

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

橢圓微型模穴之微液體填充研究

Analysis on Filling Process in Oval Disk-Shaped Micro Chambers of
Composite Materials at Different Aslope Angle

研究生：劉懋勳

指導教授：林振德

中華民國 九十五年 七月

橢圓微型模穴之微液體填充研究

Analysis on Filling Process in Oval Disk-Shaped Micro Chambers of
Composite Materials at Different Aslope Angle

研究生：劉懋勳

Student : Mao-Shiun Liu

指導教授：林振德

Adviser : Jenn-Der Lin

國 立 交 通 大 學

機 械 工 程 學 系

碩 士 論 文

A Thesis
Submitted to Institute of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of The Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Mechanical Engineering
July 2006
Hsinchu, Taiwan, Republic in China

中華民國九十五年七月

橢圓微型模穴之微液體填充研究

研究生：劉懋勳

指導教授：林振德

摘要

本論文之研究目的在於製作橢圓模穴為主之微流體裝置，並藉由實驗觀測表面張力、附著力、慣性力對液體填充過程中之影響。實驗中，流道製作方式有二，一為PDMS翻模而成，另一為以MEMS技術於晶圓上蝕刻流道；根據偉伯數的變化、模穴大小、模穴旋轉角、改變橢圓模穴壁面材質和化學處理改變壁面性質，探討波前與其流動現象，並且使用微粒子影像測速法(PIV)重現會包圍氣泡模穴填充過程之速度，藉以釐清會發生包圍氣泡前後實際流動狀態。

實驗結果顯示，容易在模穴產生氣泡包覆現象之情況如下：

1. 偉伯數相同，橢圓模穴旋轉後，越靠近進口流道時。
2. 橢圓模穴旋轉角相同的，偉伯數越高時。
3. 偉伯數相同，PDMS 模穴以 PDMS 材質封裝比以玻璃封裝之更易包覆氣泡。
4. 偉伯數及模穴材質相同，相同面積但形狀較寬闊的模穴；產生氣泡包覆的主要原因與流速、模穴與入口夾角及橢圓模穴之幾何尺寸有關。另外在微粒子影像測速法過程中發現在彎角大的模穴中，因為進口慣性力被表面張力抵銷後，速度向量會在波前呈現均勻的分佈，導致填充時液面不足以到達模穴角落填充，造成最後的包覆氣泡現象。

另本研究中，尚有以化學處理法處理，改變已封裝好之模穴內部親疏水性。針對 PDMS 模穴而言，實驗中的氧電漿再處理法、界面離

子活性劑處理法，均會使原本是疏水性質的模穴內壁轉變為較為親水。且對照文獻中 HEMA 處理法後，結果顯示能使模穴內變親水的效果為氧電漿處理法最佳、HEMA 處理法最差。針對 Silicon 流道而言，通入等向性蝕刻液 TMAH 後，能再度蝕刻模穴底面，也因為模穴內部非平滑表面，所以處理 15 分鐘、30 分鐘後，再與未處理前比較時，通入水時會出現疏水、相對親水、相對疏水的填充現象。



Analysis on Filling Process in Oval Disk-Shaped Micro Chambers of Composite Materials at Different Aslope Angle

Student: Mao-Shiun Liu

Advisor : Prof. Jenn-Der Lin

Abstract

The purpose of this thesis is to manufacture oval disk-shaped micro fluidic device for observation and also to examine the effect of surface tension, adhesive and inertial force in the filling process. Two methods to manufacture micro channels and micro chambers in this experiment are PDMS molding process and MEMS technology fabricating on the wafer. The liquid filling process is analyzed at variance value the Weber number, size of the chambers, aslope angle of the chambers, associated with the changes in materials of the walls of the micro chambers, and the chemical changes in processing. Furthermore, in order to clarify the actual circumstance of flowing before bubble entrapped and after, PIV is adopted in this experiment for reconstructing the speed distribution of filling in the bubble-entrapped chambers.

The result of the experiment shows some circumstances when bubble entrapment occurred:

1. With the same Weber number, the degree between the chambers and the inlet channel decreased.
2. With the same degree between the chamber and the inlet channel, the Weber number increased.
3. The PDMS micro chambers package with PDMS sheet was easier than that with glass sheet.
4. With the same Weber number and the same property of the wall in the

chamber, the superficies of the chamber was equivalent but the shape of the chamber was different.

In addition, inertia in the inlet channel was offset by the surface tension in big curve chambers, and the speed quantities would spread evenly in the front shapes. Consequently, front shapes failed for reaching chamber corners and filling, and bubble entrapment occurred.

Chemical treatment is also used to change the hydrophilic and hydrophobic quality inside the packaged chambers in this experiment. In regard to PDMS chambers, surfactant and treatment O₂ plasma for the second time changed the hydrophobic chamber walls into somewhat hydrophilic. Moreover, to make chamber walls become hydrophilic, treatment O₂ plasma is better than treatment HEMA in comparison with treatment HEMA in references. In regard to silicon channel, pouring TMAH would etch the bottom of the chambers once more. Inside the chambers was not smooth; when comparing the chamber walls used treatment TMAH for 15minutes and 30minutes with those had not used treatment TMAH, different filling phenomenon would appear while pouring water in chambers.

誌謝

感謝吾師林振德教授在兩年來在課業上的教導及在論文上的適切引導。也感謝奈米所柯富祥教授，在實驗上除借用實驗器材之外，也提供許多製程上寶貴的建議與觀念。同時對口試委員吳志陽教授、許隆結教授和陳志堅博士對於論文的指正與建議，使得論文能夠順利完成，在此也一併致謝。

在交大的每一個日子，感謝好友豐庭、秋傑、益彰、啟豪的相互砥礪，也感謝學長文福、志明、雲龍、昱宏、自皓、本權、俞任、遠達、文義及學弟光倫、志豪、昌彥的照顧與幫忙，同時也要謝謝奈米所其昌、孟德、乙介、佳典、建文、坤霖、子銘、志杰、亦儂、群芳、敬雅在實驗儀器使用方式的教學與借用。

求學的階段暫時告一段落，感謝媽媽在我求學期間的辛勤培育，讓我在生活上無後顧之憂，能安心的致力於課業。也感謝妹妹、阿姨、星好的鼓勵與協助。

僅以此論文獻給我摯愛的家人。

劉懋勳

九五年七月 于交大

目錄

頁次

摘要.....	i
Abstract.....	iii
誌謝.....	v
目錄.....	vi
表目錄.....	viii
圖目錄.....	ix
符號表.....	xvii
第一章 緒論	1
1.1 背景	1
1.2 文獻回顧.....	1
1.3 研究目的.....	5
第二章 實驗原理與微流道製程設計	6
2.1 實驗原理	6
2.1.1 內聚力、表面張力、潤濕性與毛細作用力概念	6
2.1.2 微粒子影像測速法基本量測原理	7
2.1.3 接觸角.....	8
2.2 微流道製程設計	9
2.2.1 微流道設計.....	9
2.2.2 微流道製程.....	10

第三章 觀測系統與步驟	15
3.1 系統架設及操作步驟	15
3.2 實驗項目暨觀測步驟	20
第四章 結果與討論	22
4.1 靜態接觸角量測結果	22
4.1.1 PDMS 材質	22
4.1.2 Silicon 材質	23
4.2 PDMS 流道填充過程	23
4.3 PDMS 模穴表面改質後之填充過程	29
4.4 TMAH 處理 Silicon 流道後填充過程	30
第五章 結論	32
5.1 接觸角	32
5.2 PDMS-PDMS 模穴與 PDMS-GLASS 模穴填充過程	33
5.3 改變 PDMS 模穴壁面親疏水性質	36
5.4 TMAH 處理 silicon 流道後之填充過程	36
參考文獻.....	38



表目錄

	頁次
表 2-1 光阻種類及使用參數	43
表 2-2 RIE 機台使用參數	43



圖目錄

頁次

圖 1-1	Cheng 等人[16]在晶圓上以 TMAH 處理與蝕刻速率和粗糙度之關係圖	44
圖 1-2	Xie 等人[21]設計之 PDMS 整合微流體晶片之生物流體系統。	44
圖 1-3	Chen 等人[22]以毛細管製作之流道口接管及 L 型接頭。 .	45
圖 1-4	Sundararajan 等人[23]，針頭在 PDMS 澆鑄時作為開口區。	45
圖 1-5	Bodas 等人[24]以不同化學處理比較 PDMS 親水性的延長時間	46
圖 1-6	Adrian 等人[22]以 PIV 對紊流邊界層之研究。	46
圖 1-7	Nguyen 等人以 μ -PIV 對微流道中磁性流體之研究。	47
圖 1-8	Hoffmann μ -PIV 觀測等人 T 型混合流道系統架設圖	47
圖 2-1	表面張力。(文獻[27])	48
圖 2-2	液體與固體表面潤濕性示意圖。(文獻[27])	48
圖 2-3	影像測速法原理示意圖	49
圖 2-4	Youngs model[29]	49
圖 2-5	模穴幾何尺寸示意圖	50
圖 2-6	PDMS(聚二甲基矽甲烷)	51
圖 2-7	構成微模穴材質類別	51
圖 2-8	微流體裝置(PDMS-PDMS)	52
圖 2-9	微流體裝置(PDMS-Glass)	52

圖 2-10	微流體裝置(Silicon-PDMS)	52
圖 2-11	超音波震動鑽孔機	53
圖 2-12	接觸角量測儀	54
圖 2-13	氧電漿清洗機	54
圖 3-1	高速攝影實驗系統示意圖	55
圖 3-2	可程式注射泵	55
圖 3-3	μ -PIV 實驗系統示意圖	56
圖 4-1	PDMS 氧電漿處理時間與接觸角關係圖	57
圖 4-2	PDMS 表面經 Tritont 處理後之接觸角	58
圖 4-3	TMAH 處理時間與接觸角關係圖	59
圖 4-4	流道之 SEM 圖	60
圖 4-5	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000002$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$	61
圖 4-6	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.001$ 、 $We_2=0.0002$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$	61
圖 4-7	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.009$ 、 $We_2=0.00181$ 、 $Q=0.03\text{ml}/\text{min}$	62
圖 4-8	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000001$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$	62
圖 4-9	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.001$ 、 $We_2=0.0001$ 、 $Q=0.01\ \text{ml}/\text{min}$	63
圖 4-10	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.009$ 、 $We_2=0.00097$ 、 $Q=0.03\ \text{ml}/\text{min}$	63

圖 4-11	微流體填充過程 PDMS-Glass、700 μm ×250 μm 、Original、 We ₁ =0.009、We ₂ =0.0018、Q=0.03 ml/min.....	64
圖 4-12	微流體填充過程 PDMS-Glass、700 μm ×250 μm 、Original、 We ₁ =0.1005、We ₂ =0.0201、Q =0.1 ml/min.....	64
圖 4-13	微流體填充過程 PDMS-Glass、700 μm ×250 μm 、Original、 We ₁ =10.046、We ₂ =2.01、Q=1 ml/min.....	65
圖 4-14	微流體填充過程 PDMS-Glass、500 μm ×350 μm 、Original、 We ₁ =0.009、We ₂ =0.00097、Q=0.03 ml/min.....	65
圖 4-15	微流體填充過程 PDMS-Glass、500 μm ×350 μm 、Original、 We ₁ =0.1005、We ₂ =0.01077、Q=0.1ml/min.....	66
圖 4-16	微流體填充過程 PDMS-Glass、500 μm ×350 μm 、Original、 We ₁ =10.046、We ₂ =1.076、.....	66
圖 4-17	Q-We ₂ 關係圖.....	67
圖 4-18	微流體填充過程 PDMS-Glass、700 μm ×250 μm 、Original、 We ₁ =0.001、We ₂ =0.0201、Q=0.01 ml/min.....	68
圖 4-19	微流體填充過程 PDMS-Glass、PDMS-PDMS、 700 μm ×250 μm 、Original、We ₁ =0.001、We ₂ =0.0201、Q= 0.01ml/min.....	68
圖 4-20	微流體填充過程 PDMS-Glass、500 μm ×350 μm 、Original、 We ₁ =0.000251、We ₂ =0.000027、Q=0.005ml/min.....	69
圖 4-21	微流體填充過程 PDMS-PDMS、500 μm ×350 μm 、Original、 We ₁ =0.000251、We ₂ =0.000027、Q=0.005ml/min.....	69
圖 4-22	微流體填充過程 PDMS-Glass、700 μm ×250 μm 、Original、	

	$We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.00005$ 、 $Q=0.005\text{ml}/\text{min}$	70
圖 4-23	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.00005$ 、 $Q=0.005\text{ml}/\text{min}$	70
圖 4-24	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000002$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$	71
圖 4-25	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000002$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$	71
圖 4-26	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、R30、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000002$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$	72
圖 4-27	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、R60、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000002$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$	72
圖 4-28	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000001$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$	73
圖 4-29	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000001$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$	73
圖 4-30	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、R30、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000001$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$	74
圖 4-31	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、R60、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000001$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$	74
圖 4-32	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.00402$ 、 $We_2=0.00804$ 、 $Q=0.02\text{ml}/\text{min}$	75
圖 4-33	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.00402$ 、 $We_2=0.00804$ 、 $Q=0.02\text{ml}/\text{min}$	75

圖 4-34	微流體填充過程 PDMS-PDMS、700 μm ×250 μm 、L60、 We ₁ =0.00402、We ₂ =0.00804、Q=0.02ml/min.....	76
圖 4-35	微流體填充過程 PDMS-PDMS、700 μm ×250 μm 、R30、 We ₁ =0.00402、We ₂ =0.00804、Q=0.02ml/min.....	76
圖 4-36	微流體填充過程 PDMS-PDMS、700 μm ×250 μm 、R60、 We ₁ =0.00402、We ₂ =0.00804、Q=0.002ml/min.....	77
圖 4-37	微流體填充過程 PDMS-PDMS、500 μm ×350 μm 、Original、 We ₁ =0.00402、We ₂ =0.000431、Q=0.02ml/min.....	77
圖 4-38	微流體填充過程 PDMS-PDMS、500 μm ×350 μm 、L30、 We ₁ =0.00402、We ₂ =0.000431、Q=0.02ml/min.....	78
圖 4-39	微流體填充過程 PDMS-PDMS、500 μm ×350 μm 、L60、 We ₁ =0.00402、We ₂ =0.000431、Q=0.02ml/min.....	79
圖 4-40	微流體填充過程 PDMS-PDMS、500 μm ×350 μm 、R30、 We ₁ =0.00402、We ₂ =0.000431、Q=0.02ml/min.....	79
圖 4-41	微流體填充過程 PDMS-PDMS、500 μm ×350 μm 、R60、 We ₁ =0.00402、We ₂ =0.000431、Q=0.02ml/min.....	80
圖 4-42	微流體填充過程 PDMS-Glass、700 μm ×250 μm 、L30、 We ₁ =0.000251、We ₂ =0.00005、Q=0.005ml/min.....	81
圖 4-43	微流體填充過程 PDMS-PDMS、500 μm ×350 μm 、L30、 We ₁ =0.000251、We ₂ =0.000027、Q=0.005ml/min.....	81
圖 4-44	微流體填充過程 PDMS-Glass、500 μm ×350 μm 、L30、 We ₁ =0.000251、We ₂ =0.000027、Q=0.005ml/min.....	82
圖 4-45	微流體填充過程 PDMS-Glass、500 μm ×350 μm 、L60、	

	$We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.000027$ 、 $Q=0.005\text{ml}/\text{min}$	83
圖 4-46	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L60、	
	$We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.000027$ 、 $Q=0.005\text{ml}/\text{min}$	84
圖 4-47	微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L30、	
	$We_1=0.001005$ 、 $We_2=0.000108$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$	84
圖 4-48	微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L60、	
	$We_1=0.001005$ 、 $We_2=0.000108$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$	85
圖 4-49	微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L30、	
	$We_1=0.001005$ 、 $We_2=0.000201$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$	85
圖 4-50	微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、	
	$We_1=0.001005$ 、 $We_2=0.000201$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$	86
圖 4-51	微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L30、	
	$We_1=10.046$ 、 $We_2=1.076$ 、 $Q=1\text{ml}/\text{min}$	87
圖 4-52	微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L60、	
	$We_1=10.046$ 、 $We_2=1.076$ 、 $Q=1\text{ml}/\text{min}$	88
圖 4-53	微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L30、	
	$We_1=10.046$ 、 $We_2=2.01$ 、 $Q=1\text{ml}/\text{min}$	88
圖 4-54	微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、	
	$We_1=10.046$ 、 $We_2=2.01$ 、 $Q=1\text{ml}/\text{min}$	89
圖 4-55	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L30、	
	$We_1=0.001$ 、 $We_2=0.0002$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$	90
圖 4-56	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、	
	$We_1=0.001$ 、 $We_2=0.0002$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$	91

圖 4-57	微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.001$ 、 $We_2=0.000108$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$	92
圖 4-58	微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.001$ 、 $We_2=0.000108$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$	92
圖 4-59	微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.009$ 、 $We_2=0.001808$ 、 $Q=0.03\text{ml}/\text{min}$	93
圖 4-60	微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.00251$ 、 $We_2=0.00005$ 、 $Q=0.005\text{ml}/\text{min}$	94
圖 4-61	微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.00402$ 、 $We_2=0.000431$ 、 $Q=0.02\text{ml}/\text{min}$	95
圖 4-62	微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.001$ 、 $We_2=0.00108$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$	96
圖 4-63	$500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 模穴內水平速度分量比較圖	97
圖 4-64	$700\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 模穴內水平速度分量比較圖	98
圖 4-65	液體由入口流道進入模穴後之轉折角 θ 。定義	99
圖 4-66	PDMS-Glass $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 模穴之 $We-\theta$ 圖	100
圖 4-67	PDMS-Glass $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 模穴之 $We-\theta$ 圖	101
圖 4-68	PDMS-Glass $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 模穴之 $We-\theta$ 圖與文獻[13]比較	102
圖 4-69	PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 模穴之 $We-\theta$ 圖	103
圖 4-70	PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 模穴之 $We-\theta$ 圖	104
圖 4-71	微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.001005$ 、 $We_2=0.000201$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$ 、Plasma	

	treatment	105
圖 4-72	微流體填充過程 PDMS-Glass、700 μm \times 250 μm 、R30、 We ₁ =0.001005、We ₂ =0.000201、Q=0.2ml/min、Plasma treatment	106
圖 4-73	微流體填充過程 PDMS-Glass、700 μm \times 250 μm 、L60、 We ₁ =0.401、We ₂ =0.0802、Q=0.005ml/min、Triton treatment	106
圖 4-74	微流體填充過程 PDMS-Glass、700 μm \times 250 μm 、Original、 We ₁ =0.000251、We ₂ =0.00005、Q=0.005ml/min、HEMA treatment	107
圖 4-75	微流體填充過程 PDMS-Glass、700 μm \times 250 μm 、L60、 We ₁ =0.401、We ₂ =0.0802、Q=0.2ml/min	107
圖 4-76	Plasma 再處理裝置簡圖	107
圖 4-77	微流體填充過程 Silicon-PDMS、700 μm \times 250 μm 、R60、 We ₁ =0.000251、We ₂ =0.000016、Q=0.005ml/min	109
圖 4-78	微流體填充過程 Silicon-PDMS、700 μm \times 250 μm 、L30、 We ₁ =0.000251、We ₂ =0.000007、Q=0.005ml/min	110

符號表

A_1	進口流道截面積
A_2	橢圓模穴中與短軸呈平行之截面積
D	擴散係數
D_h	等效水力直徑
d_p	螢光粒子直徑
k	波茲曼常數
L	特徵長度
L_s	模穴內最小尺寸長度
P	截面積週長
Q	體積流率
S	影像平面上的位移
s	實際流場中的位移
T	絕對溫度
t	時間
u	粒子單位時間平均速度
V	速度
V_1	流體於進口流道中的速度
V_2	流體於模穴中內之速度
γ	表面能
ε_B	布朗運動誤差
θ_c	接觸角
θ_0	工作流體進入模穴後之彎角



μ 工作流體動力黏滯係數

ρ 密度

σ 表面張力

下標

L 液體

S 固體

V 氣體

LV 液體與氣體之間的差值

SL 固體與液體之間的差值

VS 氣體與固體之間的差值

1 進口流道

2 模穴



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、精確方向前進。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於這具有廣大發展潛力的研究領域。

傳統生醫化學分析過程，實驗所用的器材繁雜(如燒杯、錐形瓶、攪拌器等等)。在分析時，往往需使用各步驟大量的器材，獨立分析；且所需檢體及試劑量需求量大，整個分析過程緩慢，實驗廢棄物多[3]。而實驗室晶片(Lab on a chip, LOC)及微全分析系統(micro total analysis system, μ TAS)的目的就是為了整合上述分析數個獨立過程，除減少檢體的耗費量也縮短檢驗時間。另外分析晶片因為要達到低成本、高產能的要求，近來更有研究人員以聚合物做成上述之微米元件，因為聚合物如聚甲機丙烯酸甲脂(PMMA)、聚二甲基矽氧烷(PDMS)對化學試劑具有高阻抗性且密度小，甚至透明度高，並可依照不同要求之加工方法達到所需各種複雜元件。

1.2 文獻回顧

在微流體晶片尺寸趨向微小化的情況下，微小流場現象的分析成

為不可或缺的一環。對於微流體系統(Micro-Fluidics system)而言，是將小至幾個微升甚至是奈升的體積的液體，導入佈滿微流道的晶片中，以某種驅動方式或各類形式幫浦，讓液體在微流道中執行混合[3, 4]、分離[5]、加熱[6]或聚合酶連鎖反應(PCR)[7]等實驗室所用的反應，且廣泛地應用在化學分析、生物科技、製藥或量場觀測方面。然而，液體在微流道中流動之現象會因流體種類及流速、流道表面之表面粗糙度，幾何形狀及尺寸的改變而不同。因此分析液體在微流道中流動現象變成為一項重要的課題。

不同於以往之巨觀的狀態下，可以將毛細作用的影響忽略不計而不影響分析結果，在微管道之中微管道流，其慣性力較小，相對之下毛細作用影響分析結果更顯得重要。現今設計利用毛細力驅動液體流動的方法有改變壁面對液體之親水性(Hydrophilic)或疏水性(Hydrophobic)、管徑漸縮及局部加熱的特性，使液體不需依賴外力驅動的狀況下能自發的流動[8, 9]。而在毛細作用研究方面大多數由內聚力、附著力、表面張力及潤濕性著手，以實驗或模擬探討單一種液滴在毛細管中新月形波前(Meniscus Front)的變化或不同種類液滴與接觸界面之表面張力的關係導致不同的流動現象[10, 11]。且在表達流體與壁面的作用力時，常以接觸角來作為一參考指標。接觸角是流體分子與壁面接觸時，因接觸面的不同，表面能使得引力不同。令流體與壁面產生特定的夾角 θ ；此接觸角以 90° 為一分界，若純水於一平面上之接觸角大於 90° 時，此表面稱為疏水性表面(Hydrophobicity)，表示水不會潤濕此固體表面。反之，若接觸角小於 90° 時，稱為親水性表面(Hydrophilicity)，液體會浸潤固體表面。在流道中，其

表面是可以表面處理使呈親水性狀態，因為在流速不高的流道中，親水性扮演的是驅動的腳色，而疏水性表面則是呈現阻力的效應[12]。陳等人所模擬之模穴填充現象[13]，在假設模穴四個壁面為均質材料後，除圓形模穴、橢圓模穴做不同條件下模擬數值，也根據壁面材質之接觸角、模穴彎角及偉伯數，找出相關之無因次曲線。

至於製程加工技術方面，一般常利用矽晶圓之晶格面的不同($\langle 100 \rangle$ ， $\langle 110 \rangle$ ， $\langle 111 \rangle$)於其上作各種的面型或是體型的加工，相關之技術也已廣泛發展[14]。使用氫氧化鉀及異丙醇(IPA)溶液處理矽晶圓表面時，可發現到增加 KOH 濃度會使(100)晶圓表面小丘的情況減小；如果 KOH 溶液中加上 IPA，則會使蝕刻速率變慢，時間拉長[15]。如了 KOH 蝕刻外，文獻[16]中利用濃度 10% 氫氧化四甲銨(TMAH)之非等向性蝕刻液加上介面離子活性劑後，處理不同晶格方向之晶圓，利用光學顯微鏡觀察其表面型態，因為加上界面離子活性劑後，蝕刻速率減慢且表面粗糙度也會減小。近來更有使用活性離子的蝕刻技術，以 $3.5 \mu\text{m}/\text{min} \sim 10 \mu\text{m}/\text{min}$ 的蝕刻速率在矽晶圓上做出垂直度高且高深寬比孔穴，並改善以往以 Bosch-type 的製程時側壁產生扇形紋的缺陷[17]。另外，有相關研究針對在矽晶圓上運用相關製程作出微流道，分析探討微管道流體熱傳現象[18, 19]。由於在晶圓上的流道製程繁雜、成本耗費高，又在生化實驗上特殊試劑須避開金屬類物品，故開始有研究選用高分子材料，而 PDMS 是最近被廣泛用來作為研究的材料，以翻模的方式，將已經過 DRIE(Deep Reactive-Ion Etching)處理的矽晶圓上設計之圖形轉成實驗室晶片(Lab-on-a-chip)，偵測並分析胺基酸反應[20]。或利用晶圓與 PDMS

整合的方式，做出生物流體系統[21]。而輸入試劑的管路多以玻璃或塑膠毛細管為主，藉用毛細管旋轉的鑽孔法，製造出壁面圓滑之直接穿透(through-hole)的孔洞及 L 型(L-type)的進口，其可阻擋內部工作壓力約為 136kPa[22]。另外，有文獻研究在 PDMS 澆鑄前，先行於進出口處放置注射針頭，此製程方式的優點，在於流道進出口接管不需再以其他熔膠黏合，減少因接合不良導致漏液的情形 [23]。PDMS 原本為疏水性質，若要改變表面親疏水性，一般以氧電漿處理，但其疏水性的恢復時間快，文獻[24]中 PDMS 以氧電漿處理過後，再旋塗 HEMA，再送進氧電漿處理，其結果可以延長親水性之時間約為 7 天左右。

粒子影像測速技術(Particle Image Velocimetry)，是以非接觸性量測的方式量測，不會侵入流場中而影響流體的流動狀態，且能即時將擷取流場中之速度分佈，亦可以處理成單位時間內之平均流速，早期其應用於大型流場之量測方面如槳葉轉動時流場的分析，或可將紊流邊界層經 PIV 量測後，以截面的方式呈現[30]。而近來因微機電技術發展，流道的尺寸已縮小至微米等級以下，所以在微流場觀測之下，大部分研究以波長 532nm 雷射配合螢光粒子注入流場中，並配合顯微鏡發展出一套適合分析微流體裝置之 μ -PIV 系統；分析微管道中流動現象如文獻[31]以 PMMA 做出流道之後，注入磁流體，以量測出因外部架設磁場導致磁流體於微管道內流動的速度；另有研究以改變微管道內流體之絕對壓力後，影響滑移長度的現象[32]。至於生醫晶片之相關應用上，文獻[33]藉由量測 PCR 晶片內部物理現象，其結果顯示 DNA 的反應次數並不影響管道內流動速度；且於微混合器的研

究中，針對注入不同折射率之液體並變化不同之初速，量測進口處之速度分佈[34]。而文獻[35]則以 HCL 與 NaOH 注入 T 形混合流道中後，以 μ -PIV 量測的結果配合 OM 觀察微流體混合現象。

1.3 研究目的

本論文之研究目的在於利用高分子翻模技術及微機電系統製程技術，分別在高分子 PDMS 上及晶圓上，製作相同體積大小、但進口流道彎角不同的橢圓形微型模穴，探討在不同條件下流體經由微流道流經微型模穴內之流動現象，並利用實驗室建置之 PIV 系統結合倒立式螢光顯微鏡架設出之 μ -PIV 系統，以量測特定模穴內部流動狀態。另本研究中，針對微流道與微型模穴其表面於不同親疏水性程度下，流體之填充現象進行實驗觀測與量測，並分析物理參數以及各項作用力之效應，並將現象與文獻[13]歸納之結果做比較，並歸納出各條件下流動現象之參數。期使能提供未來相關研究人員，在不管於生醫、或是工業分析上，能夠快速並準確的應用於微小液體之輸送裝置。

第二章 實驗原理與微流道製程設計

本實驗研究目的為觀察工作流體在不同進口角度之橢圓模穴中填充及輸送現象，在微流體流動時，主要受內聚力、液-氣間界面張力、潤濕性及毛細作用的影響，利用新月型波前變化及包圍氣泡與否分析毛細作用、表面張力與其餘作用力產生之流動現象影響，並以 μ -PIV 量測技術量測模穴在包圍氣泡前流體內部速度向量的變化。

2.1 實驗原理

2.1.1 內聚力、表面張力、潤濕性與毛細作用力概念

本研究相關模穴中微流體主要有四項作用力影響，其概念為以下所示[27]：

1. 內聚力(Cohesion)與附著力(Adhesion):同類分子間聚合吸引在一起的力稱為內聚力，而異類分子間相吸引的力稱為附著力。
2. 液-氣間之界面張力(Liquid-gas interfacial tension):為液體分子間內聚力形成的一種現象。液體中分子因為受到來自周圍四方之吸引力，因而相互抵消並保持平衡，但液面分子只受到向下之吸引力而沒有向上之吸引力，因此液面分子隨時受到一個向下的拉力，彷彿要將他們拉近液體中般，且這力量俗稱表面張力。因液體有這股拉力的關係，液體表面會收縮至最小面積。而自然界中，物體在相同體積的情況下，以呈現球型的表面積最小。
3. 潤濕性(Wetting):潤濕性是固液氣三相分子間作用的表現，當液體表面與固體表面接觸時，若內聚力大於附著力，則接觸角

(Contact Angle) θ 大於 90° ，液體不致潤濕固體表面，稱為非潤濕(non-wetting)，反之，若內聚力小於附著力，則 θ 小於 90° ，液體會潤濕固體表面，稱為潤濕(wetting)。

4. 毛細作用(Capillary):因為液體附著力、內聚力及表面張力等作用，而使與固體接觸的液體表面產生上升或下降的現象，稱為毛細作用。

為了分析液體流道中的現象，故導入一無因次參數:偉伯數(Weber Number, $we = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$)，物理意義為慣性力與表面張力的比值，L 取水力直徑為特徵長度，在本研究中將以此無因次參數值的變化來分析微型模穴之填充現象。

2.1.2 微粒子影像測速法基本量測原理

粒子影像測速法(Particle Image Velocimetry)的基本原理是以攝影機將流場中流動粒子做快速曝光，藉由拍攝之圖片後處理後量測流場中之瞬時速度。微粒子影像測速法(μ -PIV)基本原理如巨觀拍攝之原理一般，將所拍攝之照片分割成許多區域(interrogation window)，並計算小區域內影像質點的灰階度與位置，藉由其位移與曝光時間算出速度向量，若取二維平面量測如圖 2-3 所示，則在實際流場位移 \mathbf{s} 定義知：

$$\vec{s} = (x\vec{i} + y\vec{j}) \quad (2-1)$$

但因在拍攝光路中有顯微鏡筒的放大被率所致，所以如果鏡組之放大倍率為 M 時，則攝影機所接收到影像平面(Image plane)的位移 \mathbf{S} 則為：

$$\vec{S} = M\vec{s} \quad (2-2)$$

而物理上對速度向量的定義為 V

$$\vec{V} = \frac{\Delta\vec{S}}{\Delta t} \quad (2-3)$$

PIV 實驗中因為儀器量測必有一極小值之間隔時間

$$\vec{V} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{S}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{s}}{M\Delta t} \quad (2-4)$$

在軟體中是用統計的方式，是對整個影像分割出的 interrogation window 中所成像的粒子群求出最有可能的位移，其分析法又分為自相關(Auto-correlation)、互相關(Cross-correlation)兩種，兩者之間主要不同之處為自相關為在同一張照片上做重複曝光，而互相關則是擷取兩張照片後，對兩張照片粒子影像尋找其位移量，再依照兩張照片的間隔時間即可算出速度，兩分析法若在軟體辨識流場中大小峰值差異量大時，自相關會因為曝光在同一張照片上，所以有可能無法正確顯示向量；而互相關因為是影像分別存於兩張圖片中，故可以避免大小峰值差異量大時的干擾，向量運算結果會較為準確。而取 interrogation window 的大小需與量測之流體速度配合調整適當的大小，流速小時，流體中粒子群總體位移量小，interrogation window 要取的較小，若流速增大時，為了要大致涵蓋粒子的位移量，則 interrogation window 大小要相對較大。

2.1.3 接觸角

本研究靜態接觸角的部分以接觸角量測儀量測，其產生液滴體積約為 4~6 μl ，將液滴滴於矽晶圓表面及 PDMS 表面，並以自動量測或手動擷取的方式量測接觸角。

液滴滴於固體平板上，當液體、固體、氣體達熱力學平衡狀態時，此三者間界面會有一穩定的角度，此角度稱為靜態接觸角。一般量測之材質表面為平坦且均質表面時，會採以楊格方程式(Young' s Equation)解釋此現象[29]。方程式如下所示：

$$\gamma_{vs} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta_c \quad (2-5)$$

其中 γ 表示表面張力(surface tension)，其定義為單位表面積的能量(erg/cm²)；S、V 及 L 分別表示固體(Solid)、氣體(Vapor)及液體(Liquid)，下標 VS、SL、LV 分別代表不同介面間表面張力的差值， θ_c 就是所謂的接觸角，從上述方程式(3-1)中，因為介面間能量的不同會導致接觸角的不同。所以不同親疏水性之表面，可用接觸角判別其表面能的不同。



2.2 微流道製程設計

2.2.1 微流道設計

根據文獻[26]結論顯示，幾何尺寸效應裡，深度相對於寬度而言對於填充過程有著較為顯著的影響，亦即在體積流率不變的條件下，流道寬度的改變不會對液體在圓形模穴中造成影響，微小流場之中並不像巨觀流場般會產生渦旋的現象。基於上述結論再加上之毛細現象基本概念，本研究設計之微模穴如圖 2-5 所示，橢圓模穴主要是橢圓形，且為面積相同的細長型及寬胖型模穴，幾何尺寸大小分別為細長型 700 μm \times 250 μm 及寬胖型 500 μm \times 350 μm ，固定進口流道寬度為 100 μm 、深度 50 μm 。另外在模穴相對於進口流道有做偏轉的設計，其偏轉的角度其定義以橢圓長軸為準，並以橢圓中心作特定方向

角的旋轉，不旋轉前定義為 0° 及旋轉 90° 模穴橫置之外，尚有依原本長軸的位置為準順時針旋轉 30° 及 60° ，逆時針旋轉 30° 及 60° ，所以在描述模穴的種類時會以 0° 、 90° 、 $R30^\circ$ (Right 30°)、 $R60^\circ$ (Right 60°)、 $L30^\circ$ (Left 30°)、 $L60^\circ$ (Left 30°) 來作為區分。模穴的幾何形狀為橢圓型時，以模穴為中心作旋轉後，進出口流道切入模穴的夾角會比圓形模穴更多元化，並探討單一種液體於進口處彎角不同時與慣性力、表面張力、壁面毛細力所產生的填充現象。

2.2.2 微流道製程

本研究流道製作於兩種基材之上，一種以晶圓作為基材，另一種以高分子材料(PDMS)作為基材。以晶圓作為基材的流道製程中選擇 4 吋 $\langle 100 \rangle$ 的晶圓， $\langle 100 \rangle$ 表密勒指標，也是代表結晶面晶格方向，除 $\langle 100 \rangle$ 的晶圓之外另尚有 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ 方向之晶圓，且對於製程之中晶格方向的不同會影響濕式蝕刻的結果，在非等向性蝕刻速率的差別為 $\langle 100 \rangle$ 最快、 $\langle 110 \rangle$ 次之、 $\langle 111 \rangle$ 最慢，但濕式蝕刻比起乾式蝕刻之壁面垂直度差，一般而言，濕式蝕刻的壁面垂直度約為 54.7° ，乾式蝕刻的壁面垂直度為 $80^\circ \sim 85^\circ$ 。因本研究實驗中之流道深寬比較大、壁面垂直度必須要求較高，故選擇以乾式蝕刻製作流道以減少壁面垂直度影響流動現象之效應。以 PDMS 作為流道的基材，是因 PDMS 用於製作微奈米尺度分析系統時，成品製作過程簡易、可在短時間內複製相同產品且價格低廉等優點。PDMS，聚二甲基矽氧烷(polydimethylsiloxane)，如圖 2-6，為矽氧烷類聚合物的一種。其具有分子鍊柔軟、熱穩定性佳、低表面能且低玻璃轉移溫度(120°C)等特性。另外，PDMS 作接合時，不需接著劑黏合或陽極接合時需高溫高電壓，只需

於其表面作氧電漿氧化處理，藉由鍵結作接合[28]。聚二甲基矽氧烷 (PDMS)，表面性質屬疏水性，若需改變其表面性質，則可以氧電漿處理，將表面氧化，此氧化後之表面可呈現親水性狀態。氧電漿處理之原因，基本原理主要是使表面產生(SiOH)鍵；產生此類的鍵結會產生親水性表面，或是在兩片 PDMS 之間產生 Si-O-Si 鍵結，所以在製程時不需黏著劑即可接合。

如圖 2-7 所示本實驗流道製程分為三類。第一類以傳統之半導體製程技術於 4 吋<100>晶圓上作出流道後，於其上覆蓋一層厚度約 5mm 之平坦 PDMS 片封裝模穴；第二類是以近來技術成熟之高分子(PDMS)翻模的方式製作流道，但第二類製程方式封裝模穴的材料又分為兩種，第一種為與第一類製程相同之 PDMS 片覆蓋方式封裝，第二種為與玻璃直接黏合封裝。流道製程分述如下：

第一類：Silicon-PDMS

- (1) 以 AutoCAD 繪製光罩。
- (2) 晶圓 RCA-Clean 清洗，確保表面潔淨度。
- (3) 上 HMDS
- (4) 塗佈 AZ4620 光阻，並軟烤。依表 2-1 參數厚度可達 $5\mu\text{m}$ 。
- (5) 以光罩對準曝光機將光罩圖形轉於晶圓表面光阻。
- (6) 顯影、定影、硬烤。
- (7) 利用 ICP 於晶圓上蝕刻流道。依表 2-2 之參數將流道蝕刻至所需深度。
- (8) 超音波鑽孔機於進出口流道鑽出外部接管接合孔位。
- (9) 丙酮配合超音波震盪器去除光阻。

- (10) 晶圓 RCA-Clean，矽基材流道完成。
- (11) 以 10：1 之比例調和 PDMS 之 A 劑與 B 劑。
- (12) 將調和好之 PDMS 置於真空乾燥皿中抽氣。
- (13) 將已除氣之 PDMS 緩慢且均勻的倒在一片乾淨的晶圓上。
- (14) 晶圓上 PDMS 靜置攤平後，將之送入 85°C 烤箱中 20min。
- (15) PDMS 脫膜。
- (16) 裁切晶圓及 PDMS 片。
- (17) 將欲接和之晶圓與 PDMS 送入氧電漿機(O₂ Plasma)中，60s。
- (18) 氧電漿處理後，將晶圓與 PDMS 片接合。
- (19) 置於 90°C Hot plate 上 30min。
- (20) 將輸水管與排水管與進出口處黏合，微流體裝置完成。



第二類：PDMS-PDMS

A. PDMS 母模製作

- (1) 以 AutoCAD 繪製光罩。
- (2) 晶圓 RCA-Clean 程序清洗，確保表面潔淨度。
- (3) 置於自動化光阻塗佈顯影系統內，旋塗 SU-8 光阻，依所需之高度點選參數。
- (4) 軟烤
- (5) 置於光照對準曝光機，將欲得之光罩圖形轉移至光阻之上。
- (6) 顯影、定影。
- (7) 硬烤。母模完成。

B. PDMS 流道翻模製程

- (1) 以 10 : 1 之比例調和 PDMS 之 A 劑、B 劑。
- (2) 將調和好之 PDMS 置於真空乾燥皿中抽氣。
- (3) 將已除氣之 PDMS 緩慢且均勻的倒在有 SU-8 母模之晶圓及乾淨之晶圓上。
- (4) 置入烤箱之中 85°C，20min。
- (5) PDMS 脫膜，取得 PDMS 流道及 5mm 之 PDMS 片。
- (6) 於 PDMS 流道上進出口輸水管接合處打孔。
- (7) 將 PDMS 流道與 PDMS 片置於氧電漿機(O₂ Plasma)之中 60s。
- (8) 電漿處理後取出對準接合。
- (9) 封裝後之流道置於 90°C Hot platg 上 30min。
- (10) 將外部輸水管與進水管與流道進出口處黏合，微流體裝置完成。

第三類 PDMS-Glass

- (1) 玻片以 H₂SO₄:H₂O₂ = 3:1 比例之溶液浸泡 10min，確保表面
- (2) 潔淨度。
- (3) 以 10 : 1 之比例調和 PDMS 之 A 劑、B 劑。
- (4) 將調和好之 PDMS 置於真空乾燥皿中抽氣。
- (5) 將已除氣之 PDMS 緩慢且均勻的倒在有 SU-8 母模之晶圓上。
- (6) 置入烤箱之中 85°C，20min。
- (7) PDMS 脫膜，取得 PDMS 流道。
- (8) 於 PDMS 流道上進出口輸水管接合處打孔。

- (9) 將 PDMS 流道與玻片置於氧電漿機(O_2 Plasma)之中 60s。
- (10) 電漿處理後取出對準接合。
- (11) 封裝後之流道置於 $90^\circ C$ Hot plat 上 60min。
- (12) 將外部輸水管與進水管與流道進出口處黏合，微流體裝置完成。



第三章 觀測系統與步驟

本實驗研究中高速攝影系統架構如圖 3-1 所示，注射幫浦依特定設定的流量將工作流體注入微流道中；拍攝之模組主要將 IDT 公司生產之高速攝影機與倒立式顯微鏡結合，連結至桌上型電腦並以高速攝影機之操作程式做影像監看調整、擷取圖片檔(TIFF 檔)的動作，其後可利用軟體將多個單一圖片再次結合成一個 GIF 檔，以動畫的型態播放。

3.1 系統架設及操作步驟

A. 本研究中，因為實驗項目包含對微模穴壁面之表面親疏水質改變之後，慣性力固定之下，探討毛細作用與附著力的改變對於填充過程之影響。研究中首先實驗量測工作流體與處理過後流道表面之接觸角關係，量測步驟如下：

1. 將欲量測之材料試片至於載台上。
2. 開啟軟體之 LIVE 功能，即時監看調整。
3. 按針筒推進扭，使針筒內的水滴在材料試片上。
4. 用軟體擷取即時看到的畫面。
5. 擷取的畫面做接觸角角度的量測。方法有二，第一為軟體依液珠與待測材質接觸面面為基準，再依照水珠外圍弧度自行判斷算出接觸角；第二為手動抓取，先於液珠與材料接觸面左右兩點定義出水平線後，在外部選取一點，以軟體中之切線切畫面液珠外緣，量取出接觸角值。
6. 重複上述步驟，將數據統計或平均。

B. 本研究實驗之目的在於藉由觀測及分析液體於不同操作條件下在模穴內流動現象。流動現象隨著液體的表面張力、密度與黏滯力的不同而有所差異，一般微流體分析晶片中最常見之溶液通常是使用水，所以本研究的實驗選擇以水($\sigma = 0.0736 \text{ N/m}$ ， $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$)作為工作流體。而實驗中驅動工作流體往微流道內動力來源為如圖 3-2 所示之 GENIE 所生產之可程式注射幫浦 (Programmable Syringe Pump)，此為單管注射幫浦，其背部有 TTL-I/O、RS232 插槽，可利用個人電腦輸入特定之驅動控制指令，也可以控制成同時與多部注射幫浦同部運作而變成多管的注射幫浦，幫浦上可固定之注射真筒大小範圍為 $10 \mu\text{l}$ ~60ml，體積流率操作範圍最小 $0.1 \mu\text{l/hr}$ 、最大達 127ml/hr，本實驗中備有容量 1ml、5ml、10ml 之針筒，在本實驗中可依照特定的流率做設定。

C. 實驗中填充波前影像之擷取設備為 IDT 公司之高速 CCD 攝影機 (X-stream VISION)，此高速攝影機在解析度 512pixelx512pixel 之下影像擷取速率範圍為每秒 30~5000 張畫面，內部記憶體大小為 4GB，一次可擷取約 16000 張圖片。此 CCD 高速攝影機利用 C-mount 接頭轉接於 OLYMPUS 倒立式顯微鏡之上，此顯微鏡具有提供有兩種照明，一為背光源藉由穿透透明試片觀測，一為汞燈提供顯微鏡內部光路之光線經鏡頭垂直於試片打光，在觀測時擷取畫面之速度越快，會導致電子快門曝光時間相對減小，則需加強光源強度補足擷取畫面的亮度；另外，因為流道的深度達 $50 \mu\text{m}$ ，所以調整完焦距確定景深範圍可以拍到流體填充之波前

後，才繼續在軟體設定及擷取動作。軟體上操作擷取時，主要設定有擷取速度(快門速度)、曝光量、張數、檔案型態等，檔案型態可用非破壞性壓縮圖片檔(TIFF 檔)或是影片檔(AVI 檔)；擷取時可以 Play 鍵預覽調整位置、焦距與亮度等，就緒後按 REC 鍵開始預錄，當填充現象預備發生前按下 Trigger 鍵觸發，觸發後 CCD 攝影機將會把所擷取之畫面暫存於像機內部記憶體中，擷取完畢後選取全部填充過程之圖片後，再將圖片存檔收圖收於電腦硬碟之中。因 CCD 像機內部記憶體容量大小固定，擷取畫面像素會影響軟體快門速度最高量及張數，在拍攝過程中流速快時若擷取速率不夠則會出現波前不清楚的殘影現象，流速慢的拍攝過程中若擷取速率過快則又會出現擷取之照片並未包含全部的填充過程，所以本實驗擷取時以能拍到模穴的範圍為主，將原本之預設畫面畫素(512 pixel×512 pixel)縮小成 512 pixel×450 pixel，如此可從原本之最高擷取速率 5000 張提高到 7100 張，才可以涵蓋本研究中 250fps~7000fps 的擷取速率。

- D. 本研究中我們並以 μ -PIV 對模穴中流動現象做速度量測，研究設備為 IDT 公司生產之 PIV 硬體設備，如上述 C 項之高速攝影機外，另有同步器、795nm 紅光半導體雷射，將 PIV 設備與倒立式顯微鏡結合，使之變成 μ -PIV 的量測設備，其 PIV 軟硬體設備分述如下：

1. Pulsed Diode 雷射(IDT XS-IR infrared laser)

此雙脈衝式雷射發出波長為 795nm(紅光)，功率 10 W，脈衝頻率最高可達 20000Hz。其脈衝間隔時間可為 $3\mu\text{s}$ 、

Duration 的範圍依照脈衝間隔時間調整其百分比，可調整範圍為 1%~100%。

2. 高速 CCD 攝影機(X-stream VISION High speed camera)

此 CCD Camera 感光畫素數為 512 畫素 × 512 畫素，其記憶體大小為 4G，頻率在 512 畫素×512 畫素的條件下可達 5000Hz。

3. 同步器(X-stream Timing Hub)

同步器的功用為整合電腦、雷射與 CCD camera。其主要功能為同時觸發雷射與 CCD camera，並藉此可以控制軟體結合，整合 camera 的曝光量、雷射脈衝方式或頻率。目的在於 camera 擷取影像之時，雷射能同時觸發。

4. 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、雷射持續時間百分比(Duration)、camera 曝光量、快門等；另可存取影像，選取 interrogation window 格數大小，擷取影像中質點計算流場中的速度向量。

研究實驗中我們採用 Duke 公司生產之螢光粒子，其密度為 1.05g/cm^3 ，為了避免粒子間相互吸附，故粒子本身帶有負電的電性，因螢光粒子與工作流體水密度相近，所以可以懸浮於微流體裝置流體之中，且本實驗中粒子直徑 $d_p = 1\ \mu\text{m}$ ，與微流體裝置中最小之尺寸長度 L_s 相比如下所示：

$$\frac{d_p}{L_s} = \frac{1}{50} = 0.02 \quad (3-1)$$

從結果得知粒子大小遠小於模穴內尺寸最小值，故螢光粒子對模穴內流體流動並不會造成窒礙現象的發生。另在尺度微小流場中，布朗運動的影響不可忽略，在此引用文獻[36]中布朗運動相度誤差計算公式來估算布朗運動對量測造成的誤差，公式中定義布朗運動誤差為 ε_B ，公式如下所示：

$$\varepsilon_B = \frac{1}{u} \sqrt{\frac{2D}{\Delta t}} \quad (3-2)$$

在(3-2)式中符號 u 表示粒子的單位時間平均速度， D 表示為擴散係數(Diffusion coefficient)， Δt 表示雷射脈衝間隔時間；而擴散係數 D 的公式定義如下：

$$D = \frac{kT}{3\pi\mu d_p} \quad (3-3)$$

在(3-3)式中 k 表示為波茲曼常數(1.38×10^{-23} J/K)， T 表示絕對溫度， $\pi = 3.14159$ ， μ 表示工作流體的動力黏滯係數， d_p 表示螢光粒子的直徑。由公式(3-2)、(3-3)中我們得知，若要減少布朗運動的干擾，可從拉長雷射脈衝間隔時間、流體平均速度加快或是採用較大直徑之粒子三方面著手。配合本實驗工作流體水 ($\mu = 1.0042 \text{ N} \cdot \text{S}/\text{m}^2$)，螢光粒子為 $1 \mu\text{m}$ ，拍攝時雷射最小脈衝時間為 192μ ，及微流體裝置內最小流速約為 $0.003 \text{ m}/\text{s}$ ，帶入上述公式計算，我們得到本實驗條件下之布朗相對誤差約為 2%。

PIV 實驗架構如圖 3-3 中所示，拍攝中雷射光頁方向以 75 度接近垂直入射的角度射入流場，CCD 高速攝影機主要接收雷射光打到螢光粒子後的散射光，其散射光線足以讓 CCD 攝影機擷取，而上述之粒子不會對流道造成窒礙的現象，布朗運動誤差約

為 2%，所以擷取粒子於流場內的運動可以描述流場內的流動狀態。

3.2 實驗項目暨觀測步驟

本實驗之目的在於分析各參數對於流動現象的影響，實驗中可能會影響之參數包含橢圓模穴之幾何尺寸(700 μm ×250 μm 、500 μm ×350 μm)、模穴之旋轉角度、流率對應之偉伯數(We)、模穴材質、壁面性質，經由固定其中幾項參數後，我們改變其餘的量來達到分析之目的。為了要清楚瞭解偉伯數與流動現象的關係，我們利用不同位置所代表之偉伯數分別探討。We₁ 為入口流道之偉伯數，特徵長度我們選用等效水力直徑(Hydraulic diameter, $D_h=4A/P$)；We₂ 為取與橢圓模穴短軸平行之橫切面，取之水力直徑後算出。計算偉伯數之速度 V_1 、 V_2 ，為體積流率除以所在位置的截面積 A_1 、 A_2 。

以下，就本研究實驗觀測項目作說明。

1. 將做好之 PDMS 片送入氧電漿中做處理，以 5 秒為間隔，觀察氧電漿處理時間與接觸角的關係。
2. 將 RIE 製程時，晶圓上預留之 1cm×2cm 之接觸角量測區以 TMAH 處理，以 5 分鐘為間隔，觀察 TMAH 處理時間與接觸角的關係。
3. 固定模穴材質、固定模穴旋轉角度，改變偉伯數值，觀察因慣性力不同導致波前的變化。
4. 固定模穴旋轉角度、固定偉伯數值，比較不同材質構成之模穴，觀察偉伯數高與偉伯數低時之波前變化。
5. 固定模穴材質、固定模穴旋轉角度，改變偉伯數值的，使之增加

或減少，觀察因慣性力、表面張力的比例變化時，流體於模穴內的流動現象。

6. 固定模穴材料、固定偉伯數值，觀察在相同慣性力及表面張力的條件下，因模穴旋轉角度的不同之流體填充現象。
7. 以 μ -PIV 量測包圍氣泡時模穴內的填充速度變化。
8. 固定模穴材料、固定偉伯數值、固定模穴旋轉角度，經模穴內氧電漿再處理後，觀察因模穴壁面親疏水質改變對波前的變化程度，對照化學藥劑處理親疏水質的優劣程度。
9. 晶圓上的流道，通 THAH 處理過後改變其模穴內之表面性質，在固定偉伯數、模穴旋轉角度的條件下，模穴內化學處理過後的流體填充現象，觀察附著力、表面張力的改變。



第四章 結果與討論

本實驗研究結果中之流道基材有兩種，一為 PDMS 翻模而成，另一以微機電製成技術在 silicon 上蝕刻而成。而在封裝覆蓋於流道上方的材料也有所區別，在 PDMS 流道封裝之材料分為兩類，一為 PDMS，在此稱做 PDMS-PDMS 流道，另一為玻璃，此稱做 PDMS-Glass 流道；於 silicon 上方封裝流道之材料則只有 PDMS 一種，在此稱為 Silicon-PDMS 流道。實驗中之工作流體固定為水，藉著流道內部表面化學處理後，觀察因為處理後表面造成毛細作用力不同對填充過程之影響。

4.1 靜態接觸角量測結果

4.1.1 PDMS 材質



在靜態接觸角方面，本實驗中因為垂直邊的範圍過小，先量出上下表面不同狀態下之靜態接觸角，在 PDMS 流道方面，我們先針對 PDMS 的表面性質做處理，第一是以 O_2 plasma 做處理、第二是以介面離子活性劑做處理，圖 4-1 表示 PDMS 經過 O_2 plasma 處理過後，處理時間跟表面接觸角的關係圖。我們可以發現，未處理前之 PDMS 是處於疏水的狀態，表面接觸角大約為 115° 表面接觸角會隨著 Plasma 處理的時間的延長而下降，在功率 18W 下大約於 35 秒的時間後 PDMS 之表面性質即變成完全親水，若將其試片保存於濕度 50%~55% 之乾燥箱中，其親水狀態可維持時間約 1~2 天；在界面離子活性劑處理方面，圖 4-2 可知處理過後的靜態接觸角大約可以減小為 92.15° ，相對於未處理前是較為親水的狀態。

4.1.2 Silicon 材質

在晶圓上之接觸角相較於文獻[24]中以 HEMA 化學處理光滑晶圓表面，本研究是取已經過 ICP-RIE 蝕刻過後之晶圓表面做 HEMA 蝕刻，所測得之接觸角相對於 TMAH 處理的時間之數據如圖 4-3 所示。圖中我們發現到經由 TMAH 處理其處理時間內在 30 分~35 分時接觸角有回升的現象，約 40 分鐘後又變為親水性質。若從圖 4-4 的 SEM 所拍圖片顯示，處理 15 分鐘後之表面會比未經 TMAH 處理時相對的粗糙，爾後處理時間至 30 分鐘時再轉成光滑的表面，處理約 40~45 分鐘後表面會變成大顆粒粗糙表面，本研究中 TMAH 處理後表面型態的變化影響接觸角的大小，會出現這樣接觸角一度回升的變化，由 SEM 圖可知與文獻[16]之粗糙程度趨勢會一直增加到臨界點的不同地方在於，本實驗蝕刻初始條件是非光滑之晶圓表面，所以 RIE 蝕刻出來的表面結構經 TMAH 處理時會出現粗糙轉為更粗糙，繼續處理後再變成漸漸變成較為平滑之表面時間點時，新的表面型態會造成接觸角再度拉升。

4.2 PDMS 流道填充過程

在 PDMS-PDMS 模穴填充的部分，固定特徵長度 L ，即進口流道之寬度和深度固定，增加進入模穴的體積流率 Q 進而提高偉伯數 We_1 、 We_2 的狀況下，拍攝水進入橢圓模穴中之填充過程如細長型模穴圖 4-5、圖 4-6、圖 4-7 和寬胖形模穴圖 4-8、圖 4-9、圖 4-10 所示，在 We_1 值為 0.00001、0.001005 和 0.009 的比較下，從填充過程波前之觀察發現，基本上 PDMS-PDMS 流道內部已經變為疏水性，雖然從極

低之 We_1 直到高 We_1 時之波前都為凸形，模穴壁面水分子之波前從填充過程開始至結束仍無法有機會超越中心波前，但不管模穴之橫向寬窄， We_1 為十萬分之一之一時，因為毛細力之作用遠大於慣性力，由圖 4-5(b)、4-8(b) 觀察發現，填充過程中並不是呈現一穩定之波前，在填充時左右壁面接觸的部分會一前一後的交替前進，或是工作流體進入模穴後會先沿著轉角處的左壁面流動。隨著 We_1 慢慢的提高後，會呈現一穩定之波前，且較高的 We_1 也表現出慣性力漸漸提高後的填充現象，使波前中心會變得更為尖銳凸出。

以 PDMS-Glass 模穴而言，固定模穴旋轉角度和流道的深度寬度也固定之下，改變偉伯數值。取 We_1 值為 0.009、0.100503、10.046 作比較，其填充過程如圖 4-11、4-12、4-13 所示之細長型模穴及圖 4-14、4-15、4-16 所示之寬胖型模穴，當慣性力增強甚至大於表面張力時，波前中心會更為凸出、尖銳。且於圖 4-11(c)、4-13(c)、4-15(d)、4-16(d) 中波前的弧度變化可發現，細長型模穴於偉伯數加高後，波前弧度變化量叫寬胖型大，其現象可由圖 4-17 流量與 We_2 的關係圖中瞭解，因為模穴尺寸之關係，導致細長型在體積流率漸漸增加時， We_2 值的變化率比寬胖型顯著，其為波前差異的主要原因。

而比較 PDMS-Glass 模穴跟 PDMS-PDMS 模穴填充過程時如圖 4-18 與圖 4-6 所示之，比較細長型模穴之波前，在固定體積流率使 We_1 同為 0.001 的條件下，由圖 4-19 比較圖 4-18(c)、圖 4-6(c) 放在一起之比較圖，可發現到因為模穴中因為壁面有一處非 PDMS 材質時，且因為玻璃本身為親水性的關係，使的波前弧度會稍微平緩；若提升 We_1 約為 0.01 之後，如細長型圖 4-5、4-7 與寬胖型圖 4-8、4-10 所示，

因為慣性力的增大使得表面張力的作用影響填充過程相對減小，波前行進中水在左右壁面速度較為平均，水在左右壁面一前一後的行進的現象明顯減少；而幾何形狀為寬胖型模穴時，在 PDMS-Glass 模穴的條件下， We_1 較小時與細長型模穴最大的差異為工作流體在進入模穴後會沿著最先接觸之模穴左側壁流動如圖 4-14、圖 4-11 所示，其最主要是幾何形狀之差異，工作流體流入細長型模穴時，除與最先接觸的左側壁之外，慣性力尚足以使流體再度接觸對面之右側壁所致，相反的在相同的入口慣性力之下因為寬胖型模穴入口距離對面右側壁之距離較長，波前無法接觸右側壁，所以表面張力之作用下，會先行將流體拉至最先接觸的左側壁方向流動。另外寬胖型模穴流體填充，在固定偉伯數的條件下，比較 PDMS-PDMS 模穴與 PDMS-Glass 模穴之波前，如圖 4-20、圖 4-21 中可以發現，在有玻璃材質的模穴裡，依照波前觀察到會如預期般之填充過程會比全為 PDMS 構成之模穴來得親水，甚至於 PDMS-PDMS 模穴會有包氣泡的現象發生。若圖 4-20、4-21 再相較於相同 We_1 之下細長型之填充過程如圖 4-22、圖 4-23 所示，其寬胖型填充過程中波前差異型態較為明顯的原因除幾何形狀差異外，主要是因為工作流體與玻璃材質接觸面積較大所致。

就 PDMS-PDMS 模穴而言，在固定 We_1 的條件下，觀察填充過程與模穴旋轉角度的不同的差異，細長型模穴在 $We_1=0.00001$ 時如圖 4-24、4-25、4-26、4-27 所示，寬胖型模穴在 $We_1=0.00001$ 時如圖 4-28、4-29、4-30、4-31 所示，從實驗擷取的圖中，在模穴作順逆時針各 30° 、 60° 的偏角時，填充過程之波前形狀並無明顯趨勢，但是在 L30、L60 之模穴中如圖 4-25(f)、圖 4-28(f)、圖 4-29(f)，模穴

填充完畢後會開始出現包氣泡現象，填充過程就如先前所述之小 We_1 時，因為工作流體進入模穴之後即沿著最先接觸的模穴左壁面流動，待工作流體流至出口時，其波前尚未到達並填充較遠之右壁面，流體徑自出口流出而會產生包覆氣泡之現象；提高偉伯數至 $We_1=0.004$ 時，細長型模穴填充過程如圖 4-32、4-33、4-34、4-35、4-36 所示，而寬胖型模穴填充過程如圖 4-37、4-38、4-39、4-40、4-41 所示，在 We_1 提高後，L60 之細長模穴填充過程會如圖 4-25(f)、4-34(e) 所拍攝結果，提高 We_1 後會在模穴的兩個角落包覆氣泡。而圖 4-34(d) 所示，因為 We_1 提升後慣性力較強使得波前會提早接觸右邊之壁面，在工作流體尚未及時填充上方角落時，流體已經流出模穴，以高速攝影機拍攝時，進口流速是使模穴內部產生氣泡包覆的主要原因，一般而言，在彎角較尖的情況下，波前接觸模穴右側壁面的時間愈早，包覆氣泡的可能性會升高，但 L30 的寬胖型模穴，提高 We_1 時，會由原先氣泡包覆的現象轉為完全填充。圖 4-38、4-62 為以 μ -PIV 量測 L30 寬胖型模穴填充現象，從 We_1 及速度向量集中方向如圖 4-62(a)(b) 得知，因慣性力進入模穴後無法抗衡表面張力的作用繼續以原來方向前進，圖中可發現速度向量由原先水平方向轉而及集中於垂直方向，帶動波前往左側壁面前進。當模穴上方角落填充完畢時，如圖 4-62(f) 流體中速度較高的集中區域會再往模穴中心移動，且速度方向順模穴形狀已有轉為水平的趨勢，但載波前接觸出口角落時，速度轉向，已無較大的水平速度分量去除氣泡，造成填充不完全。在圖 4-63 中，模穴截面的水平方向速度值可發現，在高 We_1 時，入口處一直保有一穩定之水平速度向量，待模穴上方角落填充完畢後，此一穩定水平速

度向量能在波前接觸出口角落前，將流體中高速度集中區往下移動，此現象可使波前在沿著左側壁面前進，並使模穴填充完全。

固定模穴材質為 PDMS-Glass 模穴，在固定 We_1 的條件下，觀察填充過程與模穴旋轉角度的不同的差異時，如圖 4-22、4-42、4-60 所示之細長型模穴及圖 4-20、4-44、4-45 所示之寬胖型模穴，細長型當旋轉模穴越往進口流道靠近時，越易包覆氣泡；另外模穴形狀固定下，固定旋轉之角度時，當增加 We_1 時，因體積流率升高使注入流體速度快，使得模穴填充不完全以致包覆氣泡，如圖 4-42、4-49、4-53 所示之 L30 細長型模穴、圖 4-60、4-50、4-54 所示之 L60 細長型模穴和圖 4-44、4-47、4-51 所示之 L30 寬胖型模穴。從高速攝影擷取圖中可發現到與 PDMS-PDMS 模穴一樣之填充趨勢，體積流率增加時，包覆氣泡可從無到有，或是一邊角落包到兩邊角落都包覆之現象。若將圖 4-54、4-59、4-60 所示之模穴內部填充瞬間速度向量圖發現，當 $We_1=10$ 時，慣性力大導致在波前碰觸右側壁面時，入口處仍有水平方向速度分量向右作用速度集中區，比起圖 4-59(c)則較為右邊且不均勻，而圖 4-60 (a)至 4-60(b)的速度向量發展過程，從只有水平方向集中速度向量轉為扇形發展 4-60(c)、(e)之速度向量，可知小偉伯數值時，其波前為表面張力所主導，其波前會以穩定球狀發展，使得右下角無法填充。另外從圖 4-64 知，升高偉伯數後會在左上角包覆氣泡的原因，其主要是因模穴內部慣性力過大造成內部速度分佈不穩定，無法集中大的速度分量往模穴左上角落填充所致。而比較圖 4-45、4-60 相同模穴材質及旋轉角度下，以表面張力主導之波前在寬胖型模穴中卻可以完全填充，主要原因是模穴尺寸及液體的表面

張力，因表面張力欲使波前維持一穩定發展，故圖 4-45(d)在左上角模穴角落填充完畢後，表面張力的作用會將速度再度集中於模穴右下角，再配合模穴內空間尚足以容納大曲率波前的變化下，在 L60 彎角的模穴得以順利填充。所以縱上所述，就圖 4-38、4-62 顯示之寬胖型模穴與圖 4-54、4-59、4-60 的結果顯示出，若要模穴右下角成功填充，則主要改善方案為慣性力需增強，或置換表面張力小的工作流體，慣性力增強可使波前先行至右側壁面或是保持一定的速度向量等待後續的填充，而置換表面張力小之工作流體，則是若在表面張力為主之波前時，其波前發展的弧度會趨緩，除藉由潤濕力填充之外，趨緩的波前弧度可避免於完全填充前先行碰觸其他模穴壁面，導致速度向量偏轉造成填充不完全的現象。

當固定模穴形狀、固定模穴旋轉角度時，比較 PDMS-PDMS 模穴與 PDMS - Glass 填充過程中會產生包圍氣泡時之 We_1 值的大小，如圖 4-43、4-46、4-55、4-56 所示之 PDMS-PDMS 模穴與圖 4-44、4-45、4-49、4-50 所示之 PDMS-Glass 模穴做比較後可發現，相同 We_1 之下，PDMS -PDMS 模穴已經過了會開始包圍氣泡的臨界偉伯數值時，但是 PDMS- Glass 模穴之填充狀態尚未開始有包圍氣泡的現象發生；不管是細長型還是寬胖型模穴，當模穴中有一面是親水的玻璃取代原本的 PDMS 時，會使得工作流體在模穴中充滿的成功率增高，所以會使包圍氣泡的偉伯數的臨界值升高。而文獻[13]中所歸納的 $We-\theta$ 圖， We 與本研究進口流道先前定義之偉伯數相同， θ 表示模穴壁面之液滴接觸角 θ_c ，與如圖 4-65 液體進入模穴後彎折的角度 θ_0 加總後，再除以 180° ，其公式如下：

$$\theta = \frac{\theta_c + \theta_o}{180} \quad (4-1)$$

依照此一之定義，本實驗將所有 PDMS-Glass 模穴實驗數據製成圖 4-66、4-67、4-68，且 PDMS-PDMS 模穴製成圖 4-69、4-70，圖中實心點表示為填充完全、空心點表示填充過後有包氣泡的現象發生，圖中可發現，PDMS-PDMS 模穴歸納後，雖資料範圍不大，但是仍有如文獻模擬結果所示之右上角主要為包氣泡區，而於 PDMS-Glass 模穴所歸納的 $We-\theta$ 圖的 θ 值，因為有一側壁面為玻璃材質，所以 θ 的修正值以該材質的接觸角量測值乘上在截面積上所佔之週長比例為主。有氣泡的點分佈趨勢大致上是以 θ 值的大小作為區分，而非比較集中於右上角的區域，基本上實驗數據圖大多依照模擬狀況最後之歸納圖，而左上角之有氣泡的點落於文獻中的完全填充區，其原因可能在實驗製程中表面非模擬時之完全平滑面、接觸角的實際數值有所差異或是文獻中模擬歸納時，未考慮進口流道相對於模穴本身尺寸的比例所致。

4.3 PDMS 模穴表面改質後之填充過程

固定模穴形狀、模穴旋轉角以及 We_1 ，改變模穴內之表面親疏水性時之微流體填充過程如圖 4-71、4-72、4-73、4-74 所示，本研究中模穴內親水性改質方法有 Plasma 再處理法、Triton 處理法，與文獻中 HEMA 處理法作比較，Plasma 再處理法的概念是基於 PDMS 接合前以氧電漿活化的方法，因 PDMS 隨時間的延長，其處理後的親水性質會再度轉為原本之疏水性，如圖 4-76 所示，Plasma 處理法主要目的，是企圖使模穴內部產生電漿，讓 PDMS-Glass 模穴內部在變成親

水性，PUMP 的作用是為要使模穴內部保持有氧氣的流通。圖 4-71 和 4-72 所示之圖為模穴封裝後，再以 plasma 進行流道內再處理使壁面再度變為親水，與圖 4-71 與 4-50 比較可看出，因模穴內部氧電漿處理過後，填充過程如圖 4-71(d)和 4-71(e)顯示出靠近壁面之波前會超出波前中心，且流體流經進出口流道時，其波前也由原先之凸面轉為凹面。圖 4-73，表製程中以 Triton 處理 PDMS-Glass 模穴之表面後，其填充過程結果與圖 4-75 之相同 We_1 下之未處理模穴比較時，顯示也會如流道內親水性再生法一樣，模穴波前是處於較為親水的狀況，且如此之高流速之下，不會有包覆氣泡的現象發生。另外，依文獻[26]中 HEMA 的處理流道親水性的方式，如圖 4-74 所示，最後的填充結果與未處理前並無太大的差別，原因可能由於氧電將機台處理時本身之功率差異所致。我們在實驗中可發現，若以處理後親水程度表現來作為比較，則氧電漿再處理法最好、Tritont 處理法次之，而 HEMA 效果最差。

4.4 TMAH 處理 Silicon 流道後填充過程

以 silicon 為材料的流道，固定偉伯數，我們分別以非等向性蝕刻液(TMAH)處理過後，觀察其波前變化。因為由圖 4-4 的 SEM 圖觀察到，流道大約處理 40~45 分鐘過後，流道之側壁面因為蝕刻的關係便開始有顯著的變化，故本研究中，TMAH 處理的時間以 30 分鐘以內為主，因為此段時間中，底面的變化顯著，而側壁表面型態並無太大的變化。所以 Silicon-PDMS 細長型模穴之填充過程如圖 4-77 所示；組圖 4-77 中(a)(b)(c)為未 TMAH 處理前之填充過程、圖 4-77(A)(B)(C)

表示以 THAH 處理 15 分鐘之模穴、圖 4-77(1)(2)(3)則表示以 THAM 處理 30 分鐘後之模穴。從擷取圖中可發現，從未處理經處理 15 分鐘到最後處理 30 分鐘，填充過程中所呈現之波前呈現疏水轉變成較為親水、再變成較為疏水的狀態出現；另外，Silicon-PDMS 寬胖型模穴之填充如圖 4-78 所示，組圖 4-78 中(a)(b)(c)為未 TMAH 處理前之填充過程、圖 4-78 (A)(B)(C)表示以 THAH 處理 15 分鐘之模穴、圖 4-78(1)(2)(3)則表示以 THAM 處理 30 分鐘後之模穴，實驗結果中顯示如同上述之細長型模穴般的趨勢，會有疏水、相對於未處理前較為親水、相對處理 15 分鐘後較為疏水的填充型態發生，且甚至於包圍氣泡的現象也會有差別，如相對親水時並無包氣泡的狀態。而流道的各壁面，除了上壁面的 PDMS 之外，底面屬 $\langle 100 \rangle$ 晶格方向、兩側壁屬 $\langle 110 \rangle$ 晶格方向，用非等向性蝕刻液 TMAH 處理時， $\langle 100 \rangle$ 晶格面被蝕刻速率最快，而 $\langle 110 \rangle$ 次之、 $\langle 111 \rangle$ 最慢。如 SEM 圖顯示，在本研究的 TMAH 處理時間範圍內，而屬 $\langle 110 \rangle$ 晶格面的側壁面分別再處理 15 分鐘及 30 分鐘之後，表面並無差異；屬 $\langle 100 \rangle$ 晶格面的流道底面表面型態變化最大，流道底壁面在處理 15 分鐘 30 及分鐘過後，會由原先經 RIE 蝕刻後的粗糙表面，會變為更粗糙，其處理 30 分鐘後再轉為較為平滑的表面。所以模穴中四個壁面只有底面之差異最大，配合先前接觸角的量測結果，雖然波前並不如所量測出接觸角應該呈現之超親水之凹型波前，但是在上蓋 PDMS 接觸角約為 116 度，側壁條件不變的條件下，底面因表面型態導致接觸角變化，對實驗中波前的改變相呼應。

第五章 結論

研究結果中流道材質主要有二，一是用 PDMS 高分子翻模技術製作出流道暨微型模穴，另一種是利用微機電系統之概念和製程技術在晶圓上製作相同大小之微流體裝置。PDMS 微型模穴主要固定進口流道大小，探討構成材質不同、模穴旋轉角不同、模穴面積相同但幾何尺寸不同和模穴內化學處理親疏水性不同時，固定工作流體為水在不同條件之下之橢圓模穴內流動現象；Silicon 微型模穴主要探討，通入非等向性蝕刻液後改變模穴壁面之表面型態，固定水為工作流體後，觀察水於處理過後之微型模穴內之流動現象。故實驗過程中，主要變換的參數為，偉伯數、模穴壁面材質、模穴旋轉角度、化學處理方式。



5.1 接觸角

根據第四章的結果可以歸納出，實驗中構成流道材質主要為 PDMS、silicon 與玻璃三種，玻璃材質親水性強，其接觸角約為 14° ；PDMS 親水性會隨著氧電漿處理時間而增大，另 PDMS 材質放置時間久後仍會回復其原本之疏水性狀態 (115.86°)。本實驗中將氧電漿處理過之 PDMS 保存於一般乾燥箱之中，濕度約為 50~55% 時，其親水性可約保持兩天；而 PDMS 以界面離子活性劑處理過後，接觸角大約 92.15 ，相對於未處理之 PDMS 較為親水；而 Silicon 流道經非等向性蝕刻液 (TMAH 10%) 處理過後，因為非等向性蝕刻液蝕刻率為模穴底面 (晶格方向 $\langle 100 \rangle$) 高於流道側壁 (晶格方向 $\langle 110 \rangle$)，由 SEM 觀察之後發現，模穴底部隨時間之變化遠比側壁來的明顯，以 (100) 晶圓經過相

同時間之 RIE 處理過，再依照蝕刻液處理模穴之時間後，取接觸角量測值時會發現到因為 RIE 後之表面本來就非光滑面，故可解釋因為蝕刻後表面型態改變，會影響接觸角的值後，造成會有疏水、親水、相對疏水的現象，最後表面變為極為粗糙，所以接觸角量測結果呈現親水狀態。

5.2 PDMS-PDMS 模穴與 PDMS-Glass 模穴填充過程

固定構成模穴之材質為相同材質(PDMS-PDMS)，固定模穴之旋轉角，將偉伯數漸漸升高，可以發現因模穴內部非常疏水性，不管偉伯數高低，填充過程波前都呈現凸型，模穴內左右兩側壁面水分子無法超過中心波前。但是偉伯數小時，因為慣性力很小，所以填充時因為水的表面張力與壁面是疏水性的交互作用下，填充時圖中水在左右壁面之流動之速度不一甚至只有往一方壁面流動的現象；偉伯數升高時，水在左右壁面速度均一，波前會較為穩定不晃動的前進，另因為偉伯數升高，所以波前弧度會比較凸出。

固定模穴旋轉角、固定偉伯數時，比較 PDMS-Glass 與 PDMS-PDMS 模穴之填充過程之波前差異，在偉伯數較小時，可發現到因為慣性力較小，再加上 PDMS - Glass 模穴中有一壁面是親水之玻璃關係，所以波前會較為平緩，但程度不明顯。在偉伯數升高後，因為慣性力增大蓋過原本之表面張力的現象，所以波前之弧度已無差異。

模穴材質為非均一材質 (PDMS-Glass) 時，固定模穴之旋轉角，將偉伯數漸漸升高，因為 PDMS-Glass 接合力量較 PDMS-PDMS 為強，所以偉伯數可拉升範圍可從 0.00001 擴大至 10.046，細長型模穴偉

伯數提高時波前弧度會更突出;另外在相同入口慣性力之下，因為寬胖型於偉伯數漸漸升高時導致 We_2 的差異度不如細長型之模穴，所以偉伯數增大時寬胖型波前弧度雖有差異但不如細長型來得明顯。

固定模穴旋轉角，改變偉伯數時，PDMS-PDMS 模穴及 PDMS-Glass 模穴填充過程有著共通特徵，高偉伯數之下，在角落產生包覆氣泡的現象會開始出現，高速攝影機初步拍攝結果，基本上是因為流量增大、導致速度快，填充過程中水沿著壁面的流動速度遠小於波前中心速度，以致水流出模穴後尚有未填充的部分，造成氣泡包覆的現象。甚至在旋轉角 L60 之細長模穴裡，模穴一邊角落包覆氣泡的現象，提高偉伯數時，進而變為模穴兩邊角落皆有氣泡包覆現象發生。然而以 μ -PIV 作流道內速度顯像後，發現流速快慢會影響模穴包覆氣泡的現象之外，在特定的幾何尺寸之下，工作流體於模穴內填充時，速度分佈集中度與速度方向的均勻度應也是影響的主因。流速快並不全然使包覆氣泡的現象發生，流速快能使慣性力增大，當慣性力能開始抗衡表面張力作用時，且在模穴進口處也保持有水平方向的速度向量的條件下，此速度向量能在模穴其他位置速度減弱後，再度牽引並集中流體往又下方移動，達成完全填充的可能。所以，影響流場填充的因素，速度快慢是主因，但流場水平方向速度均勻度、速度的集中度，也會影響包圍氣泡的現象。

固定偉伯數，改變模穴旋轉角時，高速攝影機所擷取之畫面可知，當模穴往入口流道方向旋轉的角度越大時(如 L30、L60)越易包覆氣泡，此為 PDMS-PDMS 模穴與 PDMS-Glass 模穴共通的現象，此為模穴的幾何現象所致，當彎角越極端，不適當的慣性力之下，工作流

體無法順利沿著壁面填充。除了慣性力之外，在 μ -PIV 拍攝的結果顯示，工作流體的表面張力也會影響填充過程的，假設於偉伯數小時，理論上整個波前是表面張力所主導，PIV 速度向量圖中可以發現，當慣性力小時，從速度向量從原本之橫向方向，進而轉為以波前為基礎形狀的扇形分佈，模穴中因為均勻扇形速度向量的關係，造成高速攝影機下模穴中波前呈現穩定半圓形發展。在細長型 L60 模穴中無法像寬胖型模穴能提供波前發展的空間，水的波前穩定發展方向會先接觸對面壁面，且因流體受阻礙時速度向量只會作轉向的動作，不再對氣泡區強制擠壓，所以填充過程中會有包覆氣泡的現象。

固定偉伯數，固定模穴旋轉角(如 L30、L60)時，做 PDMS-PDMS 模穴與 PDMS-Glass 模穴之填充過程平行比較，會發現 PDMS-Glass 模穴較有機會完全填充。若將固定之偉伯數慢慢往上提升比較時，會發現到有一個包覆氣泡的臨界偉伯數值，過了此臨界值後發生氣泡的現象會增多，固定旋轉角之下因為 PDMS-Glass 模穴中有一面為玻璃性質較為親水，所以 PDMS-Glass 模穴的臨界值的大小會比均一材質之模穴來得高。

將本研究的中填充過程包氣泡與不包氣泡的實驗值做 $We-\theta$ 關係圖，而關係圖依照文獻[13]定義做歸納，可發現若每個種模穴分開來看時，PDMS-PDMS 模穴實驗值趨勢就如模擬值一般，包氣泡的實驗值大多落於圖中右上角；而 PDMS-Glass 模穴實驗值的趨勢會比較像以 θ 值之大小作上下區隔，其與模擬值差異的原因可能是模穴並不是單一材質、模穴內壁並不保證是如模擬時之完全平滑表面，或是模穴之幾何尺寸用除特徵長度之外，作歸納時是否要將橫向尺寸大小需要考

慮進去。

5.3 改變 PDMS 模穴壁面親疏水性質

PDMS-Glass 模穴裡，為了要保持 PDMS 之親水性，相關文獻中常在氧電漿處理之後再經一次化學藥品處理，本研究之中以 Triton 處理、流道內氧電漿處理法，比較文獻 HEMA 處理方式，發現到 HEMA 效果並不理想，其原因可能是本研究所用之機台功率比文獻所述較小所致；另外 Triton 處理過程中，將流道內 Triton 烤乾時間長，製程花費時間久。本研究之結果中，若以填充時波前弧度及改變模穴壁面親水製程步驟的容易程度比較，則發現氧電漿再處理法表現最佳，HEMA 處理法最差。如果就醫藥化學分析的角度來看，流道內殘有化學物質勢必會對分析物產生影響，所以用流道內氧電漿再生法是一種最簡潔的處理過程，但是本研究在製程時因為流道微小，在反應腔中氧氣往流道內補充不易，因為氧氣無法適時填補的問題致使製程良率無法提高，製作費時，若往後有在腔體內有填充系統，能持續且穩定的對流道做氧氣補充，且 PDMS 疏水性回復時間可允許，在避免化學處理產生藥劑殘留的狀況下，流道內的親水性再生法是個不錯的選擇。

5.4 TMAH 處理 silicon 流道後之填充過程

Silicon-PDMS 流道中，固定偉伯數、固定流道彎角，觀察 TMAH 處理時間與填充時波前的差異，在本研究中可以確定的是封裝流道的 PDMS 靜態接觸角約為 116° ，不同 TMAH 處理時間後的晶圓表面靜態接觸角值如前章所述，本研究中 TMAH 處理的時間內，對 Silicon 模穴

側面之型態改變相對於底面處理後的差異是固定不變的，TMAH 並不會對 PDMS 表面造成影響，所以構成模穴之四個面中有三個面是固定性質，故實驗中因模穴 TMAH 處理的時間，造成波前會有未處理時疏水、相對於未處理前較為親水、相對於處理 15 分鐘後較為疏水的改變，就 RIE 之 silicon 表面再以 TMAH 處理後量測得之接觸角的數據顯示，亦表面的改變有可能影響其波前填充時波前改變的原因。



參考文獻

- [1] 張志誠，微機電技術，商周出版社，台北市，2002.
- [2] T. R. Hsu, MEMS and Microsystem: design and manufacture, McGraw-Hill, 2002.
- [3] N. Schwesinger, T. Frank, H. Wurmus, “A Modular Microfluid System with An Integrated Micromixer,” J. Micromech. Microengr., Vol.6, 99-102, 1996.
- [4] W.Ehrfeld, K.Gebauer, V.Hessel, H. Lowe, T.Richer,”Characterization of Mixing in Micromixers by a Test Reaction by a Test Reaction: Single Mixing Unit and Mixer Arrays,” Ind Eng. Chem. Res, Vol.37, 1075-1082, 1999.
- [5] J. T. Groves, N. Ulman, S.G. Boxer, “Micropatterning of Fluid Lipid Bilay on Solid Supports,” Science Vol. 275,651-653,1997.
- [6] J. K. Jun and K. C. Jin, “Valveless Pumping Using Traversing Vapor Bubble in Microchannels,” J. Applied Physics, Vol.83, No.11, 5658-5664, 1998.
- [7] M. A. Northrup, M. T. Ching, R. M. White, and R.T. Lawton, “DNA Amplification with A Microfabricated Reaction Chamber,” International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 93), Yokohama, Japan, June 7-10, 924-926, 1993.
- [8] J. Bico and D. Quere, “Liquide Trains in A Tube,” Europhy. Lett.,

Vol.51, 546-550, 2000.

- [9] O. E. Jensen, "The Thin Liquid Lining of A Weakly Curved Cylindrical Tube," J. Fluid Mech., Vol.331,373-403,1997.
- [10] V.D. Sobolev, "Surface Tension and Dynamic Contact Angle of Water in Thin Quartz Capillaries," J. Colloid and Interface, Vol.222, 51-54, 2000.
- [11] S.E Navti, K. Ravindran, C. Taylor, R. W. Lewis, "Finite Element Modeling of Surface Tension Effects Using a Lagrangian-Eulerian Kinematic Description," Comput. Methoda Appl.Mech. Engrg., Vol. 147, 41-60, 1997.
- [12] Y. Lee, J.K. Kim, S. Chung, C. Chung, J. K. Chang, J.Y. Yoo, "Flow Charecteristics of Hydrophilic/Hydrophobic Capillaries consider Surface Tension," Micro-technologies in Medicine and Biology 2nd Annual International IEEE-EMB Special Topic Conference, 560-564, 2002.
- [13] J.J. Chen, W.Z. Liu, J.D. Lin, J.W. Wu, "Analysis of filling of an oval disk- shaped chamber with microfluidic flows", Sensor and Actuator A, Press, 2006.
- [14] Kurt E. Petersen, "Silicon as a Mechanical Materal", Proc. of the IEEE, Vol.70, 420-457, No.5 May 1982.
- [15] I. Zubel, M. Kramkowska, "Ecth rates and morphology of silicon (h k l) surface etched in KOH and KOH Saturated with Isopropanol Solution", Sensor and Actuators, Vol.115, 549-556, 2004.

- [16] Di Cheng, Miguel A, Tatsuya Hori, Kazuo Sato, Mitsuhiro Shikida, “Improvement in smoothness of anisotropically etched silicon surfaces:Effect of surfactant and TMAH concentrations”, Sensors and Actuators A: Physical, Vol.125, 415-421, 2006.
- [17] A. Chambers, A. Ashraf, “Through Wafer Via Etching”, Advance Packaging, April 2005.
- [18] J.P. Hartnett, W.J. Minkowyez, “Measurements of Heat Transfer in Microchannel Heat Sinks”, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol.27, No.4, 495-506, 2000.
- [19] Y.P. Chen, P. Cheng, “Condensation of Steam in Silicon Microchannels”, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol.32, 175-183, 2005.
- [20] L. Ceriotti, K. Weible, N.F. de Rooij, E. Verpoorte, “Rectangular Channels for lab-on-a-chip applications”, Microelectronic Engineering, Vol. 68, 865-871, 2003.
- [21] L. Xie, L. Yobas, H.M. Ji, J. Li, Y. Chen, P. Damaruganath, W.C. Hui, M.K. Iyer, “Disposable Polydimethylsioxane Package for ‘Bio-Microfluidic System’”, Electronic Components and Technology, IEEE, 617-621,2005.
- [22] S.F. Li, S.C. Chen, “Polydimethylsioxane Fluidic Interconnects for Microfluidic Systems”, Part B: Advanced Packaging, IEEE, Vol.26, No.3, 242-247, 2003.
- [23] N. Sundararajan, M.S. Pio, L.P. Lee, A.A. Berlin, “Three-Dimens

- ional Hydrodynamic Focusing in Polydimethylsiloxane(PDMS) Microchannels”, Journal of Microelectromechanical System, IEEE, Vol.13, 599-567, No.4, 2004.
- [24] Dhananjay Bodas, Chantal Khan-Malek, “Formation of more stable hydrophilic surface of PDMS by plasma and chemical treatment”, Press, 2006.
- [25] 王亞偉等, 物理, 五南出版社, 台北市, 2001.
- [26] 謝曉星, 基本流體力學, 東華出版社, 台北市, 1991.
- [27] 劉文忠, “微形圓盤模穴內之微流體流動現象分析,”交通大學機械工程研究所碩士論文, 2002.
- [28] 林啟明, “親水性與厭水性聚二甲基矽氧烷表面特性差異”國立台灣大學碩士論文, 2001.
- [29] 施昱宏, “表面微結構對靜態接觸角與表面附著現象之研究”交通大學機械工程研究所碩士論文, 2004.
- [30] R.J. Adrian, C.D. Meinhart, C.D. Tomkins, “Vortex Organization in The Outer Region of The Turbulent Boundary Layer”, J. Fluid Mech., Vol.422, 1-54, 2000.3
- [31] N.T. Nguyen, Z.G. Wu, X.Y. Huang, C.Y. Wen, “The Application of μ PIV Technique in The Study of Magnetic Flows in Micro-channel”, Magnetism and Magnetic Materials, Vol.289, 396-398, 2005.
- [32] D.C. Tretheway, C.D. Meinhart, “Effect of Absolute Pressure on Fluid Slip in a Hydrophobic Microchannel”, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2003.

- [33] D.M. Curtin, D. T. Newport, M. R. Davies, “Utilising Micro-PIV and pressure measurements to determine the viscosity of a DNA solution in a microchannel”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Press, 2006.
- [34] B.J.Kim, Y.Z.Liu, H.J. Sung, “Micro PIV measurement of two-fluid flow with different refractive indices”, *Meas. Sci. Technol.*, Vol.15, 1907-1103, 2004.
- [35] M. Hoffmann, M. Schluter, N. Rabiger, “Experimental investigation of liquid–liquid mixing in T-shaped micro-mixers using μ -LIF and μ -PIV”, *Chemical Engineering Science*, Vol.61, 2968-2976, 2006.
- [36] S. Devasenathipathy, J.G. Santiago, S.T. Wereley, C.D. Meinhart, K. Takehara, “Particle image techniques for microfabricated fluidic system”, *Experiment in Fluids*, Vol.34, 504-514, 2003.

表 2-1 光阻種類及使用參數

光阻種類	低轉速	高轉速	軟烤時間	曝光時間	顯影時間	定影時間	硬烤時間
正光阻 AZ4620	1500rpm 15s	3000rpm 25s	90°C 3min	加濾鏡 35sec	AZ300 10sec	水 20sec	120°C 10min



表 2-2 RIE 機台使用參數

RIE 機台	SF6	CHF3	O2	Bais	ICP	壓力 (mTorr)	蝕刻速率 (μ /min)
HDP-RIE	40	20	10	100	400	10	0.9~1

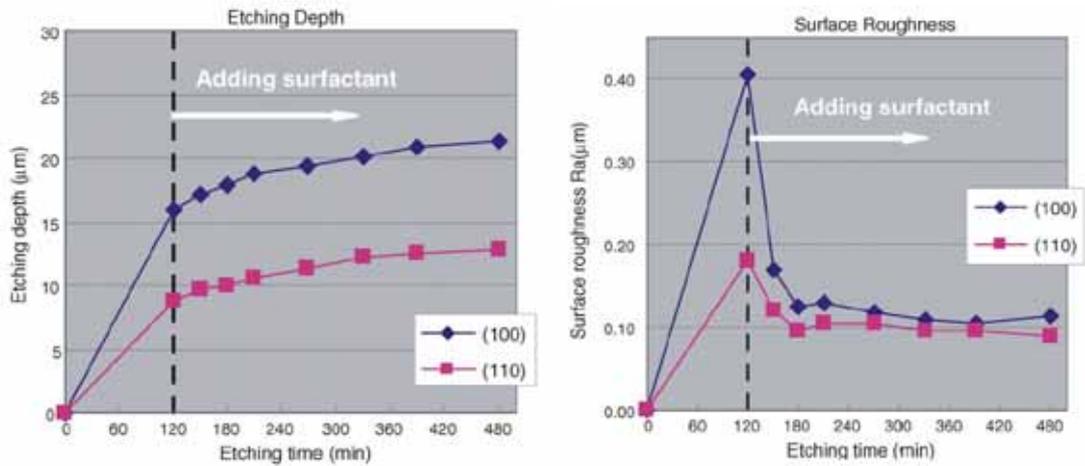


圖 1-1 Cheng 等人[16]在晶圓上以 TMAH 處理與蝕刻速率和粗糙度之關係圖

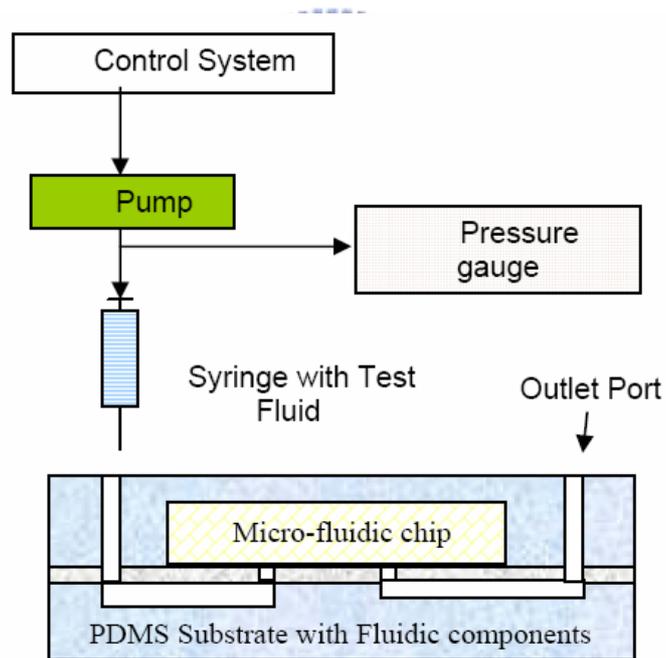


圖 1-2 Xie 等人[21]設計之 PDMS 整合微流體晶片之生物流體系統。

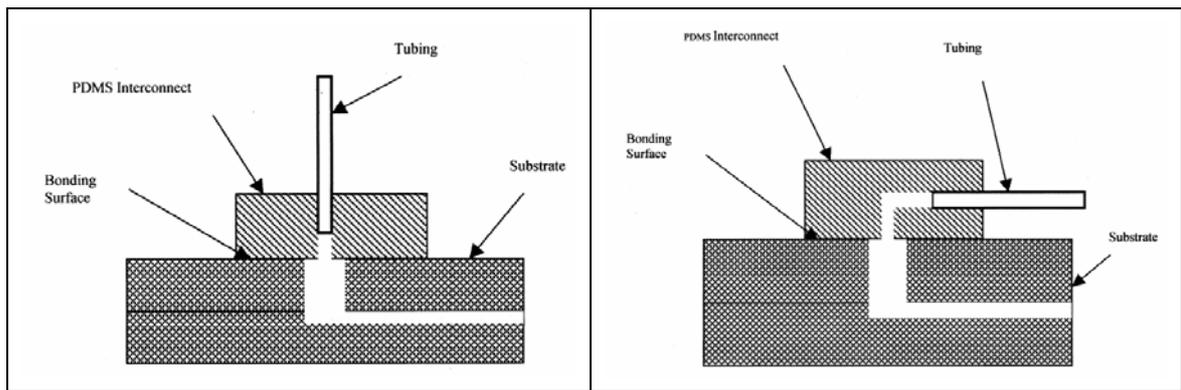


圖 1-3 Chen 等人[22]以毛細管製作之流道口接管及 L 型接頭。

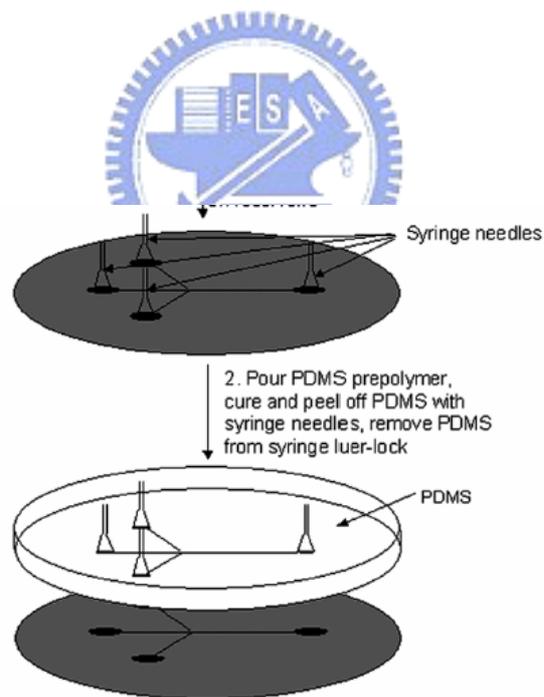


圖 1-4 Sundararajan 等人[23]，針頭在 PDMS 澆鑄時作為開口區。

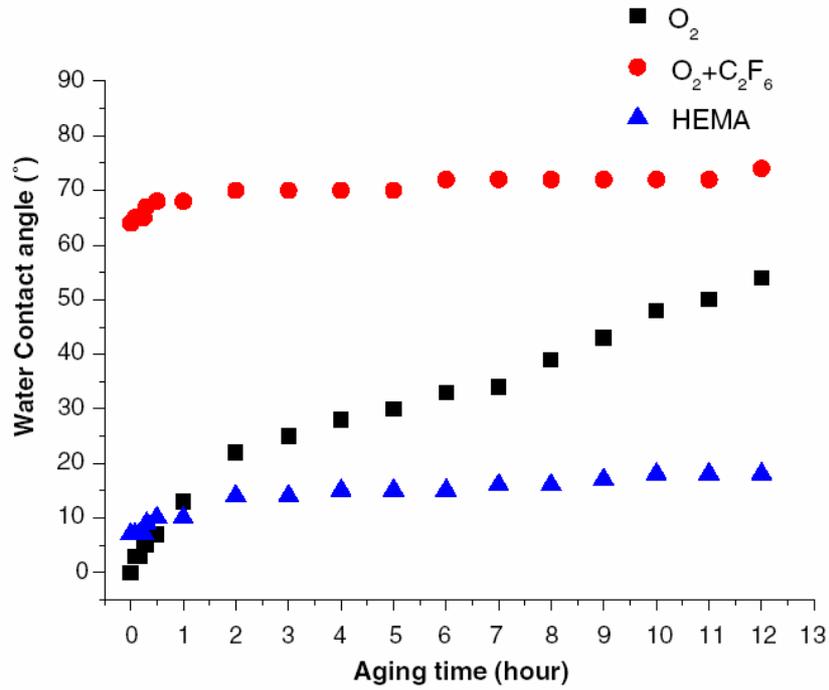


圖 1-5 Bodas 等人[24]以不同化學處理比較 PDMS 親水性的延長時間

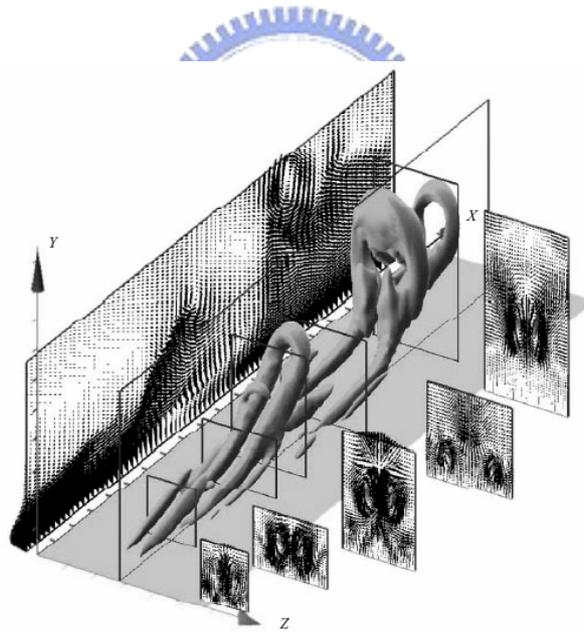


圖 1-6 Adrian 等人[22]以 PIV 對紊流邊界層之研究。

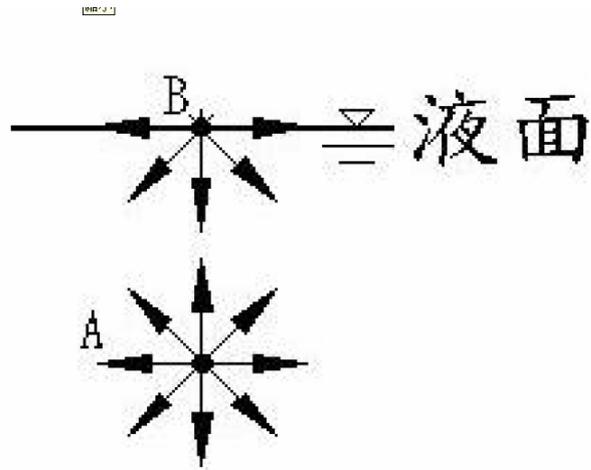


圖 2-1 表面張力。(文獻[27])

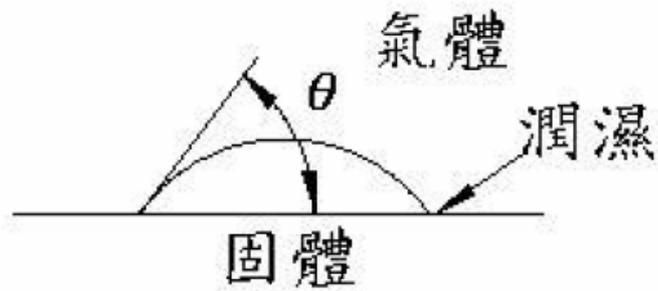
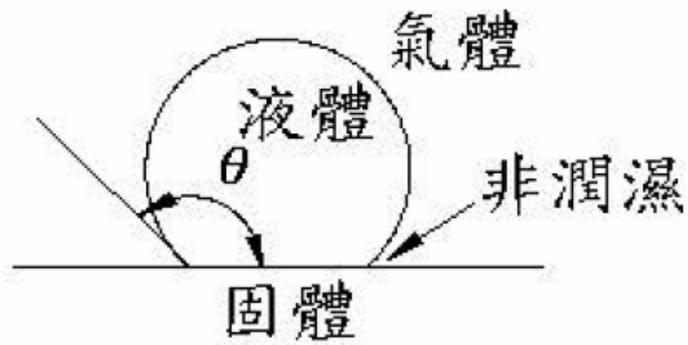


圖 2-2 液體與固體表面潤濕性示意圖。(文獻[27])

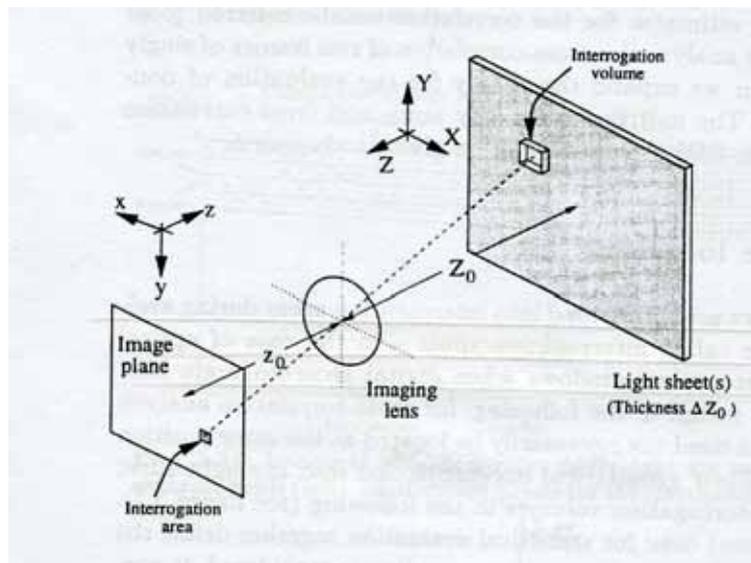


圖 2-3 影像測速法原理示意圖

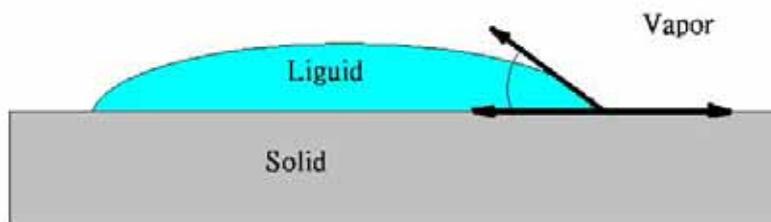


圖 2-4 Youngs model[29]

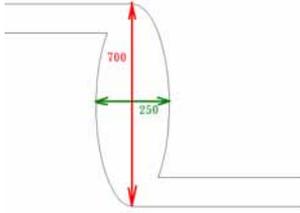
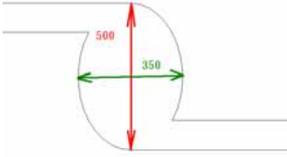
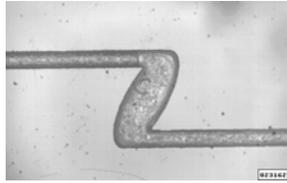
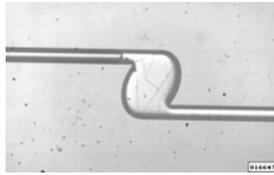
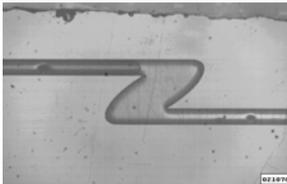
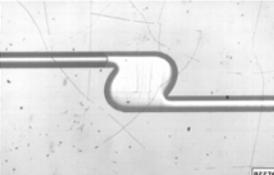
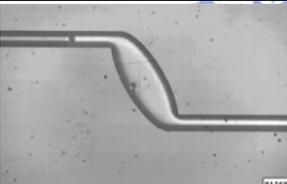
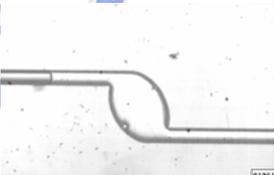
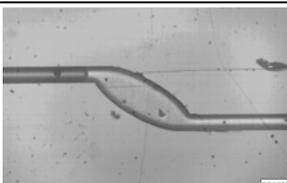
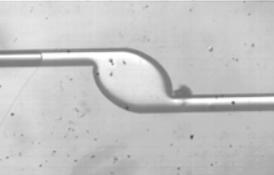
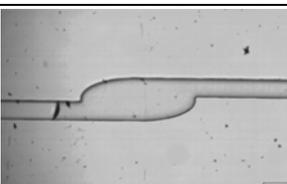
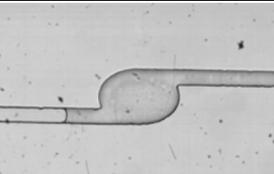
	700 μm \times 250 μm 進出口流道寬 100 μm 深度 50 μm	500 μm \times 350 μm 進出口流道寬 100 μm 深度 50 μm	
0 (Original)			0 (Original)
L30 (Left30°)			L30 (Left30°)
L60 (Left60°)			L60 (Left60°)
R30 (Right30°)			R30 (Right30°)
R60 (Right60°)			R60 (Right60°)
90			90

圖 2-5 模穴幾何尺寸示意圖

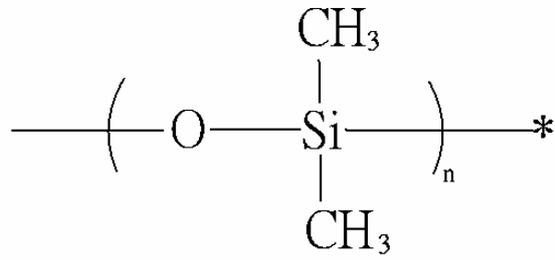


圖 2-6 PDMS(聚二甲基矽甲烷)

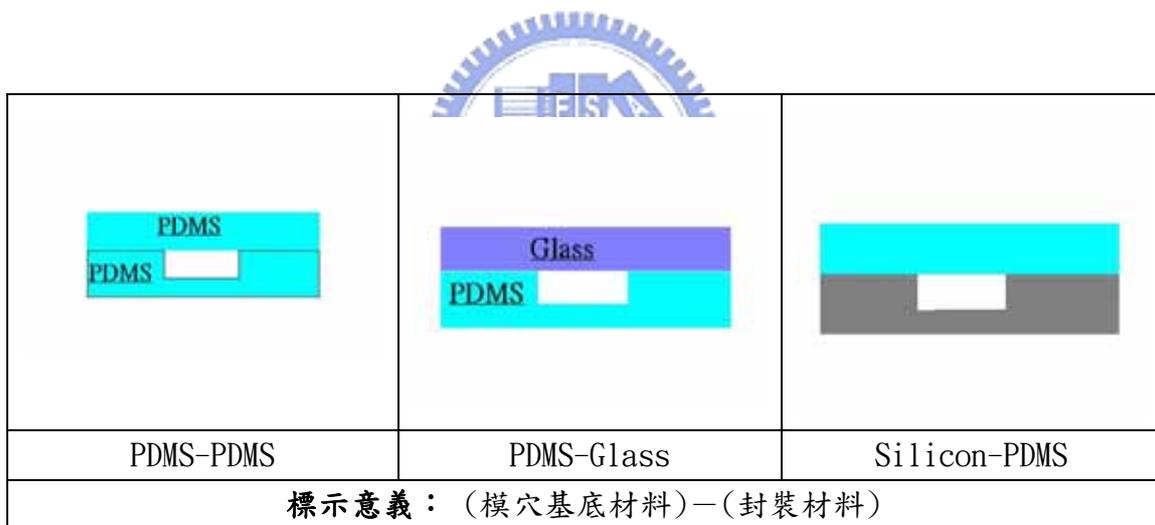


圖 2-7 構成微模穴材質類別



圖 2-8 微流體裝置(PDMS-PDMS)

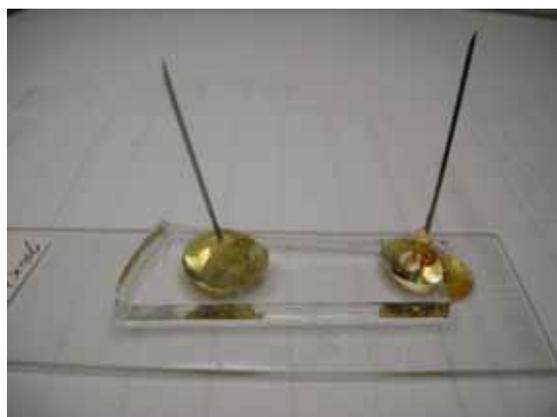


圖 2-9 微流體裝置(PDMS-Glass)



圖 2-10 微流體裝置(Silicon-PDMS)



圖 2-11 超音波震動鑽孔機

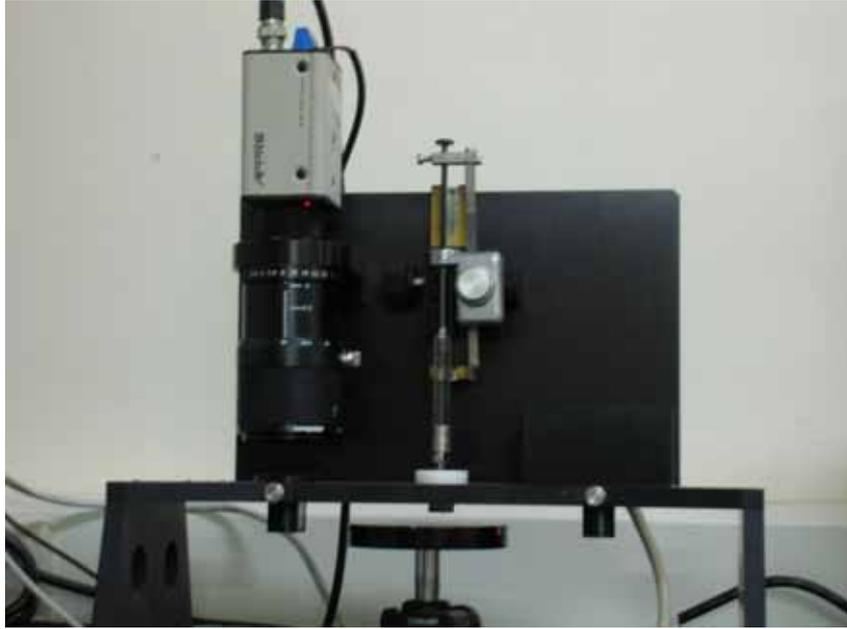


圖 2-12 接觸角量測儀



圖 2-13 氧電漿清洗機

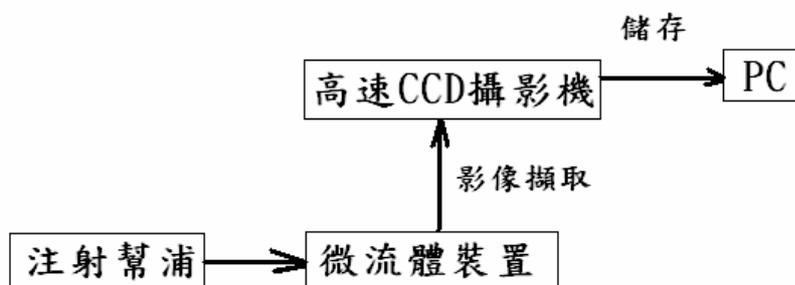


圖 3-1 高速攝影實驗系統示意圖



圖 3-2 可程式注射泵

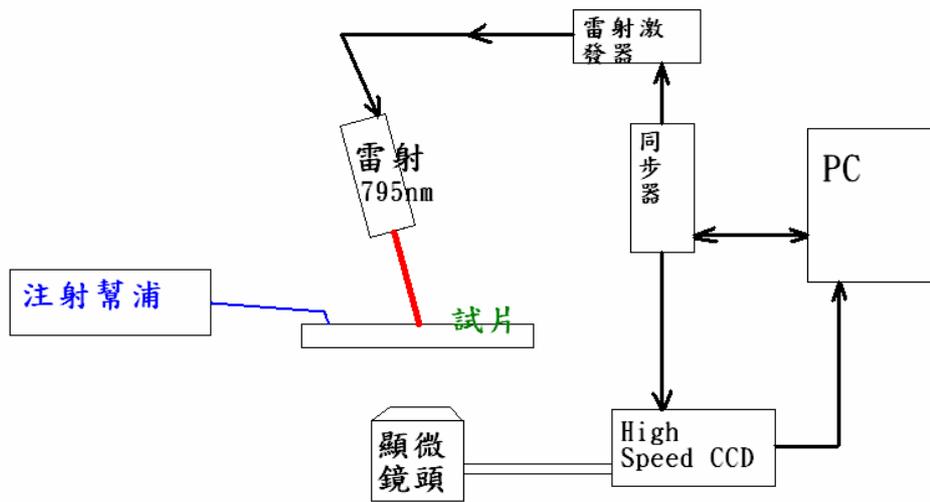


圖 3-3 μ -PIV 實驗系統示意圖



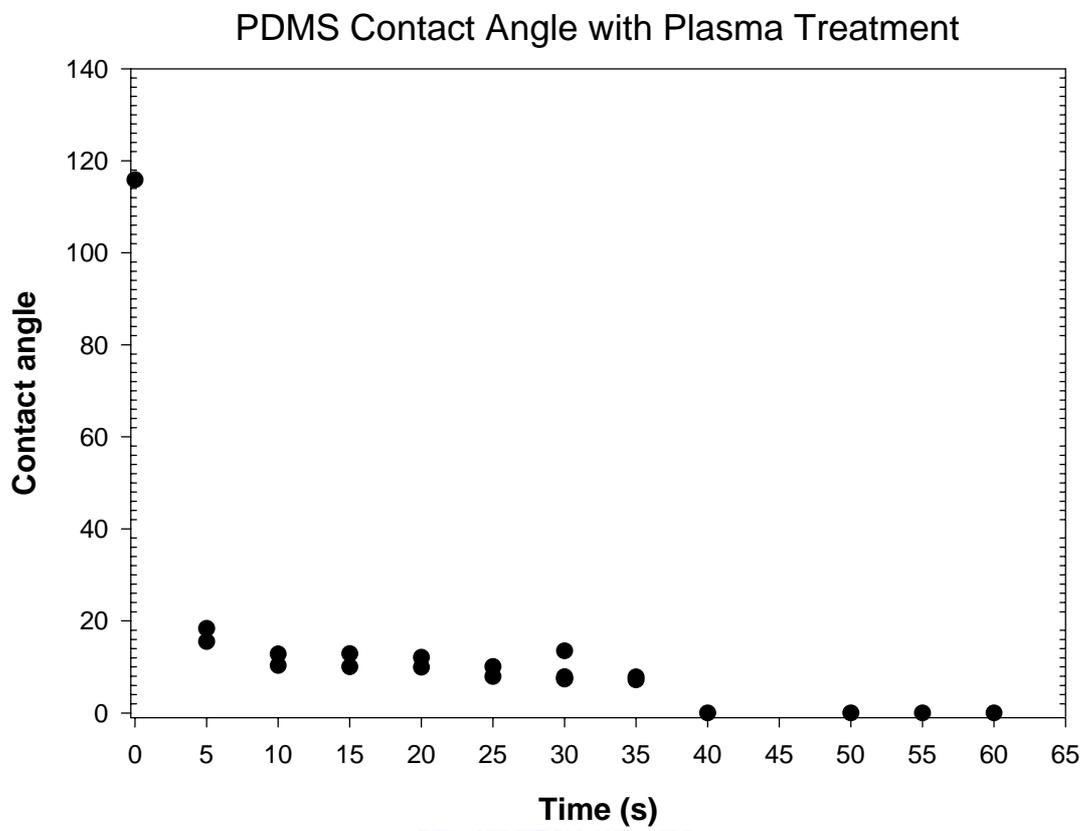
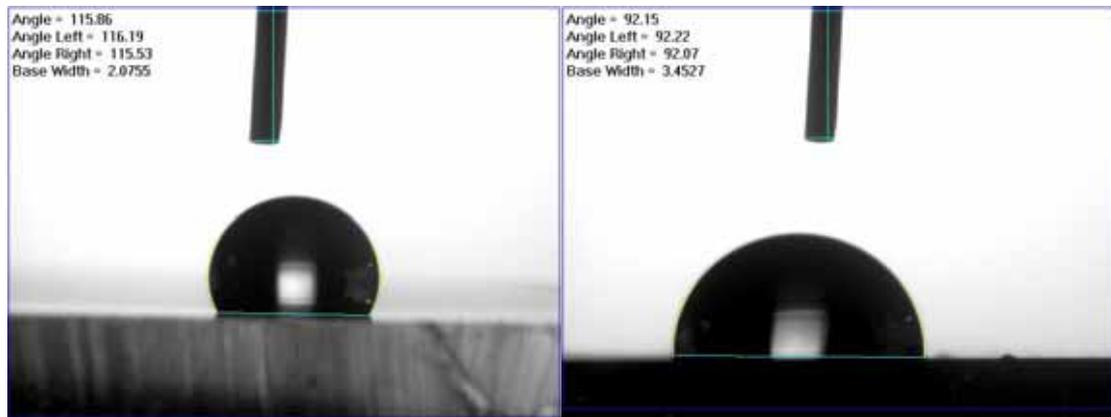


圖 4-1 PDMS 氧電漿處理時間與接觸角關係圖



Pure PDMS

(a)

Triton treatment

(b)

圖 4-2 PDMS 表面經 Tritont 處理後之接觸角



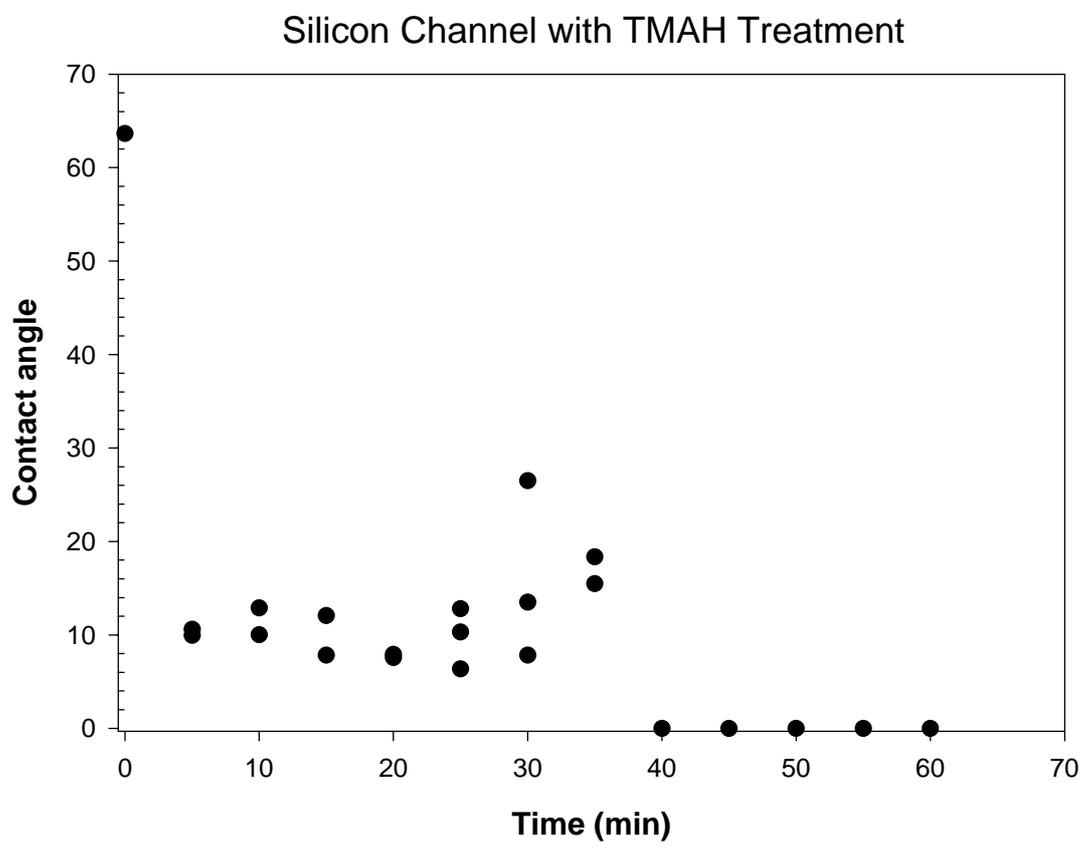
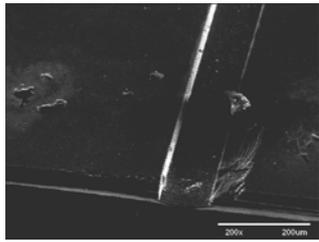
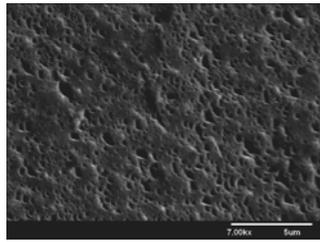


圖 4-3 TMAH 處理時間與接觸角關係圖

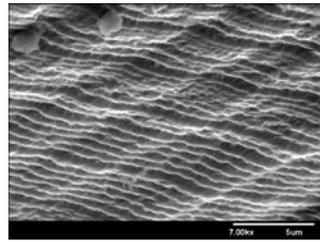


(a)



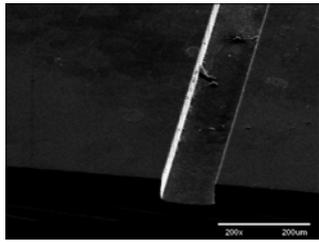
(b)

0min Botton

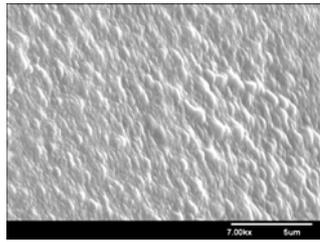


(c)

0min Side wall

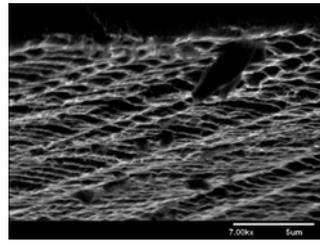


(A)



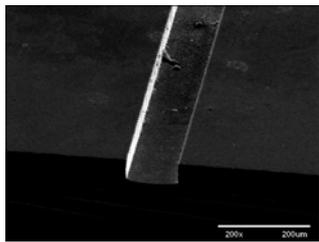
(B)

15min Botton

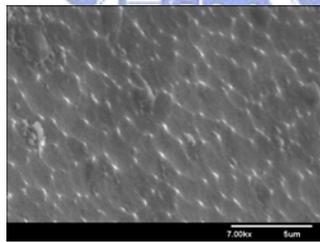


(C)

15min Side wall

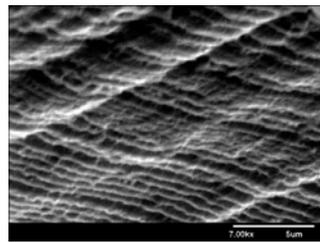


(1)



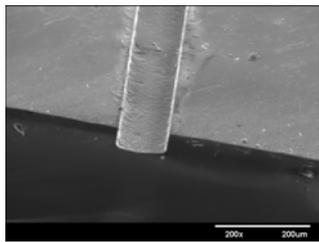
(2)

30min Botton

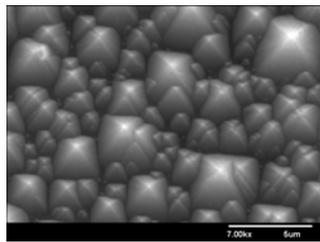


(3)

30min Side wall

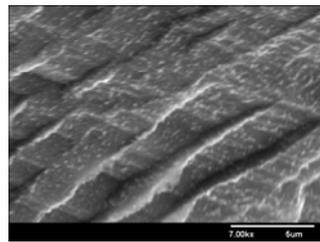


(I)



(II)

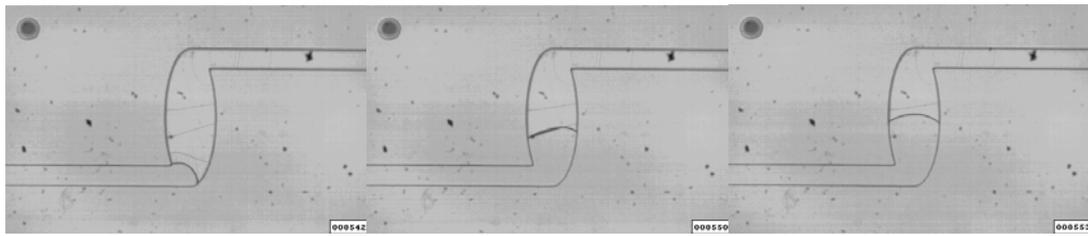
45min Botton



(III)

45min Side wall

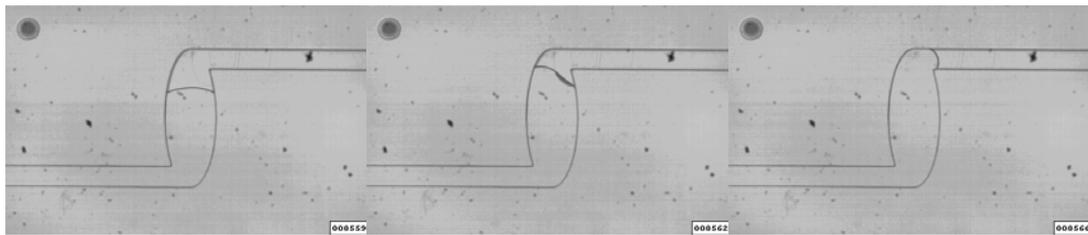
圖 4-4 流道之 SEM 圖



(a)

(b)

(c)

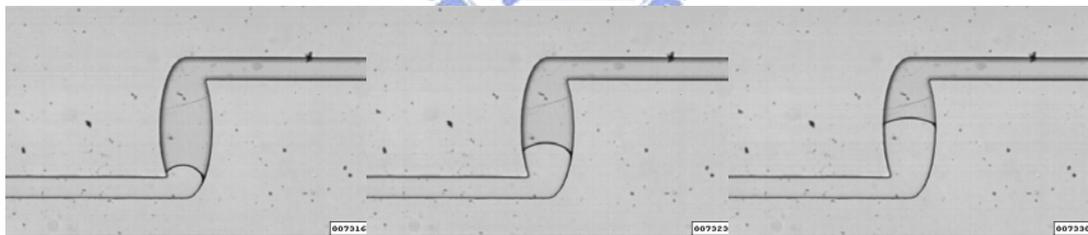


(d)

(e)

(f)

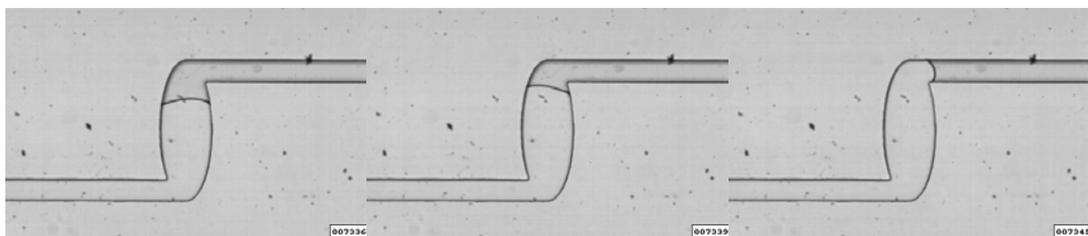
圖 4-5 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000002$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$



(a)

(b)

(c)

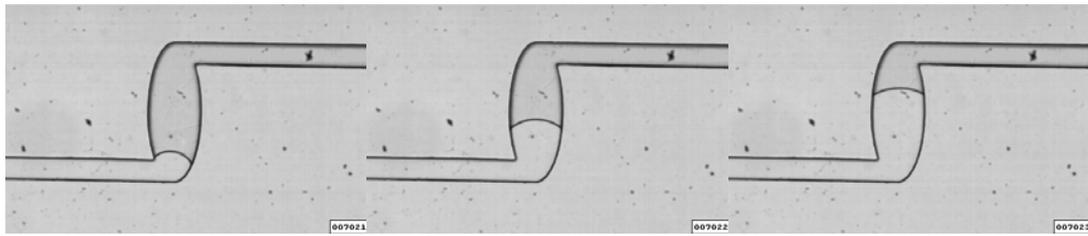


(d)

(e)

(f)

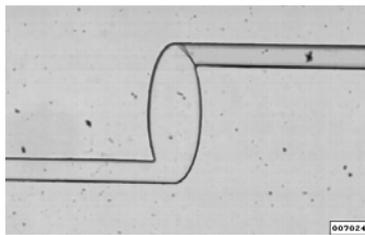
圖 4-6 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.001$ 、 $We_2=0.0002$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$



(a)

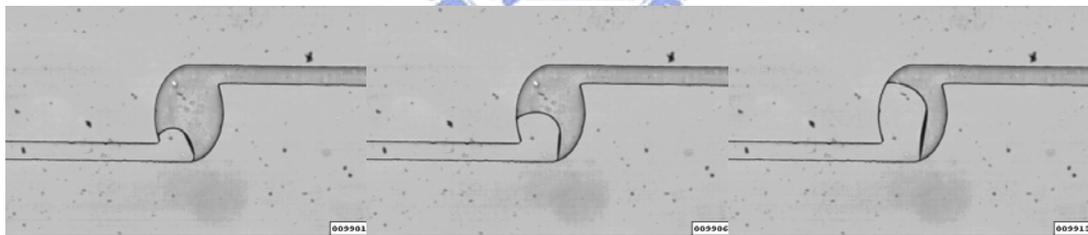
(b)

(c)



(d)

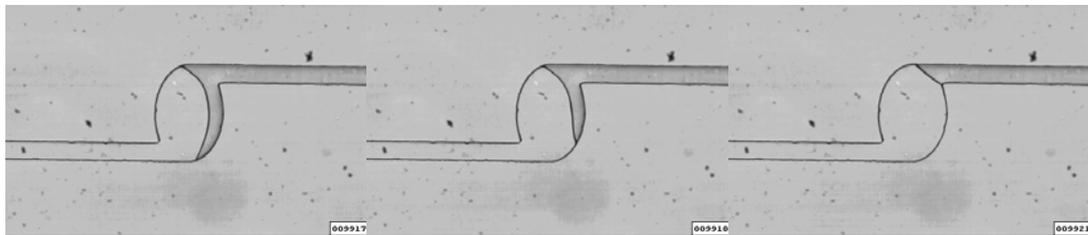
圖 4-7 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.009$ 、 $We_2=0.00181$ 、 $Q=0.03\text{ml}/\text{min}$



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)

圖 4-8 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000001$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$

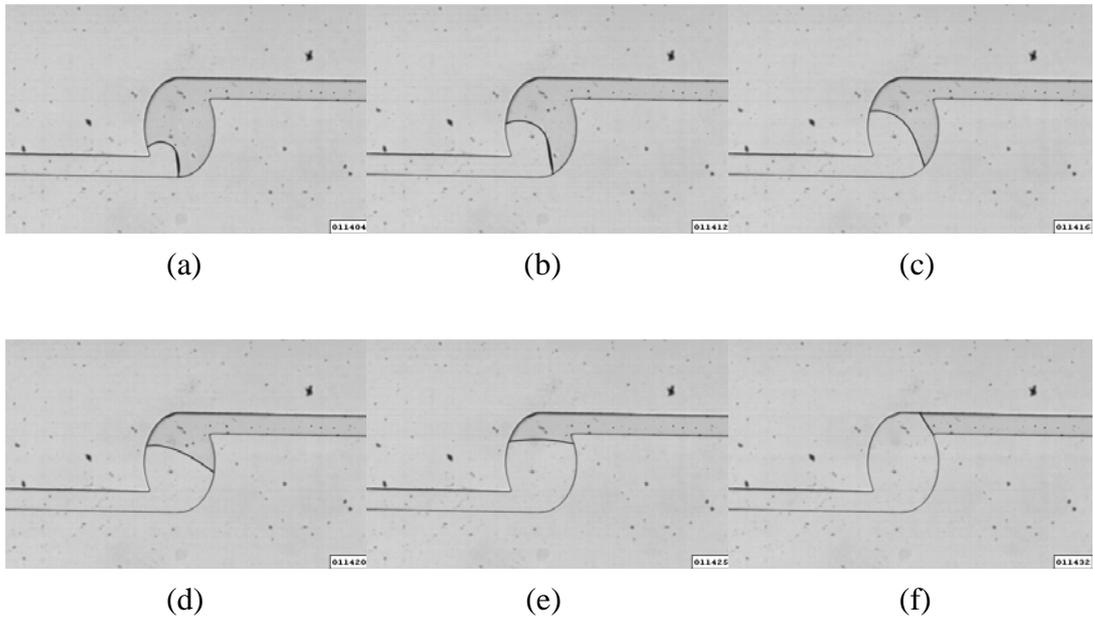


圖 4-9 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.001$ 、 $We_2=0.0001$ 、 $Q=0.01\ \text{ml/min}$

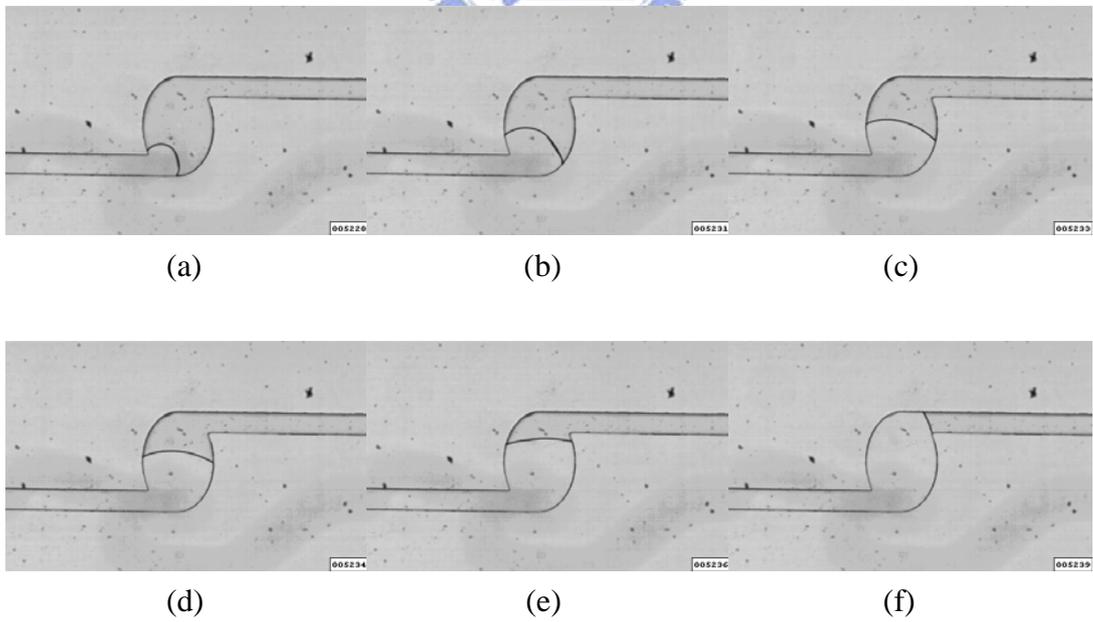
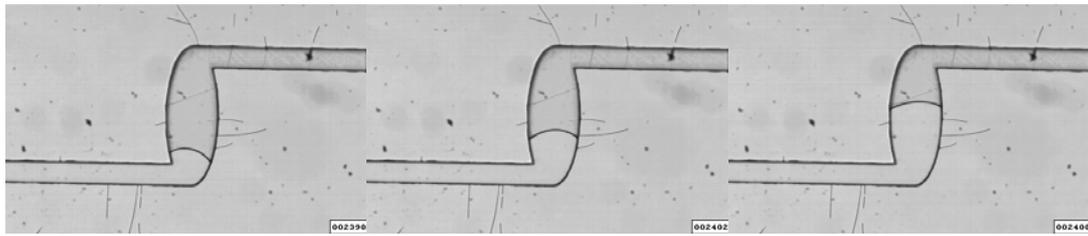


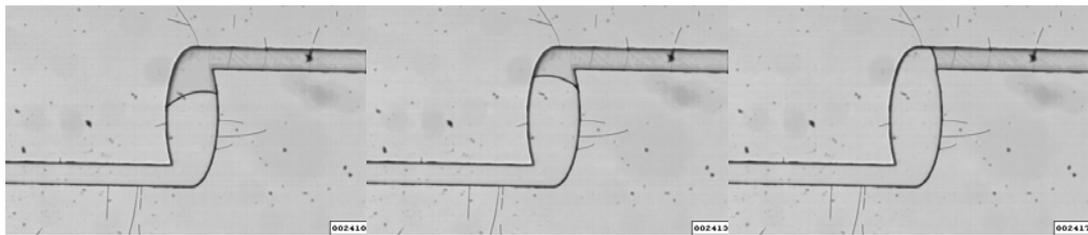
圖 4-10 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.009$ 、 $We_2=0.00097$ 、 $Q=0.03\ \text{ml/min}$



(a)

(b)

(c)

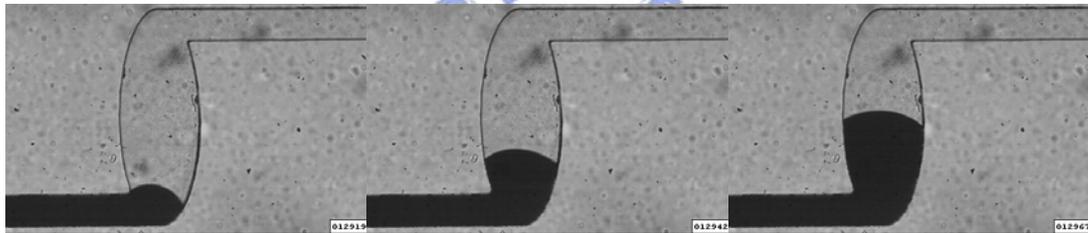


(d)

(e)

(f)

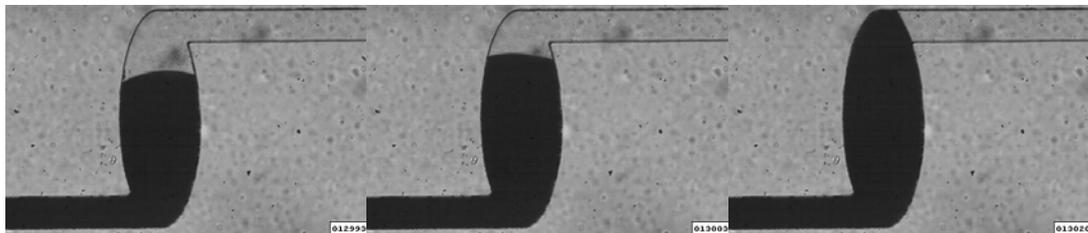
圖 4-11 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.009$ 、 $We_2=0.0018$ 、 $Q=0.03\ \text{ml/min}$



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)

圖 4-12 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.1005$ 、 $We_2=0.0201$ 、 $Q=0.1\ \text{ml/min}$

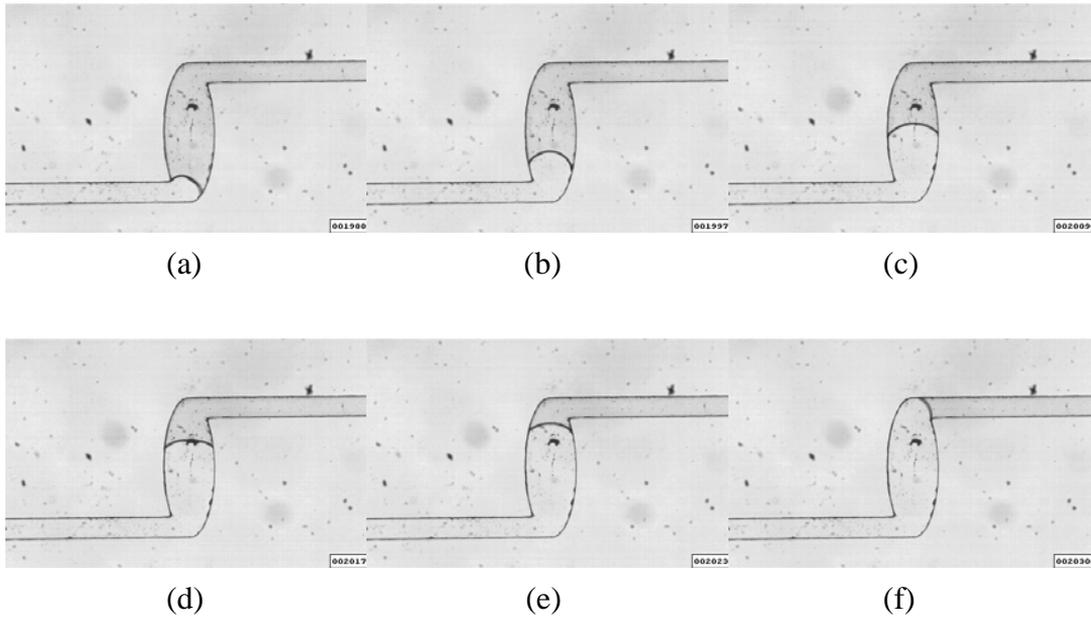


圖 4-13 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=10.046$ 、 $We_2=2.01$ 、 $Q=1\ \text{ml/min}$

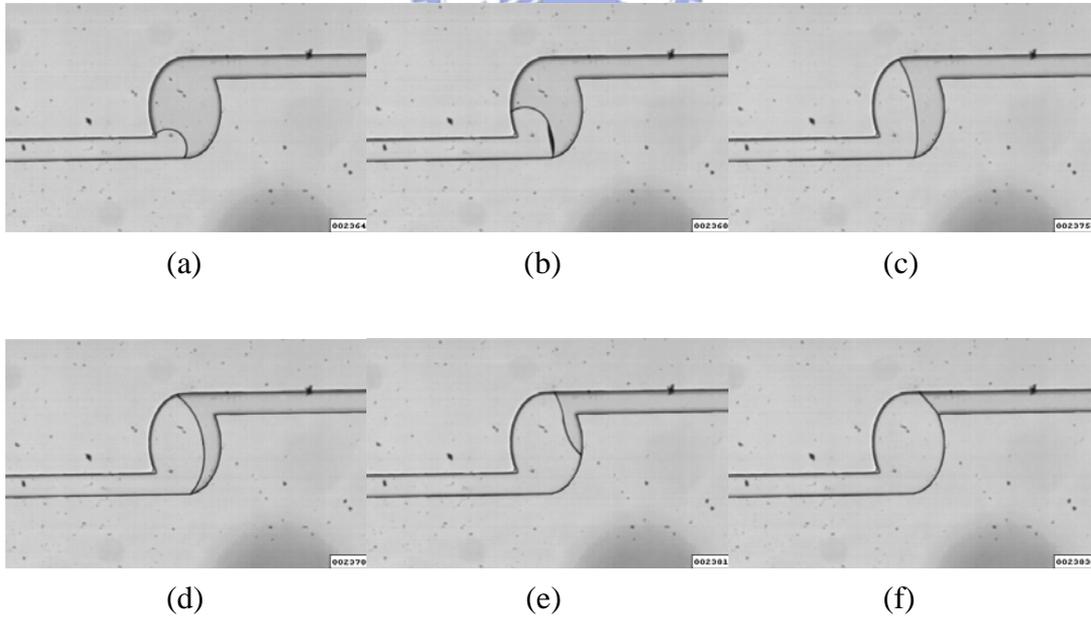


圖 4-14 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m} \times 350\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.009$ 、 $We_2=0.00097$ 、 $Q=0.03\ \text{ml/min}$

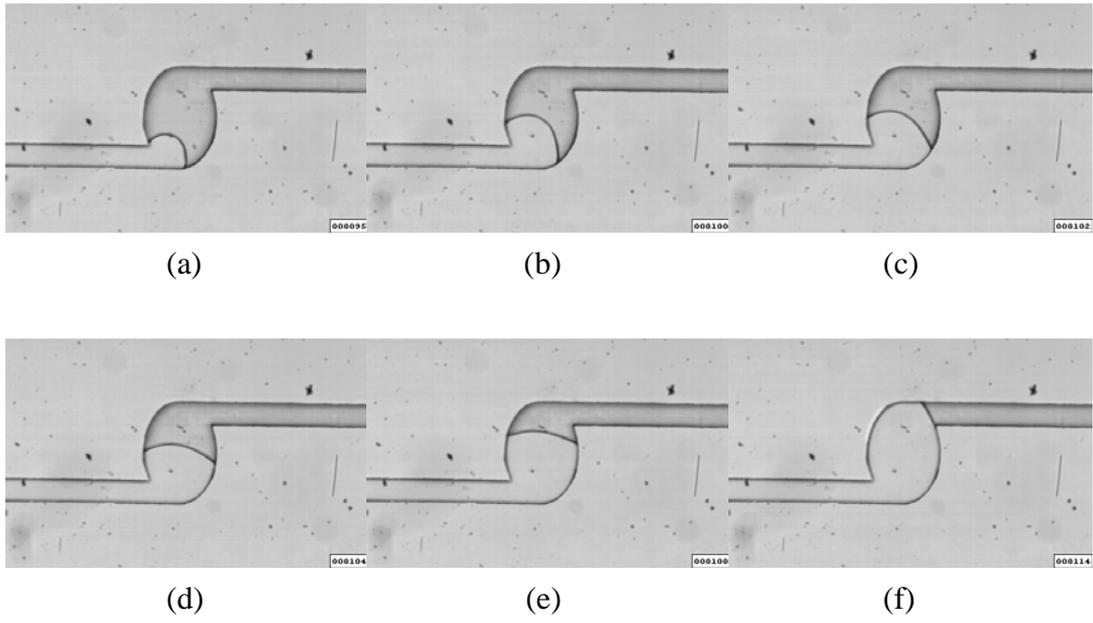


圖 4-15 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.1005$ 、 $We_2=0.01077$ 、 $Q=0.1\text{ml}/\text{min}$

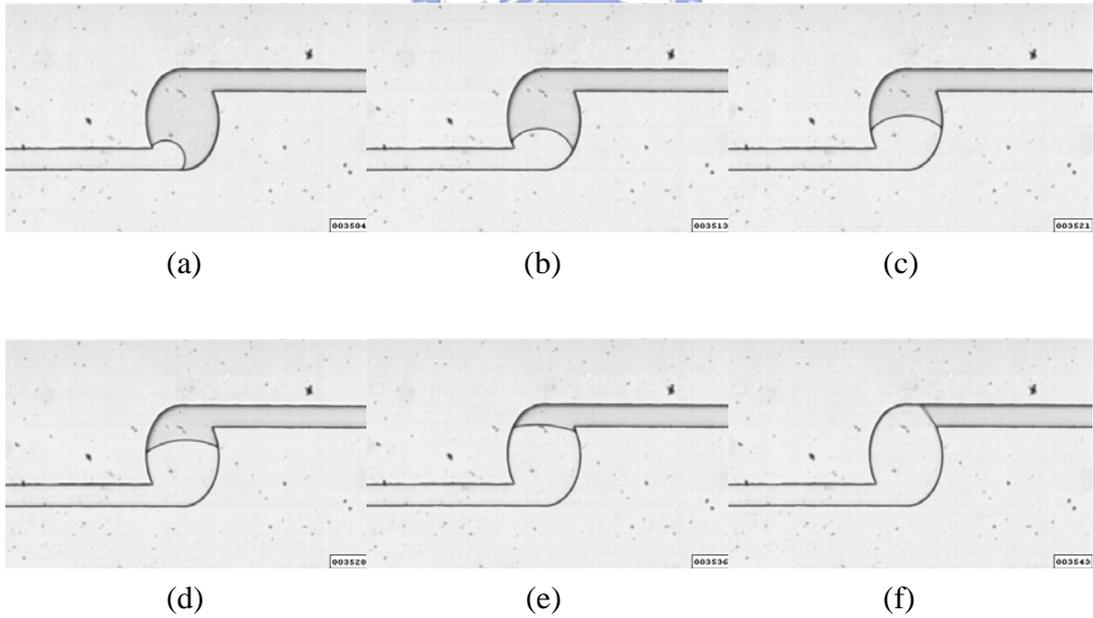


圖 4-16 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=10.046$ 、 $We_2=1.076$ 、 $Q=1\text{ml}/\text{min}$

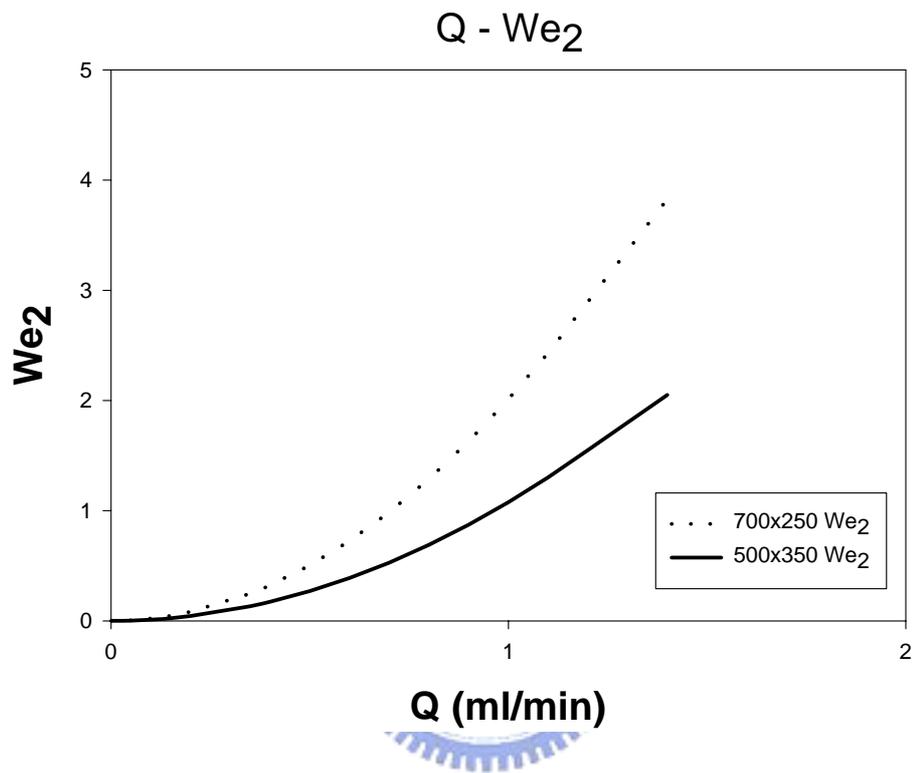


圖 4-17 Q-We₂關係圖

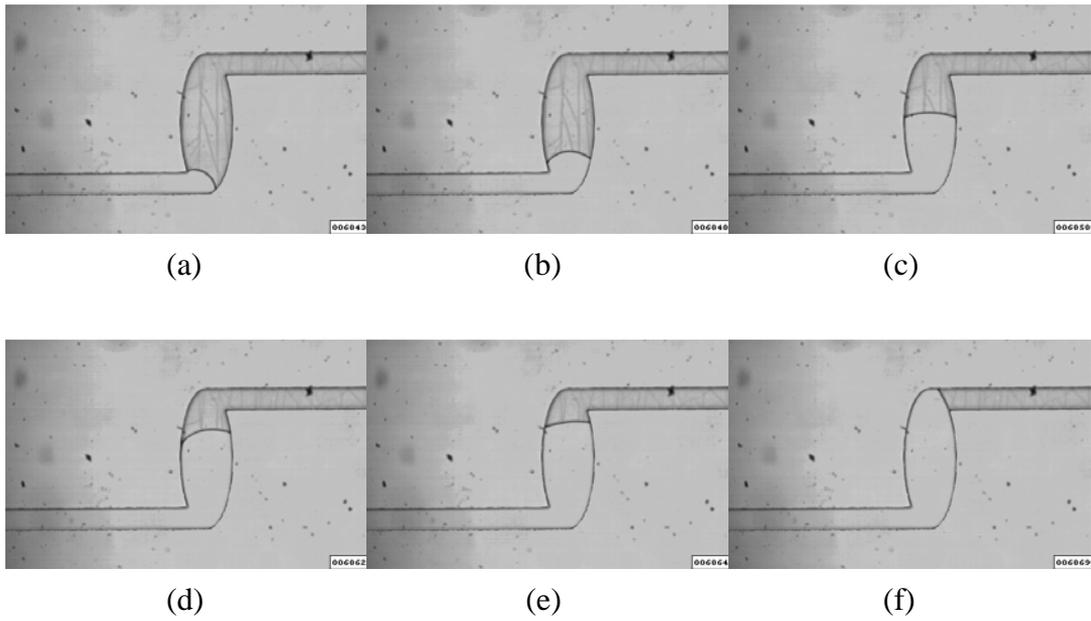


圖 4-18 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.001$ 、 $We_2=0.0201$ 、 $Q=0.01\text{ml/min}$

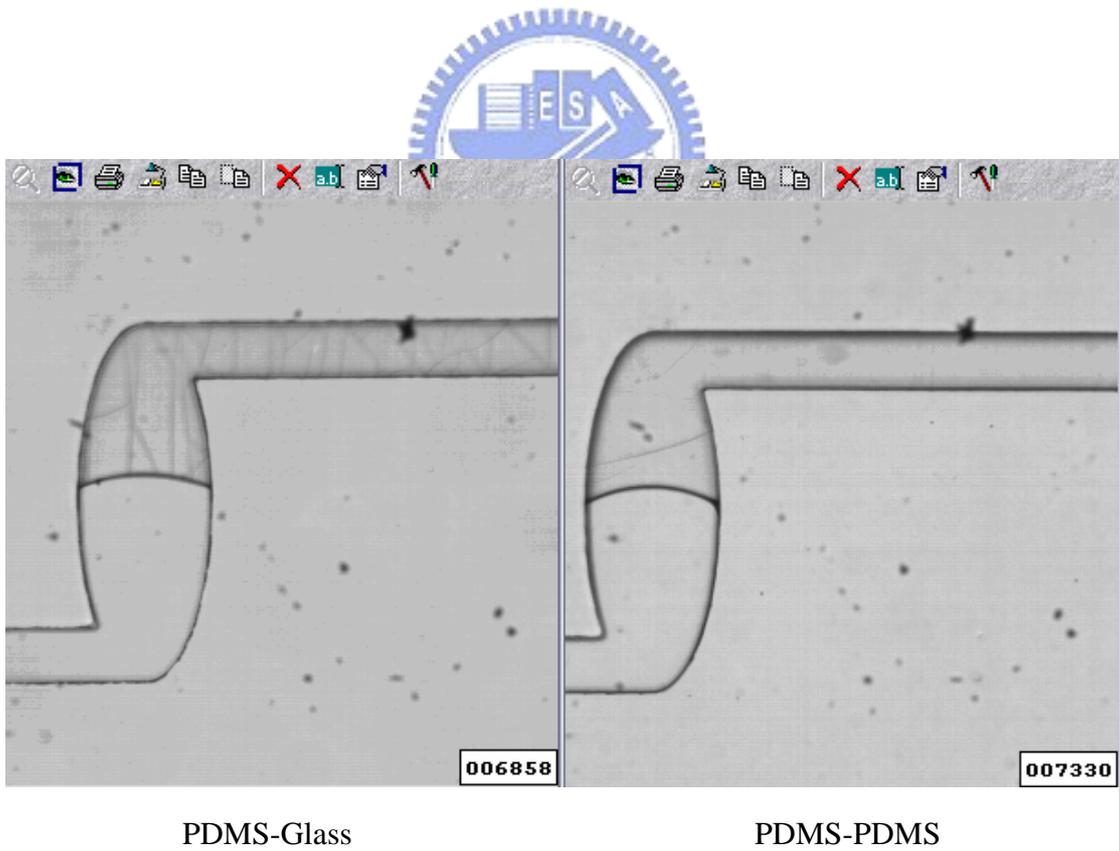


圖 4-19 微流體填充過程 PDMS-Glass、PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.001$ 、 $We_2=0.0201$ 、 $Q=0.01\text{ml/min}$

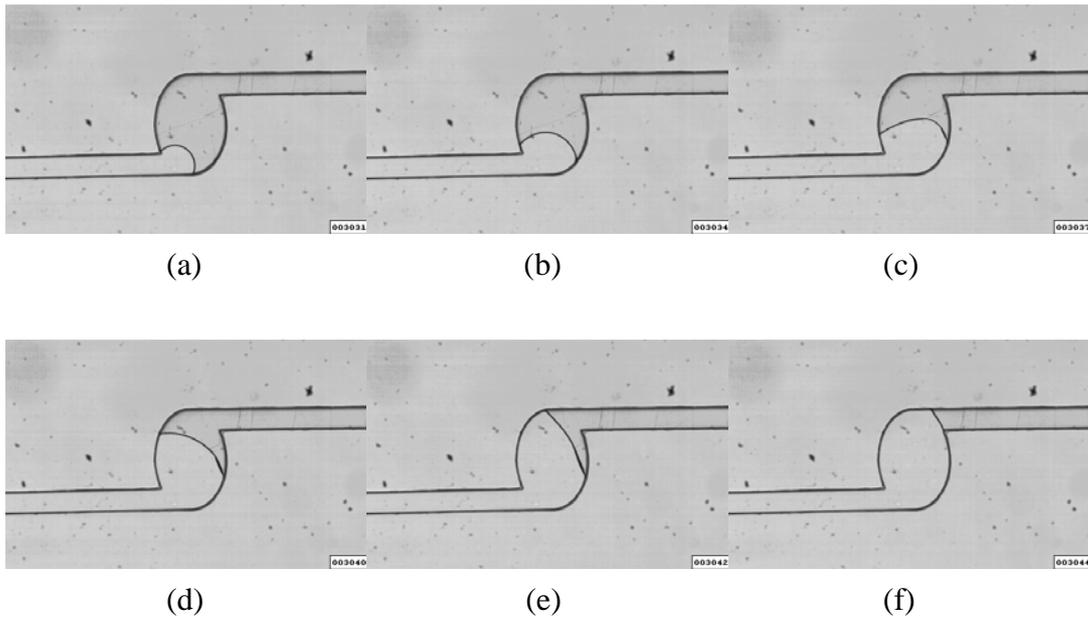


圖 4-20 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.000027$ 、 $Q=0.005\text{ml}/\text{min}$

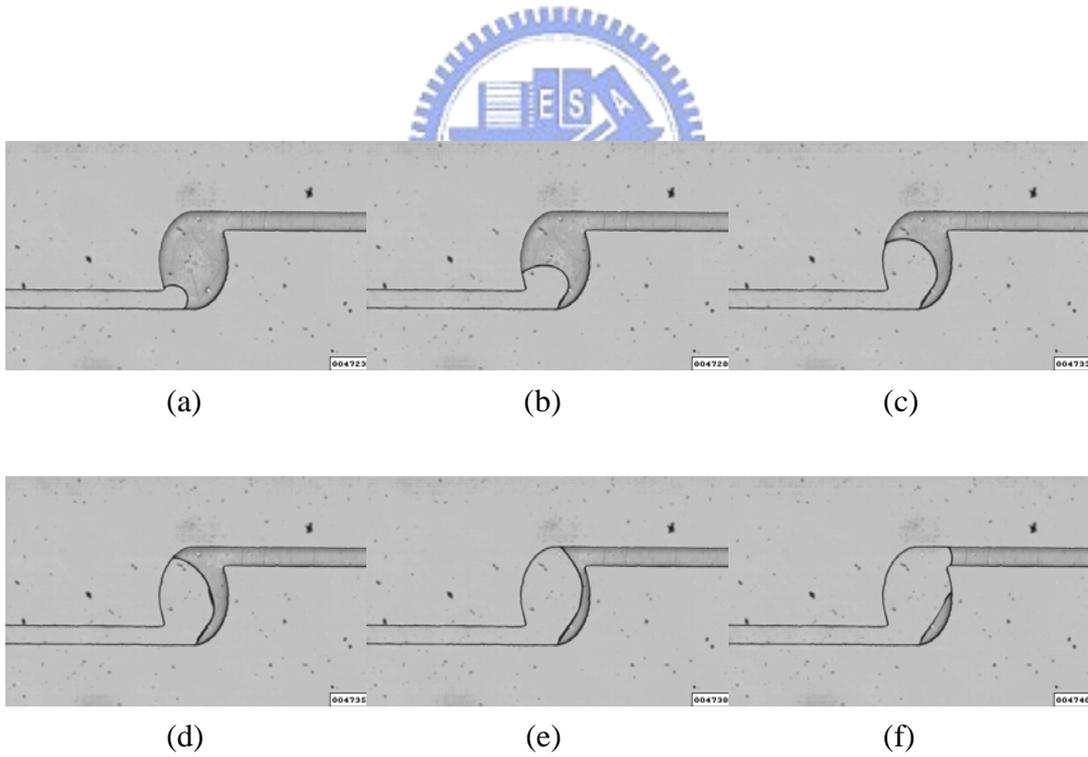


圖 4-21 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.000027$ 、 $Q=0.005\text{ml}/\text{min}$

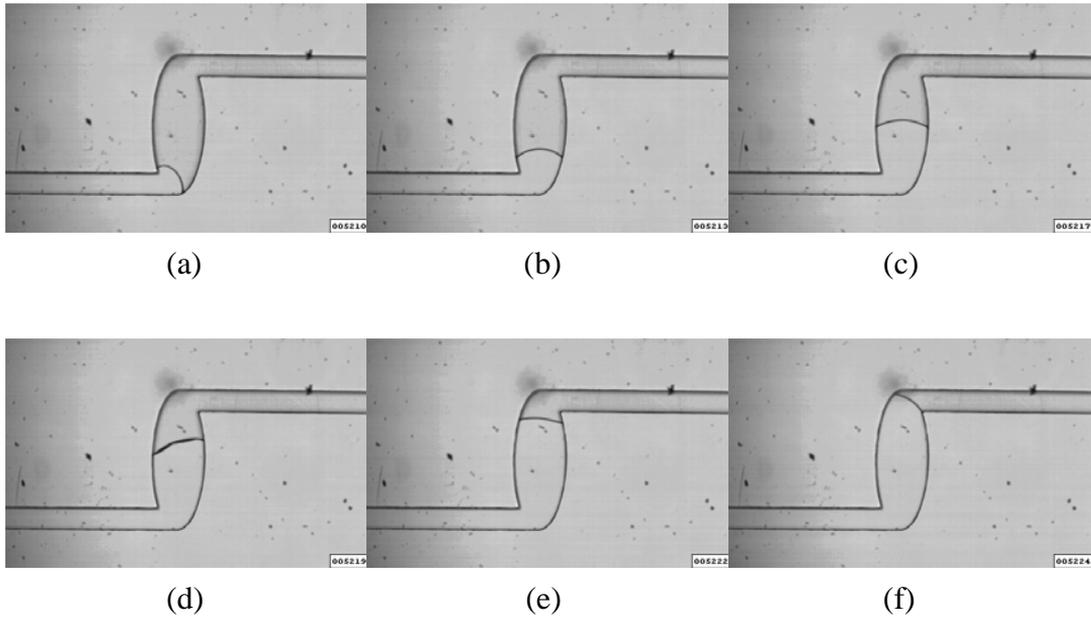


圖 4-22 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.00005$ 、 $Q=0.005\text{ml}/\text{min}$

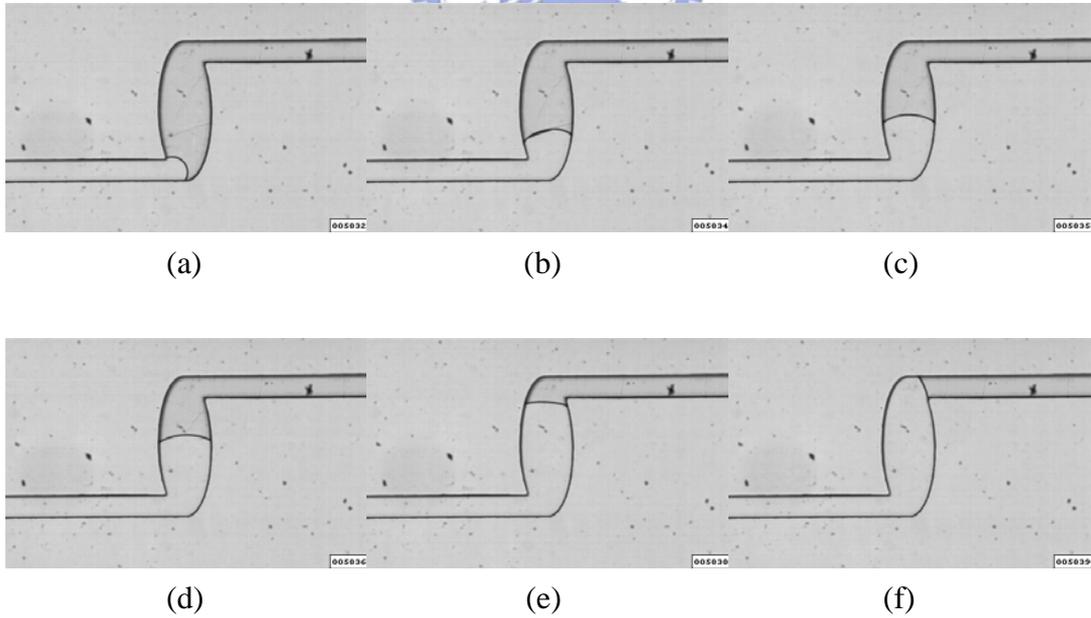


圖 4-23 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.00005$ 、 $Q=0.005\text{ml}/\text{min}$

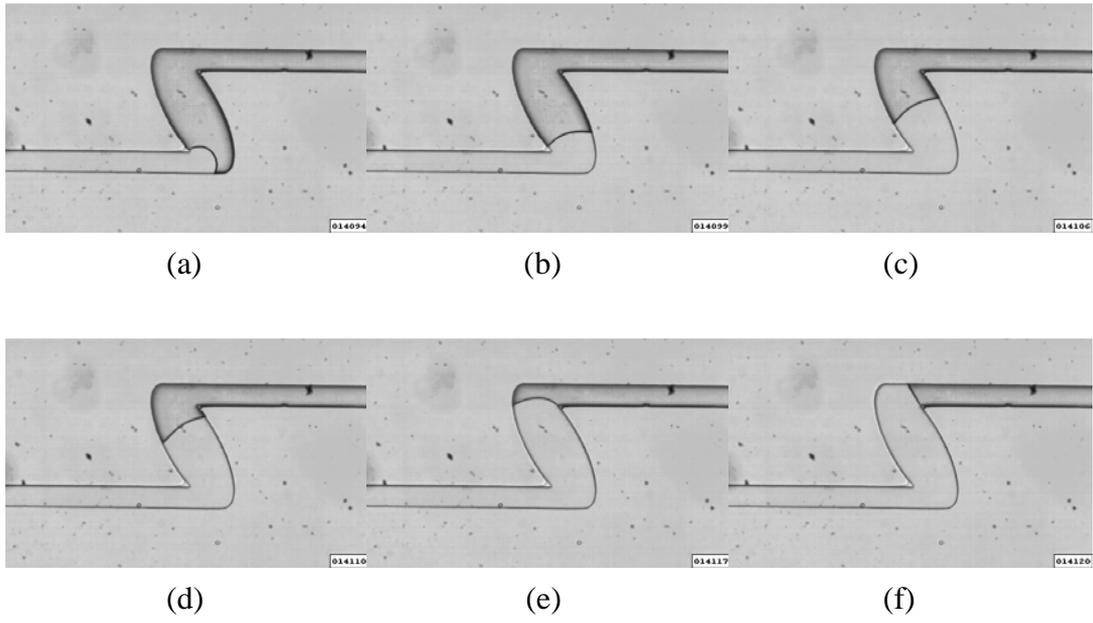


圖 4-24 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000002$ 、 $Q=0.001\text{ml/min}$

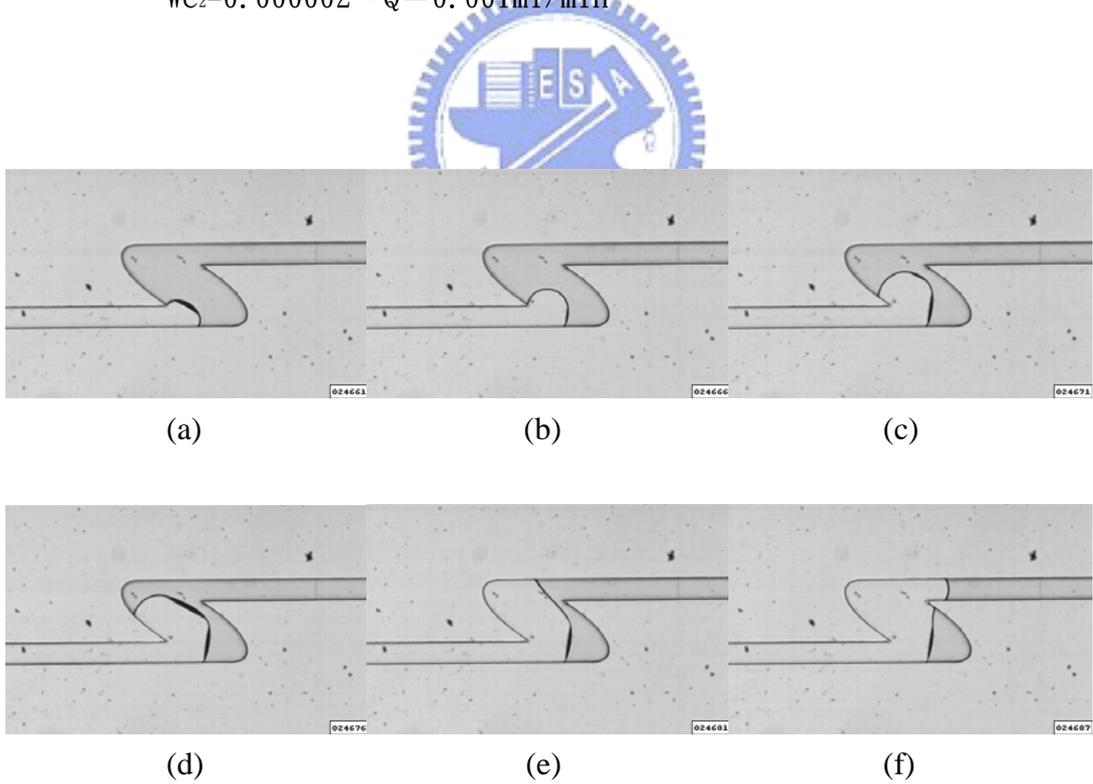


圖 4-25 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000002$ 、 $Q=0.001\text{ml/min}$

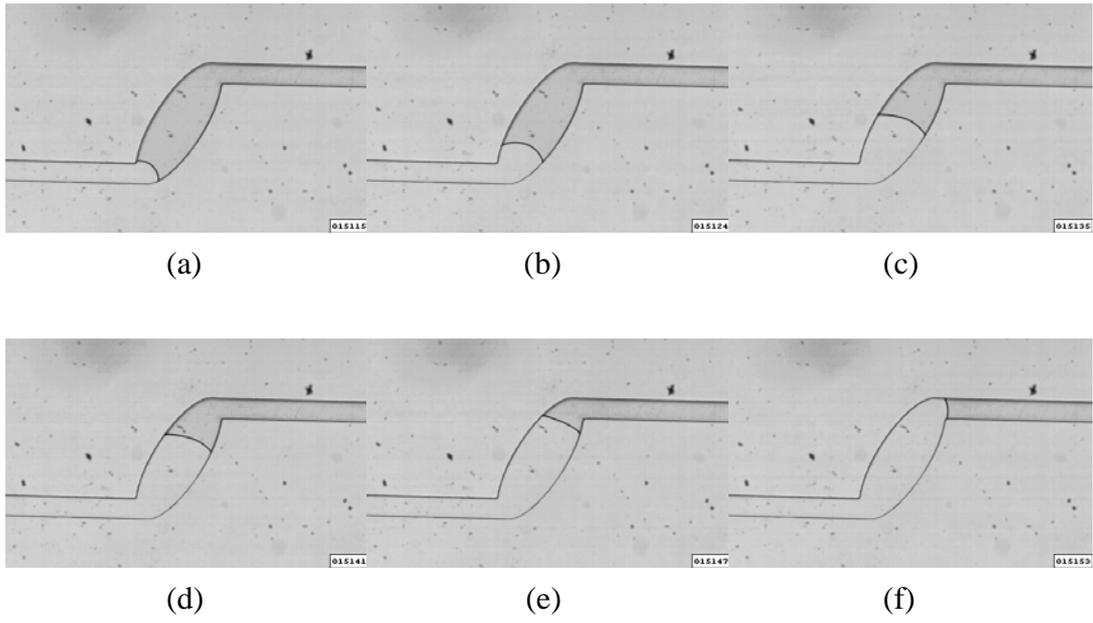


圖 4-26 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、R30、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000002$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$

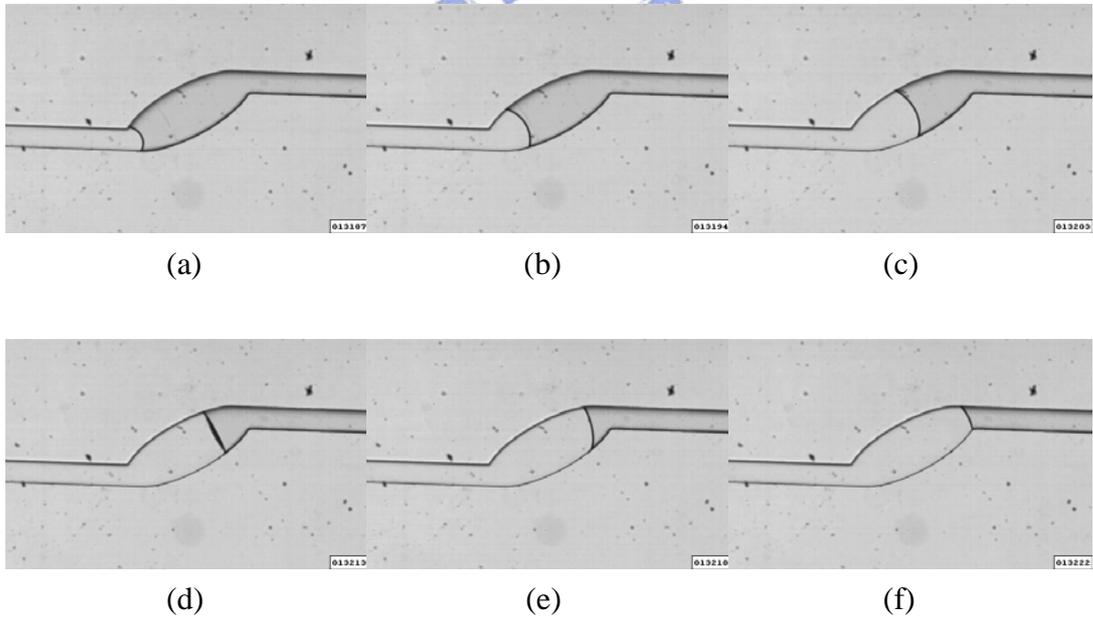


圖 4-27 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、R60、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000002$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$

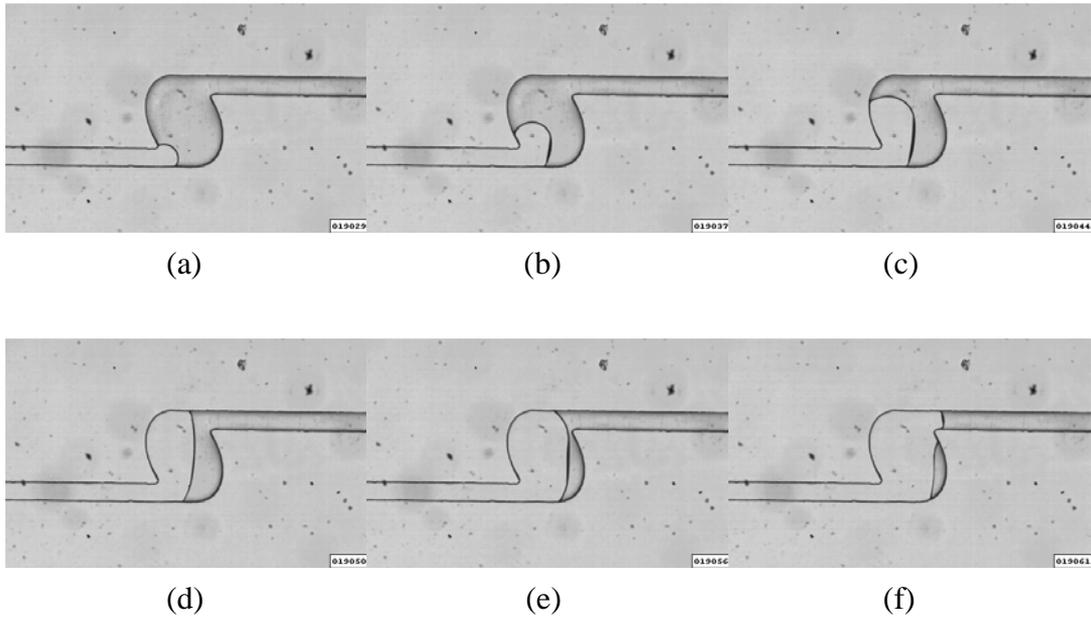


圖 4-28 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000001$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$

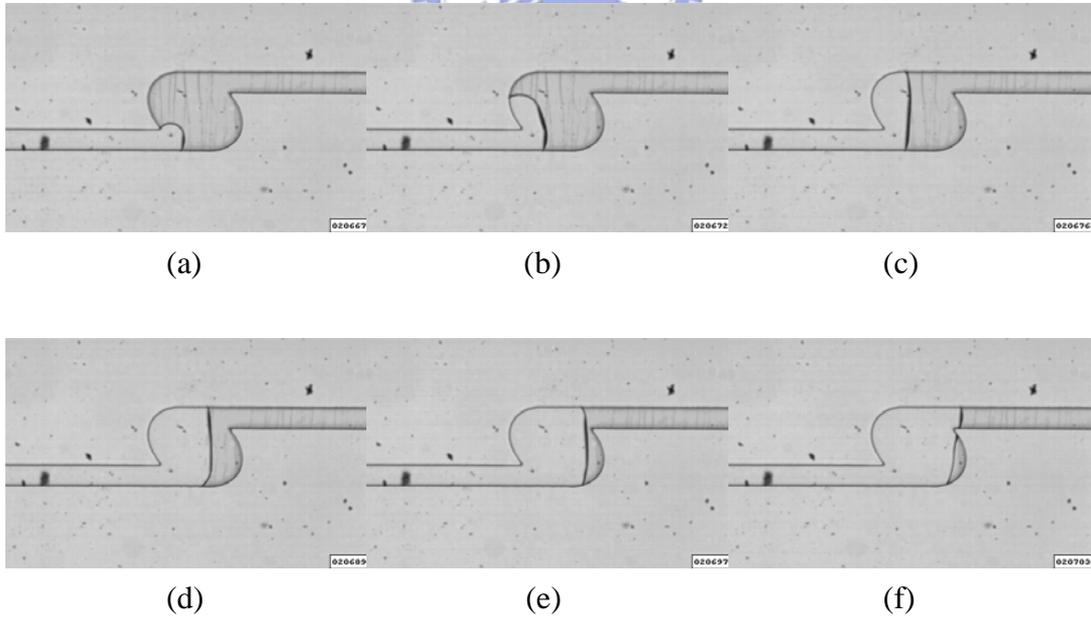


圖 4-29 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000001$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$

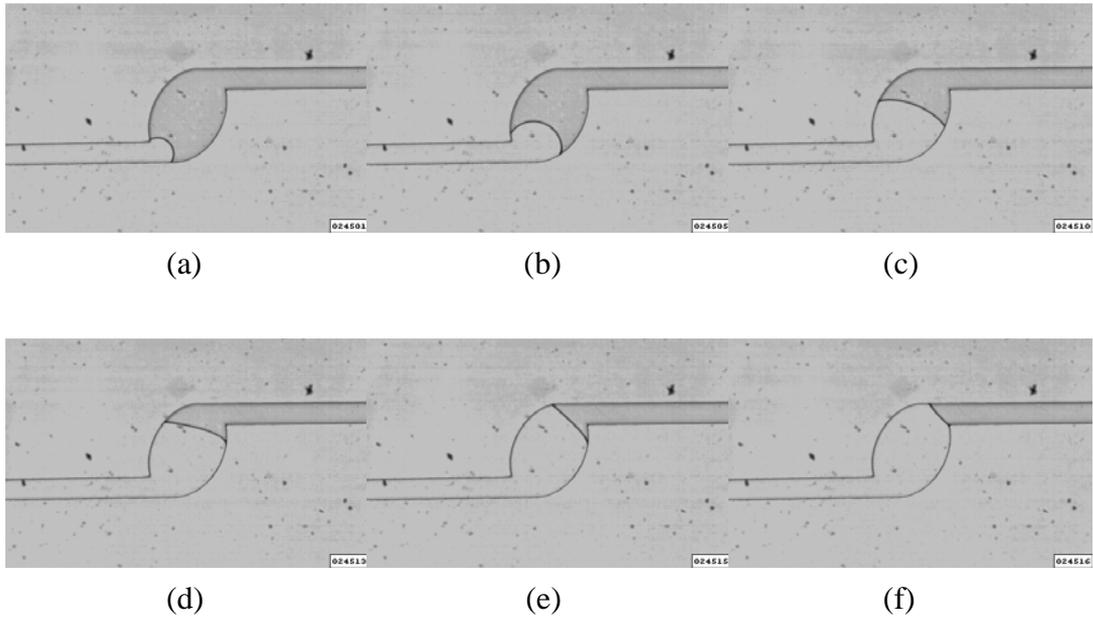


圖 4-30 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、R30、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000001$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$

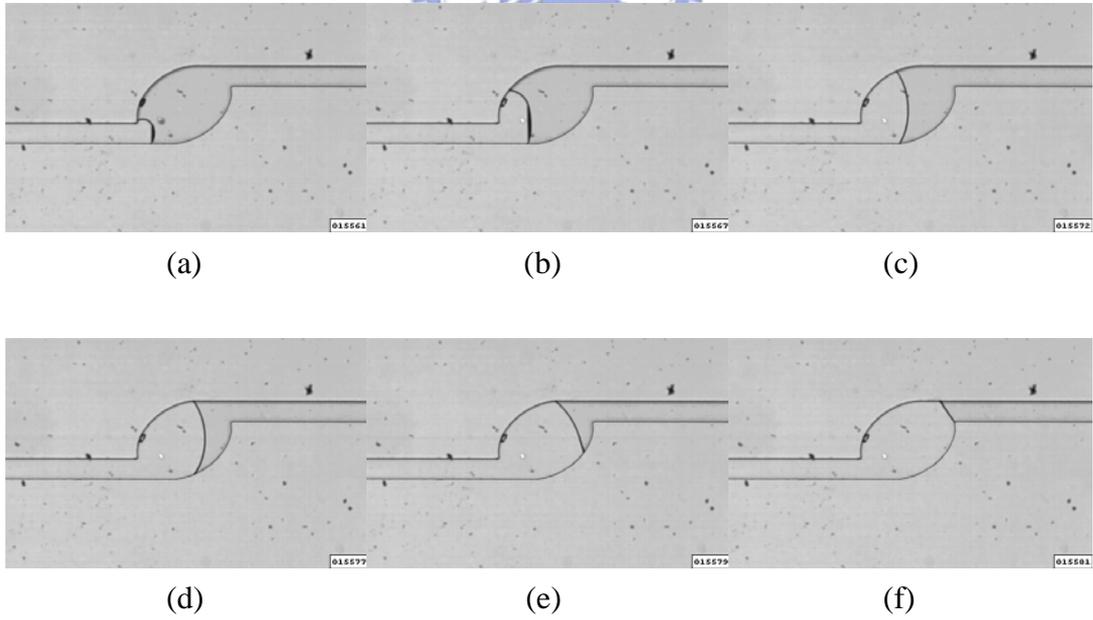


圖 4-31 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、R60、 $We_1=0.00001$ 、 $We_2=0.000001$ 、 $Q=0.001\text{ml}/\text{min}$

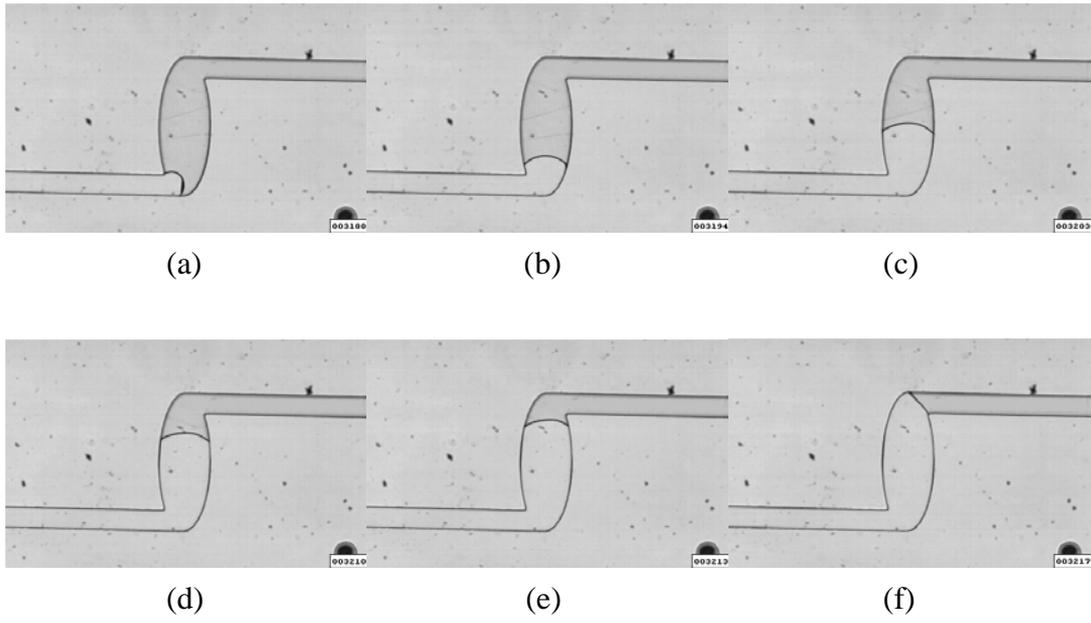


圖 4-32 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.00402$ 、 $We_2=0.00804$ 、 $Q=0.02\text{ml}/\text{min}$

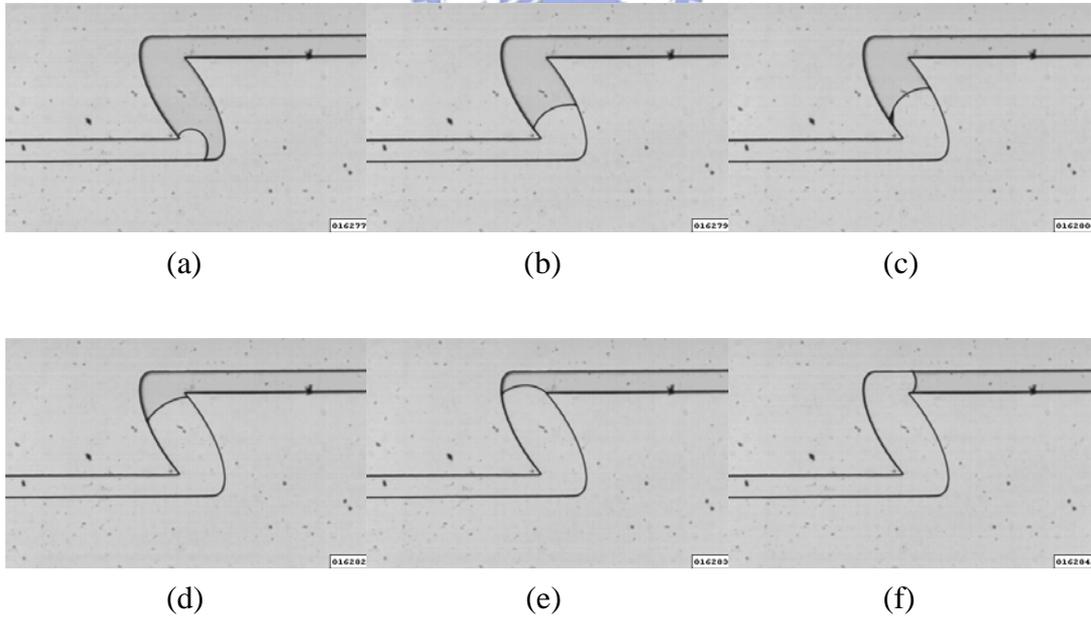


圖 4-33 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.00402$ 、 $We_2=0.00804$ 、 $Q=0.02\text{ml}/\text{min}$

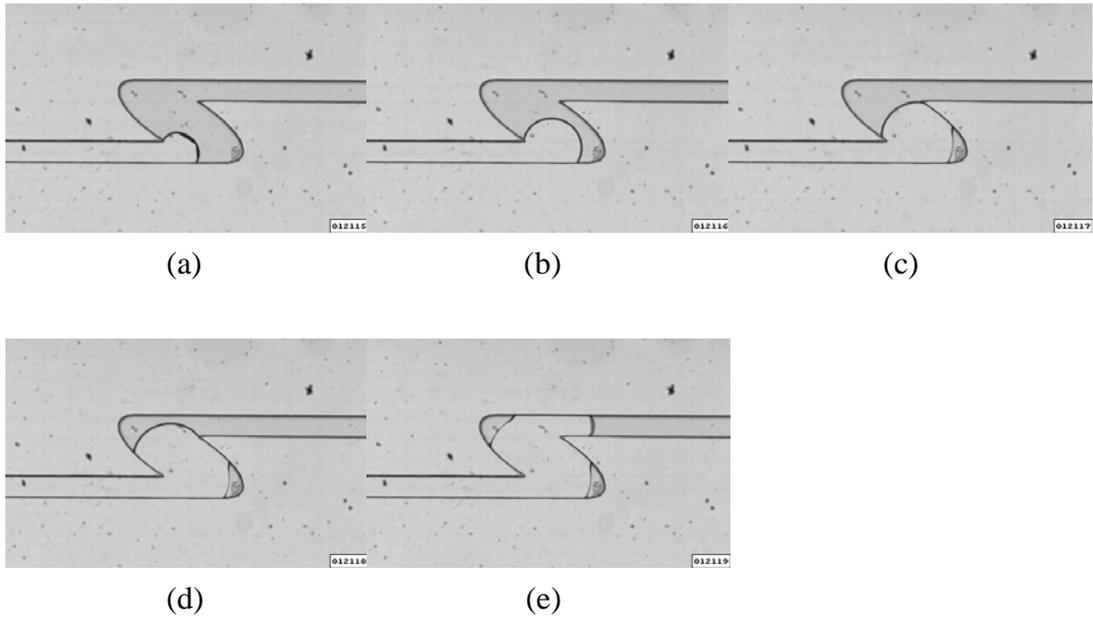


圖 4-34 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.00402$ 、 $We_2=0.00804$ 、 $Q=0.02\text{ml}/\text{min}$

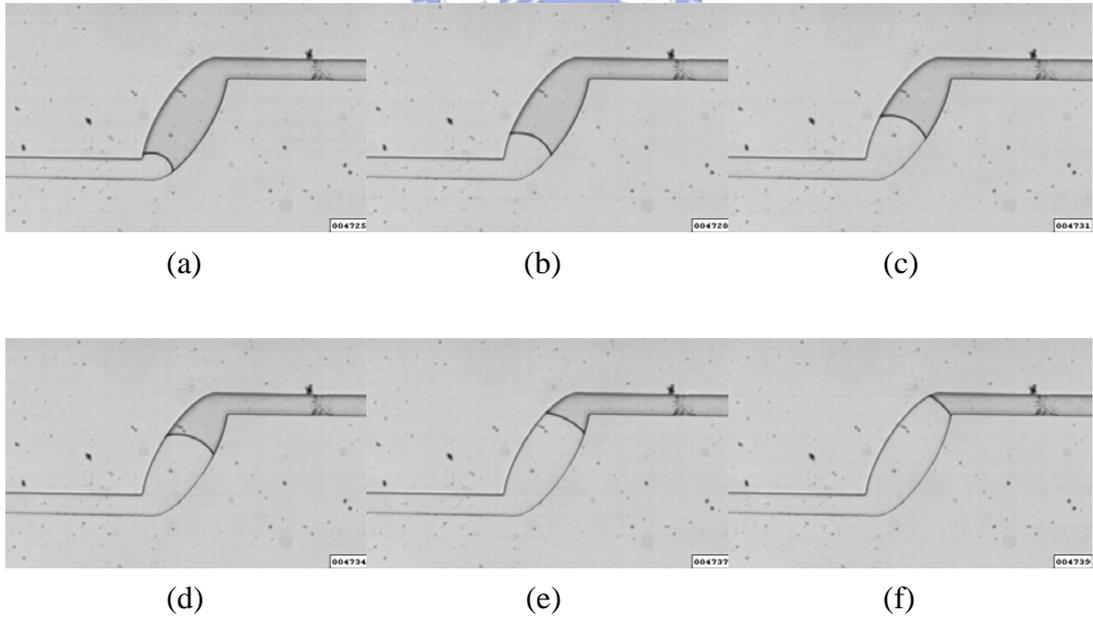


圖 4-35 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、R30、 $We_1=0.00402$ 、 $We_2=0.00804$ 、 $Q=0.02\text{ml}/\text{min}$

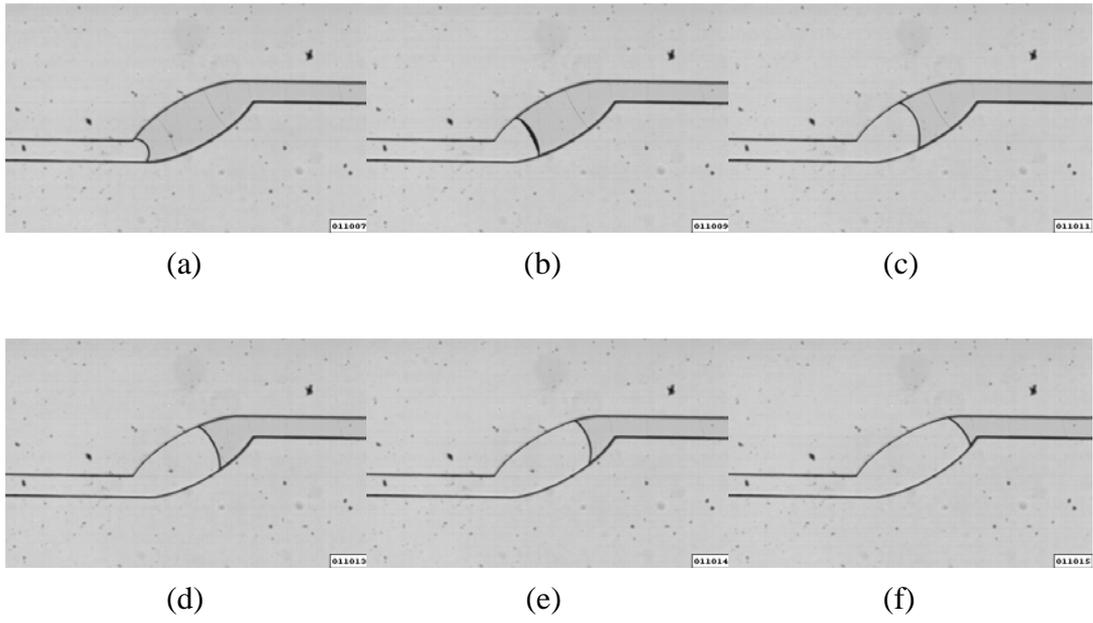


圖 4-36 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、R60、 $We_1=0.00402$ 、 $We_2=0.00804$ 、 $Q=0.02\text{ml}/\text{min}$

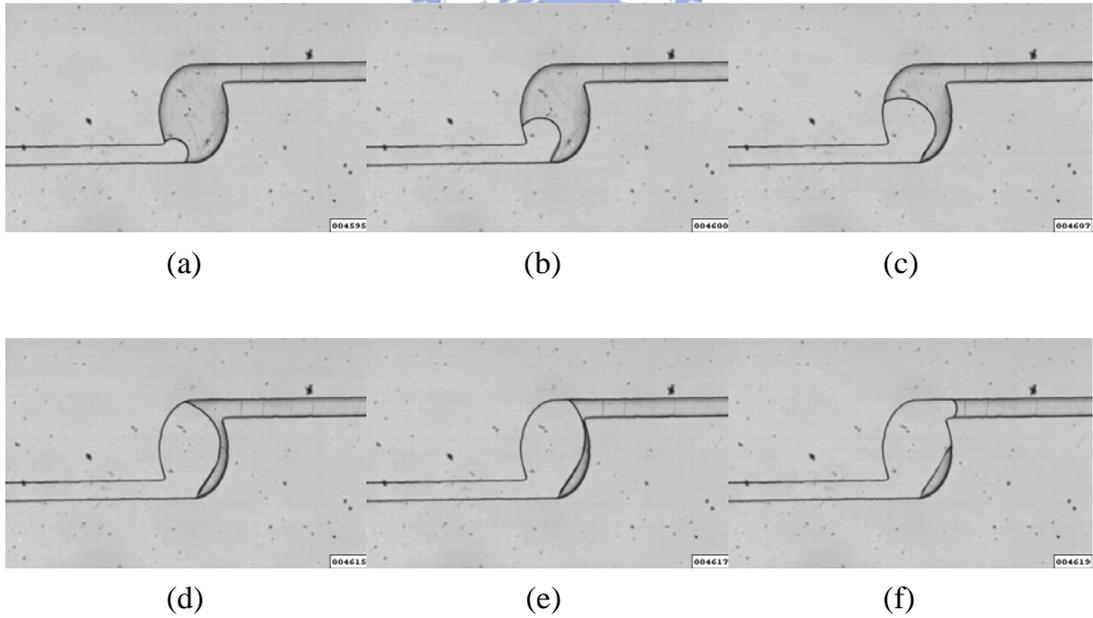


圖 4-37 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.00402$ 、 $We_2=0.000431$ 、 $Q=0.02\text{ml}/\text{min}$

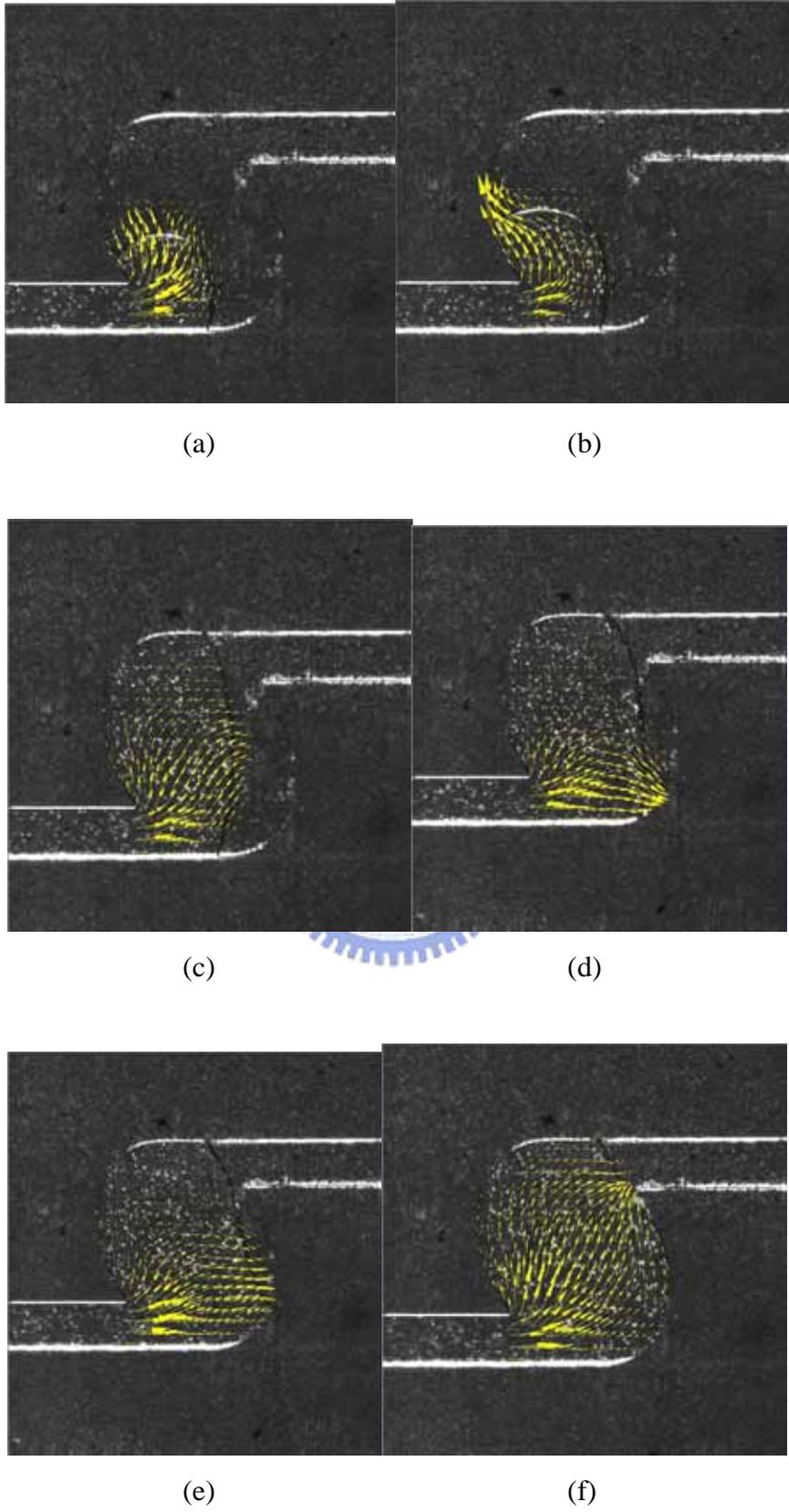


圖 4-38 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.00402$ 、 $We_2=0.000431$ 、 $Q=0.02\text{ml}/\text{min}$

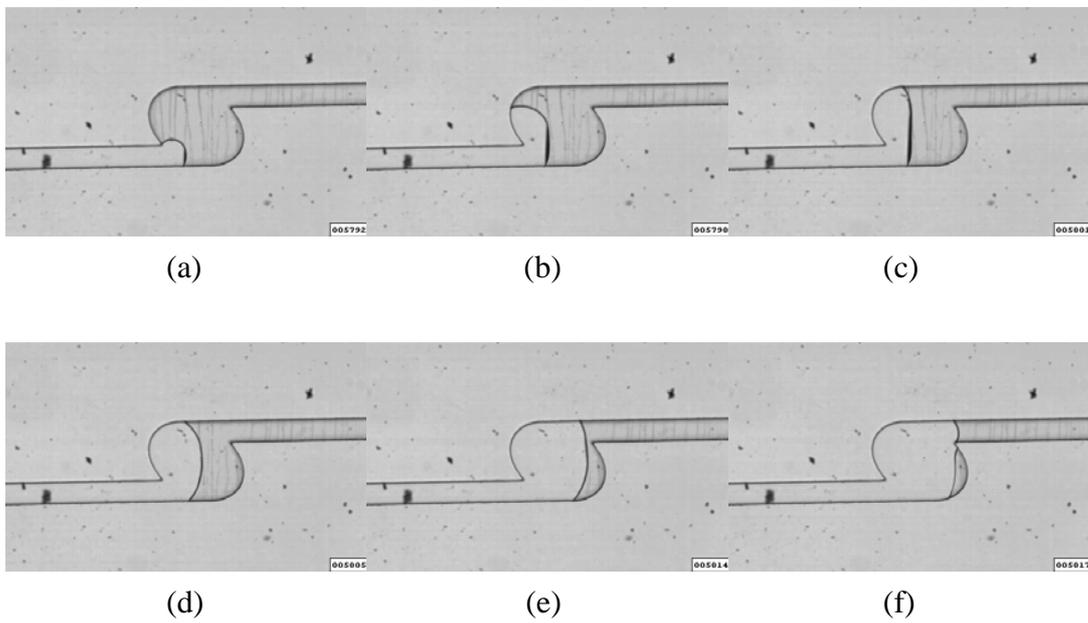


圖 4-39 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.00402$ 、 $We_2=0.000431$ 、 $Q=0.02\text{ml}/\text{min}$

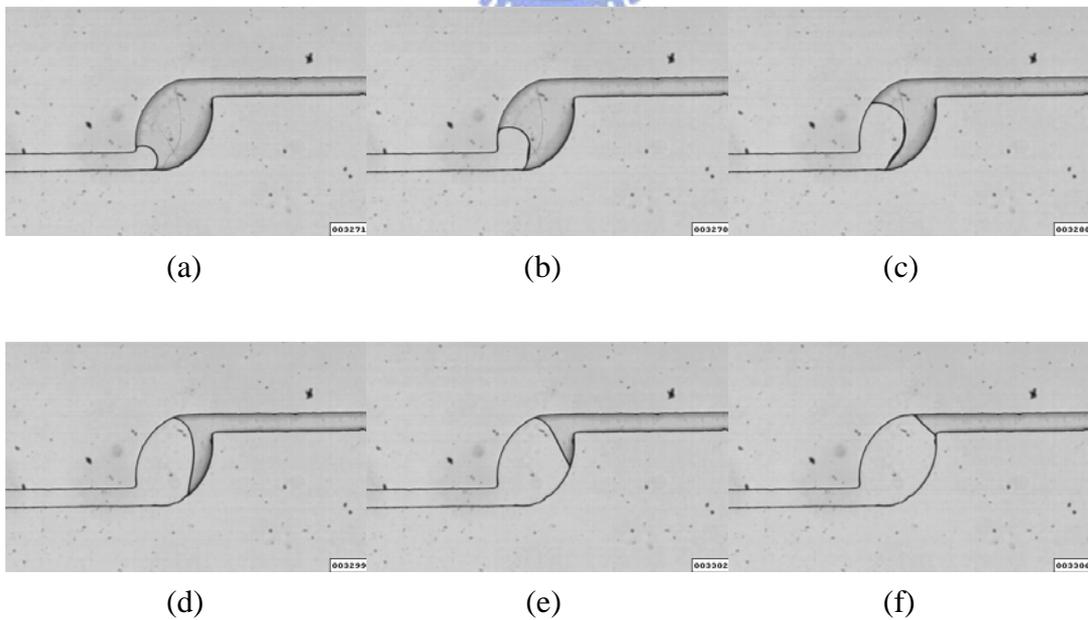


圖 4-40 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、R30、 $We_1=0.00402$ 、 $We_2=0.000431$ 、 $Q=0.02\text{ml}/\text{min}$

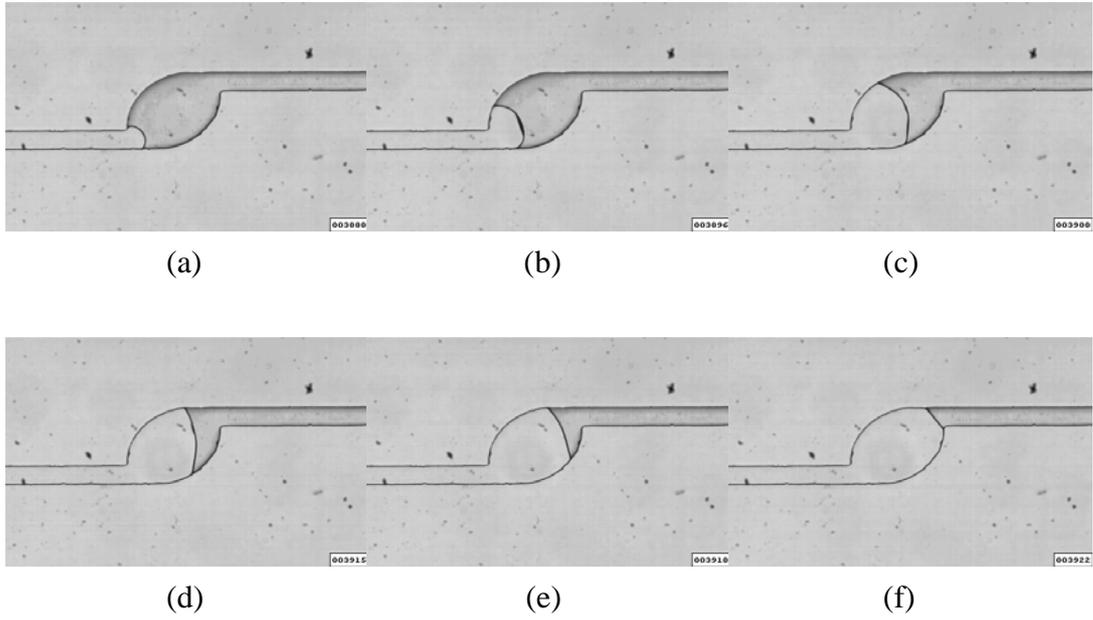


圖 4-41 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、R60、 $We_1=0.00402$ 、 $We_2=0.000431$ 、 $Q=0.02\text{ml}/\text{min}$



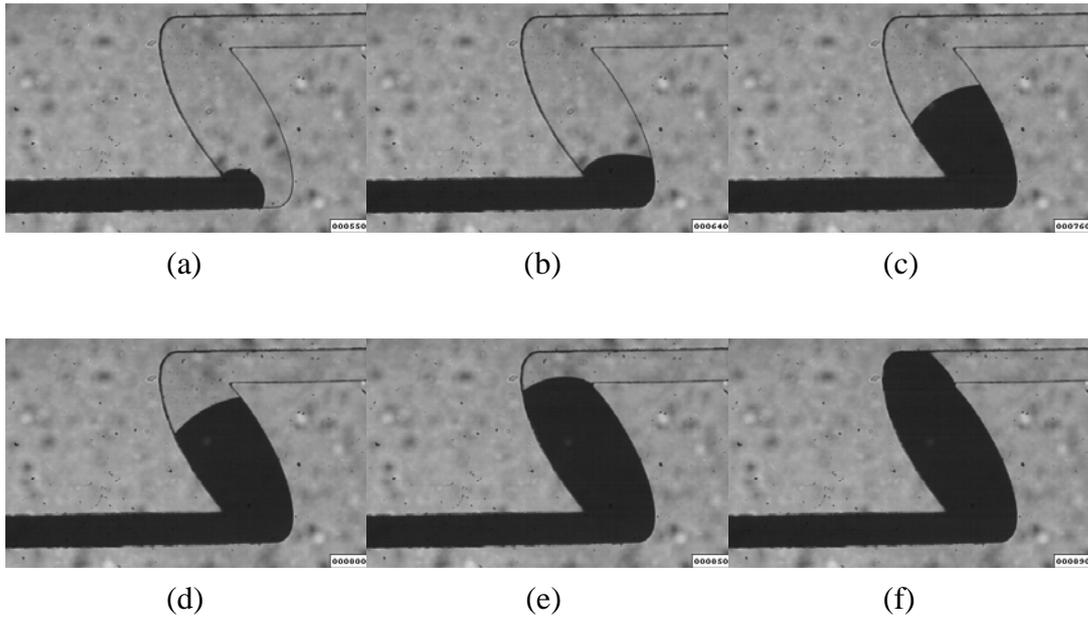


圖 4-42 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.00005$ 、 $Q=0.005\text{ml}/\text{min}$

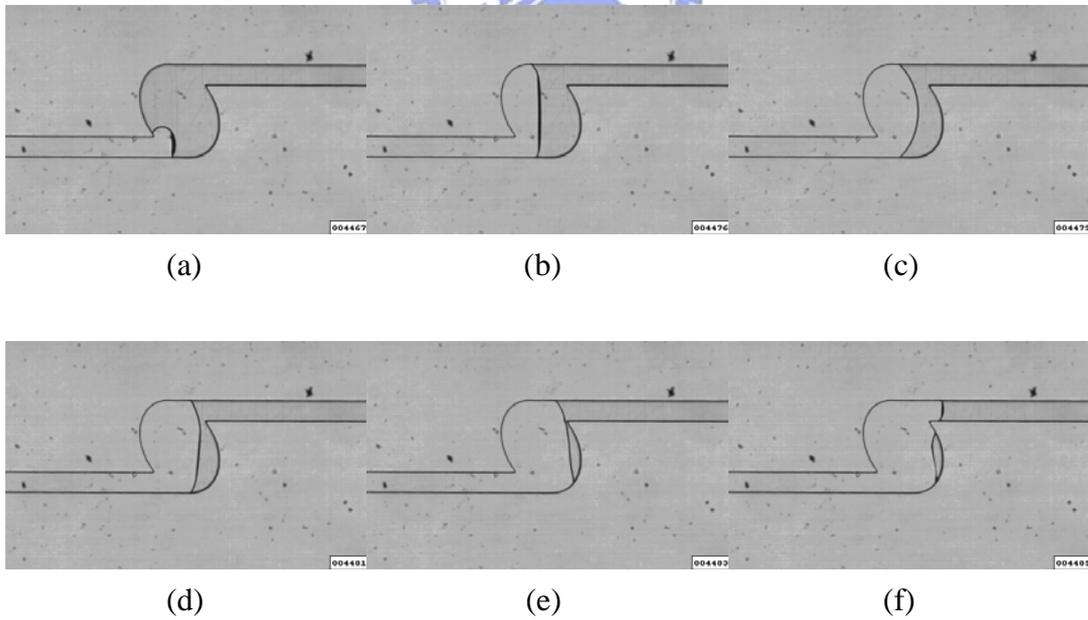
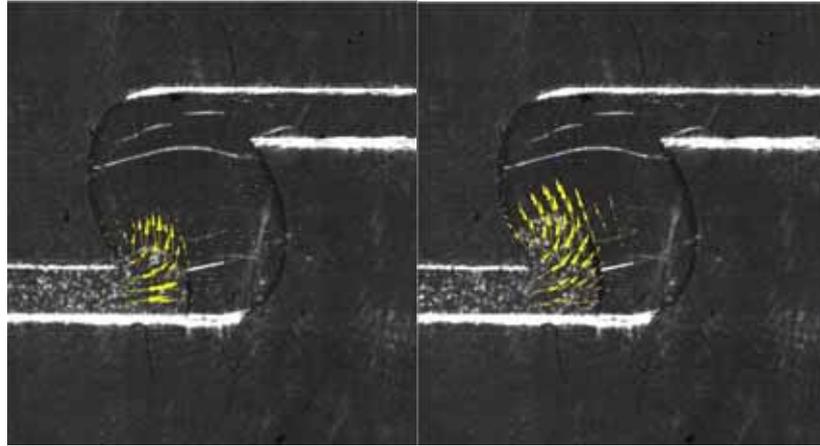
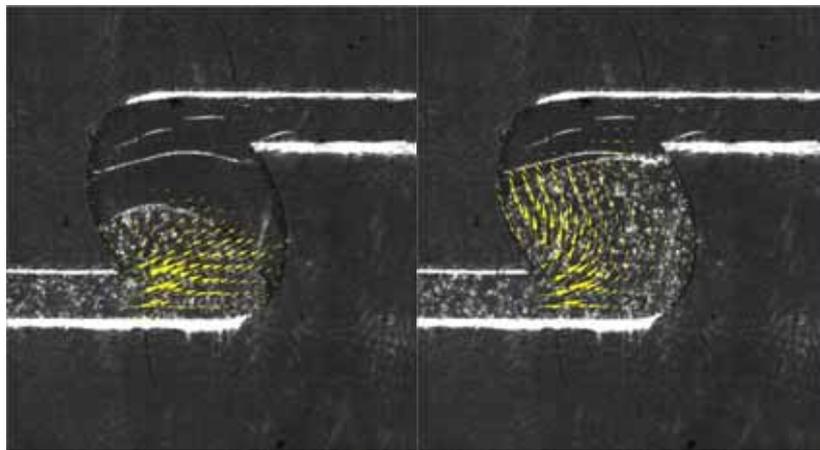


圖 4-43 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.000027$ 、 $Q=0.005\text{ml}/\text{min}$



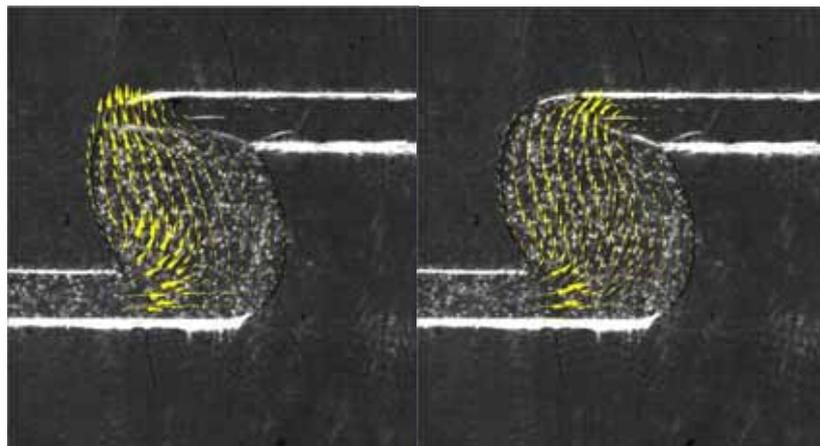
(a)

(b)



(c)

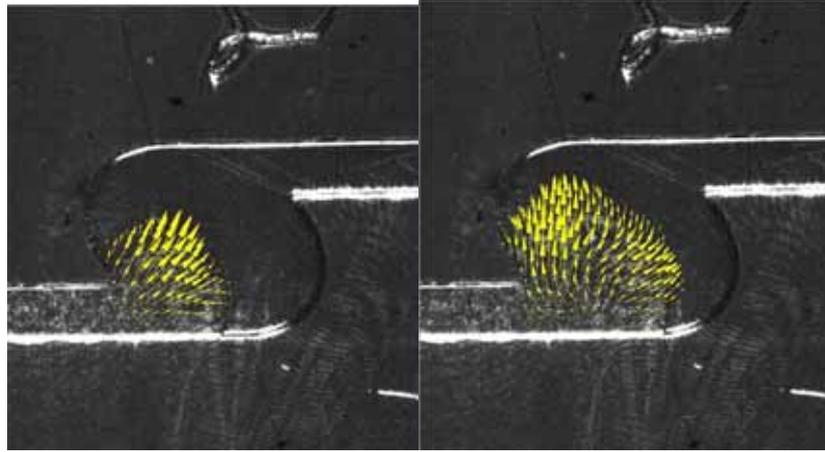
(d)



(e)

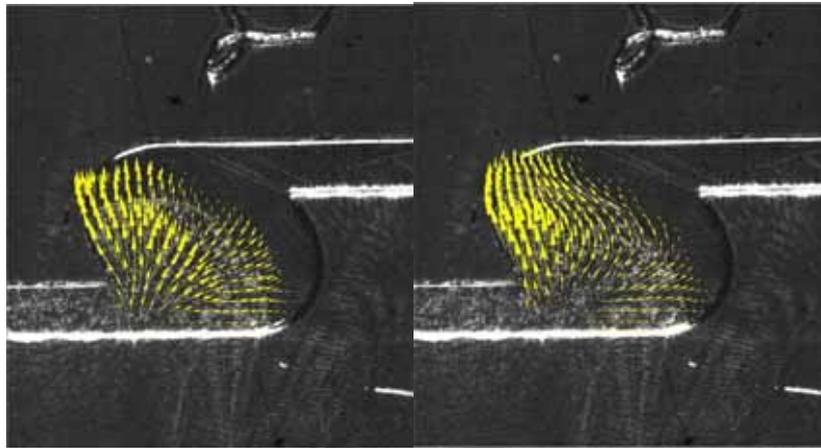
(f)

圖 4-44 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.000027$ 、 $Q=0.005\text{ml/min}$



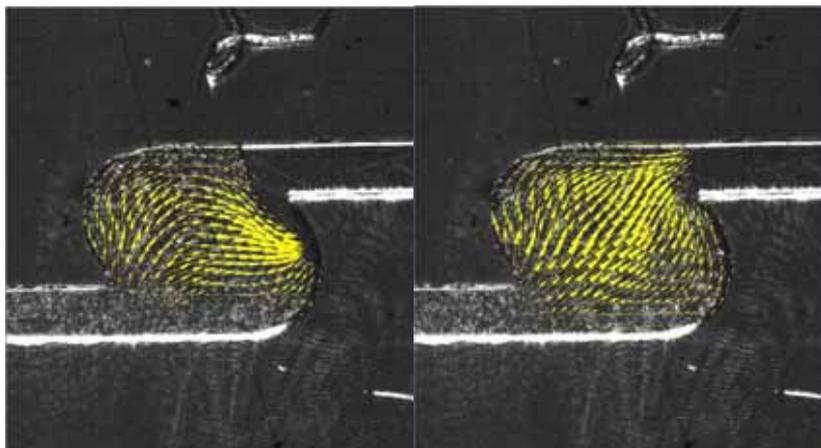
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

圖 4-45 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m} \times 350\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.000027$ 、 $Q=0.005\text{ml/min}$

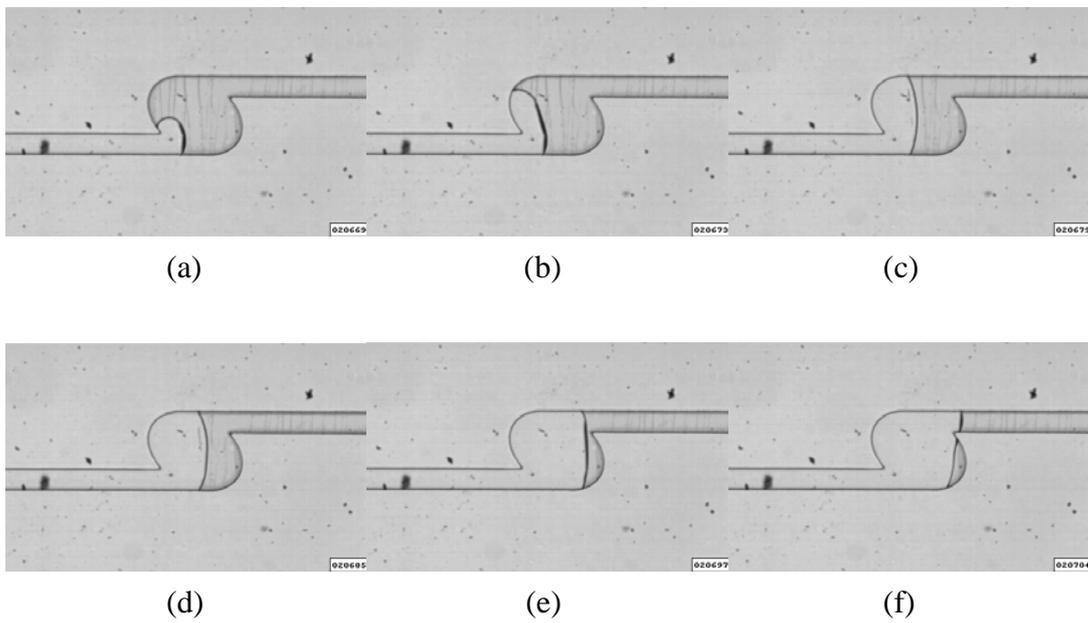


圖 4-46 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.000027$ 、 $Q=0.005\text{ml}/\text{min}$

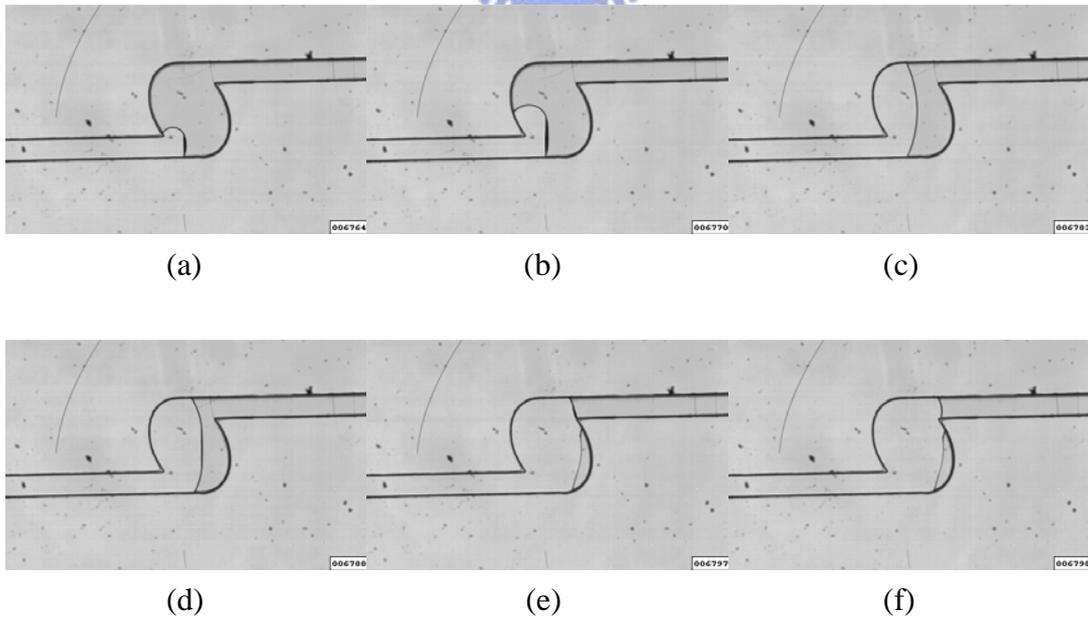


圖 4-47 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.001005$ 、 $We_2=0.000108$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$

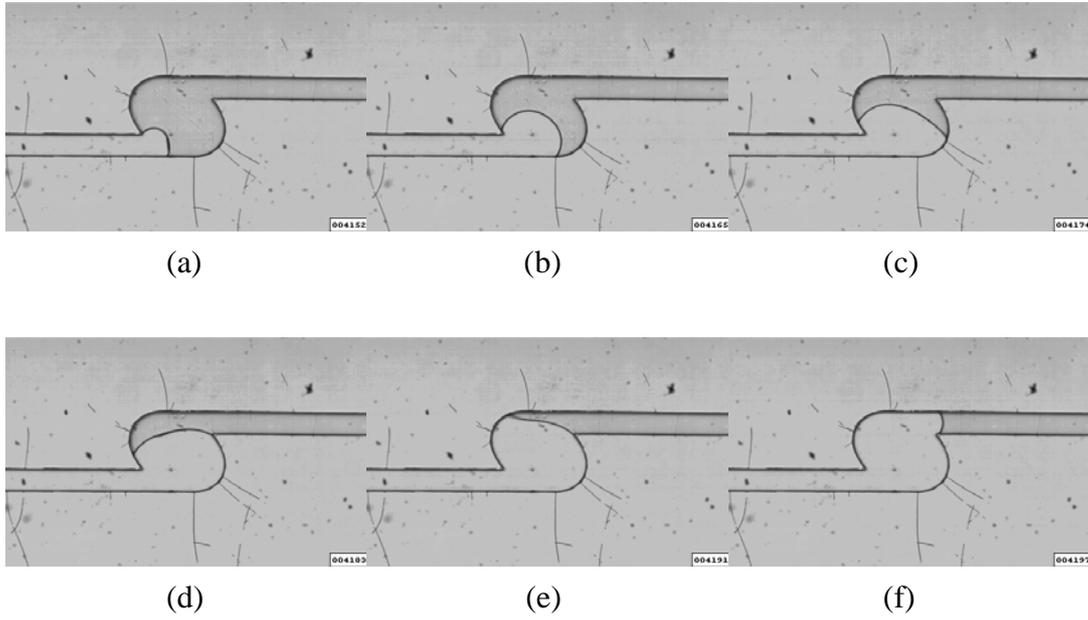


圖 4-48 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\mu\text{m}\times 350\mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.001005$ 、 $We_2=0.000108$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$

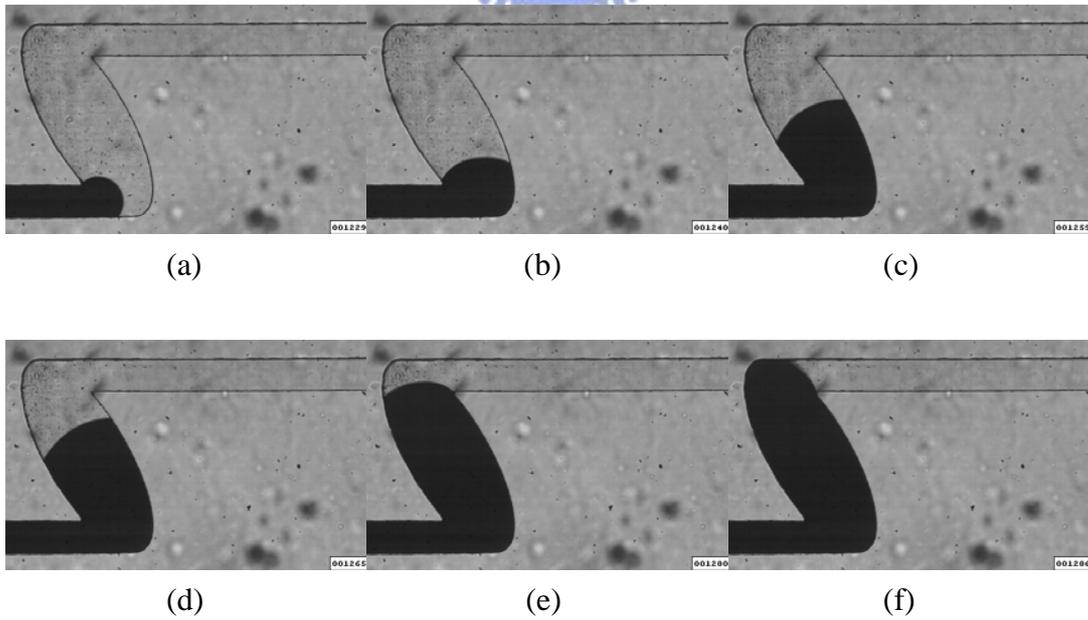


圖 4-49 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\mu\text{m}\times 250\mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.001005$ 、 $We_2=0.000201$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$

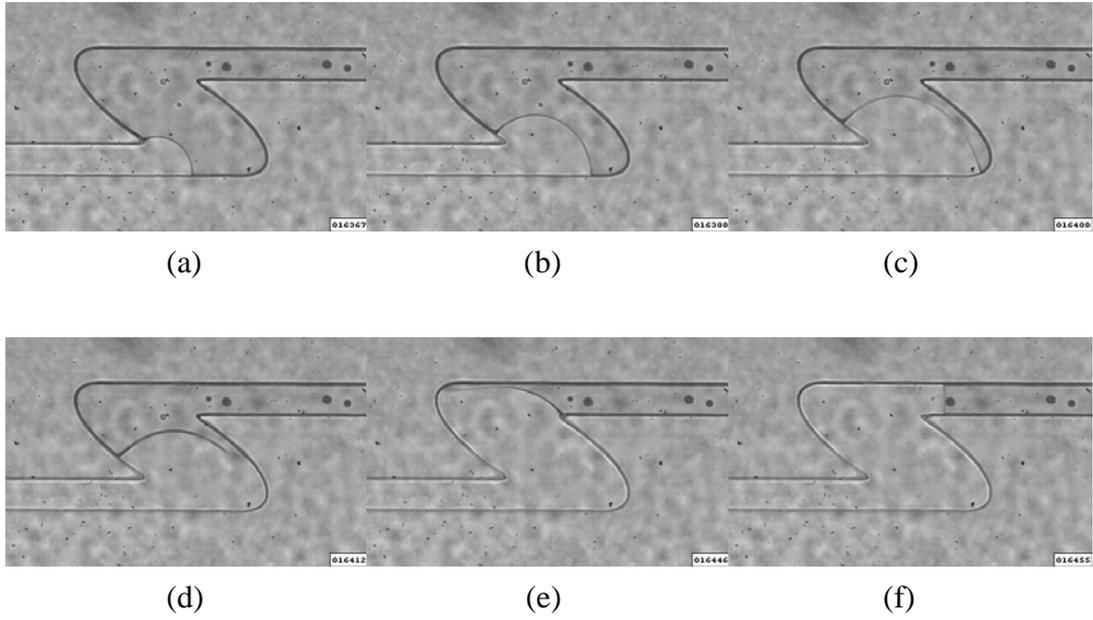
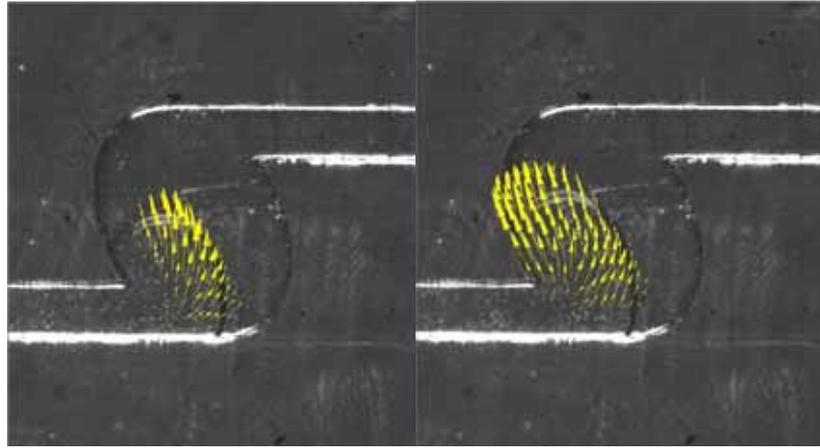


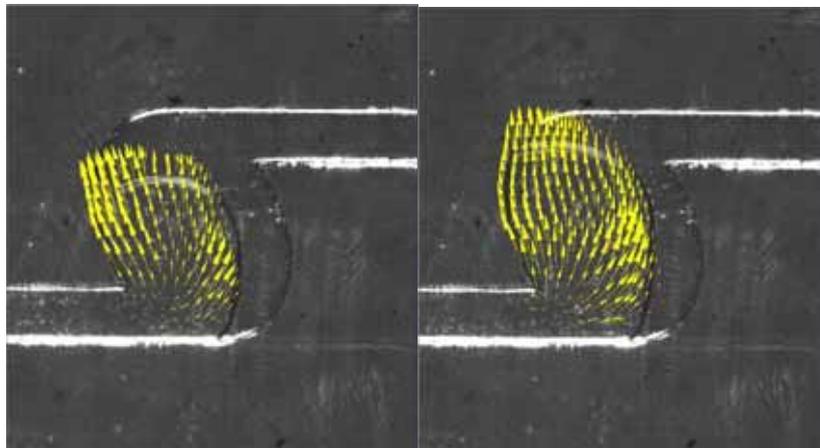
圖 4-50 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\mu\text{m}\times 250\mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.001005$ 、 $We_2=0.000201$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$





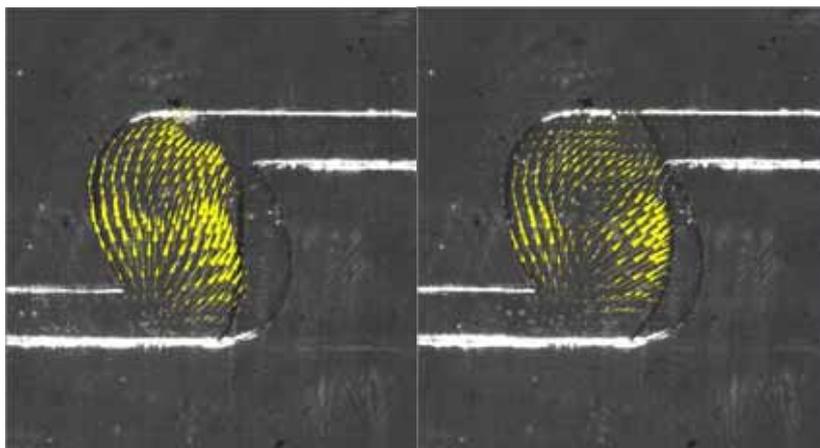
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

圖 4-51 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m} \times 350\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=10.046$ 、 $We_2=1.076$ 、 $Q=1\text{ml/min}$

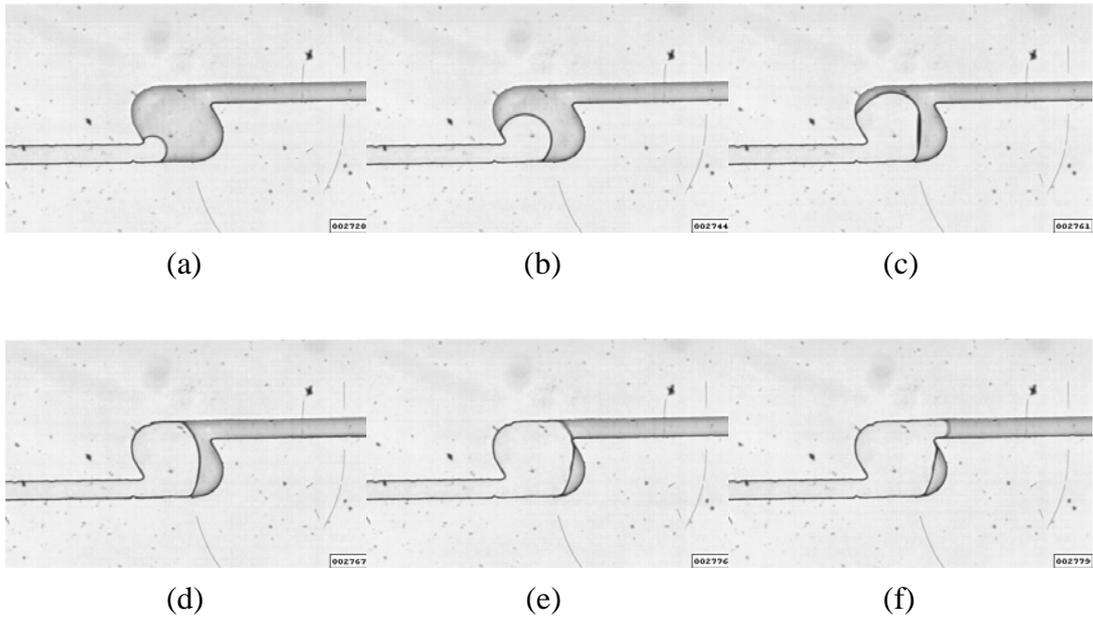


圖 4-52 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m} \times 350\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=10.046$ 、 $We_2=1.076$ 、 $Q=1\text{ml/min}$

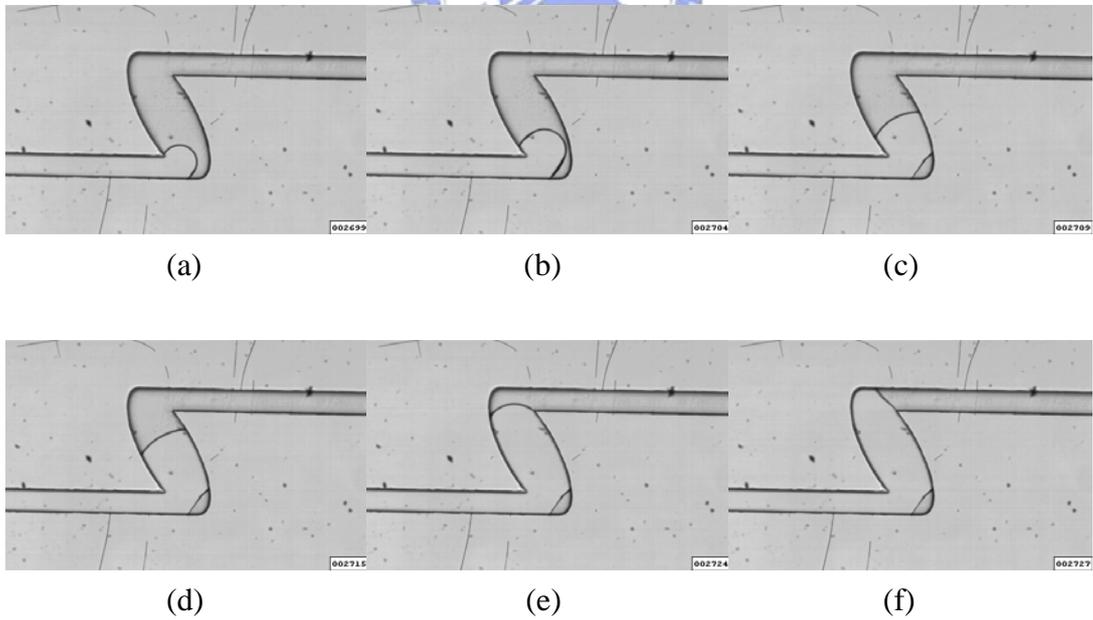


圖 4-53 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=10.046$ 、 $We_2=2.01$ 、 $Q=1\text{ml/min}$

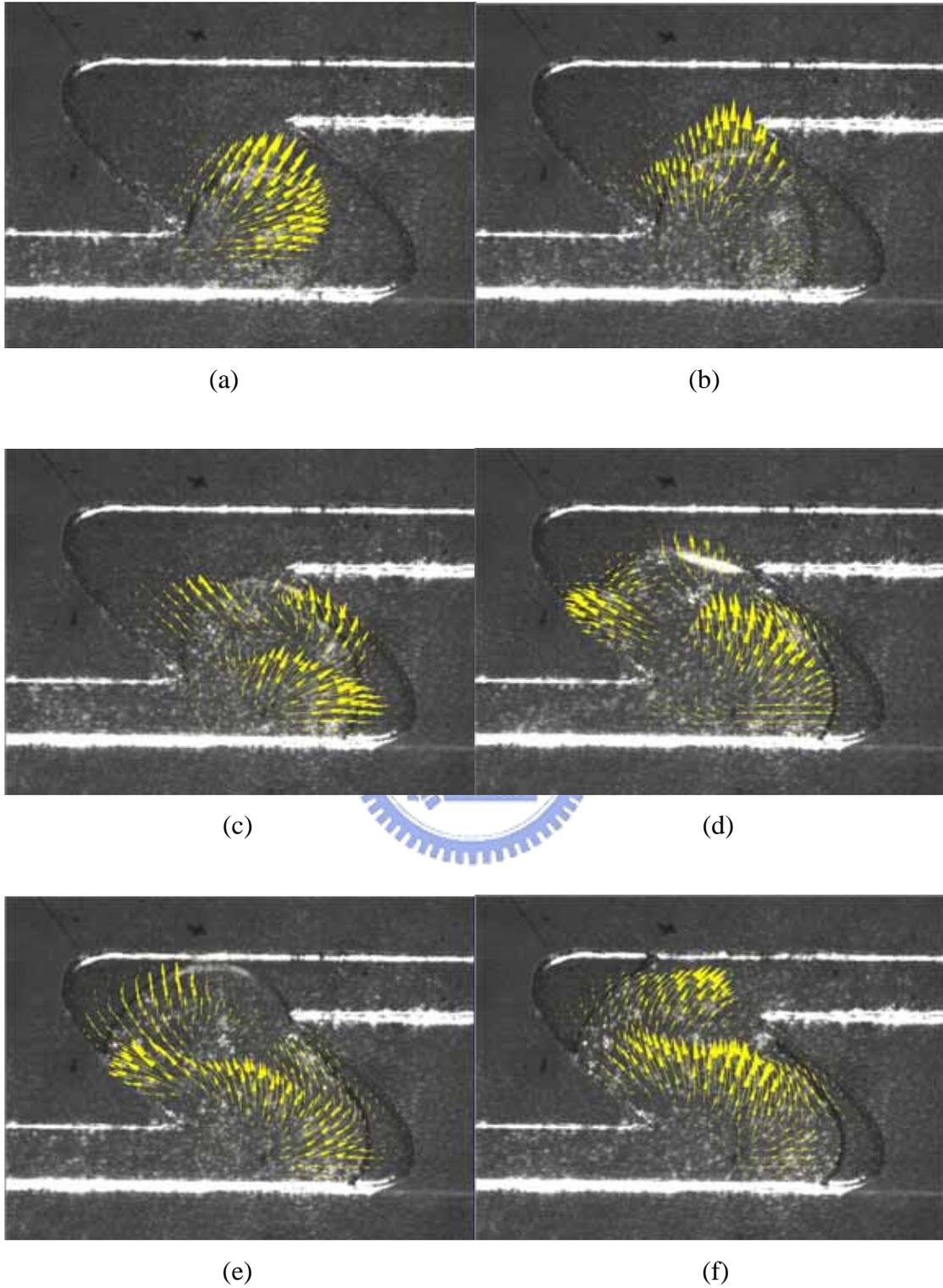


圖 4-54 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=10.046$ 、 $We_2=2.01$ 、 $Q=1\text{ml/min}$

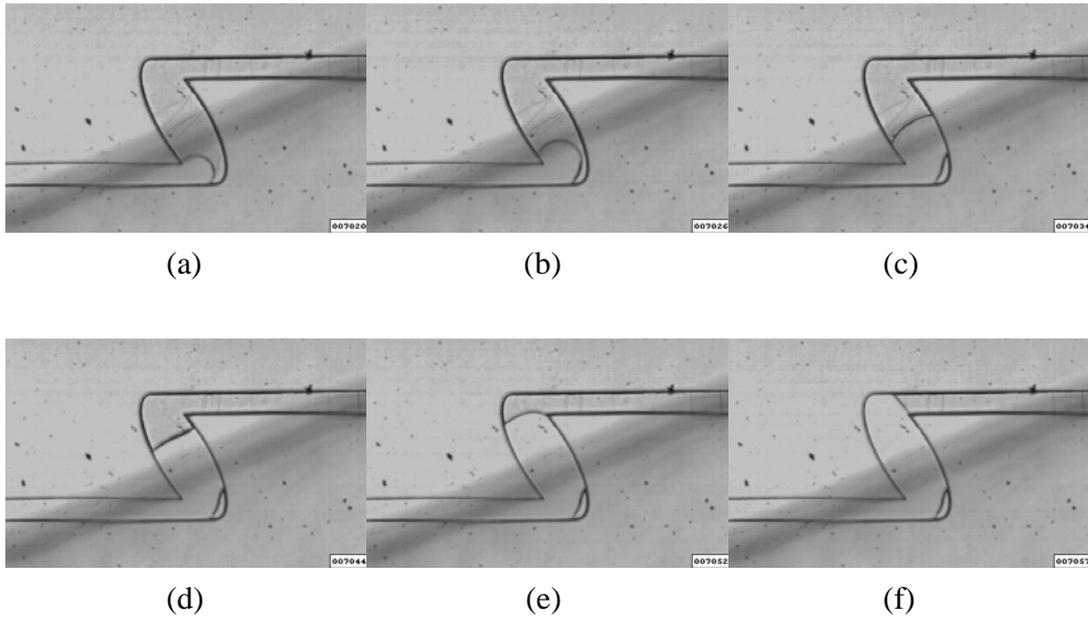
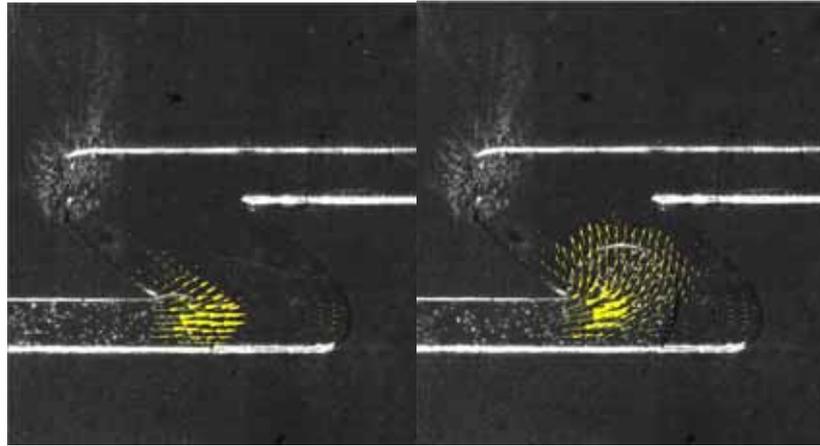


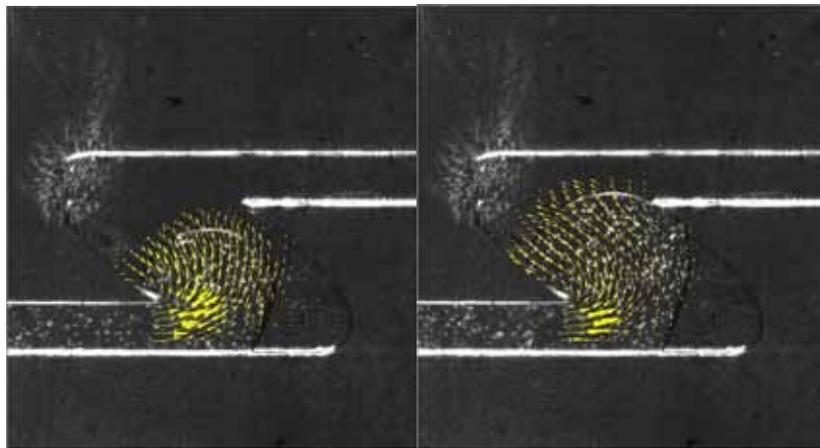
圖 4-55 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.001$ 、 $We_2=0.0002$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$





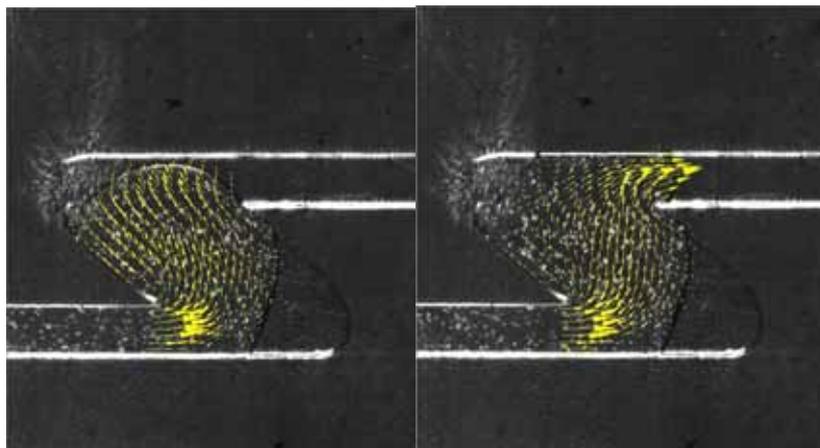
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

圖 4-56 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.001$ 、 $We_2=0.0002$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$

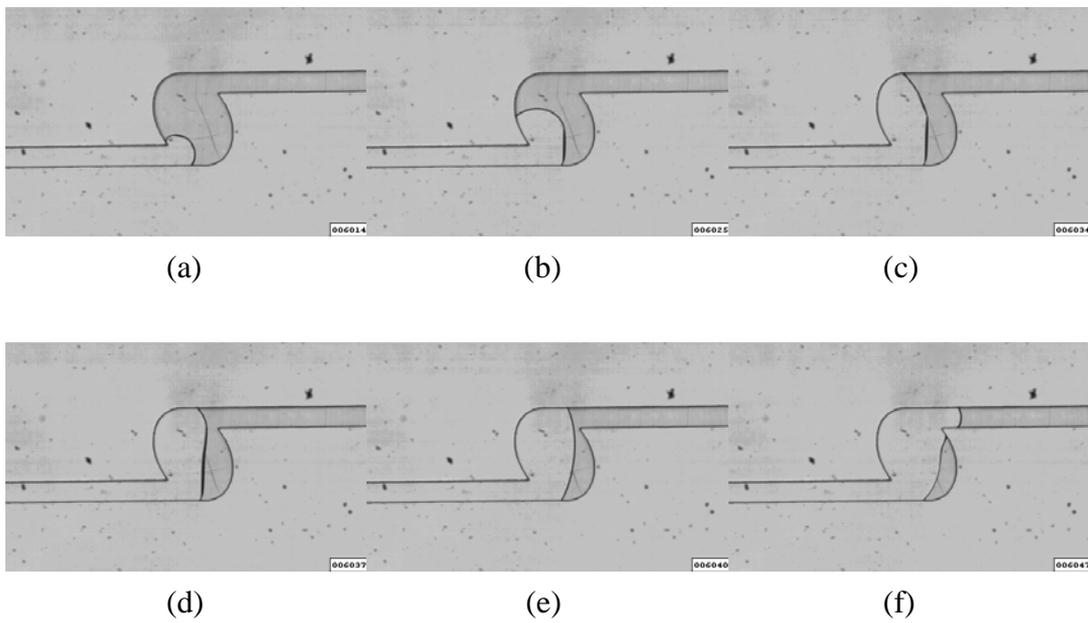


圖 4-57 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\mu\text{m}\times 350\mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.001$ 、 $We_2=0.000108$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$

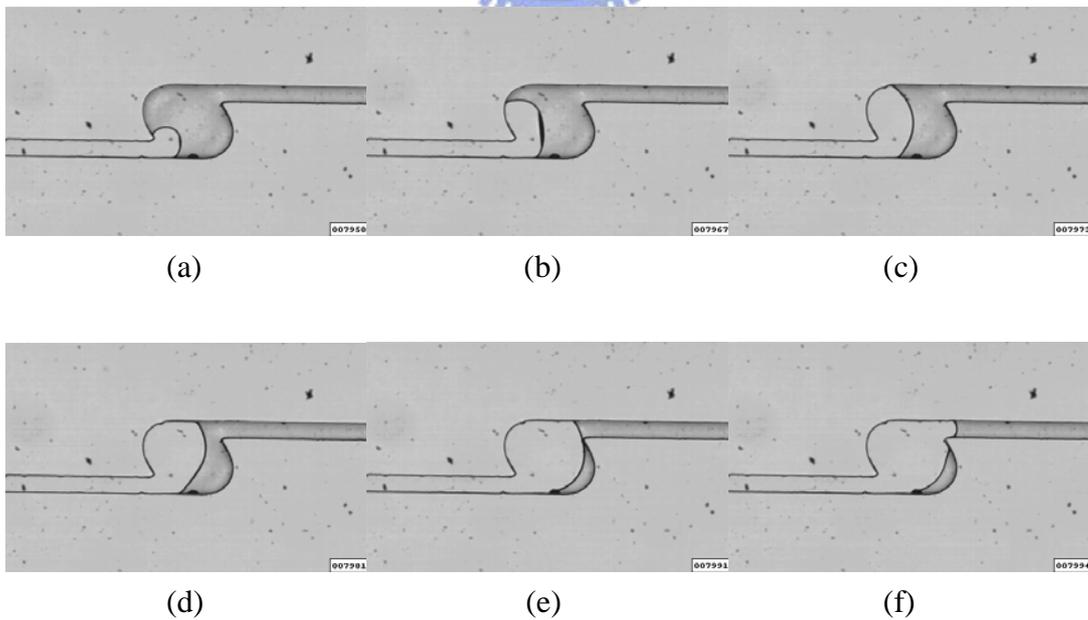


圖 4-58 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\mu\text{m}\times 350\mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.001$ 、 $We_2=0.000108$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$

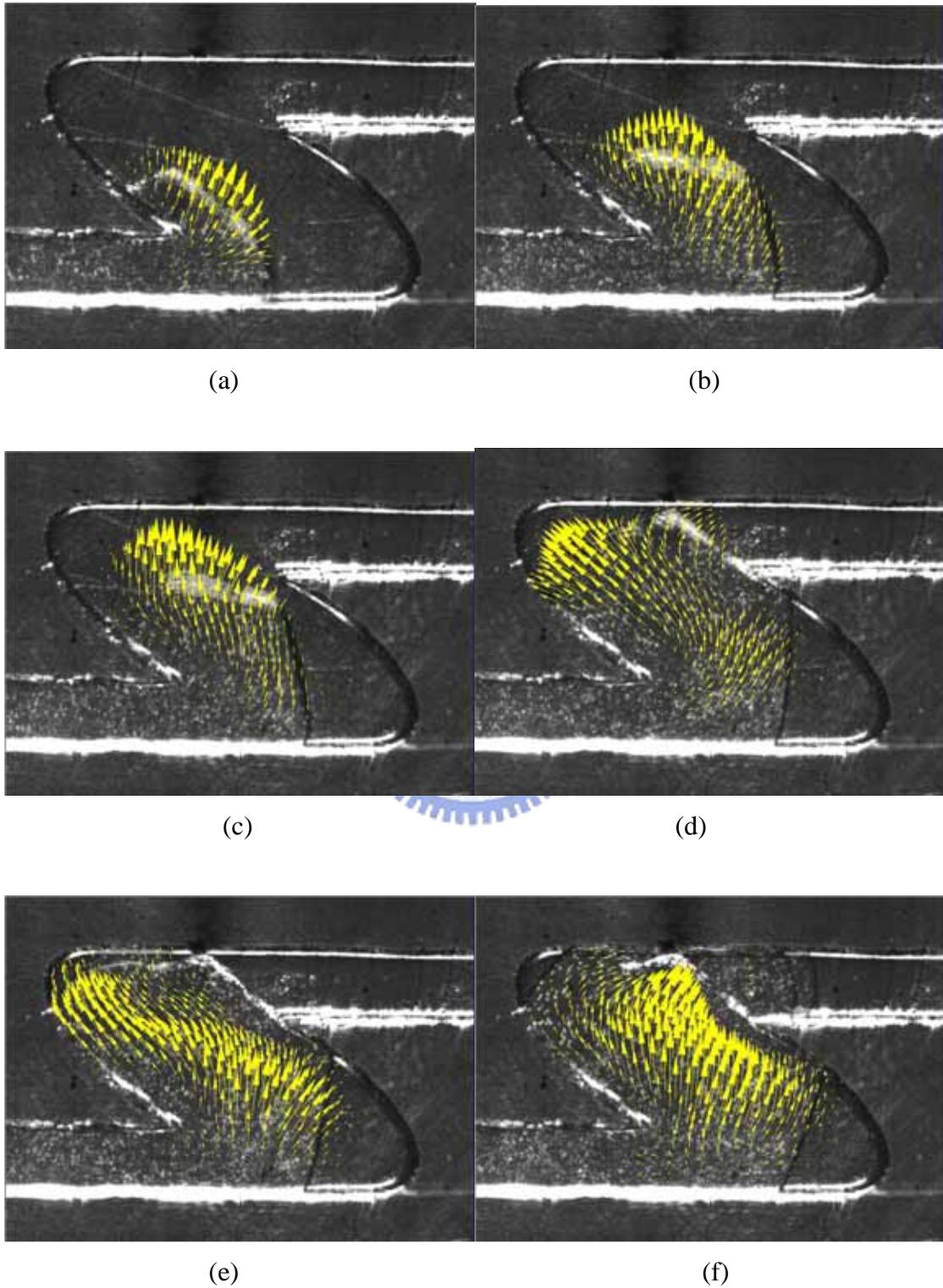


圖 4-59 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.009$ 、 $We_2=0.001808$ 、 $Q=0.03\text{ml/min}$

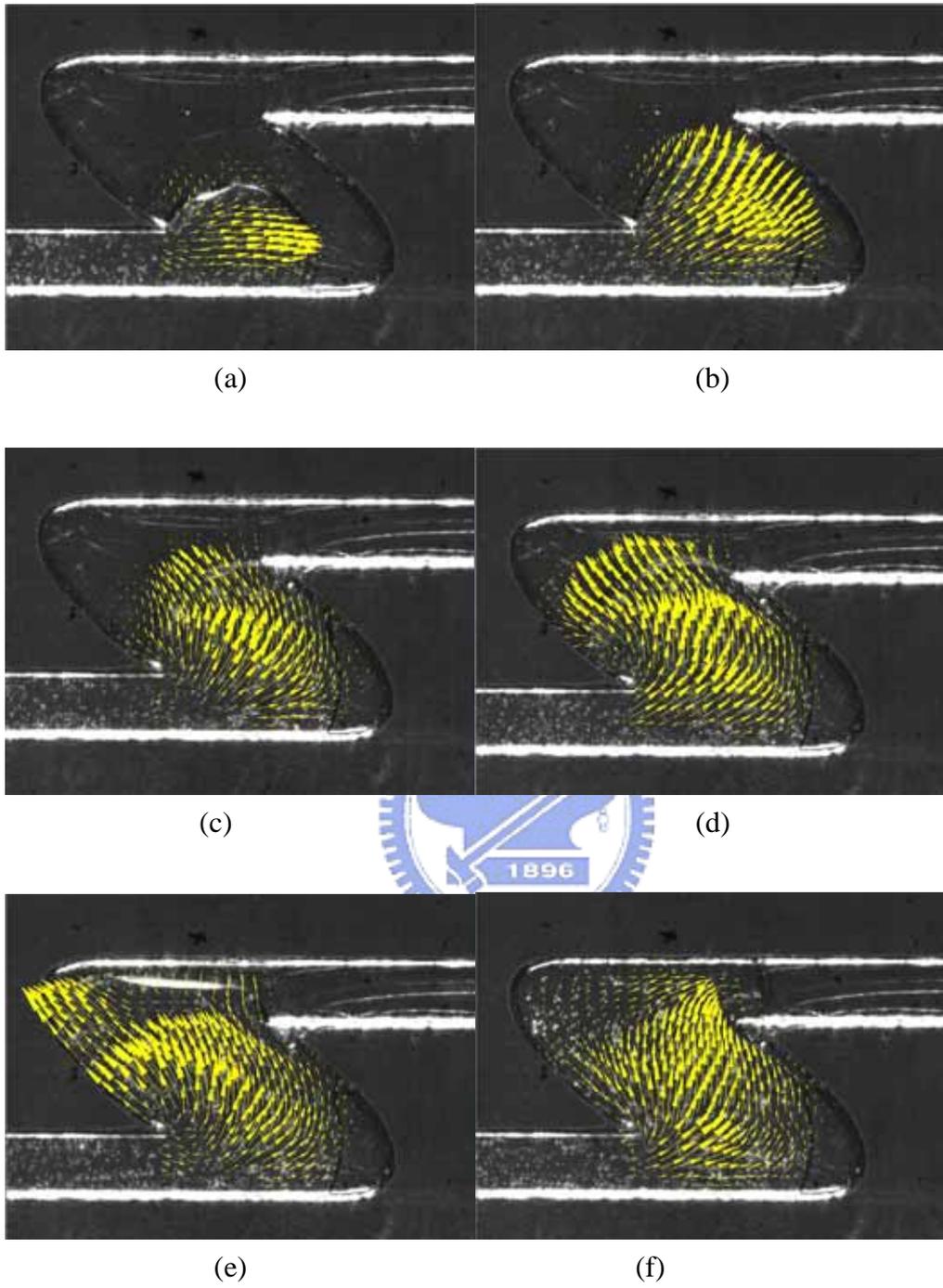
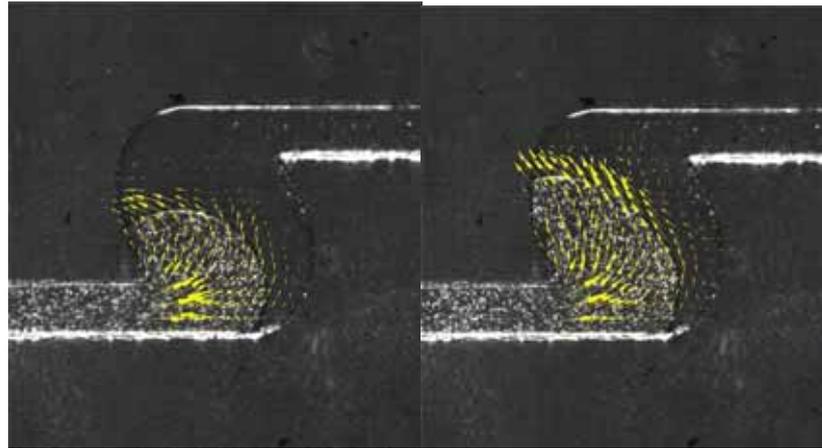
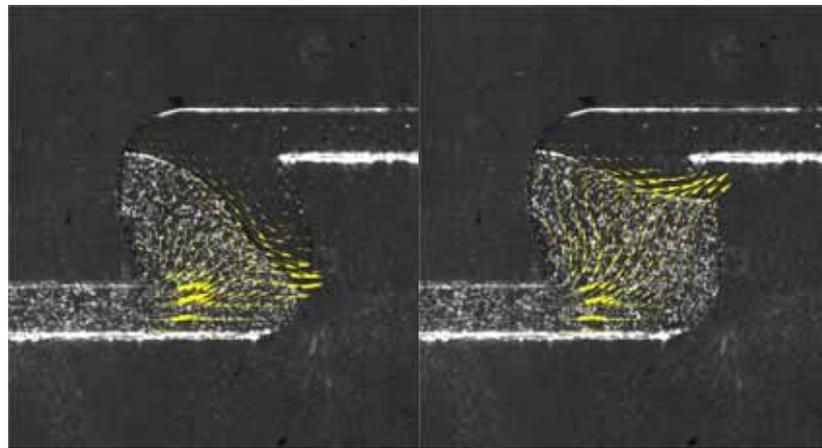


圖 4-60 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.00251$ 、 $We_2=0.00005$ 、 $Q=0.005\text{ml}/\text{min}$



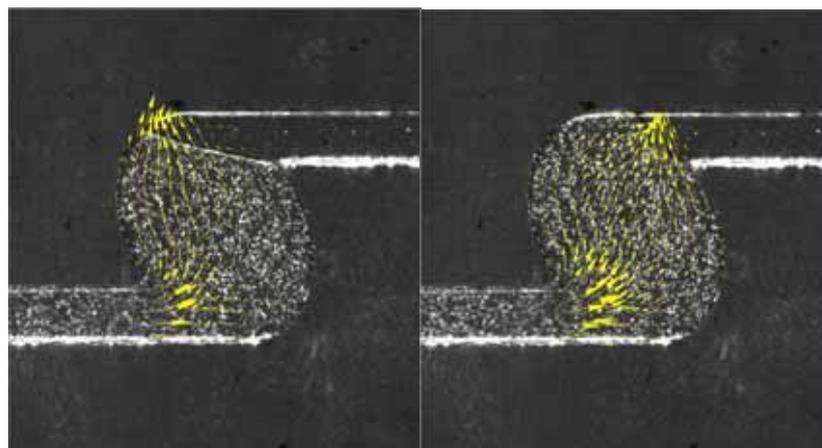
(a)

(b)



(c)

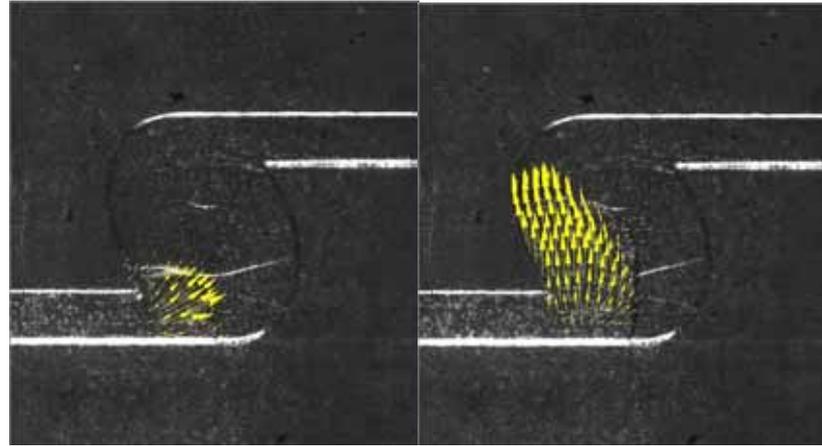
(d)



(e)

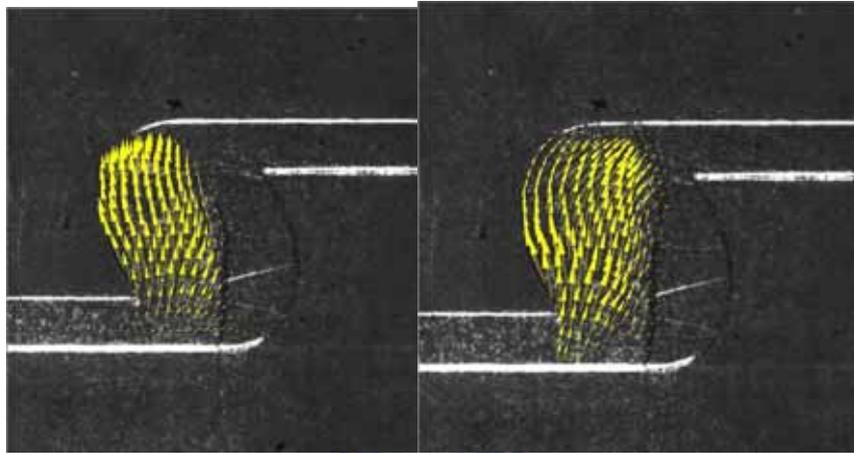
(f)

圖 4-61 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $500\ \mu\text{m} \times 350\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.00402$ 、 $We_2=0.000431$ 、 $Q=0.02\text{ml/min}$



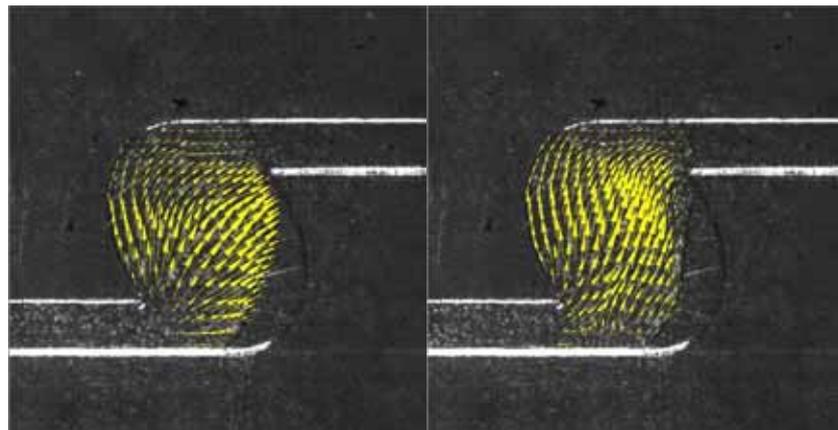
(a)

(b)



(c)

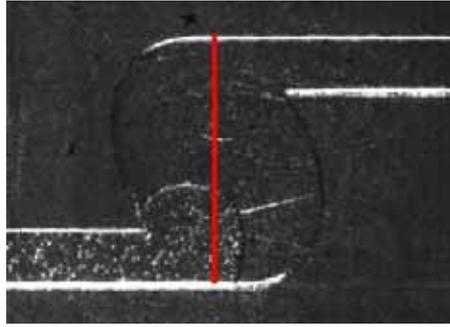
(d)



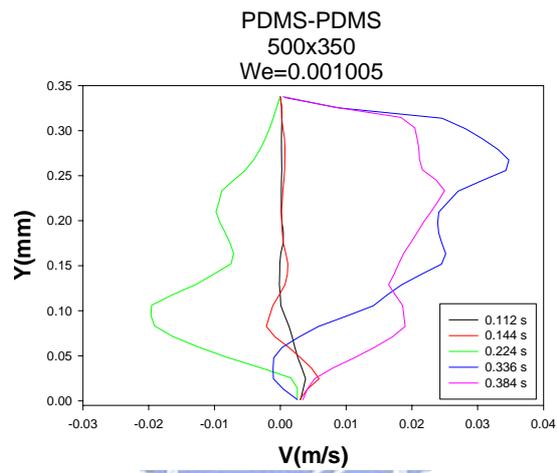
(e)

(f)

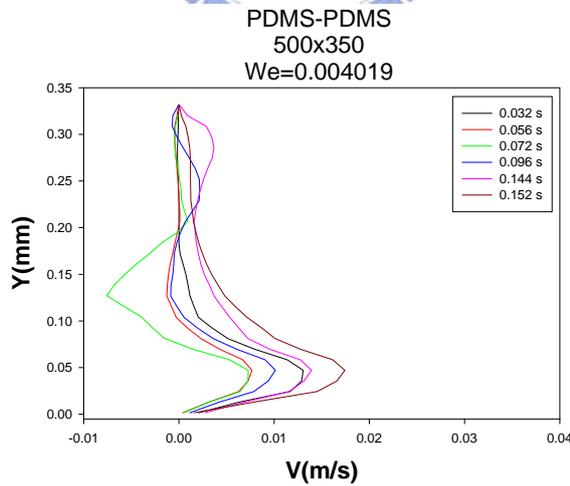
圖 4-62 微流體填充過程 PDMS-PDMS、 $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.001$ 、 $We_2=0.00108$ 、 $Q=0.01\text{ml}/\text{min}$



(a) $500 \mu\text{m} \times 350 \mu\text{m}$ 模穴、 X 方量速度截面位置

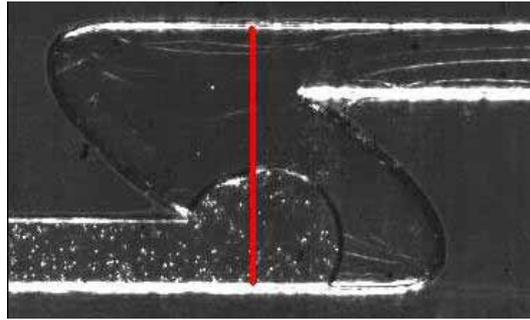


(b) $500 \mu\text{m} \times 350 \mu\text{m}$ 、 $We_1=0.001005$ 、 $Q=0.01\text{ml/min}$

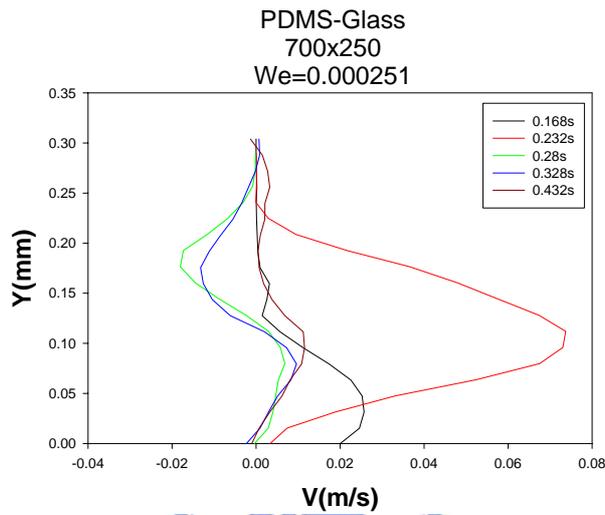


(c) $500 \mu\text{m} \times 350 \mu\text{m}$ 、 $We_1=0.004019$ 、 $Q=0.02\text{ml/min}$

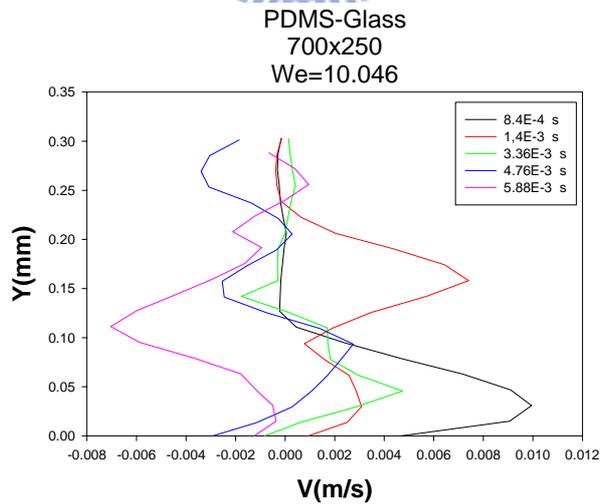
圖 4-63 $500 \mu\text{m} \times 350 \mu\text{m}$ 模穴內水平速度分量比較圖



(a) $700\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 模穴、X 方量速度截面位置



(b) $700\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 、 $We_1=0.000251$ 、 $Q=0.005\text{ml/min}$



(c) $700\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 、 $We_1=10.046$ 、 $Q=1\text{ml/min}$

圖 4-64 $700\ \mu\text{m} \times 350\ \mu\text{m}$ 模穴內水平速度分量比較圖

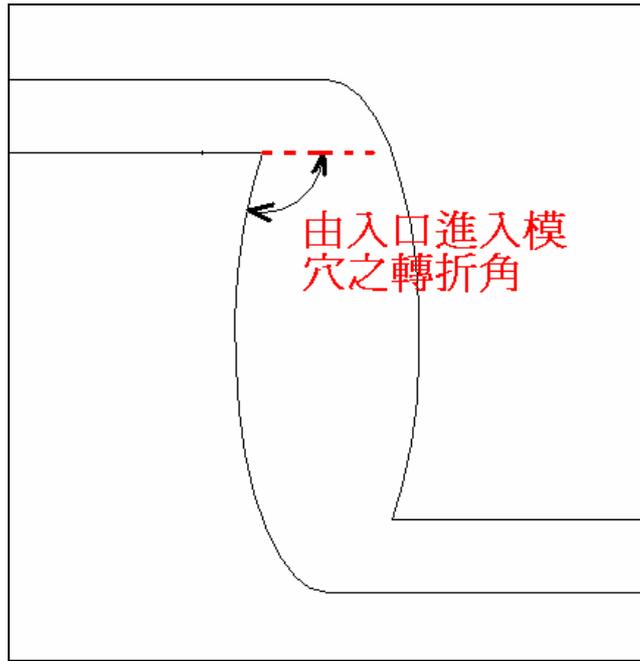


圖 4-65 液體由入口流道進入模穴後之轉折角 θ 。定義



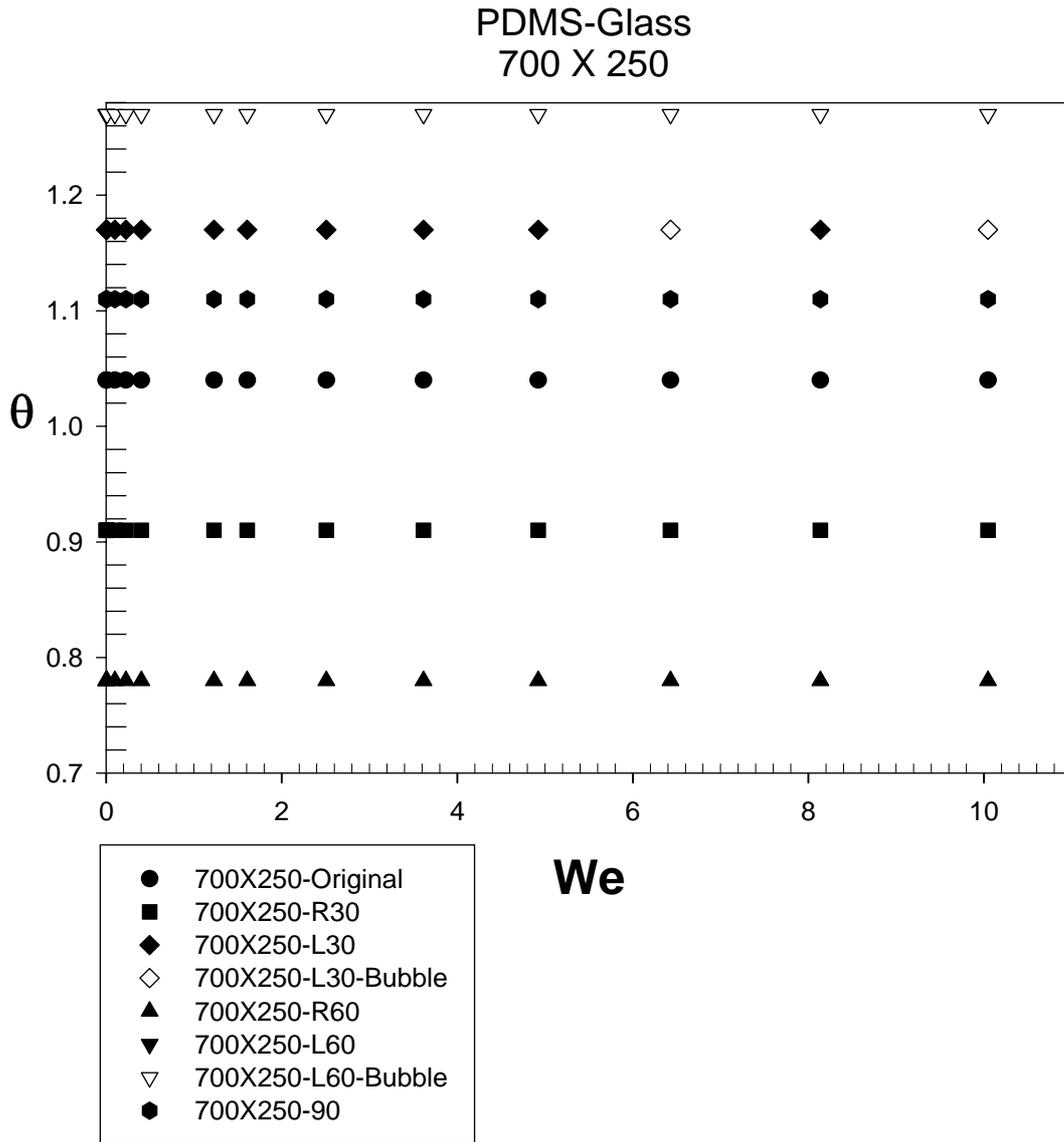


圖 4-66 PDMS-Glass 700 μm x 250 μm 模穴之 $We-\theta$ 圖

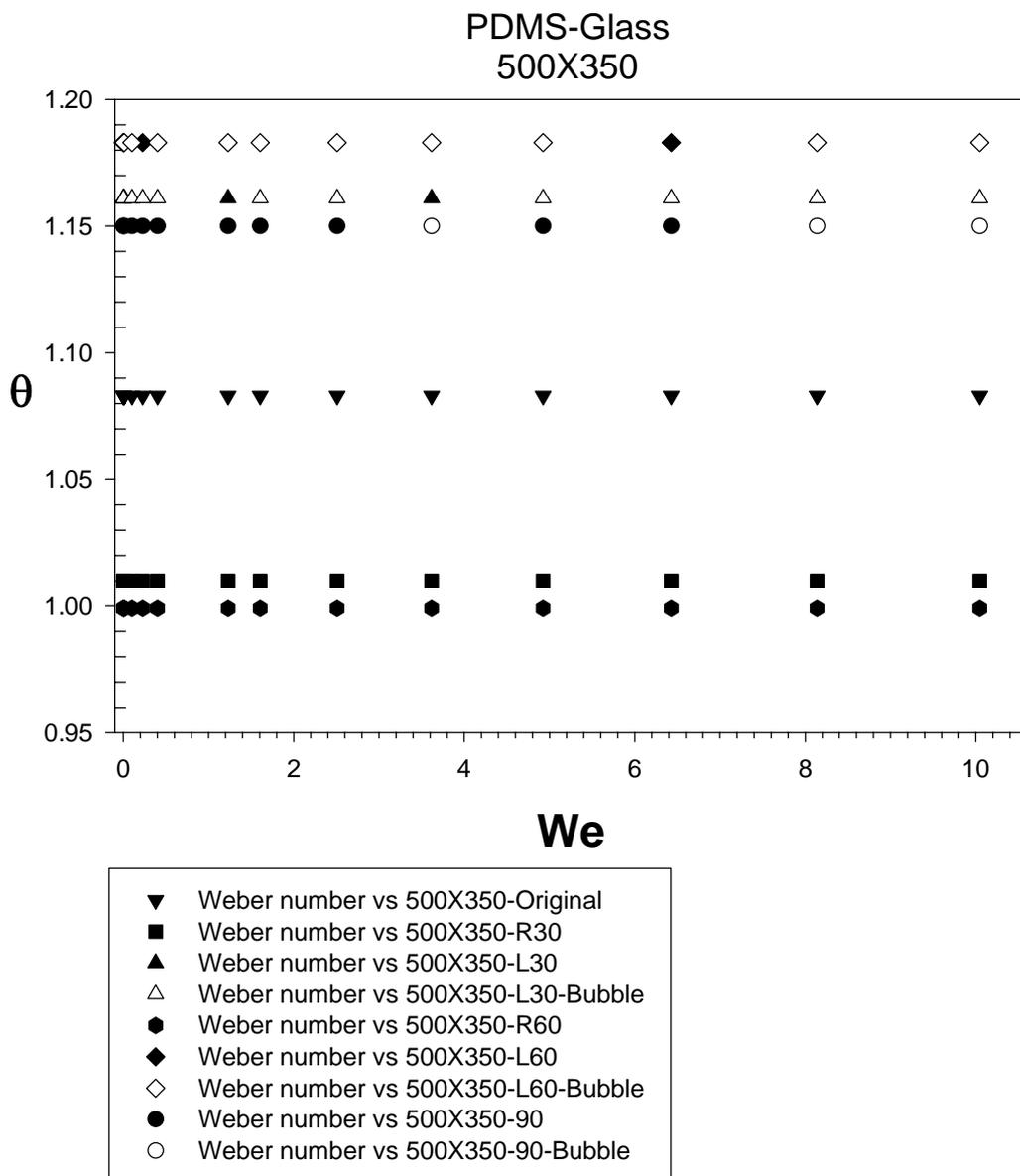


圖 4-67 PDMS-Glass $500\ \mu\text{m}\times 350\ \mu\text{m}$ 模穴之 $We-\theta$ 圖

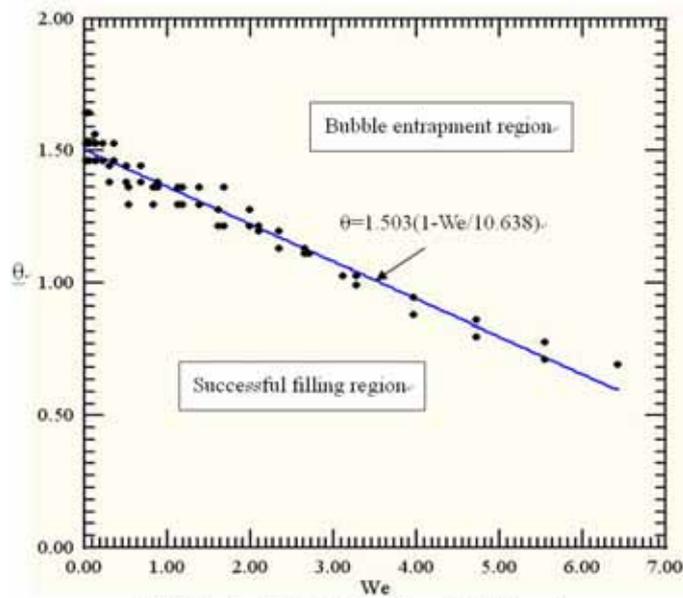
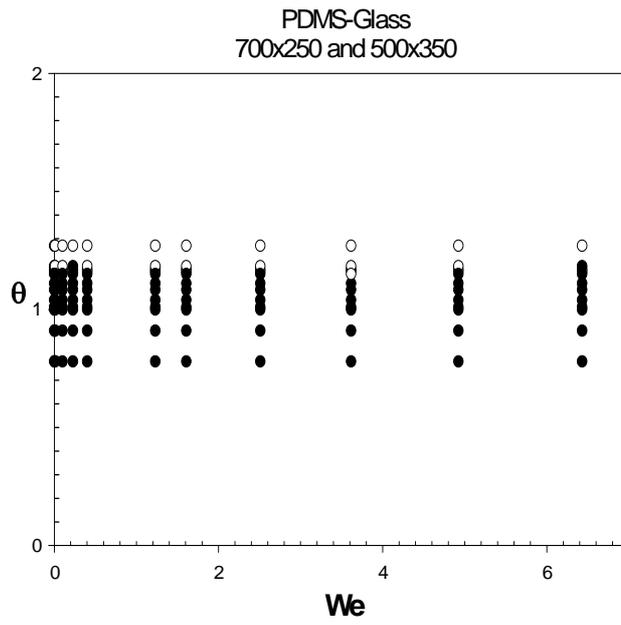


Fig. 15. A systematic relationship with the onset of bubble creation.

J.J.CHEN, W.Z.Liu, J.D.Lin, J.W.Wu

Sensor and actuators A 2006

圖 4-68 PDMS-Glass 700 μm x 250 μm 、500 μm x 350 μm 模穴之 We- θ 圖與文獻[13] 比較

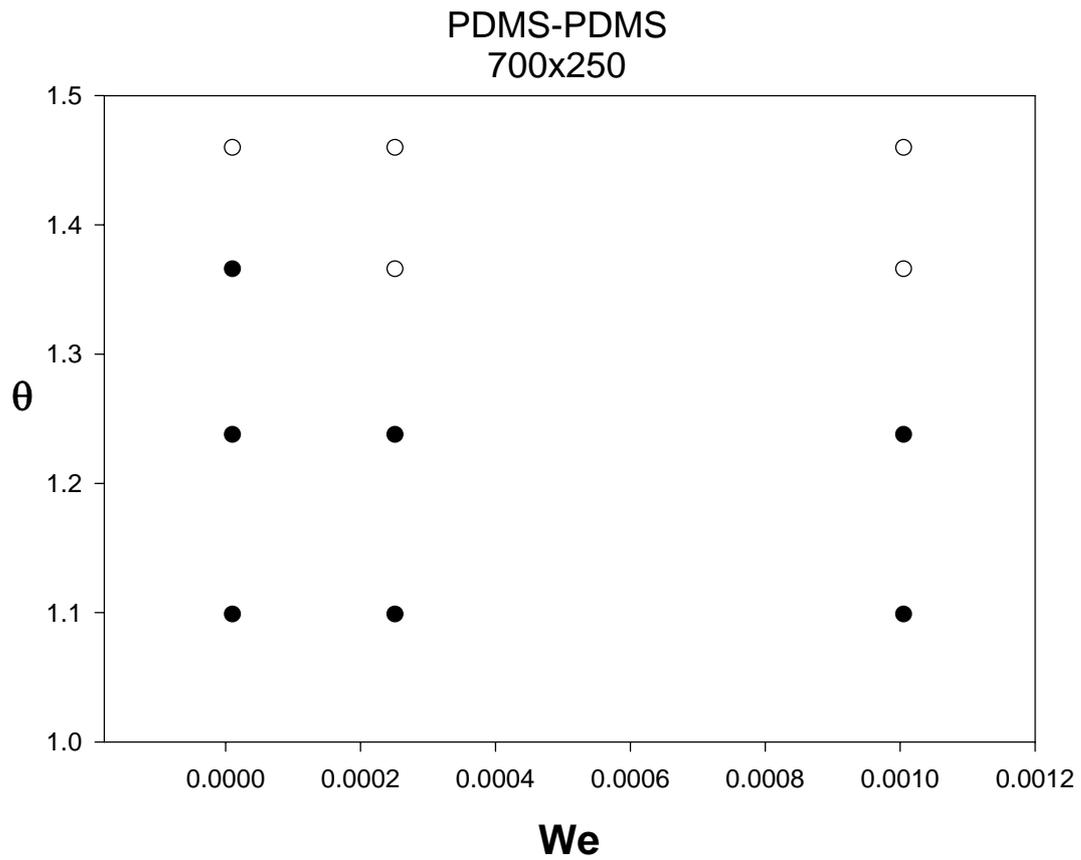


圖 4-69 PDMS-PDMS、700 μm x 250 μm 模穴之 We- θ 圖

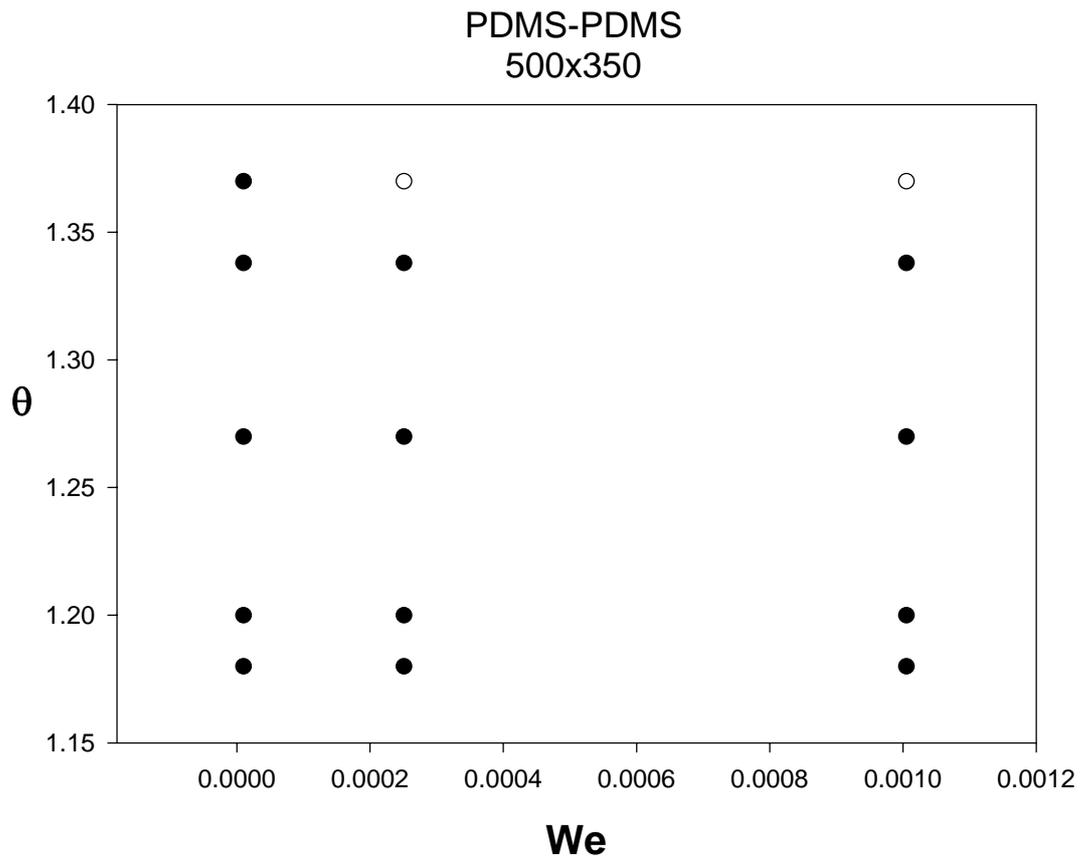


圖 4-70 PDMS-PDMS、500 μm \times 350 μm 模穴之 We- θ 圖

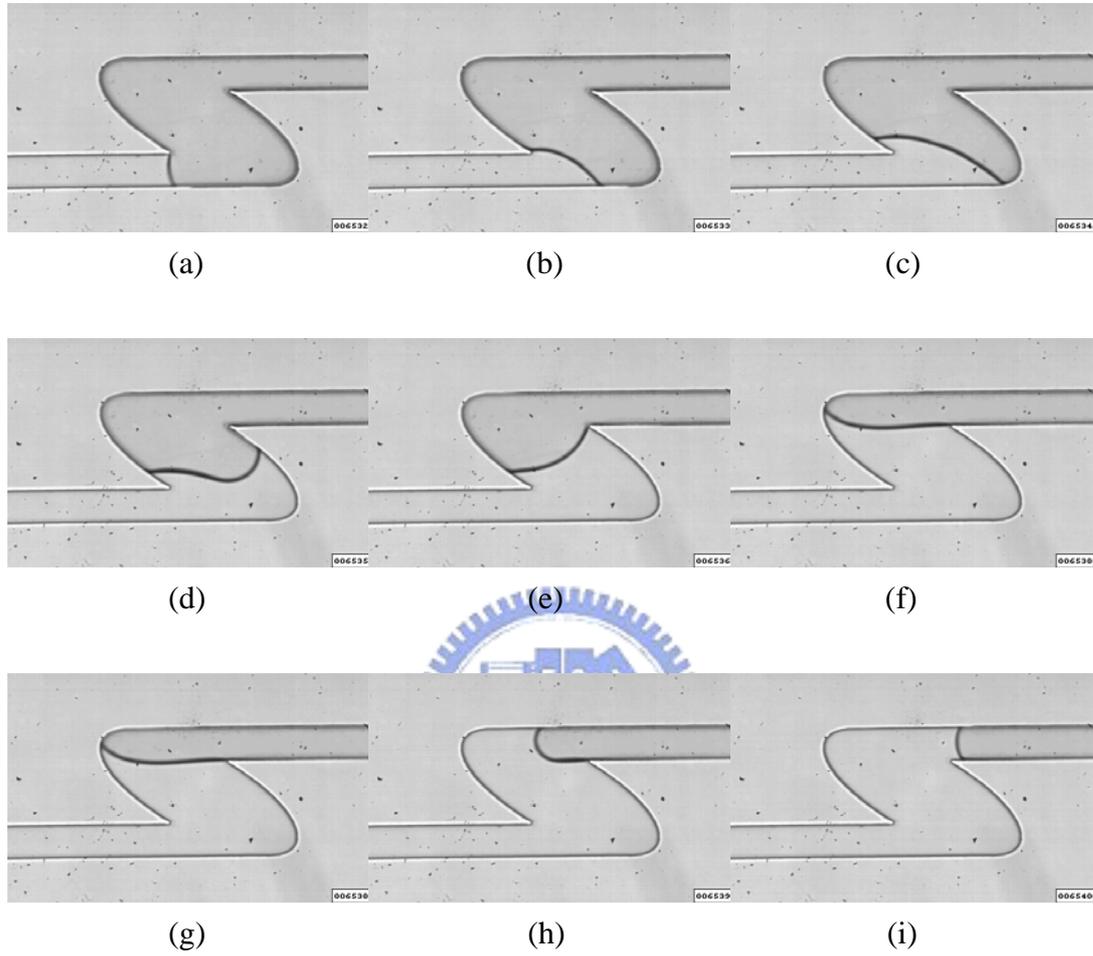


圖 4-71 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.001005$ 、 $We_2=0.000201$ 、 $Q=0.01\text{ml/min}$ 、Plasma treatment

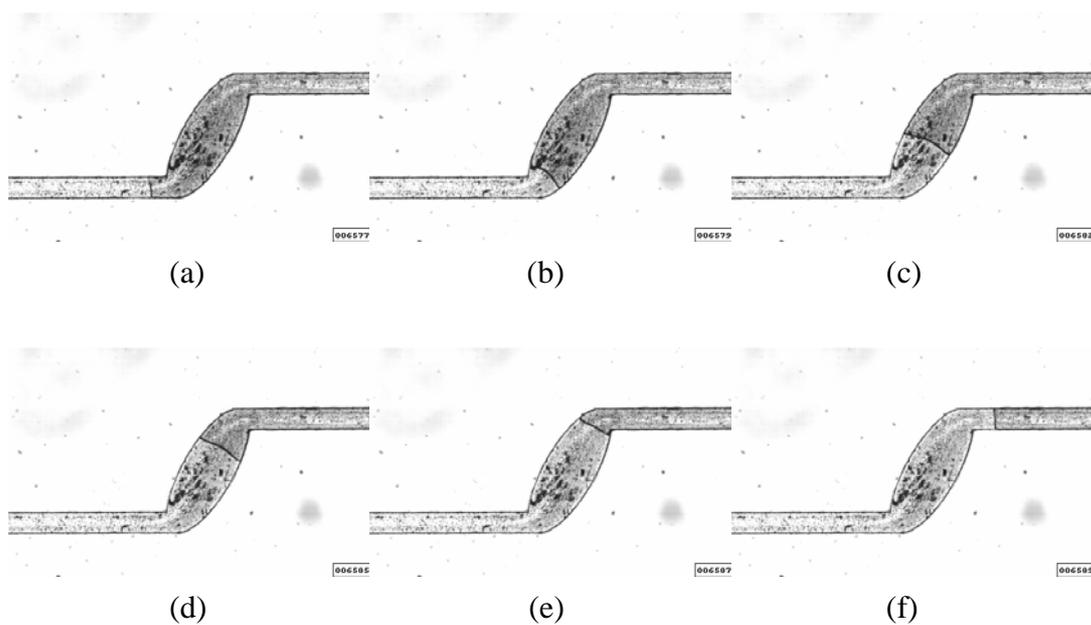


圖 4-72 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、R30、 $We_1=0.001005$ 、 $We_2=0.000201$ 、 $Q=0.01\text{ml/min}$ 、Plasma treatment

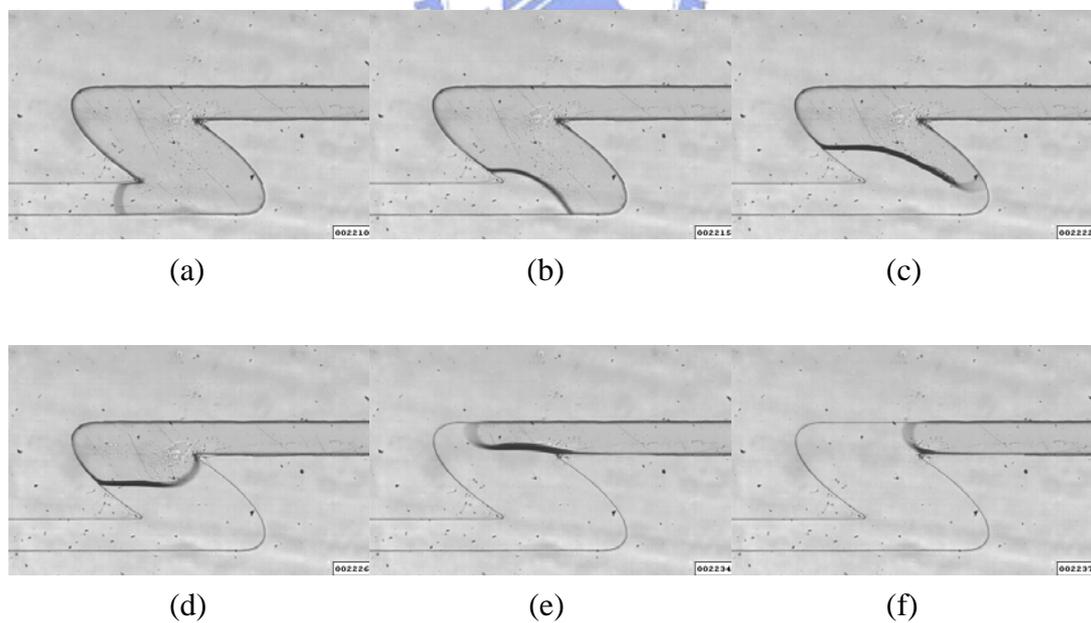


圖 4-73 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.401$ 、 $We_2=0.0802$ 、 $Q=0.2\text{ml/min}$ 、Triton treatment

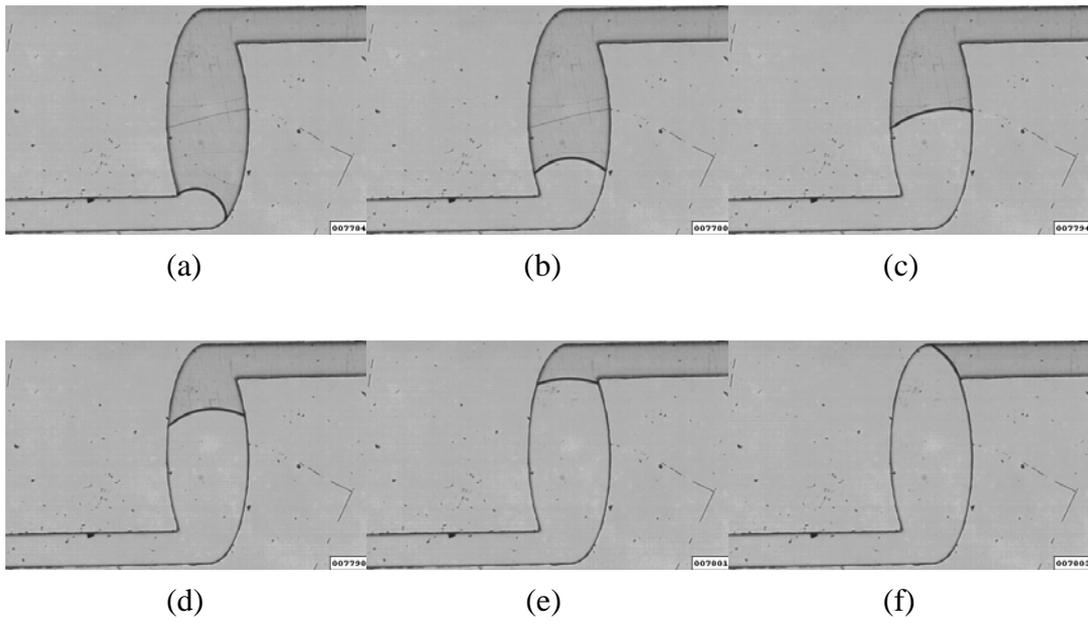


圖 4-74 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 、Original、 $We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.00005$ 、 $Q=0.005\text{ml/min}$ 、HEMA treatment

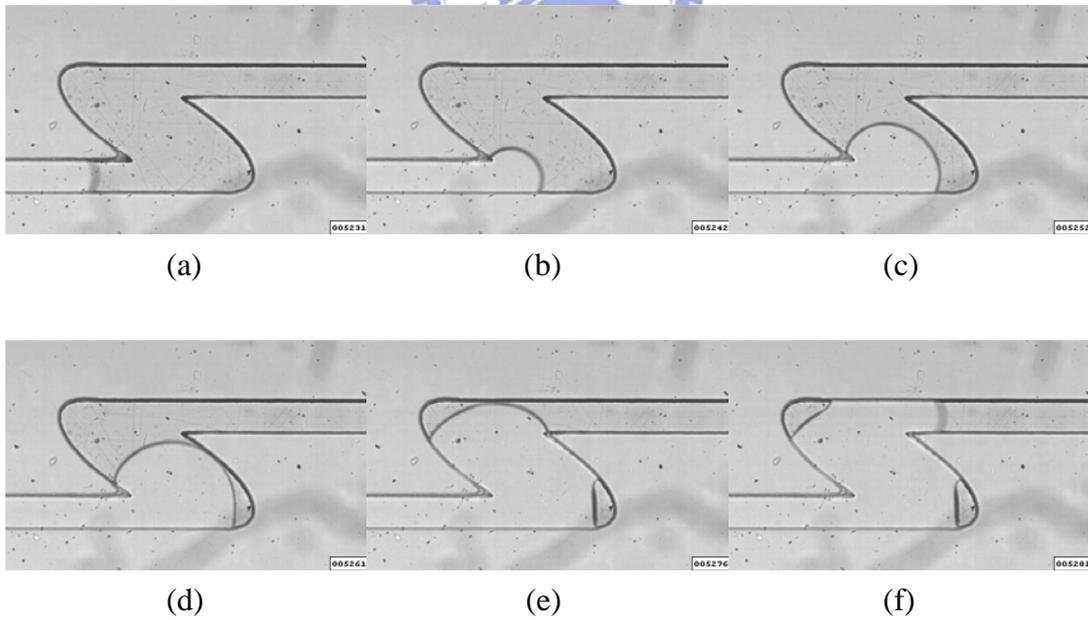


圖 4-75 微流體填充過程 PDMS-Glass、 $700\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 、L60、 $We_1=0.401$ 、 $We_2=0.0802$ 、 $Q=0.2\text{ml/min}$

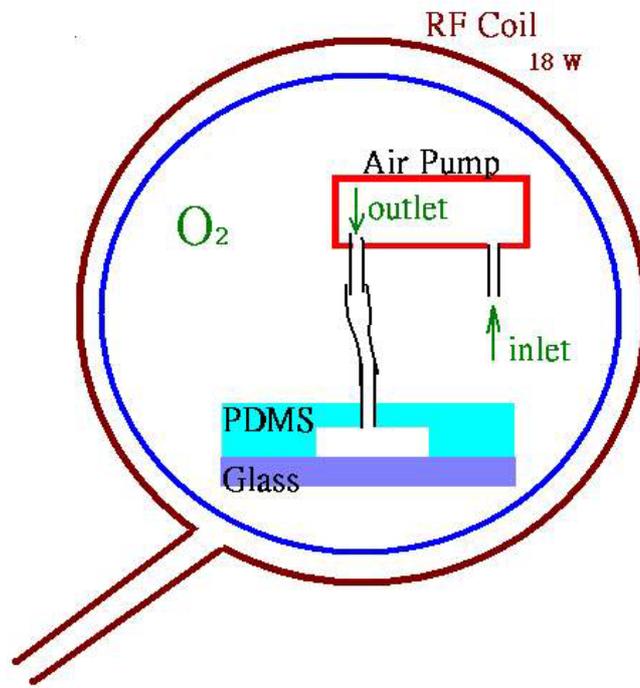


圖 4-76 Plasma 再處理裝置簡圖

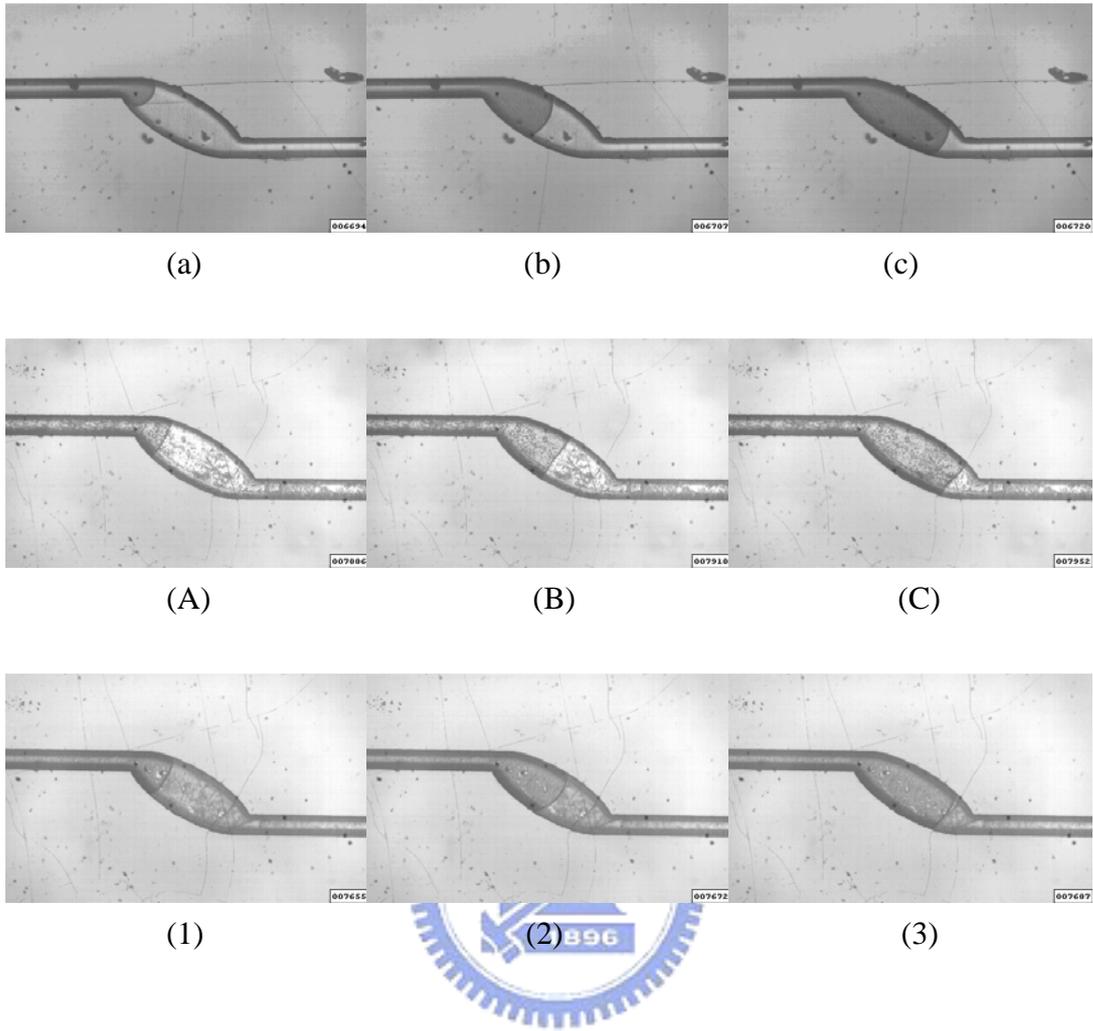


圖 4-77 微流體填充過程 Silicon-PDMS、 $700\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 、R60、 $We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.000016$ 、 $Q=0.005\text{ml/min}$

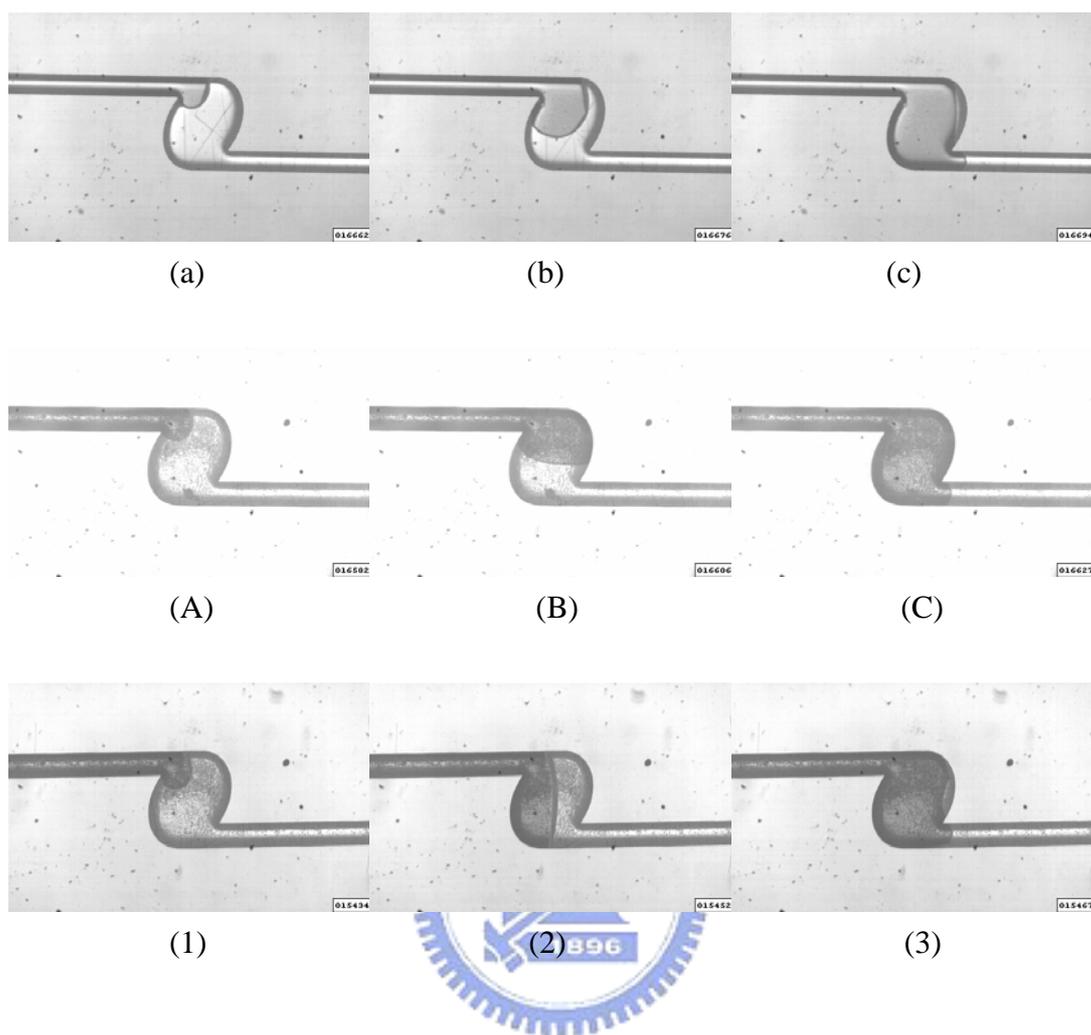


圖 4-78 微流體填充過程 Silicon-PDMS、 $700\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 、L30、 $We_1=0.000251$ 、 $We_2=0.000007$ 、 $Q=0.005\text{ml/min}$