

在氟化銨中以光電化學法蝕刻 n-Si(100)單晶 表面製作微米溝槽

林景崎*¹、陳章旭¹、賴建銘¹、楊仁泓¹、鄭文達¹、蔡明蒔²

Preparation of Macro Trenches on Si(100) by Photo-electrochemical Etching in Ammonium Fluoride Solution

J. C. Lin*¹, W. S. Chen¹, C. M. Lai¹, J. H. Young¹, W. D. Jheng¹, M. S. Tsai²

摘 要

本研究以光電化學法在 n-型(100)矽單晶上，採用不具毒性的氟化銨蝕刻液，蝕刻出微米級溝槽結構。陽極極化法及定電位蝕刻可以用來探討氟化銨溶液中，外加電壓與試片圖案間距對蝕刻速率及蝕刻形貌的影響。研究結果顯示：在預蝕刻圖形間距為 110 μm ，若改變蝕刻電位由 0.1 V 增加到 0.8 V，則蝕刻所得之結構其孔壁厚度由 32 μm 增加至 90 μm 。在外加電位為 0.8 V 時，若改變預蝕刻圖形間距在 60~170 μm 範圍，則間距 60、80 及 110 μm 試片可以製作出孔壁筆直之溝槽結構，但間距 140 及 170 μm 試片，蝕刻孔洞發生擴孔，此現象之差異可由電場與空間電荷區分佈之差異來解釋。

關鍵字：n-型 Si(100)單晶；光電化學蝕刻；氟化銨。

ABSTRACT

Fabrication of macro-trenches on n-type silicon in the ammonium fluoride solution by photo-electrochemical etching has been investigated in this work. Effect of applied voltage and the pitch of pores were discussed in ammonium fluoride solution by dc-potentiodynamic polarization and potentiostatic etching. For the pattern with a pitch of 110 μm , the wall width of the etching structures increases from 32 μm to 90 μm when the etching voltage increases from 0.1 V to 0.8 V. For the etching conducted at 0.8 V, we obtained trenches in vertical walls as the pattern with a pitch less than 110 μm (e.g., 60, 80 and 110 μm) but in curved walls for the pattern with a pitch higher than 110 μm (e.g., 140 and 170 μm). This difference in trench morphology is delineated by different distribution for the strength of electric field and the space charge regions.

Keywords: n-type(100) silicon; Photo-electrochemical etching; Ammonium fluoride.

1 國立中央大學機械系

1 Department of Mechanical Engineering, National Central University.

2 國家奈米元件實驗室

2 National Nano Device Laboratories

* 連絡作者：jclincom@cc.ncu.edu.tw

1. 前言

多孔矽在 1956 年首度被 Uhler^[1]發現，之後對於多孔矽的形成機制，及多孔矽的應用研究，紛紛開始進行。早期多孔矽大多用來製作犧牲層，自從 1990 年，Lehmann 製作出具高深寬比^[2]之多孔矽結構後，多孔矽的應用範圍又擴展到微機電系統 (Microelectro-Mechanical System, MEMS)^[3-5]，薄膜技術^[6]，偵測器^[7]及光電材料等方面。製作多孔矽的方法大致上分為三種：(1) 乾式蝕刻(Dry Etching)、(2) 濕式化學蝕刻(Stain Chemical Etching)、(3) 電化學蝕刻(Electrochemical Etching)。其中，電化學蝕刻具有低設備成本，高產能，且蝕孔異向性高等優點，常被利用於製作多孔矽。

欲在矽晶片獲得形狀規律之深孔或溝槽，通常必須先以 KOH 化學預蝕刻，在矽晶片上獲得一蝕刻尖端，作為光電化學蝕刻之起點，再以氫氟酸或氟化銨溶液^[8-11]進行光電化學蝕刻。Foll 在研究矽的電化學蝕刻時發現：所得之多孔矽孔洞外貌與矽晶片上之空間電荷層(Space Charge Region, SCR)分佈^[12]有關，而 SCR 分佈又受到外加電位及矽晶片電阻值之影響。本研究希望製作寬度 50 μm ，深度 100 μm ，長度 2000 μm 之矩形溝槽結構，以便應用於微熱交換器管路之製作。本文除了探討化學預蝕刻的形貌、深度及其圖案間距等參數是否會影響此種矩形溝槽

之結構及外貌外，希望藉由此項研究，尋找出最適之下列參數：外加電位、預蝕刻結構、及預蝕刻圖形之間距等，以獲得一垂直孔壁之矩形溝槽結構為目標。本實驗採用固定電阻值之矽晶片，以簡化問題之處理程序。

2. 研究方法

2.1 試片製備

選用電阻值為 4500 $\Omega\text{-cm}$ ，厚度 300 μm 的 n 型(100)矽晶片，做為光電化學蝕刻製作矩形溝槽結構之基材。矽晶片首先使用低壓化學氣相沉積 (LPCVD) 在表面沉積一層 100 nm 厚的 Si_3N_4 ，接著使用微影黃光製程在試片表面製作出不同間距之圖形，試片圖案形式及代號各如圖 1(a)及表 1 所示，隨後利用反應性離子蝕刻(Reactive ion etching)以及 KOH 化學預蝕刻，在試片圖案蝕刻出一尖端，作為光電化學蝕刻反應之起始點，KOH 預蝕刻結構如圖 1(b)所示，最後進行光電化學蝕刻，實驗流程如圖 2 所示。

2.2 蝕刻液選擇

一般常使用氫氟酸溶液蝕刻矽晶圓，但氫氟酸具毒性且沸點低(19.5 $^{\circ}\text{C}$)，常溫下易揮發，造成工

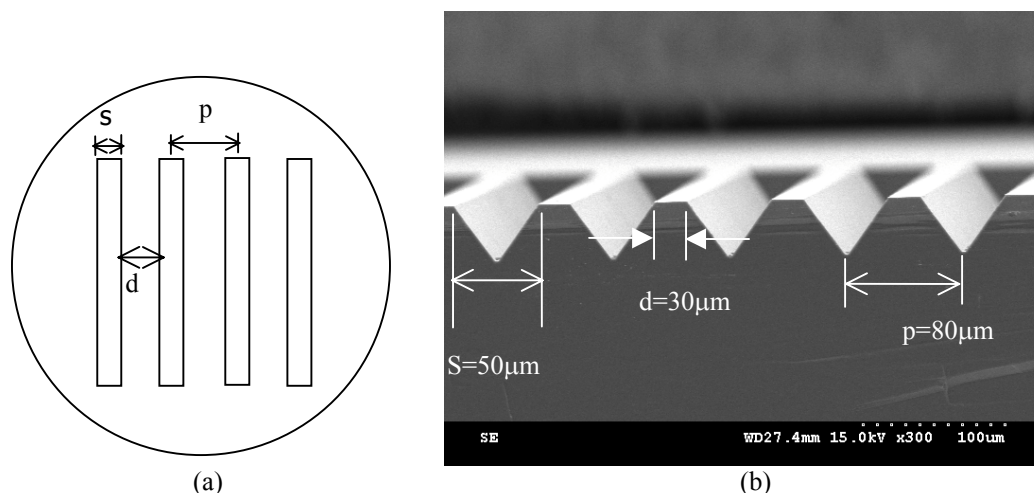


圖 1 (a) 光罩圖樣尺寸示意圖，(b) 經 KOH 預蝕刻後預蝕刻孔之 SEM 圖形。

Figure 1 (a) Schematic diagram of the mask used to obtain the pre-etched pattern, (b) SEM micrograph (tilt-viewed) of the pattern pre-etched by KOH.

表 1. 用於本研究之預蝕刻圖案之尺寸及代號描述。

Table 1 The symbols and parameters listed to describe the pre-etched patterns used in this work.

symbol	S	d	p
Pattern A(P ₆₀)	50 μm	10 μm	60 μm
Pattern B(P ₈₀)	50 μm	30 μm	80 μm
Pattern C(P ₁₁₀)	50 μm	60 μm	110 μm
Pattern D(P ₁₄₀)	50 μm	90 μm	140 μm
Pattern E(P ₁₇₀)	50 μm	120 μm	170 μm

安問題，故本研究採用本實驗室之專利配方，以氟化銨作為主要之蝕刻液。氟化銨之濃度控制在 2 M。

2.3 實驗設備

光電化學蝕刻之蝕刻槽體以鐵氟龍 (polytetrafluoroethylene, PTFE)塊材加工製成(80 × 50 × 60 cm³)，內置 100 mL 的蝕刻液，將預蝕刻試片，切成 1 cm × 1 cm 見方，置入蝕刻槽內，其與蝕刻液接觸之有效面積為 0.49 cm²，試片背面以銅片(99.9%)接觸並外接作為陽極或工作電極 (working electrode)；蝕刻槽另一端以白金片(純度 99.99%)作為陰極或稱輔助電極；實驗中使用之參考電極為飽和甘汞電極(Saturated Calomel Electrode, SCE)；本論文中所言及之電位均以對照飽和甘汞電極為標準。實驗中利用恆電位儀(AutoLab PGSTAT30)供應穩定電位，並由電腦界面控制，即時量測電流變化；試片背面以 150 W 之鹵素燈(SAKAI)照射，燈泡與試片之間距維持在 40 mm，實驗設備如圖 3 所示。

2.4 蝕刻動力學分析

本實驗採用陽極動態極化及定電位蝕刻等兩種方式，進行矽蝕刻動力學分析。陽極動態極化法掃描範圍為-1.0 ~ +6.0 V，掃描速率為 5 mV/s，以電位對電流作圖，作為選取適當蝕刻電位之依據。矽晶片在照光下以定電位蝕刻法製作矩形溝槽，同時量測電流，溝槽之外貌則以掃描式電子顯微鏡(HITACHI S-3500)進行觀察，以了解蝕刻溝槽外貌，與預蝕刻深淺、圖案間距及蝕刻電位之間的關係。

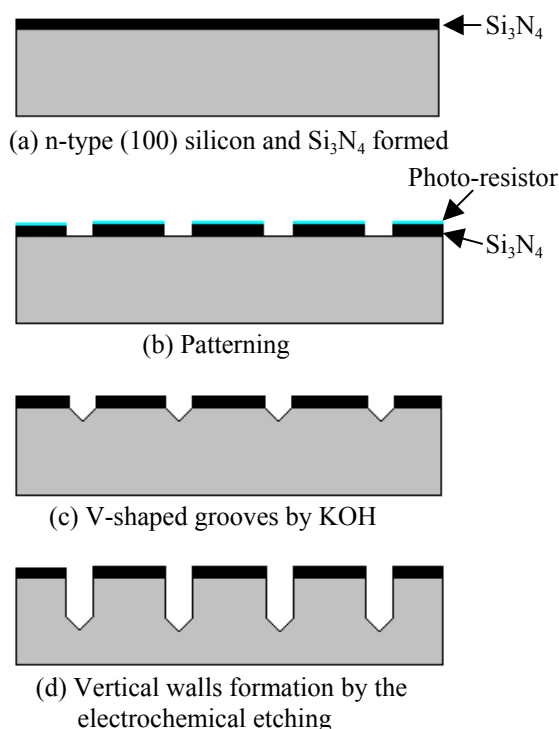


圖 2 光電化學蝕刻製作微米矩形溝槽流程圖。
Figure 2 Flow chart to prepare macro-trench array on the surface of n-Si(100) by photo-electrochemical etching process.

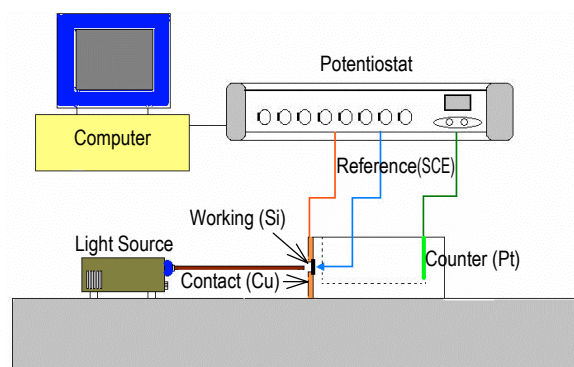


圖 3 光電化學蝕刻實驗裝置圖。
Figure 3 A schematic diagram represents the photo-electrochemical etching setup.

2.5 ANSYS 電場模擬

經 KOH 預蝕刻之結構以 ANSYS 做電場分佈

模擬，其分析步驟為：(1) 預蝕刻結構圖形繪製，(2) 邊界條件的設定(外加電位、試片厚度、試片電阻值)，(3) 預蝕刻結構之電場分佈模擬，(4) 將模擬所得之尖端電場乘以預蝕刻尖端至試片底部距離，可獲得預蝕刻結構之尖端電位($V=E \times d$)。經由此一商用軟體之模擬，希望用以驗證 Foll 研究氫氟酸的電化學矽蝕刻，所得到的空間電荷層(Space Charge Region, SCR)分佈^[12]理論對蝕刻形貌的影響，能否適用於本研究之氟化銨系統。

3. 結果

3.1 改變預蝕刻圖案間距對蝕刻結果之影響

具有預蝕刻圖案為 A(P₆₀)、B(P₈₀)、C(P₁₁₀)、D(P₁₄₀) 及 E(P₁₇₀) 之試片，浸漬於濃度 2 M 氟化銨溶液中，在功率為 150 W 的照光環境下，進行開路電位(Open Circuit Potential, OCP)量測，結果由圖 4 顯示。在 1800 秒內，隨著圖案間距由 60 μm 增加至 170 μm，其對應之平均開路電位值逐漸向負電位方向移動，其值

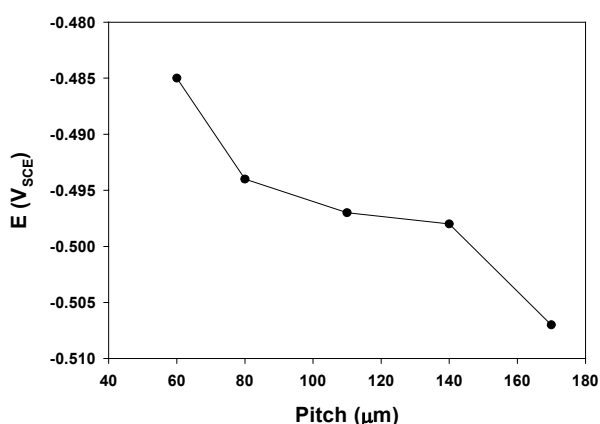


圖 4 在照光功率 150 W 之環境下，預蝕刻圖案為 A(P₆₀)、B(P₈₀)、C(P₁₁₀)、D(P₁₄₀) 及 E(P₁₇₀) 試片於 2 M 氟化銨溶液中中之開路電位量測，量測時間為 1800 秒。

Figure 4 Function of the open circuit potential against the specimens with pre-etched patterns A(P₆₀), B(P₈₀), C(P₁₁₀), D(P₁₄₀) and E(P₁₇₀) in 2 M NH₄F solutions illuminated by a 150 W halogen lamp and 1800s lamp.

分別為 -0.485 V (60 μm)，-0.494 V (80 μm)，-0.497 V (110 μm)，-0.498 V (140 μm) 與 -0.507 V (170 μm)。由此顯示，在氟化銨溶液中，改變矽晶片圖案間距會影響其活性大小，活性隨著預蝕刻圖案間距增加而增大。

圖 5 為具有與圖 4 相同預蝕刻圖案之試片，在 150 W 功率照光環境下，2 M 氟化銨溶液中，進行陽極動態極化曲線掃描所得之結果。如圖 5 所見，不論預蝕刻圖案之間距有何改變，其陽極動態極化曲線，在活化反應區之電流，均隨著電位的增加而增大，隨後，發生鈍化現象(電流隨著電位的增加而減小)，經此鈍化後電流又隨電位之增加而升高。有趣的是，鈍化現象會隨著預蝕刻圖案間距的增大而逐漸不明顯，圖案間距在達到 170 μm 時幾乎看不出鈍化現象。

圖 6 為預蝕刻試片 A(P₆₀)、B(P₈₀)、C(P₁₁₀)、D(P₁₄₀) 及 E(P₁₇₀)，在照光功率 150 W 環境下，浸漬於 2 M 氟化銨溶液中，採用定電位 0.8 V 光電化學蝕刻所得之蝕刻溝槽形貌。如果預蝕刻圖案間距由 60、80 及 110 μm 的逐漸增加，所得溝槽之寬度分別為 7、

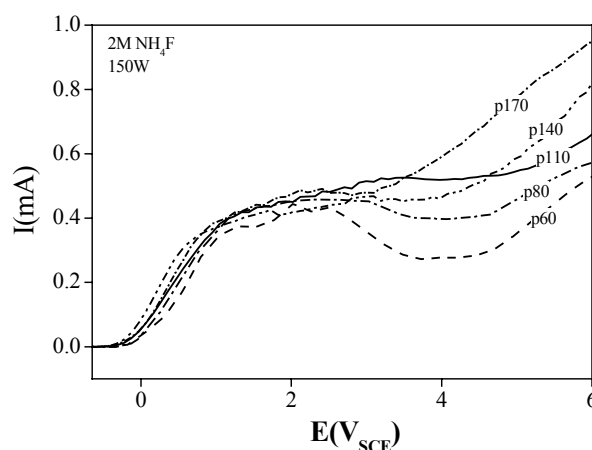


圖 5 在照光功率 150 W 之環境下，具預蝕刻圖案 A(P₆₀)、B(P₈₀)、C(P₁₁₀)、D(P₁₄₀) 及 E(P₁₇₀) 等試片於 2 M 氟化銨溶液中中之陽極動態極化曲線掃描。

Figure 5 The potentiodynamic polarization curves for the specimens with pre-etched specimens A(P₆₀), B(P₈₀), C(P₁₁₀), D(P₁₄₀) and E(P₁₇₀) in 2 M NH₄F solutions under illumination with a 150 W lamp.

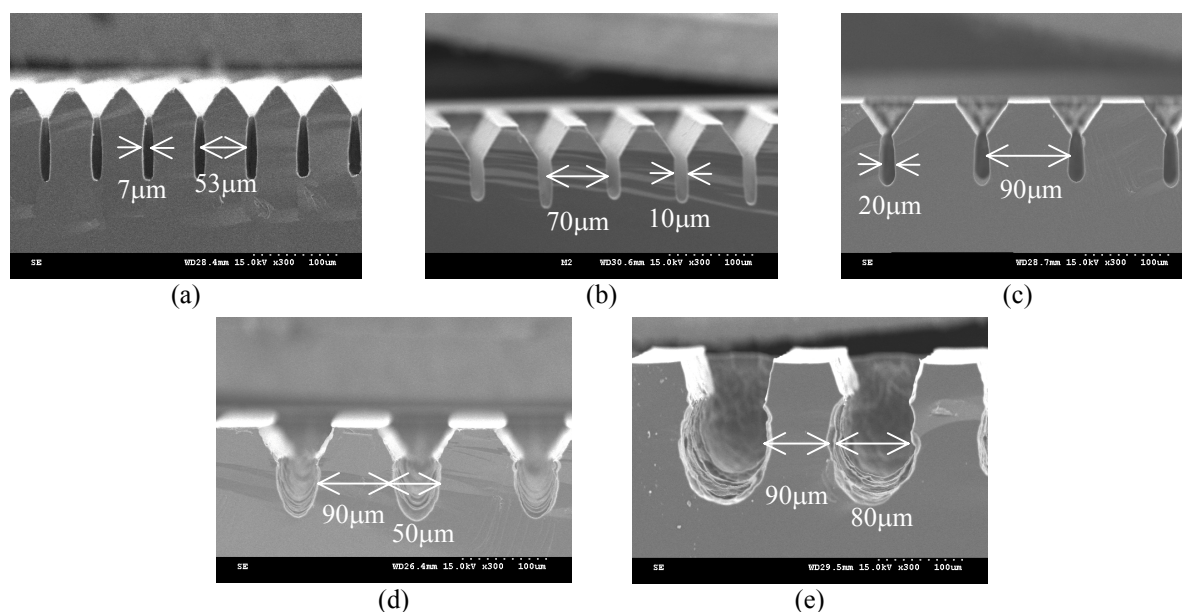


圖 6 照光功率 150 W 環境下，2 M 氟化銨溶液中，定電位 0.8 V 光電化學蝕刻 4 小時後，具預蝕刻圖案(a) P₆₀，(b) P₈₀，(c) P₁₁₀，(d) P₁₄₀ 及(e) P₁₇₀ 試片之 SEM 形貌。

Figure 6 The SEM micrographs for the specimens with pre-etched pattern (a) P₆₀, (b) P₈₀, (c) P₁₁₀, (d) P₁₄₀ and (e) P₁₇₀ illuminated with a 150 W-lamp and potentiostatically etched in 2 M NH₄F at 0.8 V for 4 h.

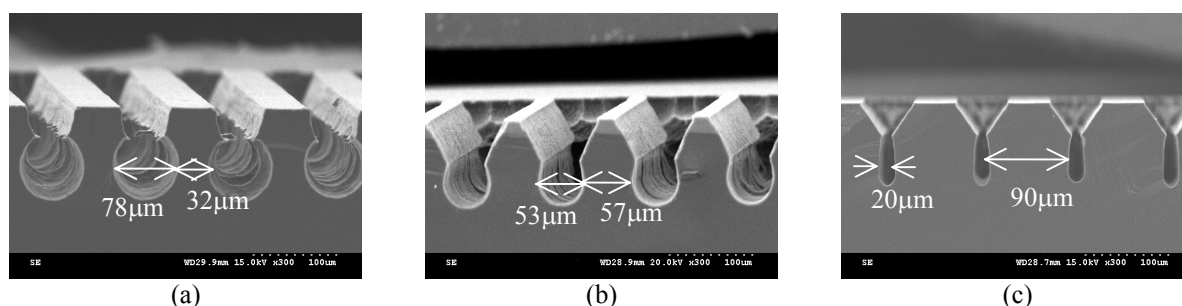


圖 7 具預蝕刻圖案 C(P₁₁₀)之試片在 150 W 照光環境下，2 M 氟化銨中，分別以(a) 0.1，(b) 0.3 及(c) 0.8 V 定電位光電化學蝕刻 4 小時後的 SEM 蝕刻形貌。

Figure 7 The SEM micrographs for the specimens with pre-etched pattern C(P₁₁₀) immersed in 2 M NH₄F and illuminated with a 150 W-lamp and potentiostatically etched at (a) 0.1V, (b) 0.3 V and (c) 0.8 V for 4 h.

10 及 20 μm，其溝壁皆接近一垂直之形狀，溝間之壁厚分別為 53、70 及 90 μm。然而，若預蝕刻圖案之間距達 140 及 170 μm，蝕刻所得之溝槽產生曲面之溝壁，溝槽之寬度大約分別為 50 及 80 μm，其溝壁之厚度皆約 90 μm。

3.2 改變蝕刻電位對蝕刻結果之影響

圖 7 為具有相同預蝕刻圖案 C(P₁₁₀)之試片，在

照光功率 150 W 環境下，濃度為 2 M 氟化銨溶液中，分別採用定電位在 0.1、0.3 及 0.8 V 下，進行光電化學蝕刻所得之溝槽形貌。由圖 7 所見，隨著蝕刻電位逐漸由 0.1、0.3 增加至 0.8 V，所得之溝槽，其寬度分別為 78、58 及 20 μm；而對應之溝壁厚，其厚度分別為 32、57 及 90 μm。此一結果顯示，在具有相同間距(110 μm)之預蝕刻圖案試片的光電化學蝕刻下，若增加蝕刻電位，則所得溝槽之壁厚對應增加。

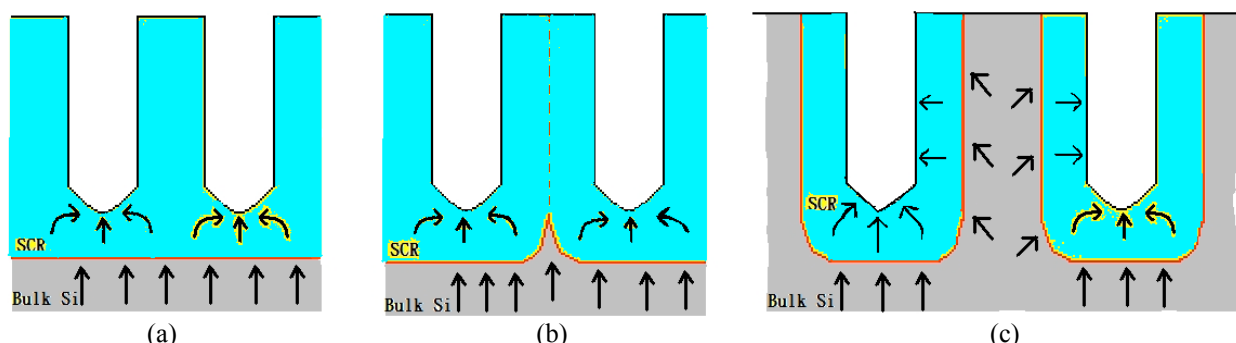


圖 8 試片中兩倍空間電荷層(厚度為 2W)內的電場分布與溝槽壁厚(T)之比較：(a) 2W > T，溝壁垂直，(b) 2W = T，溝壁也垂直，(c) 2W < T，溝壁擴大呈曲面。

Figure8 Schematic diagrams to describe the relationship between space charge region (SCR) and the direction of the electric field. The thickness for SCR (W) is compared with that of trench walls (T): (a) 2W > T leading to vertical walls, (b) 2W = T leading to also vertical walls, (c) 2W < T leading to curved walls.

4. 討論

4.1 固定外加電壓下預蝕刻圖案間距變化與空間電荷之關係

Foll 在研究氫氟酸的電化學矽蝕刻，發現 SCR 的分佈^[12]，會因電場變化、預蝕刻圖案之不同，而對蝕刻孔洞形貌有重要影響。空間電荷層之寬度(W)與電位間有式(1)之關係

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 V_B}{eN_D}} \quad (1)$$

其中

W：空間電荷層寬度(μm)

ε：矽晶片之介電常數(其值為 11 farad/m)

ε₀：真空介電常數(8.85×10⁻¹² farad/m)

e：電子電量(1.6×10⁻¹⁹ C)

N_D：摻雜濃度(1.8×10²⁰ m⁻³)

V_B：電位(V)

Foll 曾歸納出電場影響矽晶片的空間電荷層分佈，進而影響到其在氫氟酸中的蝕孔外貌，如圖 8 所示。在圖 8(a)、(b)中，若空間電荷層之兩倍(2W 或 2SCR)大於或等於孔壁厚度時，電場分佈集中於孔洞尖端，蝕刻反應垂直向下發展，而得到較垂直之孔壁。反之，在圖 8(c)，空間電荷層之兩倍小於孔壁厚度時，其電場不僅分佈在蝕孔下方，甚至也在孔壁有所分佈。此一電場誘導側壁蝕刻，造成側向蝕孔的發展，

而有曲面粗糙之孔壁形貌。此一公式是否適用於本系統為一有趣問題。為了探討此一問題，本研究乃將具有預蝕刻圖案 A(P₆₀)、B(P₈₀)、C(P₁₁₀)、D(P₁₄₀)及 E(P₁₇₀)之試片，以商用軟體 ANSYS 進行模擬，模擬時外加電位採用 0.8 V，所得預蝕刻圖案之電場分佈情況如圖 9 所示。其尖端電場分別為 5458、5744、6128、6506 及 6568 V/m。顯然，尖端電場隨著預蝕刻圖案中之間距增加而增大。若將尖端電場乘上預蝕刻尖端至試片底部距離(d)，則為尖端電位(V_T=E×d)，分別代入公式(1)計算，可得對應於圖案 A(P₆₀)、B(P₈₀)、C(P₁₁₀)、D(P₁₄₀)及 E(P₁₇₀)之 2W，分別為 80、82、88、90 及 91 μm。若將計算所得之 2W 及實際蝕刻溝槽之壁厚(圖 6)與圖案間距作圖即得圖 10。由圖 10 顯示，2W 之計算值與蝕刻後，溝槽之壁厚測量值十分接近。顯然，本系統之蝕孔壁厚受到空間電荷層寬度 W 的影響。

對於試片 A(P₆₀)及 B(P₈₀)，以 ANSYS 模擬所得之尖端電位代入公式(1)，計算可得 2W 分別為 80 及 82 μm，因 2W 皆大於其預蝕刻結構之實際間距(60 及 80 μm)。由蝕孔與電場分佈示意圖，如圖 8(a)，矽晶片之電洞聚集於蝕孔尖端，蝕孔有向下發展趨勢，終將獲得垂直蝕刻壁。檢查圖 6(a)及(b)之 SEM 蝕刻形貌，可以獲得驗證。若對試片 D(P₁₄₀)及 E(P₁₇₀)，2W 之計算值分別為 90 及 91 μm，因為 2W 小於其預蝕刻結構間距(140 及 170 μm)，其蝕刻模擬情況如圖 8(c)所示，矽晶片所產生之電洞會分布

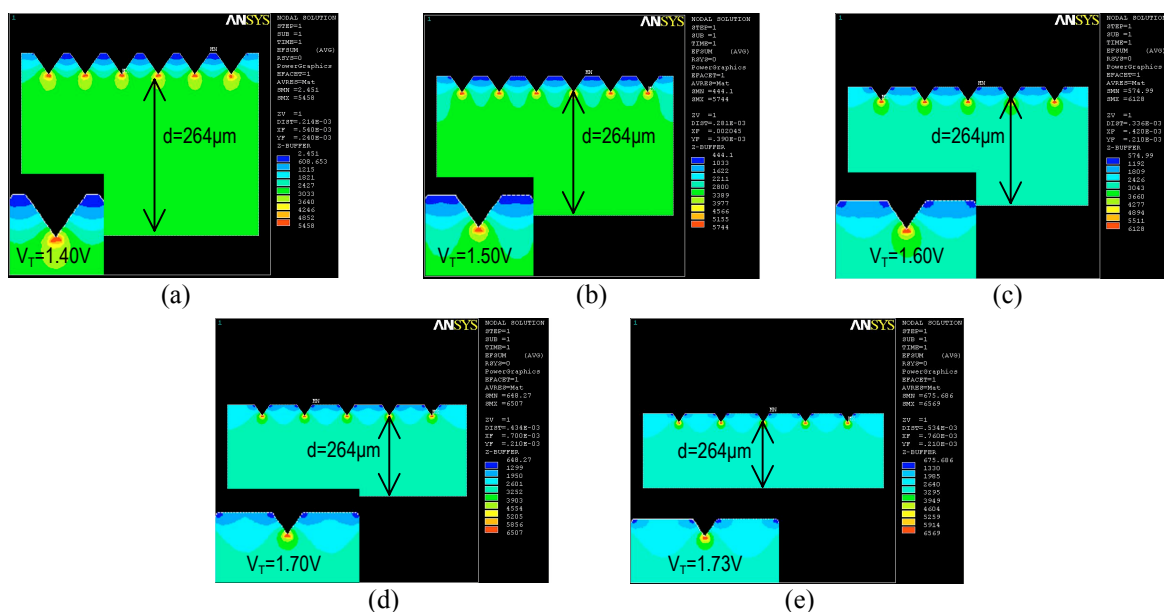


圖 9 利用 ANSYS 軟體模擬具預蝕刻圖案 (a) P_{60} 、(b) P_{80} 、(c) P_{110} 、(d) P_{140} 及 (e) P_{170} ，在外加電位 0.8 V 下蝕刻尖端之電場。(V_T：尖端電位)

Figure 9 The electric field at the tips of the pre-etching patterns (a) P_{60} , (b) P_{80} , (c) P_{110} , (d) P_{140} and (e) P_{170} simulated by software ANSYS at 0.8 V. (V_T : tip-potential)

於孔壁上，孔壁發生側蝕，造成蝕孔擴大，檢查圖 6(d)及(e)之 SEM 蝕刻形貌，可以獲得驗證，蝕孔因側蝕而擴大。因此若外加電位固定在 0.8 V 下，隨著圖案間距由 60 增大至 170 μm ，蝕刻溝槽寬度由 7 增大至 80 μm 。因為預蝕刻圖案間距的改變導致溝槽尖端電位有所差異，影響空間電荷層之分佈，造成蝕刻孔洞外型之變化。

4.2 固定預蝕刻圖案間距下，溝槽受外加電壓之影響

固定預蝕刻圖案在相同間距，藉由改變外加電壓，同樣可以探討預蝕刻槽尖端電位 分佈與蝕刻所得的溝槽間的形貌關係。由圖案 C(P_{110})之預蝕刻試片，分別在外加電位 0.1、0.3 及 0.8 V 下以 ANSYS 模擬其電場之分佈，結果如圖 11 所示。由圖 11 得知，外加電位分別在 0.1、.3 及 0.8 V 時，其對應之尖端電場分別為 766、2298 及 6128 V/m，將電場大小換算為尖端電位，可得預蝕刻結構尖端電位分別為 0.2、0.6 及 1.6 V。將尖端電位分別代入公式(1)計算 2W 分別為 30、54 及 88 μm 。觀察圖 11 之電場模擬並對照比較圖 7 之蝕刻結構，可證實尖端電位

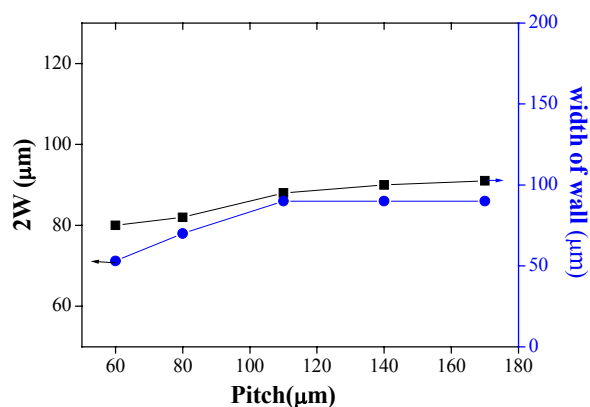


圖 10 試片具預蝕刻圖案 A(P_{60})、B(P_{80})、C(P_{110})、D(P_{140})及 E(P_{170})其兩倍空間電荷層(厚度為 2SCR)、溝槽壁厚與預蝕刻圖案間距之關係。

Figure 10 The thickness of the space charge region and the width of trench walls as a function of pitch length for the specimens with pre-etched patterns A(P_{60}), B(P_{80}), C(P_{110}), D(P_{140}) and E(P_{170}).

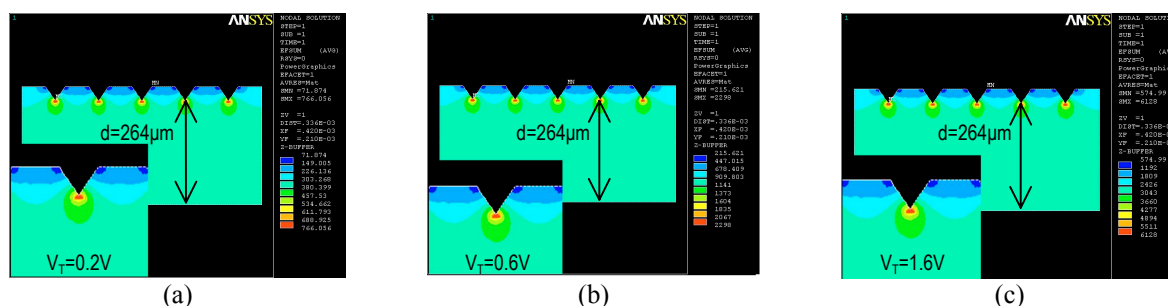


圖 11 利用 ANSYS 軟體模擬具預蝕刻圖案(P₁₁₀)之試片，在外加電位 (a) 0.1 V，(b) 0.3 V 及(c) 0.8 V 下蝕刻圖案尖端之電場大小。

Figure 11 The electric field at the tips of the pre-etched pattern C(P₁₁₀) at (a) 0.1, (b) 0.3, and (c) 0.8 V simulated by software ANSYS.

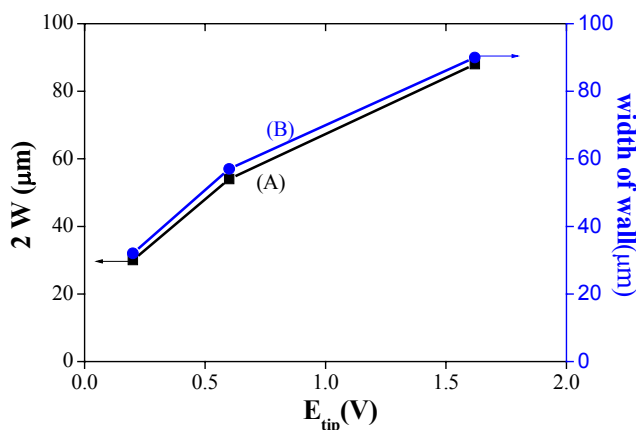


圖 12 試片具預蝕刻圖案(P₁₁₀)其兩倍空間電荷層(厚度為 2SCR)、溝槽壁厚與預蝕刻圖案尖端電位之關係。
Figure 12 The thickness of the space charge region (curve A) and the width of trench walls (curve B) as a function of the electric field strength at tips for the specimens with pre-etched pattern C(P₁₁₀).

影響蝕刻孔洞之外貌，此與空間電荷層分佈有關。若 $2W$ 等於預蝕刻圖案間距，電洞集中孔洞尖端，溝壁垂直，如圖 7(c)；若 $2W$ 小於預蝕刻圖案間距，部份電洞分佈於孔壁上，造成側蝕，而使溝壁成粗糙之曲面結構，如圖 7(a)及(b)。

將計算之 $2W$ 值及蝕刻溝槽之實際壁厚與預蝕刻圖案之尖端電位關係作圖，如圖 12 所示。如圖 12 所見，蝕刻所得溝槽之壁厚與計算所得之 $2W$ 相當接近。顯示出蝕刻溝槽壁厚與空間電荷層寬度 W 有關，蝕刻反應受到空間電荷層分佈之影響，溝槽壁厚恰等於 $2W$ 值。觀察圖 12，可以發現在相同預蝕刻圖案間距(110 µm)下，若其蝕孔尖端電位增大，其蝕刻所得溝槽之壁厚對應增大。顯然尖端電位的

變化，會影響矽晶片空間電荷層之分佈，進而造成蝕刻溝槽形貌上之差異。

綜合而言，蝕刻溝槽之壁厚及溝壁之外型(垂直或曲面擴孔)與空間電荷層分佈有關，而空間電荷層分佈又受到預蝕圖案尖端之電位影響。由預蝕刻圖案以 ANSYS 電場模擬分析可以求出尖端電位，再由尖端電位依據公式(1)求得空間電荷層寬度。由此用來預估蝕刻所得溝槽壁厚及溝壁外貌。控制外加電位或改變預蝕圖案之間距，均可控制蝕孔尖端之電位，影響空間電荷層 W ，使得 $2W$ 不小於預蝕刻圖案之間距，則可獲垂直之溝壁；反之若 $2W$ 小於預蝕刻圖案間距，則孔壁發生側蝕，造成擴孔之曲面溝壁。

5. 結論

1. n-矽(100)單晶在 2 M 氟化銨中，150 W 照光下，在 0.8 V 定電位下進行光電化學蝕刻，試片若預蝕刻圖案間距在 60、80 及 110 μm ，所得為垂直溝壁之溝槽；若預蝕刻圖案間距達 140 及 170 μm ，蝕刻所得為曲面溝壁之溝槽。
2. 若試片在具有相同預蝕刻圖案間距(110 μm)下進行光電化學蝕刻，隨著蝕刻電位由 0.1、0.3 增加至 0.8 V，所得之矩形溝槽寬度，由 78、58 減少至 20 μm ，而壁厚則自 32、57 增至 90 μm 。
3. 利用商用軟體 ANSYS 以及 Foll 氫氟酸電化學蝕刻矽的空間電荷分佈理論，可以成功解釋上述氟化銨系統中的光電化學蝕刻行為。
4. 在氟化銨的光電化學蝕刻系統中，適當外加電位及預蝕刻圖案間距，即可控制尖端電位，若在兩倍空間電荷厚度(2W)不小於預蝕刻結構之間距，則可獲得垂直溝壁之溝槽結構；反之，若 2W 小於預蝕刻結構之間距，則呈曲面溝壁之溝槽。

致謝

本研究承蒙國科會補助經費(計畫編號 NSC-93-2118-E-008-009)謹此致謝。

參考文獻

1. A. Uhlir, Bell Syst. Techn. J., 35 (1956) 333.
2. V. Lehmann and H. Foll, "Formation mechanism and properties of electrochemically etched trenches in n-type silicon," J. Electrochem. Soc., 137 (1990) 653.
3. H. Ohji, P. T. J. Gennissen, P. J. French, and K. Tsutsumi, "Fabrication of a beam-mass structure using single-step electrochemical etching for micro structures (SEEMS)," J. Micromech. Microeng., 10 (2000) 440.
4. H. Ohji, P.J. Trimp, and P.J. French, "Fabrication of free standing structure using single step electrochemical etching in hydrofluoric acid," Sens. Actuators A, 73 (1999) 95.
5. J. A. Walker, "The future of MEMS in telecommunications networks," J. Micromech. Microeng., 10 (2000) R1.
6. J. Von Behren, L. Trubeskov, and P. M. Fauchet, "Preparation and characterization of ultrathin porous silicon films," Appl. Phys. Lett., 66 (1995) 1662.
7. R. Angelucci, A. Poggi, and L. Dori, "Permeated porous silicon for hydrocarbon sensor fabrication," Sens. Actuators A, 74 (1999) 1.
8. H. J. Lewerenz and H. Jungblut, "Surface analysis of the electropolishing layer on Si(111) in ammonium fluoride solution," Electrochimica Acta, 45 (2000) pp. 4615 ~ 4627.
9. Jian Hua Ouyang and Xin Sheng Zhao, "Direct measurement of the etching rates on Si(111) and silicon dioxide surfaces in 40% ammonium fluoride aqueous solution via atomic force microscopy," Journal of Applied Physics, 93 (2003) 4315.
10. V. Lehmann and H. Foll, "Formation mechanism and properties of electrochemically etched trenches in n-type silicon," J. Electrochem. Soc., 137 (1990) 653.
11. Hirokazu Fukidome and Michio Matsumura, "Electrochemical study of atomically flattening process of silicon surface in 40% NH_4F solution," Applied Surface Science, 130-132 (1998) pp. 146 ~ 150.
12. H. Foll, M. Christophersen, J. Carstensen, and G. Hasse, "Formation and application of porous silicon," Materials Science and Engineering, R 39 (2002) pp. 93 ~ 141.

收到日期：2005 年 8 月 25 日

修訂日期：2006 年 3 月 30 日

接受日期：2006 年 4 月 17 日

