泡驅動可行範

圍

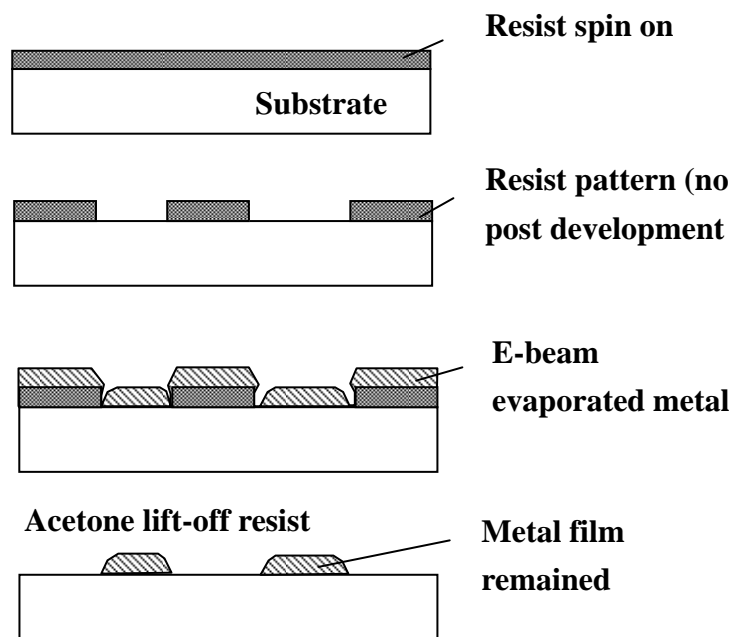


圖 2.1 光阻剝離法(Lift-off method)

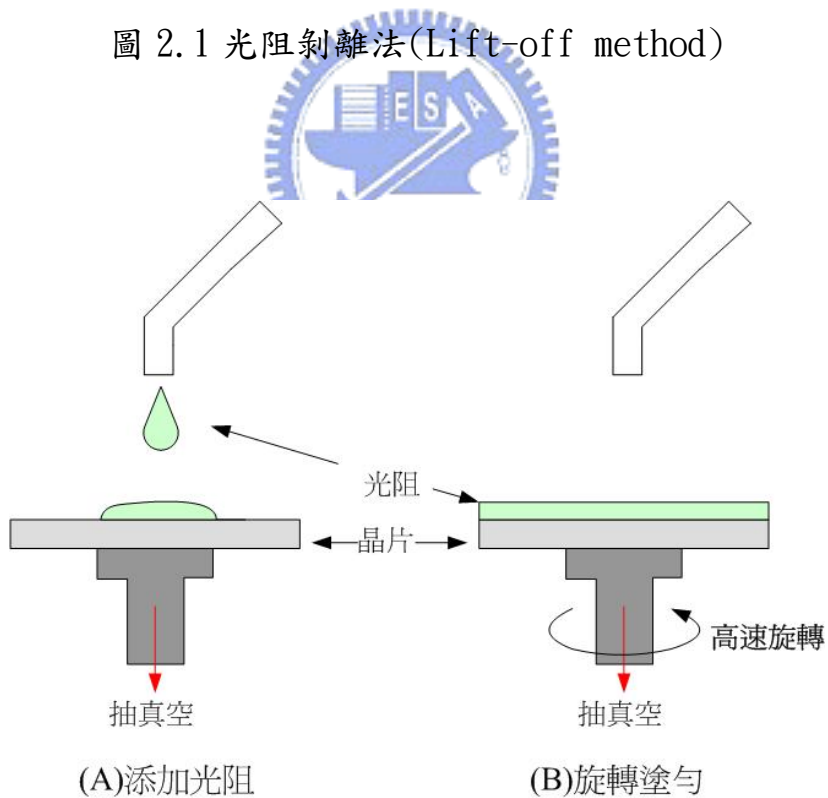


圖 2.2 光阻塗佈過程

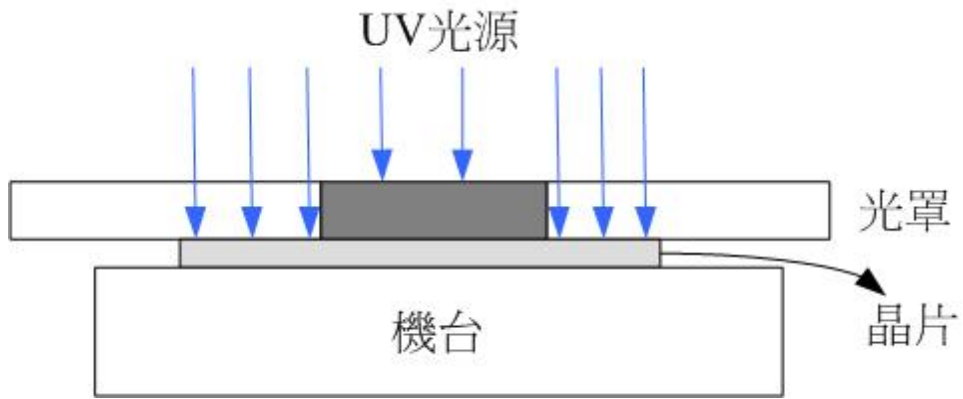


圖 2.3 接觸式曝光

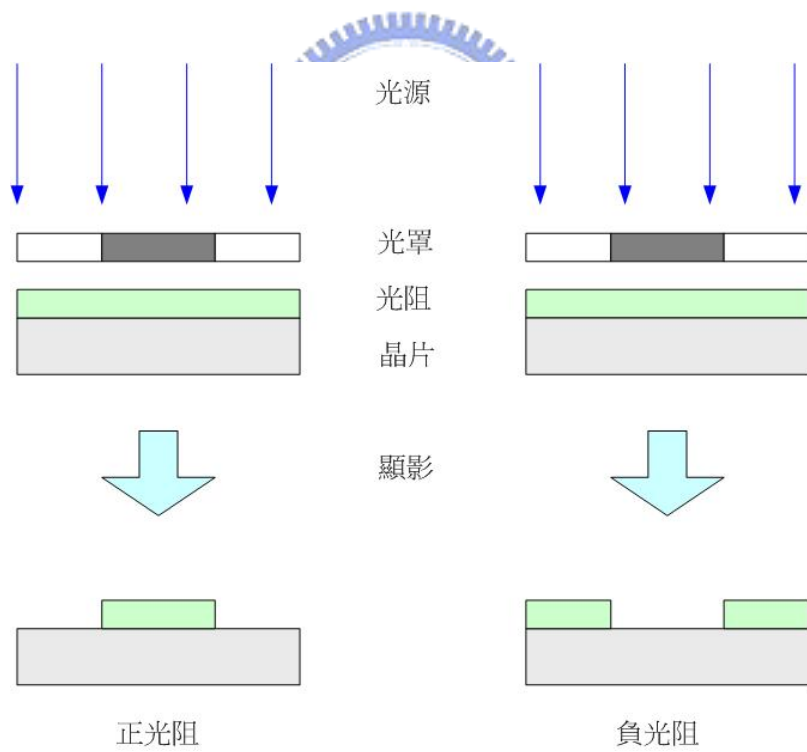


圖 2.4 正負光阻顯影後的差異圖

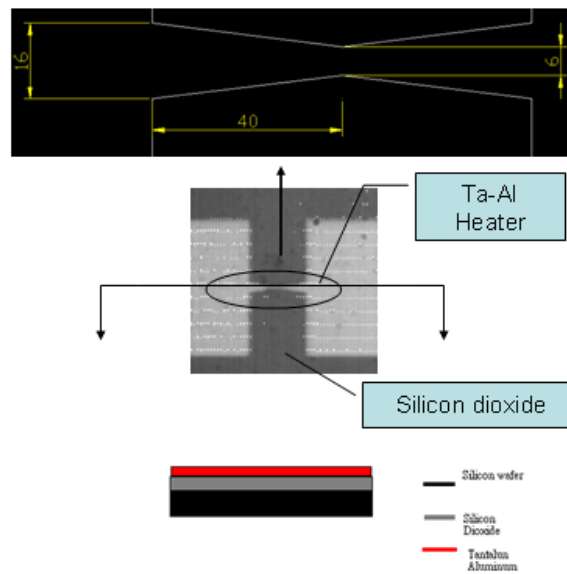


圖 2.5 漸縮式加熱器在光學顯微鏡下的上視圖(圖上方為加熱器尺寸，加熱器中心寬為  $6\ \mu\text{m}$ ，加熱器底部為  $16\ \mu\text{m}$ )，下圖為剖面圖，非真實尺寸(not to scale)

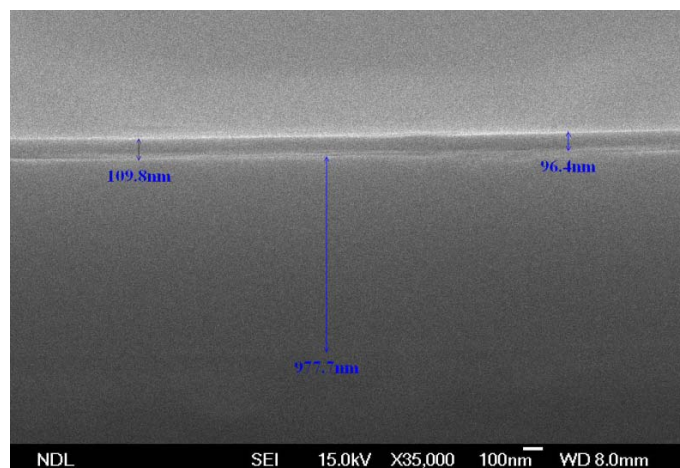


圖 2.6 為漸縮式加熱器的 SEM 圖

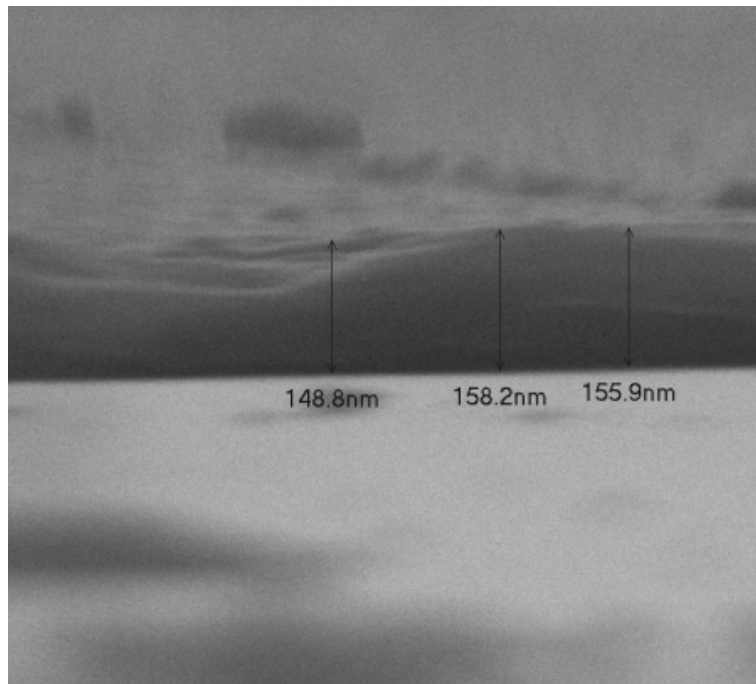


圖 2.7 為 Teflon 薄膜厚度所示





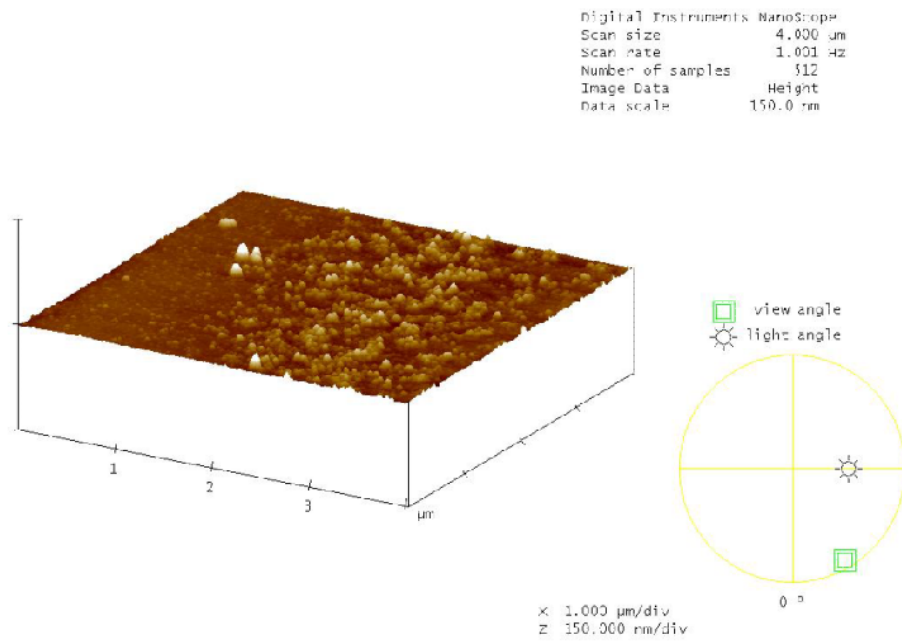


圖 2.8 未經任何處理的 Ta-Al 合金表面的表面粗糙度示意圖

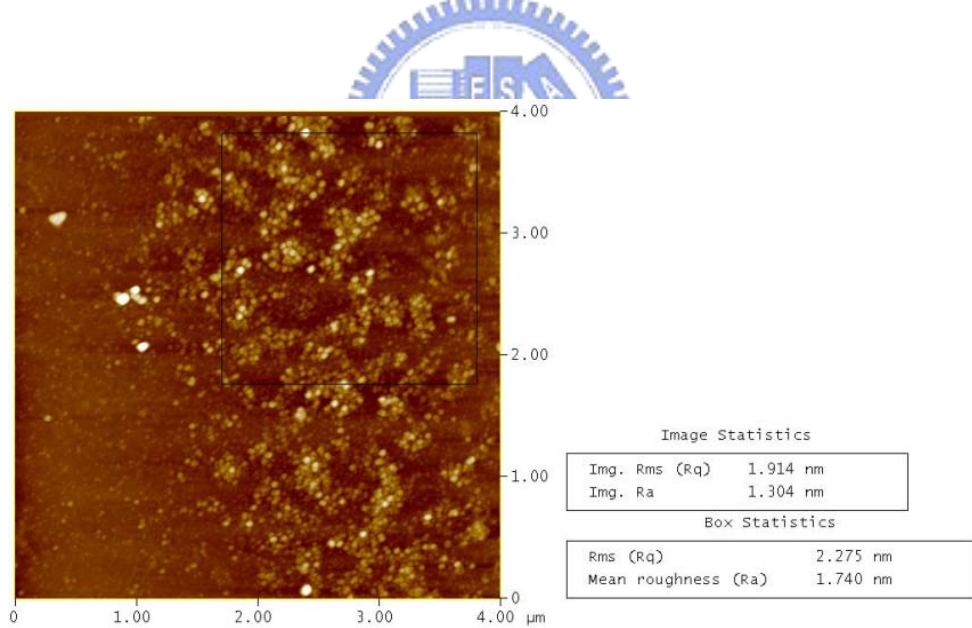


圖 2.9 未經任何處理的 Ta-Al 合金表面的表面粗糙度量測示意圖

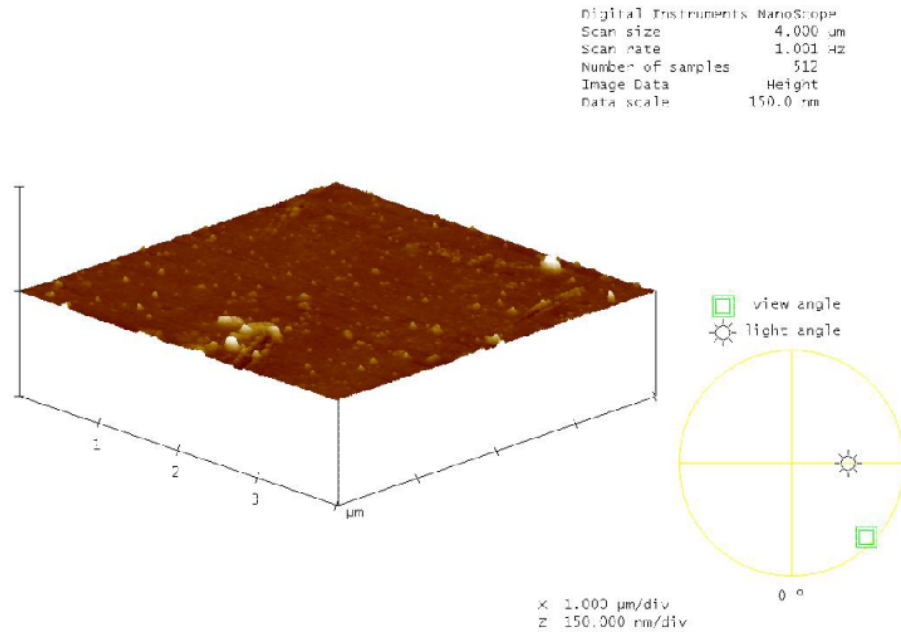


圖 2.10 利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面的表面粗

糙度示意圖

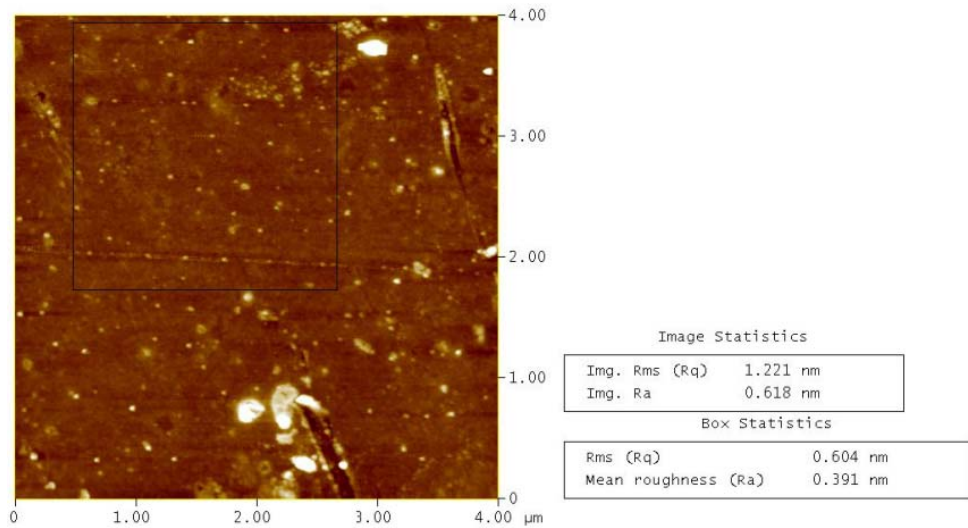


圖 2.11 利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面的表面粗

糙度量測示意圖

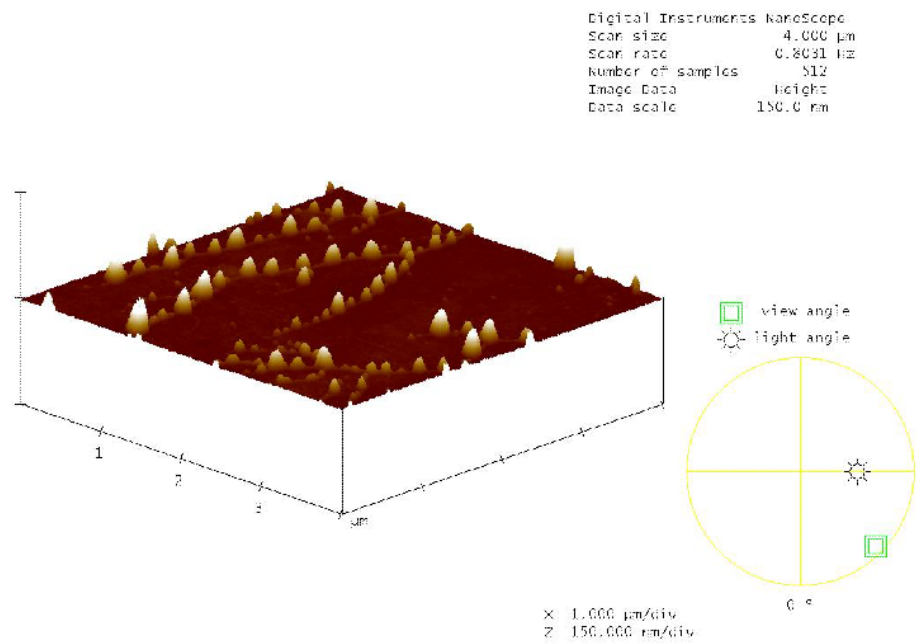


圖 2.12 塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面的表面粗糙度示意圖

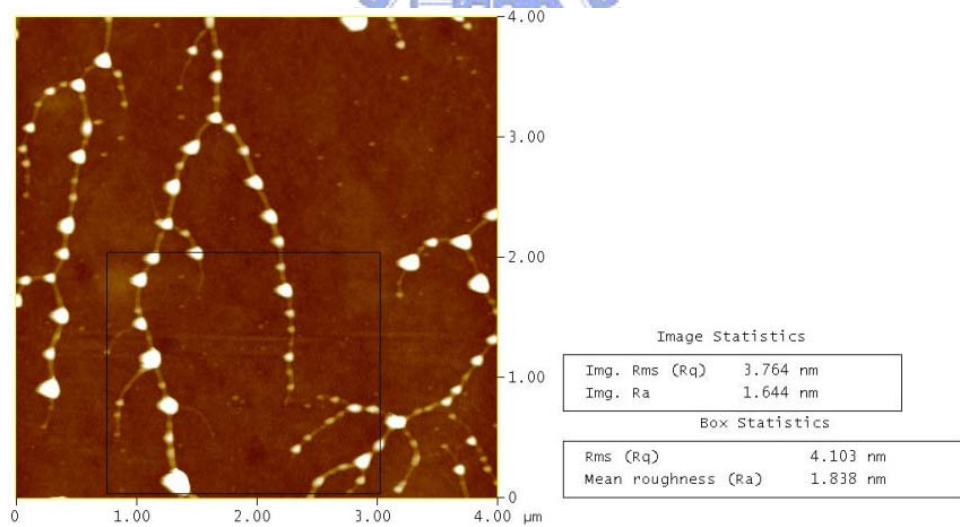


圖 2.13 塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面的表面粗糙度量測示意圖

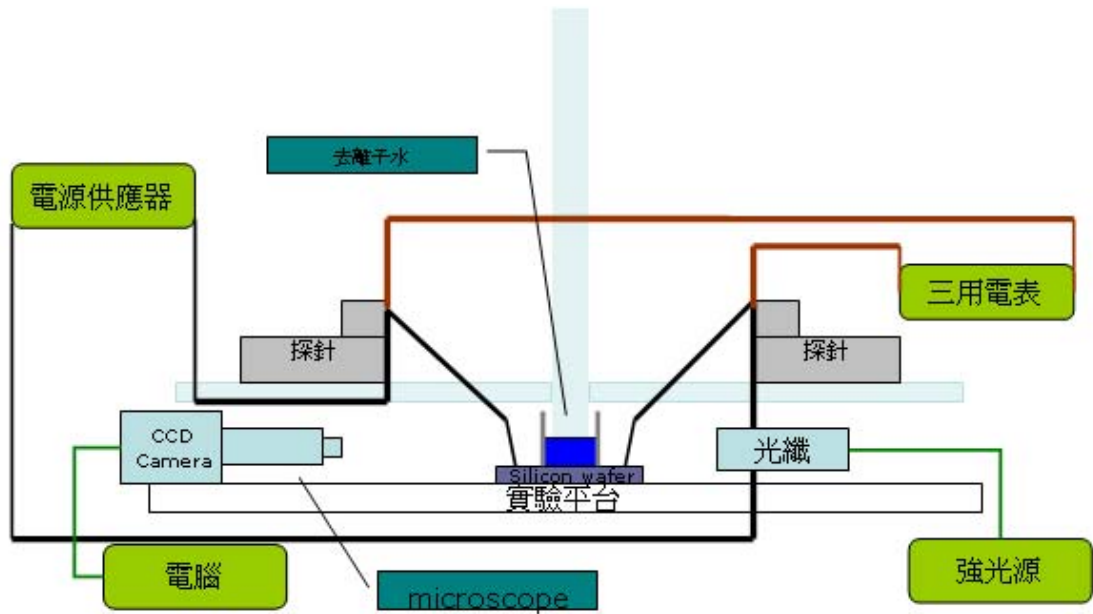


圖 3.1 側向拍攝式系統

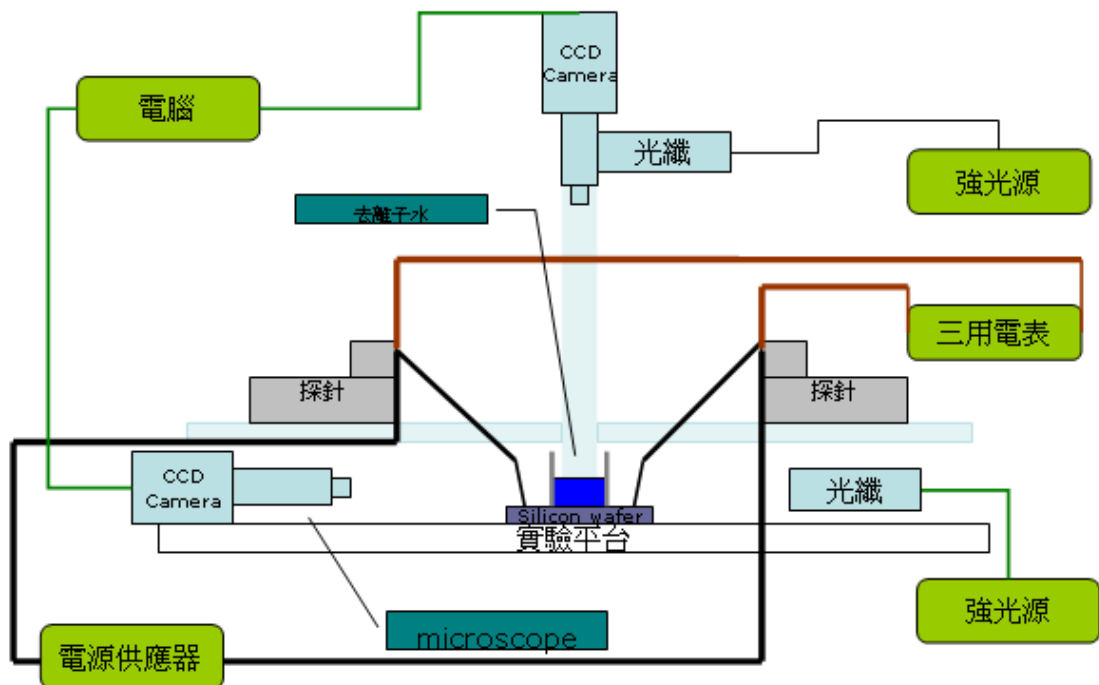


圖 3.2 上方與側向同步拍攝式系統

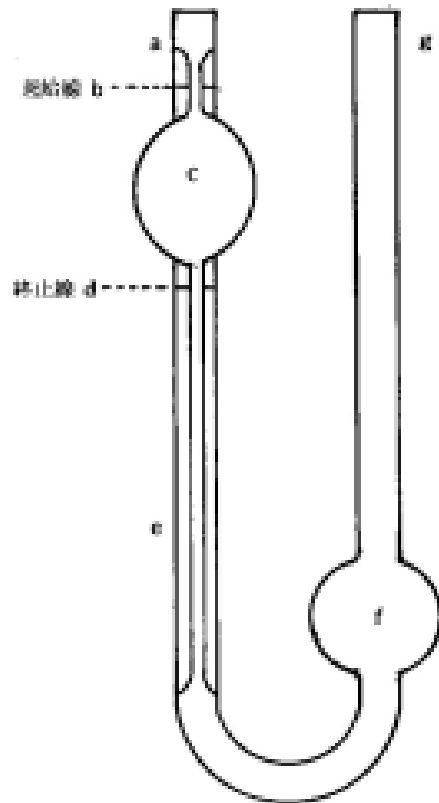


圖 3.3 奧士瓦黏度計



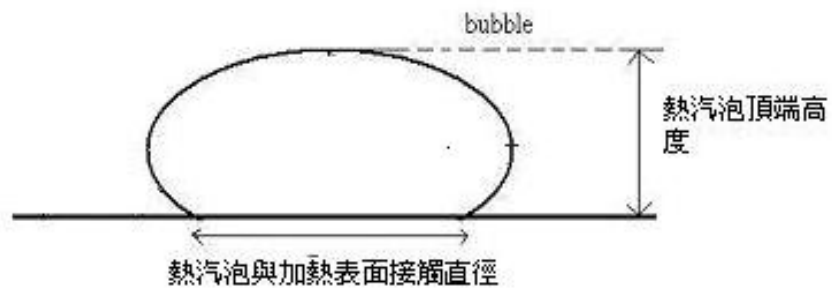


圖 4.1 幾何參數示意圖



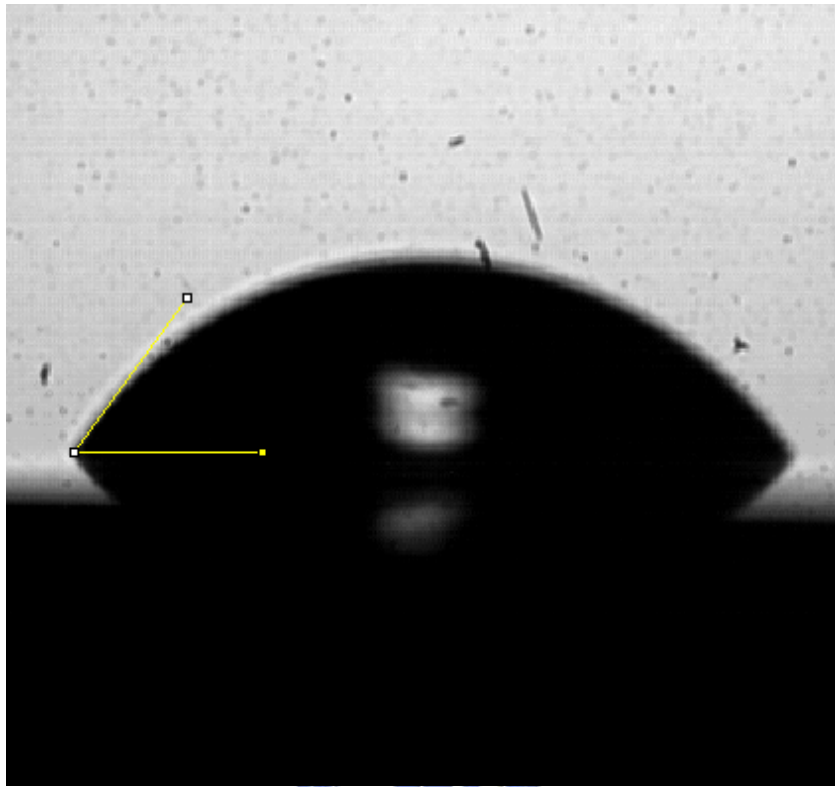


圖 4.2 未經任何處理的 Ta-Al 合金表面靜態接觸角量測

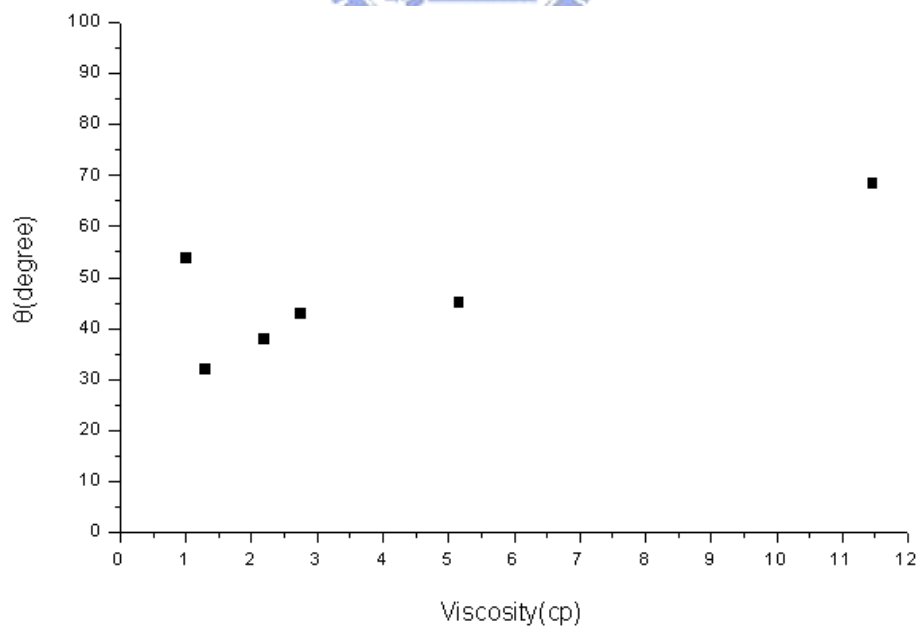


圖 4.3 未經任何處理的 Ta-Al 合金表面不同黏度所量測的靜態接觸角



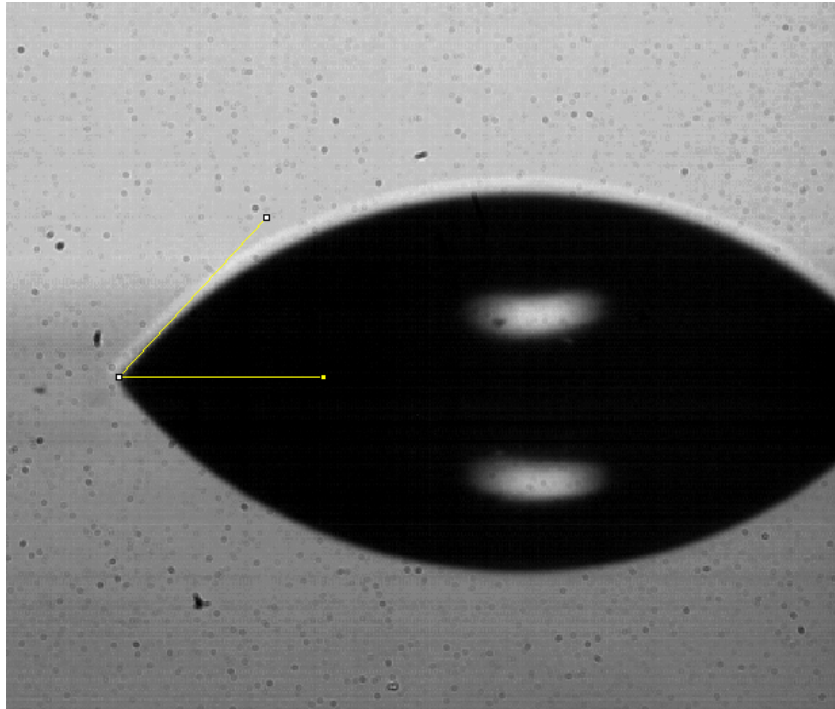


圖 4.4 利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面靜態接觸

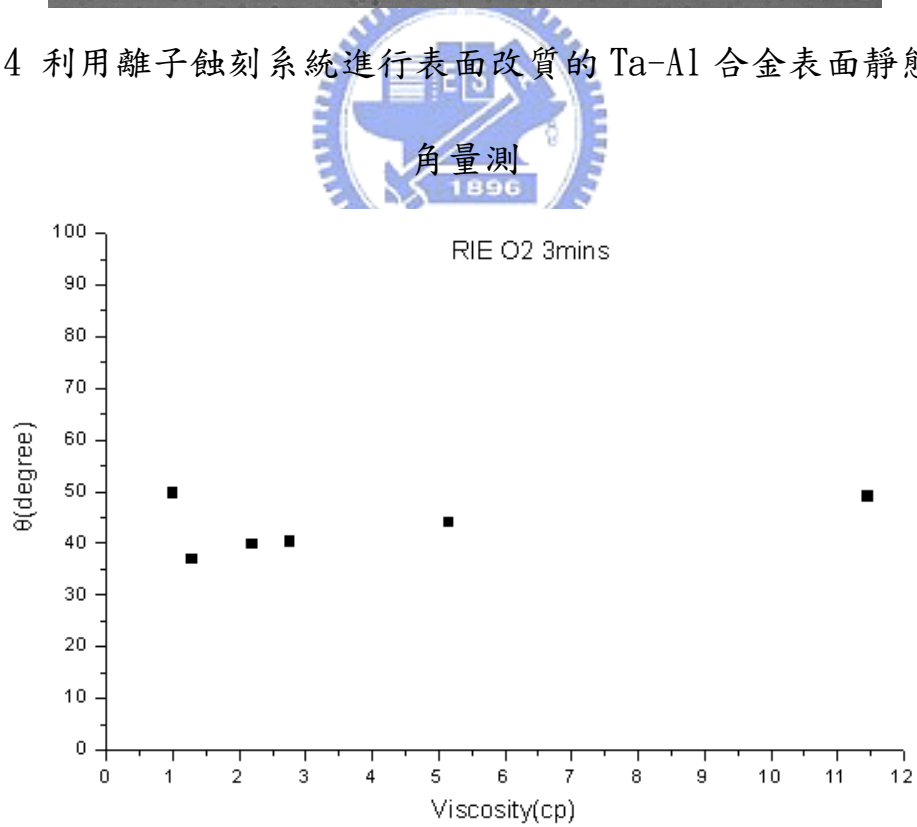


圖 4.5 利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面在不同黏度所量測的靜態接觸角

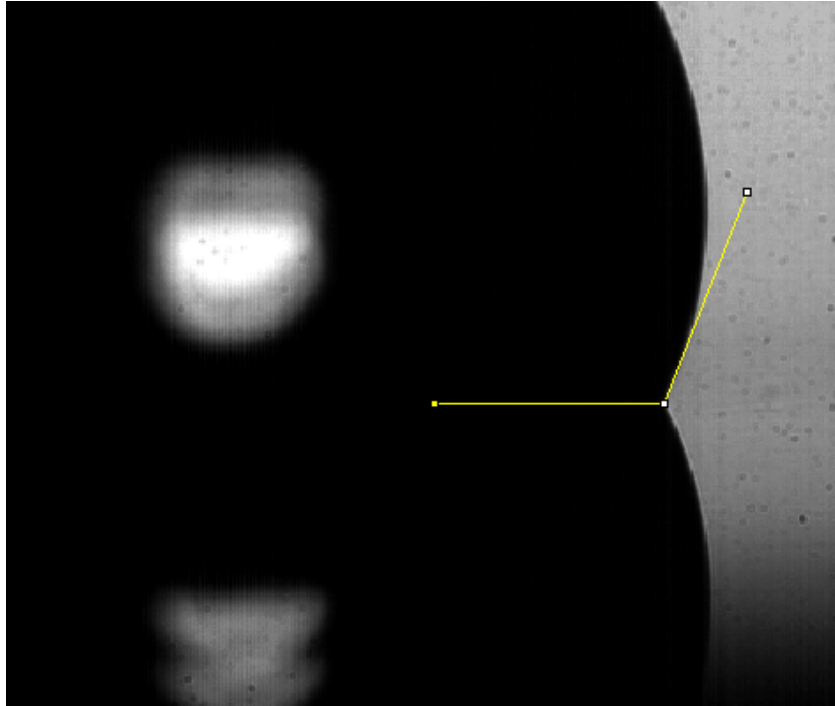


圖 4.6 塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面靜態接觸角量測

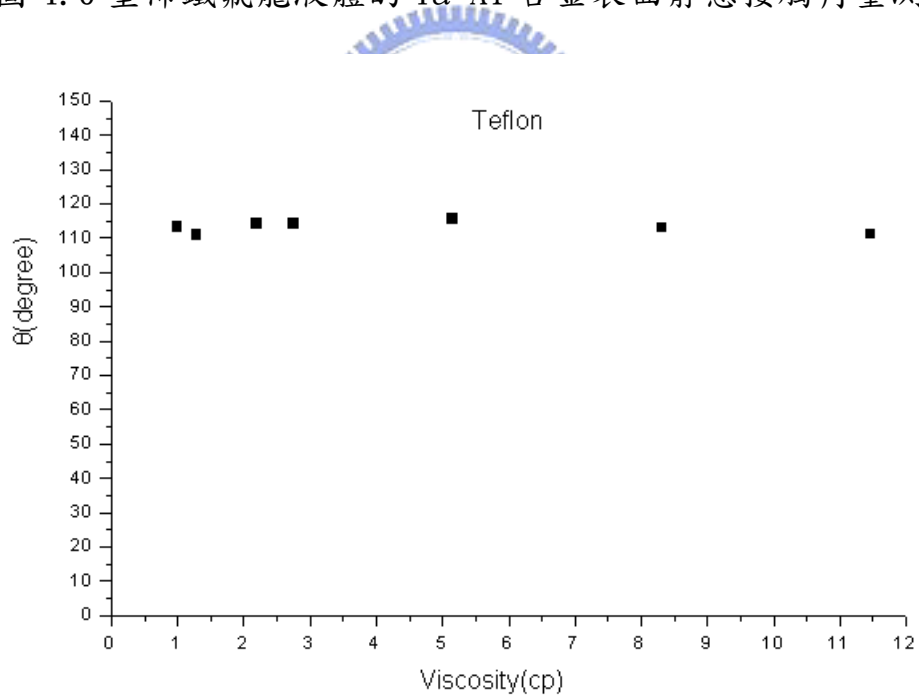
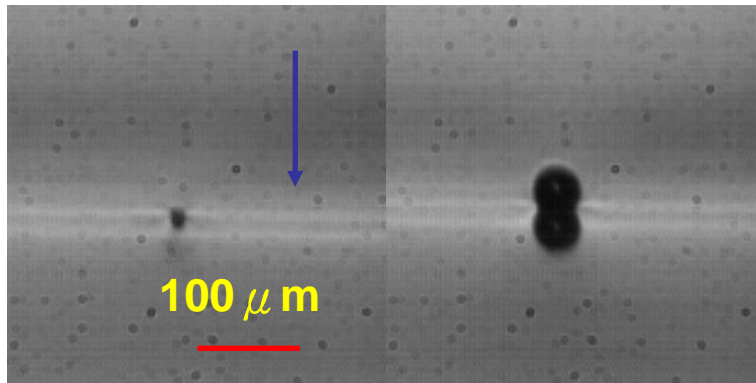
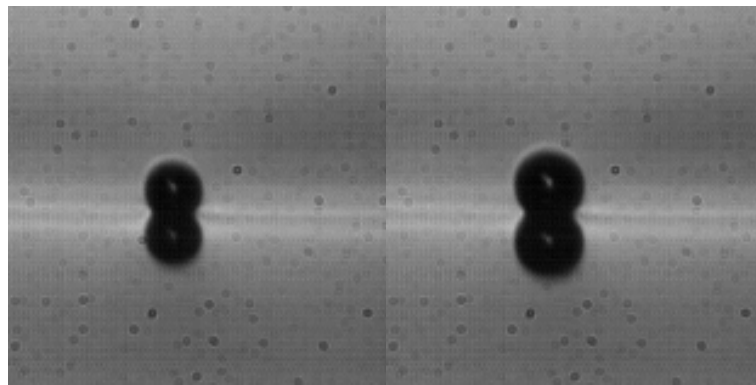


圖 4.7 塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面在不同黏度所量測的靜態接觸角



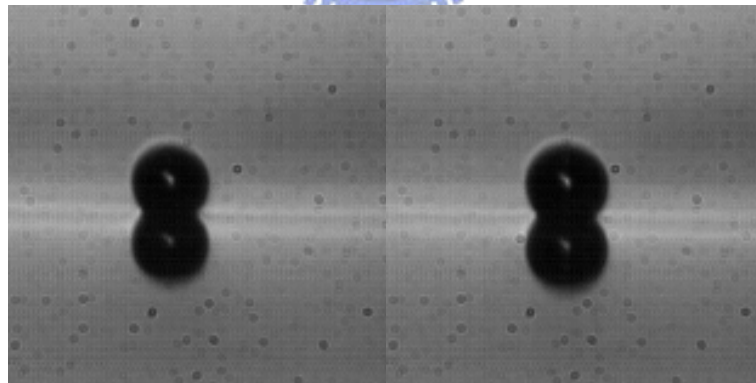
(a)

(b) 500 msec



(c) 1 sec

(d) 2 sec



(e) 3 sec

(f) 4 sec

圖 4.8 工作液體為去離子水，接觸角為 53 度，輸入功率為 0.55W 熱

汽泡成長過程側像拍攝視點

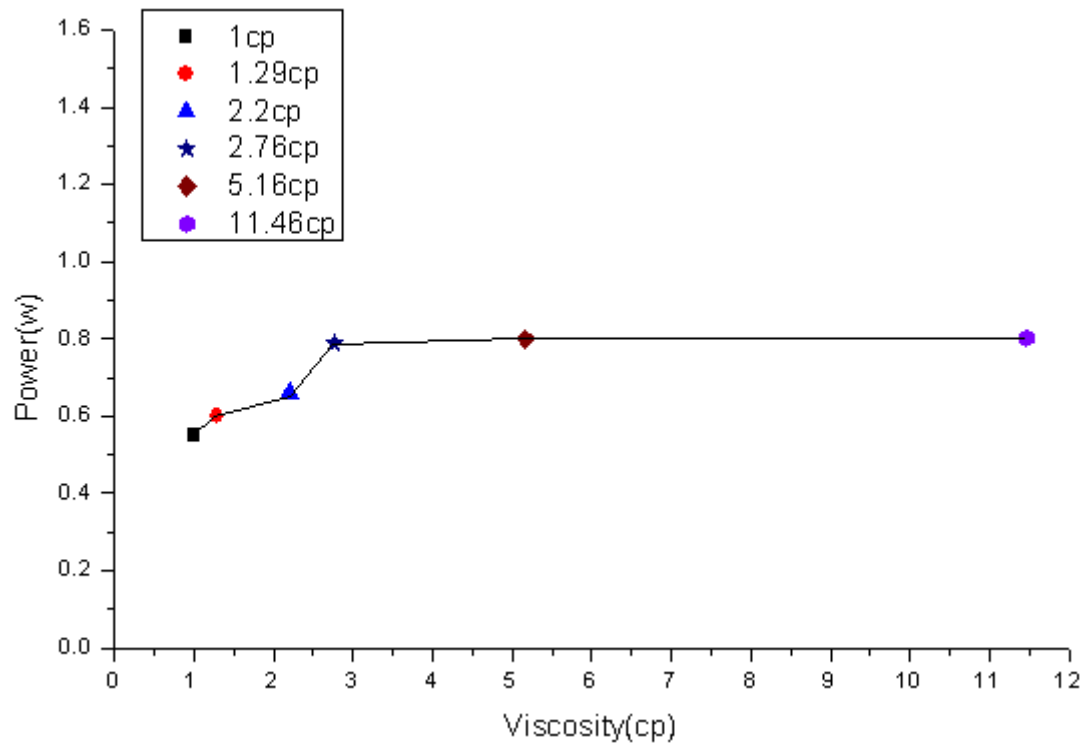
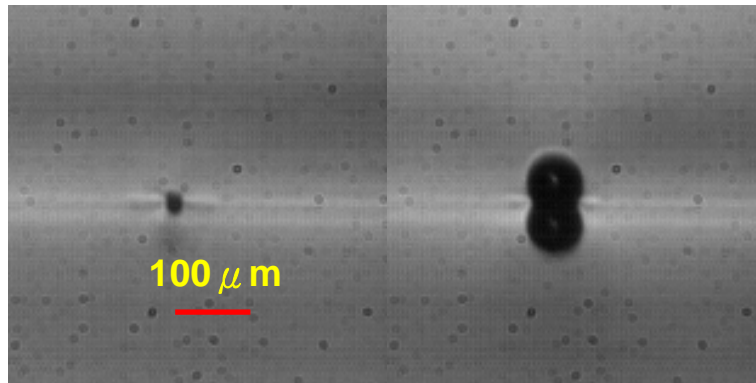
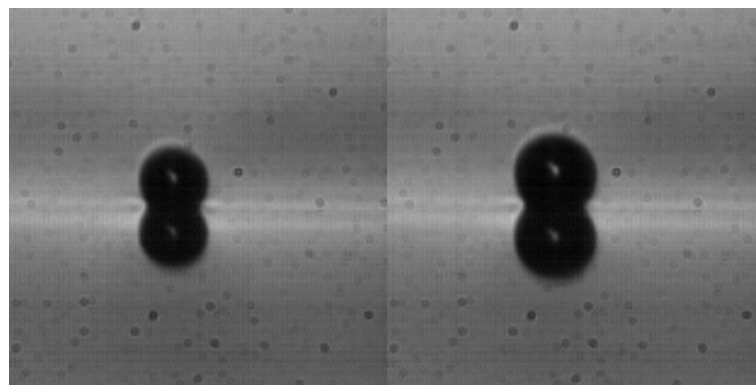


圖 4.9 未經任何處理的 Ta-Al 合金表面在不同黏度下使汽泡初始成核的輸入功率變化圖



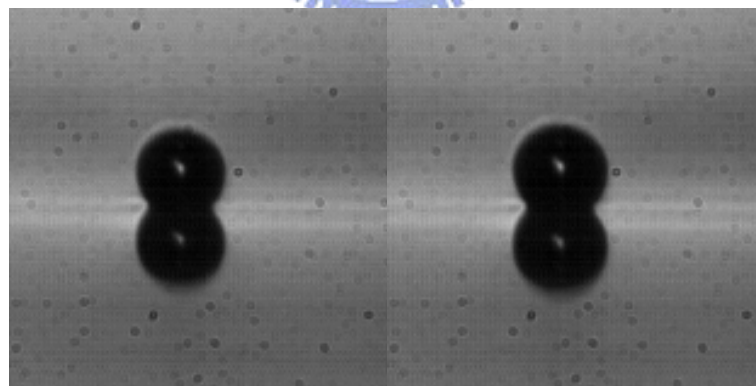
(a)

(b)500msec



(c)1sec

(d)2sec

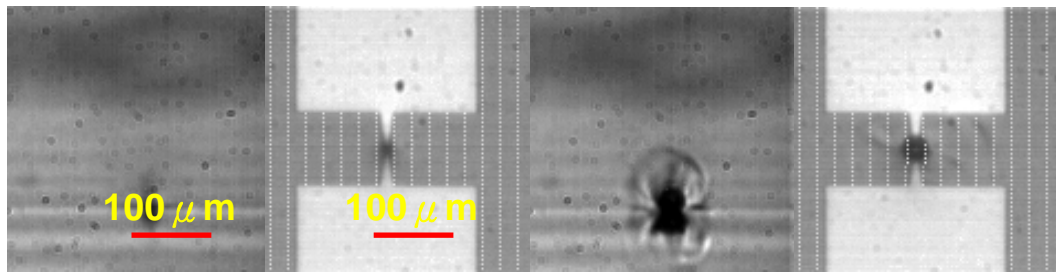


(e)3sec

(f)4sec

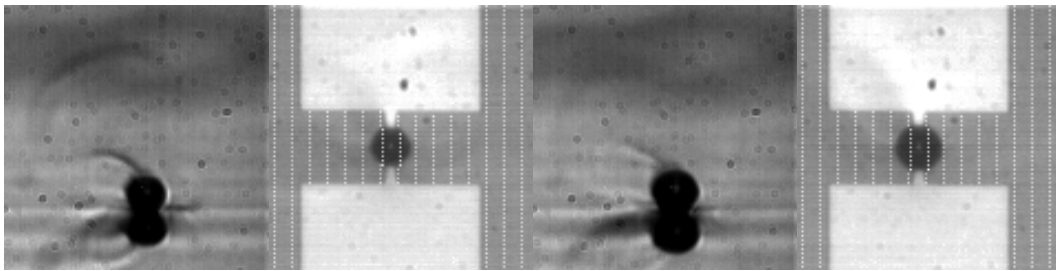
圖 4.10 工作液體為去離子水，接觸角為 53 度，輸入功率為 0.8W 熱

汽泡成長過程側像拍攝視點



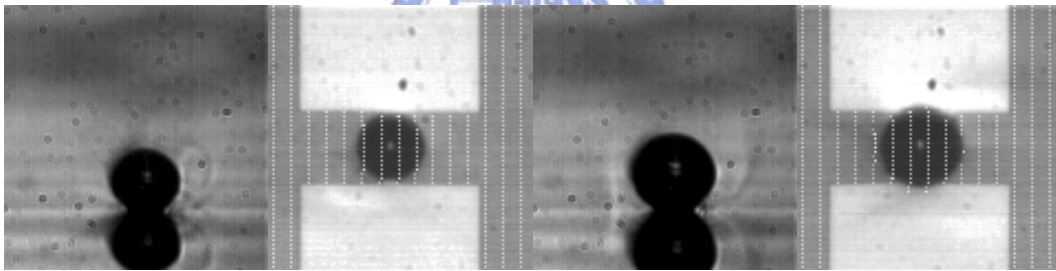
(a)

(b)50msec



(c)200msec

(d)400msec

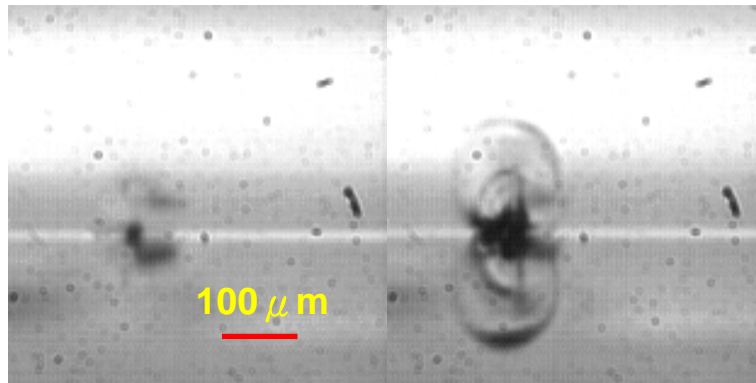


(e)1.916sec

(f)4sec

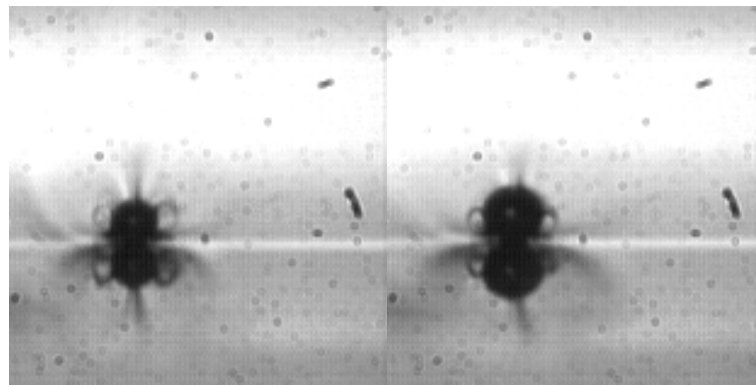
圖 4.11 工作液體為 1.29cp，接觸角為 32 度，輸入功率為 0.8W 熱汽

泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測



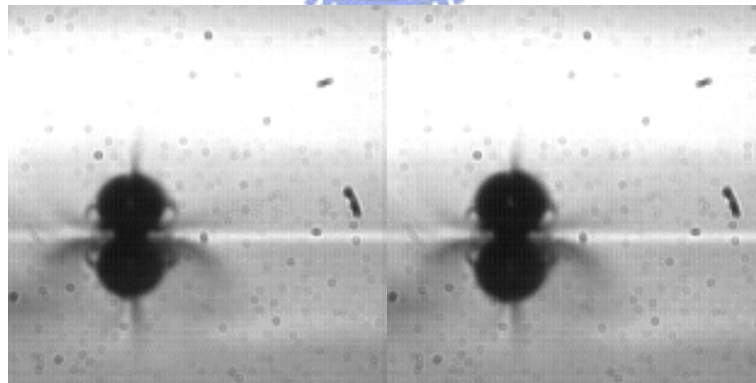
(a)

(b)143msec



(c)751msec

(d)2sec



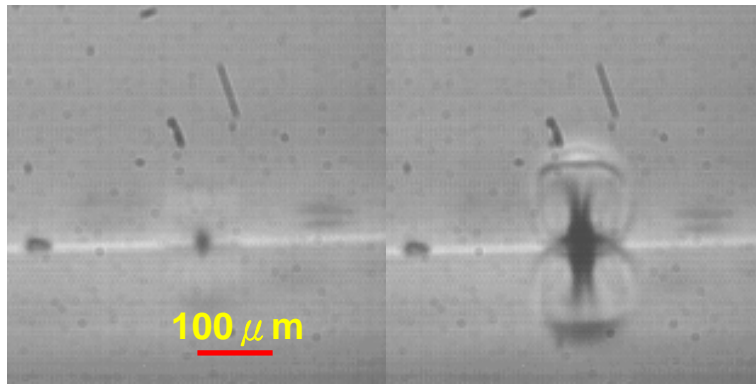
(e)3sec

(f)3.871sec

圖 4.12 工作液體為 2.2cp，接觸角為 37 度，輸入功率為 0.8W 熱汽

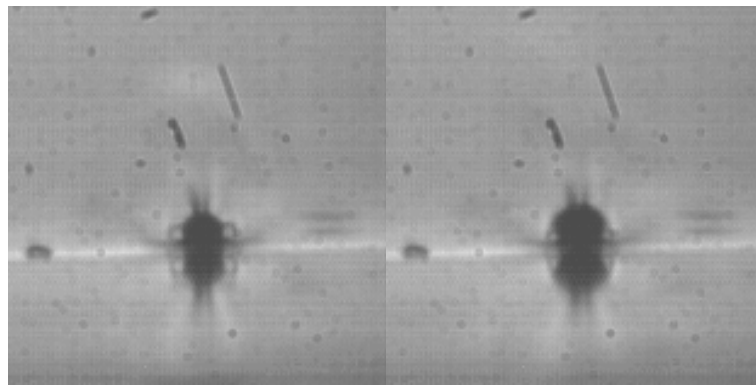
泡成長過程側像拍攝視點





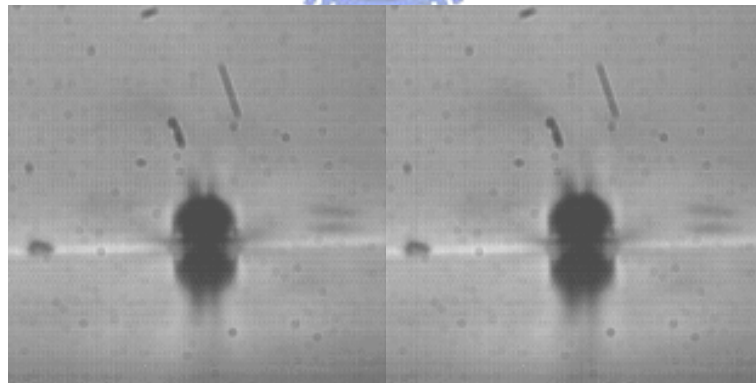
(a)

(b)200msec



(c)800msec

(d)1.9sec

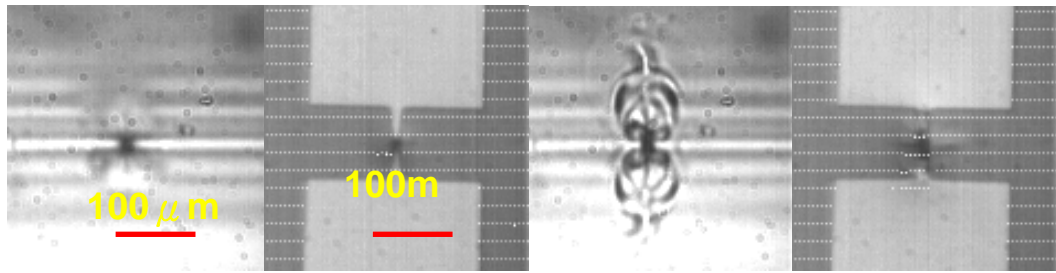


(e)3.1sec

(f)3.936sec

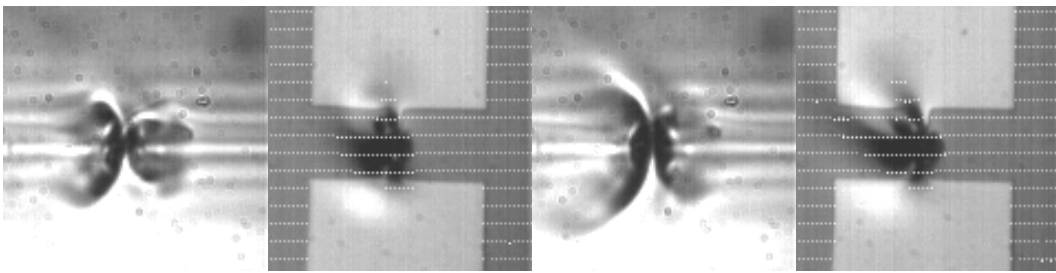
圖 4.13 工作液體為 2.76cp，接觸角為 42 度，輸入功率為 0.8W 熱汽

泡成長過程側像拍攝視點



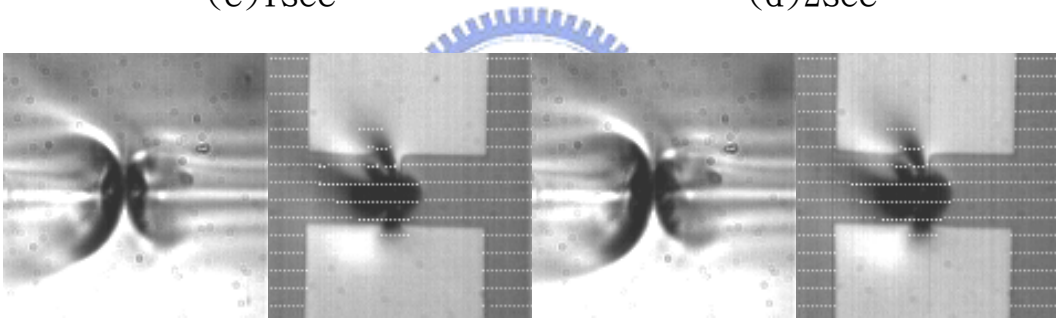
(a)

(b) 16msec



(c) 1sec

(d) 2sec

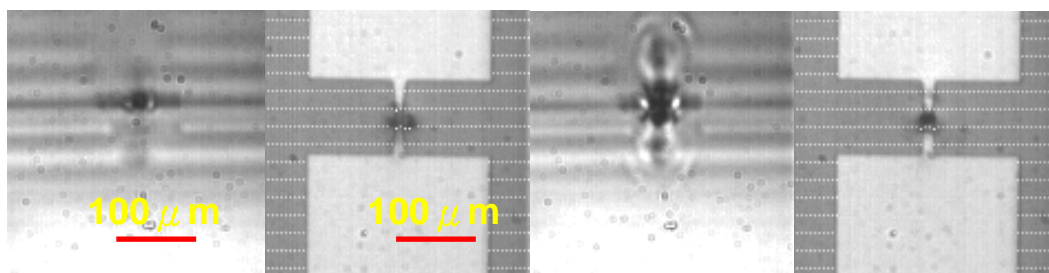


(e) 3sec

(f) 4sec

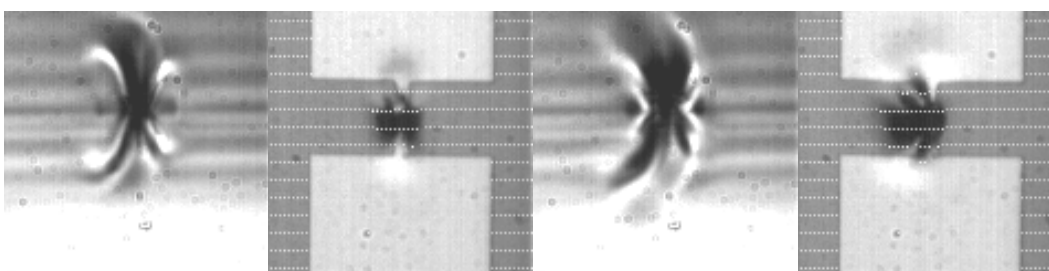
圖 4.14 工作液體為 5.16cp，接觸角為 45 度，輸入功率為 0.8W 熱汽

泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測



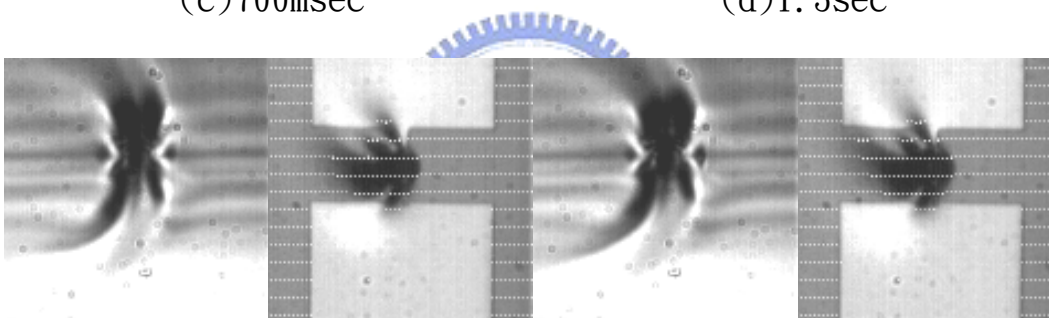
(a)

(b) 25 msec



(c) 700 msec

(d) 1.3 sec



(e) 2.2 sec

(f) 4 sec

圖 4.15 工作液體為 11.46cp，接觸角為 68 度，輸入功率為 0.8W 熱

汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測

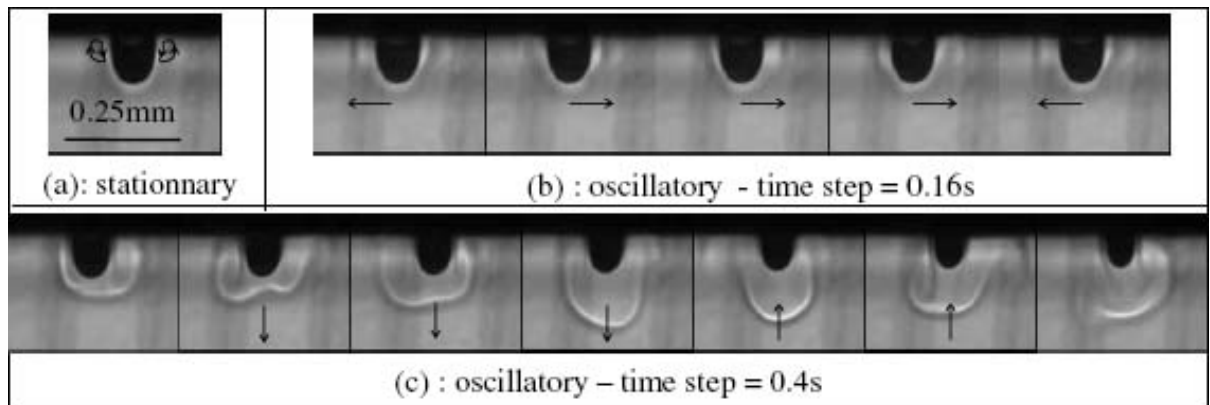
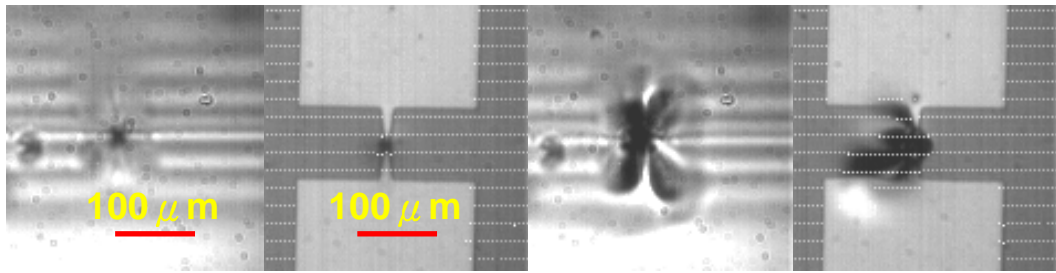


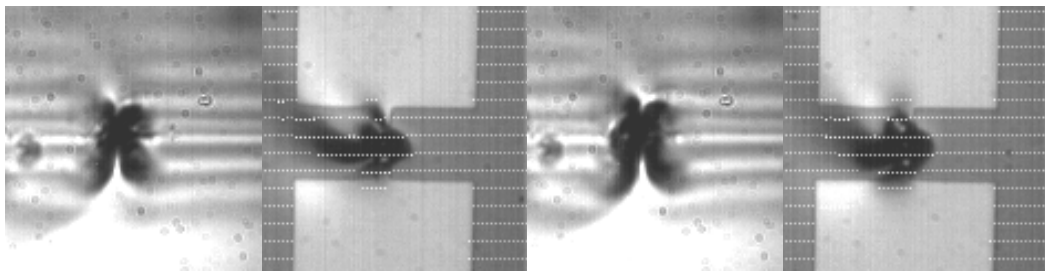
圖 4.16 為 Barthes[19]等人觀察在連續固定功率面向下的加熱器表

面 Marangoni 對流與冷凝現象的側視圖



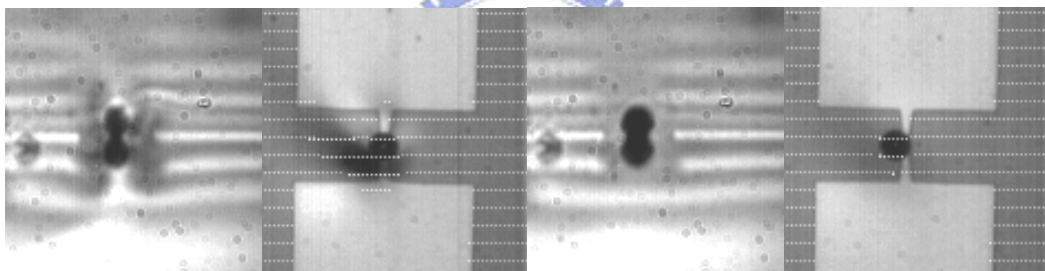


(b)1sec



(c)3sec

(d)5sec



(e)5.7sec

(f)7sec

圖 4.17 工作液體為 5.16cp，接觸角為 45 度，輸入功率為 0.8W 熱汽

泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測

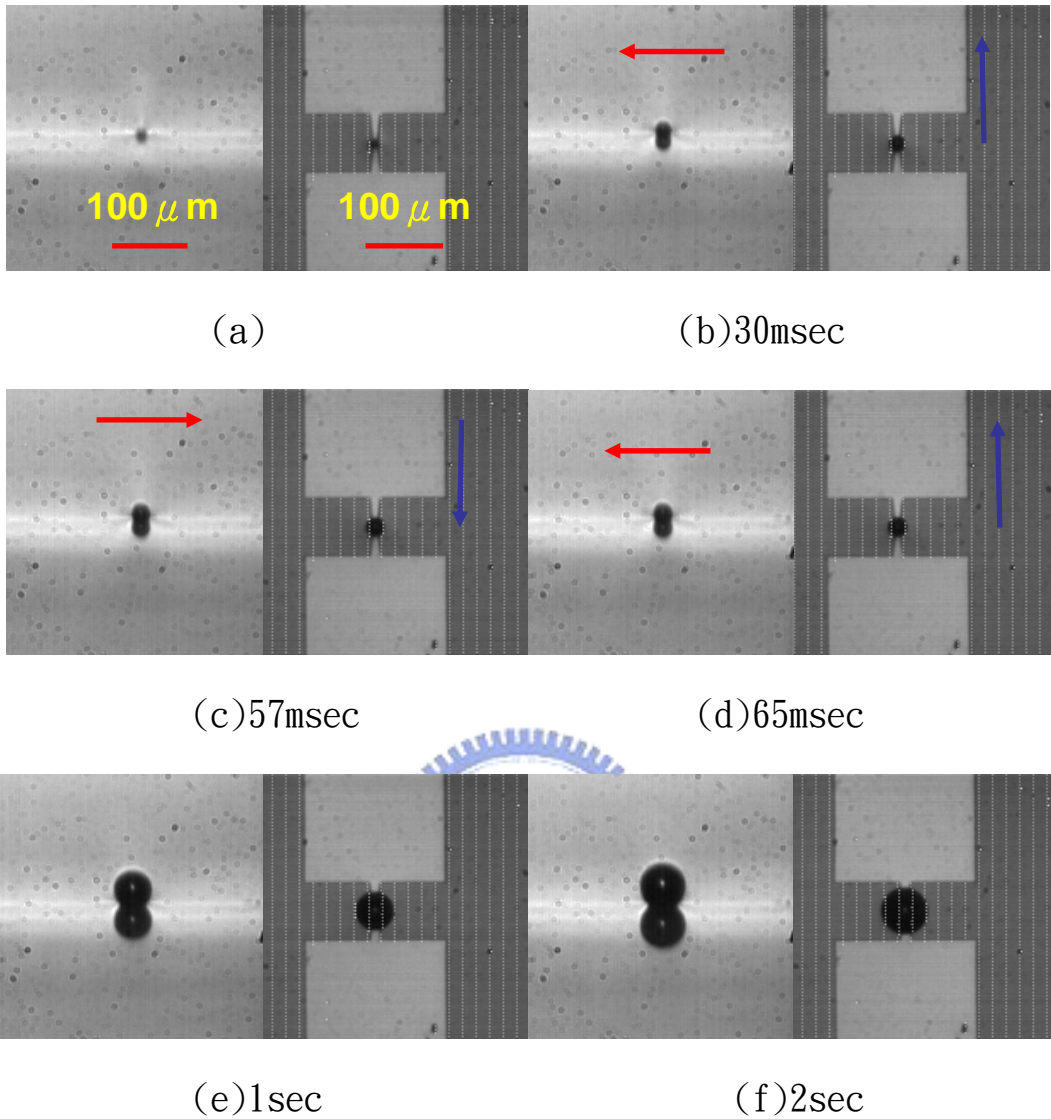


圖 4.18 工作液體為 1cp，接觸角為 49 度，輸入功率為 0.45W 熱汽泡

成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測

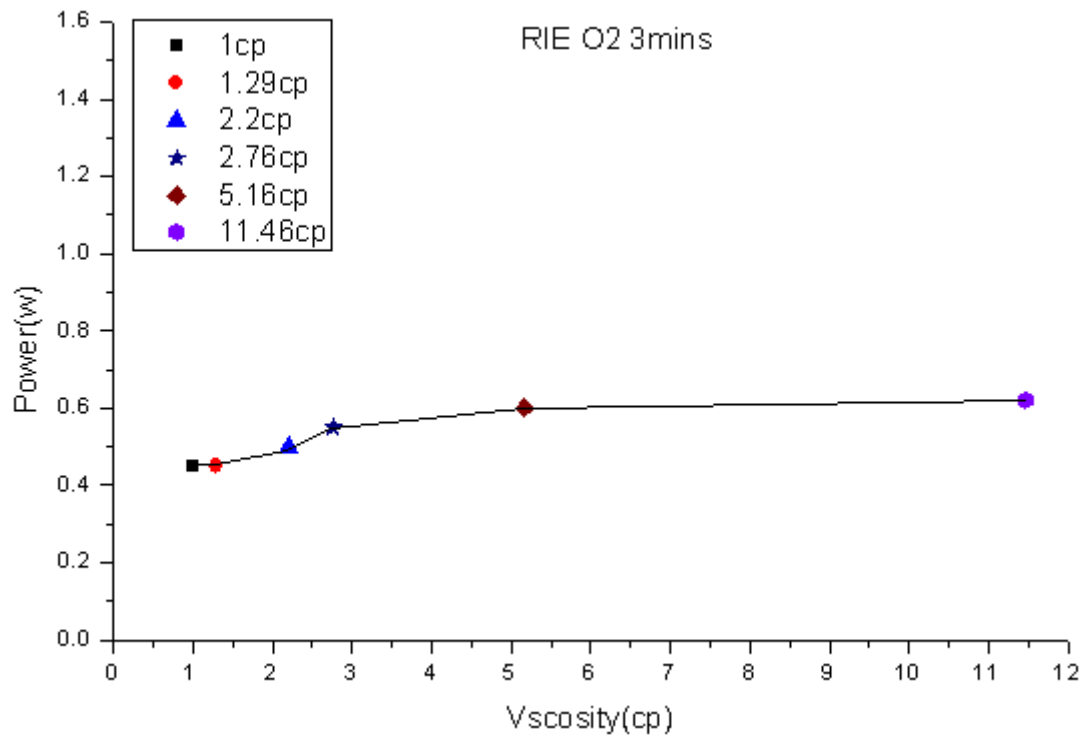
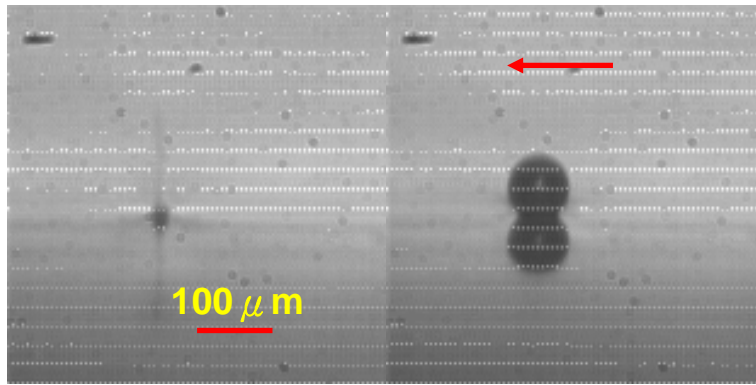


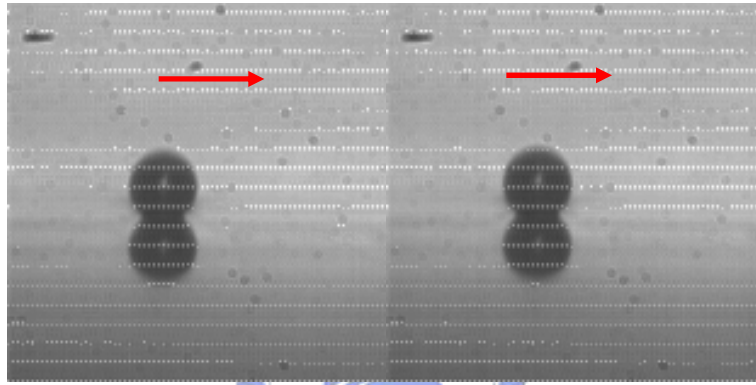
圖 4.19 利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面在不同黏度下使汽泡初始成核的輸入功率變化圖





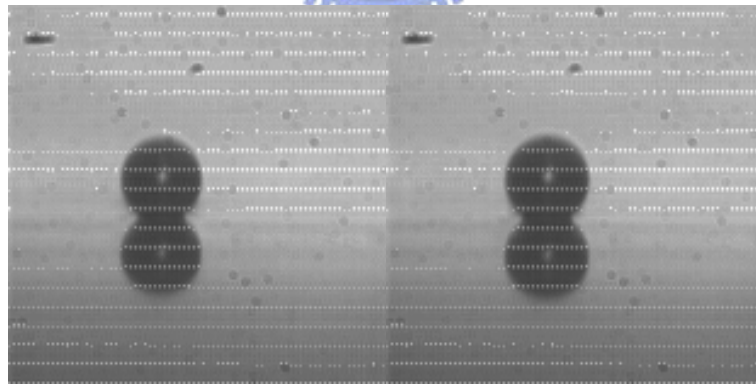
(a)

(b) 653msec



(c) 971msec

(d) 1sec

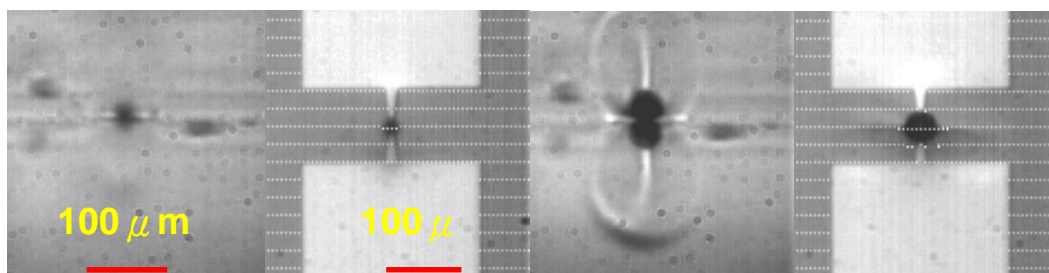


(e) 2sec

(f) 3sec

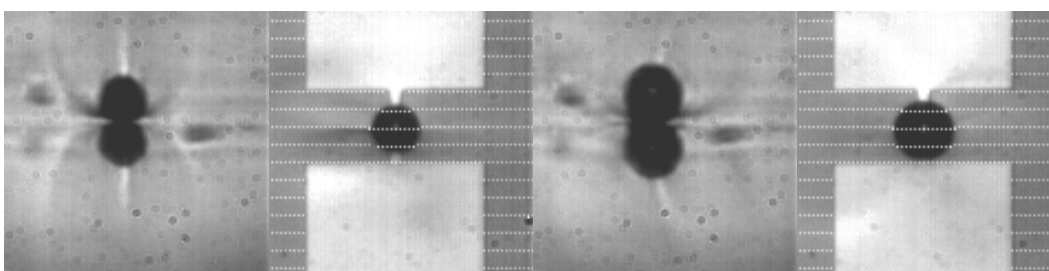
圖 4.20 工作液體為 1cp，接觸角為 49 度，輸入功率為 0.8W 熱汽泡

成長過程側像拍攝視點



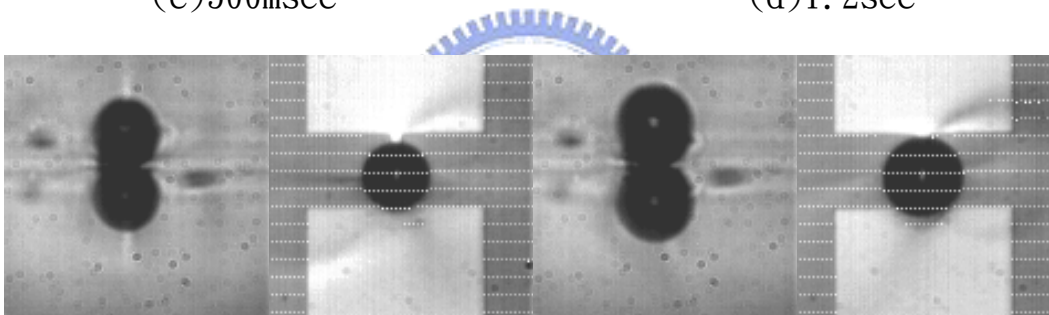
(a)

(b)100msec



(c)500msec

(d)1.2sec



(e)2.2sec

(f)4sec

圖 4.21 工作液體為 1.29cp，接觸角為 37 度，輸入功率為 0.8W 熱汽

泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測

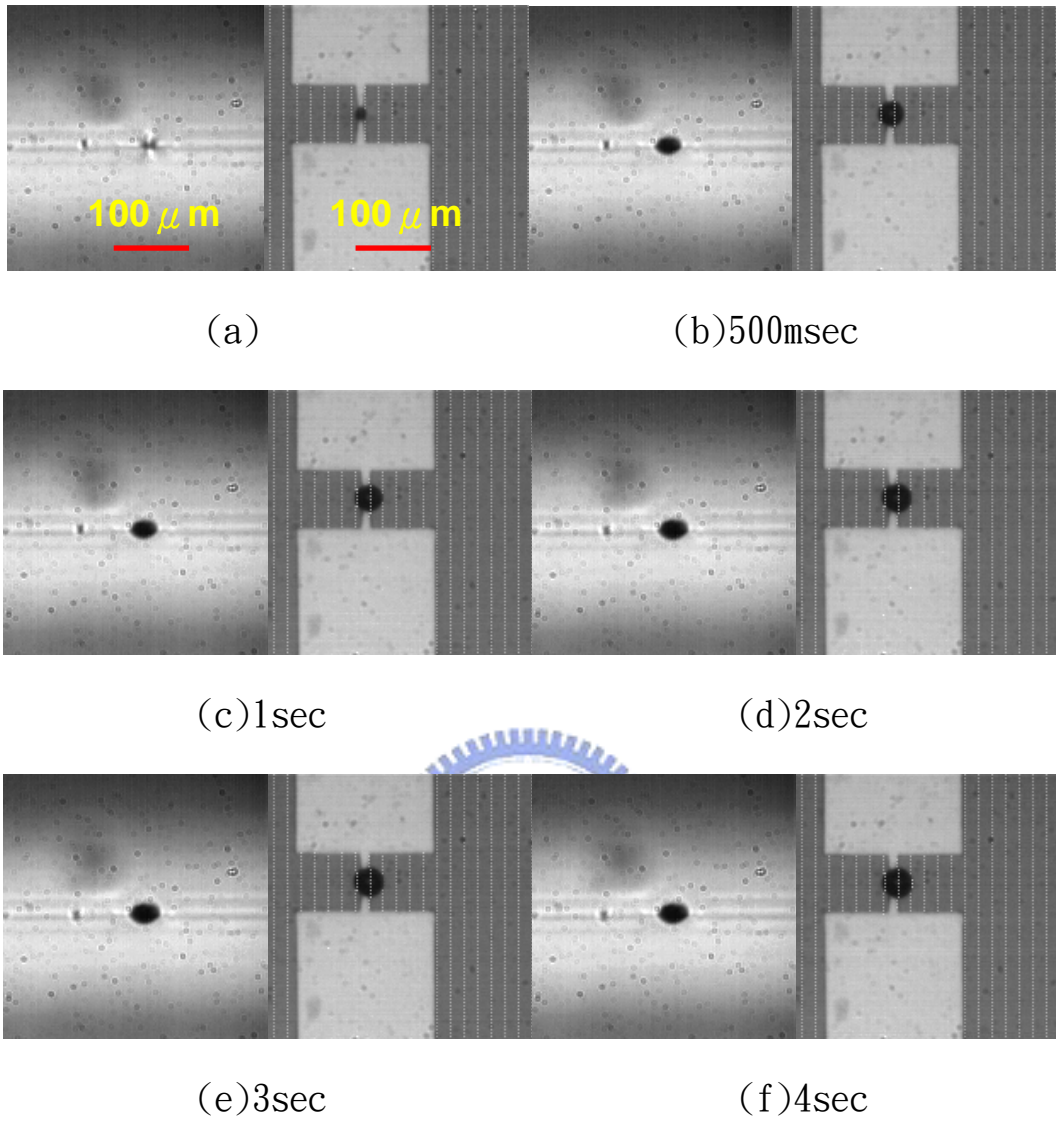


圖 4.22 工作液體為 1cp，接觸角為 113 度，輸入功率為 0.6W 熱汽泡  
成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測

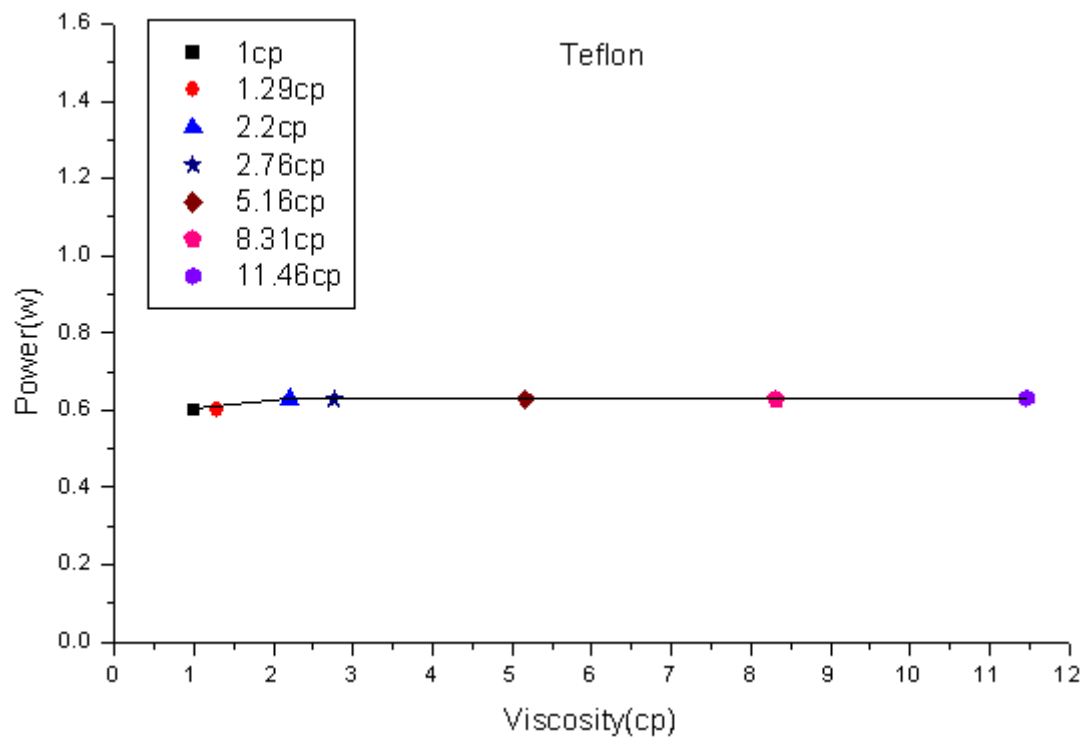
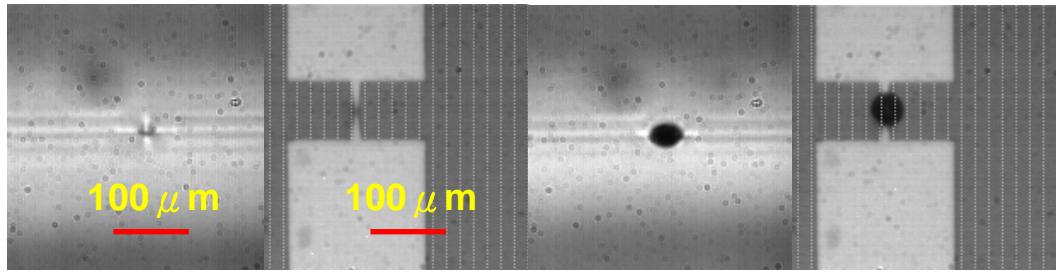
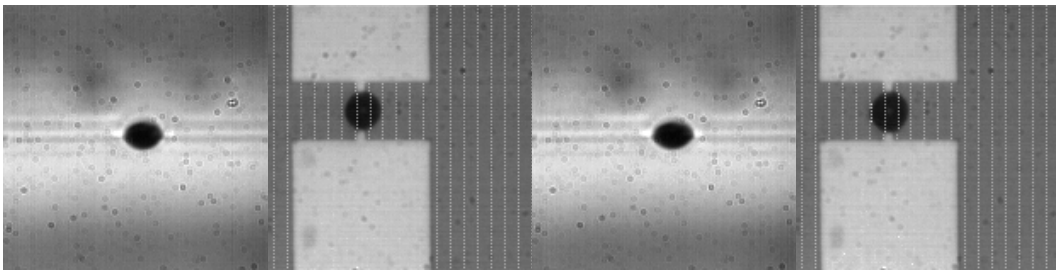


圖 4.23 塗佈鐵氟龍液體的加熱器表面在不同黏度下使汽泡初始成核的輸入功率變化圖



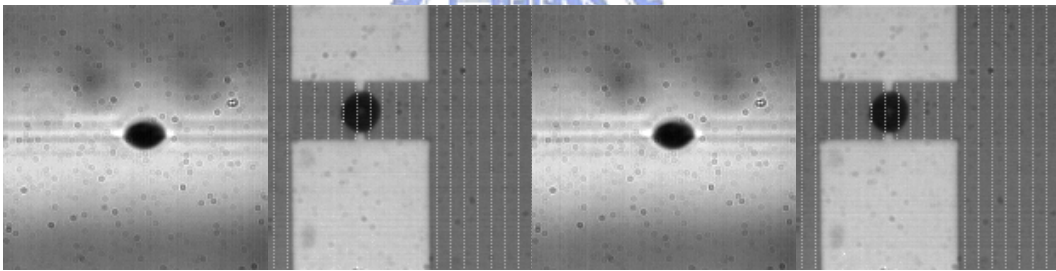
(a)

(b)500msec



(c)1sec

(d)2sec



(e)3sec

(f)4sec

圖 4.24 工作液體為 1cp，接觸角為 113 度，輸入功率為 0.8W 熱汽泡

成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測

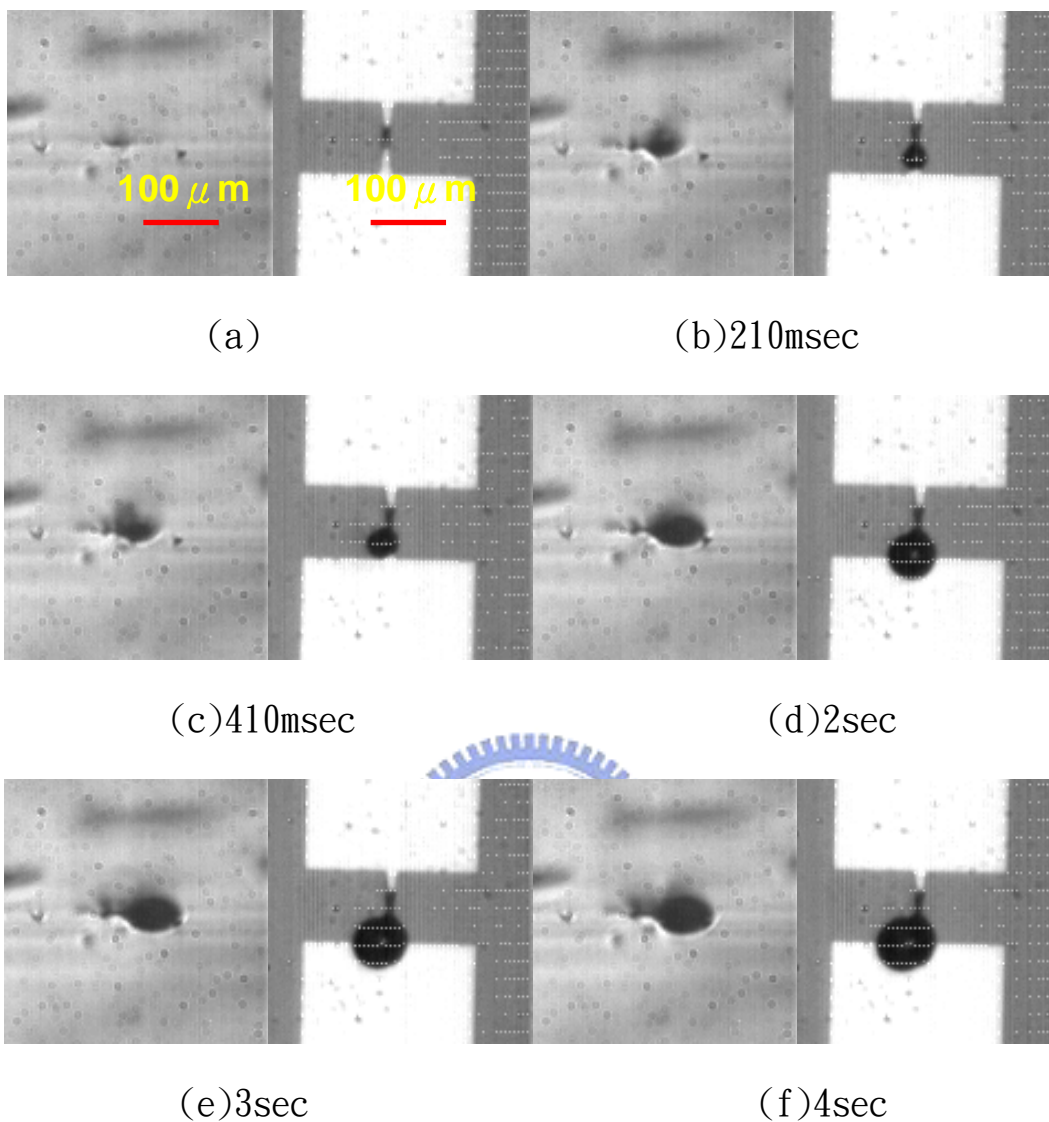
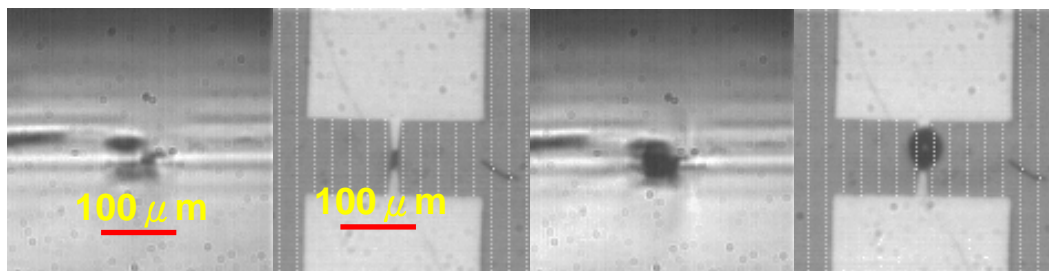


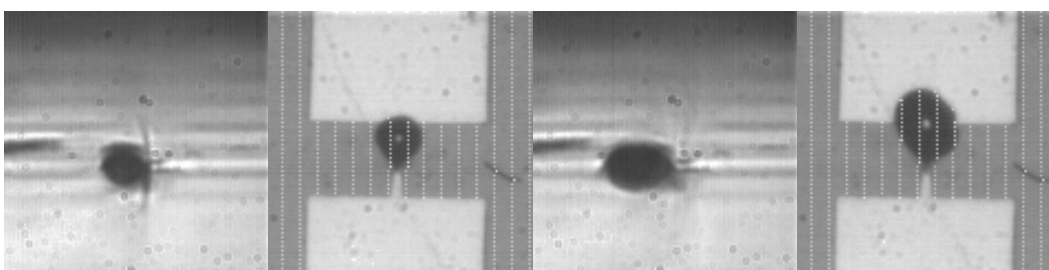
圖 4.25 工作液體為 1.29cp，接觸角為 111 度，輸入功率為 0.8W 熱  
 汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測





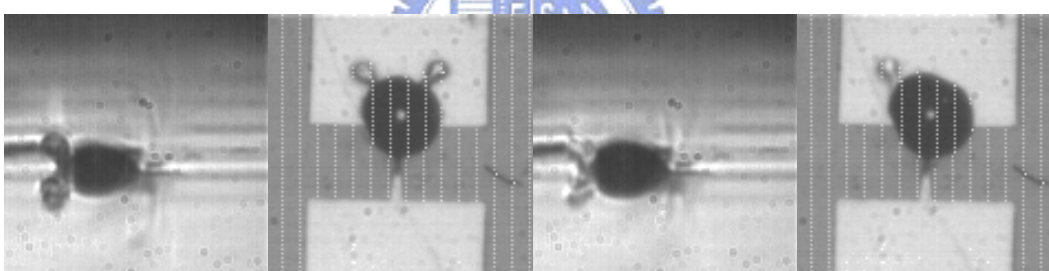
(a)

(b) 302 msec



(c) 731 msec

(d) 1.95 sec



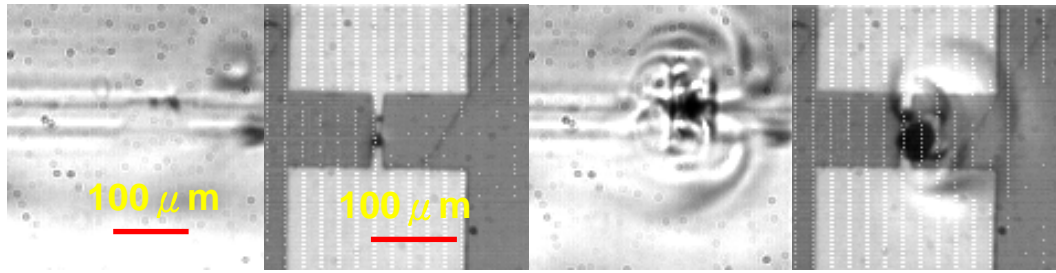
(e) 2.814 sec

(f) 3.147 sec

圖 4.26 工作液體為 2.2cp，接觸角為 114 度，輸入功率為 0.8W 熱汽

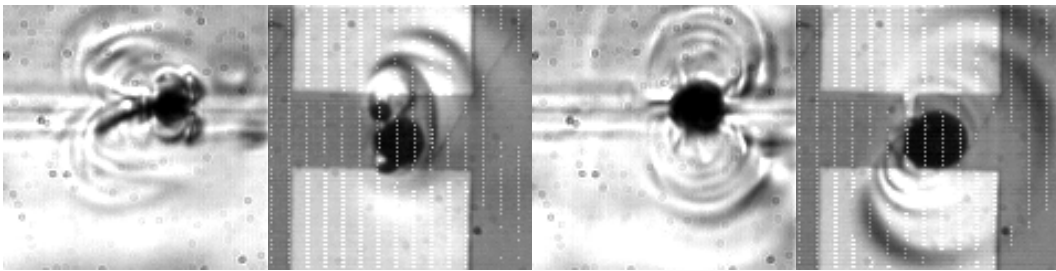
泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測





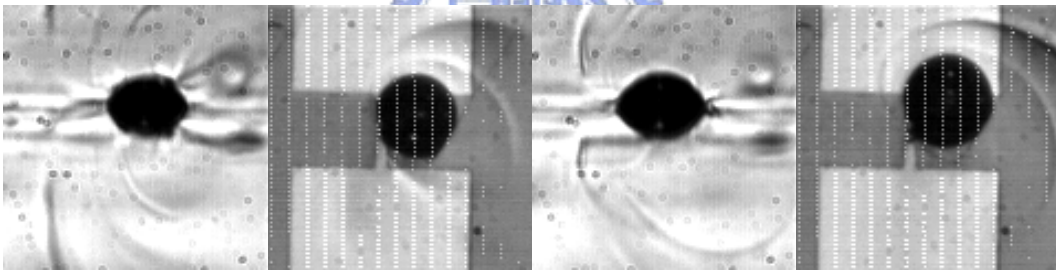
(a)

(b)281msec



(c)1sec

(d)2sec



(e)3sec

(f)4sec

圖 4.27 工作液體為 2.76cp，接觸角為 114 度，輸入功率為 0.8W 熱

汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測

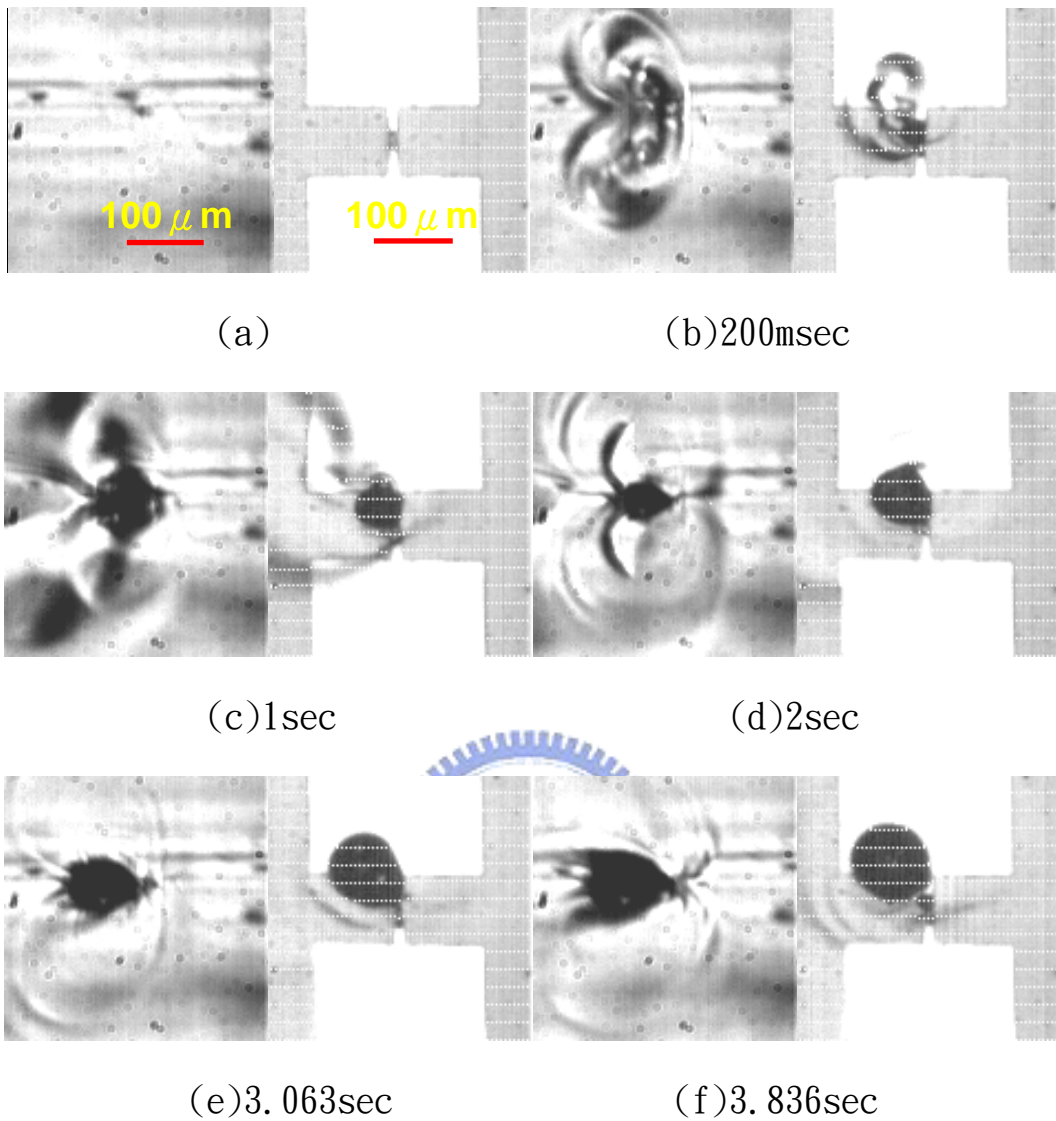
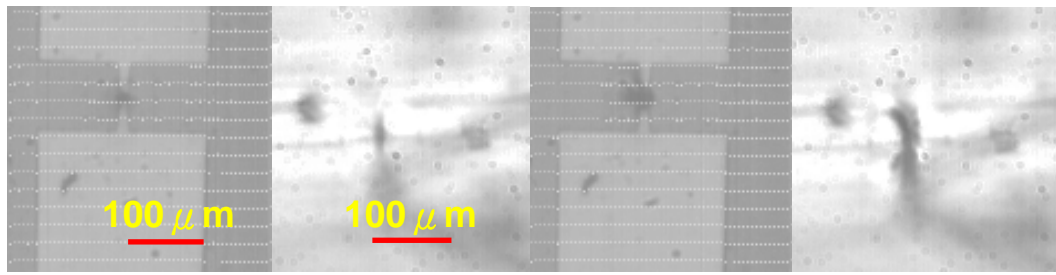


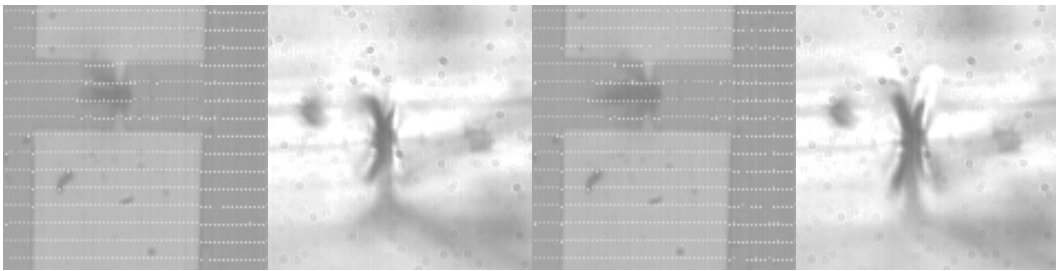
圖 4.28 工作液體為 5.16cp，接觸角為 115 度，輸入功率為 0.8W 熱

汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測



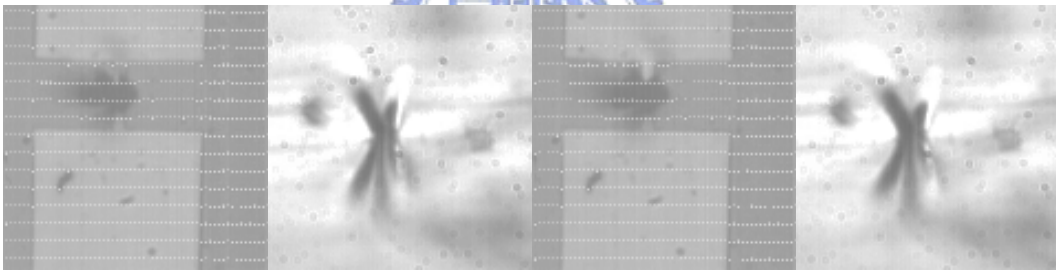
(a)

(b)200msec



(c)1sec

(d)2sec

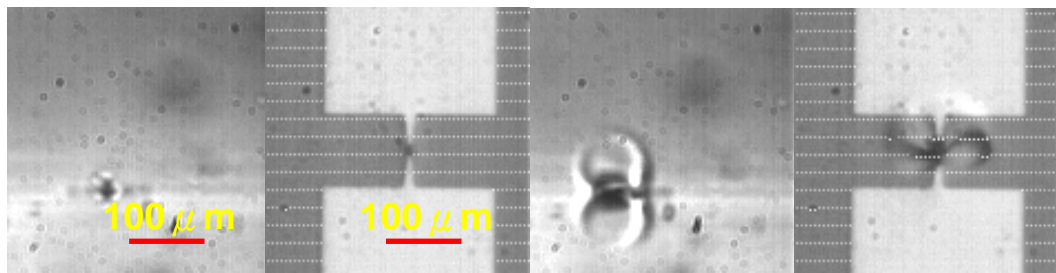


(e)3sec

(f)4sec

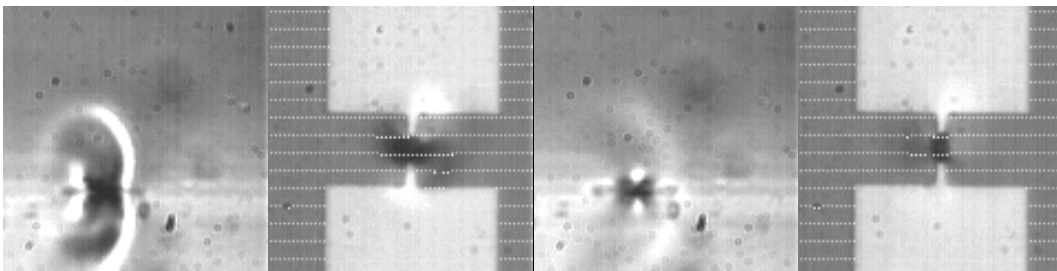
圖 4.29 工作液體為 8.31cp，接觸角為 113 度，輸入功率為 0.8W 熱

汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測



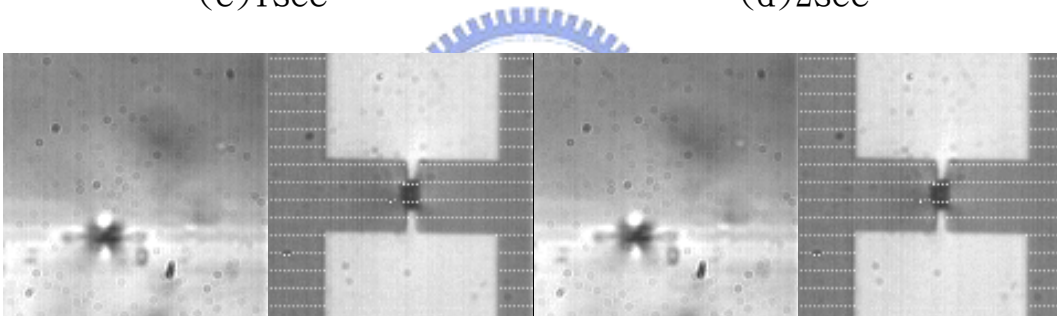
(a)

(b) 100msec



(c) 1sec

(d) 2sec



(e) 3sec

(f) 4sec

圖 4.30 工作液體為 11.46cp，接觸角為 111 度，輸入功率為 0.8W 熱

汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測

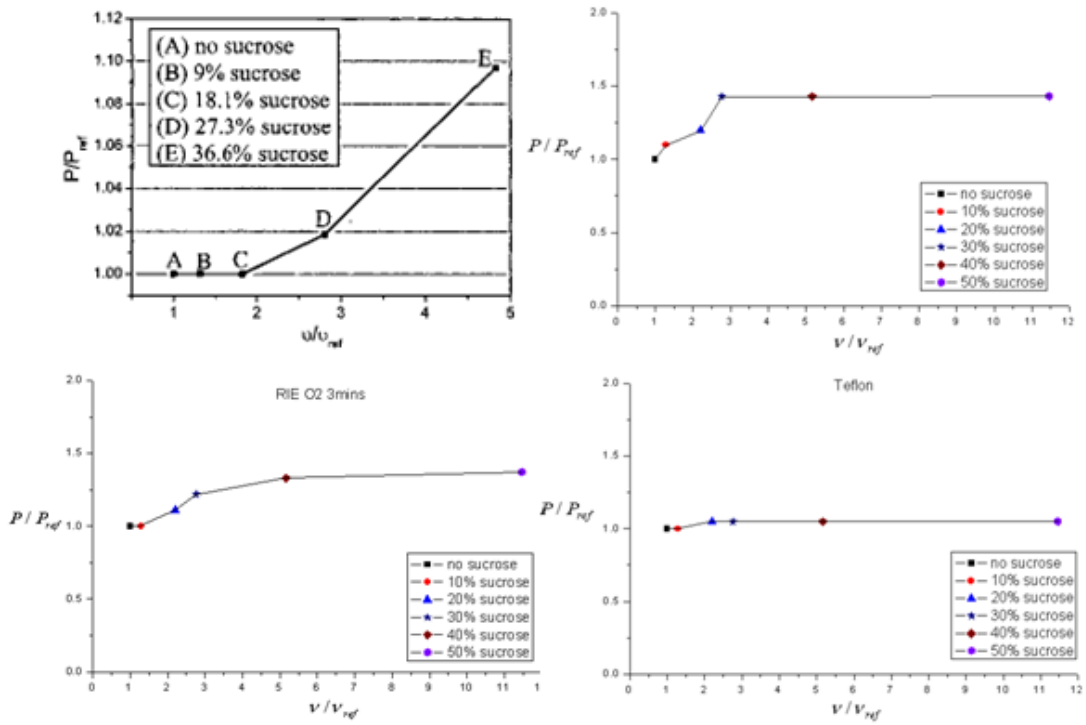
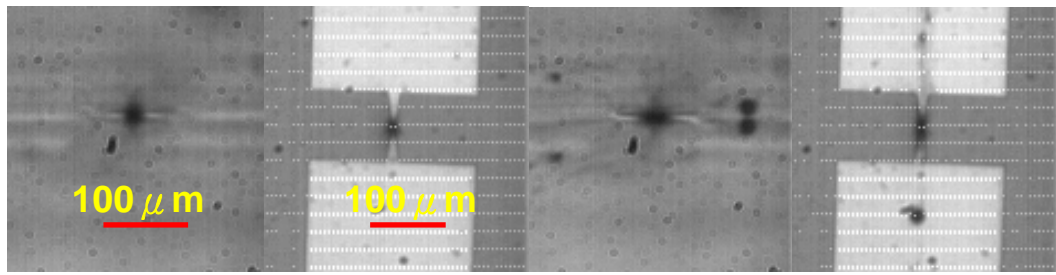


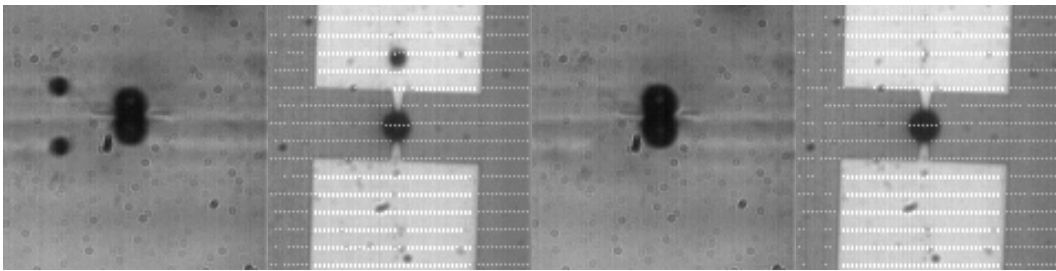
圖 4.31 左上方為 Deng[15] 在 ssDNA 溶液中添加蔗糖改變它的黏度觀

察汽泡初始成核所需功率與右方與左下方的本文實驗結果比較



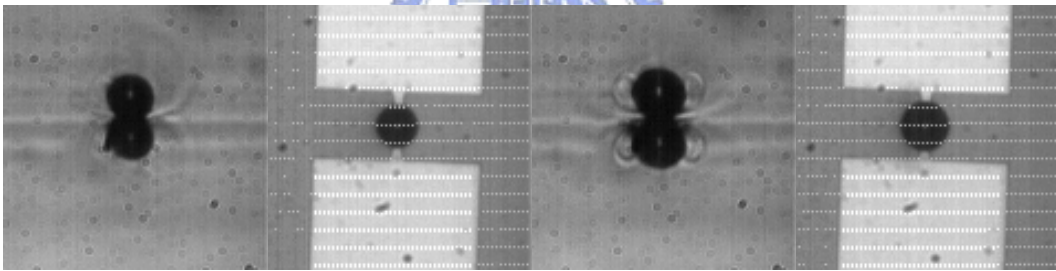
(a)

(b)27msec



(c)56msec

(d)58msec

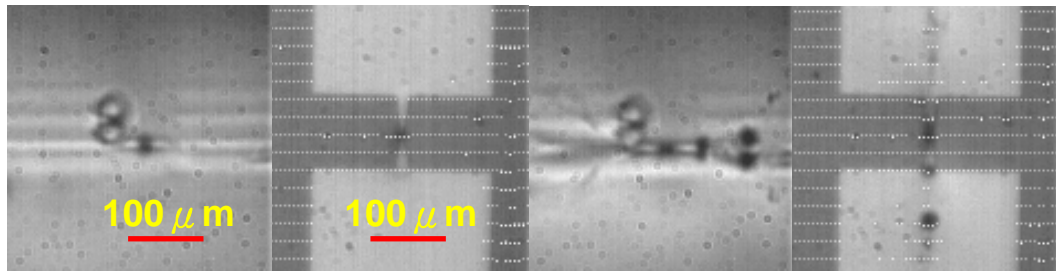


(e)128msec

(f)296msec

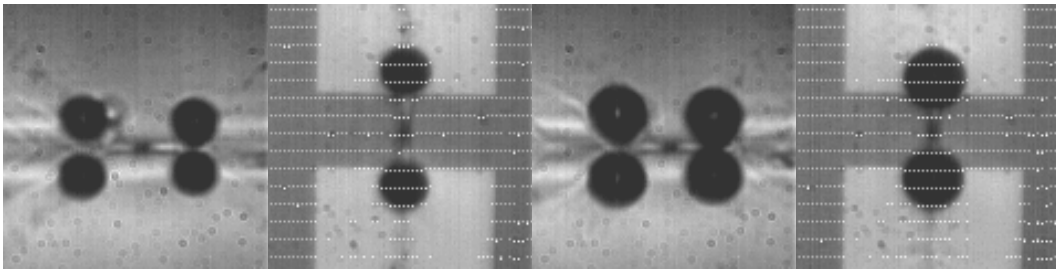
圖 4.32 工作液體為 1.29cp，接觸角為 53 度，汽泡飛濺的最低輸入  
功率為 1.2W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測





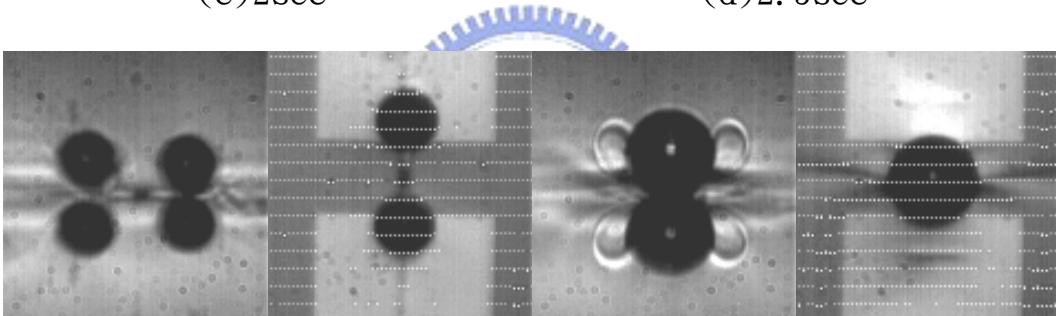
(a)

(b)100msec



(c)2sec

(d)2.5sec



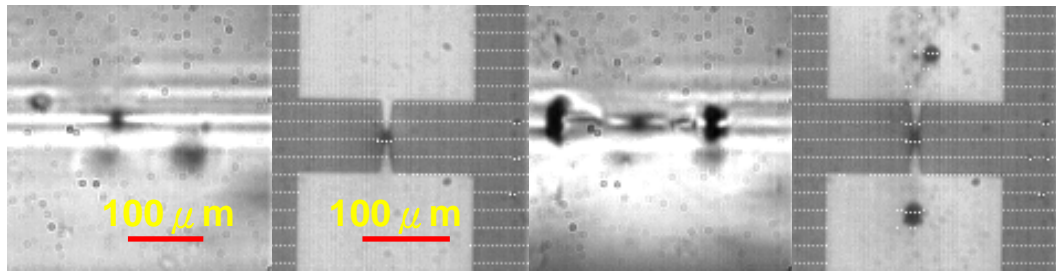
(e)2.522sec

(f)4sec

圖 4.33 工作液體為 2.2cp，接觸角為 37 度，汽泡飛濺的最低輸入功

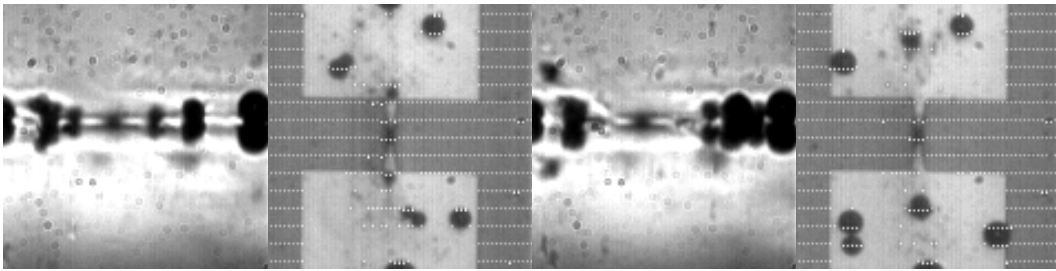
率為 1W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測





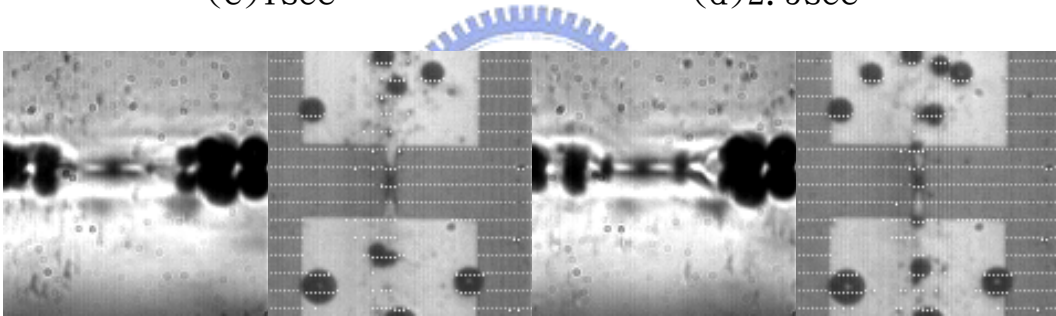
(a)

(b)100msec



(c)1sec

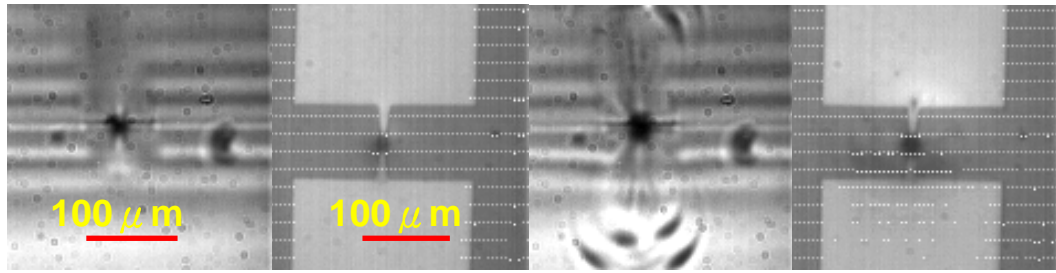
(d)2.5sec



(e)2.5sec

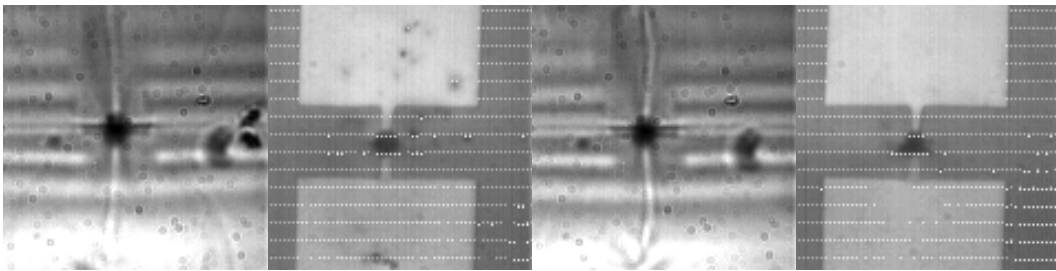
(f)3s

圖 4.34 工作液體為 2.76cp，接觸角為 42 度，汽泡飛濺的最低輸入  
功率為 1W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測



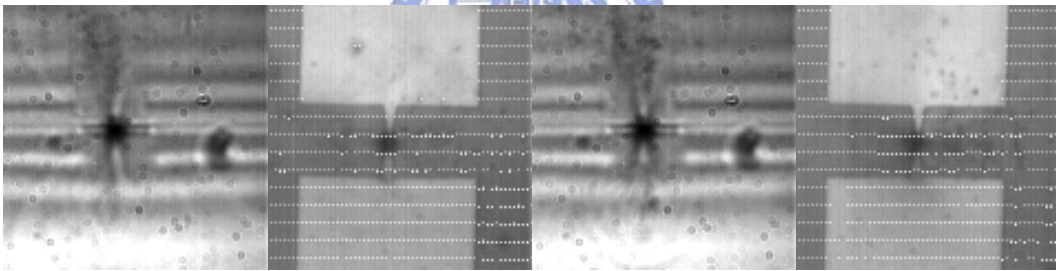
(a)

(b)21msec



(c)121msec

(d)1sec



(e)3.2sec

(f)3.7sec

圖 4.35 工作液體為 5.16cp，接觸角為 45 度，汽泡飛濺的最低輸入  
功率為 0.95W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測

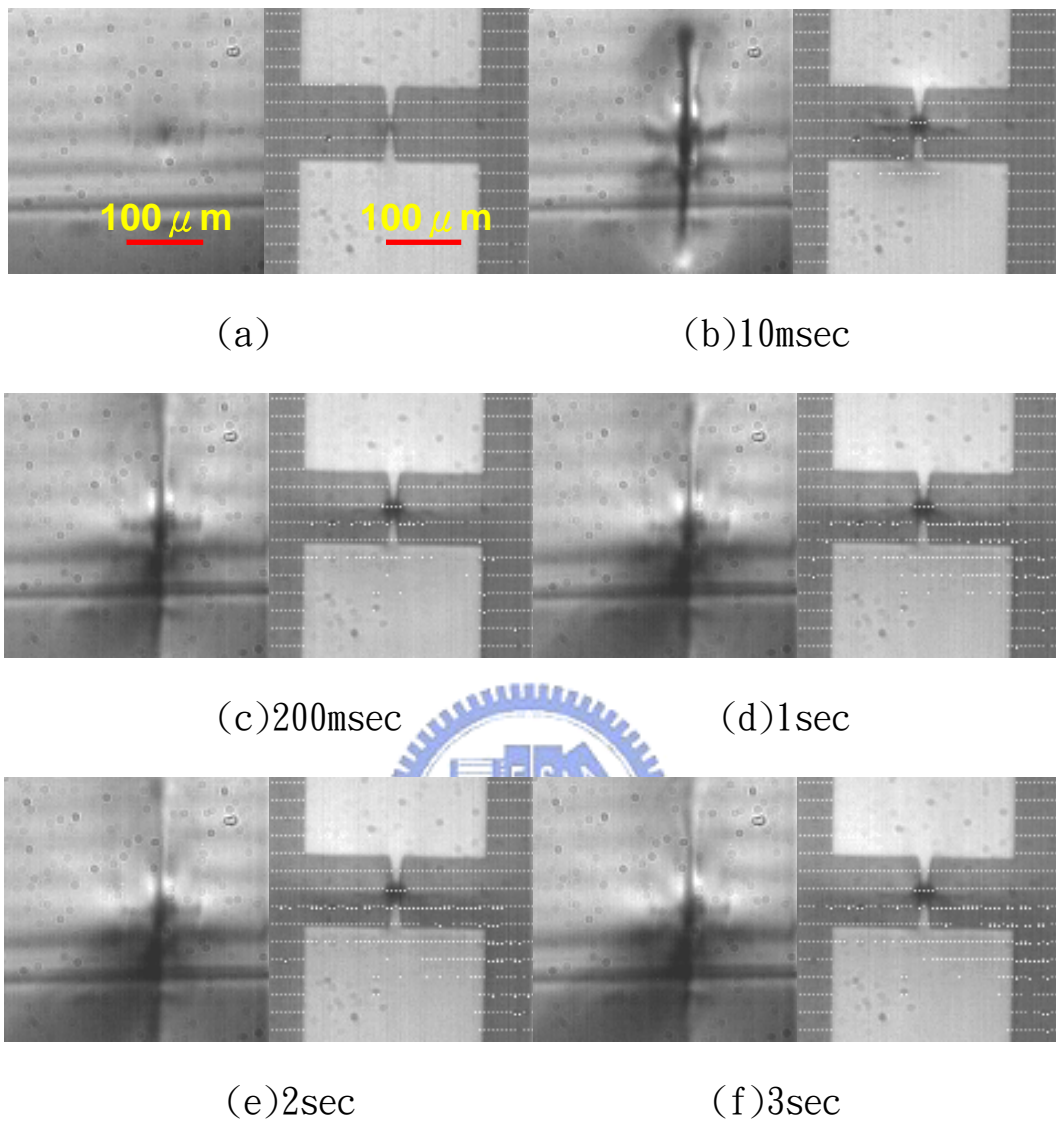


圖 4.36 工作液體為 11.46cp，接觸角為 68 度，汽泡飛濺的最低輸入  
 功率為 0.95W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測

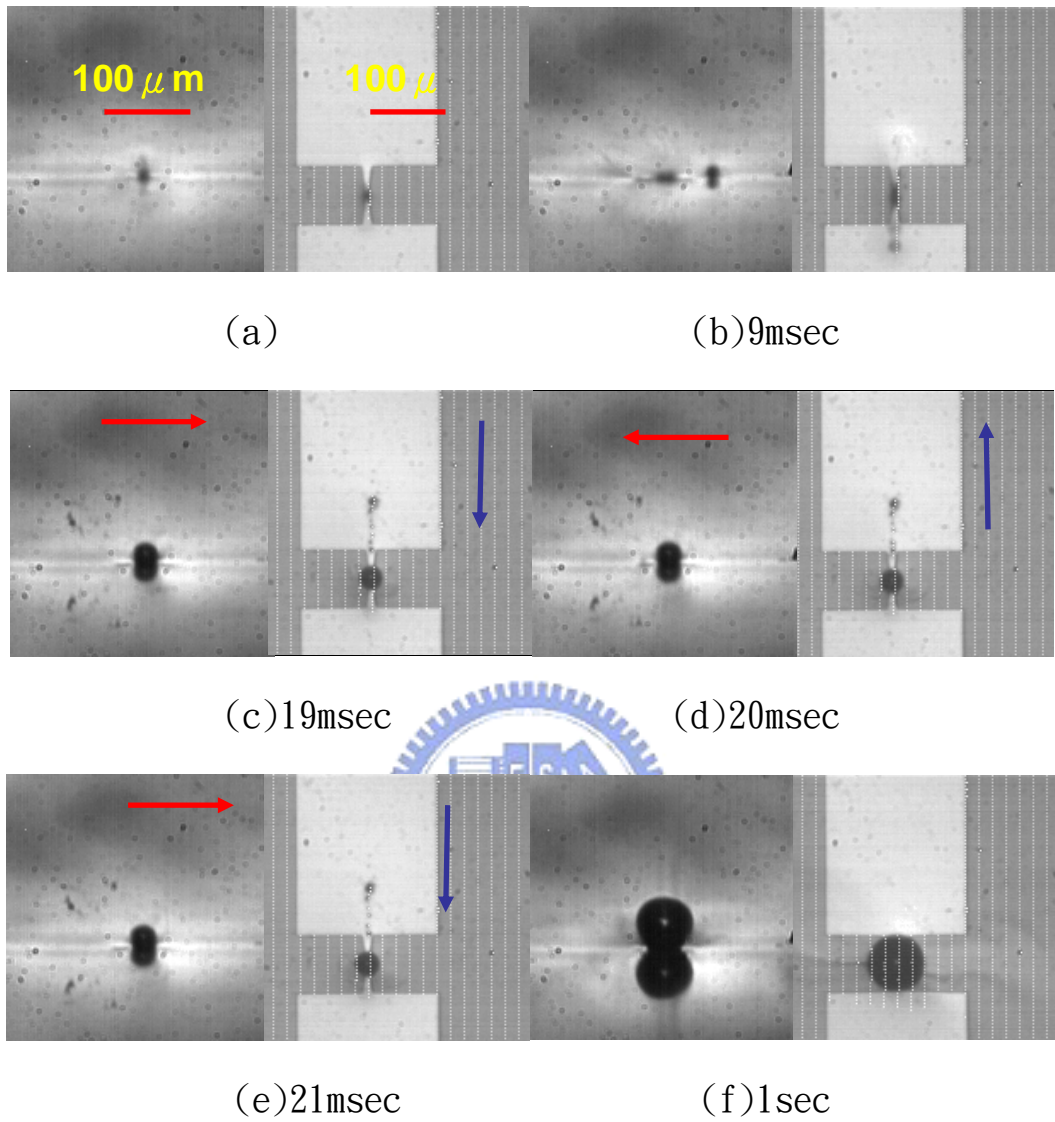


圖 4.37 工作液體為 1.29cp，接觸角為 37 度，汽泡飛濺的最低輸入  
 功率為 1.2W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測

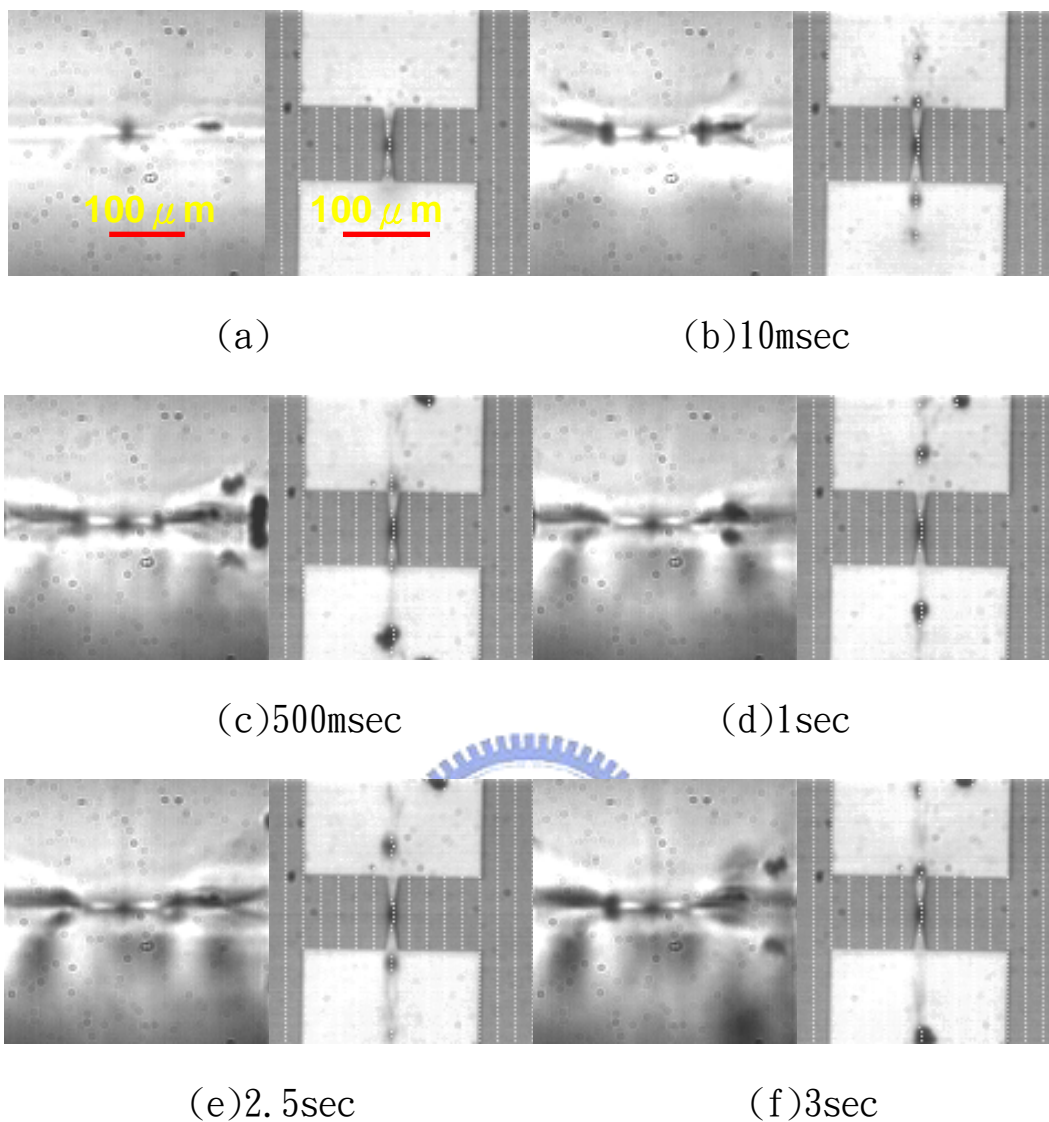


圖 4.38 工作液體為 2.2cp，接觸角為 40 度，汽泡飛濺的最低輸入功率為 0.8W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測



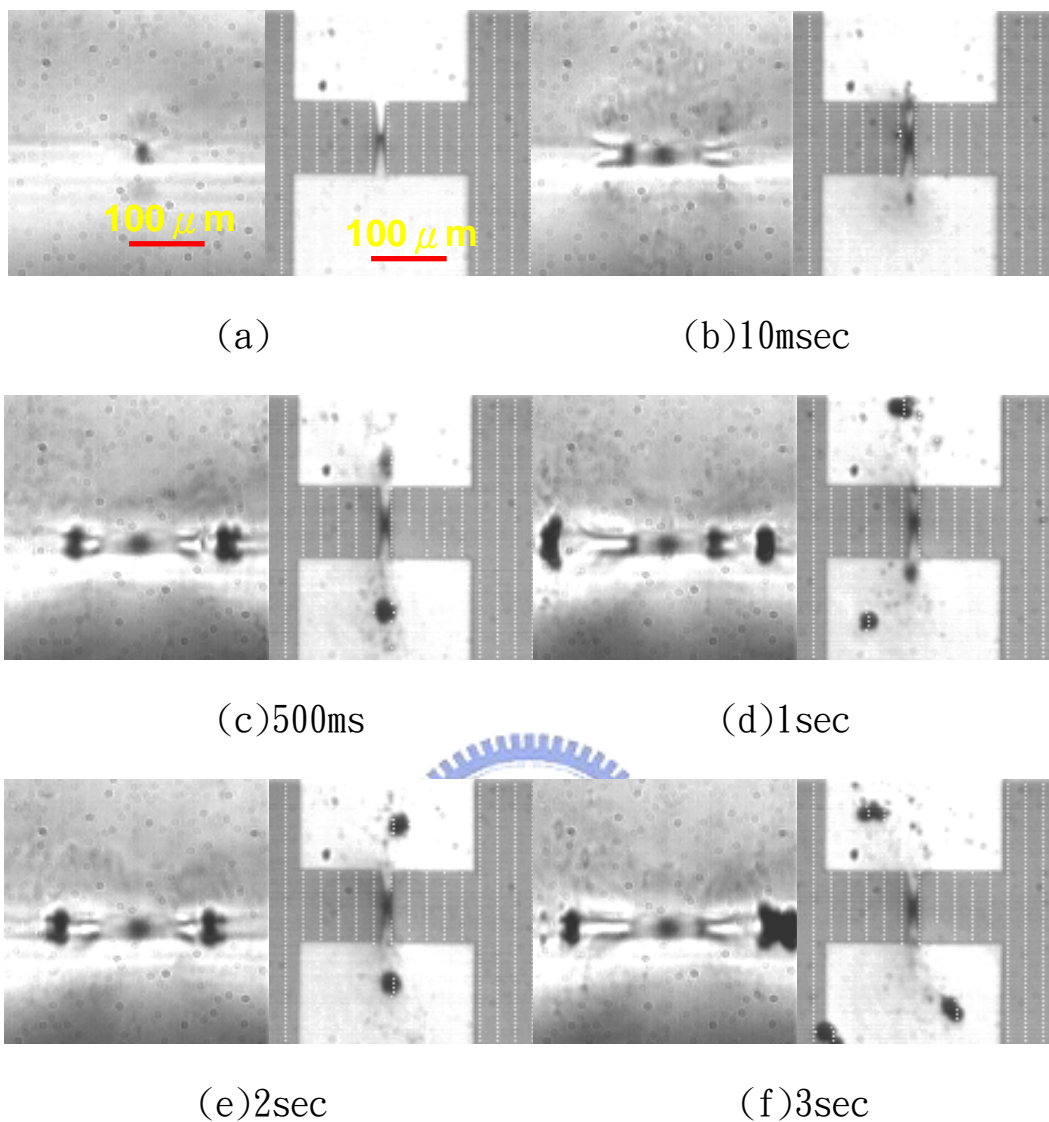


圖 4.39 工作液體為 2.76cp，接觸角為 40 度，汽泡飛濺的最低輸入  
 功率為 0.8W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測

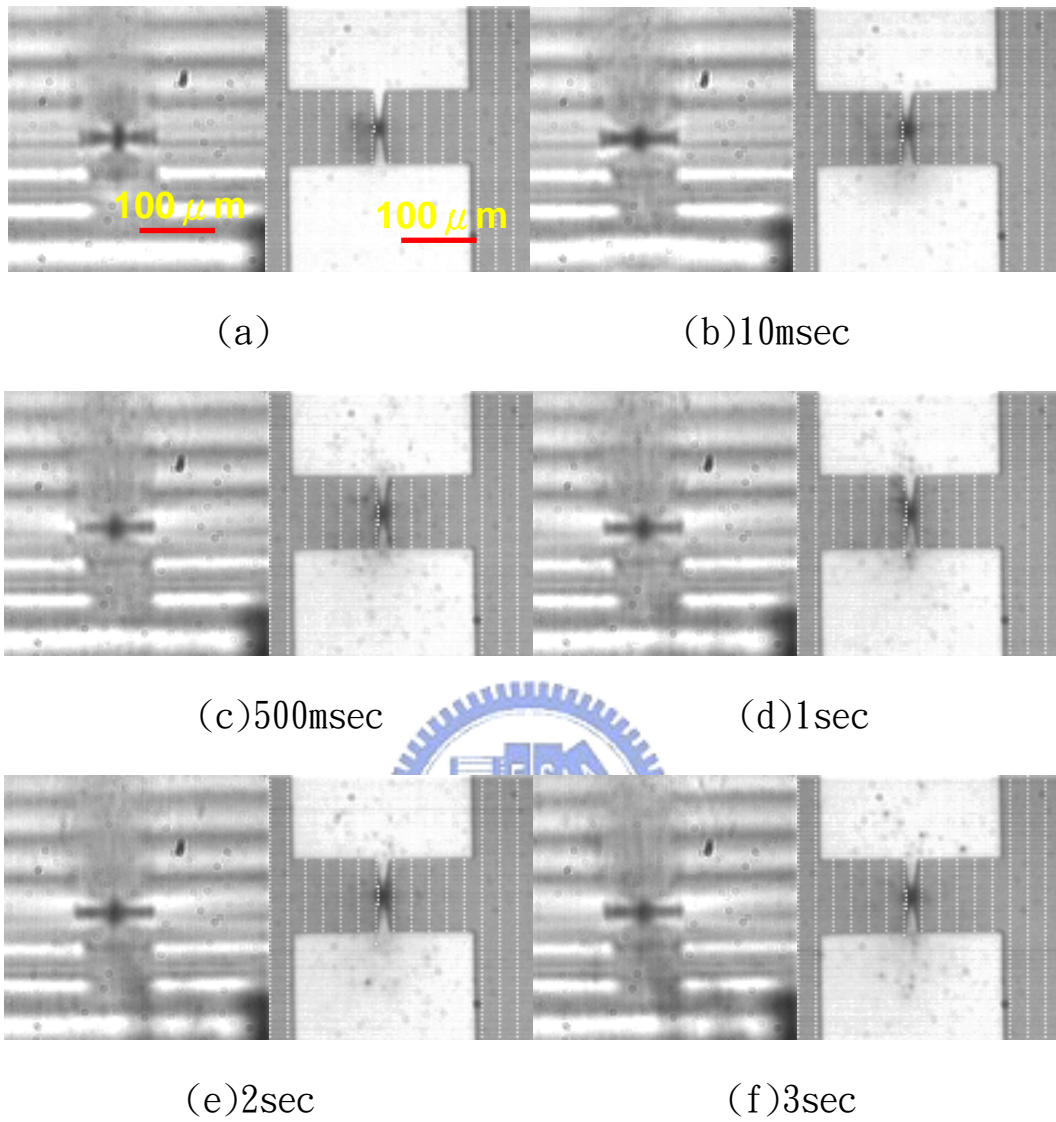


圖 4.40 工作液體為 5.16cp，接觸角為 44 度，汽泡飛濺的最低輸入  
 功率為 0.72W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測



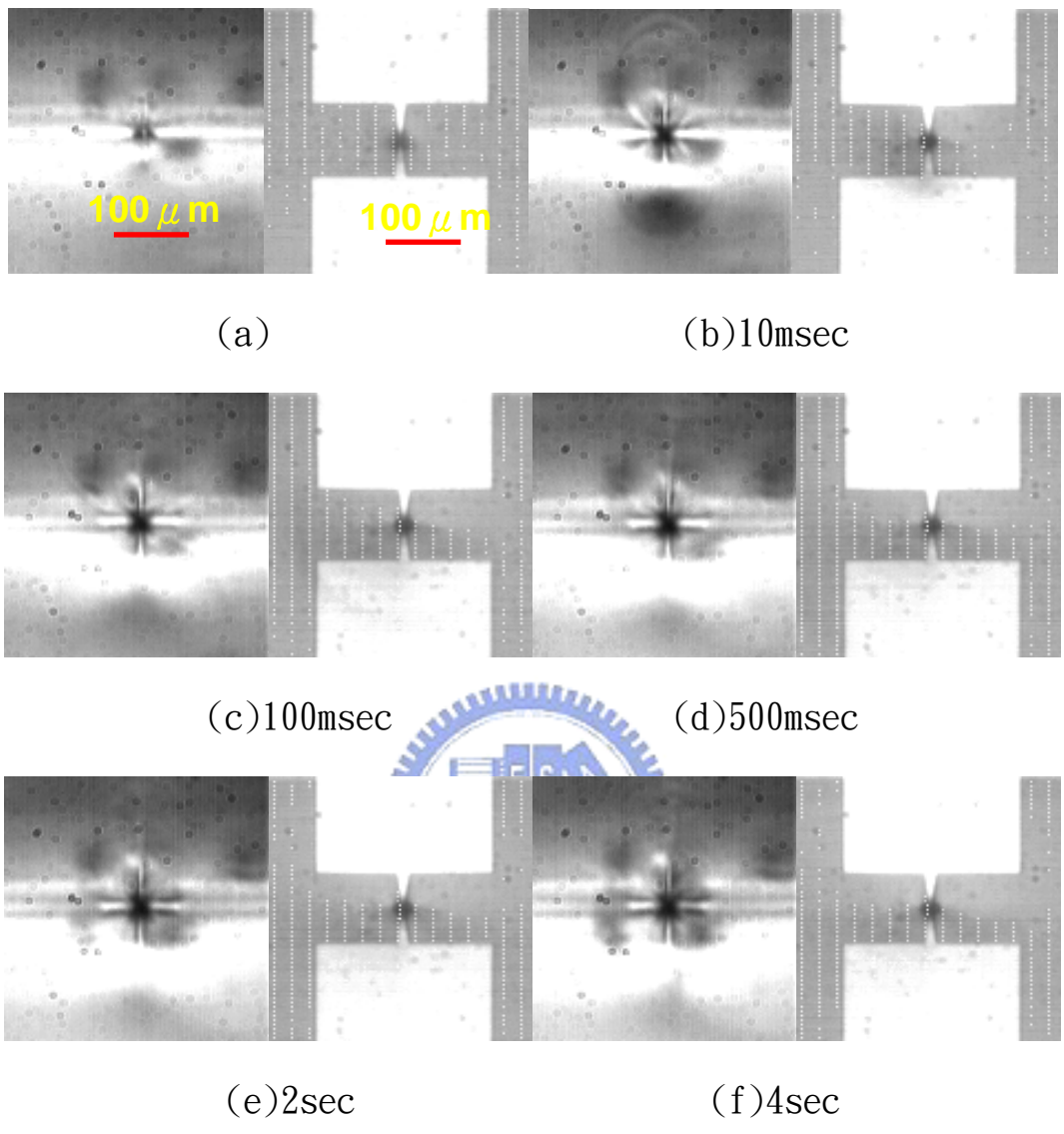


圖 4.41 工作液體為 11.46cp，接觸角為 49 度，汽泡飛濺的最低輸入功率為 0.7W 熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測

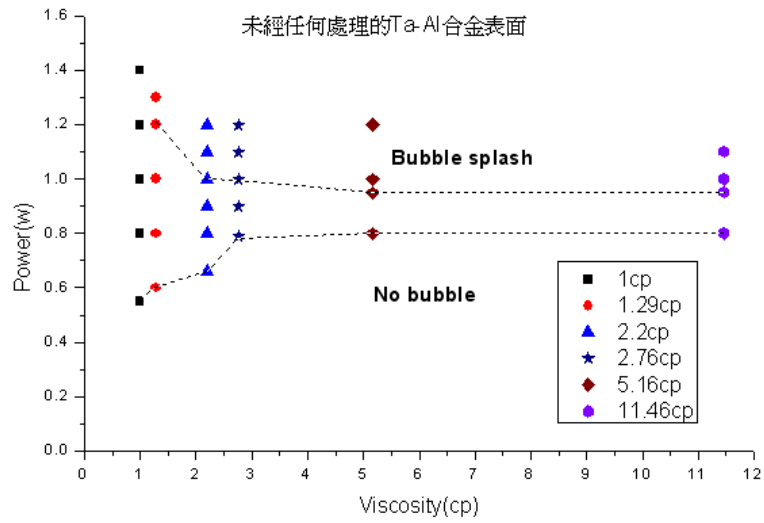


圖 4.42 界定未經任何處理的 Ta-Al 合金表面使汽泡驅動的可行功率

範圍在不同黏度下的變化圖

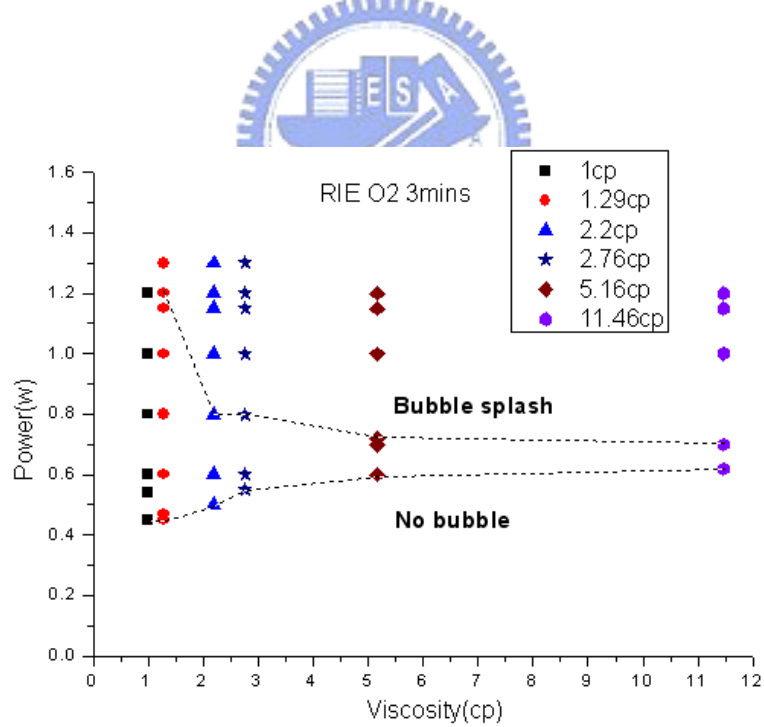
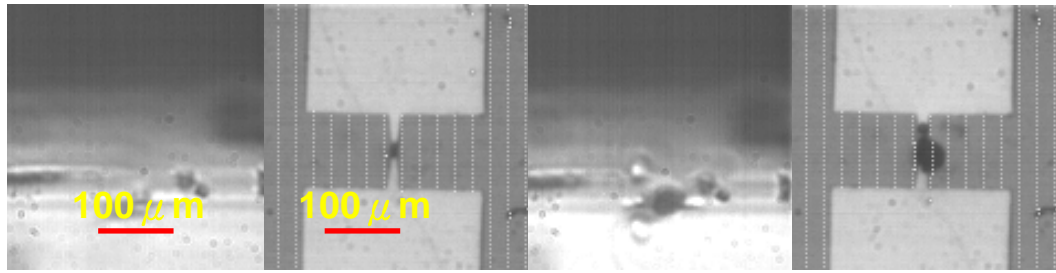


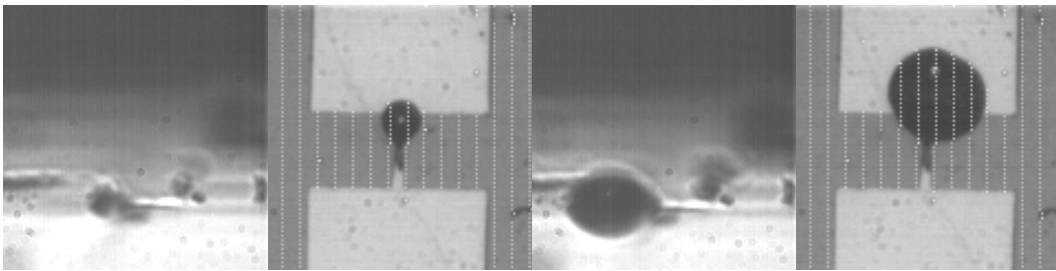
圖 4.43 界定利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面使

汽泡驅動的可行功率範圍在不同黏度下的變化圖



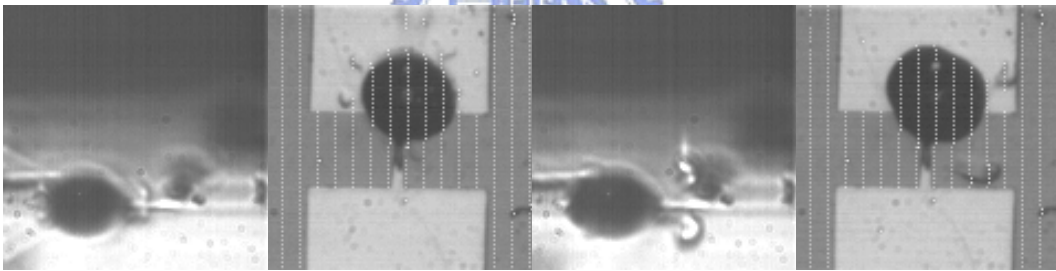
(a)

(b) 78 msec



(c) 134 msec

(d) 1 sec

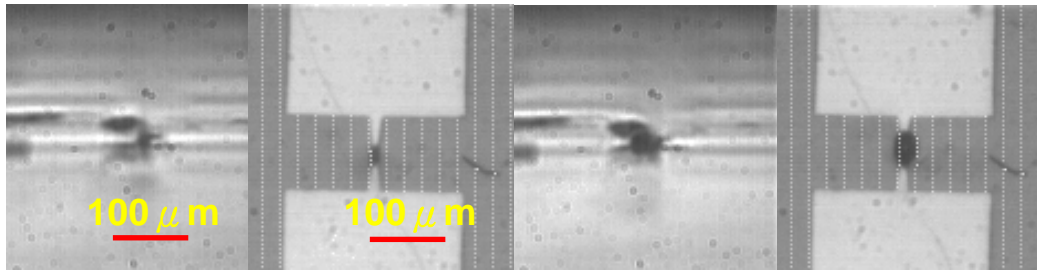


(e) 1.013 sec

(f) 1.198 sec

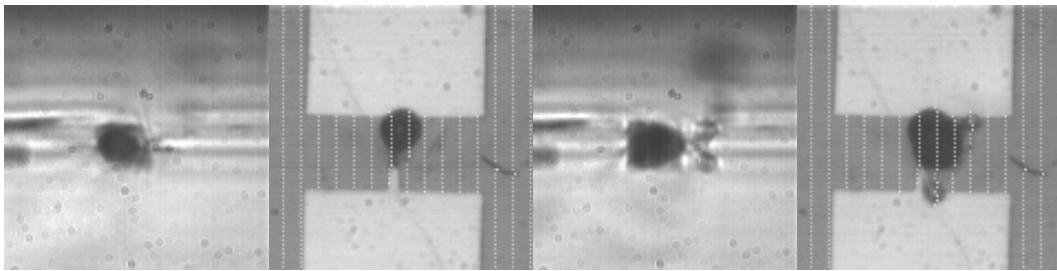
圖 4.44 工作液體為 1.29cp，接觸角為 113 度，輸入功率為 1.2W 熱

汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測



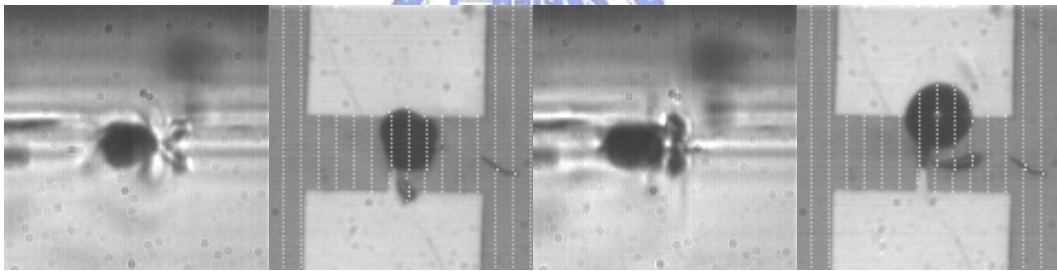
(a)

(b) 79msec



(c) 411msec

(d) 1.262sec

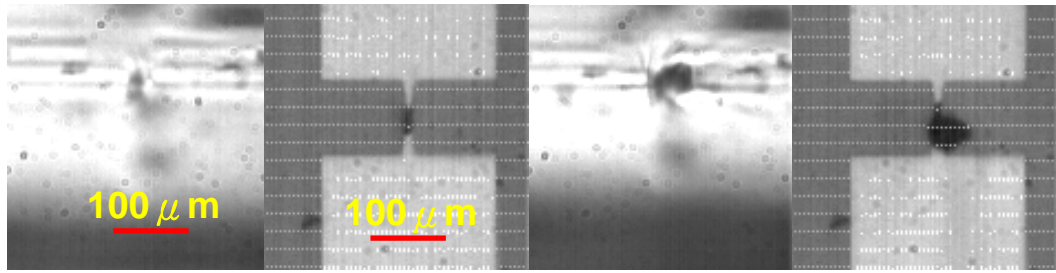


(e) 1.32sec

(f) 1.684sec

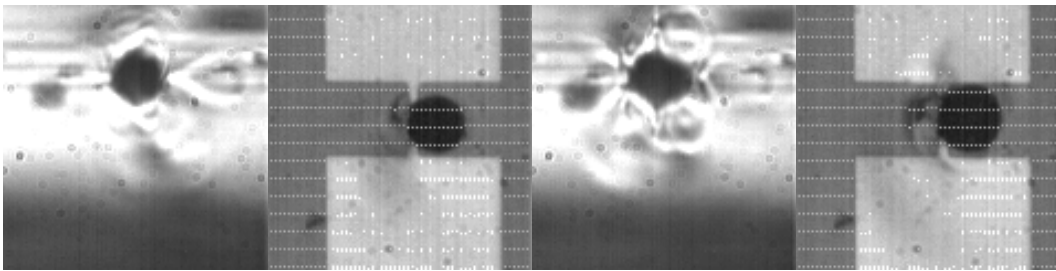
圖 4.45 工作液體為 2.2cp，接觸角為 111 度，輸入功率為 1W 熱汽泡

成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測



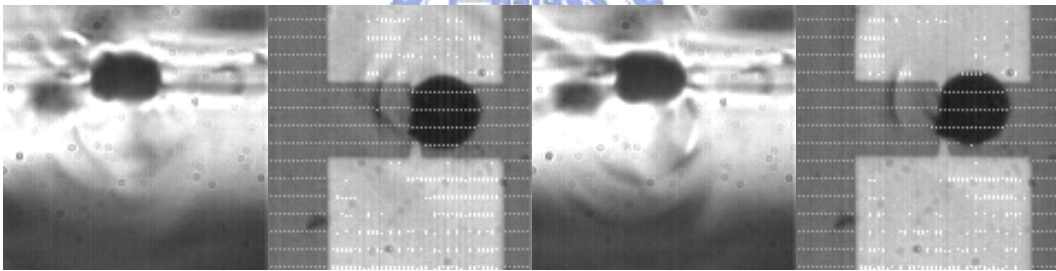
(a)

(b)200msec



(c)900msec

(d)1.59sec

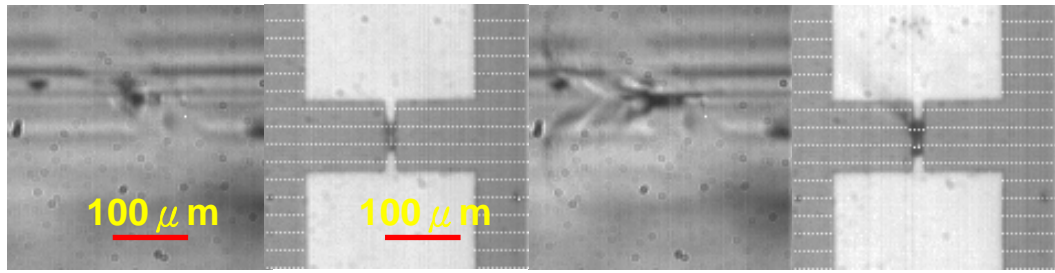


(e)1.989sec

(f)2.2sec

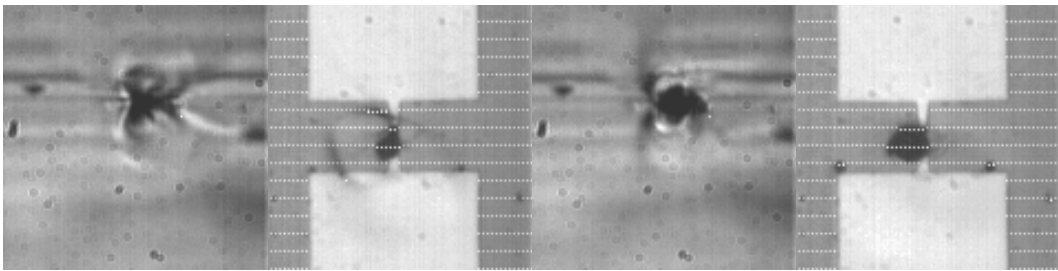
圖 4.46 工作液體為 2.76cp，接觸角為 114 度，輸入功率為 1W 熱汽

泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測



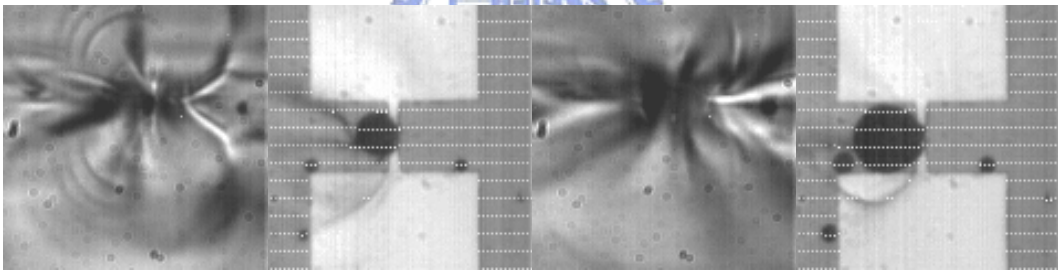
(a)

(b) 20msec



(c) 200msec

(d) 1sec



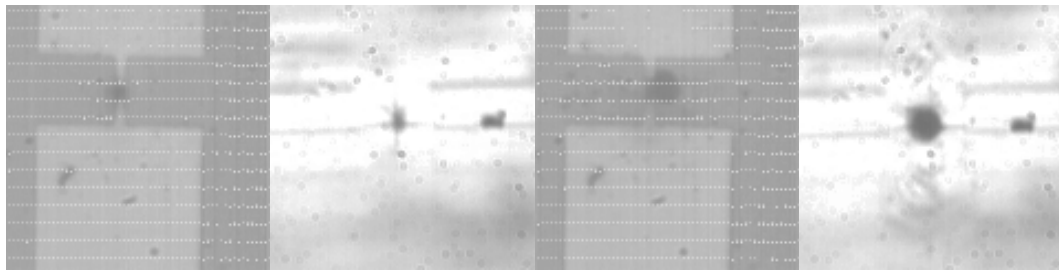
(e) 2sec

(f) 3.63sec

圖 4.47 工作液體為 5.16cp，接觸角為 115 度，輸入功率為 0.95W 熱

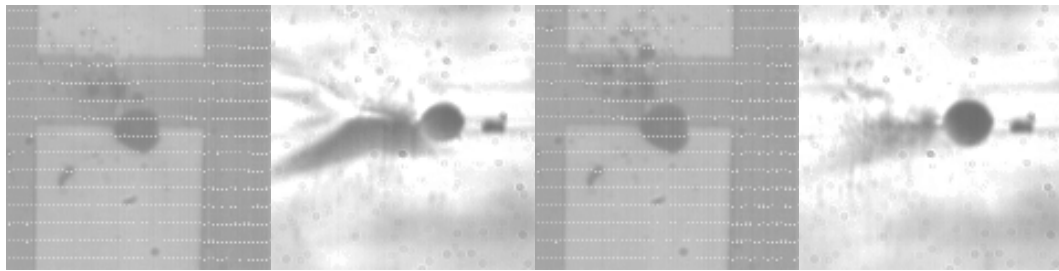
汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測





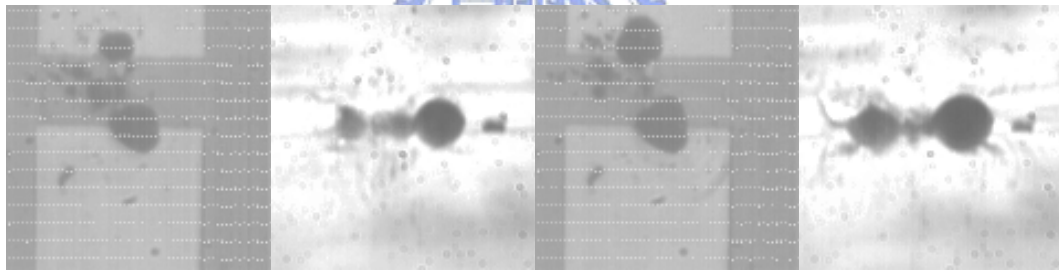
(a)

(b)249msec



(c)1sec

(d)1.5sec



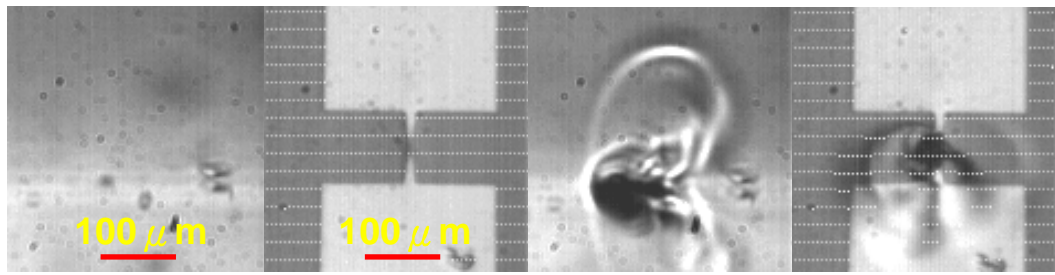
(e)2sec

(f)3sec

圖 4.48 工作液體為 8.31cp，接觸角為 113 度，輸入功率為 0.95W 熱

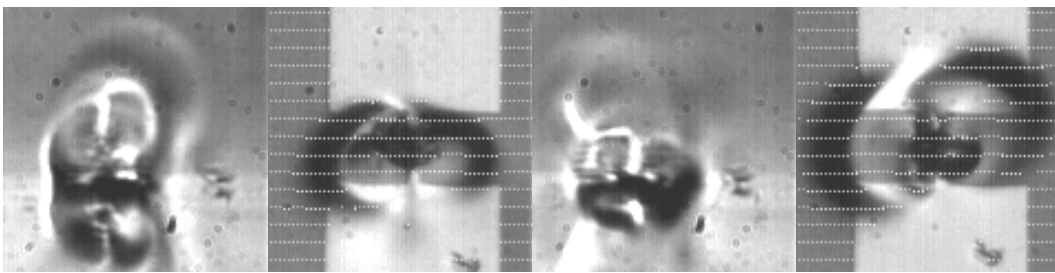
汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測





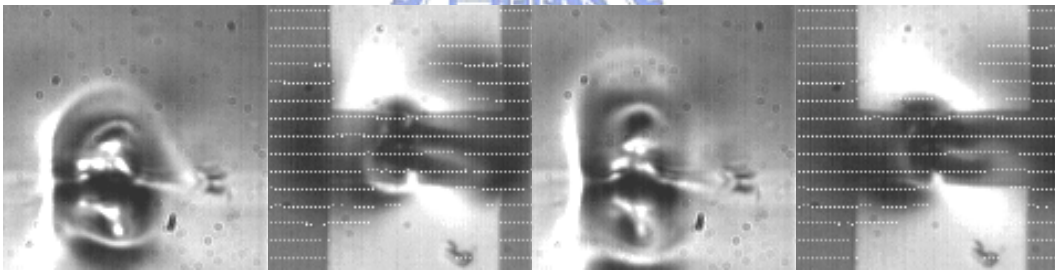
(a)

(b) 500msec



(c) 1sec

(d) 2sec



(e) 3sec

(f) 4sec

圖 4.49 工作液體為 11.46cp，接觸角為 111 度，輸入功率為 0.95W

熱汽泡成長過程上方與側向同步拍攝視點觀測

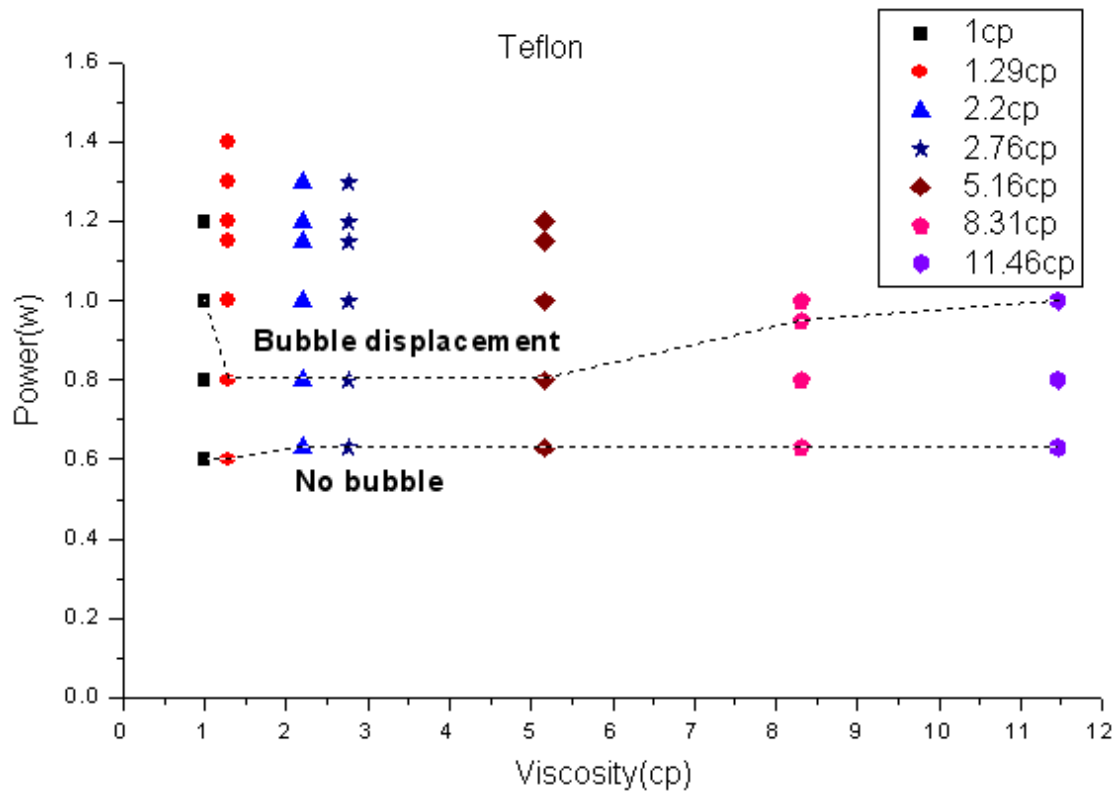


圖 4.50 界定塗佈鐵氟龍液體的 Ta-Al 合金表面使汽泡驅動的可行範圍在不同黏度下的變化圖

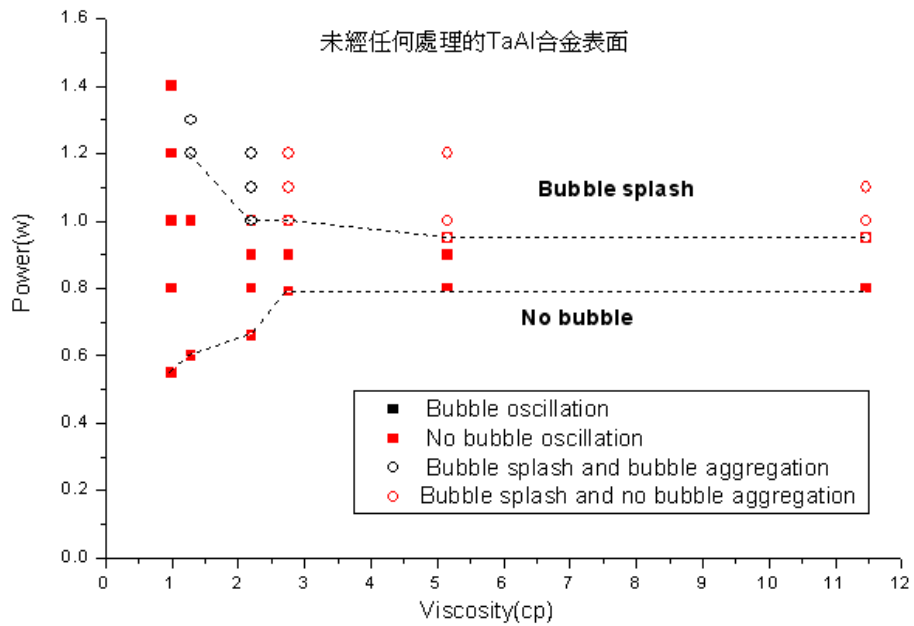


圖 4.51 界定未經任何處理的 Ta-Al 合金表面

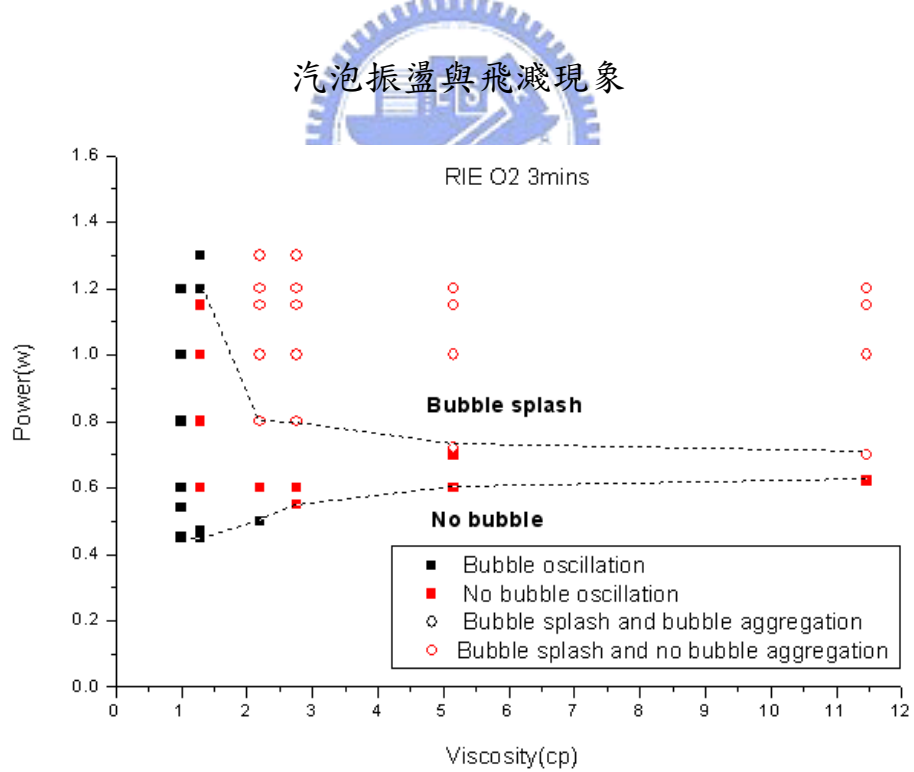


圖 4.52 界定利用離子蝕刻系統進行表面改質的 Ta-Al 合金表面

汽泡振盪與飛濺現象

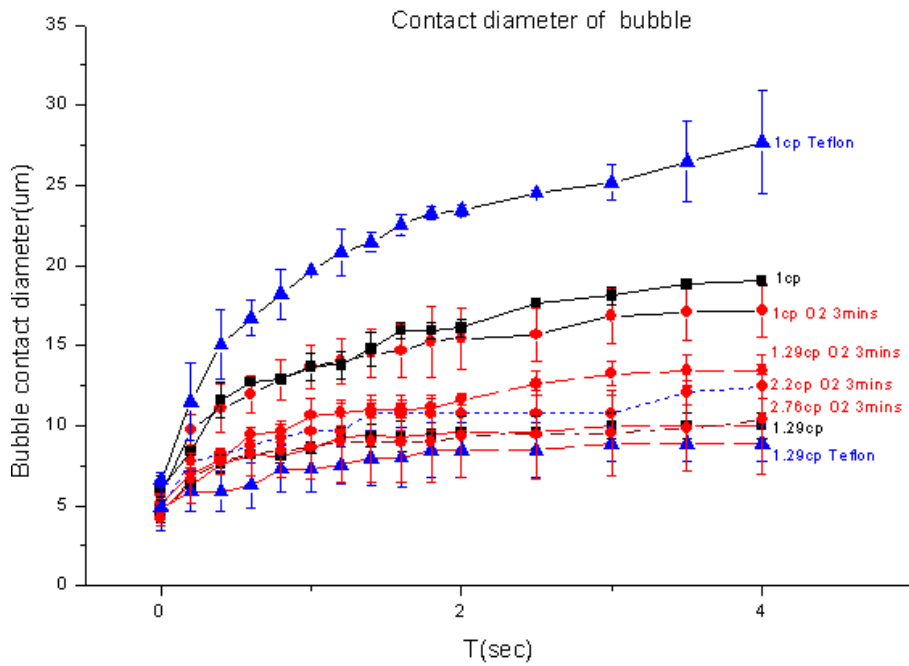


圖 4.53 輸入功率為 0.6W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性

表面熱汽泡汽固界面接觸直徑隨時間的變化圖

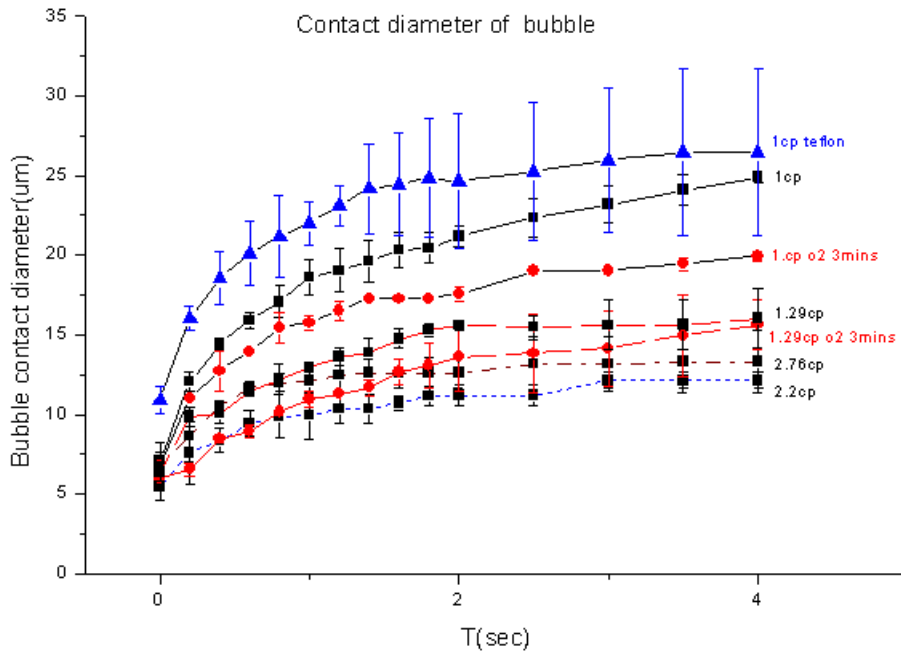


圖 4.54 輸入功率為 0.8W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性

表面熱汽泡汽固界面接觸直徑隨時間的變化圖

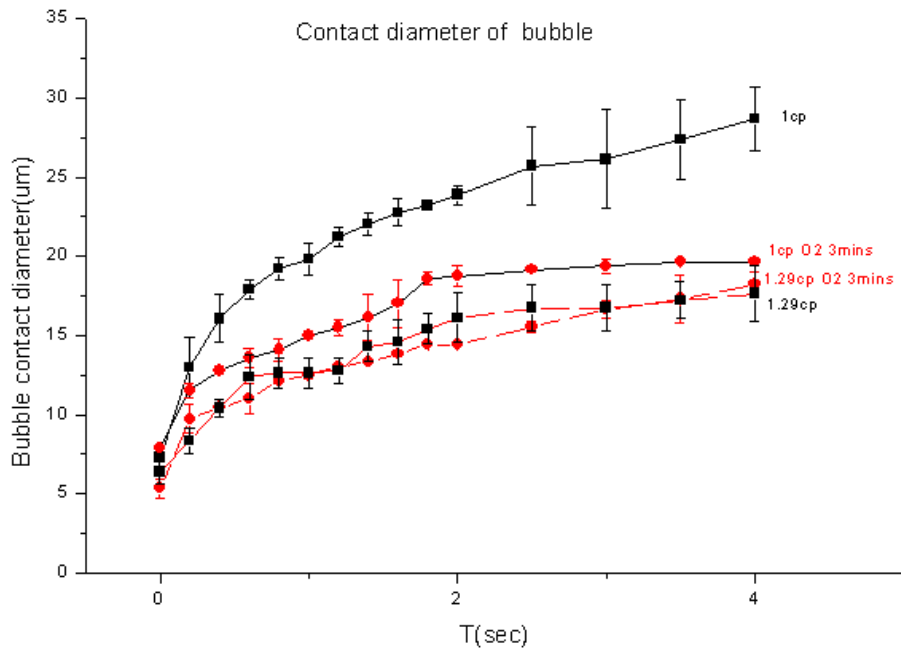


圖 4.55 輸入功率為 1W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性表

面熱汽泡汽固界面接觸直徑隨時間的變化圖



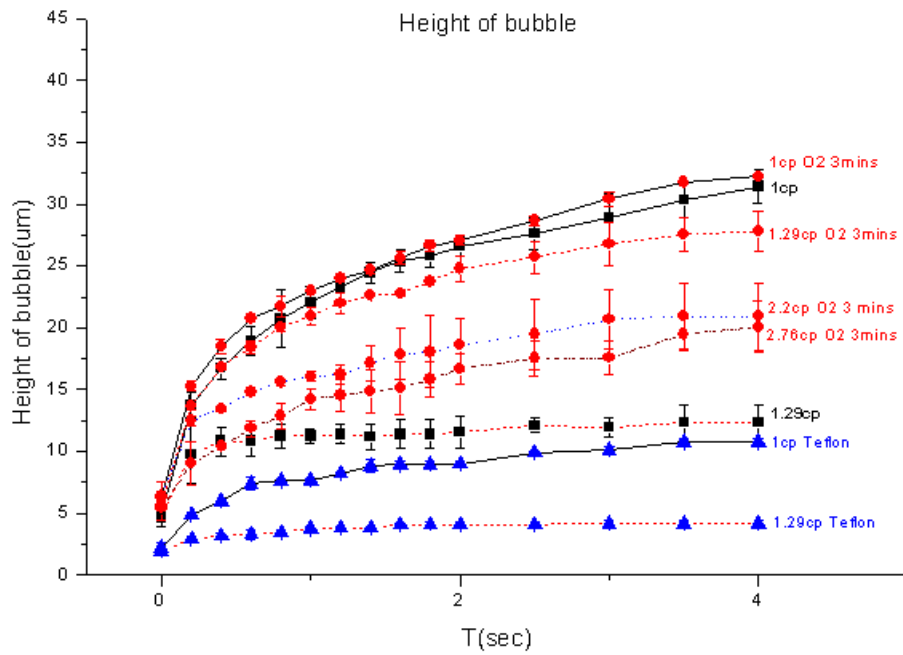


圖 4.56 輸入功率為 0.6W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性

表面熱汽泡頂端高度隨時間的變化圖

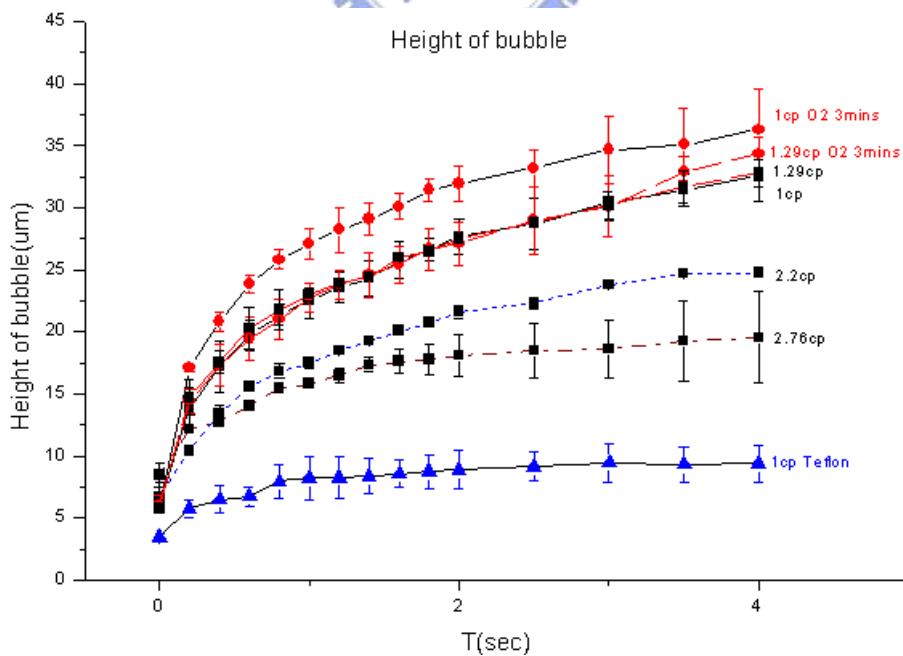


圖 4.57 輸入功率為 0.8W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性

表面熱汽泡頂端高度隨時間的變化圖

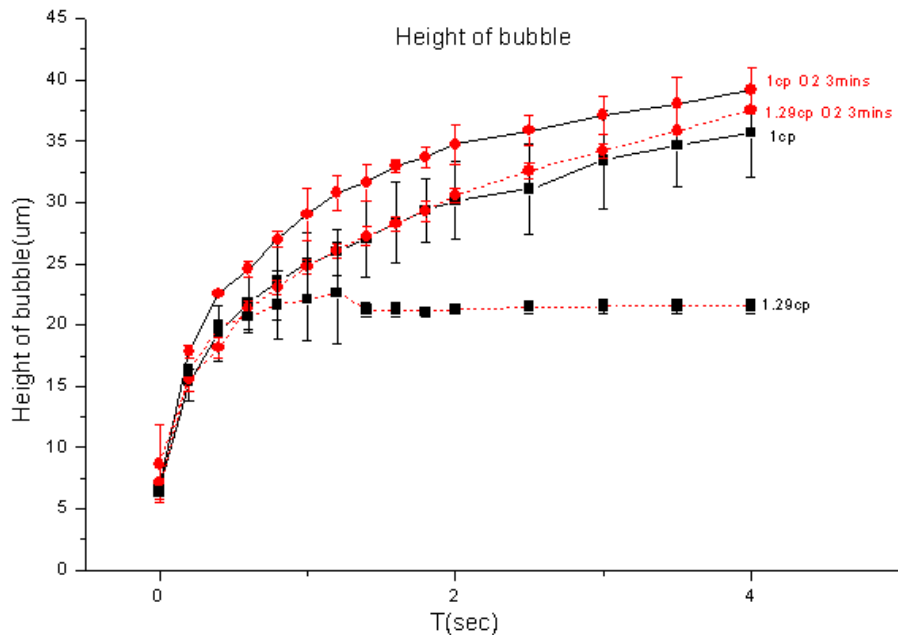


圖 4.58 輸入功率為 1W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性表

面熱汽泡頂端高度隨時間的變化圖

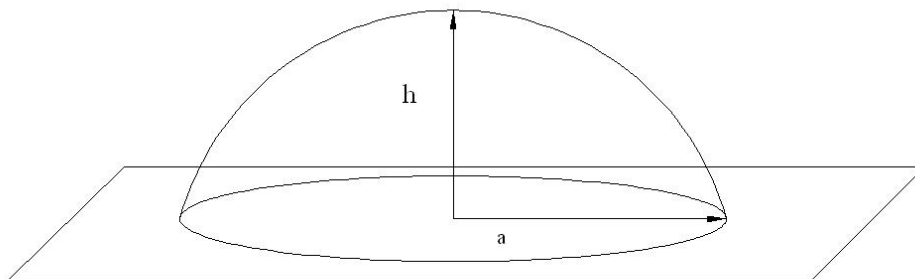


圖 4.59 球蓋體體積公式



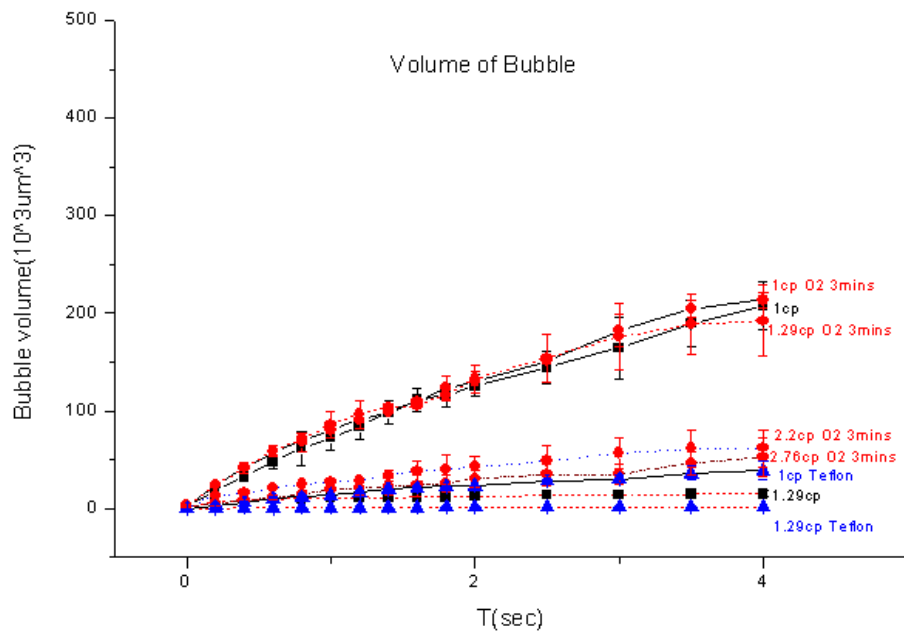


圖 4.60 輸入功率為 0.6W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性

表面熱汽泡體積隨時間的變化圖

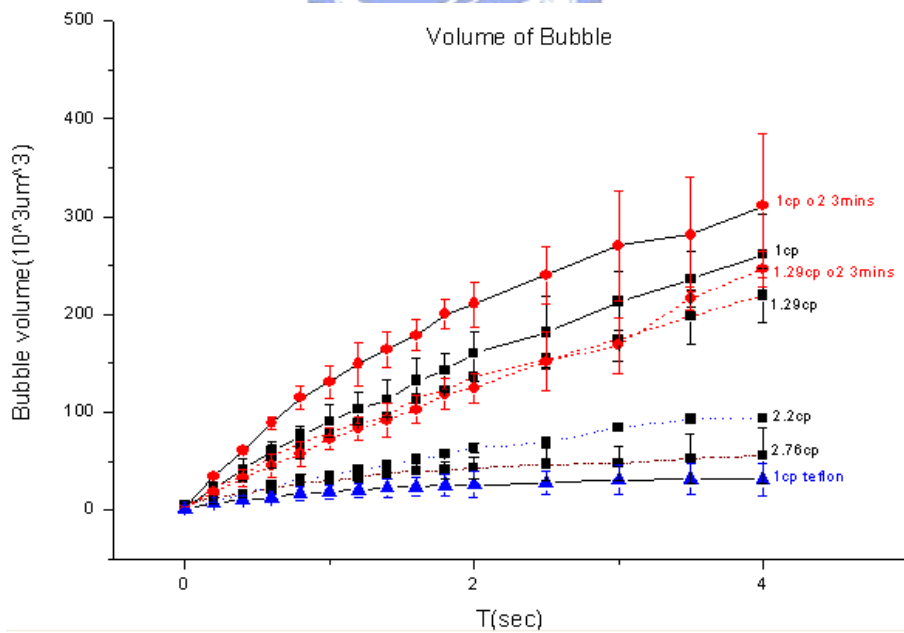


圖 4.61 輸入功率為 0.8W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性

表面熱汽泡體積隨時間的變化圖

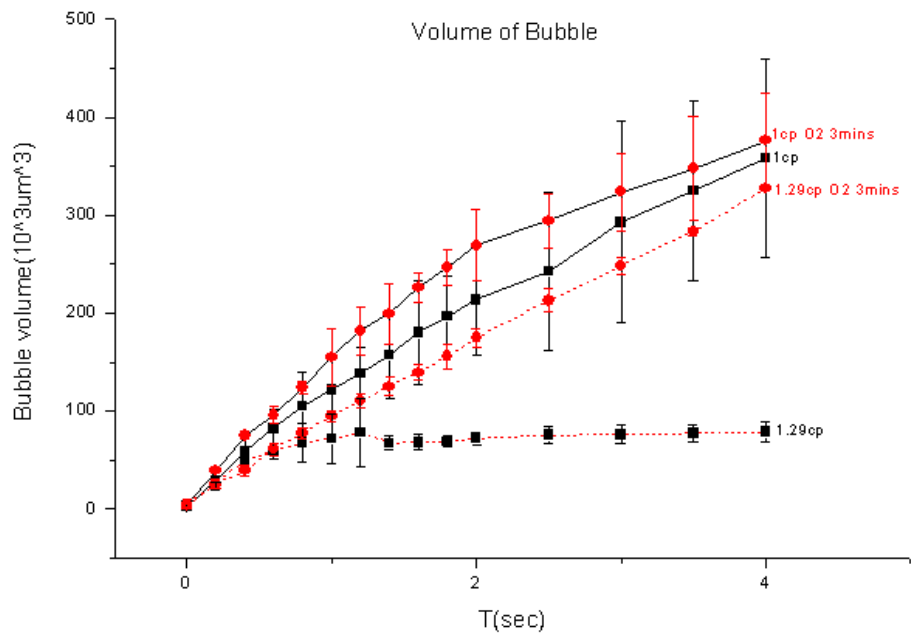


圖 4.62 輸入功率為 1W，在可行汽泡驅動的範圍中，不同親疏水性表

面熱汽泡體積隨時間的變化圖

