

攪拌方式與蝕刻幾何特徵對 KOH 矽蝕刻蝕刻速率及表面粗糙度的影響

藍偉誌 姚聖恩 鄭博任 余志成*

國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系

摘要

一般非等向性濕蝕刻所使用的攪拌方式為磁石攪拌，但對於大片晶圓的蝕刻，深度蝕刻或是當保護另一面免於蝕刻的裝置存在時，磁石攪拌常常造成蝕刻深度與粗糙度的不均勻。本文分別探討以馬達葉片攪拌與超音波震盪(Ultrasonic)兩種不同的攪拌方式的蝕刻差異；以及當蝕刻面存在其他特徵，如震動島塊時，對蝕刻速率與表面粗糙度的影響。另外，在不同溫度與濃度的條件下，探討葉片攪拌式與超音波震盪式的差異性。從實驗結果發現，超音波震盪式的蝕刻速率相較於葉片攪拌式來的快。在相同的蝕刻溶液與相同的攪拌方式之下，凹槽與島塊的平均蝕刻速率並沒有太大的差別。但開孔大小則對蝕刻速率有相當的影響，開孔較小其蝕刻速率較快。而當蝕刻凹槽中存在島塊時所得到的表面粗糙度較佳，可能因為蝕刻側壁在攪拌過程中增加了蝕刻液的擾動。

關鍵字：非等向性濕蝕刻、葉片攪拌、超音波、氫氧化鉀

1. 前言

微機電系統裡，蝕刻技術是一個不可或缺的重要製程，而蝕刻製程主要分為乾式蝕刻和濕式蝕刻兩種，濕式蝕刻因其加工成本低，因此被廣泛使用。且矽晶圓依照蝕刻液的選擇性，可產生等向性蝕刻及非等向性蝕刻。非等向性蝕刻常被用來作為微系統的結構製作，在矽晶圓(Silicon Wafer)上製作出三次元的微結構，如島塊(Mesa)、懸樑(Cantilever Beam)、薄膜(Membrane)等。

蝕刻溶液內通常存在活性物種，所以濕式化學蝕刻由三個過程所組成：(1)移動蝕刻物種至晶片表

面；(2)與未被阻擋層覆蓋的表面，起化學反應而產生溶解性的副產物；(3)將反應之產物由晶片表面移除。這三個步驟都必須進行，其中最慢的一個步驟稱為速率限制步驟，往往會決定整個蝕刻的速率。影響非等向性溼式蝕刻的因素相當多，最主要的因素包含了蝕刻溶液的選擇及濃度、蝕刻時所設定的溫度、所選擇的攪拌方式、矽晶圓的結構方向和被蝕刻的圖形結構及形狀，均對蝕刻的速率及表面粗糙度產生影響。在蝕刻過程中，會在表面產生氫氣泡[1]，因而阻絕蝕刻的反應，當氫氣泡的停留時間越久，蝕刻速率會因而減慢同時造成蝕刻不均勻的問題。解決這些問題可從以下兩方面著手：(1)加速移動蝕刻物種至晶片表面與將反應之產物由晶片表面移除的速率；(2)加速帶走蝕刻表面所產生的氣泡速度，大部分都採用擾動蝕刻液的方式來解決此問題。

擾動蝕刻液的方式主要有磁石攪拌、葉片攪拌、與超音波振盪等方式，楊啟榮先生[2]等曾針對非等向性溼式蝕刻攪拌方式的不同來加以探討，不同的攪拌方式搭配不同的蝕刻溶液來觀察其實驗結果。

本文將探討蝕刻液濃度與溫度、攪拌方式與蝕刻特徵對蝕刻速率與表面粗糙度的影響，而實驗方法以同時進行不同條件的蝕刻因素。可分為：(1)以攪拌方式分為葉片攪拌式及超音波震盪式[3]；(2)蝕刻液(KOH)不同的濃度；(3)被蝕刻物的形狀分為薄膜凹槽及薄膜中有島塊特徵；(4)蝕刻元件尺寸大小的差別。在這四種條件下，量測蝕刻速率與表面粗糙度，並將最後的結果加以比較之。

2. 實驗流程及實驗規劃

2.1 實驗規劃

本文以攪拌式及超音波震盪式兩種不同的攪拌

* 聯絡作者：jcyu@ccms.nkfust.edu.tw

方式，來進行(100)矽晶圓的非等向性化學溼蝕刻，所採用的蝕刻溶液是KOH(Potassium hydroxide)蝕刻液，由蝕刻的化學反應方程式可知道影響蝕刻速率的因素有三：蝕刻液濃度、蝕刻液溫度、及攪拌之有無，本研究針對兩種不同濃度、攪拌方式與蝕刻物件特徵區，分薄膜凹槽及其中有島塊的情形，分析這些因素對蝕刻速率與蝕刻面粗糙度的影響，蝕刻條件如表 1。

表 1 蝕刻參數與蝕刻開孔邊長

		80°C 20 wt.%	80°C 30 wt.%
葉片攪拌式	島塊	蝕刻開孔邊長 (μm): 1000、1200、1400、1600、2000	
	凹槽		
超音波震盪式	島塊		
	凹槽		

2.2 實驗流程

本次實驗係採用4吋矽晶圓。首先將矽晶圓浸入丙酮在超音波震盪器內淨洗10分鐘，再以異丙醇將丙酮去除後以氮氣吹乾，利用LPCVD在矽晶圓上沉積 $0.3\mu\text{m}$ 厚的低應力膜氮化矽(Si_3N_4)層當作溼式非等向性蝕刻的阻擋層，接著旋鍍厚約 $1.8\mu\text{m}$ 的正型光阻(S-1818)再進行微影，將圖型定義於矽晶圓上面，最後再用RIE把裸露出的 Si_3N_4 層除去產生蝕刻窗口。

將試片割成破片並以去離子水(DI water)及乾空氣(Clean Dry Air)將表面的雜質除去，分別置於攪拌式及超音波式蝕刻機台裡，對於兩種不同的濃度20wt.%-80°C、30wt.%-80°C，以及對於凹槽及島塊兩種型式的破片，在不同的蝕刻條件下進行蝕刻，時間為七個小時，而每隔一小時後取出進行測量。本實驗流程圖如圖 1。

2.3 葉片攪拌式及超音波震盪式

葉片攪拌式及超音波震盪式為目前非等向性溼式蝕刻最常用的攪拌方式，葉片攪拌式機台是利用電磁加熱攪拌器帶動磁石旋轉，以及馬達帶動上方的攪拌匙旋轉而產生對流，以加強帶離蝕刻時所產生的氫氣泡(OH^-)。並且使用冷凝管，冷凝加熱後所產生水蒸氣讓冷凝後所生成的液體流回反應瓶內使反應瓶內的濃度保持一定，蝕刻裝置如圖 2。超音波震盪

式運用電子震盪原理，運用壓電陶瓷震盪器，產生高頻率震波能迅速帶走蝕刻窗口所產生的氫氣泡。

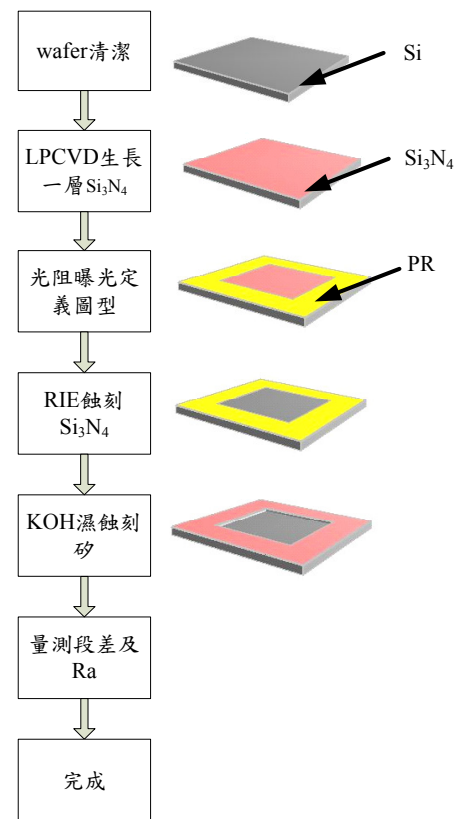


圖 1 實驗流程圖

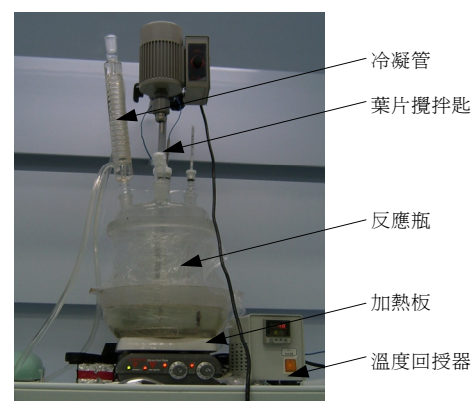


圖 2 馬達葉片攪拌式 KOH 蝕刻裝置

2.4 島塊及凹槽

本次實驗利用島塊補償和凹槽之試片，分別設計不同大小之尺寸分別為 $1000\mu\text{m}$ 、 $1200\mu\text{m}$ 、 $1400\mu\text{m}$ 、 $1600\mu\text{m}$ 、 $2000\mu\text{m}$ ，並針對不同大小的島塊及凹槽進行蝕刻作業。表 2為元件尺寸及島塊大小分配

表。

表 2 元件尺寸及島塊大小

元件尺寸	1000	1200	1400	1600	2000
島塊寬度	200	400	500	500	500
單位： μm					

2.5 測量方式

每蝕刻一個小時後取出試片，使用Alpha-Step IQ 測量表面粗糙度及段差，為了使實驗結果更加精確分別針對每個試片四個側邊之中心點的段差及凹槽底部量測出三個Ra值，如下圖。

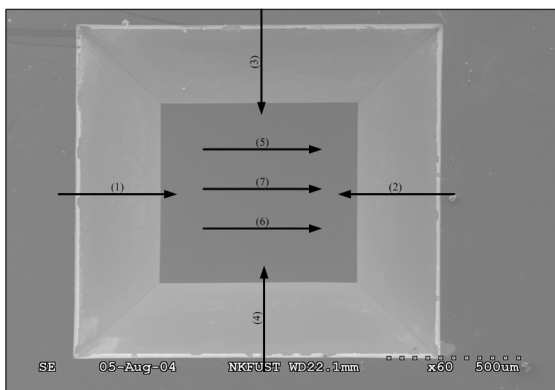


圖 3 Alpha Step IQ 量測方式，圖中(1)~(4)為量測段差，(5)~(7)為量測其表面粗糙度，其中(7)只有凹槽才可量測。

3. 實驗結果

影響非等向性濕式蝕刻蝕刻速率和表面粗糙度的主要參數有蝕刻攪拌方式、特徵形狀之有無、蝕刻液溫度與濃度條件的不同以及元件尺寸大小的影響。以下將針對影響蝕刻速率和表面粗糙度的參數加以說明。在本實驗中攪拌方式分別為超音波震盪和葉片攪拌，於超音波震盪中，蝕刻溶液溫度控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，而葉片攪拌式的蝕刻溶液溫度可以控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，無法完全將溫度控制在零誤差的狀態。蝕刻速率的量測結果以直線擬合後如圖 4、圖 5、圖 6、圖 7 所示。綜合整理蝕刻速率與表面粗糙度與蝕刻濃度、攪拌方式、蝕刻特徵的關係如表 3、表 4。

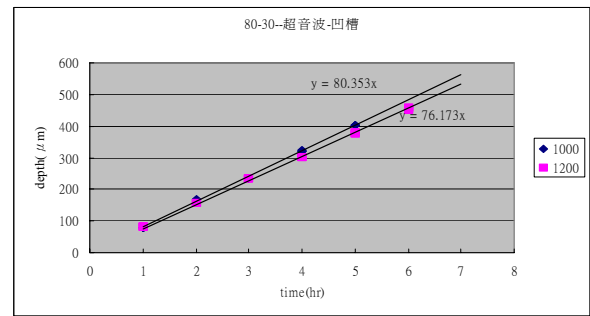


圖 4 超音波震盪式-凹槽蝕刻速率

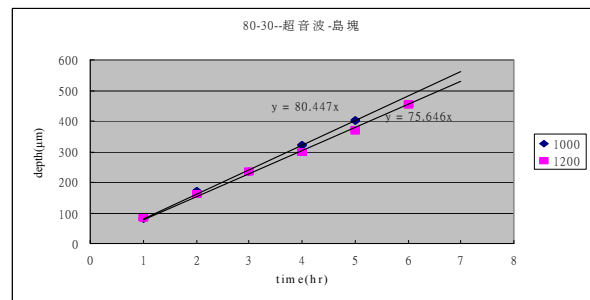


圖 5 超音波震盪式-島塊蝕刻速率

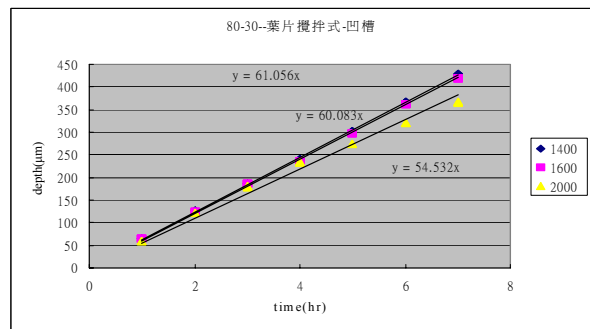


圖 6 葉片攪拌式-凹槽蝕刻速率

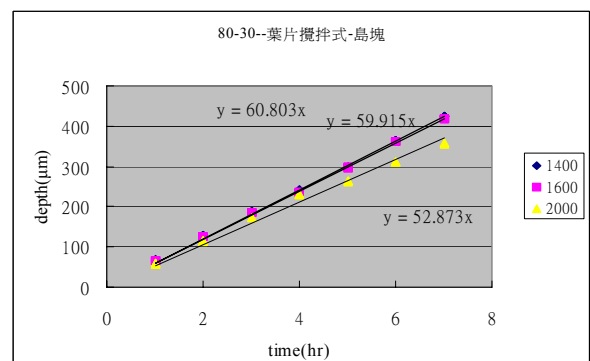


圖 7 葉片攪拌式-島塊蝕刻速率

表 3 蝕刻參數與蝕刻速率

		80°C	80°C
		20 wt.%	30 wt.%
葉片攪拌式	島塊	73.97	65.33
	凹槽	75.13	65.45
超音波震盪式	島塊	91.82	86.14
	凹槽	91.94	85.65

單位： $\mu\text{m/hr}$

表 4 蝕刻參數與表面粗糙度

		80°C	80°C
		20 wt.%	30 wt.%
葉片攪拌式	島塊	114.23	206.66
	凹槽	306	250.71
超音波震盪式	島塊	160.57	122.75
	凹槽	312.88	133.77

單位： \AA

3.1 蝕刻速率

3.1.1 攪拌方式

本文中蝕刻攪拌的方式分為超音波震盪和葉片攪拌兩種，我們拿同樣的圖形，在相同溫度與濃度的蝕刻溶液下進行實驗，從文獻中KOH濃度30wt.%-80°C的蝕刻溶液蝕刻速率為 $80\mu\text{m/hr}$ [1]，而葉片攪拌式在相同的蝕刻溶液下蝕刻速率平均僅 $65\mu\text{m/hr}$ ；超音波震盪式的蝕刻平均速率為 $86\mu\text{m/hr}$ 。另外，文獻中20wt.%-80°C KOH蝕刻的理論值為 $86\mu\text{m}$ [1]，如表 3葉片攪拌式及超音波震盪式的凹槽蝕刻速率分別為 $75\mu\text{m/hr}$ 和 $92\mu\text{m/hr}$ ；我們可看出攪拌方式對攪拌方式對蝕刻速率有很大的影響，故若採用超音波震盪式可以得到較為快速的蝕刻速率。

3.1.2 島塊蝕刻與凹槽蝕刻

由表 3葉片攪拌方式80°C-20wt.%島塊與凹槽的平均蝕刻速率差別最大值只有 $1.16\mu\text{m}$ ，得知不同元件的蝕刻特徵形式，無論是在超音波震盪式或葉片攪拌式的蝕刻方式，其蝕刻速率的影響差異性並不大。

3.1.3 蝕刻開孔尺寸

不同的元件尺寸，最直接的影響就是被蝕刻的面積。從實驗中的數據可以知道，本文針對30wt.%-80°C的蝕刻速率圖加以討論，從圖 4、圖 5、圖 6、圖

7可以明顯看出無論是在超音波震盪式及葉片攪拌式在特徵形狀的有無，尺寸越大蝕刻速率越慢；在其他不同的溫度濃度的蝕刻溶液下，亦有此種現象，但偶而會有特例點，仍需進一步的實驗調查。本實驗發現尺寸越小的開孔蝕刻速率越快，本研究推測當尺寸越小，蝕刻所產生的氣泡越容易因攪拌的方式，相鄰壁面所引起的震（擾）動而產生結合，氣泡結合後因受浮力影響，越大越容易快速離開蝕刻表面，造成反應加速蝕刻速率越快，但確切的原因還需進一步實驗討論。

3.2 表面粗糙度

3.2.1 攪拌方式

一般非等向性濕蝕刻較常採用葉片攪拌式，而本實驗中除了葉片攪拌式之外，還利用超音波震盪的攪拌方式來觀察表面粗糙度的變化。在一般的情況下，蝕刻速率越快所得到的表面粗糙度越粗，反之越慢越細，當蝕刻過程加入不同的攪拌方式其粗糙度變化並無特定的趨勢。圖 8為葉片攪拌方式蝕刻七小時後的結果，蝕刻深度約 $365\mu\text{m}$ ，蝕刻側壁可以很明顯的看出水痕。圖 9為凹槽超音波震盪式蝕刻結果SEM圖並無水痕現象，比起超音波震盪的攪拌方式，可以看出凹槽超音波震盪的表面粗糙度較好，表 4，為各種不同條件實驗結果的表面粗糙度的平均值。

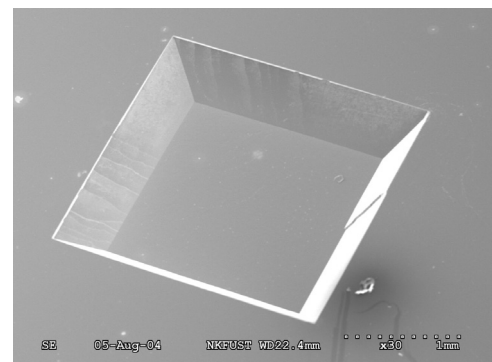


圖 8 葉片攪拌方式蝕刻結果 SEM 圖

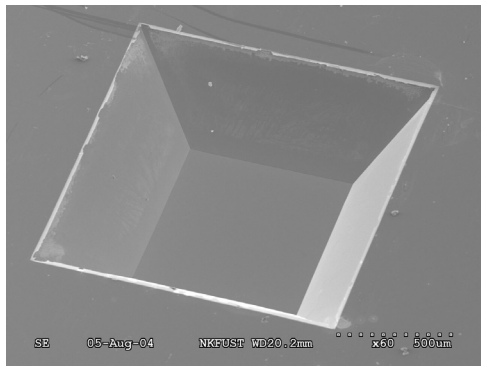


圖 9 凹槽超音波震盪式蝕刻結果 SEM 圖

3.2.2 島塊蝕刻與凹槽蝕刻

由本實驗得知，如表 4，利用凹槽和島塊這兩種不同的蝕刻圖形，在不同的攪拌方式下，80℃-30wt.%的蝕刻溶液，島塊的表面粗糙度都優於凹槽的表面粗糙度，由此而知，特徵形狀會影響表面粗糙度，在同樣大小的蝕刻窗口，島塊的存在增加了側壁的面積，因而因而增加了溶液的側向擾動，使得蝕刻反應較均勻，因而改善了表面粗糙度。

3.2.3 蝕刻開孔尺寸

蝕刻開孔尺寸對表面粗糙度的影響並不會太大，經過本實驗證實，在不同的蝕刻開孔尺寸下，所得到的表面粗糙度並沒有固定的規則可尋。

4. 結論

本論文主要探討不同條件的攪拌方式、尺寸元件、元件特徵對蝕刻速率及表面粗糙度的影響，由實驗結果比較後得到下列結論：

- (1) 超音波震盪式較葉片攪拌式擁有較快的蝕刻速率。
- (2) 超音波震盪比起葉片攪拌式可得到較平坦的蝕刻表面。
- (3) 超音波震盪式與葉片攪拌式均對島塊特徵的蝕刻速度影響並不明顯。
- (4) 超音波震盪式及葉片攪拌式所得到的表面粗糙度均是島塊較佳於凹槽。

從本實驗的實驗數據如表 3，超音波震盪式的蝕

刻速率皆優於理論值，所以若要有較快的蝕刻速率，建議採用超音波震盪式進行蝕刻作業。

5. 致謝

本研究承蒙工研院計畫編號93R12G經費支援，特誌謝意。以及碩士研究生蔡宗欣和林煌堯學長從旁協助實作指導，並感謝碩士研究生彭湘儀協助SEM的拍攝。

參考文獻

- [1] M. Madou, *Fundamentals Microfabrication*, CRC Press, New York, (1997)171,
- [2] 楊啟榮、陳柏穎、楊其成、鄭兆岷、邱源成、李榮宗，”非等向性濕式矽蝕刻攪拌效應之探討”，第十九屆機械工程研討會論文集(2000)
- [3] Chen, Jing; Liu, Litian; Li, Zhijian; Tan, Zhimin; Jiang, Qianshao; Fang, Huajun; Xu, Yang; Liu, Yanxiang, “Study of anisotropic etching of (1 0 0) Si with ultrasonic agitation”, *Sensors and Actuators*, A96, pp. 152-156 .
- [4] Seidel, H., Csepregi, L., Heuberger, A., and Baumgatel, H., “Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions-Part I . Orientation Dependence and Behavior of Passivation Layers“, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 137, No.11, 1990, pp. 3612-3626.

The Influences of Agitation and Geometric Features on the Etching Rate and the Surface Roughness in the KOH etching of (100) Silicon

Wei-Chih Lan, Sheng-En Yao, Po-Jen Cheng,
and Jyh-Cheng Yu*

Department of Mechanical and Automation Engineering
National Kaohsiung First University of Science and
Technology

Abstract

The magnetic stirring is often used to agitate the etchant in anisotropic wet etching. However, in the etching of a large wafer, deep etching, or in the presence of a protecting chuck, the surface roughness using magnetic stirring tends to unsatisfactory. This paper compares two different agitation methods: ultrasonic agitation and turbine stirring. The etching rate and surface roughness are studied for different sizes of etching window with and without seismic mesa in the middle. The experiment results show that the ultrasonic agitation can increase the etching (92 $\mu\text{m/hr}$ at 80 °C, 20%) without sacrificing the etching uniformity. The surface roughness is as good as 12 μm (Ra) in deep etching. The etching rate slightly decreases with the size of etching window, but is insensitive to the presence of mesa. The surface roughness of the etched membrane is better for the case with mesa, which might be due to a more even agitation for the etching with more side wall areas.

Keyword: Anisotropic wet etching, turbine stirring, ultrasonic agitation, KOH

*Corresponding author