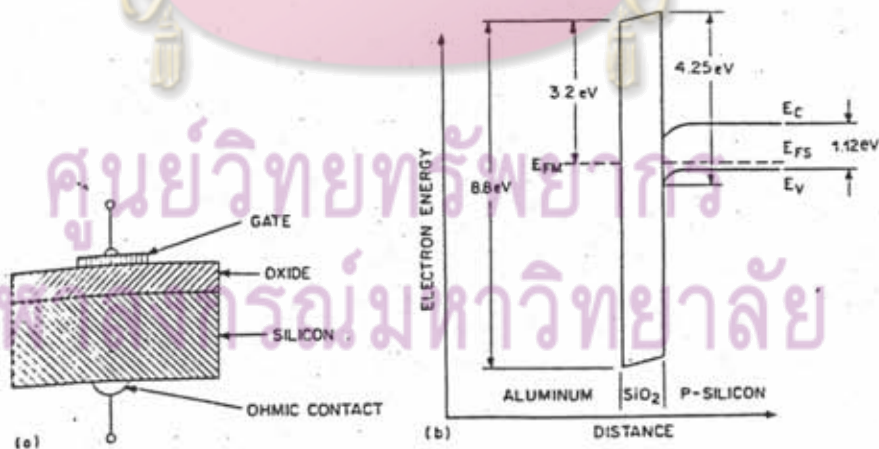




บทที่ 2

ทฤษฎีเกี่ยวกับตัวเก็บประจุมอส

ตัวเก็บประจุมอสมีโครงสร้างประกอบด้วย ชั้นของฉนวนไฟฟ้าทำจากซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อยู่ระหว่างเพลต (plate) 2 เพลตวางขนานกัน เพลตหนึ่งเป็นโลหะเรียกว่าเกต (Gate) มักทำด้วยอลูมิเนียม เนื่องจากเป็นโลหะที่มีกระบวนการฉาบผิวโลหะที่ง่าย และยึดเกาะกับผิวของซิลิกอนไดออกไซด์ได้ดี อีกเพลตหนึ่งเป็นเพลตซิลิกอนดังแสดงในรูปที่ 2.1 (a) แถบพลังงานของตัวเก็บประจุมอสในรูปที่ 2.1 (b) แสดงถึงพลังงานขวางกั้น (Energy barrier) ระหว่างเกตซึ่งทำด้วยอะลูมิเนียมกับซิลิกอนไดออกไซด์ และระหว่างซิลิกอนซึ่งเป็นชนิด P กับซิลิกอนไดออกไซด์ พลังงานเหล่านี้มีค่าสูง ตัวอย่างเช่น ในการดึงอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะมายังเสตทวงต่ำสุดในออกไซด์ต้องใช้พลังงาน 3.2 eV และการดึงอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ของซิลิกอนมายังเสตทวงต่ำสุดในออกไซด์ต้องใช้พลังงาน 4.25 eV ดังนั้นซิลิกอนไดออกไซด์ จึงสามารถป้องกันการวิ่งของพาหะอิสระจากโลหะมายังซิลิกอนหรือจากซิลิกอนไปยังโลหะ และทำให้ในขณะที่มีแรงดันไบอัสตกคร่อมตัวเก็บประจุมอส จะไม่มีกระแสตรงไหล



รูปที่ 2.1 a) แสดงโครงสร้างของตัวเก็บประจุมอส  
 b) แถบพลังงานของตัวเก็บประจุมอส

ผ่านตัวเก็บประจุมอสเลย ตัวเก็บประจุมอสจะอยู่ในสภาวะสมดุลย์อุณหภูมิตลอดเวลา นั่นคือระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level) ของเกตและของซิลิกอนจะอยู่ระดับเดียวกัน และ  $n_p = n_i^2 / p$  ตำแหน่งใด ๆ ในซิลิกอน

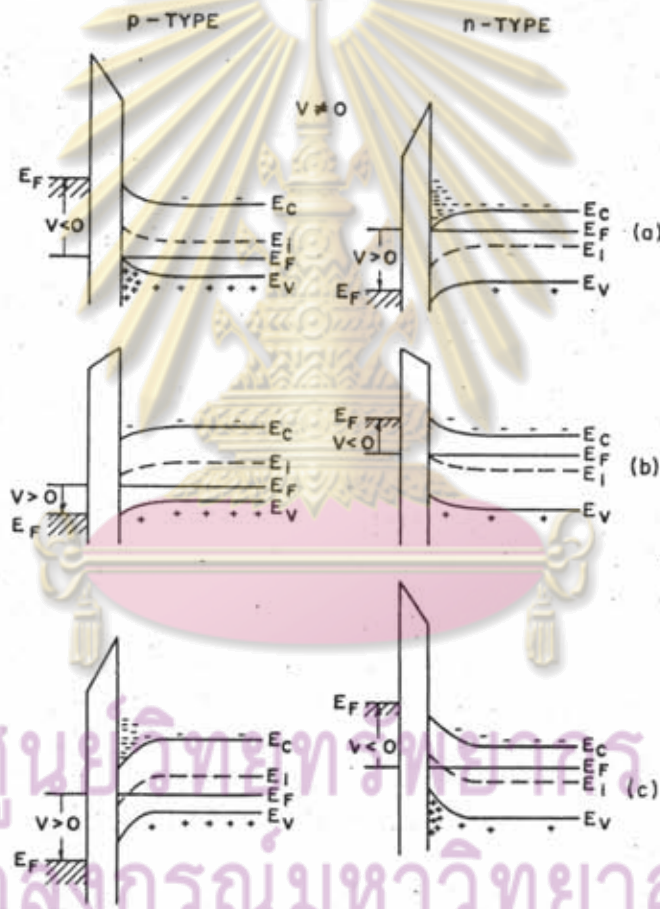
การป้อนแรงดันไบอัสให้ตัวเก็บประจุมอส จะทำให้ความหนาแน่นของประจุพื้นผิวในโลหะและซิลิกอนเปลี่ยนแปลง ชั้นประจุพื้นผิวในซิลิกอนมีบทบาทต่อลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอสและถูกไบอัสอย่างมาก ส่วนชั้นประจุพื้นผิวในโลหะที่เกิดขึ้นขณะมีการไบอัสตัวเก็บประจุมอสแทบไม่มีผลต่อลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอสเลย เนื่องจากชั้นประจุพื้นผิวนี้บางมาก ประมาณ 1 Å ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นประจุจึงมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ และชั้นประจุพื้นผิวในซิลิกอน การตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้าสลับในช่วงความถี่ 0-10 MHz ของประจุพื้นผิวในโลหะดีมาก จึงไม่ทำให้เกิดการสูญเสียทางไฟฟ้า ซึ่งมีผลต่อค่าแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุมอส ดังนั้นลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอสและถูกไบอัสจึงขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุพื้นผิวในซิลิกอน ซึ่งอาจแบ่งย่านการไบอัสตัวเก็บประจุมอสได้ 3 ย่าน ดังแสดงในรูปที่ 2.2

1. ย่าน Accumulation เป็นการไบอัสที่ทำให้พาหะข้างมากในซิลิกอนมารวมกันที่ผิวของซิลิกอน ในซิลิกอนชนิด P แรงดันไบอัสเป็นลบ ทำให้แถบพลังงานโค้งขึ้นพาหะที่มารวมกันที่ผิวได้แก่ โฮล ซิลิกอนชนิด N แรงดันไบอัสเป็นบวก ทำให้แถบพลังงานโค้งลง พาหะที่มารวมกันที่ผิวได้แก่ อิเล็กตรอน ความหนาแน่นของชั้นบรรจุพื้นผิวขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไบอัสและความเข้มข้นของสารเจือปน โดยปกติจะมีขนาด 100-1000 Å

2. ย่าน depletion เป็นการไบอัสด้วยแรงดันขนาดต่ำ ๆ เริ่มจากค่าแรงดันแถบราบ (flatband voltage) พาหะข้างมากบริเวณผิวของซิลิกอนจะถูกผลักดันเข้าไปในซิลิกอนทำให้เกิดย่านปลอดพาหะ (Depletion layer) ชั้นที่ผิวของซิลิกอน ภายในย่านปลอดพาหะจะเต็มไปด้วยไอออนของสารเจือปนชนิดตรงข้ามกับพาหะข้างมาก ความกว้างของย่านปลอดพาหะจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามการเพิ่มของแรงดันไบอัส ในซิลิกอนชนิด P แรงดันไบอัสเป็นบวกต่ำ ๆ (เทียบกับแรงดันแถบราบ) ในซิลิกอนชนิด N แรงดันไบอัสเป็นลบต่ำ ๆ (เทียบกับแรงดันแถบราบ) ความกว้างของย่านปลอดพาหะขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสและความเข้มข้นของสารเจือปน ซึ่งมีค่าประมาณ 0.1-10  $\mu\text{m}$



3. ย่าน Inversion เป็นการไบอัสตัวเก็บประจุอสด้วยแรงดันไฟฟ้าในทิศทางเดียวกับย่าน Depletion แต่ขนาดของแรงดันไฟฟ้าจะมากกว่า เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นพาหะข้างมากที่บริเวณผิวของซิลิกอน ยิ่งถูกผลักดันเข้าไปในซิลิกอน เนื่องจากสภาวะสมดุลย์อุณหภูมิทำให้ผลคูณ  $pn$  มีค่าคงที่ ณ ตำแหน่งใด ๆ ในซิลิกอน จึงทำให้ปริมาณพาหะข้างน้อยที่บริเวณผิวของซิลิกอนมากขึ้นจนเกิดขึ้นอินเวอร์ชัน (Inversion layer) ในซิลิกอนชนิด P ชั้นอินเวอร์ชันเกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนบริเวณผิวของซิลิกอน ในซิลิกอนชนิด N ชั้นอินเวอร์ชันเกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวของโฮลบริเวณผิวของซิลิกอน ความหนาของชั้นอินเวอร์ชันขึ้นอยู่กับ



รูปที่ 2.2 แถบพลังงานของตัวเก็บประจุอส เมื่อมีการไบอัสแรงดันในย่านต่าง ๆ

- ทั้งสารกึ่งตัวนำชนิด P และ N
- ย่าน Accumulation
  - ย่าน Depletion
  - ย่าน Inversion

ขนาดของแรงดันไบอัส และความเข้มข้นของสารเจือปน โดยทั่วไปจะมีความหนาประมาณ 30-300 Å การไบอัสในย่าน Inversion นี้ยังคงปรากฏย่านปลอดพาหะอยู่ในซิลิกอน แต่จะอยู่ถัดจากชั้นอินเวอร์ชันเข้าไปในซิลิกอน และความกว้างของย่านปลอดพาหะจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง หลังจากเกิดชั้นอินเวอร์ชันแล้ว นั่นคือการเพิ่มขนาดของแรงดันไบอัสมากขึ้น เป็นการเพิ่มความหนาแน่นของประจุในชั้นอินเวอร์ชันเท่านั้น

แถบพลังงานและการกระจายของประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุผสม ในอุดมคติซึ่งมีวัสดุฐานรอง (Substrate) เป็นชนิด P แสดงดังในรูปที่ 2.3 เนื่องจากสภาพความเป็นกลางทางไฟฟ้าของประจุ ปริมาณประจุไฟฟ้าในโลหะ และในเนื้อสารกึ่งตัวนำ จึงมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$Q_M = Q_n + qN_A W = Q_s \quad (2.1)$$

โดยที่  $Q_M$  คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในโลหะ

$Q_n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นอินเวอร์ชันที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ

$qN_A W$  คือ ความหนาแน่นของไอออนของพาหะข้างมากในย่านปลอดพาหะ

$Q_s$  คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าทั้งหมดในสารกึ่งตัวนำ

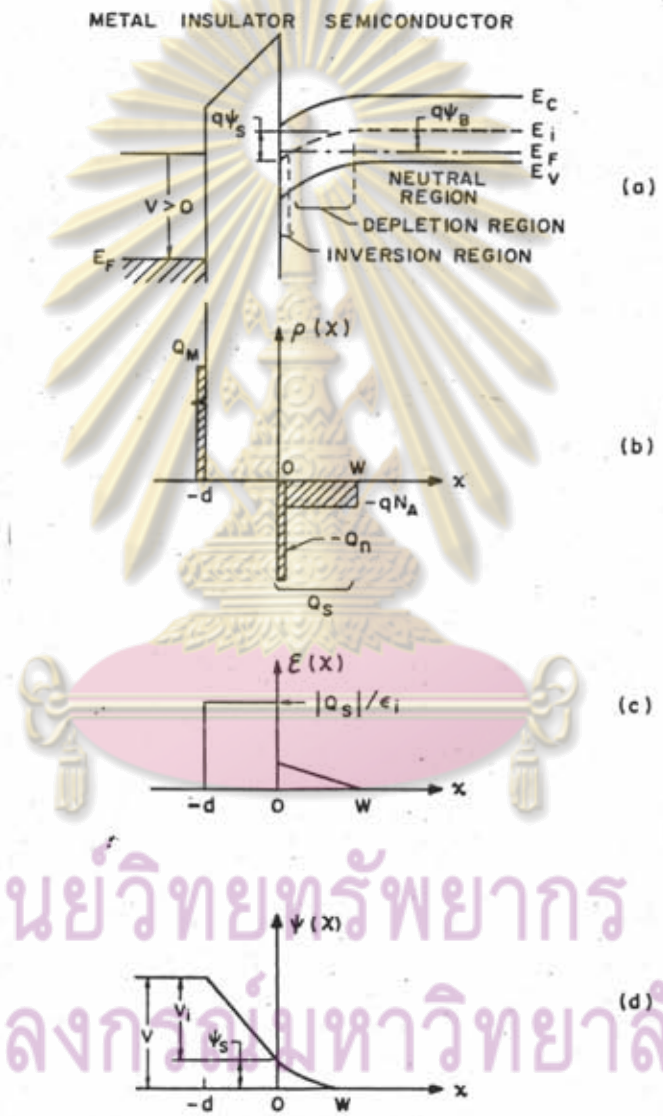
อาศัยสมการของปัวซอง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแถบพลังงานโค้ง และประจุไฟฟ้า สามารถหาสนามไฟฟ้าในตัวเก็บประจุผสมในรูป 2.3 (c) ได้โดยการอินทิเกรต สมการปัวซองครั้งที่หนึ่ง และหาค่าศักย์ไฟฟ้าในตัวเก็บประจุผสม ในรูป 2.3 (d) ได้โดยการอินทิเกรต สมการของปัวซองครั้งที่สอง (4)

แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ตัวเก็บประจุผสม จะตกคร่อมชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ และซิลิกอน (เมื่อไปคำนึงถึงค่าความแตกต่างฟังก์ชันงานระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ) ตามสมการดังนี้

$$V = V_{ox} + \phi_s \quad (2.2)$$

$$V_{ox} = E_{ox} d = \frac{|Q_s| d}{\epsilon_{ox}} \equiv \frac{|Q_s|}{C'_{ox}} \quad (2.3)$$

- โดยที่  $V_{ox}$  คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม ซิลิกอนไดออกไซด์
- $\psi_s$  คือ แรงดันไฟฟ้าพื้นผิวของซิลิกอน
- $\epsilon_{ox}$  คือ ค่า permittivity ของซิลิกอนไดออกไซด์
- $d$  คือ ความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์
- $C'_{ox}$  ค่าความจุไฟฟ้าของซิลิกอนไดออกไซด์ต่อหน่วยพื้นที่



ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.3 a) แถบพลังงานของตัวเก็บประจุโมสในอุดมคติ (5)  
 b) การกระจายของประจุไฟฟ้าเมื่อเกิดขึ้นอินเวอร์ชัน  
 c) สนามไฟฟ้าในตัวเก็บประจุโมส  
 d) ศักย์ไฟฟ้าในตัวเก็บประจุโมส



ค่าความจุไฟฟ้าของตัวประจุมอส (C) เป็นผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าของซิลิกอน ไดออกไซด์ต่ออนุกรมกับค่าความจุไฟฟ้าของย่านปลอดพาหะ ( $C_D$ ) ดังนี้

$$C = \frac{C_{ox} C_D}{C_{ox} + C_D} \quad (2.4)$$

$$C_D = \frac{\partial Q_s}{\partial \phi_s} = \frac{\epsilon_s}{\sqrt{2} L_D} \frac{[1 - \exp(-\beta \phi_s) + (n_{po}/P_{po})(\exp(\beta \phi_s) - 1)]}{F(\beta \phi_s, n_{po}/P_{po})} \quad (2.5)$$

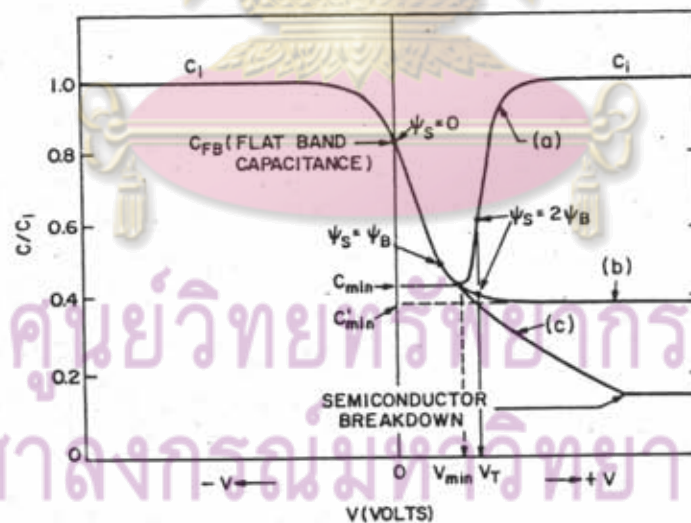
โดยที่  $\epsilon_s$  คือ ค่า permittivity ของซิลิกอน

$L_D$  คือ Extrinsic debye length

$\beta$  คือ  $q/kT$

$n_{po}$  คือ ปริมาณอิเล็กตรอนต่อหน่วยปริมาตรในสภาวะ intrinsic ในสารกึ่งตัวนำที่มีวัสดุฐานรองเป็นชนิด P

$P_{po}$  คือ ปริมาณโฮลต่อหน่วยปริมาตร ในสภาวะ intrinsic ในสารกึ่งตัวนำที่มีวัสดุฐานรองเป็นชนิด P



รูปที่ 2.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของตัวเก็บประจุมอส ในอุดมคติ (5)

- ย่านความถี่ต่ำ
- ย่านความถี่สูง
- Deep depletion

ค่าความจุไฟฟ้าของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $C_{ox}$ ) มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง และเป็นค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดของตัวเก็บประจุรวม ส่วนค่าความจุไฟฟ้าของย่านปลอดพาหะ ( $C_D$ ) มีค่าไม่คงที่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ตัวเก็บประจุรวม ทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมของตัวเก็บประจุรวม ( $C$ ) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ตัวเก็บประจุรวมด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.4

ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุรวมในสภาวะ intrinsic หรือในสภาวะที่  $\psi_s = 0$  เรียกว่า Flat band capacitance ( $C_{FB}$ )

$$C_{FB} (\psi_s = 0) = \frac{\epsilon_1}{d + (\epsilon_1/\epsilon_s)L_D} = \frac{\epsilon_1}{d + (\epsilon_1/\epsilon_s)\sqrt{kT\epsilon_s/P_{po}q^2}} \quad (2.6)$$

การป้อนแรงดันไฟฟ้าย้อนให้แก่ตัวเก็บประจุรวม ทำให้เกิด accumulation ของพาหะข้างมาก (โฮล) ที่บริเวณผิวของซิลิกอน ค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงมีค่าสูงกว่าค่าความจุไฟฟ้าของซิลิกอนไดออกไซด์มาก ค่าความจุไฟฟ้ารวมของตัวเก็บประจุรวม จึงมีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าของซิลิกอนไดออกไซด์ เมื่อลดแรงดันไฟฟ้าย้อนลงจะเกิดย่านปลอดพาหะขึ้นบริเวณผิวของซิลิกอน ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำลดลง ค่าความจุไฟฟ้ารวมของตัวเก็บประจุรวมจะลดลงด้วย ความจุไฟฟ้ารวมของตัวเก็บประจุรวมลดลงกระทั่งถึงค่าต่ำสุด ( $C_{min}$ ) และจะเริ่มสูงขึ้นเมื่อเกิดชั้นอินเวอร์ชัน การเพิ่มขึ้นของค่าความจุไฟฟ้ารวมของตัวเก็บประจุรวมนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะในย่านความถี่ต่ำเท่านั้น เพราะอัตราการเกิด recombination-generation ของพาหะข้างน้อย (อิเล็กตรอน) สามารถเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณไฟฟ้าได้ทัน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนพาหะข้างน้อยกับชั้นอินเวอร์ชันได้ ย่านความถี่ต่ำของตัวเก็บประจุรวมนี้จะมีความถี่น้อยกว่า 100 Hz (5) สำหรับตัวเก็บประจุรวมซึ่งมีวัสดุฐานรองเป็นชนิด N ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันในอุดมคติจะมีลักษณะคล้ายรูปที่ 2.4 แต่ต้องเปลี่ยนเครื่องหมายของแรงดันไฟฟ้าในแกนแรงดัน พาหะข้างมากจะเป็นอิเล็กตรอนและพาหะข้างน้อยจะเป็นโฮล

เมื่อเริ่มเกิดชั้นอินเวอร์ชันขึ้น ความกว้างของย่านปลอดพาหะจะมีค่าสูงสุดโดยที่ความกว้างนี้มีค่าเป็น

$$W_M = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_s (inv)}{qN_A}} = \sqrt{\frac{4\epsilon_s kT \ln(N_A/n_i)}{q^2 N_A}} \quad (2.7)$$



แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวเก็บประจุรวม เมื่อเริ่มเกิดขึ้นอินเวอร์ชันเรียกว่า Turn-on voltage หรือ Threshold voltage ( $V_T$ )

$$V_T = \frac{Q_s}{C_{ox}} + 2\phi_B = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\phi_B)}}{C_{ox}} + 2\phi_B \quad (2.8)$$

ที่ Threshold voltage นี้ ค่าความจุไฟฟ้ารวมของตัวเก็บประจุรวมมีค่าดังนี้

$$C'_{min} = \frac{\epsilon_{ox}}{d + (\epsilon_{ox} + \epsilon_s) W_m} \quad (2.9)$$

## 2.1 ซิลิกอนไดออกไซด์

ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) เป็นสารที่มีความสำคัญยิ่งต่ออุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวมที่ใช้ซิลิกอนเป็นวัสดุในการผลิต หน้าที่สำคัญของซิลิกอนไดออกไซด์ได้แก่

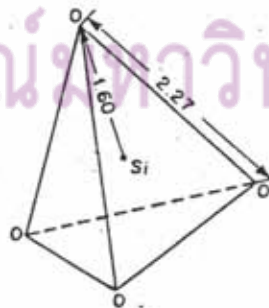
1. ทำชั้นป้องกันผิวซิลิกอน (Surface passivation) ซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้ต้องมี Oxide fixed charge และ Interface trap ต่ำ และความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ต้องมากเพียงพอ เพื่อทำให้อักริผลของ Potential gradients บริเวณ Air-oxide interface ที่มีต่อสมบัติของเนื้อสารกึ่งตัวนำต่ำ ซึ่งจะทำให้สมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์จะขึ้นอยู่กับสมบัติของเนื้อสารกึ่งตัวนำมากกว่า ขึ้นอยู่กับสมบัติที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ทำให้สิ่งประดิษฐ์มีเสถียรภาพดี ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้จะมีความหนาประมาณ 5000 Å
2. ทำหน้ากักในการแพร่ซึมสารเจือปน (diffusion mask) เนื่องจากสารเจือปนส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวม สามารถแพร่ซึมผ่านซิลิกอนไดออกไซด์ได้ช้ากว่าแพร่ซึมผ่านซิลิกอน ดังนั้นซิลิกอนไดออกไซด์จึงสามารถใช้เป็นหน้ากักให้สารเจือปนแพร่ซึมเข้าสู่ซิลิกอนเฉพาะส่วนที่ต้องการได้
3. เป็นฉนวนกั้นระหว่างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ในวงจรรวม และกั้นระหว่างชั้นของเส้นตัวนำแต่ละชั้น เนื่องจากซิลิกอนไดออกไซด์มีสมบัติทางไฟฟ้าเป็นฉนวน จึงสามารถนำซิลิกอนไดออกไซด์มาเป็นฉนวนกั้นระหว่างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ในวงจรรวม รวมถึงการใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นฉนวนกั้นระหว่างชั้นของสายไฟที่เชื่อมต่อระหว่างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ซึ่งต้องต่อคร่อมกันไปมา เพราะมีสิ่งประดิษฐ์ในวงจรรวมเป็นจำนวนมาก



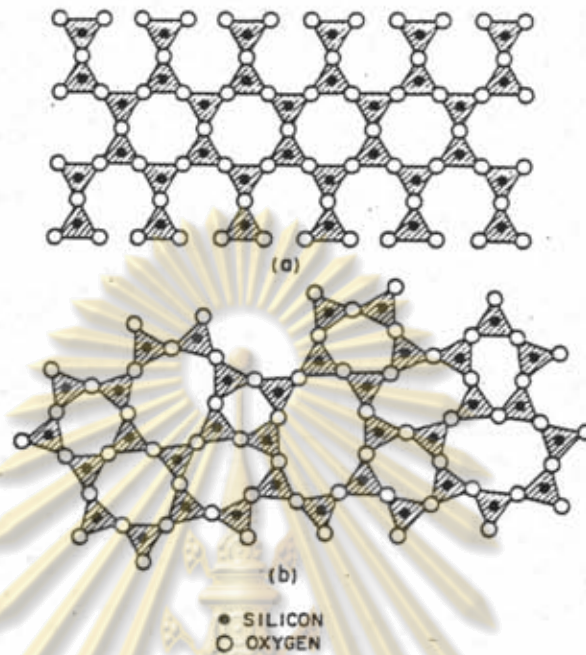
4. เป็น Gate oxide ของสิ่งประดิษฐ์มอส ซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้ต้องมี Oxide fixed charge และ Interface trap ต่ำ ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์จะน้อยกว่าซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้ป้องกันผิวซิลิกอน เพื่อให้สนามไฟฟ้าบริเวณ Air-Oxide interface มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเนื้อสารกึ่งตัวนำ ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้จะมีความหนาประมาณ  $1000 \text{ \AA}$

การเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์ให้มีสมบัติทางไฟฟ้าตามต้องการนั้น ทำได้หลายวิธี เช่น Thermal oxidation, Vapor phase reaction, Plasma anodization และ Wet anodization เป็นต้น เนื่องจากสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์มากที่สุด คือสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งใช้เป็น Gate oxide ของสิ่งประดิษฐ์มอส กระบวนการเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อให้ได้ Gate oxide ที่มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีที่สุดนั้นคือ Thermal oxidation ดังนั้น Thermal oxidation จึงถือเป็นกระบวนการเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์ที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวม (4) (รายละเอียดเกี่ยวกับ Thermal oxidation process กล่าวไว้ในบทที่ 4)

ซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งเตรียมขึ้นด้วย Thermal oxidation process มีโครงสร้างผลึกพื้นฐาน (Basic structural unit) แบบ Tetrahedral มีอะตอมของซิลิกอนอยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจน 4 อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์มีการเรียงตัวของผลึกเป็นแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous structure) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ ความหนาแน่นของซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัสเป็น  $2.21 \text{ (g/cm}^3\text{)}$  ลักษณะโครงสร้างของซิลิกอนไดออกไซด์แบบอะมอร์ฟัสและแบบผลึก แสดงดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกพื้นฐานของซิลิกอนไดออกไซด์



รูปที่ 2.6 ภาพ 2 มิติ ของโครงสร้างซิลิกอนไดออกไซด์  
 a) แบบผลึก (Crystalline structure)  
 b) แบบอะมอร์ฟัส (Amorphous structure)

## 2.2 อธิบายของการทำออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation) ที่มีต่อซิลิกอน

การทำออกซิเดชันด้วยความร้อนจะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเนื้อสารซิลิกอน 2 ประการคือ

1. ความบกพร่องเชิงผลึกโดยเฉพาะอย่างยิ่ง Oxidation induced stacking faults
2. การกระจายใหม่ของสารเจือปน (Dopant impurity redistribution)

นอกจากนี้ยังมีความบกพร่องซึ่งเกิดเนื่องจากความเครียด (strain) ของแวนผลึก โดยมีสาเหตุมาจากความไม่เท่ากันของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน (Coefficient of thermal expansion) ของซิลิกอนไดออกไซด์และซิลิกอน แม้ว่าความบกพร่องนี้จะไม่ส่งผล



ต่อสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ แต่ถ้าแวนผลึกที่ใช้มีขนาดบางเกินไป ความเครียดที่เกิดขึ้นจะทำให้แวนผลึกแอ่นตัว ซึ่งจะมีผลต่อการถ่ายแบบ (Photolithography) ทำให้แบบที่ได้มีความเนียนเกิดขึ้น การแอ่นตัวของแวนผลึกนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยเลือกใช้แวนผลึกที่มีความหนาพอเหมาะ เช่น แวนผลึกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ควรมีความหนาน้อยที่สุดประมาณ 11-20 mils (280-500  $\mu\text{m}$ ) แวนผลึกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว ควรมีความหนาน้อยที่สุดประมาณ 15-20 mils (380-500  $\mu\text{m}$ ) และแวนผลึกขนาดเล็กผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ควรมีความหนาน้อยประมาณ 21-25 mils (530-630  $\mu\text{m}$ )

### 2.2.1 Oxidation Induced Stacking Faults

Stacking fault เป็นความบกพร่องที่เกิดขึ้นจากอะตอมของซิลิกอนที่มีระนาบการยึดเกาะเกินถูกยึดเกาะไว้ด้วย ความบกพร่องเชิงเส้น (Dislocation) (6-19) Stacking faults มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์คือ ทำให้กระแสรั่วของหัวต่อเพิ่มขึ้น และลดเวลาชีวิต (life time) ของพาหะข้างน้อย (minority carrier) ลง ระหว่างการทำออกซิเดชันด้วยความร้อนนั้น ความบกพร่องเหล่านี้สามารถเคลื่อนตัวจากบริเวณรอยต่อระหว่างซิลิกอน และซิลิกอนไดออกไซด์เข้าไปในเนื้อซิลิกอนได้ จึงเรียกความบกพร่องเหล่านี้ว่า Oxidation induced stacking faults (OISF)

อิทธิพลของ OISF ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์จะมีมากขึ้นเมื่อมีสารเจือปนซึ่งเป็นอะตอมของโลหะหนักเข้ามายึดเกาะกับ Stacking faults สารเจือปนเหล่านี้จะทำให้ stacking faults มีระดับพลังงานอยู่ที่กลางของช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap) ของซิลิกอน ซึ่งมีผลทำให้อัตราการเกิด-รวมตัว (Generation-recombination rate) ของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากบริเวณนั้น ดังนั้นถ้ามี Stacking faults ในย่านปลอดพาหะจะทำให้มีกระแสรั่วเพิ่มขึ้น และถ้ามีความเข้มข้นของสารเจือปนที่เป็นอะตอมของโลหะหนักนั้นมากเพียงพอจะทำให้กระแสรั่วมากขึ้น จนทำให้สิ่งประดิษฐ์ลัดวงจรได้

OISF เกิดจากอะตอมของซิลิกอนส่วนเกินบริเวณรอยต่อระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งไม่ได้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (อะตอมเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นตามอัตราการเกิดซิลิกอน



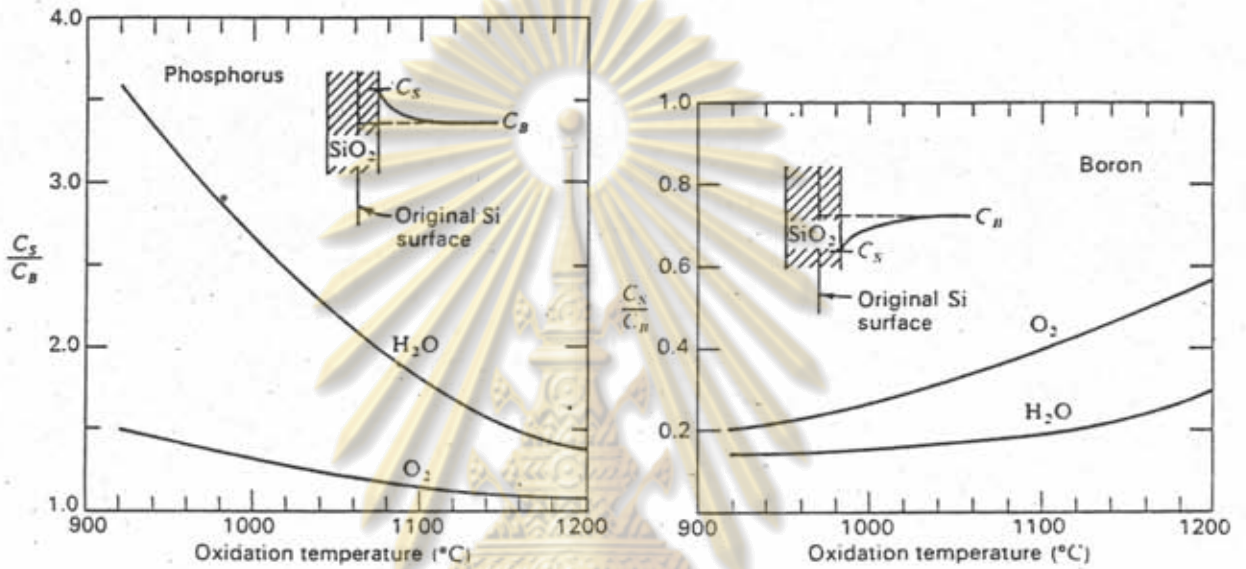
ไดออกไซด์ (20) แพร่ซึมเข้าไปภายในเนื้อซิลิกอน และไปเกาะกลุ่มกันอยู่ที่ Nucleation centers ซึ่งได้แก่ ความบกพร่องเชิงผลึกต่าง ๆ บริเวณที่สารเจือปนอยู่ไม่สม่ำเสมอ บริเวณที่มีสิ่งเปราะเบื้อนต่าง ๆ หรือความบกพร่องซึ่งเกิดจากการกัดด้วยสารเคมีก่อนการทำออกซิเดชัน เป็นต้น OISF สามารถแพร่เข้าไปในเนื้อสารซิลิกอนได้ลึกหลายไมครอน โดยที่ความลึกนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดันย่อย (Partial pressure) ของออกซิเจน และเวลาในการทำออกซิเดชันด้วยความร้อน

การลด OISF ให้น้อย สามารถทำได้โดยการลดจำนวนอะตอมของซิลิกอนส่วนเกินที่บริเวณรอยต่อระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ลง ซึ่งอาจจะทำได้ด้วยการผลักดันให้อะตอมของซิลิกอนส่วนเกินเคลื่อนตัวเข้าไปยังช่องว่าง (Vacancy) ในเนื้อซิลิกอน หรือผลักดันให้ช่องว่างในเนื้อซิลิกอนเคลื่อนตัวมายังบริเวณรอยต่อระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ ดังนั้นถ้าอัตราการเกิดช่องว่าง (Vacancy generation rate) สูงเพียงพอจะทำให้สามารถลดจำนวนอะตอมของซิลิกอนส่วนเกินลงได้ การเพิ่มจำนวนช่องว่างนี้อาจทำได้โดยการทำออกซิเดชันในบรรยากาศที่มี  $HCl$  จำนวนช่องว่างจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ  $HCl$  หรือการทำออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงเกินค่าวิกฤตค่าหนึ่ง  $m$  ที่อุณหภูมินี้ อัตราการเกิดของช่องว่างจะสูงเพียงพอที่จะทำให้จำนวนอะตอมของซิลิกอนส่วนเกินมีจำนวนน้อยมาก หรือสามารถกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตนี้ อะตอมของซิลิกอนส่วนเกินบริเวณรอยต่อระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์จะแพร่ซึมเข้าสู่เนื้อซิลิกอนได้เร็วกว่า อัตราการเกิดซิลิกอนไดออกไซด์ (20)

### 2.2.2 การกระจายใหม่ของสารเจือปน (Dopant impurity redistribution)

ระหว่างการทำออกซิเดชันด้วยความร้อนจะทำให้เกิดการกระจายใหม่ของสารเจือปนในเนื้อซิลิกอนขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากซิลิกอนไดออกไซด์และซิลิกอนเป็นของแข็งที่มีปริมาณสารเจือปนไม่เท่ากัน และไม่อยู่ในสภาวะสมดุลย์ เมื่อมาอยู่ติดกันสารเจือปนในซิลิกอนจะมีการแพร่ซึมเข้าไปยังซิลิกอนไดออกไซด์ และสารเจือปนจะหยุดแพร่ซึมเมื่อปริมาณของสารเจือปนในซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์อยู่ในสภาวะสมดุลย์ ลักษณะการกระจายใหม่ของสารเจือปนนี้จะขึ้นอยู่กับ Segregation coefficient ( $m$ ) โดยที่

ซึ่ง  $m$  จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือปน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเร็วในการแพร่ซึมของสารเจือปนในซิลิกอนไดออกไซด์ด้วย รูปที่ 2.7 แสดงค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและโบรอนที่ผิวของซิลิกอนเทียบกับความเข้มข้นภายในเนื้อซิลิกอนหลังจากการทำออกซิเดชันด้วยความร้อนที่มีการกระจายของสารเจือปนแบบสม่ำเสมอ (21)



a) ฟอสฟอรัส  $m = 10$

b) โบรอน  $m = 0.3$

รูปที่ 2.7 ความเข้มข้นของสารเจือปนที่ผิวของซิลิกอนหลังจากทำออกซิเดชันด้วยความร้อน

2.3 อธิบายของประจุไฟฟ้าภายในซิลิกอนไดออกไซด์ต่อสิ่งประดิษฐ์มอส

ในการปลูกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์โดยการทำออกซิเดชันด้วยความร้อน จะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ไม่ต้องการขึ้นภายในชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ปลูกขึ้น ประจุไฟฟ้าเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

1. Oxide Fixed Charge (Q<sub>f</sub>) เป็นประจุไฟฟ้าไม่เคลื่อนที่อยู่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างซิลิกอน และซิลิกอนไดออกไซด์ เชื่อกันว่า การเกิดประจุไฟฟ้าเหล่านี้ขึ้นเกี่ยวกับพันธะของ Si-O ที่อยู่ในบริเวณรอยต่อ (22)



2. Oxide Trapped charge ( $Q_{ot}$ ) เป็นประจุไฟฟ้าไม่เคลื่อนที่ซึ่งสามารถอยู่ได้ทั่วไปในเนื้อซิลิกอน เกิดขึ้นจากความบกพร่องต่าง ๆ ซึ่งมีอยู่ในเนื้อซิลิกอนไดออกไซด์ เช่น สารเจือปน หรือพันธะขาด (Broken bond) เป็นต้น (ในสภาพปกติจะเป็นกลางทางไฟฟ้า) รวมตัวกับอิเล็กตรอนหรือโฮลจากภายนอกเนื้อซิลิกอนไดออกไซด์

3. Mobile Ionic Charge ( $Q_m$ ) เป็นประจุไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ได้ เกิดขึ้นเนื่องจากมีไอออนของธาตุอัลคาไลในเนื้อซิลิกอนไดออกไซด์ ได้แก่ โซเดียม และ โปแตสเซียม เป็นต้น ไอออนเหล่านี้มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ที่สำคัญและมีบทบาทต่อสิ่งประดิษฐ์มากได้แก่  $Na^+$  ไอออนเหล่านี้จะอยู่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะและซิลิกอนไดออกไซด์ (ซึ่งเป็นบริเวณที่ไอออนเหล่านี้สามารถเข้ามายังเนื้อซิลิกอนไดออกไซด์ได้) และบริเวณรอยต่อระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ (ไอออนจะเคลื่อนที่มายังรอยต่อนี้ เมื่อมีการบ่อนสนามไฟฟ้าให้แก่ซิลิกอนไดออกไซด์)

ประจุไฟฟ้าภายในออกไซด์มีบทบาทต่อสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ต่อไปนี้

1. เนื่องจากประจุไฟฟ้าภายในออกไซด์เป็นประจุบวก ดังนั้นจึงทำให้แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) ของทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด P-channel เพิ่มขึ้น และชนิด N-channel ลดลง และทำให้แรงดันแถบราบของตัวเก็บประจุมอสทั้งชนิด P และ N เลื่อนไปในทิศทางแรงดันลบมากขึ้น

2. ทรานซิสเตอร์แบบมอส ชนิด P-channel ซึ่งมีหัวต่อที่เดรนเป็น  $P^+ - n$  ประจุไฟฟ้าภายในออกไซด์ จะดึงดูดอิเล็กตรอนในสารเอ็นให้มาออกกันที่ผิวเกิดเป็นชั้น  $n^+$  ชั้นบริเวณผิว ทำให้แรงดันเบรกดาวน์ (Breakdown voltage) ที่หัวต่อเดรนลดลง สำหรับชนิด N-channel หัวต่อเดรนเป็น  $n^+ - p$  ประจุไฟฟ้าภายในออกไซด์จะผลักโฮลบริเวณผิวของสารเอ็นออกไป ทำให้แรงดันเบรกดาวน์ที่หัวต่อเดรนเพิ่มขึ้น

3. เนื่องจากไอออนบวกของโซเดียมในออกไซด์สามารถเคลื่อนที่ระหว่างรอยต่อโลหะกับซิลิกอนไดออกไซด์ และรอยต่อซิลิกอนไดออกไซด์กับซิลิกอนได้ตามแรงดันไบอัสที่บ่อนให้แก่สิ่งประดิษฐ์มอส จึงทำให้สิ่งประดิษฐ์มอสที่มีปริมาณ  $Na^+$  ในออกไซด์มากมีเสถียรภาพที่ไม่ดี

4. ประจุไฟฟ้าภายในออกไซด์ทำให้ค่าความคล่องตัวของพาหะในช่องนำไฟฟ้า (channel) ของสิ่งประดิษฐ์มอสลดลง อันเป็นสาเหตุทำให้กำลังขยายของสิ่งประดิษฐ์มอสลดลงด้วย



## 2.4 การควบคุมความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าภายในออกไซด์

การควบคุมประจุไฟฟ้าภายในออกไซด์สามารถกล่าวแยกเป็นการควบคุมความหนาแน่นของโซเดียมไอออน และการควบคุมความหนาแน่นของ Oxide fixed charge

โซเดียมไอออนสามารถเข้าสู่ออกไซด์ได้หลายรูปแบบระหว่างกระบวนการผลิตสิ่งประดิษฐ์มอส ดังนั้นในกระบวนการผลิตแต่ละขั้นตอนต้องป้องกันออกไซด์จากโซเดียมไอออนดังต่อไปนี้

1. การฉาบผิวโลหะ (Metallization) โซเดียมไอออนสามารถเข้าสู่ออกไซด์ได้เนื่องจากลวดทั้งสแตน ซึ่งใช้เป็นเป้าหมายละลายอะลูมิเนียม มีส่วนผสมของโซเดียมอยู่เพื่อให้ลวดทั้งสแตนสามารถติดตั้งได้ง่าย ขณะที่การฉาบผิวโลหะ อะลูมิเนียมจะหลอมละลายและรวมตัวกับทั้งสแตนเป็นโลหะผสม ทำให้โซเดียมในทั้งสแตนเข้าไปรวมอยู่ในอะลูมิเนียมที่ถูกฉาบบนออกไซด์ และจะเข้าไปในออกไซด์ในที่สุด ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ควรใช้ลวดทั้งสแตนที่ปราศจากโซเดียม

2. การทำออกซิเดชันด้วยความร้อน การแอนนิล (Annealing) และการแพร่ซึมสารเจือปน (Diffusion) สามารถทำให้โซเดียมไอออนเข้าสู่ออกไซด์ได้ โดยโซเดียมไอออนซึ่งมีอยู่ในฉนวนของเตาหลอม (Furnace insulator) สามารถซึมผ่านผนังของ Fused quartz furnace tube เข้าไปภายในได้ ขณะที่เตากำลังทำงานที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการที่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องกับเตา เช่น การทำออกซิเดชันด้วยความร้อนแบบเปียก (Wet oxidation) น้ำจะเป็นตัวทำลายโซเดียมไอออนที่ผนังของ Fused quartz furnace tube ที่ดี ทำให้ปริมาณโซเดียมไอออนในออกไซด์สูงกว่ากระบวนการที่ไม่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง (23) การแก้ไขปัญหานี้ทำได้โดยการทำความสะอาดเตาด้วยการปล่อยก๊าซผสม  $\text{HCl-O}_2$  ผ่านเตาที่อุณหภูมิสูง (24) ( $6\% \text{HCl-O}_2$ , mole ratio,  $1150^\circ\text{C}$ , 2 hr) ก่อนการทำขั้นตอนการผลิตอื่น ๆ ก๊าซผสม จะทำปฏิกิริยากันเกิดไอน้ำ และก๊าซคลอรีน ก๊าซคลอรีน จะซึมเข้าไปรวมตัวกับโซเดียมไอออนที่ผนังของ Fused quartz furnace tube เป็นไอของ  $\text{NaCl}$  และถูกไล่ออกไปจากเตา

3. การทำความสะอาดหรือการกัดแวนผลึกด้วยสารเคมี เป็นกระบวนการอีกอย่างหนึ่งซึ่งสามารถนำโซเดียมไอออนเข้าสู่ออกไซด์ได้ ดังนั้นสารเคมีที่ใช้ควรหลีกเลี่ยงสารเคมีที่มีโซเดียมเป็นองค์ประกอบ และในการใช้สารเคมีกับแวนผลึกทุกครั้งควรล้างแวนผลึกด้วยน้ำปลอด

พาหะ (Deionized water) ในขั้นตอนสุดท้าย การหยิบจับแวนผลึกไม่ควรสัมผัสแวนผลึกโดยตรง เพราะร่างกายของคนเป็นแหล่งของโซเดียมไอออนที่สำคัญ รวมทั้งไม่ควรใช้พาหะที่สัมผัสกับร่างกายของคนแล้วไปสัมผัสกับแวนผลึกด้วย

นอกจากการป้องกันออกไซด์จากโซเดียมไอออนในกระบวนการผลิตดังได้กล่าวมาแล้ว เนื่องจากระหว่างการใช้งานสิ่งประดิษฐ์หรือแม้กระทั่งในระหว่างกระบวนการผลิต โซเดียมไอออนสามารถสะสมขึ้นภายในออกไซด์ได้ เพื่อกำจัดโซเดียมไอออนภายในออกไซด์นี้ กระบวนการที่ใช้มี 2 กระบวนการ คือ

1. การปลุกขึ้น Phosphosilicate glass คลุมทับชั้นออกไซด์ (25) ชั้นของ Phosphosilicate glass จะทำหน้าที่กำจัดโซเดียมไอออนภายในออกไซด์ซึ่งมาจากสิ่งแวดล้อมระหว่างอายุการใช้งานของสิ่งประดิษฐ์ โดยทำปฏิกิริยากับโซเดียมไอออนให้อยู่ในสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า
2. การปลุกขึ้นออกไซด์ในก๊าซผสม HCl-dry O<sub>2</sub> (26,27) ก๊าซผสม HCl-dry O<sub>2</sub> จะทำหน้าที่ 2 อย่างในการปลุกขึ้นออกไซด์ คือ ทำความสะอาดเตาจากโซเดียมไอออนดังได้กล่าวมาแล้ว และก๊าซคลอรีนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง HCl และ O<sub>2</sub> จะซึมเข้าไปภายในออกไซด์ และทำปฏิกิริยากับโซเดียมไอออนบริเวณรอยต่อระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ให้อยู่ในสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า กระบวนการนี้จะควบคุมความหนาแน่นของโซเดียมไอออนได้ทั้งระหว่างกระบวนการผลิต และระหว่างอายุการใช้งานของสิ่งประดิษฐ์

ความหนาแน่นของ Oxide fixed charge ภายในออกไซด์ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิในการทำออกซิเดชัน ความหนาแน่นของ Oxide fixed charge จะมีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิในการทำออกซิเดชันสูงขึ้น (28)
2. สภาพในการทำออกซิเดชัน การปลุกขึ้นออกไซด์ด้วยการทำออกซิเดชันด้วยความร้อนแบบแห้ง (Dry Oxidation) จะทำให้ออกไซด์มีความหนาแน่นของ Oxide fixed charge ต่ำกว่าออกไซด์ซึ่งถูกปลุกด้วยการทำออกซิเดชันด้วยความร้อนแบบเปียก ที่อุณหภูมิการทำออกซิเดชันเดียวกัน (28)
3. อัตราเร็วของการทำให้แวนผลึกเย็นตัวลงจากอุณหภูมิการทำออกซิเดชัน ความหนาแน่นของ Oxide fixed charge ในออกไซด์จะมีค่าต่ำที่สุด เมื่อลดอุณหภูมิของแวนผลึกลง



อย่างรวดเร็วหลังจากทำออกซิเดชันแล้ว (28) อย่างไรก็ตามอัตราเร็วของการลดอุณหภูมิลงนั้น ต้องคำนึงถึงการปิดตัวของแวนดลิกเนื่องจากความเครียดของแวนดลิกด้วย (ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น)

4. ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนในการทำออกซิเดชัน ความหนาแน่นของ Oxide fixed charge ในออกไซด์จะมีความสูงขึ้นเมื่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนในการทำออกซิเดชันสูงขึ้น (29)

5. ทิศทางผลึก (orientation) ของแวนดลิก การปลูกออกไซด์บนแวนดลิกที่มีทิศทางผลึก 111 จะทำให้มีความหนาแน่นของ Oxide fixed charge ในออกไซด์สูงที่สุด และการปลูกออกไซด์บนแวนดลิกทิศทาง 100 จะมีความหนาแน่นของ Oxide fixed charge ในออกไซด์ต่ำที่สุด (30)

## 2.5 อิทธิพลของ Interface traps ต่อสิ่งประดิษฐ์มอส

Interface trap เป็นความบกพร่องเนื่องจากชั้นของซิลิกอนบริเวณรอยต่อระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ถูกออกซิไดซ์ไม่สมบูรณ์ Interface trap จะมีระดับพลังงานกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap) ของซิลิกอน สามารถแลกเปลี่ยนประจุกับซิลิกอนได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการไบแอสเกต Interface trap ถ้ามีเป็นจำนวนมากจะมีผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ และความหนาแน่นของ Interface trap จะเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการใช้งานของสิ่งประดิษฐ์ อิทธิพลของ Interface trap ต่อสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์มอส มีดังต่อไปนี้

1. ทำให้แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) ของทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด P ลดลง และของชนิด N เพิ่มขึ้น
2. ทำให้แรงดันเบรกดาวน์ที่หัวต่อเดรนของทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด P เพิ่มขึ้น และชนิด N ลดลง
3. เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของการไบแอสเกตจะมีผลต่อการแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง Interface trap กับซิลิกอน และการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุภายในช่องนำไฟฟ้า (Channel) ดังนั้นถ้ามีความหนาแน่นของ Interface trap สูง จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่บ่อนให้เกิดไปกับการเปลี่ยนแปลงประจุระหว่าง Interface trap กับซิลิกอน ซึ่งมีผลทำให้อัตราขยายของสิ่งประดิษฐ์มอสต่ำลง นอกจากนี้แล้ว Interface trap ยังทำให้ความ



คล่องตัวของพาหะในช่องนำไฟฟ้าลดลง ซึ่งทำให้อัตราขยายของสิ่งประดิษฐ์มอลลดลงเช่นกัน

4. ทำให้เกิดกระแสรั่วที่หัวต่อเดรนขึ้น ซึ่งจะมีผลในการลดความไว (sensitivity) ต่อสัญญาณขนาดเล็กของสิ่งประดิษฐ์มอลลง และยังทำให้สิ่งประดิษฐ์มอลกินไฟมากเกินไปด้วย

## 2.6 การควบคุมความหนาแน่นของ interface trap ในออกไซด์

ความหนาแน่นของ interface trap บริเวณรอยต่อระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการทำออกซิเดชัน สภาพในการทำออกซิเดชัน (การทำออกซิเดชันด้วยความร้อนแบบเปียกหรือแบบแห้ง) ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนในการทำออกซิเดชันและทิศทางผลึกของแวนผลึก ความหนาแน่นของ interface trap จะไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือปน และความเข้มข้นของสารเจือปนในสารกึ่งตัวนำ ความหนาแน่นของ interface trap จะมีค่าน้อยเมื่อการปลูกชั้นออกไซด์ทำที่อุณหภูมิสูง (31) ออกไซด์ซึ่งถูกปลูกโดยการทำออกซิเดชันด้วยความร้อนบนแวนผลึกที่มีทิศทางผลึกแบบ 100 จะมีความหนาแน่นของ interface trap น้อยที่สุด และออกไซด์ซึ่งถูกปลูกบนแวนผลึกที่มีทิศทางผลึกแบบ 111 จะมีความหนาแน่นของ interface trap สูงที่สุด (30) ความหนาแน่นของ interface trap ภายในออกไซด์ซึ่งปลูกโดยการทำออกซิเดชันด้วยความร้อนแบบเปียกมีค่าต่ำ ( $10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ) กว่าในออกไซด์ซึ่งปลูกโดยการทำออกซิเดชันด้วยความร้อนแบบแห้ง ( $10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ) ถึงแม้ความหนาแน่นของ interface trap ภายในออกไซด์จะลดลงด้วยเงื่อนไขในการปลูกชั้นออกไซด์ดังกล่าวแล้ว แต่ความหนาแน่นของ interface trap ภายในออกไซด์ยังมีมากเกินไปอยู่ เพื่อลดความหนาแน่นของ interface trap นี้จึงแวนผลึกต้องถูกนำไปผ่านกระบวนการแอนนัลซึ่งกระบวนการแอนนัลนี้มีด้วยกัน 2 กระบวนการ คือ

1. การทำแอนนัลหลังการจอบผิวโลหะ แวนผลึกซึ่งปลูกชั้นออกไซด์และจอบผิวโลหะเรียบร้อยแล้วจะถูกนำมาทำแอนนัลที่อุณหภูมิประมาณ  $350^{\circ}\text{C}$  -  $500^{\circ}\text{C}$  ในบรรยากาศก๊าซไฮโดรเจนหรือก๊าซเฉื่อยเป็นเวลานานกว่า 30 นาที ก่อนการกัดอะลูมิเนียมออกไปเพื่อทำเกตการทำแอนนัลเป็นการทำให้โมเลกุลของน้ำซึ่งอยู่ในเนื้อออกไซด์ (แม้ว่าจะเป็นการทำออกซิเดชันด้วยความร้อนแบบแห้ง) ทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมเกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์และอะตอมของไฮโดรเจน อะตอมของไฮโดรเจนบางส่วนจะแพร่ซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับ interface trap บริเวณรอยต่อระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ ทำให้ interface trap เป็นกลางทางไฟฟ้าลดผลของ

Interface trap ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์มอส การทำแอนนัลจะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ค่าหนึ่งซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นของ Interface trap เหลือน้อยที่สุดหลังจากทำแอนนัลแล้ว ซึ่งอุณหภูมินี้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการทำออกซิเดชันด้วยความร้อน และเงื่อนไขในการลดอุณหภูมิของแวนผลึกจากอุณหภูมิในการทำออกซิเดชันลง การทำแอนนัลในบรรยากาศที่มีก๊าซไฮโดรเจนผสมอยู่ด้วยจะทำให้ความหนาแน่นของ Interface trap ลดลง แต่ความหนาแน่นของ Interface trap ไม่ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของก๊าซไฮโดรเจนที่ผสมอยู่กับก๊าซเฉื่อยเช่น ก๊าซไนโตรเจนมากนัก (32)

2. การทำแอนนัลหลังการทำออกซิเดชัน หลังจากปลูกชั้นออกไซด์โดยการทำออกซิเดชันด้วยความร้อนแล้ว แวนผลึกจะถูกทำแอนนัลโดยทิ้งไว้ภายในเตาออกซิเดชันที่อุณหภูมิที่ใช้ทำออกซิเดชันเป็นเวลานาน 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนหรือก๊าซเฉื่อย การลดลงของความหนาแน่นของ Interface trap หลังจากการทำแอนนัลวิธีนี้แล้ว เชื่อว่าจะต่อมของไฮโดรเจนในบรรยากาศของการทำแอนนัลและโมเลกุลของน้ำในออกไซด์มีส่วนของการลดนี้ด้วย

### 2.7 อิทธิพลของความแตกต่างของฟังก์ชันงาน (work function difference) ระหว่างซิลิกอนกับโลหะและเสตทระหว่างผิว (Interface state) ต่อสิ่งประดิษฐ์มอส

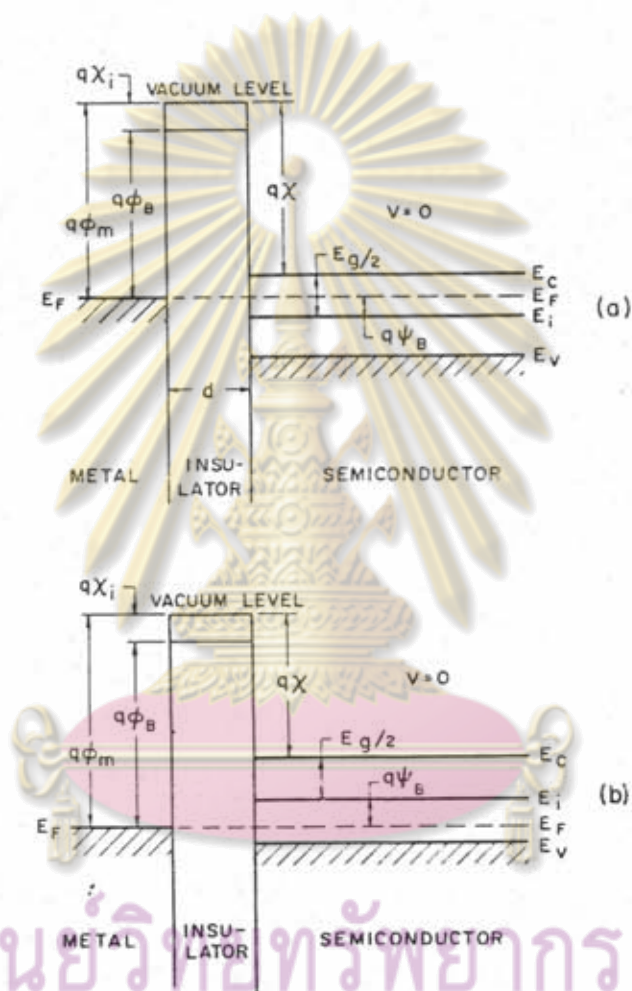
ตัวเก็บประจุมอสในอุดมคติ ค่าฟังก์ชันงานของเกตและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำขณะที่ไม่มีการไบอัสตัวเก็บประจุมอส ( $V = 0$ ) จะมีค่าเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ทำให้ไม่มีค่าความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันงาน

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left( x + \frac{E_g}{2q} - \phi_B \right) = 0 \quad \text{สำหรับชนิด n} \quad (2.10)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left( x + \frac{E_g}{2q} + \phi_B \right) = 0 \quad \text{สำหรับชนิด p} \quad (2.11)$$

- โดยที่  $\phi_{ms}$  คือ ความแตกต่างฟังก์ชันงานระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ (ซิลิกอน) ในหน่วย eV  
 $\phi_m$  คือ ฟังก์ชันงานของโลหะ ในหน่วย eV  
 $x$  คือ สัมพรรคภาพของอิเล็กตรอน (Electron affinity) ในสารกึ่งตัวนำ ในหน่วย eV

- $e_s$  คือ ช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำในหน่วยจูล  
 $\psi_B$  คือ ความต่างศักย์ระหว่างพลังงานเฟอร์มี และระดับพลังงานเฟอร์มีบริสุทธิ์ (Intrinsic Fermi level) ในหน่วย eV



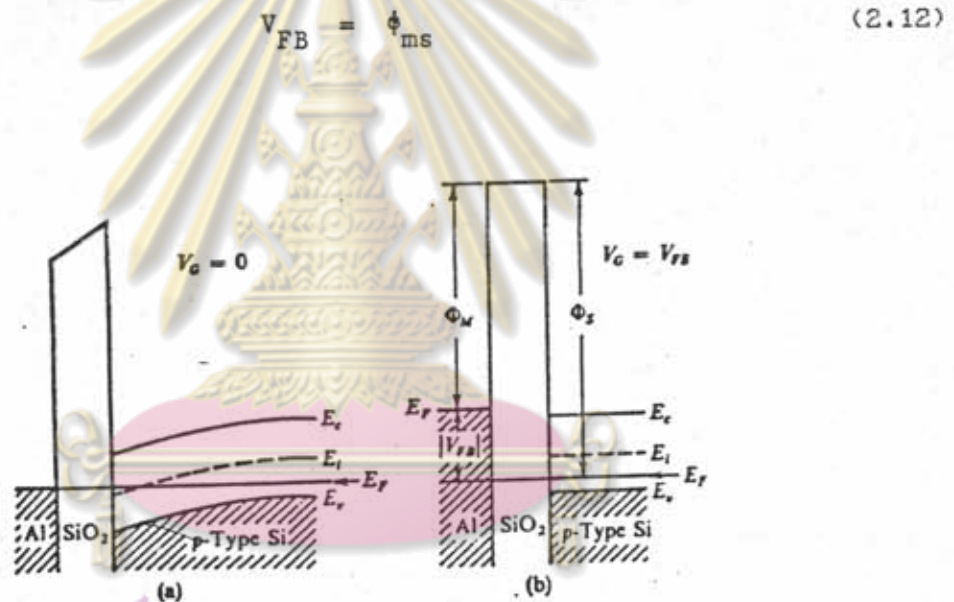
## ศูนย์วิจัยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของตัวเก็บประจุโมสในอุดมคติเมื่อไม่มีการไบอัส

- a) สารกึ่งตัวนำชนิด n  
 b) สารกึ่งตัวนำชนิด p



แต่ในทางปฏิบัติแล้วฟังก์ชันงานของเกตและของสารกึ่งตัวนำจะไม่เท่ากัน ด้านที่มีฟังก์ชันงานต่ำกว่าจะมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าอีกด้านหนึ่ง และสำหรับเกตซึ่งทำด้วยอะลูมิเนียมแล้ว ฟังก์ชันงานของเกตจะต่ำกว่าของสารกึ่งตัวนำ ศักย์ไฟฟ้าทางด้านเกตจึงสูงกว่าทางด้านสารกึ่งตัวนำซึ่งมีผลทำให้เกิดการดึงคู่อิเล็กตรอนในเนื้อสารกึ่งตัวนำมาออกันอยู่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำในทางปฏิบัติจึงมีการโค้งลงที่บริเวณผิวดังแสดงในรูปที่ 2.9 เพื่อให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำกลับอยู่ในสภาพแถบราบ (Flat band) เหมือนเดิม ต้องป้อนแรงดันลบเข้ามาที่เกตเพื่อให้อิเล็กตรอนบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำออกไป แรงดันดังกล่าวนี้เรียกว่าแรงดันแถบราบ (Flat band voltage,  $V_{FB}$ )



รูปที่ 2.9 ผลของความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ  
 a) เมื่อ  $V = 0$   
 b) เมื่อ  $V = V_{FB}$  ในสภาพแถบราบ  
 ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอกจากนี้ประจุไฟฟ้าต่าง ๆ บริเวณรอยต่อระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ได้แก่ประจุไฟฟ้าในออกไซด์และ interface trap ซึ่งจะรวมเรียกว่าเสตทระหว่างผิว (Interface state,  $Q_{ss}$ ) ประจุเหล่านี้จะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นประจุบวกทั้งสิ้น ดังนั้นการปรากฏของเสตทระหว่างผิวขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนในเนื้อสารกึ่งตัวนำมาออกันที่ผิวของสารกึ่งตัว

นำเช่นกัน ซึ่งจะให้ผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมอสเสริมกับผลเนื่องจากความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นเพื่อให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำอยู่ในสภาพแถบราบ แรงดันแถบราบที่ป้อนให้ตัวเก็บประจุมอสจะเป็น

$$V_{FB} = \phi_{ms} + Q_{ss} / C'_{ox} \quad (2.13)$$

โดยที่  $Q_{ss}$  คือ ความหนาแน่นของสถานะระหว่างผิว  
 $C'_{ox}$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ต่อหน่วยพื้นที่



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย