

## บทที่ 4

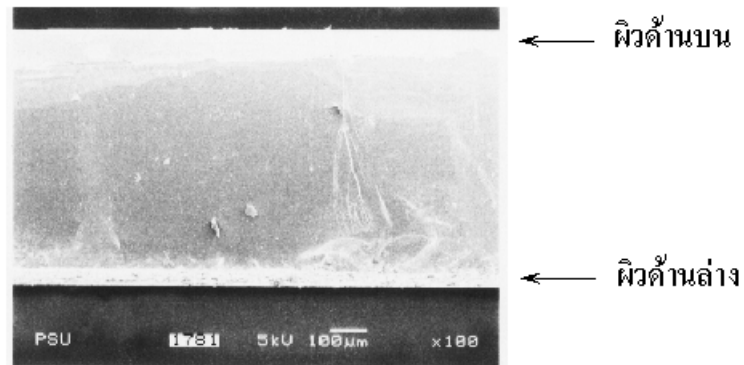
### ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ผลของการศึกษาจุลโครงสร้างโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดและชนิดส่องผ่าน และผลของการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยการสร้างเป็นตัวเก็บประจุมอสและวัดค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน

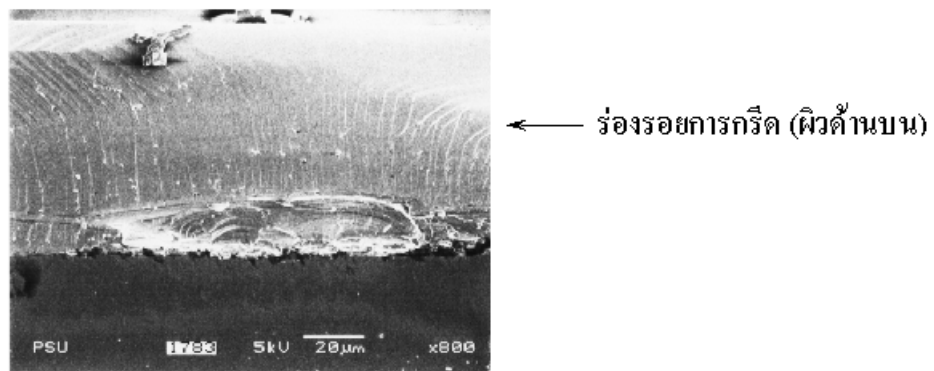
#### 1. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

ภาพถ่ายจากจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดนี้ เป็นตัวอย่างผลึกเดี่ยวซิลิกอนที่นำมาทดลองศึกษาจุลโครงสร้างของวัตถุ คือต้องการดูชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าผลึกเดี่ยวซิลิกอน โดยมาจากการเตรียมตัวอย่าง 3 วิธี คือ การเตรียมตัวอย่างโดยการตัดด้วยปากกาหัวเพชร การเตรียมตัวอย่างโดยการตัดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก และการเตรียมโดยการกัดด้วยสารเคมี

1.1 ภาพถ่ายตัวอย่างที่ตัดด้วยปากกาหัวเพชร มี 2 ลักษณะคือตัดโดยกริดตัวอย่างบริเวณผิวหน้าด้านบนซึ่งเป็นชั้นออกไซด์ (มีสีเขียว) และโดยการกริดตัวอย่างบริเวณผิวหน้าด้านล่าง (สีเทา) แล้วนำไปถ่ายภาพ ได้ภาพดังภาพประกอบที่ 4.1 และภาพประกอบ 4.2 จากภาพประกอบที่ 4.1 (ก) วัดความหนาของตัวอย่างซิลิกอนได้ 669 ไมโครเมตร สังเกตเห็นชั้นด้านบนและด้านล่างมีความหนา 83 ไมโครเมตร และ 48 ไมโครเมตร ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 4.1 (ข) เป็นภาพขยายบริเวณด้านบนของตัวอย่าง ซึ่งมีชั้นของตัวอย่าง 2 ชั้น คือชั้นด้านบนที่มีความหนาเล็กน้อย 7 ไมโครเมตรและชั้นที่ 2 หนา 76 ไมโครเมตร วัดจากด้านบน จากภาพทั้งสองนี้คาดว่าชั้นด้านบนอาจจะเป็นชั้นของออกไซด์ แต่เมื่อนำความหนาของชั้นออกไซด์จากภาพเทียบกับความหนาที่บอกไว้ในเอกสารต่าง ๆ พบว่ามีค่าแตกต่างกันมาก คือปกติชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองจากการออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศมีความหนาประมาณ 5-10 อังสตรอม ( $10^{-10}$  เมตร) หากเป็นออกไซด์ที่เกิดจากการสร้างขึ้นมาจะไม่หนาเช่นนี้ และจากภาพประกอบที่ 4.2 เมื่อตัดตัวอย่างโดยการกริดบริเวณผิวด้านล่างกลับไม่พบชั้นด้านบนของตัวอย่าง ดังนั้นชั้นที่ปรากฏในภาพประกอบที่ 4.1 ที่คาดว่า เป็นชั้นออกไซด์ที่ผิวนั้นอาจจะเป็นความเสียหายของตัวอย่างเนื่องจากแรงกระทำจากการตัด

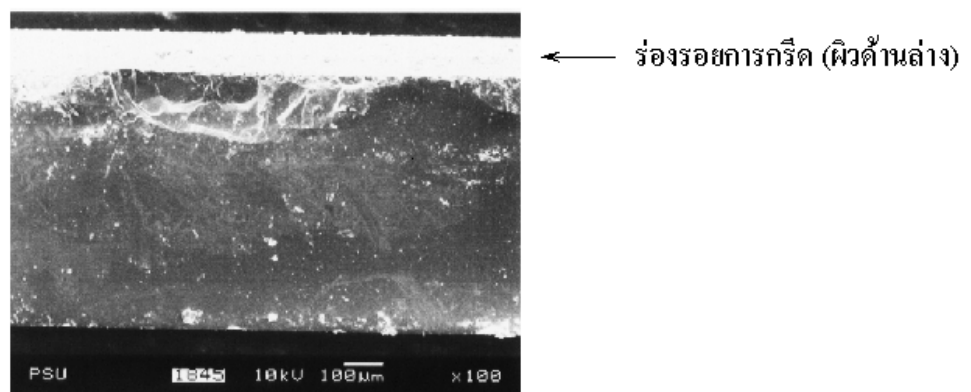


ก)



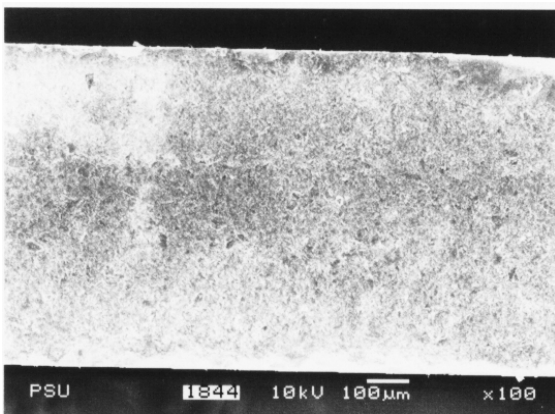
ข)

ภาพประกอบที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายไมโครกราฟของตัวอย่างซิลิกอนที่ตัดด้วยปากกาเพชรโดยการกรีดที่ผิวด้านบน (ก) ตัวอย่างทั้งหมด (ข) ขยายบริเวณด้านบน

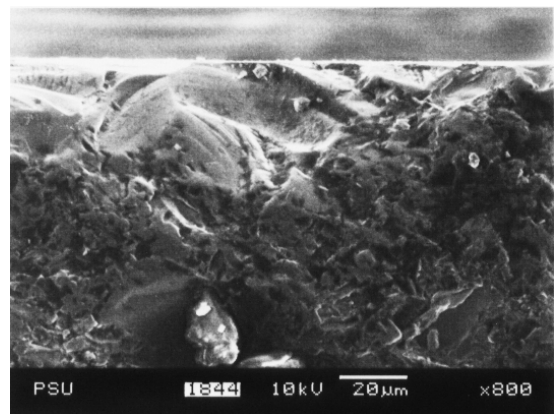


ภาพประกอบที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายไมโครกราฟของตัวอย่างซิลิกอนที่ตัดโดยปากกาหัวเพชรโดยการกรีดที่ผิวด้านบน (บริเวณด้านบนของภาพเป็นบริเวณด้านล่างของตัวอย่าง)

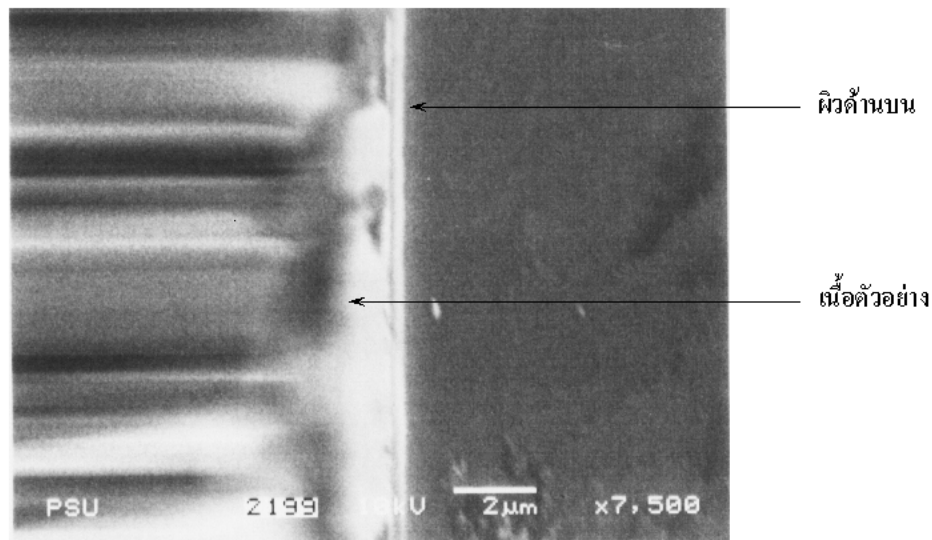
1.2 ภาพถ่ายตัวอย่างที่ตัดด้วยเครื่องตัดอัลตราโซนิก ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ตัดตัวอย่างโดยอาศัยการสั่นของหัวตัดด้วยความถี่เหนือเสียง หลังจากตัดนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเพื่อให้พื้นผิวของตัวอย่างดีขึ้น และถ่ายภาพได้ภาพดังภาพประกอบที่ 4.3 (ก) และ 4.3 (ข) พบว่าไม่มีชั้นของตัวอย่างเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องตัดอัลตราโซนิกไม่ทำให้เกิดแรงที่ทำความเสียหายต่อตัวอย่าง และการขัดด้วยกระดาษทรายทำให้พื้นผิวของตัวอย่างดีขึ้น



(ก)



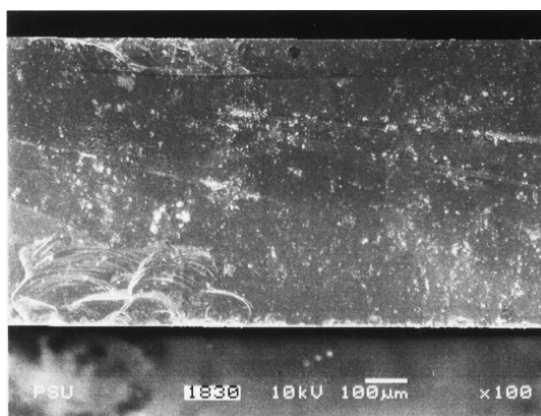
(ข)



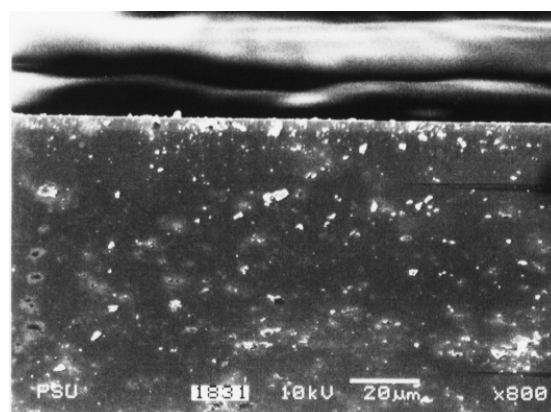
ภาพประกอบที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายไมโครกราฟของตัวอย่างซิลิกอนที่ตัดด้วยเครื่องตัดอัลตราโซนิก  
 (ก) ตัวอย่างทั้งหมด (ข) ขยายบริเวณด้านบน (วางตัวอย่างลักษณะเดียวกับภาพประกอบ 4.1) (ค) ขยายบริเวณด้านบน (วางตัวอย่างในแนวตั้งฉาก)

เมื่อคำนวณสเกลของภาพประกอบที่ 4.3 (ข) ซึ่งถ่ายด้วยกำลังขยาย 800 เท่า กำลังขยายดังกล่าวต่ำเกินไปหากชั้นออกไซด์มีความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตร จึงเพิ่มกำลังขยายในการถ่ายภาพขึ้นอีก สามารถถ่ายภาพได้ที่กำลังขยายที่มากที่สุด 7,500 เท่า เนื่องจากเมื่อเพิ่มกำลังขยายมากขึ้นภาพถ่ายจะไม่คมชัด ดังภาพประกอบที่ 4.3 (ค) จากภาพเห็นความแตกต่างของชั้นที่อยู่บริเวณผิวหน้า ด้านบนวัดความหนาได้ 380 นาโนเมตร แต่อย่างไรก็ตามชั้นด้านบนที่ปรากฏอาจเกิดจากการให้สัญญาณภาพบริเวณขอบที่ผิดปกติเมื่อกำลังขยายสูงขึ้น

1.3 ภาพถ่ายตัวอย่างที่กัดด้วยสารเคมี ซึ่งมีวิธีการกัด 2 วิธี คือ กัดด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออริก และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สารละลายไฮโดรฟลูออริกซึ่งเป็นกรดที่ใช้กัดออกไซด์ หลังจากการกัดพบว่าชั้นออกไซด์ด้านบนซึ่งเป็นสีเขียวถูกกัดออกไปเหลือเฉพาะชั้นซิลิกอนที่เป็นสีเทา ถ่ายภาพได้ภาพดังภาพประกอบที่ 4.4 (ก) และ 4.4 (ข) เมื่อวัดขนาดของตัวอย่างที่กัดแล้วนี้พบว่าความหนามีค่าเท่ากับความหนาในภาพประกอบที่ 4.1 (ก) ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ยังไม่ได้กัด จึงคาดว่าชั้นออกไซด์ที่ถูกกัดออกไปนั้นมีความหนาน้อยมากในระดับนาโนเมตรจึงไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยการถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายต่ำ

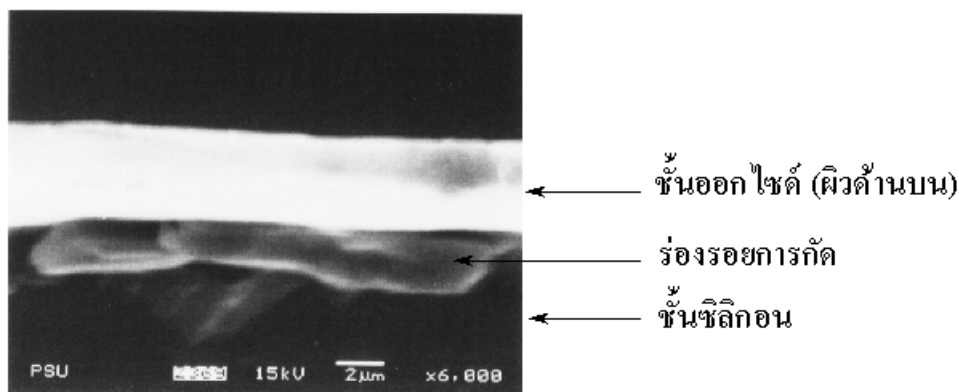


(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายไมโครกราฟของตัวอย่างซิลิกอนที่กัดด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออริก (ก) ตัวอย่างทั้งหมด (ข) ขยายบริเวณด้านบน (วางตัวอย่างลักษณะเดียวกับภาพประกอบ 4.1)



ภาพประกอบที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายไมโครกราฟของตัวอย่างซิลิกอนที่กัดด้วยสารละลาย โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์

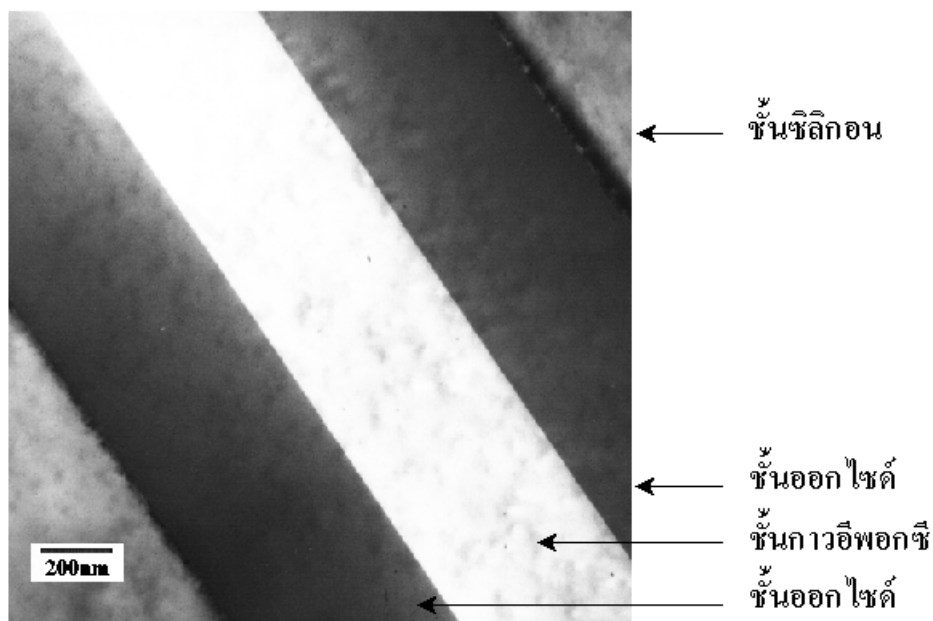
แต่เมื่อกัดด้วยสารละลายโพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารที่ใช้กัดซิลิกอน ภายหลังกัด สังเกตเห็นว่าชั้นซิลิกอนที่อยู่ตรงรอยต่อของชั้นออกไซด์กับชั้นซิลิกอนนั้นถูกกัดเป็นร่องออกไป พบว่าเมื่อใช้เวลาในการกัดนานขึ้นชั้นซิลิกอนจะถูกกัดมากขึ้นและชั้นออกไซด์ก็จะถูกกัดไปด้วย ดังนั้นจึงเลือกตัวอย่างที่เพิ่งเริ่มกัดซิลิกอนเพียงน้อย ๆ ไปถ่ายภาพที่กำลังขยายสูง ได้ภาพดังภาพประกอบที่ 4.5 ซึ่งปรากฏเป็นร่องรอยของซิลิกอนที่ถูกกัดออกไป จึงวัดความหนาด้านบนซึ่งคาดว่า จะเป็นชั้นออกไซด์ได้ 3.69 ไมโครเมตร ซึ่งยังเป็นค่าที่มากเกินไปสำหรับชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นเอง จึงอาจเป็นชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการสร้างขึ้น

## 2. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน ได้แก่ ภาพถ่ายภาคตัดขวางของตัวอย่างผลึกเดี่ยวซิลิกอน ตัวอย่าง ไชมอกซ์ และตัวอย่าง ไชมอกซ์ ที่สร้างเป็นตัวเก็บประจุมอสซึ่งจะแสดงในหัวข้อที่ 3

2.1 ภาพถ่ายของตัวอย่างผลึกเดี่ยวซิลิกอน แสดงในภาพประกอบที่ 4.6 จากภาพแสดงความหนาของชั้นออกไซด์ที่อยู่บนชั้นซิลิกอนทั้งสองด้านของกาว วัดความหนาของชั้นทั้งสองด้านซึ่งมีค่าเท่ากัน นั่นคือ ชั้นออกไซด์หนา 250 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบค่านี้กับค่าที่ได้จากภาพถ่ายของจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดของตัวอย่างซิลิกอนที่กัดด้วยสารละลายโพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์ ในภาพประกอบ 4.5 ซึ่งได้ความหนาของชั้นออกไซด์ถึง 3.69 ไมโครเมตร จากการถ่ายภาพทั้งสองแบบให้ค่าความหนาของชั้นออกไซด์มีค่าแตกต่างกันมาก แต่ค่าที่น่าเชื่อถือมากกว่าคือค่าที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านเนื่องจากให้ภาพถ่ายที่คมชัดและไม่มีความเสี่ยงของตัวอย่าง และการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดอาจทำให้

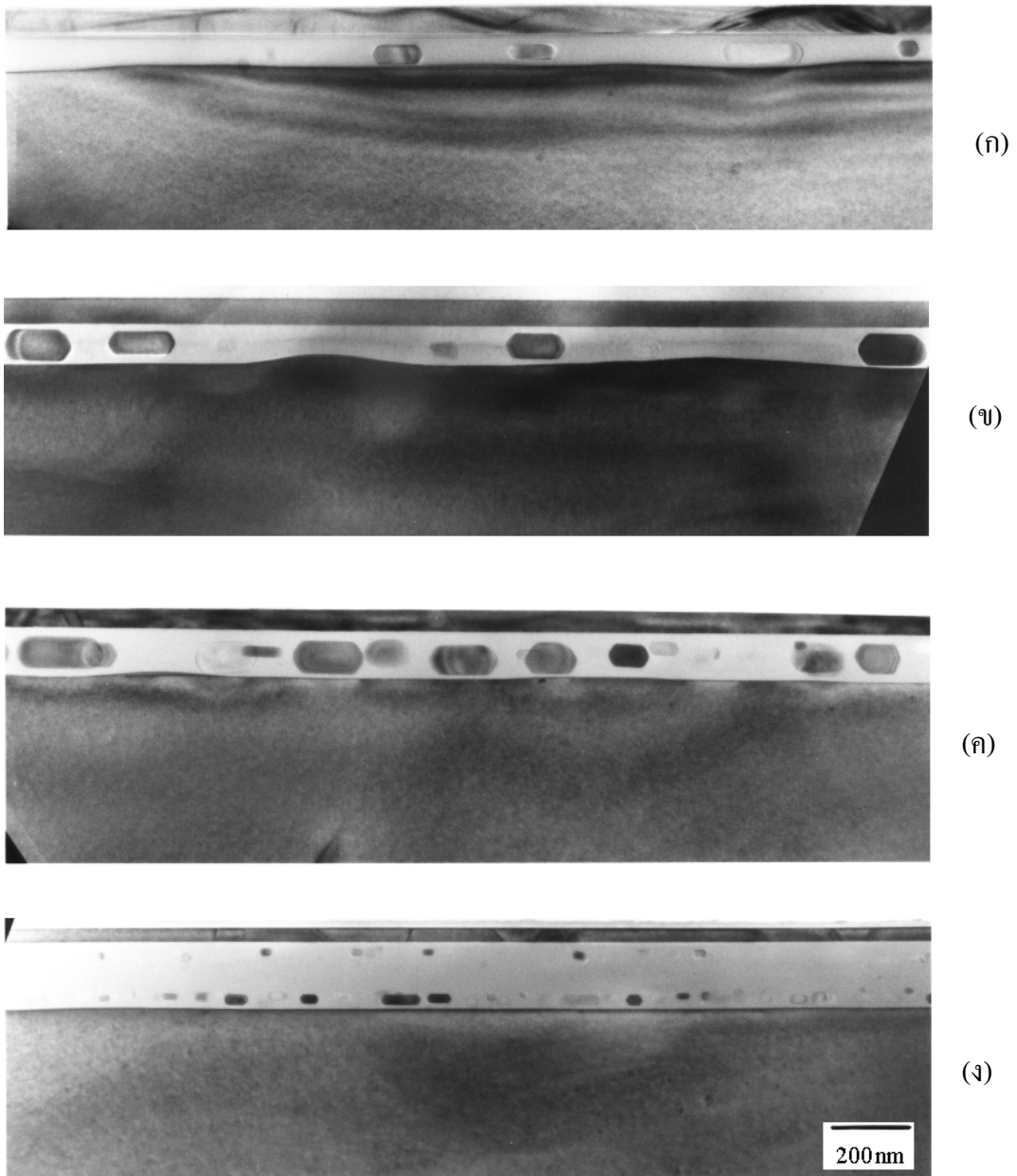
ได้ความหนาของตัวอย่างผิดจากความเป็นจริงเนื่องจากการเอียงตัวอย่างหรืออาจเกิดจากการกัดตัวอย่าง สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อาจจะไม่กัดบริเวณรอยต่อชั้นซิลิกอนกับชั้นออกไซด์แต่จะกัดบริเวณชั้นซิลิกอนที่อยู่ห่างจากรอยต่อออกมา



ภาพประกอบที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายไมโครกราฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านของผลึกเดี่ยวซิลิกอน (กำลังขยาย  $1.25 \times 10^4$  เท่า)

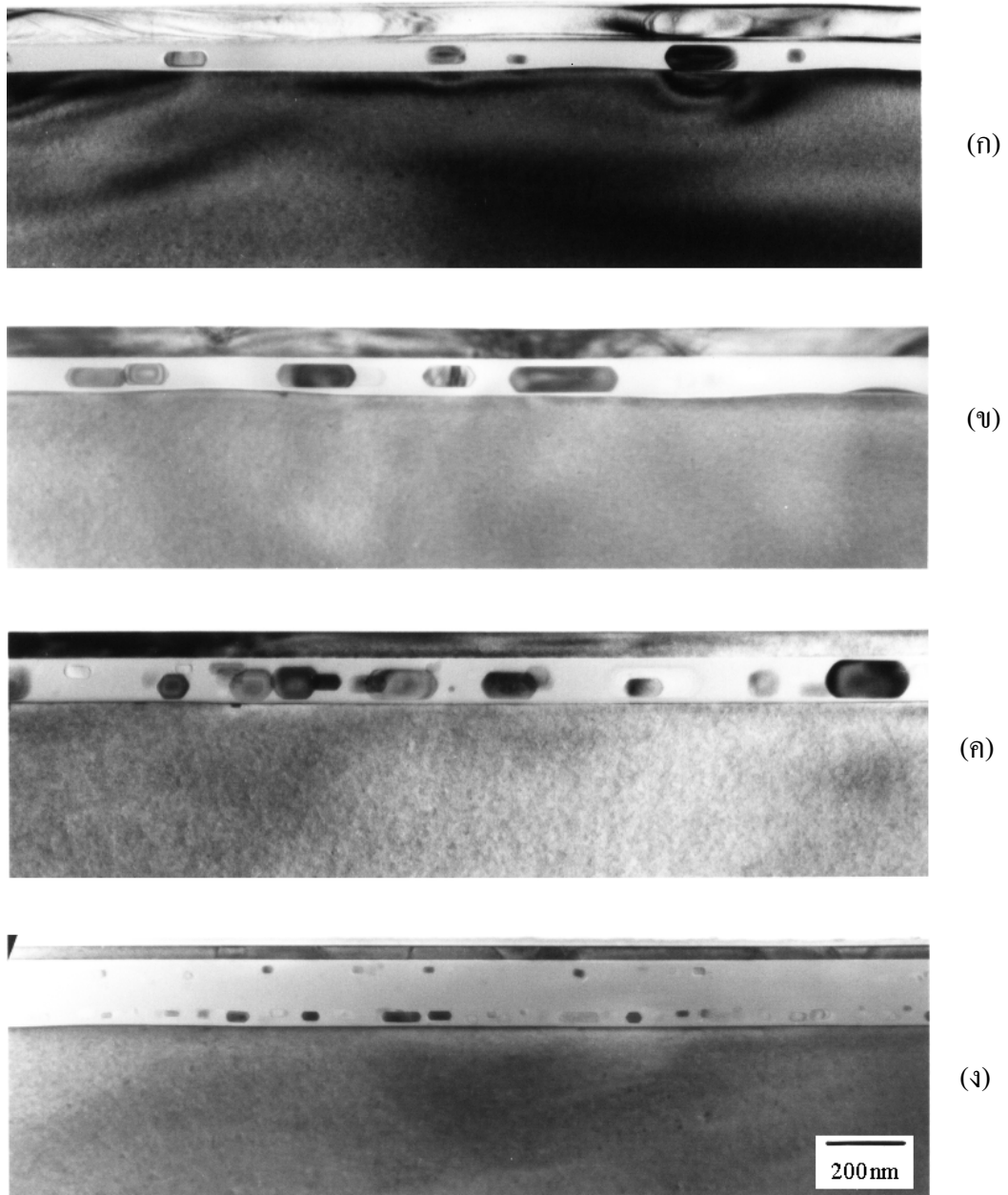
2.2 ภาพถ่ายตัวอย่างไซมอกซ์ ที่ฝังไอออนออกซิเจนที่ฝังออกซิเจน 3, 3.5, 4 และ  $7 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร ของตัวอย่างที่อบให้ความร้อนโดยไม่มีชั้นป้องกันผิว และมีชั้นป้องกันผิวดังภาพประกอบ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

<sup>1</sup> กำลังขยายในที่นี้คือกำลังขยายของกล้อง



ภาพประกอบที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายไมโครกราฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านของไซมอกซ์ ที่อบให้ความร้อนโดยไม่มีชั้นป้องกันผิวที่ฝังไอออนออกซิเจน ปริมาณ ก)  $3 \times 10^{17}$  ข)  $3.5 \times 10^{17}$  ค)  $4 \times 10^{17}$  ง)  $7 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร (กำลังขยาย<sup>2</sup>  $1.6 \times 10^5$  เท่า)

<sup>2</sup> กำลังขยายในที่นี้และต่อจากนี้ไปคือกำลังขยายของกล้องบวกกับกำลังขยายในการอัดภาพ



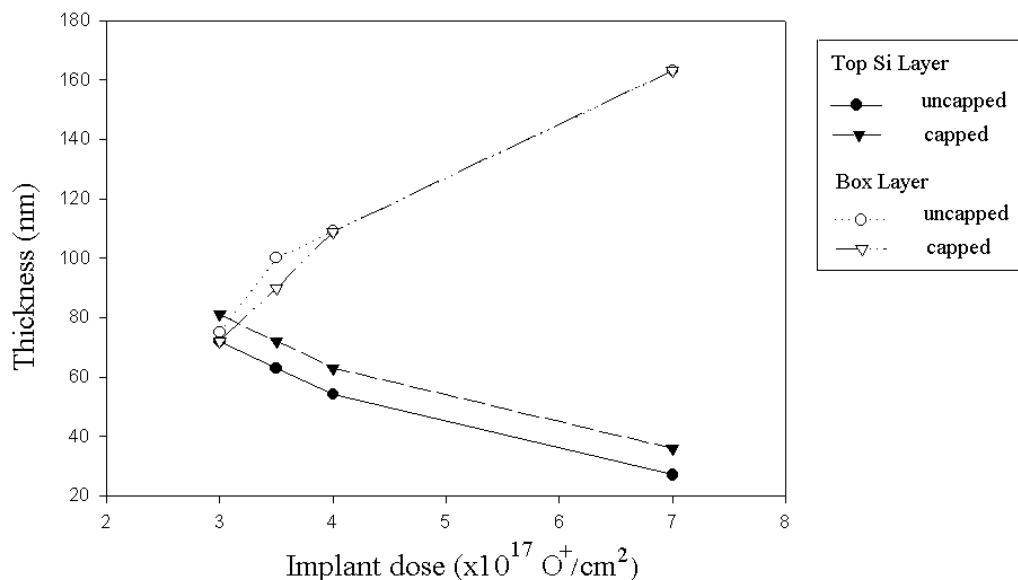
ภาพประกอบที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายไมโครกราฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านของไซมอกซ์ ที่อบให้ความร้อนโดยมีชั้นป้องกันผิว ที่ฝังไอออนออกซิเจน ปริมาณ ก)  $3 \times 10^{17}$  ข)  $3.5 \times 10^{17}$  ค)  $4 \times 10^{17}$  ง)  $7 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร (กำลังขยาย  $1.6 \times 10^5$  เท่า)

จากภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน ในภาพประกอบที่ 4.7 และ 4.8 แสดงถึงโครงสร้างของไซมอกซ์ ซึ่งประกอบด้วย 3 ชั้น อย่างเห็นได้ชัดคือชั้น ซิลิกอนด้านบน ชั้นออกไซด์



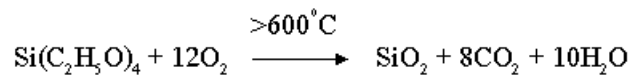
ได้ผิวซิลิคอน และชั้นฐานซิลิคอน ทุกปริมาณการฝังไอออนทำให้ชั้นออกไซด์ต่อเนื่อง ซึ่งแสดงถึงว่า ปริมาณออกซิเจนดังกล่าวเพียงพอที่จะทำให้ชั้นออกไซด์ต่อเนื่องที่การฝังไอออนด้วยพลังงาน 65 keV แต่ทุกตัวอย่างจะปรากฏกลุ่มก้อนซิลิคอนภายในชั้นออกไซด์ ตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิวจะมีความหนาแน่นของกลุ่มก้อนซิลิคอนน้อยกว่า ตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิว ทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิวนั้นในระหว่างการอบให้ความร้อนออกซิเจนที่อยู่รอบ ๆ จะสามารถแพร่ (diffusion) เข้ามาในชั้นออกไซด์ซึ่งจะทำให้เกิดการออกซิไดซ์ (oxidize) กับกลุ่มก้อนซิลิคอนบางส่วนที่แทรกอยู่ในชั้นออกไซด์ซึ่งสามารถลดปริมาณของกลุ่มก้อนซิลิคอนในชั้นออกไซด์ได้ แต่อย่างไรก็ตามการฝังออกซิเจนที่ 65 keV ด้วยปริมาณ 3, 3.5, 4 และ  $7 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณออกซิเจนที่อยู่รอบและเวลาในการอบให้ความร้อนที่ใช้จะไม่สามารถเติมให้ชั้นออกไซด์สมบูรณ์ได้ จากงานวิจัยของ Jiao (2000) พบว่าปริมาณการฝังออกซิเจนที่เหมาะสมสำหรับการฝังออกซิเจนที่พลังงาน 65 keV คือปริมาณ  $2 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร สำหรับตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิว และ  $2.5 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตรสำหรับตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิว

ปริมาณการฝังออกซิเจนยังมีผลต่อความหนาของชั้นซิลิคอนและชั้นออกไซด์ ทั้งตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิวและมีชั้นป้องกันผิว คือความหนาของชั้นซิลิคอนจะลดลง เมื่อปริมาณการฝังออกซิเจนเพิ่มขึ้น และความหนาของชั้นออกไซด์จะมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการฝังออกซิเจนเพิ่มขึ้น ดังกราฟในภาพประกอบ 4.9

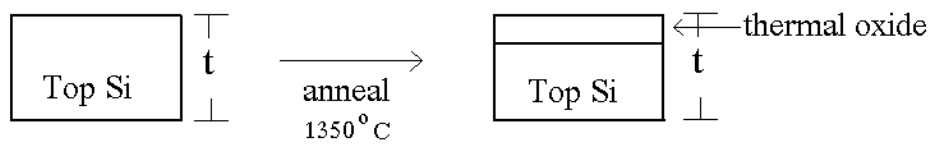


ภาพประกอบที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการฝังไอออนออกซิเจนกับความหนาของชั้นซิลิคอนและชั้นออกไซด์

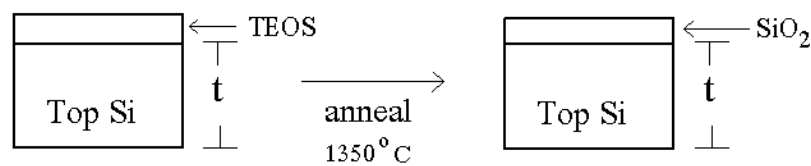
การหนาขึ้นของชั้นออกไซด์ที่ฝังไอออนทำให้ชั้นซิลิกอนมีการสูญเสียไป และที่ปริมาณการฝังออกซิเจนเดียวกันของตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิวและไม่มีชั้นป้องกันผิว ความหนาของชั้นซิลิกอน ของตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิวบางกว่าตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิวเนื่องจากเกิดการออกซิเดชันบริเวณผิวหน้าซิลิกอนในระหว่างการอบให้ความร้อนทำให้มีการสูญเสียไปของชั้นซิลิกอนประมาณ 9 นาโนเมตร ส่วนตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิวด้วย TEOS เมื่อมีการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง (>600°C) ทำให้ TEOS สลายเหลือแต่เพียงชั้นออกไซด์ ดังปฏิกิริยา



และชั้นดังกล่าวยังป้องกันไม่ให้เกิดการออกซิเดชันทางความร้อนของผิวหน้าซิลิกอนจึงทำให้ความหนาของชั้นซิลิกอนยังคงเท่าเดิม การเกิดชั้นออกไซด์บนผิวหน้าซิลิกอนดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังภาพประกอบที่ 4.10



ก)



ข)

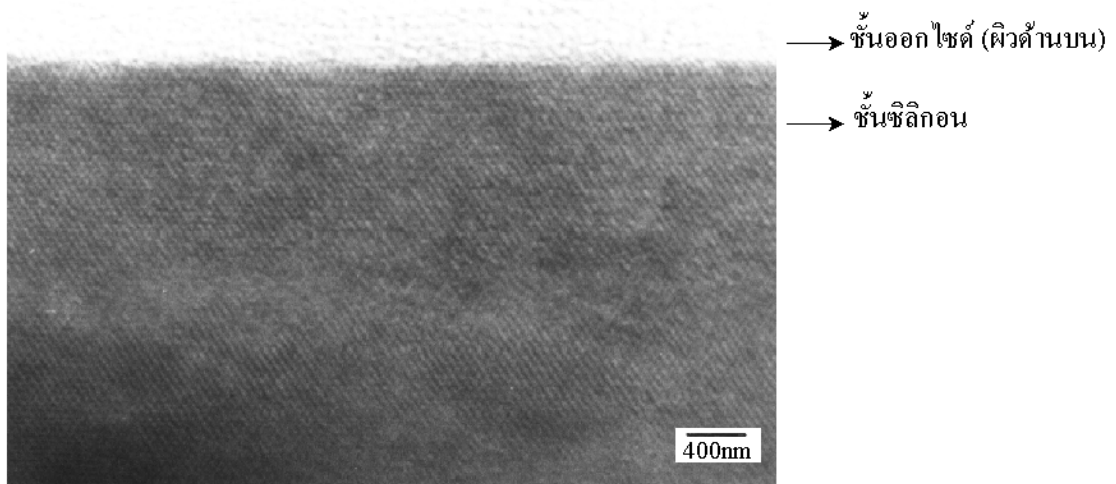
ภาพประกอบที่ 4.10 ไดอะแกรมแสดงการเกิดชั้นออกไซด์บริเวณผิวหน้าซิลิกอน ก) ตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิว ข) ตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิว

ดังนั้นภายหลังจากการอบให้ความร้อนชั้นซิลิกอนของตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิวจะมีค่าเท่ากับความหนาของชั้นซิลิกอนก่อนการอบให้ความร้อน (t) ลบด้วยความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกิด

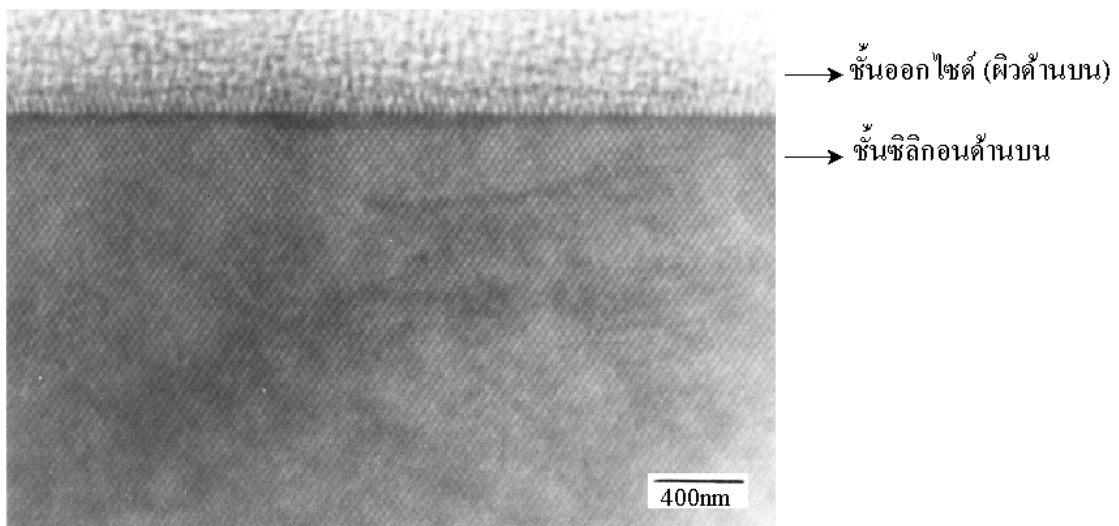
จากการออกซิเดชันทางความร้อน สำหรับตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิวความหนาของชั้นซิลิกอนจะยังคงเท่าเดิม

ส่วนความหนาของชั้นออกไซด์ได้ผิวซิลิกอนที่ปริมาณการฝังไอออนออกซิเจนเดียวกัน สำหรับตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิวและมีชั้นป้องกันผิวนั้นมีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าในระหว่างการอบให้ความร้อนออกซิเจนจากภายนอกจะทำให้ชั้นออกไซด์ที่ฝังไอออนเติบโตขึ้นทางด้านข้าง (lateral direction) เท่านั้น ซึ่งมีส่วนในการเกิดออกไซด์ชั้กับกลุ่มก้อนซิลิกอนทำให้กลุ่มก้อนซิลิกอนลดลง แต่ความเข้มข้นของออกซิเจนไม่เพียงพอที่จะทำให้ชั้นออกไซด์ที่ฝังไอออนเติบโตในแนวตั้ง (vertical direction) ที่ทำให้ชั้นออกไซด์มีความกว้างเพิ่มขึ้น

ภาพกำลังขยายสูงที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของบริเวณพื้นผิวของไซมอกซ์ ของตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิว และมีชั้นป้องกันผิว ในภาพประกอบ 4.11 (ก) และ 4.11 (ข) แสดงให้เห็นถึงพื้นผิวของตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิวจะมีลักษณะเรียบกว่าของตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิว เนื่องจากการออกซิเดชันของตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิว



(ก)



(ข)

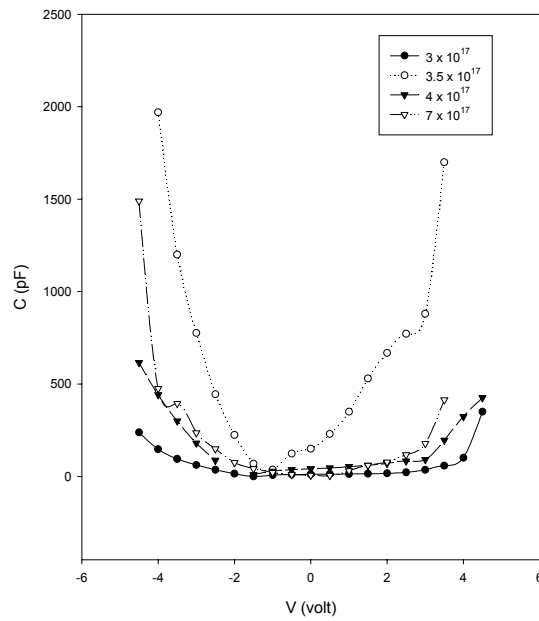
ภาพประกอบที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายไมโครกราฟของตัวอย่างบริเวณผิวหน้าของไซมอกซ์ ที่ฝัง  
ออกซิเจน  $4 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร ก) ไม่มีชั้นป้องกันผิว ข) มีชั้น  
ป้องกันผิว หนา  $\{110\}^3$  (กำลังขยาย  $4.5 \times 10^6$  เท่า)

<sup>3</sup>หนา  $\{110\}$  ได้จากภาพถ่ายดิฟเฟรคชั่นของชั้นซิลิกอนแสดงภาพและวิธีการคำนวณในภาค ผนวก ข

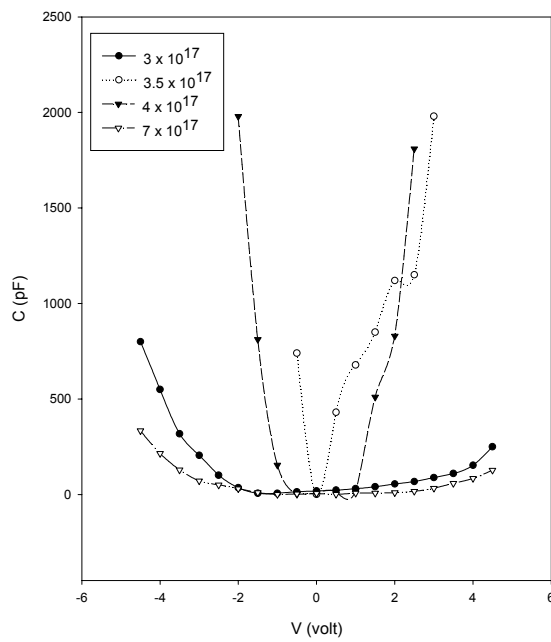
### 3. การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

ได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไข่มอกซ์ เพื่อประกอบกับสมบัติทางจุลโครงสร้างโดยการนำตัวอย่างไข่มอกซ์ที่ฝังออกซิเจนปริมาณ 3, 3.5, 4 และ  $7 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร ทั้งที่ไม่มีและมีชั้นป้องกันผิวมาสร้างเป็นตัวเก็บประจุมอส (คู่มือข้อ 3.2 บทที่ 3) นำมาวัดค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน ที่ความถี่ต่ำ ผลการวัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของตัวอย่างเมื่อป้อนค่าแรงดันให้ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งผลการทดลองตามสภาวะการเตรียมตัวอย่างในการสร้างเป็นตัวเก็บประจุมอส 2 สภาวะ คือ การกักขังลิทอนด้านบนออกที่อุณหภูมิ  $30 \pm 1^\circ \text{C}$  และ  $35 \pm 1^\circ \text{C}$  ดังนี้

3.1 ตัวอย่างที่สร้างเป็นตัวเก็บประจุมอสโดยการกักขังลิทอนออกที่  $30 \pm 1^\circ \text{C}$  และใช้เวลาต่างกันดังตาราง 3.1 และวัดค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน ที่ความถี่ต่ำ ได้ผลดังภาพประกอบที่ 4.12 จากกราฟทั้งสองพบว่าค่าความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันทั้งค่าลบและบวก โดยที่แต่ละตัวอย่างที่มีปริมาณการฝังออกซิเจนต่างกันอัตราการเพิ่มค่าความจุไม่เท่ากัน จากภาพประกอบ 4.12 (ก) ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิว อัตราการเพิ่มของค่าความจุไฟฟ้าของตัวอย่างเรียงตามลำดับจากน้อยไปมากดังนี้  $3 \times 10^{17}$ ,  $4 \times 10^{17}$ ,  $7 \times 10^{17}$  และ  $3.5 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร จึงทำให้กราฟของตัวอย่าง  $3.5 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร มีลักษณะแคบที่สุดสำหรับตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิว ภาพประกอบ 4.12 (ข) ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิว อัตราการเพิ่มของค่าความจุไฟฟ้าเรียงตามลำดับดังนี้  $7 \times 10^{17}$ ,  $3 \times 10^{17}$ ,  $4 \times 10^{17}$  และ  $3.5 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร และทำให้กราฟของตัวอย่าง  $3.5 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร มีลักษณะแคบที่สุดเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกราฟจากการทดลองกับกราฟความจุไฟฟ้า-แรงดันอุดมคติ ของตัวอย่างตัวเก็บประจุมอสชนิดพี ที่วัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ ในภาพประกอบที่ 2.17 กราฟจะมีลักษณะแคบและมีค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดที่คงที่เมื่อให้แรงดันลบและบวกจนถึงค่าหนึ่ง โดยที่อัตราการเพิ่มของค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าสูง จึงทำให้กราฟให้ค่าความจุไฟฟ้าในช่วงแรงดันที่ไม่กว้างมากนักนั่นเอง ดังนั้นกราฟของตัวอย่างที่ให้ลักษณะของกราฟใกล้เคียงกับกราฟอุดมคติที่สุด คือตัวอย่าง  $3.5 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร ทั้งที่ไม่มีและมีชั้นป้องกันผิว



ก )



ข )

ภาพประกอบที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของ ตัวเก็บประจุ  
 มอสที่สร้างจากไซมอกซ์ที่กัดชั้นซิลิกอนออก ที่อุณหภูมิ  $30 \pm 1^\circ \text{C}$   
 (ก) ตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิว (ข) ตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิว

และจะพบว่ากราฟของตัวอย่าง  $3.5 \times 10^{17}$  ไอออนตารางเซนติเมตร ของตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิวจะให้ค่าความจุไฟฟ้าในช่วงแรงดันที่แคบและสูงกว่าของตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิว หากคำนวณหาค่าแรงดันแถบราบแล้วค่าประจุไฟฟ้าระหว่างผิวและในชั้นออกไซด์ก็จะพบว่า ตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิวจะให้ค่าประจุไฟฟ้าระหว่างผิวและในชั้นออกไซด์ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิว

แต่จากการสังเกตตัวอย่างในขั้นตอนการสร้างเป็นตัวเก็บประจุมอส ภายหลังจากการกัดด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิและช่วงเวลานี้คาดว่าอาจจะไม่ทำให้ชั้นซิลิกอนหลุดออกไปหมด สังเกตจากสีของตัวอย่างยังเหมือนเดิม และเมื่อนำตัวอย่างไปกัดในกรดซึ่งใช้กัดชั้นออกไซด์ปรากฏว่าสียังเหมือนเดิม แสดงว่าชั้นด้านบนไม่ได้เป็นชั้นออกไซด์แต่เป็นชั้นซิลิกอนที่ยังเหลืออยู่ นั่นคือการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 % ที่อุณหภูมิ  $30 \pm 1$  °C และเวลาดังกล่าวไม่สามารถกัดชั้นออกไซด์ด้านบนออกได้ แสดงว่าตัวอย่างที่ผ่านการกัดชั้นซิลิกอนที่สภาวะดังกล่าวนี้กัดซิลิกอนออกได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงควรที่จะเพิ่มอุณหภูมิหรือเวลาในการกัดให้มากขึ้นอีก

3.2 ตัวอย่างที่สร้างเป็นตัวเก็บประจุมอสโดยการกัดที่อุณหภูมิ  $35 \pm 1$  °C และใช้เวลาดังตารางจากการสังเกตตัวอย่างหลังจากการกัดชั้นซิลิกอนออกพบว่าสีของตัวอย่างเปลี่ยนไปดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงสีของตัวอย่างภายหลังจากการกัดชั้นซิลิกอนออกที่อุณหภูมิ  $35 \pm 1$  °C

ตัวอย่าง (ปริมาณออกซิเจน : $O^+ / cm^2$ )	ไม่มีชั้นป้องกันผิว		มีชั้นป้องกันผิว	
	สีก่อนกัด	สีหลังกัด	สีก่อนกัด	สีหลังกัด
$3 \times 10^{17}$	ม่วง	เหลือง	เขียว	เทา
$3.5 \times 10^{17}$	ชมพู	เขียว	ฟ้า-ม่วง	เทา
$4 \times 10^{17}$	ส้ม	เขียว	ม่วง	เขียว-เทา
$7 \times 10^{17}$	ส้ม	เขียว	เหลือง	เขียว-เทา

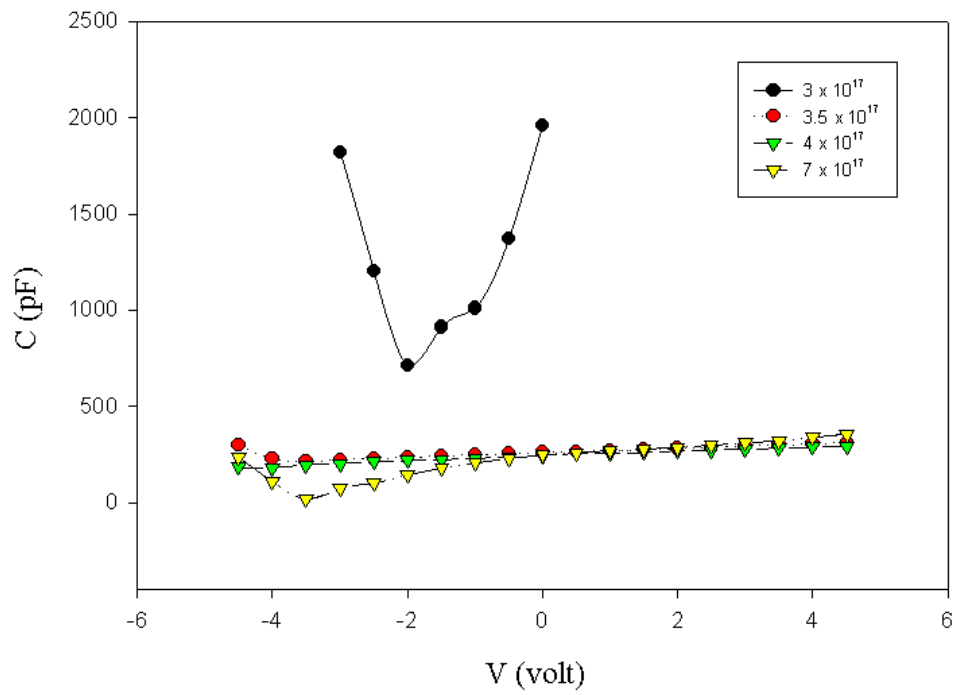
และเมื่อนำตัวอย่างที่ผ่านการกัดซิลิกอนด้านบนออกแล้วไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก แล้วชั้นออกไซด์ที่เหลืออยู่จะถูกกัดออกไป โดยจะเปลี่ยนสีไปเป็นสีเทา-ดำ แสดงว่าการกัดชั้นซิลิกอนที่สภาวะนี้น่าจะกัดซิลิกอนด้านบนออกหมด ภาพประกอบ 4.13 แสดงภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านของตัวอย่างไซม็อกซ์ ที่ฝังปริมาณออกซิเจน  $3 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร ที่มีชั้นป้องกันผิว ที่สร้างเป็นตัวเก็บประจุมอสโดยการกัดที่อุณหภูมิ  $35 \pm 1$  °C เห็นโครงสร้างประกอบด้วยชั้น 3 ชั้น โดยที่ด้านบนเป็นชั้นอะลูมิเนียมที่ฉาบหนา 119 นาโนเมตร



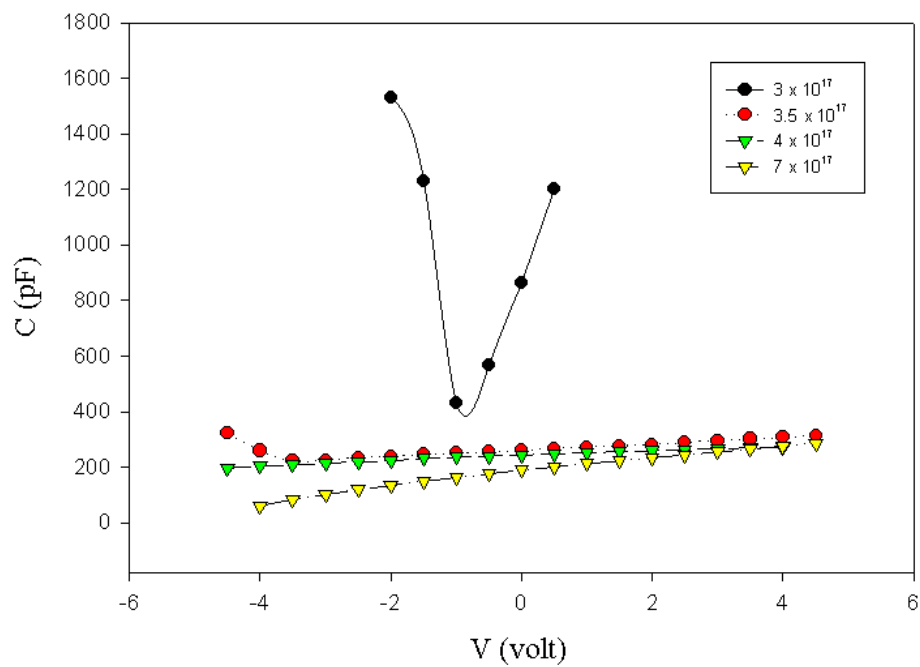
ภาพประกอบ 4.13 แสดงภาพถ่ายไมโครกราฟตัวอย่างไซม็อกซ์ ที่สร้างเป็นตัวเก็บประจุมอส ของตัวอย่างที่ฝังปริมาณออกซิเจน  $3 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร ที่มีชั้นป้องกันผิว (กำลังขยาย  $1.6 \times 10^5$  เท่า)

ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของตัวอย่างไซม็อกซ์ ที่สร้างเป็นตัวเก็บประจุมอสโดยการกักชั้นซิลิกอนที่อุณหภูมิ  $35 \pm 1^\circ \text{C}$  ดังภาพประกอบที่ 4.14 เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟอุดมคติก็ยังคงพบว่าคุณค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดมีค่าไม่คงที่ เหมือนกับกราฟผลการทดลองหัวข้อ 3.1 แต่สำหรับกราฟของตัวอย่างที่กักที่สภาวะนี้ ตัวอย่างไซม็อกซ์ที่ฝังออกซิเจนปริมาณ  $3 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตรของทั้งตัวอย่างที่ไม่มีและมีส่วนป้องกันผิวให้กราฟที่ให้ค่าความจุไฟฟ้าในช่วงแรงดันที่แคบกว่าตัวอย่างอื่นๆ ที่ฝังออกซิเจนในปริมาณสูงขึ้น และกราฟของตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิวจะให้ค่าความจุไฟฟ้าในช่วงแรงดันที่แคบกว่าและอยู่ในช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าของ ตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิว





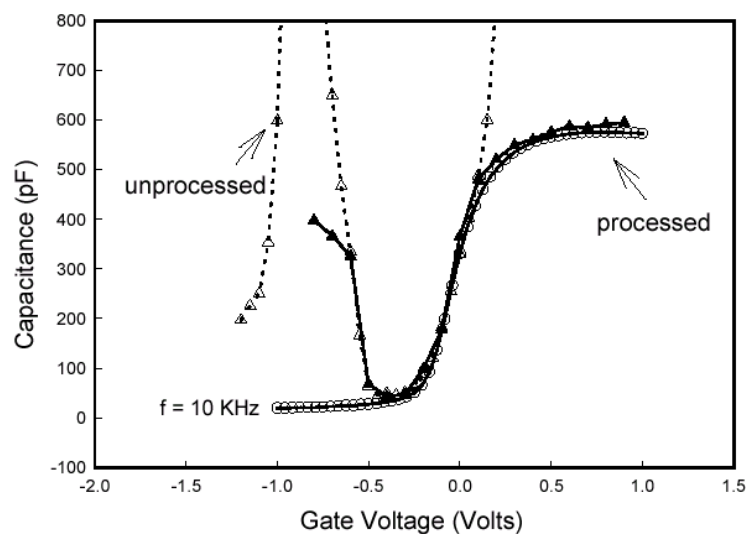
0(ก)



(ข)

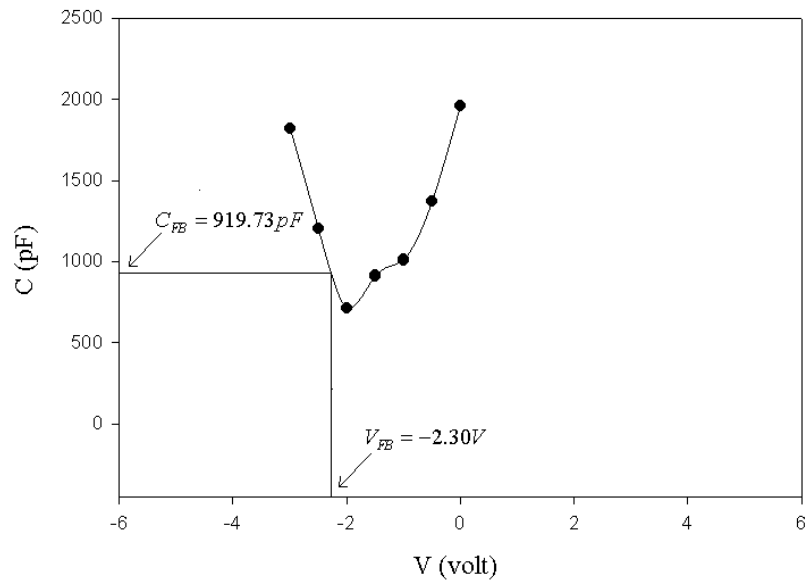
ภาพประกอบที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันของ ตัวเก็บประจุ  
 มอสที่สร้างจากไซมอกซ์ที่กักชั้นซิลิกอนออก ที่อุณหภูมิ  $35 \pm 1^\circ \text{C}$   
 (ก) ตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิว (ข) ตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิว

จากงานวิจัยของ Song และคณะ (1998) ได้วัดค่าความจุไฟฟ้าแรงดันของตัวเก็บประจุมอสที่สร้างจากไซม็อกซ์ เขาพบว่าผลการวัดได้กราฟที่แตกต่างไปจากลักษณะของกราฟอุดมคติคือค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดมีลักษณะไม่คงที่ ดังภาพประกอบที่ 4.15 ซึ่งมีลักษณะเดียวกับผลการทดลองนี้ เขาให้เหตุผลว่าเกิดจากกระแสรั่วในขณะที่วัดและได้ทำวงจรเพื่อกรองกระแสรั่วผลการวัดจึงมีลักษณะเดียวกับกราฟในอุดมคติ

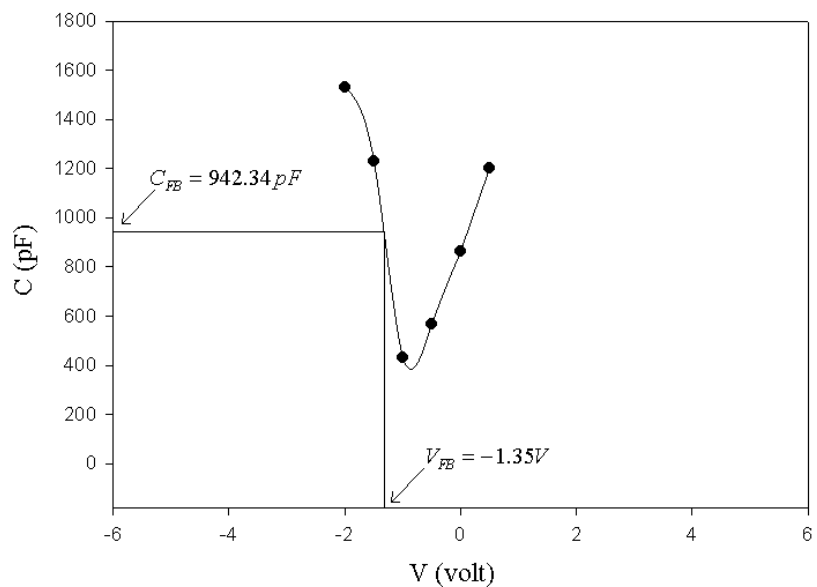


ภาพประกอบที่ 4.15 แสดงกราฟความจุไฟฟ้า-แรงดันก่อนและหลังจากการใช้วงจรรองกระแสรั่ว (ที่มา: Song, 1998: 234)

ดังนั้นจากผลการทดลองนี้ค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดที่ไม่คงที่นี้อาจเกิดจากกระแสรั่วที่เกิดขึ้นในวงจร เนื่องจากตัวอย่าง  $3 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร ให้กราฟที่ใกล้เคียงกับกราฟอุดมคติที่สุดทั้งของตัวอย่างที่ไม่มีและมีส่วนป้องกันผิว จึงนำกราฟทั้งสองมาทำการคำนวณ (ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.2.2 บทที่ 3) สามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าสูงสุด  $C_{ox}$  ได้เท่ากับ 1450 พิโคฟารัด (pF) สำหรับตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิว และ 1507 พิโคฟารัด สำหรับตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิว และค่า  $C_d$  เท่ากับ 2515 พิโคฟารัด จึงหาค่าความจุไฟฟ้าแถบราบ  $C_{FB}$  ได้เท่ากับ 919 และ 942 พิโคฟารัด สำหรับตัวอย่างที่ไม่มีและมีส่วนป้องกันผิวตามลำดับ สามารถหาค่าแรงดันแถบราบ  $V_{FB}$  ของตัวอย่าง  $3 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร ทั้งตัวอย่างที่ไม่มีและมีส่วนป้องกันผิว ได้จากกราฟความจุไฟฟ้า-แรงดัน ดังภาพประกอบ 4.16



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4.16 แสดงการหาค่าแรงดันแถบราบของตัวอย่างไซมอกซ์  $3 \times 10^{17}$  ไอออนต่อตารางเซนติเมตร (ก) ไม่มีชั้นป้องกันผิว และ (ข) มีชั้นป้องกันผิว

ได้  $V_{FB} = -2.30 \text{ V}$  สำหรับตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิว และ  $V_{FB} = -1.35 \text{ V}$  สำหรับตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิว คำนวณค่าความหนาแน่นประจุที่รอยต่อผิวได้เท่ากับ  $4.18 \times 10^{11}$  และ

$1.50 \times 10^{11}$  ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับตัวอย่างที่ไม่มีและมีชั้นป้องกันผิว ตามลำดับ รายละเอียดการคำนวณค่าต่าง ๆ แสดงในภาคผนวก (ก)

ค่าความหนาแน่นประจุที่รอยต่อผิวที่ได้มีค่ามากกว่า  $10^{11}$  ต่อตารางเซนติเมตร แสดงถึงคุณภาพของไซมอกซ์ นี้ยังไม่ดีทั้งตัวอย่างที่ไม่มีและมีชั้นป้องกันผิว อาจเนื่องมาจากการมีกลุ่มก้อนซิลิกอนอยู่ในชั้นออกไซด์ ซึ่งแสดงด้วยภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (ดูภาพประกอบ 4.7 และ 4.8) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Dimitrakis (1996) ที่พบว่าความหนาแน่นประจุบวกในชั้นออกไซด์ ส่วนใหญ่มาจากการมีกลุ่มก้อนซิลิกอนในชั้นออกไซด์

ค่าความหนาแน่นประจุที่รอยต่อผิว ของตัวอย่างที่อบให้ความร้อนโดยไม่มีชั้นป้องกันผิวจะมีค่ามากกว่าของตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิว แสดงถึงไซมอกซ์ที่มีชั้นป้องกันผิวมีคุณภาพดีกว่าที่ไม่มีชั้นป้องกันผิว แต่จากภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านพบว่า กลุ่มก้อนซิลิกอนในชั้นออกไซด์ ของตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิวจะมีค่ามากกว่าของตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิวเล็กน้อย ดังนั้นคุณภาพของไซมอกซ์ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของกลุ่มก้อนซิลิกอนในชั้นออกไซด์ที่ฝังไอออนเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับรอยต่อผิวระหว่างชั้นออกไซด์กับชั้นฐานซิลิกอนด้วย จากผลการทดลองนี้บอกได้ว่า ตัวอย่างที่มีชั้นป้องกันผิวในระหว่างการอบให้ความร้อนจะมีรอยต่อผิวระหว่างชั้นออกไซด์กับชั้นฐานซิลิกอนที่ดีกว่าตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิวรอยต่อผิวระหว่างชั้นออกไซด์กับชั้นฐานซิลิกอนดีขึ้นในที่นี้คือทำให้ประจุที่รอยต่อผิวลดลงนั่นเอง