

บทที่ 2

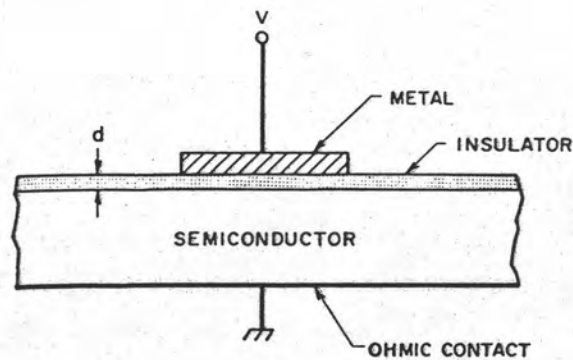
โครงสร้าง MIS

โครงสร้างสิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำแบบ MIS เป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญแบบหนึ่ง สำหรับการทดสอบและตรวจวัดสมบัติบ่งชี้ทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ การศึกษาสมบัติต่าง ๆ จากโครงสร้างแบบนี้เป็นขั้นตอนหนึ่งของการพัฒนาสารกึ่งตัวนำทั้งในเชิงวิชาการและเชิงประยุกต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการพัฒนาและการผลิตอุปกรณ์กึ่งตัวนำ โครงสร้าง MIS เป็นโครงสร้างพื้นฐานในการทำความเข้าใจหลักการการทำงานของอุปกรณ์กึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ อีกด้วย เช่น ทรานซิสเตอร์สนาม (Field Effect Transistor), วงจรรวมชนิดเอ็นมอส (NMOS), วงจรรวมชนิดพีมอส (PMOS), และวงจรรวมชนิดซีมอส (CMOS) เป็นต้น ในปัจจุบันจะพบอุปกรณ์กึ่งตัวนำจำพวกวงจรรวมที่มีความหนาแน่นของวงจรมากมาย เช่น LSI, MSI และ VLSI อุปกรณ์กึ่งตัวนำเหล่านี้ส่วนใหญ่จะใช้เทคโนโลยีในการผลิตประเภทมอสทั้งนั้น ดังนั้น ในบทนี้เราจะมาศึกษาโครงสร้าง MIS ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์เหล่านี้ว่าเป็นเช่นไร โดยจะศึกษาโครงสร้างนี้ในทางอุดมคติก่อนเพื่อใช้เป็นแบบจำลองในการทำความเข้าใจโครงสร้าง MIS ในทางปฏิบัติ จากนั้นจะมาพิจารณาถึงผลที่ทำให้โครงสร้าง MIS ในทางปฏิบัติเบี่ยงเบนไปจากโครงสร้างในอุดมคติ

2.1 โครงสร้าง MIS ในอุดมคติ

โครงสร้าง MIS เป็นรอยต่อของโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็นชั้นของโลหะประกบบนผิวหน้าของแวนผลึกสารกึ่งตัวนำโดยมีชั้นฉนวนบาง ๆ คั่นระหว่างสารทั้งสองชนิด ในกรณีที่ชั้นฉนวนที่คั่นนี้เป็นออกไซด์ของสารกึ่งตัวนำ โครงสร้างนั้นจะเรียกว่า MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) โครงสร้างทั้งคู่มุ่งหมายถึงของสิ่งเดียวกัน ลักษณะโครงสร้างดังกล่าวนี้เหมือนกับโครงสร้างของตัวเก็บประจุ (capacitor) ที่มีความจุน้อย ลักษณะการทำงานจึงมีส่วนที่เกี่ยวข้องกับความจุของระบบ สิ่งที่แตกต่างกัน

กันของระบบ MIS กับตัวเก็บประจุธรรมดา ก็คือค่าความจุของตัวเก็บประจุธรรมดา มีค่าคงที่ ในขณะที่ค่าความจุของระบบ MIS เปลี่ยนแปลงได้ถ้ามีการป้อนศักย์ไฟฟ้าหรือไบแอส ลักษณะโครงสร้างและการไบแอสแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 เมื่อ d คือความหนาของชั้นฉนวน และ V คือแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการไบแอส ค่าแรงดันไฟฟ้านี้เราวัดที่ขั้วโลหะส่วนบนเทียบกับรอยต่อโอห์มมิกด้านล่าง เช่น ถ้า V เป็นบวก หมายความว่าขั้วโลหะด้านบนจะป้อนด้วยไฟบวกเมื่อเทียบกับขั้วโอห์มมิกเป็นต้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้าง MIS

คุณสมบัติของโครงสร้าง MIS ทั้งในเรื่องความจุที่เปลี่ยนแปลงได้ตลอดจนสมบัติอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับพาหะนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำสามารถอธิบายได้ด้วยโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำพร้อมกับโครงสร้างระดับพลังงานของโลหะที่ประกอบขึ้นเป็นระบบของ MIS

โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อแบบนี้เมื่อยังไม่ได้อ่อนแรงคันไบเอส เป็นดังรูปที่ 2.2 ก และรูปที่ 2.2 ข สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี ตามลำดับ เรานิยามโครงสร้าง MIS ในอุดมคติเป็นดังนี้

1. เมื่อยังไม่อ่อนแรงคันไบเอส ค่าเวรค์ฟังก์ชันของโลหะจะเท่ากับค่าเวรค์ฟังก์ชันของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการข้างล่าง

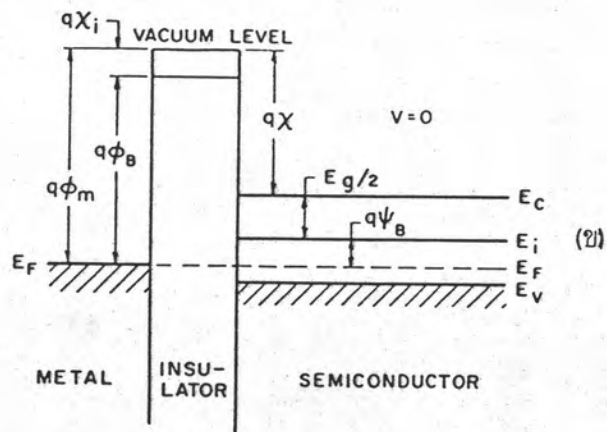
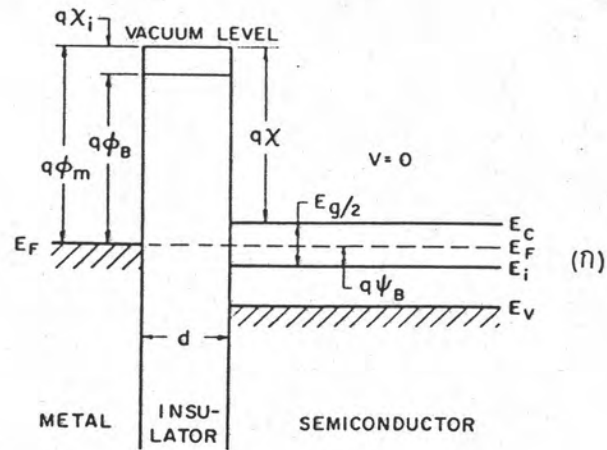
$$\text{ชนิดเอ็น } \varphi_{ms} = \varphi_m - \left(x + \frac{E_g}{2q} - \phi_B\right) = 0 \quad 2.1$$

$$\text{ชนิดพี } \varphi_{ms} = \varphi_m - \left(x + \frac{E_g}{2q} + \phi_B\right) = 0 \quad 2.2$$

เมื่อ φ_m คือค่าเวรค์ฟังก์ชันของโลหะ, x คือค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ, E_g คือค่าช่องว่างแถบพลังงาน, ϕ_B คือค่าศักย์แตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิ E_F และระดับอินทรินสิคเฟอร์มิ E_i

2. ประจุไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำเมื่ออ่อนแรงคันไบเอสที่ขั้วโลหะจะเกิดเฉพาะในสารกึ่งตัวนำใกล้ ๆ กับรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ โดยที่ประจุเหนี่ยวนำจะมีปริมาณเท่ากับที่ขั้วโลหะแต่มีชนิดตรงกันข้าม

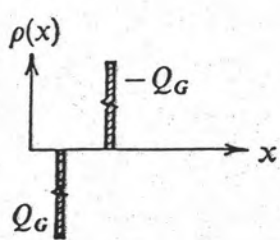
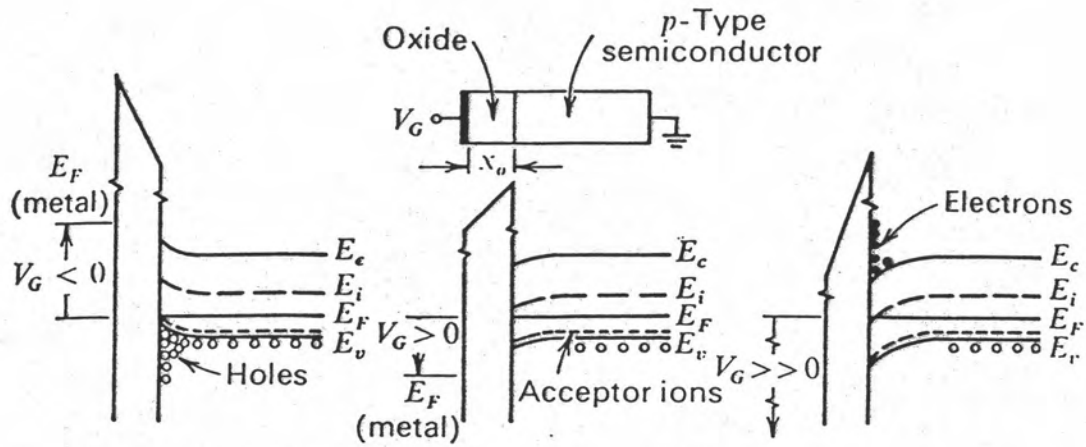
3. ประจุไฟฟ้าไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นฉนวนได้เมื่ออ่อนไบเอสด้วยแรงคันไฟตรง



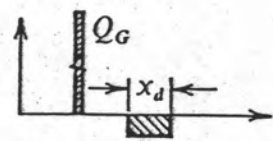
รูปที่ 2.2 โคอะแกรมแถบพลังงานของโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ
 ก. สารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็น
 ข. สารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี

2.1.1 บริเวณปลดพาหะที่ผิวหน้า (surface space charge region)

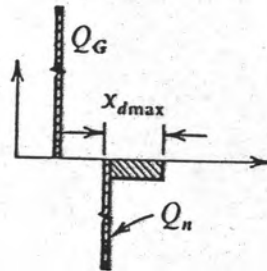
พิจารณาโครงสร้าง MIS มีสารกึ่งตัวนำชนิดพี ความเข้มข้นสารเจือปนเท่ากับ N_A เป็นแผ่นรองรับ เมื่อมีการป้อนแรงดันไบแอสตามรูปที่ 2.1 ลักษณะโคอะแกรมแถบพลังงานจะเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของไบแอส ดังรูปที่ 2.3 เมื่อป้อนแรงดันไบแอสเป็นลบที่ขั้วโลหะเมื่อเทียบกับรอยต่อโอห์มมิก อิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งจะกระจายตรงบริเวณผิวโลหะตรงรอยเชื่อมต่อกับชั้นฉนวน ขณะเดียวกันประจุบวก



(a) Accumulation of majority carriers near surface.



(b) Depletion of majority carriers from surface.



(c) Inversion: accumulation of minority carriers near surface.

รูปที่ 2.3 ไคอะแกรมแถบพลังงานและการกระจายของประจุของโครงสร้าง MIS ที่เงื่อนไขการไบแอสต่าง ๆ กัน

หรือโฮลจะถูกดูมาสะสมอยู่บริเวณใกล้กับรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ
 ง่ายขึ้นเช่นนี้เราเรียกว่า "แอกคิวมูเลชัน (accumulation)" ดังรูปที่ 2.3 ก
 การกระจายของประจุในบริเวณนี้แสดงดังรูปข้างล่าง ในทางตรงข้ามเมื่อป้อนแรงดัน
 ไบแอสเป็นบวก ในรูปที่ 2.3 ข โฮลในแถบวาเลนซ์จะถูกผลักออกไป จะทำให้
 เกิดบริเวณปลอดพาหะ บริเวณนี้จะประกอบด้วยไอออนผู้รับ (acceptor ions)
 ที่ไม่ได้รับการชดเชย (uncompensated) ประจุเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในสาร
 กึ่งตัวนำมีค่าดังสมการ

$$Q_s = -qN_A x_d \quad \text{2.3}$$

qN_A x_d

เมื่อ x_d คือความกว้างของชั้นปลอดพาหะ

เมื่อป้อนแรงดันไบแอสให้เป็นบวกมากขึ้น แถบนำบริเวณใกล้กับรอยต่อระหว่างชั้นฉนวน
 และสารกึ่งตัวนำจะเบนลงมามากขึ้น จนกระทั่งระดับอินทรีนสิก E_i ลดต่ำลงผ่าน
 ระดับเฟอร์มีที่จุดนี้ จำนวนของพาหะข้างน้อยคืออิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ
 จะเพิ่มมากขึ้น และมีจำนวนมากกว่าโฮลที่ผิวหน้า ทำให้เกิดการกลับขั้วที่ผิวหน้าของ
 สารกึ่งตัวนำ ภายใต้เงื่อนไขนี้เราเรียกว่า "อินเวอร์ชัน (inversion)"
 อิเล็กตรอนจำนวนนี้จะรวมตัวกันสร้างชั้นอินเวอร์ชันขึ้นมา ชั้นอินเวอร์ชันนี้จะทำหน้าที่
 เป็นส่วนป้องกันสนามไฟฟ้าจากขั้วโลหะที่จะมาผลักโฮลที่ขอบของชั้นปลอดพาหะ เป็นผล
 ให้ชั้นปลอดพาหะจะกว้างออกถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง กำหนดให้เป็น x_{dmax} ภายใต้
 เงื่อนไขที่ว่าประจุที่เหนี่ยวนำขึ้นในสารกึ่งตัวนำจะมีค่าดังสมการ

$$Q_s = Q_n + qN_A x_{dmax} \quad \text{2.4}$$

เมื่อ Q_n คือประจุลบเนื่องจากอิเล็กตรอน

ต่อจากนี้ไปเราจะใช้แบบจำลองการประมาณการผลักประจุ (depletion
 approximation) โดยการสมมุติว่าประจุที่ถูกเหนี่ยวนำในสารกึ่งตัวนำมีค่าดังสมการ
 ที่ 2.3 เพื่อที่จะนำไปใช้ในการอธิบายลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS

หรือโฮลจะถูกดูดมาสะสมอยู่บริเวณใกล้กับรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ
 เจื่อนไซเช่นนี้เราเรียกว่า "แอคคิวมูเลชัน (accumulation)" ดังรูปที่ 2.3 ก
 การกระจายของประจุในบริเวณนี้แสดงดังรูปข้างล่าง ในทางตรงข้ามเมื่อป้อนแรงดัน
 ไบแอสเป็นบวก ในรูปที่ 2.3 ข โฮลในแถบวาเลนซ์จะถูกผลักออกไป จะทำให้
 เกิดบริเวณปลอดพาหะ บริเวณนี้จะประกอบด้วยไอออนผู้รับ (acceptor ions)
 ที่ไม่ได้รับการชดเชย (uncompensated) ประจุเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในสาร
 กึ่งตัวนำมีค่าดังสมการ

$$Q_s = -qN_A X_d \quad 2.3$$

เมื่อ X_d คือความกว้างของชั้นปลอดพาหะ

เมื่อป้อนแรงดันไบแอสให้เป็นบวกมากขึ้น แถบนำบริเวณใกล้กับรอยต่อระหว่างชั้นฉนวน
 และสารกึ่งตัวนำจะเบนลงมามากขึ้น จนกระทั่งระดับอินทรินสิก E_i ลดต่ำลงผ่าน
 ระดับเฟอร์มีที่จุดนี้ จำนวนของพาหะข้างน้อยคืออิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ
 จะเพิ่มมากขึ้น และมีจำนวนมากกว่าโฮลที่ผิวหน้า ทำให้เกิดการกลับขั้วที่ผิวหน้าของ
 สารกึ่งตัวนำ ภายใต้เงื่อนไขนี้เราเรียกว่า "อินเวอร์ชัน (inversion)"

อิเล็กตรอนจำนวนนี้จะรวมตัวกันสร้างชั้นอินเวอร์ชันขึ้นมา ชั้นอินเวอร์ชันนี้จะทำหน้าที่
 เป็นส่วนป้องกันสนามไฟฟ้าจากขั้วโลหะที่จะมาผลักโฮลที่ขอบของชั้นปลอดพาหะ เป็นผล
 ให้ชั้นปลอดพาหะจะกว้างออกถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง กำหนดให้เป็น X_{dmax} ภายใต้
 เงื่อนไขที่ว่านี้ประจุที่เหนี่ยวนำขึ้นในสารกึ่งตัวนำจะมีค่าดังสมการ

$$Q_s = Q_n + qN_A X_{dmax} \quad 2.4$$

เมื่อ Q_n คือประจุลบเนื่องจากอิเล็กตรอน

ต่อจากนี้ไปเราจะใช้แบบจำลองการประมาณการผลักประจุ (depletion
 approximation) โดยการสมมุติว่าประจุที่ถูกเหนี่ยวนำในสารกึ่งตัวนำมีค่าดังสมการ
 ที่ 2.3 เพื่อที่จะนำไปใช้ในการอธิบายลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS

ในหัวข้อต่อไป ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากประจุตามสมการที่ 2.3 ที่ระยะต่าง ๆ ภายในชั้นปลอดพาหะสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตสมการของโพซอง (Poisson's equation) ในหนึ่งมิติ

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad 2.5$$

$$\text{เมื่อ } \rho(x) = -q N_A$$

ϵ_s คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ

ϵ_0 คือค่าเพอร์มิติวิตีของสุญญากาศ

จะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ระยะต่าง ๆ ภายในบริเวณปลอดพาหะดังสมการ

$$\phi = \phi_s \left(1 - \frac{x}{x_d}\right)^2 \quad 2.6$$

เมื่อ ϕ_s คือศักย์ไฟฟ้าที่ผิว (surface potential) มีค่าเท่ากับ

$$\phi_s = \frac{q N_A x_d^2}{2 \epsilon_s \epsilon_0} \quad 2.7$$

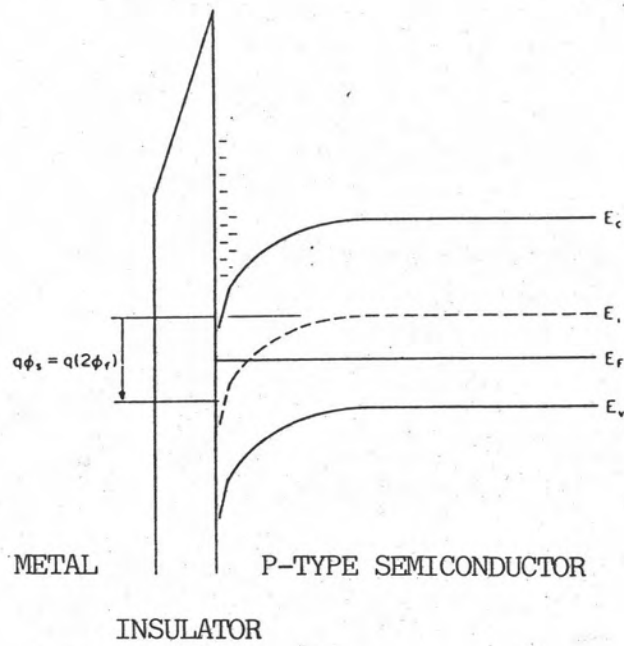
การกระจายของศักย์ไฟฟ้าตามสมการ 2.6 แสดงดังรูปที่ 2.4 พบว่าค่าที่คำนวณด้วยคอมพิวเตอร์กับแบบจำลองที่เราใช้มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นบริเวณใกล้ ๆ กับรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน เนื่องจากแบบจำลองของเรามีได้รวมประจุเนื่องจากอิเล็กตรอนด้วย อย่างไรก็ตามเราจะยังคงใช้แบบจำลองนี้ในการอธิบายในหัวข้อต่อไป ทั้งนี้เพราะเป็นแบบจำลองที่ง่ายในการทำความเข้าใจและการวิเคราะห์ผลกระทำได้ง่าย

$$\varphi_S(\text{inv}) = 2\varphi_F \quad 2.9$$

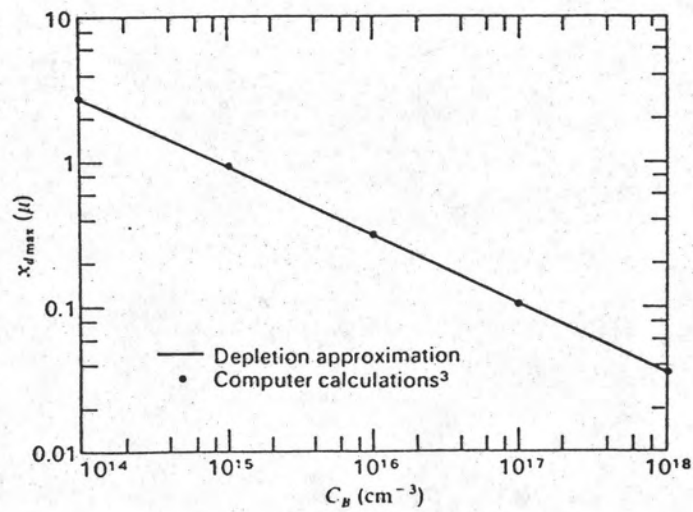
เมื่อไบแอสให้เป็นบวกมากขึ้น จะทำให้ความโค้งของแถบพลังงานเบนไปมากยิ่งขึ้น กล่าวคือ $\varphi_S(\text{inv}) > 2\varphi_F$ จะพบว่าระดับเฟอร์มี E_F จะเบนเข้าใกล้แถบนำมากยิ่งขึ้นเป็นผลให้จำนวนอิเล็กตรอนในแถบนำซึ่งรวมตัวกันเป็นชั้นอินเวอร์ชันเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว สนามไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนที่เพิ่มจำนวนจากจำนวนที่จุด $\varphi_S(\text{inv}) = 2\varphi_F$ จะไปหักล้างพอดีกับสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุบวกเมื่อไบแอสให้เป็นบวกมากขึ้น ซึ่งจะเป็นผลให้โฮลที่ขอบของชั้นปลดพาหะไม่ถูกผลักเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากการไบแอสที่เป็นบวกมากขึ้น ชั้นปลดพาหะจึงกว้างออกถึงค่าสูงสุด ค่าความกว้างของชั้นปลดพาหะเมื่อ $\varphi_S(\text{inv}) = 2\varphi_F$ หาได้โดยการแทนสมการ 2.9 ลงในสมการที่ 2.7 เราจะได้

$$x_{d_{\max}} = \sqrt{\frac{2\epsilon_S \epsilon_0 \varphi_S(\text{inv})}{qN_A}} \quad 2.10$$

จากสมการที่ 2.10 จะพบว่า ความกว้างมากที่สุดของชั้นปลดพาหะจะมีค่าแปรผกผันกับรากที่สองของความเข้มข้นสารเจือปนของสารกึ่งตัวนำ สมการที่ 2.10 แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ไตอะแกรมแถบพลังงานเมื่อเริ่มเกิดชั้นอินเวอรชันอย่างรุนแรง



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความกว้างมากที่สุดของชั้นปลอดพาหะมีค่าขึ้นกับความเข้มข้นสารเจือปน

2.1.2 ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้า

จากโครงสร้าง MIS ในอุดมคติซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่มีศักย์ไฟฟ้าสัมผัส (contact potential) แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับโครงสร้างนี้จะแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกตกคร่อมชั้นฉนวน อีกส่วนหนึ่งตกคร่อมสารกึ่งตัวนำ ดังสมการ

$$V_G = V_{ox} + \phi_s \quad 2.11$$

เมื่อ V_G คือแรงดันไบแอส V_{ox} คือแรงดันไฟฟ้าส่วนที่ตกคร่อมชั้นฉนวนและ ϕ_s คือแรงดันไฟฟ้าส่วนที่ตกคร่อมสารกึ่งตัวนำ

สมมุติว่าไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ การขาดไฟฟ้า (electric displacement) จะมีค่าต่อเนื่อง ดังสมการ

$$\epsilon_{ox} E_{ox} = \epsilon_s E_s \quad \text{ที่บริเวณรอยต่อ} \quad 2.12$$

สมมุติต่อไปอีกว่าไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ในชั้นฉนวน สนามไฟฟ้าภายในชั้นฉนวน จะมีค่าสม่ำเสมอ ดังสมการ

$$E_{ox} = \frac{V_{ox}}{x_{ox}} \quad 2.13$$

โดยที่ x_{ox} คือความกว้างของชั้นฉนวน

และจากกฎของเกาส์ (Gauss's law) จะหาค่าสนามไฟฟ้าที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำได้ดังสมการ

$$E_s = - \frac{Q_s}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad 2.14$$

จากสมการที่ 2.12 สมการที่ 2.13 และสมการที่ 2.14 เราจะได้แรงดันไฟฟ้าส่วนที่ตกคร่อมชั้นฉนวน มีค่าดังสมการ

$$V_{ox} = \frac{\chi_{ox}}{\epsilon_{ox}\epsilon_0} \cdot Q_s = - \frac{Q_s}{C_{ox}} \quad 2.15$$

แทนค่า V_{ox} ลงในสมการที่ 2.11 จะได้

$$V_G = - \frac{Q_s}{C_{ox}} + \phi_s \quad 2.16$$

จากสมการที่ 2.16 จะเห็นว่าประจุไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำในสารกึ่งตัวนำ จะมีค่าขึ้นกับแรงดันไบแอส V_G ดังนั้นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงจำนวนประจุที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอส จึงเป็นการศึกษาการวัดความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ดังนั้นนิยามของความจุไฟฟ้าตามสมการ

$$C \equiv \frac{dQ_G}{dV_G} = - \frac{dQ_s}{dV_G} = - \frac{dQ_s}{\frac{dQ_s}{C_{ox}} + d\phi_s} \quad 2.17$$

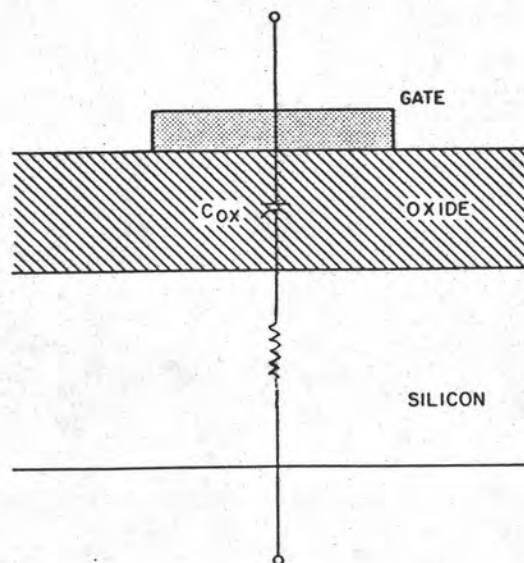
$$\text{หรือ} \quad C = \frac{1}{\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_s}} \quad 2.18$$

$$\text{เมื่อ} \quad C_s \equiv - \frac{dQ_s}{d\phi_s} = \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{\chi d} \quad 2.19$$

C_s เป็นค่าความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ของชั้นลวดทาสความกว้างเท่ากับ χd ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS จึงเป็นตัวเก็บประจุ C_{ox} ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ C_s แทนค่า χd จากสมการที่ 2.7 ลงในสมการที่ 2.19 และจากสมการที่ 2.18 เราจะได้

$$\frac{C}{C_{ox}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2\epsilon_{ox}^2 \epsilon_0}{qN_A \epsilon_s x_{ox}^2} \cdot V_G}} \quad 2.20$$

จากสมการที่ 2.20 จะพบว่าค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS จะมีค่าแปรผกผันกับรากที่สองของ V_G นั่นคือค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS จะลดลง เมื่อ V_G มีค่าเป็นบวกมากขึ้นคือการไบแอสที่ทำให้เกิดชั้นปลอดพาหะนั่นเอง และเมื่อ V_G มีค่าเท่ากับศูนย์หรือเป็นลบ ก็จะไม่มีการเกิดชั้นปลอดพาหะเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อ V_G มีค่าเป็นลบจะเกิดการสะสมของประจุบวกบริเวณใกล้กับรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ เปรียบเสมือนกับเป็นขั้วโลหะอีกด้านหนึ่งของชั้นฉนวน โดยที่บริเวณที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมอยู่ ดังรูปที่ 2.7 ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ในสมการที่ 2.20 จึงเป็นค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฉนวน

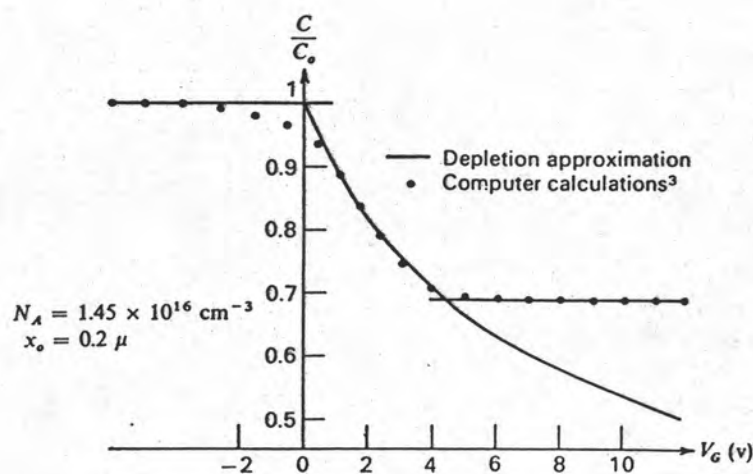


รูปที่ 2.7 โครงสร้าง MIS เมื่อไบแอสอยู่ในเงื่อนไขแอกคิวมูเลชัน

สำหรับในกรณีที่ V_G เป็นบวก ถ้าไบแอสต่อไปจนกระทั่งถึงจุดเริ่มต้นของเงื่อนไขการกลับขั้วอย่างรุนแรง (strongly inverted) และชั้นปลอดพาหะจะกว้างออกถึงค่าสูงสุดและจะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อป้อน V_G มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันไบแอสที่จุดนี้จะทำให้เกิดประจุเหนี่ยวนำขึ้นในสารกึ่งตัวนำให้เป็น Q_B และ $\phi_S(\text{inv}) = 2\phi_F$ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 2.16 เราจะได้แรงดันไบแอสที่ขั้วโลหะเป็นแรงดันไบแอสที่จุดเริ่มการเกิดชั้นอินเวอร์ชันอย่างรุนแรง ซึ่งเราเรียกว่า "แรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage)" หรือ V_T มีค่าดังสมการ

$$V_T = -\frac{Q_B}{C_{\text{ox}}} + \phi_S(\text{inv}) \quad 2.21$$

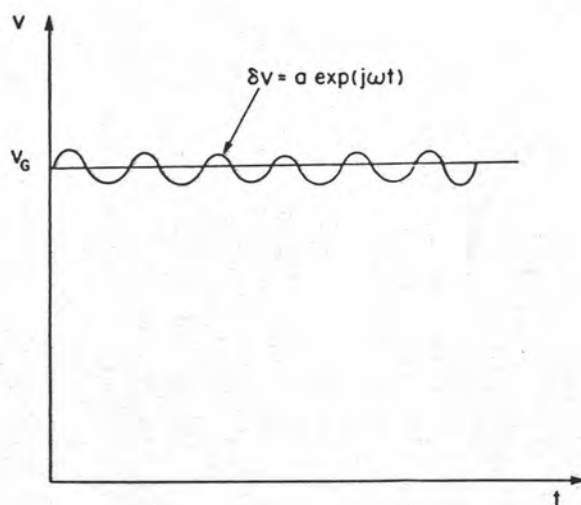
ดังนั้น ค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS เมื่อ V_G เท่ากับ V_T จะมีค่าคงที่ ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีแผ่นรองรับเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี แสดงดังรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าแบบจำลองที่เราใช้อธิบายใช้ได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณเครื่องคอมพิวเตอร์ จากแบบจำลองที่มีความถูกต้องมากกว่า



รูปที่ 2.8 ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS

2.1.3 ผลของความถี่ (frequency effect)

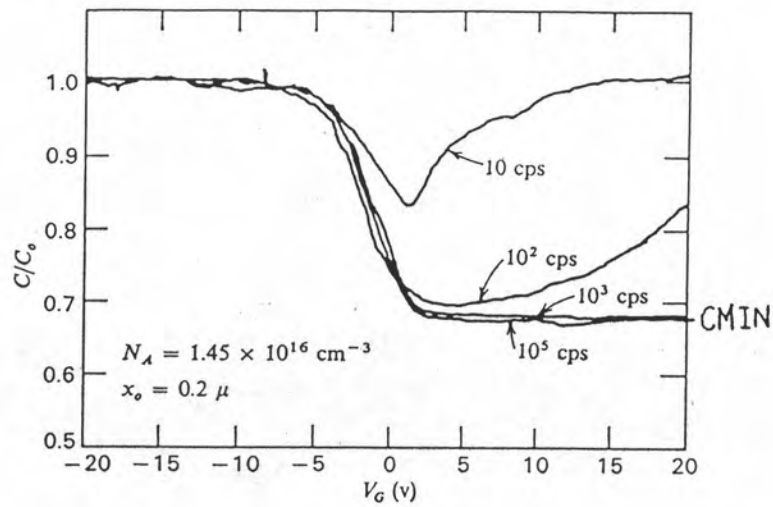
ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS แรงดันไบแอสจะประกอบด้วยสองส่วนคือ แรงดันไฟตรง และแรงดันไฟสลับขนาดแอมพลิจูดขนาดเล็กไม่เกิน 50 mV เพื่อใช้วัดค่าความจุไฟฟ้า ลักษณะของแรงดันไบแอสแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แรงดันไบแอสโครงสร้าง MIS

เมื่อแรงดันไฟสลับมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ กราฟลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าเมื่อ V_G มากกว่า V_T ในกรณีของแรงดันไฟสลับมีความถี่สูง ค่าความจุไฟฟ้าจะคงที่เท่ากับ C_{MIN} ในขณะที่กรณีของแรงดันไฟสลับมีความถี่ต่ำ ค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าความจุของชั้นฉนวนและจะคงที่ต่อไป ผลอันนี้จะเกิดเฉพาะกรณีที่การไบแอสภายใต้เงื่อนไขของการเกิดชั้นอินเวอร์ชันเท่านั้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพาหะข้างน้อย (ในที่นี้คือ อิเล็กตรอน) ที่รวมตัวกันเป็นชั้นอินเวอร์ชัน ในกรณีของความถี่ของแรงดันไฟสลับมีค่าสูง ปริมาณอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟตรงเท่านั้น ส่วนกรณีที่ความถี่ของแรงดันไฟสลับมีค่าต่ำ ปริมาณอิเล็กตรอนจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของแรงดันไฟสลับและแรงดันไฟตรง

สำหรับขีดจำกัดของความถี่สูงและความถี่ต่ำของแรงดันไฟสลับจะขึ้นกับชนิดของชั้นฉนวนและชนิดของสารกึ่งตัวนำ จากการทดลอง พบว่าสำหรับรอยต่อโลหะ-ซิลิคอนไดออกไซด์-ซิลิคอน ขีดจำกัดของความถี่ประมาณ 5 - 100 Hz [10, 11] ที่ความถี่สูงกว่านี้จะได้กราฟลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูงคือค่าความจุไฟฟ้าในช่วงการไบแอสจนเกิดชั้นอินเวอร์ชันจะมีค่าเป็น C_{MIN} ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ผลของความถี่ต่อกราฟลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้า

2.2 การเบี่ยงเบนไปจากโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ

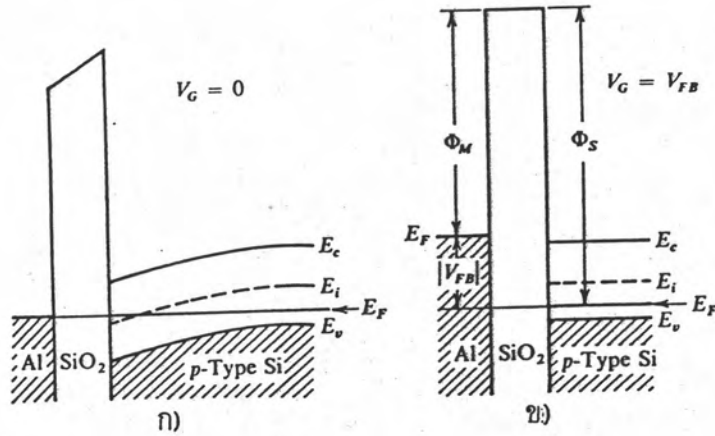
2.2.1 ผลจากความแตกต่างค่าเวอรัคฟังก์ชัน

ในทางปฏิบัติโลหะที่นำมาใช้ทำเป็นขั้วโลหะของโครงสร้าง MIS และสารกึ่งตัวนำที่เป็นแผ่นรองรับของโครงสร้างนี้จะมีค่าระดับเฟอร์มิที่แตกต่างกัน ค่าพลังงานที่แตกต่างกันนี้เราเรียกว่า "ความแตกต่างค่าเวอรัคฟังก์ชัน" ถ้าเราเชื่อมต่อขั้วโลหะกับรอยต่อโอห์มมิกด้วยตัวนำอิเล็กตรอนในโลหะจะไหลมายังสารกึ่งตัวนำหรือกลับกันขึ้นกับระดับเฟอร์มิของโลหะและสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนนี้จะไหลจนกระทั่งระดับเฟอร์มิของทั้งสองข้างมีค่าเท่ากัน ดังรูปที่ 2.11 ก จะเห็นว่ามีความโค้งของแถบพลังงานเกิดขึ้น ทั้งที่ยังมีโตะปอนแรงดันไบแอส เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้าง MIS ในอุดมคติในหัวข้อที่ผ่านมา เมื่อยังไม่ป้อนแรงดันไบแอสคือ $V_G = 0$ จะไม่มีการโค้งของแถบพลังงาน ดังนั้นการที่จะทำให้ความโค้งของแถบพลังงานนี้หมดไปเพื่อให้ตรงกับแบบจำลองที่เราได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนจึงต้องป้อนแรงดัน V_G ให้มีค่าเท่ากับศักย์แตกต่างของค่าเวอรัคฟังก์ชัน ค่าแรงดันไบแอสนี้เราเรียกว่า "แรงดันไฟฟ้าแถบพลังงานเรียบ" (flat band voltage) หรือ V_{FB}

คังสมการ

$$V_{FB} = \phi_M - \phi_S = \phi_{MS} \quad 2.22$$

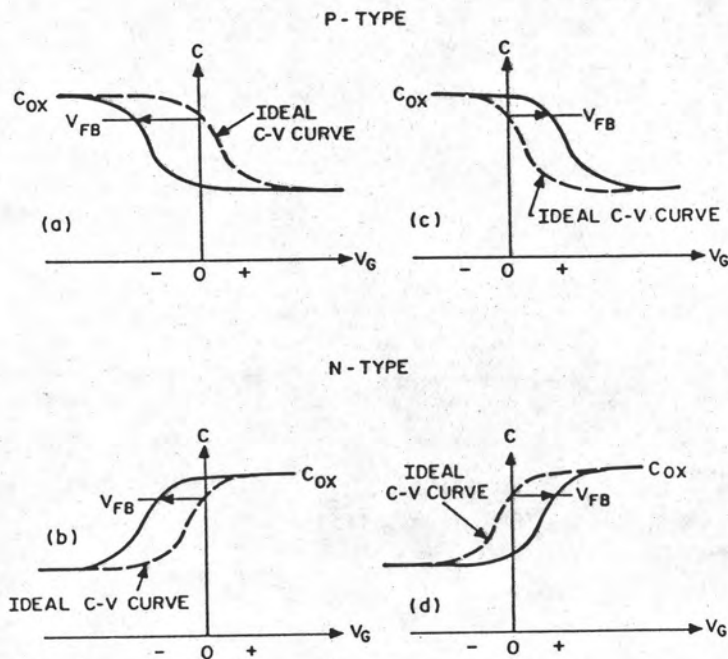
ในรูปที่ 2.11 ข จะเห็นว่าเมื่อป้อน $V_G = V_{FB}$ จะทำให้ความโค้งของแถบพลังงานหายไป หลังจากนั้นเมื่อป้อนแรงดันไบแอสค่าต่าง ๆ กัน เราก็จะใช้แบบจำลองของโครงสร้าง MIS ในอุดมคติอธิบายต่อไปได้ โดยที่ทุก ๆ ค่าของแรงดันไบแอส V_G จะมีค่า V_{FB} เป็นค่าออฟเซต (offset) และค่า V_{FB} นี้จะมีค่าเป็นลบหรือบวก จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำ และชนิดของขั้วโลหะ ผลอันนี้จะทำให้กราฟลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าเลื่อนไปทางซ้ายหรือทางขวามือตามแกน x ด้วยค่า V_{FB} ตัวอย่างของผลนี้แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 ผลของความแตกต่างค่าเวรคพังชั้น

ก. เมื่อ $V_G = 0$

ข. เมื่อ $V_G = V_{FB}$



รูปที่ 2.12 ผลของ V_{FB} มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ถ้า V_{FB} เป็นบวก กราฟจะเลื่อนไปทางขวามือ ถ้า V_{FB} เป็นลบ กราฟจะเลื่อนมาทางซ้ายมือ

2.2.2 ผลจากประจุไฟฟ้าในชั้นฉนวน

พิจารณาชั้นประจุต่อพื้นที่ Q ภายในชั้นฉนวน ดังรูปที่ 2.13 ก เมื่อยังไม่ป้อนแรงดันไบแอสคือ $V_G = 0$ ประจุจำนวนนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุเหนี่ยวนำบริเวณขั้วต่อโลหะ และบริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าดังรูปข้างล่าง การที่จะให้เกิดเงื่อนไขแถบพลังงานเรียบ คือไม่มีประจุไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ เราต้องป้อนแรงดันโพลที่ขั้วโลหะ ดังรูปที่ 2.13 ข เมื่อเพิ่มแรงดันโพลให้เป็นลบมากขึ้น ก็คือป้อนประจุลบที่ขั้วโลหะให้มากขึ้นนั่นเอง จะทำให้ประจุไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสารกึ่งตัวนำลดลงไป และค่าแรงดันโพลที่ทำให้ประจุเหนี่ยวนำนี้หมดไป เราก็เรียกว่า V_{FB} เช่นเดียวกับหัวข้อที่ผ่านมา จากกราฟดังรูปที่ 2.13 ข ค่า V_{FB} คือพื้นที่ใต้กราฟ สนามไฟฟ้าและระยะ x นั้นเอง ดังสมการ

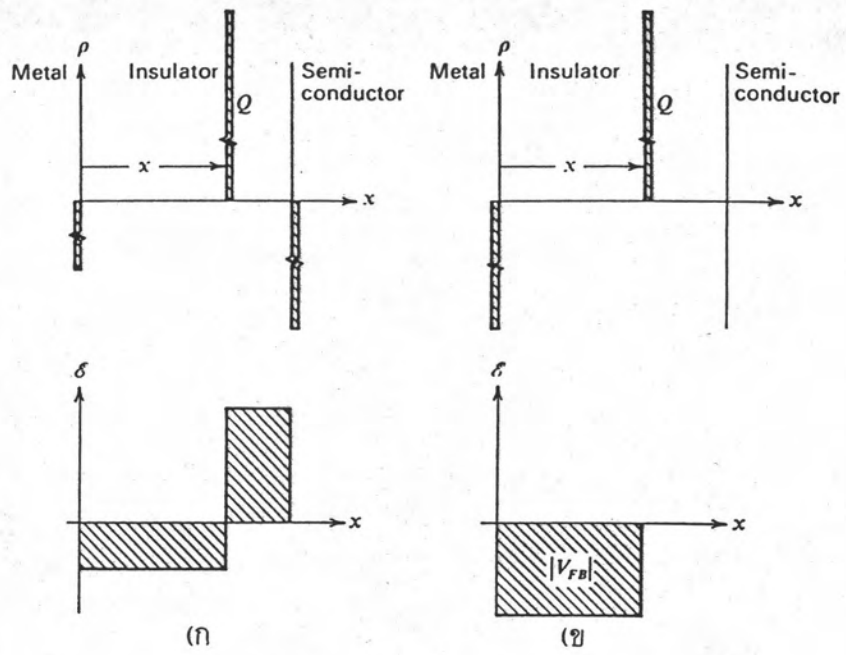
$$V_{FB} = -\frac{xQ}{\epsilon_{ox}\epsilon_0} = -\frac{x \cdot Q}{x_{ox} C_{ox}} \quad 2.23$$

จากสมการที่ 2.23 พบว่าค่า V_{FB} นั้นนอกจากขึ้นกับปริมาณประจุ Q แล้วยังขึ้นกับตำแหน่งที่ประจุนั้นกระจายอยู่ด้วย ที่ตำแหน่ง $x = x_{ox}$ คือบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ ค่า V_{FB} จะมีค่ามากที่สุด ดังสมการ

$$V_{FB} = -\frac{Q}{C_{ox}} \quad 2.24$$

สำหรับในกรณีที่มีประจุกระจายอยู่ในชั้นฉนวน ดังรูปที่ 2.14 ก โดยมีประจุเป็น $\rho(x)$ ค่า V_{FB} จะหาได้จากสมการ

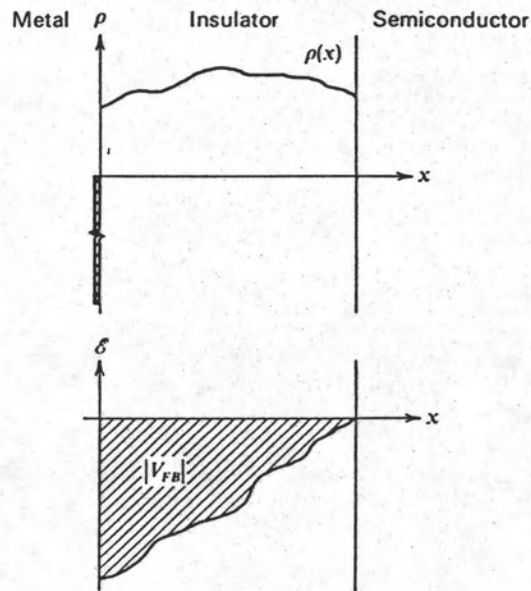
$$V_{FB} = -\frac{1}{C_{ox}} \int_0^{x_{ox}} \frac{x}{x_{ox}} \cdot \rho(x) dx \quad 2.25$$



รูปที่ 2.13 ผลจากประจุไฟฟ้าในชั้นฉนวน

ก. เมื่อ $V_G = 0$

ข. เมื่อ $V_G = V_{FB}$

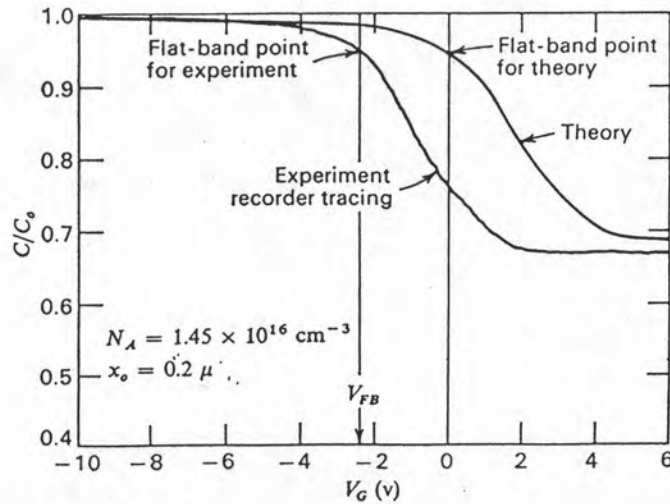


รูปที่ 2.14 ผลจากประจุไฟฟ้าที่มีการกระจายของประจุเป็น $\rho(x)$

เมื่อรวมผลทั้งสามคือ ผลเนื่องจากความแตกต่างค่าเวรคัพซัน ประจุบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ และผลจากประจุในชั้นฉนวนมีการกระจายเป็น $\rho(x)$ แสดงทั้งสมการข้างล่าง

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q}{C_{ox}} - \frac{1}{C_{ox}} \int_0^{x_{ox}} \frac{x}{x_{ox}} \rho(x) dx \quad 2.26$$

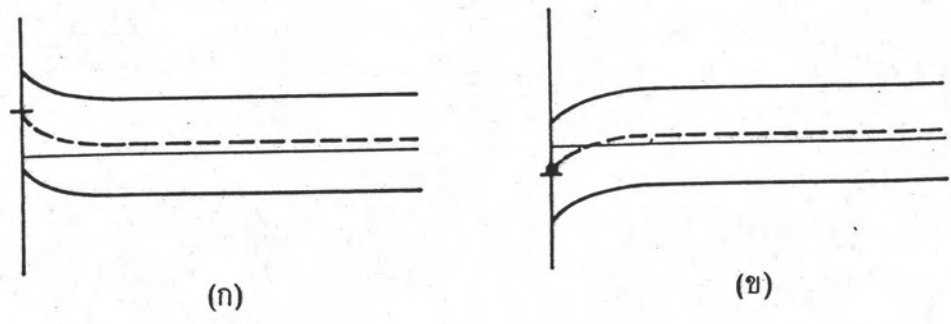
ตัวอย่างจากการทดลองเป็นกราฟลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวอย่างซิลิคอน ชนิดพี ความเข้มข้นสารเจือปน $N_A = 1.45 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ แสดงผลของ $V_{FB} \neq 0$ ดังรูปที่ 2.15



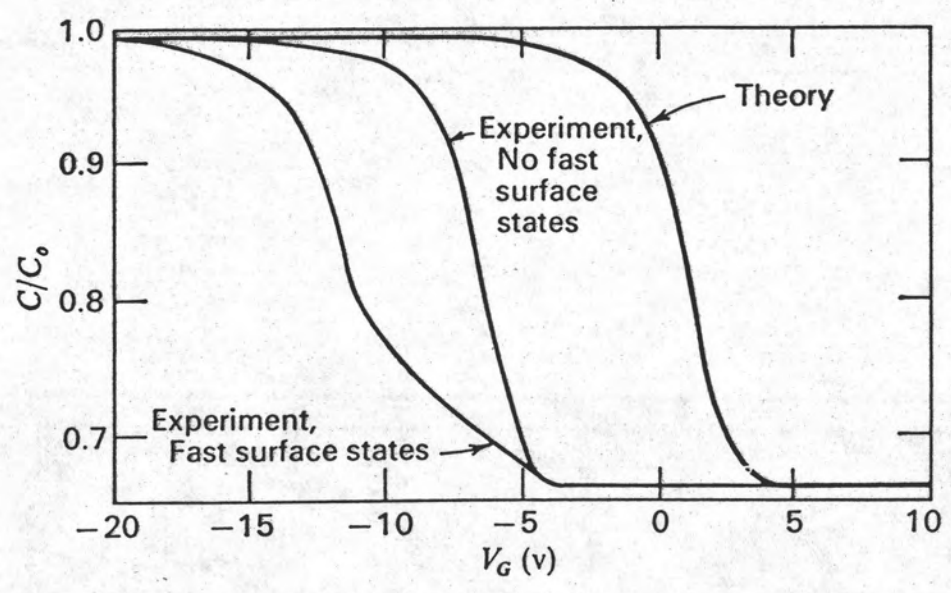
รูปที่ 2.15 ผลเนื่องจากประจุในชั้นฉนวนและ $\phi_{MS} \neq 0$

2.2.3 ผลจากสถานะผิว

ในหัวข้อ 2.1.1 ได้แสดงให้เห็นถึงเงื่อนไขการไบแอสต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดความโค้งของแถบพลังงานบริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ สมมุติว่ามีระดับพลังงานเกิดขึ้นในช่องว่างแถบพลังงานบริเวณใกล้กับรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ ตัวอย่างของระดับพลังงานเหล่านี้ เช่น รีคอมบิเนชันเซ็นเตอร์ที่ผิว (surface recombination centers) หรือเจนเนอเรชันเซ็นเตอร์ที่ผิว (surface generation centers) เป็นต้น โอกาสในการเข้าครอบครองสถานะเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามความโค้งของแถบพลังงาน กล่าวคือตามแรงดันไบแอสนั่นเอง ผลอันนี้แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.16 ในรูป ก. เป็นกรณีที่เราไบแอสจนเกิดเงื่อนไขเอกคิวมูล์ชัน จะเห็นว่าตำแหน่งของสถานะนี้จะอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิ เป็นผลให้ออกาสเข้าครอบครองมีค่าน้อยมาก และเกือบทั้งหมดจะปราศจากการครอบครอง และเมื่อเราไบแอสเข้าสู่เงื่อนไขอินเวอร์ชัน ดังรูปที่ 2.16 ข. จะพบว่าตำแหน่งของระดับพลังงานเดียวกันนี้จะอยู่ต่ำกว่าระดับเฟอร์มิ โอกาสในการเข้าครอบครองมีค่าเป็นหนึ่ง พาหะที่เข้าครอบครองระดับพลังงานเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเงื่อนไขการไบแอสต่าง ๆ กัน สำหรับระดับพลังงานเหล่านี้ที่มีการแลกเปลี่ยนพาหะกับสารกึ่งตัวนำอย่างรวดเร็ว เราเรียกว่า สถานะผิวรวดเร็ว (fast surface state) ผลอันนี้จะทำให้กราฟลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากแบบจำลองในอุดมคติ กล่าวคือในช่วงที่เกิดชั้นปลอดพาหะ ลักษณะกราฟจะมีขั้นเกิดขึ้นหรือมีลักษณะบิดเบี้ยว ดังตัวอย่างรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 การโค้งของแถบพลังงานเมื่อไบแอสในเงื่อนไขต่าง ๆ โดยมีสถานะผิวอยู่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ
 ก. เงื่อนไขแอคคิวมูเลชัน
 ข. เงื่อนไขอินเวอร์ชัน



รูปที่ 2.17 ผลเนื่องจากสถานะผิวรวดเร็ว