



## บทที่ 6

### รอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ

สมบัติของผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ จะมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในเรื่องความคงทนถาวร (stable) [52] กล่าวคือ บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำมีความไวต่อสิ่งเจือปนสูง สมบัติของอุปกรณ์จึงเปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำมาใช้ในงานในทางปฏิบัติ มักแก้ไขข้อเสียนี้ โดยการเคลือบฉนวนชั้นบาง ๆ ชั้นบนผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ การทำเช่นนี้ช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพ และความคงทนถาวรของอุปกรณ์ได้ดีขึ้น จึงเป็นเหตุให้วงการอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ มุ่งความสนใจมาที่การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MIS เพราะนับได้ว่าเป็นหลักการขั้นพื้นฐานต่อการทำความเข้าใจเพื่อพัฒนาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ต่อไป

การเคลือบชั้นฉนวนด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น ขบวนการออกซิเดชัน หรือการจุ่มแล้วปล่อยให้แห้ง แล้วต่อจากนั้นอาจนำมาแอนนیلเป็นชั้นตอนต่อไป มักพบสิ่งเจือปนเกิดขึ้นคือ สถานะประจุ (charge center) ซึ่งได้แก่ กับดักประจุที่รอยต่อ กับดักประจุในฉนวน ประจุในฉนวนที่อยู่กับที่ และประจุในฉนวนที่เคลื่อนที่ได้ เป็นต้น จึงต้องมีการออกแบบเครื่องมือและควบคุมขบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ให้ดี เพื่อลดสิ่งเจือปนให้เหลือน้อยที่สุด แต่ทว่าสมบัติของอุปกรณ์ไม่ได้ขึ้นกับสิ่งเจือปนในชั้นฉนวนเท่านั้น สารอสุทธิที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดข้อบกพร่อง ผลึกในสารกึ่งตัวนำก็เป็นต้นเหตุทำให้เกิดกับดักมากมายอยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำด้วย เช่น ระดับพลังงานผู้ให้ ระดับพลังงานผู้รับ และกับดักที่เกิดจากขาดที่เป็นโลหะซึ่งเจือปนอยู่เอง โดยไม่ได้ตั้งใจเติมลงไป (เช่น  $Fe^{3+}$ ) ขณะเตรียมสาร เป็นต้น เนื่องจากกับดักเหล่านี้มีอิทธิพลต่อขบวนการเกิดและการรวมตัว (generation and recombination) ของพาหะที่เคลื่อนที่ได้ ซึ่งเป็นกลไกทำให้สารกึ่งตัวนำกลับสู่สภาวะสมดุลความร้อนอีกครั้ง ภายหลังจากถูกรบกวนโดยการใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ

ลักษณะของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ ของรอยต่อแบบ MIS ทั้งที่วัดโดยใช้ความถี่สูง และความถี่ต่ำ นับว่าเป็นวิธีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MIS ที่วิธีหนึ่ง แต่จะเลือกวัดโดยใช้ความถี่ค่าใดนั้นขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการตอบสนอง (response time) ของพาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟสลัปที่ใช้ไบอัส และสมบัติทางไฟฟ้าที่พิจารณา เช่น กรณีวัดโดยใช้ความถี่สูง จะใช้สำหรับศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าทั่ว ๆ ไป ซึ่งเป็นการศึกษาวัดค่าความจุ เมื่อเปลี่ยนค่าความต่างศักย์

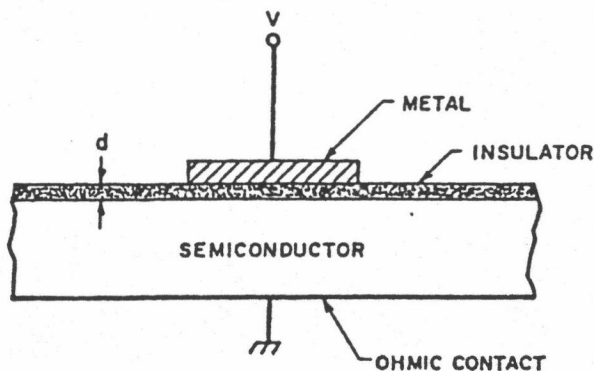
ที่ใช้ไบอัสเป็นค่า ๆ ทีละค่า ส่วนกรณีวัดโดยใช้ความถี่ต่ำจะใช้สำหรับศึกษาเกี่ยวกับกับดักประจุที่รอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ เป็นการวัดค่ากระแสไฟฟ้าขจัด (displacement current) ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุออกมาเมื่อไบอัสความต่างศักย์แบบค่อย ๆ เพิ่มขึ้นแบบต่อเนื่อง (slow ramp voltage) [53] เป็นต้น สำหรับตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และ GaAs นี้เราจะวัดโดยใช้ค่าความถี่สูงคงที่เท่ากับ 1 MHz ซึ่งที่เป็นค่าความถี่พาหะข้างน้อยตอบสนองต่อค่าความต่างศักย์ไฟสลับที่ใช้ไบอัสไม่ทัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าช่วงเวลาการตอบสนองของพาหะข้างน้อยมีค่ามากกว่าส่วนกลับของความถี่ค่านี้มาก ๆ และเป็นค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับพิจารณาสมบัติทางไฟฟ้าที่เราต้องการ

เนื่องจากว่า เราจะได้ผลการคำนวณทั้งหมดจากสมการที่เป็นผลมาจากการแก้ปัญหาโดยใช้สมการปัวซอง (Poisson's equation) เป็นพื้นฐาน เมื่อพิจารณาว่าระบบนี้มีเพียง 1 มิติ และคิดว่าจากสนามไฟฟ้ามีค่าสม่ำเสมอ มีทิศทางตั้งฉากกับผิวหน้าสารกึ่งตัวนำเท่านั้น ไม่คิดผลของสนามไฟฟ้าที่อยู่บริเวณขอบของโลหะ (edge effects) นอกจากนี้ยังพิจารณาในกรณีที่ความหนาแน่นของสารอสุทธิ อยู่ในสารกึ่งตัวนำอย่างสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั่วทุกส่วนจนถึงผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ

ดังนั้นบทนี้จะกล่าวถึงตัวเก็บประจุแบบ MIS เชิงอุดมคติ การแก้ปัญหาสมการปัวซองใน 1 มิติ เพื่อหาสมการที่นำไปใช้ในการคำนวณ และอิทธิพลที่ทำให้ตัวเก็บประจุแบบ MIS ที่สร้างขึ้นมีสมบัติทางไฟฟ้าเบี่ยงเบนไปจากตัวเก็บประจุแบบ MIS เชิงอุดมคติ เป็นแต่ละหัวข้อไป

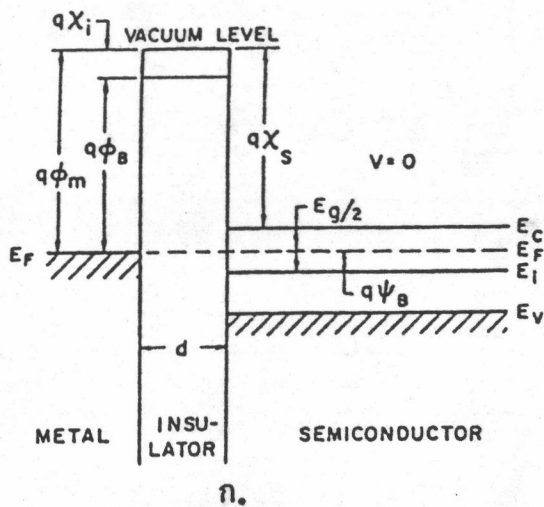
### 6.1 ตัวเก็บประจุแบบ MIS เชิงอุดมคติ [52,54,55]

แม้ลักษณะโครงสร้างตัวเก็บประจุแบบ MIS ดังแสดงในรูปที่ 6.1 จะเป็นแบบง่าย ๆ ไม่ซับซ้อน แต่เนื่องจากอิทธิพลของสถานะผิว (surface states) จึงทำให้การศึกษาสมบัติของตัวเก็บประจุแบบนี้ เป็นเรื่องยุ่งยาก เพื่อให้ง่ายจะพิจารณากรณีเชิงอุดมคติก่อน ต่อจากนั้นจึงจะกล่าวถึงผลที่เกิดจากสถานะผิว ซึ่งเกิดขึ้นกับตัวเก็บประจุแบบ MIS จริง ๆ

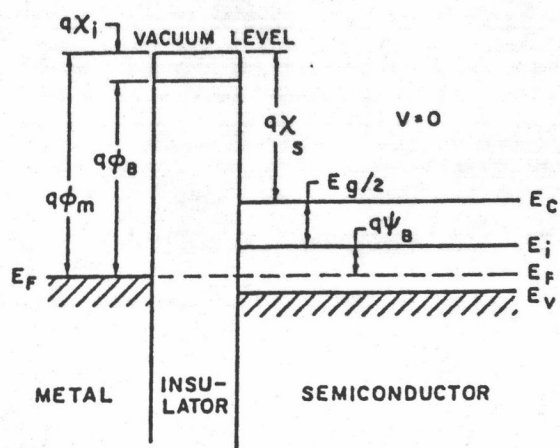


รูปที่ 6.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบ MIS เมื่อ  $d$  คือ ความหนาของฉนวน และ  $V$  คือความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสให้กับรอยต่อ

สมบัติของรอยต่อแบบ MIS นี้สามารถอธิบายตามแผนภาพของลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน โดยขณะที่ยังไม่มีกรไบอัส ( $V = 0$ ) จะเป็นดังรูปที่ 6.2



ก.



ข.

รูปที่ 6.2 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อแบบ MIS เชิงอุดมคติ

ซึ่งสำหรับกรณีของรอยต่อแบบ MIS เชิงอุดมคติจะต้องเป็นตามเงื่อนไขต่อไปนี้

ขณะที่ไม่มีการไบอัส ผลต่างของค่าเว็รกฟังก์ชันระหว่างโลหะ ( $\phi_m$ ) กับ สารกึ่งตัวนำ ( $\phi_n$ ) จะต้องมีค่าเป็นศูนย์ ดังสมการ สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$\begin{aligned}\phi_{ms} &= \phi_m - \phi_n \\ &= \phi_m - \left( X_1 + \frac{E_g}{2q} + \psi_B \right) \\ &= 0\end{aligned}\quad (6.1)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left( X_2 + \frac{E_g}{2q} - \psi_B \right) = 0 \quad (6.2)$$

เมื่อ  $\phi_m$  คือ ค่าเว็รกฟังก์ชันของโลหะ

$X_1, X_2$  คือ ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) ของ สารกึ่งตัวนำ และของฉนวน ตามลำดับ

$E_g$  คือ ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

$\psi_B$  คือ ความต่างศักย์ระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มี ( $E_F$ ) และระดับ พลังงานเฟอร์มีชนิดอินทรีนสิค ( $E_i$ )

$\phi_B$  คือ กำแพงศักย์ระหว่างโลหะกับฉนวน

หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า แถบพลังงานจะไม่โค้ง (flat band) เมื่อไม่มีการไบอัส ซึ่งหมายความว่า ความหนาแน่นของพาหะจะมีค่าสม่ำเสมอตลอดในชั้นสารกึ่งตัวนำ และไม่มี พาหะขุมขุมอยู่ที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำตรงที่ต่อกับฉนวน

2. จะมีประจุเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการไบอัสเท่านั้น ประจุดังกล่าวนี้เกิดขึ้นที่บริเวณ ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำตรงที่ต่อกับฉนวน อีกทั้งจะมีประจุชนิดตรงกันข้าม และมีจำนวนเท่ากัน อยู่ที่แผ่นโลหะ

3. ไม่มีการไหลของประจุผ่านฉนวน ในขณะที่มีการไบอัส เนื่องจากฉนวนมี ความต้านทานสูงมากเป็นอนันต์ (infinity)

เมื่อมีการไบอัสให้กับตัวเก็บประจุแบบ MIS จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุ

ที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำตรงที่ต่อกับฉนวน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณีใหญ่ๆ ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 6.3 และ 6.4 คือ

1. ถ้าไบอัสให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบ ( $V < 0$ ) เมื่อเทียบกับทางด้านสารกึ่งตัวนำเปรียบเสมือนเป็นการใส่ประจุลบลงบนแผ่นโลหะ และจะมีประจุบวกหรือโฮล ซึ่งเป็นพาหะข้างมากของสารกึ่งตัวนำ จำนวนเท่า ๆ กัน มาชุมนุมที่บริเวณรอยต่อกับฉนวน เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่โลหะเป็นลบ ดังรูปที่ 6.4 ก. พลังงานของอิเล็กตรอนในโลหะจึงถูกยกขึ้น เมื่อเทียบกับในสารกึ่งตัวนำ ผลก็คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะจะเลื่อนขึ้นไปอยู่ในตำแหน่งที่สูงกว่าสถานะสมดุล เป็นจำนวนเท่ากับ  $qV$  ส่วนแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณรอยต่อกับฉนวนจะมีการโค้งขึ้น เนื่องจากการชุมนุมโฮลเกิดขึ้น ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์

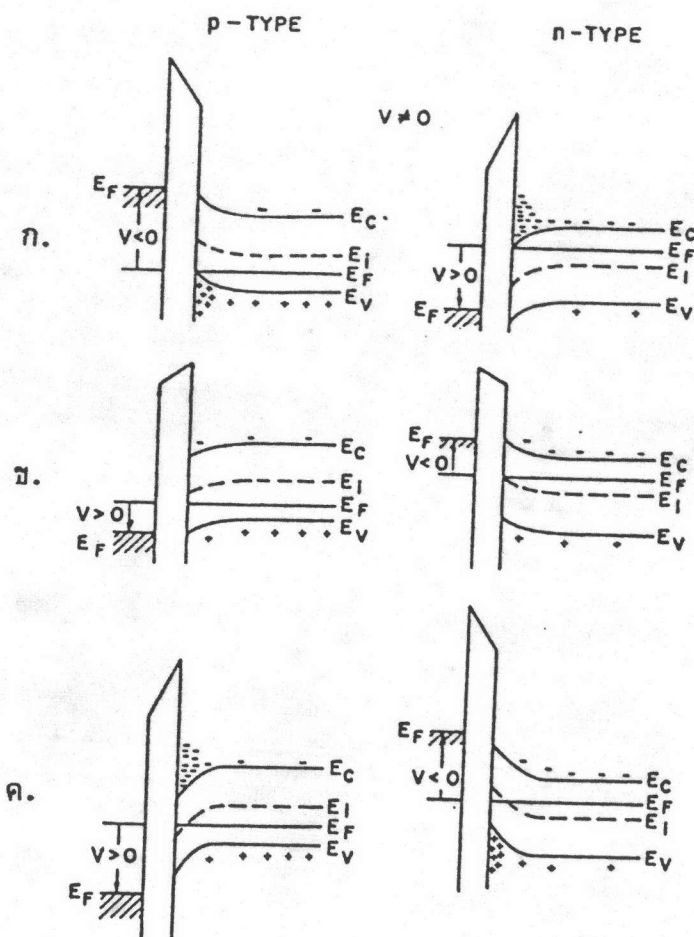
$$\begin{aligned} p &= n_1 \exp \left( \frac{(E_1 - E_F)}{kT} \right) \\ &= n_1 \exp \left( \frac{q \psi_B}{kT} \right) \end{aligned} \quad (6.3)$$

แสดงว่าการที่ความหนาแน่นของโฮลเพิ่มขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ค่า  $E_1 - E_F = q \psi_B$  จะต้องมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากไม่มีกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุแบบ MIS ดังนั้น ระดับพลังงานเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำจึงไม่เปลี่ยนแปลง เพราะฉะนั้นค่า  $E_1 - E_F$  จะเพิ่มขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ  $E_1$  เลื่อนขึ้นเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงเกิดการโค้งขึ้นของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ที่บริเวณรอยต่อกับฉนวน ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 6.3 ก. ระดับพลังงานเฟอร์มิใกล้บริเวณผิวรอยต่อจะอยู่ชิดกับแถบวาเลนซ์มากกว่าในเนื้อสารกึ่งตัวนำ (bulk) แสดงว่าที่บริเวณใกล้รอยต่อกับฉนวน ความหนาแน่นของโฮล มีมากกว่าในส่วนอื่น ๆ ของสารกึ่งตัวนำ จึงกล่าวได้ว่าการไบอัสตรงก่อให้เกิดการชุมนุมพาหะ (accumulation case)

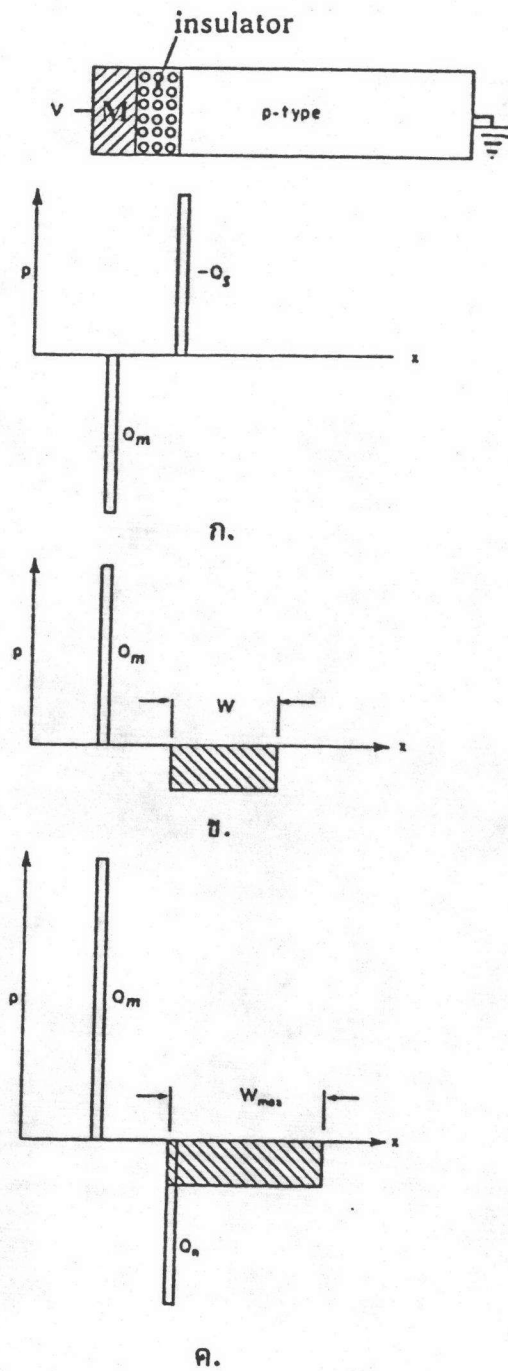
2. ถ้าไบอัสให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก ( $V > 0$ ) เมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ (ชนิดพี) หรือเรียกว่า การไบอัสกลับทาง (reverse bias) ทำให้เกิดประจุบวกขึ้นที่แผ่นโลหะ และจะเกิดประจุลบ จำนวนเท่ากันขึ้นที่บริเวณรอยต่อของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ประจุลบที่เกิดขึ้นนี้คืออิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างน้อย และผู้รับที่ผูกไอออนไนซ์แล้ว ความหนาแน่นของโฮลในบริเวณนี้จะลดลง ดังรูป 6.4 ข. ระดับพลังงานเฟอร์มิชนิดอินทรีนสิก ( $E_1$ ) ตามสมการที่ (6.3) จะเลื่อนเข้าใกล้ระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) ดังนั้นแถบพลังงานใกล้บริเวณรอยต่อกับฉนวนจึงโค้งลง ซึ่งกล่าวได้ว่าการไบอัสกลับทางแบบนี้ก่อให้เกิดการตีผลัดชั้น (depletion case) ดังรูปที่ 6.3 ข.

3. เมื่อไบอัสกลับทางให้มีค่าสูงขึ้นไปอีก แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะโค้งลงมากขึ้น ถ้าโค้งมากจนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มิชนิดอินทรีนสิก ( $E_1$ ) เลื่อนลงมาต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) ดังรูปที่ 6.3 ค. จะเป็นผลให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำมีค่า

สูงขึ้น กรณีที่มีบริเวณใกล้ผิวรอยต่อกับฉนวน จะมีสมบัติในการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดเอ็น บริเวณดังกล่าวนี้ ไม่ได้เกิดจากการเติมสารอสุทธิเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด แต่เกิดจากการกลับกลาย (inversion) ไปจากสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เกิดเนื่องจากการไบอัสความต่างศักย์เข้าไป ซึ่งเราเรียกกรณีนี้ว่ากรณีกลับกลาย (inversion case) ประจุทั้งหมดในช่วงนี้จะประกอบด้วย ประจุลบในกรณีตีผลิชั้นขณะที่มีขนาดช่วงผลิชั้นกว้างที่สุด และอิเล็กตรอนในแถบนำที่เคลื่อนมาอยู่ บริเวณใกล้ผิวรอยต่อดังรูปที่ 6.4 กรณีนี้จึงเป็นกฎเกณฑ์สำคัญในการทำงานของทรานซิสเตอร์ ที่มีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานแบบ MIS



รูปที่ 6.3 แสดงแผนภาพลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของตัวเก็บประจุแบบ MIS เชิงอุดมคติ เมื่อมีการไบอัสเพื่อให้เกิด ก. ช่วงชุมชนพาหะ ข. ช่วงตีผลิชั้น ค. ช่วงกลับกลาย

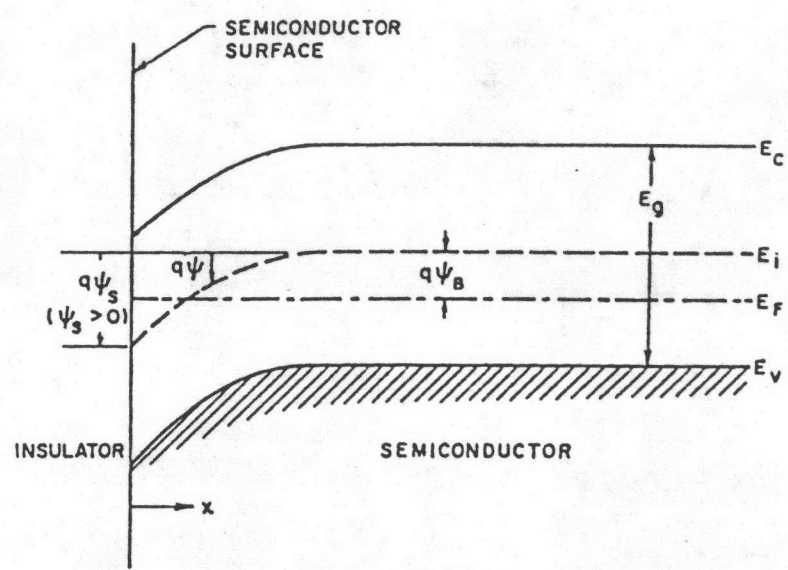


รูปที่ 6.4 แสดงแผนภาพความหนาแน่นของประจุที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของ MIS ชนิดนี้ เชิงอุดมคติ เมื่อ ไบอัสให้ เกิดกรณี ก. ช่วงขุมอนุพาหะ ข. ช่วงตีฟลิซัน ค. ช่วงกลับกลาย

ทำนองเดียวกันเราสามารถอธิบายรอยต่อแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้ โดยเลือกขั้วของศักย์ไฟฟ้าให้สอดคล้องกับชนิดของสารกึ่งตัวนำ ถ้าไบอัสตรงจะได้กรณีรุ่มนูนนားหะ ถ้าไบอัสกลับทางจะได้กรณี ดันลื่น และถ้าไบอัสกลับทางค่าสูง ๆ จะได้กรณีขึ้นกลับกลาย ดังกล่าว

6.1.1 การกระจายของประจุในสารกึ่งตัวนำที่บริเวณรอยต่อกับฉนวน

หัวข้อนี้จะหาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ผิว จำนวนประจุ และสนามไฟฟ้าในช่วง ดันลื่นของสารกึ่งตัวนำ เพื่อที่จะนำความสัมพันธ์เหล่านี้ไปคำนวณ และอธิบายลักษณะส่วของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ (C-V characteristics) ของ ตัวเก็บประจุแบบ MIS สำหรับหัวข้อถัดไป



รูปที่ 6.5 แสดงแผนภาพของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งแสดงให้เห็นชั้นดันลื่น และ ขึ้นกลับกลายที่เกิดขึ้นเมื่อ  $\psi_B > \psi_s > 0$  และเมื่อ  $\psi_s > \psi_B$  ตามลำดับ

จากรูปที่ 6.5 ซึ่งแสดงรายละเอียดของแถบพลังงานผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ตรงที่ต่อกับฉนวน ถ้ากำหนดให้ เป็นศักย์ไฟฟ้าของระดับพลังงานเฟอร์มิชนิดอินทรีนสิก ที่โค้งไปจากระดับเดิมที่สภาวะสมดุล ส่วนในเนื้อสารที่ห่างจากรอยต่อมากๆ  $\psi$  จะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจาก ระดับพลังงานเฟอร์มิไม่เกิดการโค้งงอ แต่  $\psi$  จะมีค่ามากที่สุดที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ ซึ่ง เราเรียกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า ( $\psi_s$ ) ความหนาแน่นของโฮลและอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะเป็นฟังก์ชันกับ  $\psi$  ดังสมการ [54]



$$\begin{aligned}
 p_p &= p_{p0} \exp\left(\frac{-q\psi}{kT}\right) \\
 &= p_{p0} \exp(-\beta\psi)
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

$$\begin{aligned}
 n_p &= n_{p0} \exp\left(\frac{q\psi}{kT}\right) \\
 &= n_{p0} \exp(\beta\psi)
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

เมื่อ

$$\beta = \frac{q\psi}{kT}$$

$$\begin{aligned}
 k &= \text{ค่าคงที่ของโบลซ์มันน์ (Boltzmann's constant)} \\
 &= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}
 \end{aligned}$$

โดยที่  $\psi$  จะมีค่าเป็นบวก เมื่อแถบพลังงานโค้งลง แต่จะมีค่าเป็นลบเมื่อแถบพลังงานโค้งขึ้น

$p_{p0}$  และ  $n_{p0}$  คือ ความหนาแน่นของโฮลและอิเล็กตรอนในส่วนของสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่อยู่ห่างจากรอยต่อมาก ๆ ขณะอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน ( $p_{p0} = N_A$  และ  $n_{p0} = n_i^2/N_A$  เนื่องจาก  $n_{p0} p_{p0} = n_i^2$ )

ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะที่อยู่ที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำจะเป็นดังสมการ

$$p_s = p_{p0} \exp(-\beta\psi_s) \tag{6.6}$$

$$n_s = n_{p0} \exp(\beta\psi_s) \tag{6.7}$$

จากรูปที่ 6.5 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า

ถ้า  $\psi_s < 0$  หมายถึง สภาวะที่มีการสะสมโฮล ซึ่งทำให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีโค้งขึ้น

$\psi_s = 0$  หมายถึง สภาวะแถบพลังงานไม่โค้ง

$\psi_s > 0$  หมายถึง สภาวะที่เกิดช่องดิพลชัน แถบพลังงานเริ่มโค้งลง

$\psi_p = \psi_s$  หมายถึง  $\psi_s$  จะอยู่ที่ระดับกึ่งกลางช่องว่างแถบพลังงาน ขณะนี้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และโฮล มีค่าเท่ากัน เตรียมพร้อมที่จะเกิดขึ้นกลับกลาย

$\psi_s > \psi_B$  หมายถึงสภาวะที่เกิดชั้นกลับกลายชั้นที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ

ศักย์ไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันกับระยะทาง สามารถหาได้จากสมการปัวซอง (Poisson's equation) ใน 1 มิติ ดังนี้ [52,54]

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} \quad (6.8)$$

เมื่อ  $\epsilon_s$  คือ สภาพยอม (permittivity) ของสารกึ่งตัวนำ  
 $\rho(x)$  คือ ความหนาแน่นของประจุในช่วงดัดชั้นของสารกึ่งตัวนำซึ่งมีค่า  
 ดังสมการ

$$\rho(x) = q (N_D^+ - N_A^- + p_p - n_p) \quad (6.9)$$

เมื่อ  $N_D^+$  และ  $N_A^-$  คือ ความหนาแน่นของผู้ให้ และผู้รับที่ถูกละอองไอออไนซ์ แล้วในช่วงดัดชั้นตามลำดับ แต่ในส่วนอื่น ๆ ของสารกึ่งตัวนำที่อยู่ถัดจากช่วงดัดชั้นออกไป ยังคงมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้านั้นคือ  $\rho(x) = 0$  และ  $\psi = 0$  เราจึงได้เงื่อนไขว่า

$$N_D^+ - N_A^- = n_{p0} - p_{p0} \quad (6.10)$$

แต่ที่บริเวณใกล้รอยต่อกับฉนวนความหนาแน่นของพาหะขึ้นกับค่า  $\psi$  ดังนั้นจากสมการที่ (6.4) และ (6.5) จะได้ว่า

$$p_p - n_p = p_{p0} \exp(-\beta\psi) - n_{p0} \exp(\beta\psi) \quad (6.11)$$

และจากสมการที่ (6.8), (6.9), (6.10) และ (6.11) จะได้ว่า

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = -\frac{q}{\epsilon_s} [p_{p0}(e^{-\beta\psi}-1) - n_{p0}(e^{\beta\psi}-1)] \quad (6.12)$$

อินทิเกรตสมการที่ (6.12) ทั้งสองข้างจะได้

$$\int_0^{\psi/\alpha x} \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) d \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = \frac{-q}{\epsilon_s} \int_0^{\psi} [p_{p0} (e^{-\beta\psi} - 1) - n_{p0} (e^{\beta\psi} - 1)] d\psi \quad (6.13)$$

เพราะว่าสนามไฟฟ้า (E) ที่ค่าเท่ากับ  $-\frac{\partial \psi}{\partial x}$

ดังนั้นจากสมการที่ (6.13) จะได้ว่า

$$E^2(x) = \left( \frac{2kT}{q} \right)^2 \left( \frac{q p_{p0} \beta}{2 \epsilon_s} \right) \left[ (e^{-\beta\psi} + \beta\psi - 1) + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} (e^{\beta\psi} - \beta\psi - 1) \right] \quad (6.14)$$

เพื่อให้สะดวกยิ่งขึ้น กำหนดให้

$$L_D = \left[ \frac{kT \epsilon_s}{p_{p0} q^2} \right]^{1/2} = \left[ \frac{\epsilon_s}{q p_{p0} \beta} \right]^{1/2} \quad (6.15)$$

และ

$$F\left(\beta\psi, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left[ (e^{-\beta\psi} + \beta\psi - 1) + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} (e^{\beta\psi} - \beta\psi - 1) \right]^{1/2} > 0 \quad (6.16)$$

เมื่อ  $L_D$  คือ ความยาวเดอบาย (Debye length) ของโซล

ดังนั้นสนามไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อกับฉนวนจะเป็นตามสมการ

$$E = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = \pm \frac{\sqrt{2} kT}{q L_D} F\left(\beta\psi, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) \quad (6.17)$$

เมื่อ  $\psi > 0$  สนามไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวก แสดงว่าสนามไฟฟ้ามีทิศทางพุ่งจากรอยต่อเข้าสู่ชั้นของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งเป็นกรณีเกิดช่วงดึ้นลิ้น

แต่ถ้า  $\psi < 0$  สนามไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบ แสดงว่าสนามไฟฟ้ามีทิศทางตรงข้าม ซึ่งเป็นกรณีขุมุมุ โซลที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ

สำหรับสนามไฟฟ้าที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำที่สัมผัสกับฉนวนในกรณีที่  $\psi = \psi_s$  จะมีค่าดังสมการ

$$E_{\text{sc}} = \pm \frac{\sqrt{2kT}}{qL_D} F\left(\beta \psi_{\text{sc}}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) \quad (6.18)$$

จากการคำนวณโดยใช้กฎของเกาส์ (Gauss's law) จะได้ว่าประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ( $Q_{\text{sc}}$ ) ที่ก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าดังกล่าว มีค่าเท่ากับ

$$Q_{\text{sc}} = -\epsilon_{\text{sc}} E_{\text{sc}} = \mp \frac{\sqrt{2} \epsilon_{\text{sc}} kT}{qL_D} F\left(\beta \psi_{\text{sc}}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) \quad (6.19)$$

กราฟรูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของประจุ ( $Q_{\text{sc}}$ ) กับศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า ( $\psi_{\text{sc}}$ ) ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่มีค่า  $N_A = 4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  จะเห็นว่า เมื่อ  $\psi_{\text{sc}}$  เป็นลบ ค่า  $Q_{\text{sc}}$  จะเป็นบวก และจะตรงกับกรณีชุนนุกวนาหะ สำหรับกรณีที่ฟังก์ชัน  $F$  ขึ้นกับเทอมแรกของสมการที่ (6.16) เท่านั้น ดังนั้น

$$Q_{\text{sc}} = \exp\left(\frac{q|\psi_{\text{sc}}|}{kT}\right) \quad (6.20)$$

แต่สำหรับกรณี  $\psi_{\text{sc}} = 0$  จะเป็นกรณีที่แถบพลังงานไม่โค้ง ซึ่ง  $Q_{\text{sc}} = 0$

ถ้า  $\psi_{\text{sc}} > \psi_B > 0$  แล้ว  $Q_{\text{sc}}$  จะเป็นลบ ฟังก์ชัน  $F$  จะขึ้นกับเทอมที่สองของสมการที่ (6.16) ซึ่งจะได้ว่า

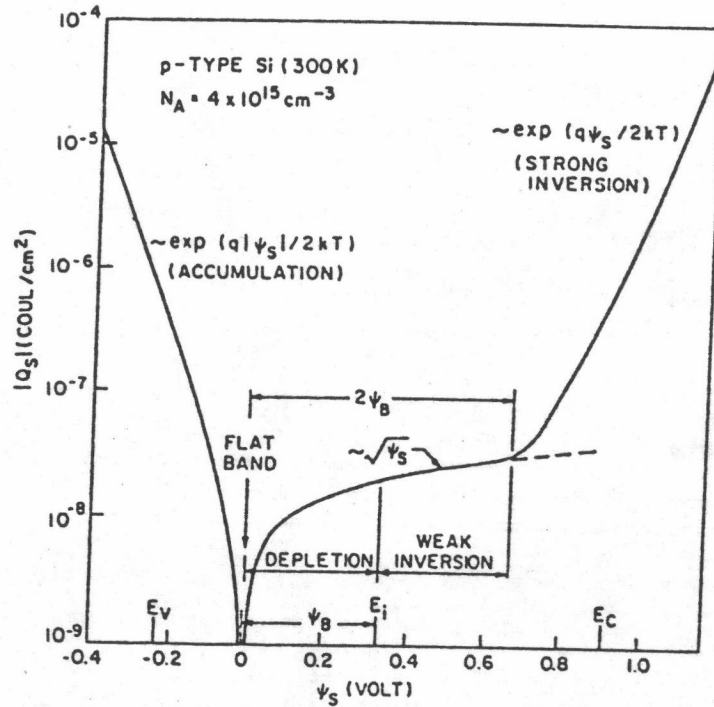
$$Q_{\text{sc}} = \sqrt{\psi_{\text{sc}}} \quad (6.21)$$

ส่วนในกรณีที่  $\psi_{\text{sc}} \gg \psi_B$  แล้วจะเกิดขึ้นกลับกลายขึ้นที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ ฟังก์ชัน  $F$  ขึ้นกับเทอมที่สี่ของสมการที่ (6.16) จะได้ว่า

$$Q_{\text{sc}} = -\exp\left(\frac{q\psi_{\text{sc}}}{2kT}\right) \quad (6.22)$$

และขึ้นกลับกลายอย่างมาก (strong inversion) จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อ

$$\psi_{\text{sc}}(\text{inv}) = 2\psi_B = \frac{2kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (6.23)$$



รูปที่ 6.6 แสดงความหนาแน่นของประจุ  $Q_s$  ที่ขึ้นกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า ( $\psi_s$ ) ของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ ซึ่งมีค่า  $N_A = 4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อ  $\psi_B$  เป็นความต่างศักย์ระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) และระดับพลังงานเฟอร์มิ ชนิดอินทรีนสิก ( $E_i$ ) ในเนื้อสารกึ่งตัวนำ

ค่าความจุของช่วงดีป्लीชัน ของสารกึ่งตัวนำจะเป็นตามสมการ

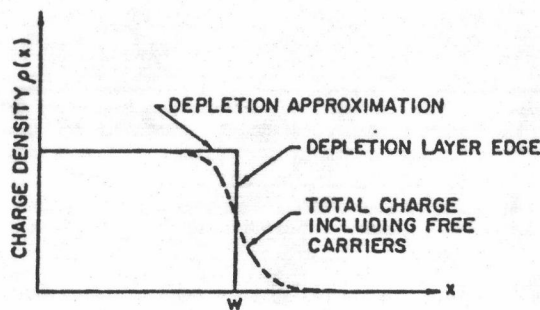
$$C_d = \frac{\partial Q_s}{\partial \psi_s} = \frac{\epsilon_s}{\sqrt{2}L_D} \left[ \frac{1 - e^{-\beta\psi_s} + (n_{po}/p_{po})(e^{\beta\psi_s} - 1)}{F(\beta\epsilon_s, \frac{n_{po}}{p_{po}})} \right] \text{ F/cm}^2 \quad (6.24)$$

ในกรณีเงื่อนไขแถบพลังงานไม่โค้ง ( $\psi_n = 0$ ) โดยการกระจายเทอมเอ็กโปเนนเชียล (exponential terms) ให้เป็นจำนวนอนุกรม (series) จะได้ว่า

$$C_d \text{ (flat-band)} = \frac{\epsilon_n}{L_D} F/\text{cm}^2 \quad (6.25)$$

### 6.1.2 การประมาณค่าตัวแปรเฉพาะในช่วงดีพลีชัน (Depletion's Approximation) [55]

การแก้สมการปัวซอง ในหัวข้อที่ผ่านมาจะคำนึงถึงค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระ และได้ผลลัพธ์ที่ใช้อธิบายความหนาแน่นของประจุ ค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนไปตามระยะทางจากรอยต่อกับฉนวนเข้าสู่ชั้นสารกึ่งตัวนำ อย่างไรก็ตามให้การประมาณค่าเหล่านี้ถูกต้องมากขึ้นควรกำหนดให้  $p=n=0$  ที่ทุกระยะในช่วงดีพลีชัน สำหรับพาหะข้างมากและพาหะข้างน้อยที่เป็นอิสระนั้นจะกำหนดให้อยู่ถัดจากช่วงดีพลีชันลึกเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ และกำหนดให้การกระจายของประจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่รอยต่อกับฉนวนเป็นลักษณะฟังก์ชันชานตอน (step function) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 6.7 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่นำมาใช้ เพื่อแก้สมการปัวซองง่ายขึ้น และมักใช้กันแพร่หลายโดยเฉพาะสำหรับรอยต่อ แบบ พี - เอ็น (p-n junction)



รูปที่ 6.7 แสดงการกระจายของประจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำตามการประมาณค่าตัวแปรเฉพาะในช่วงดีพลีชัน

จากรูปที่ 6.7 แสดงให้เห็นถึงการกระจายของประจุไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ เมื่อ  $w$  คือ ความกว้างของช่วงดีพลีชัน เส้นประแสดงค่าความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าทั้งหมด แต่เส้นประที่อยู่ต่ำกว่าเส้นทึบ เมื่อระยะทางจากรอยต่อกับจำนวนเข้าไปในชั้นสารกึ่งตัวนำมีค่า  $w$  จะแสดงค่าความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่มีอยู่จริง ๆ ตรงบริเวณใกล้ขอบช่วงดีพลีชัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ ผลต่างของประจุพาหะข้างมากกับประจุของผู้ให้และผู้รับที่ถูก ไอออไนซ์แล้ว กล่าวคือ ตามสภาพความเป็นจริง จะยังคงมีการกระจายของประจุพาหะข้างมาก ประจุผู้ให้ และผู้รับที่ถูก ไอออไนซ์แล้วอยู่ในระยะทางนี้ จนกระทั่งเลขจากขอบของช่วงดีพลีชันออกไปเป็นระยะทางเท่ากับค่า  $L_D = (kT\epsilon_s/q^2 N_A^- (w))^{1/2}$  (สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดนี้) ต่อจากระยะทางนี้เข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าทั้งหมด จะอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงไฟฟ้า ซึ่งคือระยะที่ค่าความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับศูนย์นั่นเอง

จากรูปที่ 6.7 นี้ แสดงให้เห็นว่าการประมาณวิธีนี้ทำให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณตัวแปรต่าง ๆ เนื่องจากในความเป็นจริง ตรงขอบของช่วงดีพลีชันออกไปเป็นระยะทางเท่ากับค่าความยาวเดอบายค่า  $N_A^-$  ขึ้นกับค่า  $w$  บริเวณดังกล่าวนี้ควรเกิดความต่างศักย์ตกคร่อมด้วย แต่การประมาณค่าตัวแปรเฉพาะในช่วงดีพลีชันไม่ได้พิจารณากรณีนี้

พิจารณากรณีที่สารอสุทธิที่ได้อุปลงในสารกึ่งตัวนำ ด้วยขบวนการแพร่ หรือ ไอออน อิมแพลนต์เตชัน (ion implantation) มีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอที่ระยะความลึกต่าง ๆ ซึ่งมักถือว่าเป็นกรณีทั่ว ๆ ไป เมื่อมีการได้อุป ดังนั้นความหนาแน่นของสารอสุทธิทั้งชนิดผู้ให้และผู้รับจะเป็นฟังก์ชันกับระยะความลึกเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ

เพราะฉะนั้นความหนาแน่นของประจุในช่วงดีพลีชันจะมีค่าดังสมการ

$$\rho(x) = q [N_D^+(x) - N_A^-(x)] \quad (6.26)$$

แต่เนื่องจากการประมาณนี้ เราคิดว่าความหนาแน่นของผู้ให้และผู้รับที่ถูก ไอออไนซ์แล้ว มีค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นที่ยังไม่ถูก ไอออไนซ์ ในช่วงดีพลีชันดังนั้นสมการปัวซองคือ

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{q}{\epsilon_s} [N_A^-(x) - N_D^+(x)] \quad (6.27)$$

อินทิเกรตสมการที่ (6.27) ทั้งสองข้างจะได้ว่า

$$\int_0^x d\left(\frac{d\psi}{dx}\right) = \frac{q}{\epsilon_s} \int_0^x [N_A^-(x') - N_D^+(x')] dx'$$

สนามไฟฟ้าที่ระยะ  $x$  ใด ๆ ในช่วงดีนลิ้นจะมีค่าเป็นตามสมการ

$$E(x) = \frac{q}{\epsilon_s} \int_w^x [N_A(x') - N_D(x')] dx' \quad (6.28)$$

เมื่อ  $w$  คือความกว้างของช่วงดีนลิ้น

ศักย์ไฟฟ้าที่ระยะ  $x$  ใด ๆ ในช่วงดีนลิ้น หาได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (6.28)

$$\psi = \int_0^\psi E(x') dx' = \frac{q}{\epsilon_s} \int_w^x \int_w^{x'} [N_A(x') - N_D(x')] dx' dx'' \quad (6.29)$$

อินทิเกรตสมการที่ (6.29) โดยการสลับตัวแปรจะได้ว่า

$$\psi = \int_0^{\psi(x)} E(x') dx' = \frac{q}{\epsilon_s} \int_w^x [N_A(x') - N_D(x')] (x'' - w) dx' \quad (6.30)$$

กำหนดให้  $x'' - w = x - x'$  ดั่งนั้นสมการที่ (6.30) จะกลายเป็น

$$\psi = \frac{q}{\epsilon_s} \int_w^x (x - x') [N_A(x') - N_D(x')] dx' \quad (6.31)$$

ถ้าพิจารณา กรณีพิเศษว่าความหนาแน่นของสารอสุกษิตทั้งสองชนิดผู้รับ และผู้ให้มีค่าสม่ำเสมอตลอดระยะความลึกในช่วงดีนลิ้นนี้จะได้ว่า

$$q(N_A - N_D) = \text{ค่าคงที่}$$

ดั่งนั้นสมการที่ (6.28) จะกลายเป็น

$$\begin{aligned} E(x) &= \frac{q}{\epsilon_s} (N_A - N_D) \int_w^x dx' \\ &= \frac{q}{\epsilon_s} (N_A - N_D) (x - w) \end{aligned} \quad (6.32)$$



เพราะฉะนั้นสนามไฟฟ้าที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ ( $E_{\perp}$ ) ซึ่งก็คือ สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $x = 0$  จะมีค่า

$$E_{\perp} = \frac{-q}{\epsilon_s} (N_A - N_D)w \quad (6.33)$$

จากสมการที่ (6.32) จะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำในช่วงดีพลีชัน จะมีค่าลดลงแบบเชิงเส้น จากผิวหน้าสารกึ่งตัวนำจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์ที่ระยะทาง  $x = w$  ซึ่งเป็นระยะทางที่สิ้นสุดช่วงดีพลีชัน ดังรูปที่ 6.10

จากสมการที่ (6.32) ศักย์ไฟฟ้าที่ระยะ  $x$  ใด ๆ ในช่วงดีพลีชันจะเป็น

$$\psi(x) = -\int_0^x E(x') dx' = \frac{q}{\epsilon_s} (N_A - N_D) \int_w^x (x' - w) dx' \quad (6.34)$$

อินทิเกรตสมการที่ (6.34) จะได้ผลลัพธ์เป็น

$$\psi(x) = \frac{1}{2} \frac{q}{\epsilon_s} (N_A - N_D) (w - x)^2 \quad (6.35)$$

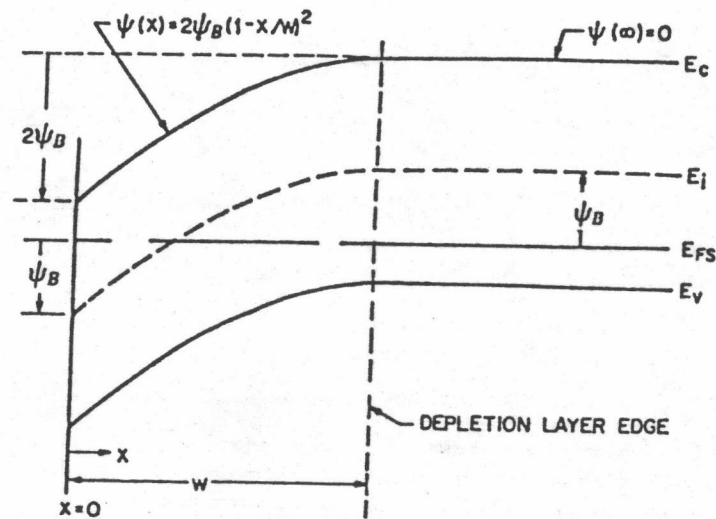
ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ ( $\psi_{\perp}$ ) คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $x=0$  จะมีค่าเป็น

$$\psi_{\perp} = \frac{q}{2\epsilon_s} (N_A - N_D) w^2 \quad (6.36)$$

สำหรับในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ( $N_D > N_A$ ) นั้น  $\psi_{\perp}$  จะมีค่าเป็นลบ ( $\psi_{\perp} < 0$ ) แต่ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ( $N_A > N_D$ ) แล้ว  $\psi_{\perp}$  จะมีค่าเป็นบวกเสมอ ( $\psi > 0$ ) เมื่อรอยต่อแบบ MIS ถูกไบอัสกลับทางเพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขช่วงดีพลีชัน จากสมการที่ (6.35) และ (6.36) จะเขียนค่าศักย์ไฟฟ้าที่ระยะ  $x$  ใด ๆ ให้อยู่ในรูปของศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ ( $\psi_{\perp}$ ) ได้ดังนี้คือ

$$\psi(x) = \psi_{\perp} \left(1 - \frac{x}{w}\right)^2 \quad (6.37)$$

สมการที่ (6.37) นี้ แสดงให้เห็นว่าการโค้งของแถบพลังงานในช่วงดีพลีชัน เป็นลักษณะกราฟพาราโบลา ดังแสดงในรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 แสดงการโค้งของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งเมื่อศักย์ไฟฟ้า  $\psi_{\infty}$  มีค่าเท่ากับ  $2\psi_B$  จะเกิดการขึ้นกลับกลายอย่างมากขึ้น

พิจารณาเมื่อช่วงดีพลีชันมีขนาดกว้างมากที่สุด [54,55] การเพิ่มค่าไบอัสกลับทางให้แก่ตัวเก็บประจุแบบ MIS มากขึ้น ความกว้างของช่วงดีพลีชันจะยิ่งมากขึ้น จนกระทั่งถึงค่าความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสค่าหนึ่ง จะเริ่มเกิดการขึ้นกลับกลายขึ้นตรงผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำที่ต่อกับจนวน แม้จะเพิ่มค่าไบอัสกลับทางต่อไปอีก ช่วงดีพลีชันจะสามารถขยายเพิ่มอีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากชั้นกลับกลายทำหน้าที่เป็นตัวกำบัง (shield) ทำให้สนามไฟฟ้าในช่วงดีพลีชันเพิ่มขึ้นได้อีกเล็กน้อย เส้นแรงไฟฟ้าส่วนใหญ่จะสิ้นสุดลงที่ประจุในชั้นกลับกลาย มีเพียงส่วนน้อยที่ส่งไปถึงประจุของสารอสุทธิที่ถูก ไอออไนซ์แล้ว ขนาดความกว้างของช่วงดีพลีชันมากที่สุดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.36) นั่นคือ ต้องทราบค่าความโค้งของแถบพลังงาน ( $\psi_{\infty}$ )

ในขณะนี้ ความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อย หรืออิเล็กตรอน ซึ่งอยู่ที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีค่าเท่ากับพาหะส่วนมากหรือโฮล ซึ่งอยู่ภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำจะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มี ( $E_F$ ) ที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำจะเลื่อนขึ้นไปอยู่เหนือระดับพลังงานเฟอร์มีชนิดอินทรีนสิก ( $E_i$ ) ด้วยระดับขนาดเท่ากับที่เคยอยู่ต่ำกว่าภายในสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 6.8 ดังนั้นแถบพลังงานจะโค้งลง และทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ  $\psi_s = 2\psi_B \approx E_{\infty}$  ซึ่งจะเรียกว่าเป็นเงื่อนไขที่ก่อให้เกิดการขึ้นกลับกลายอย่างมาก เพราะฉะนั้น

ช่วงดีพลีชันที่กว้างมากที่สุด ( $W_{\max}$ ) ก็คือผลรวมของความกว้างของชั้นกลับกลายอย่างมากกับความกว้างของช่วงดีพลีชันเมื่อ  $\psi_{\max} = 2\psi_B$  ซึ่งจะประมาณค่าได้จากสมการที่ (6.23) และ (6.36) โดยคิดว่าความกว้างของชั้นกลับกลายอย่างมากมีค่าน้อยกว่าความกว้างของช่วงดีพลีชันในขณะนั้นมาก กล่าวคือ จะมีค่าเพียงเศษส่วนของระยะความยาวเดอบายเอ็กทรินสิก (a small fraction of an extrinsic Debye length) เท่านั้น ดังนั้น

$$W_{\max} = \left[ \frac{2\epsilon_s \psi_{\max}}{qN_A} \right]^{1/2} = \left[ \frac{4\epsilon_s \psi_B}{qN_A} \right]^{1/2}$$

หรือ

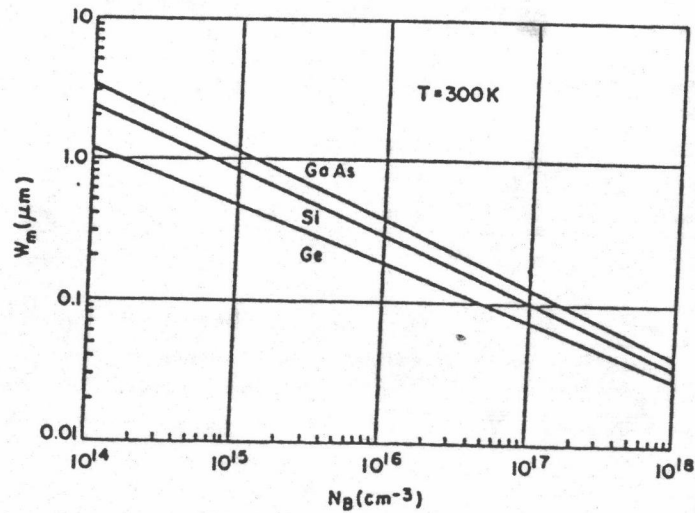
$$W_{\max} = \left[ \frac{4\epsilon_s kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)}{q^2 N_A} \right]^{1/2}$$

หรือ

$$W_{\max} = \left[ \frac{2\epsilon_s E_g}{qN_A} \right]^{1/2} \quad (6.38)$$

จากสมการที่ (6.38) สามารถอธิบายความหมายได้โดยสังเกตจากรูปที่ 6.9 ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงดีพลีชันที่กว้างมากที่สุด กับความหนาแน่นของสารอสุกติในสารกึ่งตัวนำ Ge, Si และ GaAs เมื่อ  $N_B = N_A$  สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ และ  $N_B = N_D$

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น จะเห็นได้ว่า เมื่อค่าความหนาแน่นของสารอสุกติที่ถูกไอออนไนซ์แล้วในช่วงดีพลีชันที่กว้างมากที่สุดเพิ่มขึ้น ความกว้างของช่วงดีพลีชันที่มากที่สุดนี้จะลดลงแบบเชิงเส้น



รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงดีพลีชันที่กว้างมากที่สุด กับความหนาแน่นของสารอสกัษิในสารกึ่งตัวนำ Ge, Si และ GaAs เมื่อ  $\psi_s = 2 \psi_B$

จากสมการที่ (6.15) ดังนั้น ในช่วงดีพลีชัน ความยาวเดอบายของสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็นจะเป็นดังสมการ

$$L_{DP} = \left[ \frac{\epsilon_s kT}{q^2 N_A} \right]^{1/2} \quad (6.39)$$

และ

$$L_{DN} = \left[ \frac{\epsilon_s kT}{q^2 N_D} \right]^{1/2} \quad (6.40)$$

ตามสมการที่ (6.39) และ (6.40) จะเห็นว่า ถ้าสมมุติว่าค่า  $N_A$  หรือ  $N_D$  มีค่ามาก ( $10^{16} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) ค่า  $L_{DP}$  หรือ  $L_{DN}$  จะมีค่าน้อยกว่า  $400 \text{ \AA}$  มาก ๆ และจากสมการที่ (6.38), (6.39) และ (6.40) จะเห็นได้ว่าค่า  $W_{max}$  มีค่าประมาณสี่เท่าของความยาวเดอบายของสารกึ่งตัวนำชนิดพี หรือชนิดเอ็น ขณะเกิดขึ้นกลับกลายอย่างมาก ดังสมการ

$$W_{max} = \left[ 4 L_{DP} \ln \left( \frac{N_A}{n_1} \right) \right]^{1/2} \quad (6.41)$$

$$\text{หรือ } W_{\max} = \left[ 4 L_{DN} \ln \left( \frac{N_D}{n_1} \right) \right]^{1/2} \quad (6.42)$$

จากสมการที่ (6.19) ค่าประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ( $Q_n$ ) ในช่วงดีพลีชันคือ

$$Q_n = \epsilon_n E_n \quad (6.43)$$

แทนสมการ (6.33) ในสมการที่ (6.43) จะได้ว่า

$$Q_n = -q (N_D - N_A) w \quad (6.44)$$

โดยการแทนค่า  $w$  จากสมการที่ (6.36) ในสมการที่ (6.44) จะได้ค่า  $Q_n$  ที่อยู่ในรูปของ  $\psi_n$  เป็น

$$Q_n = - [2 \epsilon_n q (N_A - N_D) \psi_n]^{1/2} \quad (6.45)$$

ดังนั้นในกรณีที่เริ่มเกิดขึ้นกลับกลายอย่างมาก ค่า  $Q_n$  สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี หรือชนิดเอ็นจะเป็นตามสมการ (6.46)

$$Q_n = - [4 \epsilon_n q N_A \psi_B]^{1/2} \quad (6.46)$$

$$\text{หรือ } Q_n = - [4 \epsilon_n q N_D \psi_B]^{1/2}$$

### 6.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ของรอยต่อแบบ MIS เชิงอุดมคติ [54]

นิจากรูปที่ 6.10 ก ซึ่งแสดงแผนภาพของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อแบบ MIS เชิงอุดมคติ ซึ่งมีลักษณะแถบพลังงานโค้งเหมือนกับในรูปที่ 6.8 ส่วนรูปที่ 6.10 ข. แสดงความหนาแน่นของประจุที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของรอยต่อในกรณีที่เริ่มเกิดขึ้นกลับกลาย ประจุของรอยต่อแบบ MIS นี้ จะอยู่ในสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$Q_m = Q_n + qN_A w = Q_s \quad (6.47)$$

เมื่อ  $Q_m$  คือ ประจุของโลหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$Q_n$  คือ อิเล็กตรอนในชั้นนำกลับกลายต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$qN_A w$  คือ ประจุผู้รับที่ถูก ไอออน ไนซ์ ในช่วงดิวลิชันต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$Q_s$  คือ ประจุทั้งหมดในชั้นสารกึ่งตัวนำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

สำหรับรูปที่ 6.10 ค. และ 6.10 ง. แสดงสนามไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ความต่างศักย์ที่ไบอัสให้ที่รอยต่อแบบ MIS ส่วนใหญ่จะตกคร่อมฉนวน ( $V_i$ ) ส่วนที่เหลือจะตกคร่อมช่วงดิวลิชัน ( $\psi_s$ ) ของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการ

$$V = V_i + \psi_s \quad (6.48)$$

ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมฉนวนคือ ค่าอัตราส่วนระหว่าง ประจุที่อยู่ผิวโลหะ หรือ ผิวสารกึ่งตัวนำ ตรงที่ต่อกับฉนวน ต่อค่าความจุของฉนวน ( $C_1$ ) ดังสมการ

$$V_i = \frac{Q_s}{C_1} = \frac{Q_s d}{\epsilon_1} \quad (6.49)$$

แทนสมการที่ (6.49) ในสมการที่ (6.48) จะได้ว่า

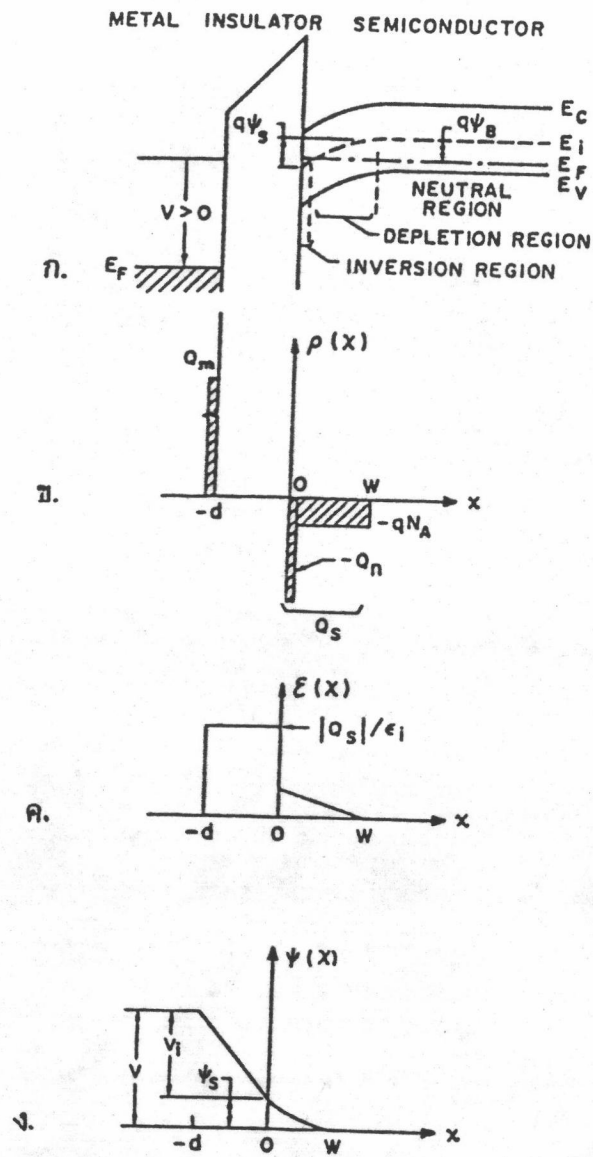
$$V = \frac{Q_s}{C_1} + \psi_s \quad (6.50)$$

เนื่องจาก ขณะนี้ที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ตรงที่ต่อกับฉนวน เกิดชั้นนำกลับกลายขึ้น ซึ่งประมาณได้ว่าค่าความหนาแน่นของประจุทั้งหมด ( $Q_s$ ) จะมีค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นประจุผู้รับที่ถูกไอออนไนซ์ในช่วงดิวลิชัน ( $qN_A w$ ) จากสมการที่ (6.45) จะเขียนสมการที่ (6.50) ได้เป็น

$$V = \frac{[2 \epsilon_1 q N_A \psi_s]^{1/2}}{C_1} + \psi_s \quad (6.51)$$

สมการที่ 6.51 คือ ความต่างศักย์ทั้งหมดที่ตกคร่อมฉนวนและสารกึ่งตัวนำในช่วงดิวลิชัน ซึ่งกว้าง  $w$  หรือถ้าแทนค่า  $\psi_s$  จากสมการที่ (6.36) และค่าความจุของช่วงดิวลิชัน ( $C_d$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\epsilon_1/w$  ในสมการที่ (6.49) จะได้ค่า  $V$  อยู่ในรูปสมการ

$$V = \frac{qN_A \epsilon_1}{C_1 C_d} + \frac{qN_A \epsilon_1}{2C_d^2} \quad (6.52)$$

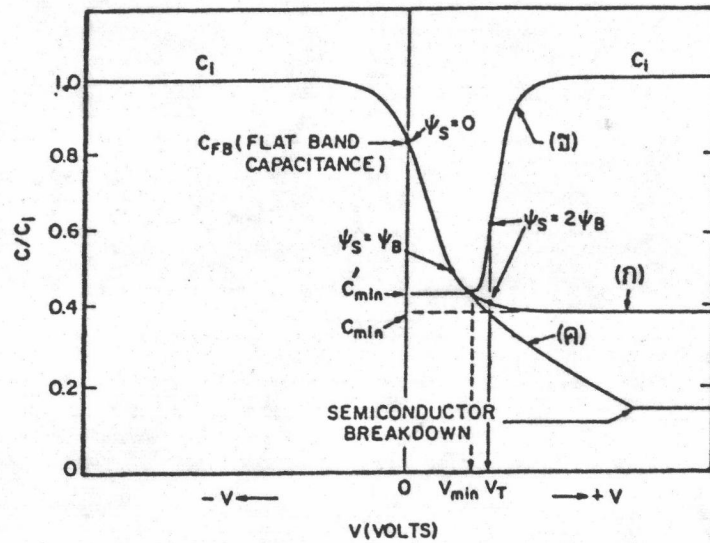


รูปที่ 6.10 แสดง ก. แผนภาพของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อแบบ MIS  
 เชิงอุดมคติของสารกึ่งตัวนำชนิดพีในกรณีที่เกิดขึ้นกลับกลาย ข. ความหนาแน่น  
 ของประจุที่ตำแหน่งต่าง ๆ ค. และ ง. สนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า  
 ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามลำดับ

ค่าความจุของตัวเก็บประจุแบบ MIS ทั้งหมด ( $C$ ) จะเกิดจากค่าความจุของฉนวน ( $C_1$ ) ต่ออนุกรมกับค่าความจุในช่วงดีปลีชัน ( $C_d$ ) ของสารกึ่งตัวนำ

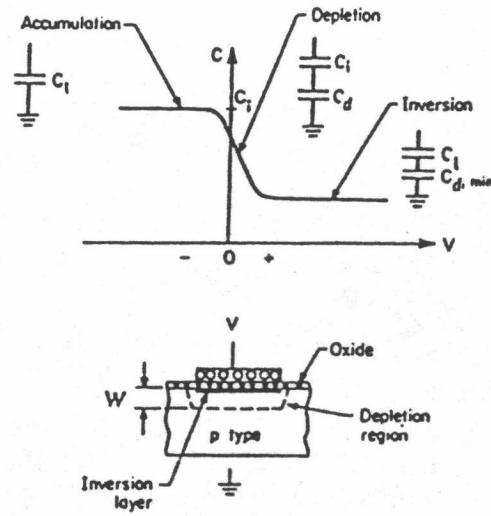
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_d}$$

$$C = \frac{C_1 C_d}{C_1 + C_d} \quad \text{F/cm}^2 \quad (6.53)$$



รูปที่ 6.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ ก. ที่ความถี่สูง  
 ข. ที่ความถี่ต่ำ ค. ในกรณีที่ช่วงดีปลีชันกว้างมากกว่าปกติ (deep depletion)  
 ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในเชิงอุดมคติ





รูปที่ 6.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ เมื่อวัดที่ความถี่สูงของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

จากรูปที่ 6.11 และจากสมการที่ (6.24), (6.48), (6.49), (6.53) สามารถอธิบายลักษณะกราฟของตัวเก็บประจุแบบ MIS นี้ได้เป็น 2 กรณีคือ

1. นิยามารูปกราฟที่ความถี่สูง (รูปที่ 6.11 ก. และรูปที่ 6.12)

เมื่อไบอัสความต่างศักย์ให้กับตัวเก็บประจุแบบ MIS นี้เพื่อให้เกิดกรณีขุมขุมเฉพาะ เนื่องจากขณะนี้ยังไม่เกิดช่วงดีพลีชันขึ้น ดังนั้นค่า  $C_d$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้นค่าความจุรวม ( $C$ ) จากสมการที่ (6.53) จึงมีค่าคงที่และเท่ากับ  $C_i$  ซึ่งเป็นค่าความจุมากที่สุด ( $C_{max}$ ) แต่ถ้าไบอัสกลับทาง จะเกิดช่วงดีพลีชันขึ้นที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ (จาก  $\psi_s = 0$  ถึง  $\psi_s = \psi_B$ ) ค่า  $C_d$  จะไม่เท่ากับศูนย์ จากสมการที่ (6.53) ความจุรวมจะมีค่าลดลงตามค่าไบอัสกลับทางที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงค่าความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสค่าหนึ่ง จะเริ่มเกิดขึ้นกลับกลายที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำตรงที่ตรงกับฉนวน ( $\psi_s = \psi_B$ ) ความต่างศักย์ค่านี้เรียกว่า  $V_{min}$  ความจุรวม จะมีค่าเท่ากับ  $C'_{min}$  ถ้าเพิ่มความต่างศักย์ของการไบอัสกลับทางมากขึ้นอีก จะเริ่มเกิดขึ้นกลับกลายอย่างมากขึ้น ( $\psi_s = 2\psi_B$ ) ขณะนี้ช่วงดีพลีชันมีขนาดกว้างที่สุด จนประมาณได้ว่า ความกว้างของชั้นกลับกลายอย่างมาก มีขนาดน้อยกว่าความกว้างช่วงดีพลีชันที่กว้างมากที่สุดมาก ๆ ดังนั้นจึงคิดว่าประจุต่อหน่วยพื้นที่ที่อยู่ทั้งสองข้างของฉนวน มีค่าประมาณประจุผู้รับที่ถูกล้อไอออนแล้วต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในช่วงดีพลีชันขณะนี้ ความต่างศักย์ค่านี้ เรียกว่า ความต่างศักย์วิกฤติ ( $V_T$ ) จากสมการที่ (6.23) และ (6.50) จะได้ว่า

$$V_T = \frac{|Q_n|}{C_1} + 2\psi_B \quad (6.54)$$

แต่กรณีที่เริ่มเกิดขึ้นกลับกลายอย่างมาก  $Q_n$  มีค่าประมาณ  $qN_A W_{max}$  ดังสมการที่ (6.54) จะเป็น

$$V_T = \left[ \frac{qN_A W_{max}}{C_1} \right] + 2\psi_B$$

หรือ

$$V_T = \left[ \frac{2\epsilon_n qN_A (2\psi_B)}{C_1} \right]^{1/2} + 2\psi_B \quad (6.55)$$

หลังจากนั้น จะเกิดขึ้นกลับกลายอย่างมากต่อไป  $Q_n$  จะมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (6.47) ถ้าแทนค่า  $Q_n$  นี้ในสมการที่ (6.50) จะได้ว่า

$$V = \frac{-Q_n}{C_1} + \frac{qN_A W_{max}}{C_1} + 2\psi_B \quad (6.56)$$

แทนสมการที่ (6.55) สมการที่ (6.56) จะได้

$$V = \frac{-Q_n}{C_1} + V_T$$

$$Q_n = -C_1 (V - V_T) \quad (6.57)$$

นั่นคือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำ กรณีที่เกิดขึ้นกลับกลายอย่างมากมีค่าขึ้นอยู่กับค่า  $C_1$ ,  $V$  และ  $V_T$

จากสมการที่ (6.53) ค่าความจรวมในกรณีที่เกิดขึ้นกลับกลายอย่างมากจะเป็นตามสมการที่ (6.58) ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุด และที่ค่าไบอัสกลับทางต่อจากค่า  $V_T$  ความจุ  $C_{min}$  จะมีค่าคงที่เนื่องจากช่วงดัดเปลี่ยนไม่ขยายกว้างมากกว่านี้อีกต่อไปแล้ว

$$\frac{1}{C_{min}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_d}$$

$$\frac{1}{C_{min}} = \frac{d}{\epsilon_1} + \frac{W_{max}}{\epsilon_n}$$

$$C_{min} = \frac{\epsilon_1}{d + \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_n}\right) W} \quad (6.58)$$

ขณะที่ตัวเก็บประจุแบบ MIS ถูกไบอัสกลับทางเกิดควมที่ขึ้นกลับกลายอย่างมากขึ้น ค่าศักย์ในไฟฟ้าที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ ( $\psi_B$ ) เมื่อวัดเทียบกับสายดินที่ขั้วรอยต่อแบบโอห์มมิก ดังรูปที่ 6.1 คือ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_d$  ของสารกึ่งตัวนำนั่นเอง ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\epsilon_n/W_{max}$  ดังนั้นจากสมการที่ (6.38) ค่า  $\psi_n$  ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีในกรณีนี้ จะมีค่าดังสมการ

$$\psi_n = \frac{q \epsilon_n N_A}{2C_d^2} \quad (6.59)$$

จากรูปที่ 6.8 จะเห็นว่าขณะเกิดขึ้นกลับกลายอย่างมากนั้นค่า  $\psi_n$  จะมีค่าประมาณ  $E_g/4$  [43,55] ดังนั้นจากสมการที่ (6.59) จะได้  $N_A$  มีค่าเป็นตามสมการ

$$N_A = \frac{2E_g C_d^2}{q \epsilon_n} \quad (6.60)$$

สมการที่ (6.60) ใช้สำหรับคำนวณหาค่าความหนาแน่นของสารอสุกษิผู้รับ ( $N_A$ ) ที่ได้ปลงในสารกึ่งตัวนำ เพื่อให้ได้สารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยคิดว่าสารอสุกษินี้มีความหนาแน่นสม่ำเสมอในทุก ๆ ส่วนของเนื้อสารกึ่งตัวนำ

ถ้าเป็นกรณีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำไม่โค้ง ( $\psi_n = 0$ ) แต่มีประจุสะสมอยู่ที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ โดยที่ความกว้างช่วงนี้มีค่าเท่ากับความยาวเดอบาย ( $L_D$ ) แล้วจากสมการที่ (6.53) และสมการที่ (6.39) ค่าความจุรวม ( $C_{FB}$ ) จะมีค่าดังสมการ

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_{FB}} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_d \text{ (flat-band)}} \\ &= \frac{d}{\epsilon_1} + \frac{L_D}{\epsilon_1} \\ C_{FB} &= \frac{\epsilon_1}{d + \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_n}\right) L_D} \end{aligned} \quad (6.61)$$

หรือ 
$$\frac{1}{C_{FB}} = \frac{1}{C_1} + \left[ \frac{kT}{\epsilon_s q^2 N_A} \right]^{1/2} \quad (6.62)$$

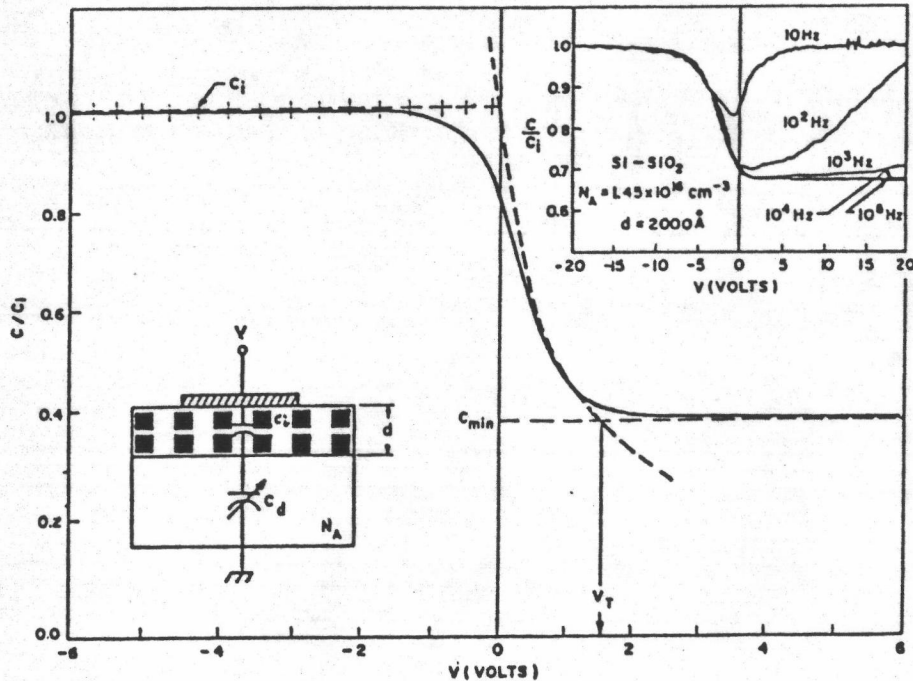
เนื่องจาก

$$C_d(\text{flat-band}) = \left[ \frac{\epsilon_s q^2 N_A}{kT} \right]^{1/2} \quad (6.63)$$

แต่ถ้าคิดว่า ระยะ  $L_D$  น้อยมาก ๆ แล้วขณะนี้  $C_d(\text{flat-band})$  จะมีค่ามากกว่า  $C_1$  มาก ๆ เนื่องจากความหนาแน่นของประจุสุทธิผู้รับ มีค่าสูงมากในช่วง  $L_D$  นี้ ดังนั้น กราฟนี้รวมความจุรวม ( $C_{FB}$ ) จะมีค่าเท่ากับความจุของฉนวน ( $C_1$ ) คือมีค่ามากที่สุดดังสมการ

$$\frac{1}{C_{FB}} = \frac{1}{C_1}$$

$$C_{FB} = C_1 = C_{max} \quad (6.64)$$

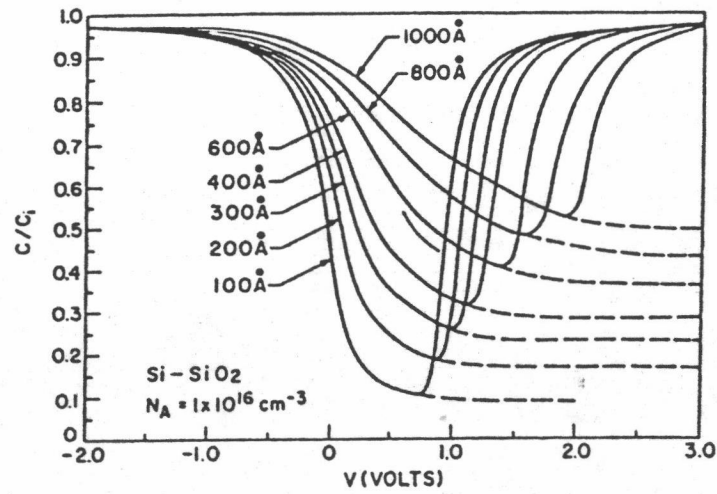


รูปที่ 6.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อวัดที่ค่าความถี่สูง ส่วนของเส้นประ คือ เส้นที่ลากขึ้นเพื่อประมาณค่า  $V_T$  เส้น +++ แสดงค่า  $C_{FB}$  เมื่อคิดว่าความยาวเดอบาย ( $L_D$ ) มีค่าน้อยมาก ๆ

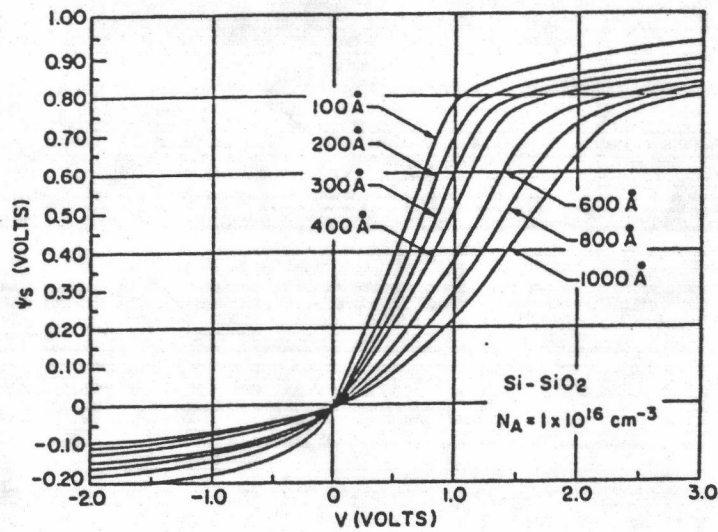
## 2. นิจากรูปกราฟที่ความถี่ต่ำ (รูปที่ 6.11 ข)

เมื่อทำการวัดความจุของตัวเก็บประจุแบบ MIS ที่ความถี่ต่ำมาก ๆ ( $< 100$  Hz) อัตราการเกิดและการรวมตัว (generation-recombination rates) ของอิเล็กตรอนกับโฮลในช่วงกลับกลายอย่างมาก จะสามารถเปลี่ยนตามค่าความถี่ของความต่างศักย์ไบโอสลับที่ซึ่งครอบคลุมความต่างศักย์ไฟตรงที่ใช้ไบอัสได้ทัน เพราะฉะนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัส จึงทำให้เกิด การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นประจุในชั้นกลับกลายนี้ขึ้นทันที ดังนั้นความจุที่วัดได้ จึงมีค่าเท่ากับความจุที่วัดได้ ขณะที่ความหนาแน่นประจุในชั้นกลับกลายมีการเปลี่ยนแปลง แทนที่จะเท่ากับความจุที่วัดในช่วงต้นลิ้น เมื่อช่วงต้นลิ้นกว้างมากที่สุด ด้วยเหตุนี้ค่าความจุรวมที่วัดได้ที่ความถี่ต่ำ ๆ นี้ จึงกลับมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเมื่อค่าความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสกลับทางมีค่ามากขึ้น ภายหลังจากที่ผ่านค่าความต่างศักย์เท่ากับ  $V'_{min}$  ไปแล้ว (ค่า  $C'_{min}$  จะมีค่าน้อยที่สุด) จนกระทั่งความจุรวมมีค่าเท่ากับ  $C_1$  อีกครั้งหนึ่ง (จาก (6.53) เมื่อ  $C_d \gg C_1$ )

เมื่อนิจากรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ของตัวเก็บประจุแบบ MIS เชิงอุดมคติที่ความหนาของชั้นฉนวนมีขนาดต่าง ๆ สำหรับกรณีที่วัดด้วยการใช้ความถี่สูง หรือความถี่ต่ำ ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 6.14 จะเห็นว่าทั้งสองกรณี เมื่อขนาดความหนาของฉนวนมีค่ามากขึ้น ค่าความจุทั้งหมดกรณีที่เกิดขึ้นกลับกลาย จะมีค่าเพิ่มขึ้น เข้าสู่ค่าความจุของฉนวนมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากตามสมการที่ (6.49) เมื่อขนาดความหนาของฉนวนมากขึ้นค่าความหนาแน่นประจุทั้งหมดในสารกึ่งตัวนำจะมีค่าลดลง ค่าความต่างศักย์ตกคร่อมฉนวนจึงมีค่าสูงขึ้นทำให้ความจุของฉนวนมีค่าลดลง ดังนั้นจากสมการที่ (6.48) ถ้าค่าไบอัสกลับทางเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ตกคร่อมช่วงต้นลิ้น ( $\psi_s$ ) ในสารกึ่งตัวนำ จะมีค่าลดลง ทำให้ค่าความจุของช่วงต้นลิ้นมีค่ามากขึ้น (จาก  $C = dQ/dV$ ) และจะมีค่ามากกว่า ความจุของฉนวนมาก ๆ เพราะฉะนั้น จากสมการที่ (6.53) ค่าความจุทั้งหมด ( $C$ ) เมื่อเกิดขึ้นกลับกลายในกรณีที่นี้จึงมีค่า เข้าสู่ค่า  $C_1$  มากขึ้น



รูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ที่วัดโดยใช้ความถี่สูง และความถี่ต่ำ เมื่อความหนาของชั้นฉนวนมีขนาดต่าง ๆ ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้



รูปที่ 6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมช่วงดีพลีชัน ( $\psi_s$ ) ในสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ - ความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสที่วัด โดยใช้ความถี่สูง หรือความถี่ต่ำ เมื่อความหนาของชั้นฉนวนมีขนาดต่าง ๆ ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้

3. พิจารณาารูปกราฟกรณที่ช่วงด้นลิชันกว้างมากกว่ากรณปรกติ เมื่อ  $\psi_{\text{e}} = 2 \psi_{\text{p}}$   
(รูปที่ 6.11 ค.)

โดยทั่วไปการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ โดยใช้อัตรา การเพิ่มความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสแบบอัด โนมิตีเร็วมาก เช่น ประมาณ 1-10 V/sec (ขึ้นกับชนิดของ สารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำตัวเก็บประจุแบบ MIS) เป็นต้น ทำให้ที่อุณหภูมิห้อง ระบบจะอยู่ในสภาวะ สมดุลความร้อนไม่นานนัก เนื่องจากในกรณที่ช่วงกลับกลายอัตรการส้างพาหะข้างน้อย มีค่าน้อยกว่า อัตรการรวมกันของโฮลกับอิเล็กตรอนมาก ๆ [55] พาหะข้างน้อยไม่สามารถเกิดขึ้นมาได้ทั้ง อัตรการเปลี่ยนแปลงค่าไบอัสสัญญาณไตรง ( $V_{\text{DC}}$ ) เพื่อให้เกิดความสมดุลกับความหนาแน่นประจุ บนแผ่นโลหะ เมื่อค่าไบอัสกลับทางเพิ่มขึ้น ช่วงด้นลิชันจึงขยายกว้างมากกว่ากรณปรกติ (เมื่อ  $\psi_{\text{e}} = 2 \psi_{\text{p}}$ ) ดังนั้น แทนที่ค่าความจุกรณที่ช่วงกลับกลายอย่างมาก ( $C_{\text{min}}$ ) จะมีค่าคงที่ เมื่อเพิ่มค่าไบอัสกลับต่อไปอีก ค่าความจุก็จะลดลงต่อไปเรื่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.11 ค. , 6.16 และ 6.17 ค่าความจุจะลดลงจนกระทั่งเกิดสภาวะพังทลาย หรือมีการส้างพาหะข้างน้อย เพิ่มขึ้น เมื่อคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pairs) ถูกสร้างขึ้นด้วยค่าความต่างศักย์ สภาวะพังทลาย หรือด้วยการลอดผ่าน (tunneling) เข้าไปในแถบวาเลนซ์และแถบนำของ สารกึ่งตัวนำ ซึ่งสำหรับสารกึ่งตัวนำ ที่มีความหนาแน่นพาหะสูงมาก (ในช่วง  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) ความต่างศักย์ที่เกิดสภาวะพังทลายจะปรากฏเป็น ความเข้มสนามไฟฟ้าตรงบริเวณขอบของแผ่นโลหะ

จะเห็นว่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ขอบของแผ่นโลหะ จะเกิดในสารกึ่งตัวนำที่มีความ หนาแน่นพาหะสูงเล็กน้อย (น้อยกว่า  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) มากกว่าเกิดในสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาแน่น พาหะสูงมากดัง รูปที่ 6.18 และความกว้างของช่วงด้นลิชันจะมีขนาดน้อยกว่าความหนา ของฉนวนมาก ดังรูปที่ 6.18 ข. สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาแน่นพาหะสูงมาก เส้นแรงของสนามไฟฟ้าที่ไปออกมา (bunching field lines) จะเกิดขึ้นภายในฉนวนเท่านั้น ไม่ส่งผลเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ สำหรับกรณที่มีความหนาของฉนวนคงที่ ความเข้มสนามไฟฟ้า ตรงบริเวณขอบของแผ่นโลหะ จะขึ้นกับลักษณะของขอบโลหะบนฉนวนเท่านั้น ถ้าขอบโลหะ ตัดตรงเป็นแบบตั้งฉากกับผิวหน้าฉนวน (sharpness) สนามไฟฟ้าตรงขอบโลหะจะมีค่าสูงมาก (ประมาณ  $10^7 - 10^8 \text{ V/cm}$ ) และเกิดภายในระยะวัดจากขอบของโลหะประมาณ 20-30 Å ขณะที่ภายในบริเวณนี้ของโลหะ ความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่า  $10^8 \text{ V/cm}$ . ตามค่าไบอัส ที่กำหนดให้ [55] ความเข้มสนามไฟฟ้าตรงขอบโลหะ เกิดจากการเกิดความต่างศักย์ตกคร่อม ที่ผิวหน้าฉนวนบริเวณใกล้ ๆ ขอบโลหะ ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากมี ไอออนของโลหะอัลคาไล (alkali ion) สะสมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าฉนวนใกล้ขอบโลหะ และมีการเคลื่อนที่ได้กล่าวคือ ถ้าบริเวณที่มีความชื้น แรงไฟฟ้าสถิตที่ขัดแย้งวสารประกอบต่าง ๆ เช่น เกลือแกง เป็นต้น

เข้าไว้ด้วยกัน มีค่าน้อยมาก สารประกอบเหล่านี้สามารถถูกไอออไนซ์แยกออกเป็นไอออนบวกและไอออนลบ ซึ่งจะเคลื่อนที่ได้เมื่อถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้า เกิดเป็นกระแสไหลตามผิวหน้าฉนวนบริเวณนี้ ดังนั้นขณะที่ทำการไบอัสแก่ตัวเก็บประจุแบบ MIS นี้ ความต่างศักย์ตกคร่อมบริเวณนี้จะยังคงมีค่าคงที่ แต่ถ้าบริเวณนี้ไม่มีความชื้น ปริมาณไอออนจะลดลง ความต่างศักย์ตกคร่อมบริเวณนี้จะลดลง มีผลทำให้ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าตรงขอบโลหะลดลงด้วย และสำหรับกรณีวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ โดยใช้ความถี่สูงกว่า 500 KHz (บริเวณผิวหน้าฉนวนไม่มีความชื้น) [55] จะไม่มีช่วงเวลานานพอสำหรับการสร้างประจุขึ้นในบริเวณนี้ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัส จึงไม่เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมบริเวณนี้ นั่นคือ จะไม่เกิดความเข้มข้นสนามไฟฟ้าตรงขอบโลหะมีอิทธิพลต่อค่าต่าง ๆ ที่วัดได้ และจากสมการ [55]

$$V_B = \frac{E_m W_{max}}{2} \quad (6.65)$$

เมื่อ  $V_B$  = ความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสขณะเกิดสภาวะนิ่งทลาย  
 $E_m$  = ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าสูงสุด  
 $W_{max}$  = ความกว้างช่วงดิลีชันมากที่สุดขณะเกิดสภาวะนิ่งทลาย

ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความเข้มข้นสนามไฟฟ้าตรงขอบโลหะที่ทำให้เกิดสภาวะนิ่งทลาย จะต้องเป็นตามเงื่อนไขที่ว่า [54]

$$\frac{d}{W_{max}} > 0.3 \quad (6.66)$$

ที่ค่าความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสทำให้เกิดสภาวะนิ่งทลาย หรือการลอดผ่านนี้จึงทำให้มีการสร้างชั้นกลับกลายขึ้นมา เมื่อไบอัสเพิ่มขึ้นอีกความกว้างช่วงดิลีชันจะไม่ขยายต่อไป เนื่องจากความหนาแน่นของประจุบนแผ่นโลหะสมดุลกับความหนาแน่นของประจุในชั้นกลับกลายที่เพิ่มขึ้นมา ดังนั้นจึงทำให้ค่าความจุลดลงถึงค่าต่ำสุด และมีค่าคงที่ต่อไป

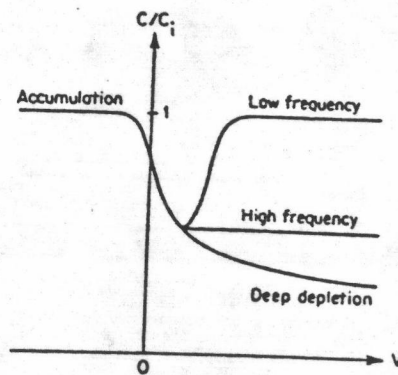
สำหรับกรณีที่ค่าความหนาแน่นพาหะสุกษิของสารกึ่งตัวนำสูงมาก (มากกว่า  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) จะเกิดการลอดผ่านมากกว่าเกิดสภาวะนิ่งทลาย ซึ่งมีผลทำให้ค่าความจุที่วัดโดยใช้ความถี่สูงมีค่าคงที่เช่นเดียวกัน ในกรณีนี้แถบพลังงานจะโค้งได้ไม่มากเกินกว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาแน่นพาหะสุกษิน้อยกว่า  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  เท่านั้น ส่วนกรณีที่ความหนา



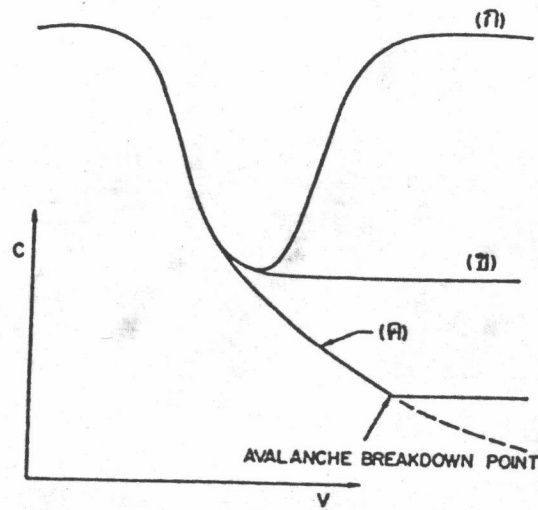
ของฉนวนบางมาก (หนา  $< 50 \text{ \AA}$ ) เมื่อเกิดกรรณที่ช่วงคลื่นสั้นกว้างมากกว่ากรรณปรกติ ตัวเก็บประจุแบบ MIS นี้จะไม่มี การสร้างชั้นกลับกลายเลย เนื่องจากพาหะข้างน้อยที่เกิดขึ้นมาจากค่าความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสทำให้เกิดสภาวะนิ่งทลาย จะลอดผ่านฉนวนเคลื่อนที่ไปยังแผ่นโลหะ เป็นกระแสรั่วไหลออกสู่จรรยาภายนอก ค่าความจุที่ค่าไบอัสนี้จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเป็นศูนย์ [55]

การฉายแสงลงบนตัวเก็บประจุ ด้วยขนาดความยาวคลื่นเหมาะสมกับการทำให้เกิด ขบวนการสร้างพาหะข้างน้อย จะทำให้เกิด ค่าความจุกลับเข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้ง ( $C_{min}$ ) ภายในช่วงเวลาที่เหมาะสมซึ่งขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 6.19

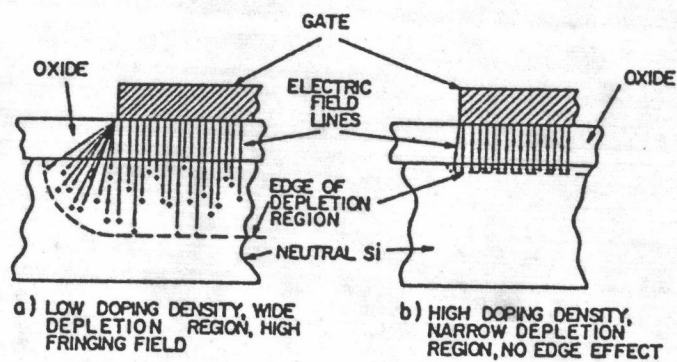
กรรณที่ช่วงคลื่นสั้นกว้างมากกว่ากรรณปรกติมักพบในสารกึ่งตัวนำ Si เพราะ Si มีช่วงเวลาการตอบสนองของพาหะข้างน้อยต่อความต่างศักย์ไฟตรง ( $V_{DC}$ ) ช้ามาก (เท่ากับ 3.4 sec) ถ้าค่าช่วงชีวิตพาหะข้างน้อย หรือช่วงเวลาการตอบสนองของพาหะข้างน้อย ต่อความต่างศักย์ไฟตรงสั้นมาก ๆ เช่น สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ถูกโด๊ปด้วยทองคำ (Au) บริสุทธิ์ เป็นต้น จะไม่เกิดกรรณที่ช่วงคลื่นสั้นกว้างมากกว่ากรรณปรกติเลย ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ ที่วัดโดยใช้ความถี่สูง [52]



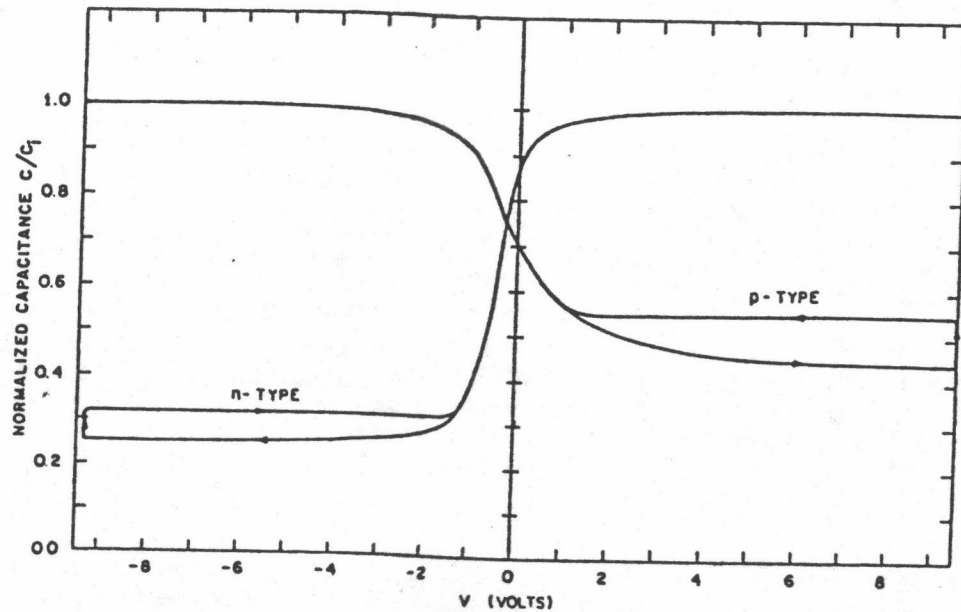
รูปที่ 6.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ กรรณที่ช่วงคลื่นสั้น กว้างมากกว่ากรรณปรกติ เมื่อวัดโดยใช้ความถี่ต่ำ และความถี่สูงของ ตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้



รูปที่ 6.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ก. ที่ความถี่ต่ำ ข. ที่ความถี่สูง ค. ในกรณีที่ช่วงคลื่นสั้นกว้างมากกว่าปกติแสดงค่าความจุจะคงที่ เมื่อไบอัสความต่างศักย์มาถึงค่าที่เริ่มเกิดสภาวะพังทลาย



รูปที่ 6.18 แสดงความเข้มข้นสนามไฟฟ้าตรงขอบโลหะ สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาแน่นเหมาะสมที่สุดน้อยและมาก



รูปที่ 6.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความจุทั้งหมดต่อความจุแนว-ความต่างศักย์ ที่ความถี่สูงเท่ากับ 1MHz ที่อุณหภูมิ 300 K ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี เมื่อมีการฉายแสงลงบนตัวเก็บประจุ

## 6.2 ลักษณะส่วของโครงสร้างแบบ MIS ที่เบี่ยงเบนไปจากกรณีอุดมคติ

ในการทดลอง วัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ของตัวเก็บประจุแบบ MIS มักได้ผลต่างไปจากทฤษฎีเชิงอุดมคติที่คาดหมายไว้ เนื่องจากสาเหตุหลายประการคือ เวิร์กฟังก์ชันของโลหะกับสารกึ่งตัวนำไม่เท่ากัน อีกทั้งฉนวนไม่ได้มีค่าความต้านทานสูงมากจนเป็นอนันต์ มีประจุไฟฟ้าและกับดักประจุ (traps) เกิดขึ้นในฉนวน ตลอดจนมีกับดักประจุภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก เช่น บริเวณขอบของเกรนผลึกเดี่ยวแต่ละเกรน เป็นต้น ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไปว่า สาเหตุดังกล่าวแต่ละชนิด ส่งผลให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ เปลี่ยนแปลงไปจากกรณีอุดมคติอย่างไร

### 6.2.1 ค่าเวิร์กฟังก์ชันของโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากัน [52, 55, 56]

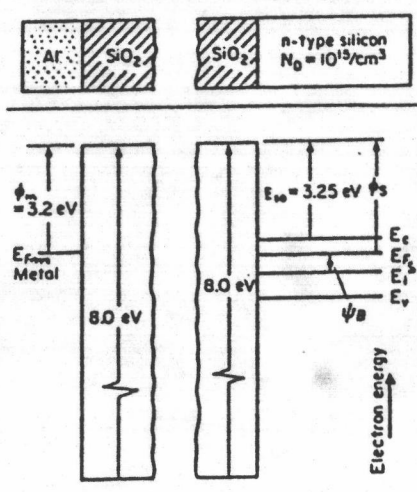
ค่าเวิร์กฟังก์ชันของโลหะและของสารกึ่งตัวนำ เคยนิยามแล้วว่าเป็นพลังงานที่ใช้

ในการยกอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะและของสารกึ่งตัวนำขึ้นไปยังระดับสัญญากาศ ( $\phi_m, \phi_s$ ) สำหรับในโครงสร้างแบบ MIS ระดับสัญญากาศในที่นี้จะเปรียบเสมือนแถบนำของฉนวน ดังนั้นค่าเวิร์กฟังก์ชันของโลหะและของสารกึ่งตัวนำจึงเป็น  $\phi_m$  และ  $\phi_s$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6.20 ในทางปฏิบัติ เวิร์กฟังก์ชันของโลหะเท่ากับสารกึ่งตัวนำ ที่นำมาใช้ประดิษฐ์เป็นรอยต่อแบบ MIS มักมีค่าไม่เท่ากัน ความแตกต่างของค่าเวิร์กฟังก์ชันของโลหะกับสารกึ่งตัวนำจะเป็นตามสมการ

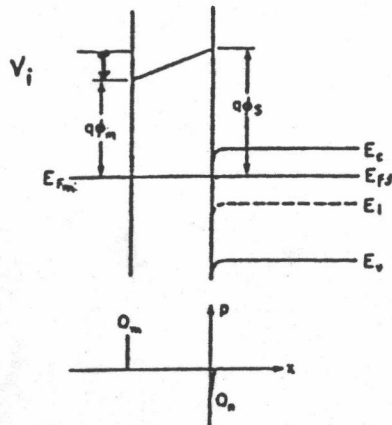
$$\phi_{ms} = \phi_m - \phi_s \tag{6.67}$$

เริ่มจากเมื่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำยังอยู่ห่างกัน แถบพลังงานของโลหะที่ต่อกับฉนวนและแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ต่อกับฉนวนจะไม่ได้ดังรูปที่ 6.20 พอนำโลหะกับสารกึ่งตัวนำมาต่อกันโดยมีฉนวนคั่นกลาง เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนระดับพลังงานเฟอร์มิทั้งในโลหะและในสารกึ่งตัวนำจะอยู่ในระดับเดียวกัน ความหมายของการเข้าสู่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือ เสมือนต่อลวดลัดวงจรระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเข้าด้วยกัน ประจุในผิวจะมีการถ่ายเทให้กันและกัน จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มิเท่ากันและประจุจะสะสมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำในปริมาณที่เท่ากับประจุที่อยู่บนแผ่นโลหะ แต่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามจะเป็นผลให้แถบพลังงานที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำตรงที่ต่อกับฉนวนโค้งลง ทั้ง ๆ ที่ยังไม่ได้มีการไบอัสความต่างศักย์ ดังแสดงในรูป 6.21 ถ้าต้องการทำให้แถบพลังงานเรียบ เพื่อที่จะใช้ทฤษฎีโครงสร้างแบบ MIS เจริญอุดมคติอธิบายได้ สามารถทำได้โดยการไบอัสกลับทางค่าความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสกลับทางนี้ เรียกว่าความต่างศักย์ที่ไม่ทำให้แถบพลังงานโค้ง ( $V_{FB}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 6.22 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

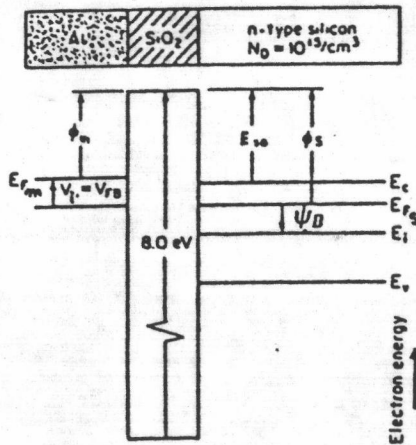
$$V_{FB} = \phi_{ms} \tag{6.68}$$



รูปที่ 6.20 แสดงบริเวณรอยต่อของโลหะกับฉนวน และรอยต่อของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น



รูปที่ 6.21 แสดงประจุที่สะสมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่ต่อกับฉนวน เนื่องมาจากค่า  $\phi_{m}$  ไม่เป็นศูนย์



รูปที่ 6.22 แสดงค่า  $V_{FB}$  ที่ทำให้แถบพลังงานไม่โค้งในกรณีสารกึ่งตัวนำ Si เป็นชนิดเอ็น

นิจากรูปที่ 6.20 จะได้ว่า

$$\phi_s = E_{s0} + E_{VL} + \frac{E_g}{2} - q\psi_B \quad (6.69)$$

และ

$$\phi_m = \frac{E_{m0} + E_{VL}}{q} \quad (6.70)$$

เมื่อ

$E_{s0}$  = ความสูงของกำแพงศักย์ ระหว่างขอบของแถบนำของฉนวน กับแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ

$E_{m0}$  = ความสูงของกำแพงศักย์ระหว่างขอบล่างสุดของแถบนำ ของฉนวนกับระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ

$E_{VL}$  = ผลต่างของค่าพลังงานระหว่างระดับสุญญากาศกับแถบนำ ของฉนวน

$\frac{E_g}{2} + q\psi_B$  = ผลต่างของค่าพลังงานระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิ กับแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ

โดยที่สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ( $\psi_B > 0$ )

$$\psi_B = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_D}{n_i} \right) \quad (6.71)$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ( $\psi_B < 0$ )

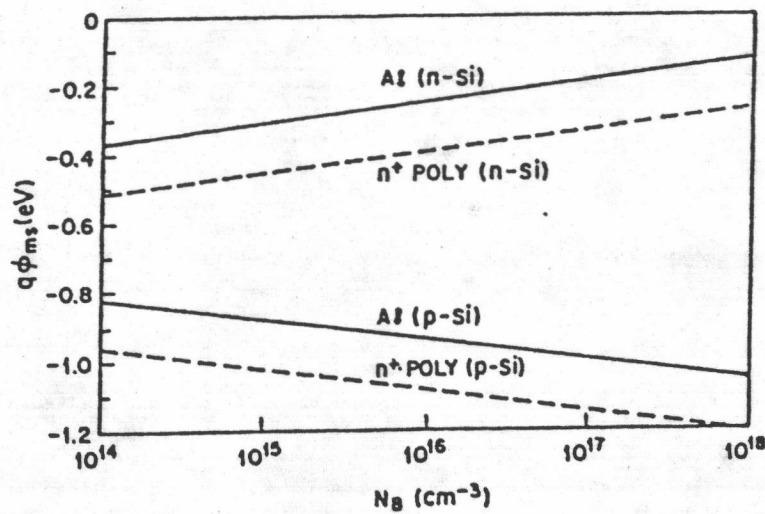
$$\psi_B = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{n_i}{N_A} \right) \quad (6.72)$$

จากสมการที่ (6.67), (6.68), (6.69) และ (6.70) จะได้ว่า

$$V_{FB} = \phi_{ms} = \frac{(E_{m0} - E_{s0} + \frac{E_g}{2} + q\psi_B)}{q} \quad (6.73)$$

นั่นคือ ถ้าคิดว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ เปลี่ยนแปลงไป จากกรณีอุดมคติ เนื่องจากผลของความแตกต่างของค่าเว็รกิ้งคั้งขึ้นของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ เพียงอย่างเดีว ความต่างศักย์ที่ไม่ทำให้แถบพลังงานโค้งจะสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (6.73) ซึ่งเมื่อ  $\phi_{ms}$  เป็นบวก กราฟจะเลื่อนไปทางขวา กล่าวคือ  $V_{FB}$  จะมีค่ามากกว่าศูนย์  $\phi_{ms}$  เป็นลบ กราฟจะเลื่อนไปทางซ้าย กล่าวคือ  $V_{FB}$  จะมีค่าน้อยกว่าศูนย์

เนื่องจากความแตกต่างระหว่างค่าเว็รกิ้งคั้งขึ้นของโลหะ กับสารกึ่งตัวนำ ( $\phi_{ms}$ ) วัดจากระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ไปยังระดับสัญญาณกับระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ ไปยังระดับสัญญาณ ดังนั้นขนาดของ  $\phi_{ms}$  จึงขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำ ความหนาแน่นของสารอสุกที่ใช้งานได้ และชนิดของโลหะเกต ดังรูปที่ 6.23 [56]

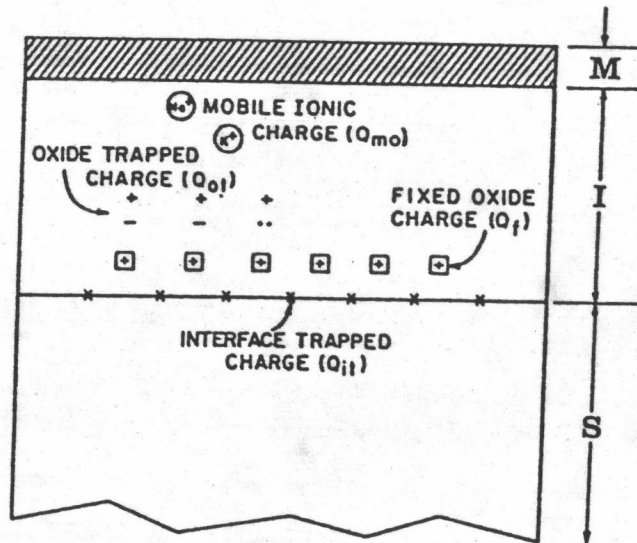


รูปที่ 6.23 แสดงค่า  $\phi_{ms}$  ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าความหนาแน่นของสารอสุกที่ใช้งานได้ และชนิดของโลหะ

ความแตกต่างระหว่างค่าเว็รกิ้งคั้งขึ้นของโลหะกับสารกึ่งตัวนำสามารถวัดได้จากวิธีการวัดการตอบสนองต่อแสง (photoresponse measurement) และวิธีการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ของตัวเก็บประจุแบบ MIS

6.2.2 ประจุในชั้นฉนวน

นอกจากความแตกต่างของเวร็กฟังก์ชันระหว่างโลหะเอกกับสารกึ่งตัวนำ แล้ว ประจุไฟฟ้าและกับดักประจุในฉนวน กับดักประจุตรงบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับฉนวน กับดักประจุตรงบริเวณรอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ก็มีผลทำให้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ต่างไปจากกรณีอุดมคติ ประจุไฟฟ้าและกับดักประจุในบริเวณดังกล่าว ได้แก่ กับดักประจุที่รอยต่อ (interface trapped charge;  $Q_{it}$ ) กับดักประจุในชั้นฉนวน (oxide-trapped charge;  $Q_{ot}$ ) ประจุในฉนวนที่อยู่กับที่ (fixed oxide charge;  $Q_f$ ) และไอออนที่เคลื่อนที่ได้ (mobile ionic charge;  $Q_{mo}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 6.24



รูปที่ 6.24 แสดงประจุชนิดต่าง ๆ ในฉนวน

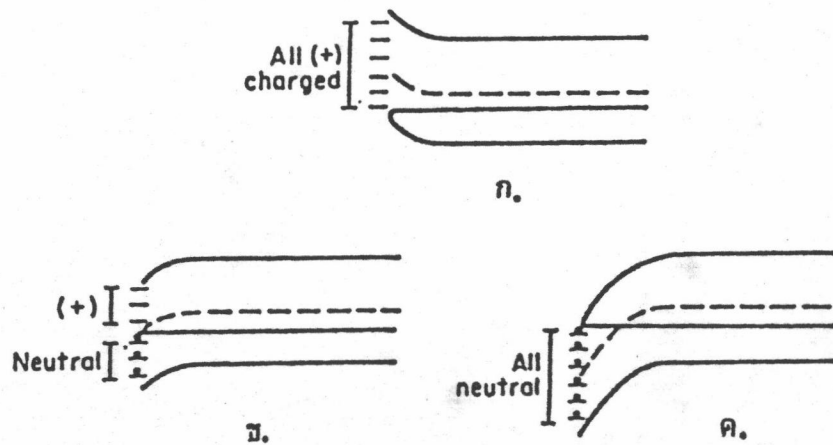
6.2.2.1 กับดักประจุที่รอยต่อ ( $Q_{it}$ )

กับดักประจุที่รอยต่อนี้บางครั้งเรียกว่า สถานะระหว่างผิวรอยต่อ (interface state) หรือสถานะรวดเร็ว (fast state) หรือสถานะผิว (surface state) แบ่งเป็นสองชนิดใหญ่ ๆ คือ กับดักประจุที่รอยต่อระหว่างโลหะกับฉนวน และกับดักประจุที่รอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ กับดักเหล่านี้เป็นต้นเหตุทำให้เกิด กระแสรั่วไหล (tunnel current) จากขบวนการลอดผ่าน (tunneling) ซึ่งจะเกิดตรงรอยต่อข้างใดนั้นขึ้นกับขนาดความหนาของฉนวน Freeman และ



Dahlike [55] สามารถวัดอิทธิพลของกับดักประจุที่รอยต่อจากตัวเก็บประจุแบบ MIS ที่ฉนวนมีขนาดบางพอที่จะทำให้มีการเกิดขบวนการลอดผ่านรอยต่อทั้งสองข้าง พบว่าถ้าฉนวนมีความหนาน้อยกว่า  $15 \text{ \AA}$  จะเกิดขบวนการลอดผ่านตรงรอยต่อระหว่างโลหะกับฉนวนเด่นกว่าตรงรอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ถ้าฉนวนหนาขึ้นอีกจะเกิดขบวนการลอดผ่านตรงรอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำเด่นกว่าตรงรอยต่อระหว่างโลหะกับฉนวน กับดักประจุที่รอยต่อเป็นประจุที่ถูกจับอยู่ที่รอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำอันเนื่องมาจากเกิดพันธะที่ไม่สมบูรณ์ (dangling bond) ขึ้นที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ จำนวนพันธะที่ไม่สมบูรณ์เหล่านี้จะมากหรือน้อยขึ้นกับทิศทางของระนาบผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ [52, 54, 55, 56] และองค์ประกอบทางเคมีของผิวหน้าสารกึ่งตัวนำที่อาจเปลี่ยนไปเมื่อสัมผัสกับฉนวน ประจุเหล่านี้จะมีสถานะทางพลังงานอยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ [52]

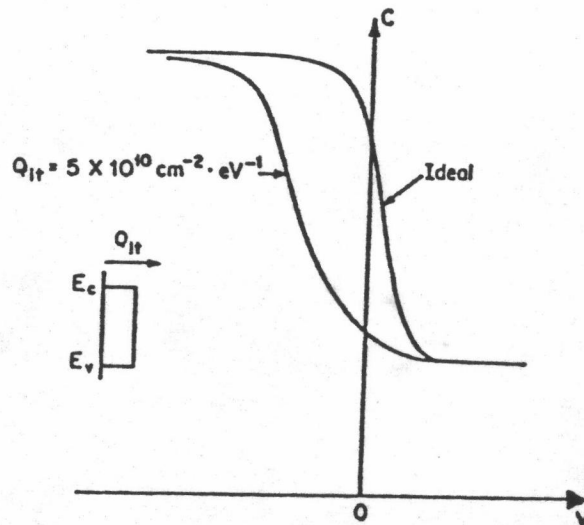
กับดักประจุที่รอยต่อสามารถวัดได้จากค่าความต่างศักย์ไฟสลับที่เปลี่ยนไป เนื่องจากการสูญเสียพลังงานออกมาจากการที่กับดักประจุที่รอยต่อ สามารถแลกเปลี่ยนจำนวนประจุกับแถบนำหรือแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำได้ โดยขบวนการจับหรือปล่อย โยลกับแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ ขณะมีการไบแอสความต่างศักย์แก่ตัวเก็บประจุแบบ MIS [55] ตามปรกติความต่างศักย์ไฟตรง ( $V_{DC}$ ) จะเปลี่ยนไปอย่างช้า ๆ ทำให้ระบบอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน ความหนาแน่นประจุในกับดักประจุที่รอยต่อจะเปลี่ยนแปลงไปพร้อม ๆ กับการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟตรง แต่จะไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟสลับ ผลนี้ทำให้เกิดความหนาแน่นประจุเพิ่มขึ้นมารวมกับความหนาแน่นประจุในช่วงดีพลีชันเพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลกับความหนาแน่นประจุบนแผ่นโลหะอันจะมีผลทำให้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ที่วัดโดยใช้ความถี่สูง ยืดออกไปตามแกนของค่าความต่างศักย์ จึงเป็นเหตุให้ค่าความชันของกราฟลดลง คล้ายกับกราฟรูปที่ 6.16 [55] นอกจากนี้ กับดักประจุที่รอยต่อจะมีผลต่อการรุ่มประจุที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำซึ่งก่อให้เกิดการโค้งของแถบพลังงาน ขณะยังไม่มีไบแอส กับดักประจุที่รอยต่อนี้จึงมีทั้งที่ประพาศิตัวคล้ายเป็นผู้ให้ (donor) หรือผู้รับ (acceptor) ถ้าเป็นผู้ให้จะมีประจุเป็นบวกหรือเป็นกลาง ถ้าเป็นประจุบวก หมายถึงกับดักนี้มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกไป ถ้าเป็นกลางหมายถึงกับดักนี้มีการรับอิเล็กตรอนเข้ามา ดังแสดงในรูปที่ 6.25



รูปที่ 6.25 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกับดักประจุที่รอยต่อ ซึ่งก่อให้เกิดการโค้งงอของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำขณะยังไม่มีกระแสไหลในลักษณะเสมือนเป็น ก. ชุ่มชุมพาหะ ข. ชั้นกลับกลาย ค. ชั้นกลับกลายอย่างมาก

จากรูปที่ 6.25 ก. จะเห็นได้ว่า ถ้ากับดักประจุที่รอยต่อ ( $Q_{sc}$ ) ทั้งหมดปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกไป กับดักประจุที่รอยต่อจะมีประจุเป็นบวก ทำให้แถบพลังงานโค้งขึ้นเสมือนเกิดกรณีชุ่มชุมพาหะทั้งๆ ไม่ได้มีการไบอัสที่รอยต่อเลย แต่ถ้าเป็นกรณีเสมือนเกิดชั้นกลับกลายดังรูปที่ 6.25 ข. กับดักประจุที่รอยต่อที่มีสถานะทางพลังงานต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิจะจับอิเล็กตรอน กับดักประจุนี้จะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าจึงทำให้กับดักประจุที่รอยต่อทั้งหมดมีประจุเป็นบวกน้อยลง และถ้าทุก ๆ สถานะทางพลังงานจับอิเล็กตรอนไว้หมด ซึ่งทำให้เกิดกรณีเสมือนเกิดชั้นกลับกลายอย่างมากขึ้น ดังรูปที่ 6.25 ค.

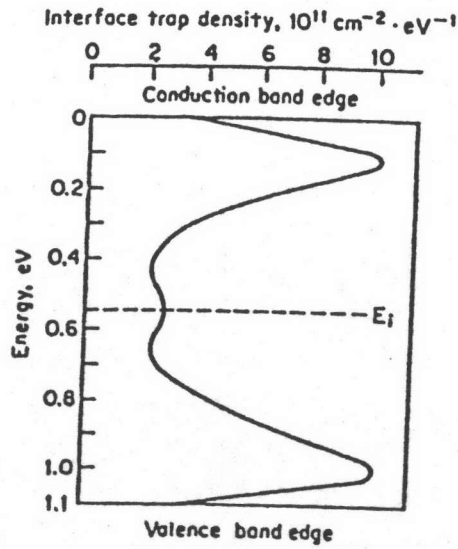
ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ จะเกิดการเลื่อนไปทางซ้ายอย่างมากในกรณีชุ่มชุมพาหะ ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบค่อย ๆ ลาดที่ละน้อยจนเกือบถึงจุดที่ไม่มีกระแสไหลเลย ๆ กรณีชั้นกลับกลาย [52] และเกือบจะไม่มีการเลื่อนเลย ถ้าเป็นกรณีของการเกิดชั้นกลับกลายอย่างมาก จึงทำให้ความชันของกราฟมีค่าเปลี่ยนไปจากกรณีอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 6.26



รูปที่ 6.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์  
ที่เลื่อนไปจากกรณีอุดมคติ เนื่องจากกับดักประจุที่รอยต่อ

ดังนั้นกับดักประจุที่รอยต่อ สามารถมีอิทธิพลทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  
ค่าความจุ-ความต่างศักย์ เกิดการเลื่อนและเกิดการยืดออก (คล้ายกรณีที่ช่วงคลื่นสั้นกว่า  
มากกว่ากรณีปรกติ เมื่อ  $\psi_s = 2\psi_0$ ) ไปจากกรณีอุดมคติ

สิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างแบบ MIS ที่มีความหนาแน่นของกับดักประจุที่รอยต่อ  
น้อยกว่า  $10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$  [52,54] และความหนาแน่นของกับดักประจุที่รอยต่อ  
อยู่ใกล้ขอบของแถบนำหรือแถบวาเลนซ์มากกว่าบริเวณอื่นๆ ในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ  
ดังแสดงในรูปที่ 6.27



รูปที่ 6.27 แสดงความหนาแน่นของกับดักประจุที่รอยต่อซึ่งเป็นฟังก์ชันกับระดับพลังงานภายในช่องว่างแถบพลังงาน

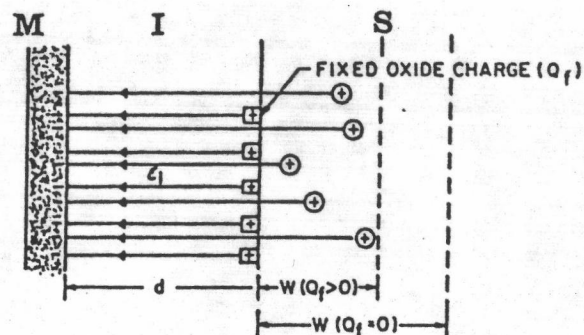
พบว่า การแอนเนลที่อุณหภูมิและบรรยากาศของแก๊สที่เหมาะสมจะช่วยให้ได้ผลการทดลองต่างไปจากกรณีอุดมคติลดลงดังที่เคยมีรายงานว่า [57] เมื่อแอนเนลตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ InP ชนิดเอ็นที่อุณหภูมิ 320 °C ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลานาน 5 นาที พบว่าค่าความจุช่วงกลับกลายมีค่าเพิ่มขึ้นจากกรณีก่อนนำมาแอนเนล เนื่องจากจะมีการจับอิเล็กตรอนไว้ในกับดักประจุที่รอยต่อ โสลที่เกิดขึ้นจึงมาชุมนุมที่บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำเมื่อค่าไบอัสกลับทางเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความจุของฉนวนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อแอนเนลตัวเก็บประจุแบบ MIS ในบรรยากาศของแก๊สคลอรีน (Cl<sub>2</sub>) ฟลูออรีน (F<sub>2</sub>) ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) หรือ ไออน้ำที่อุณหภูมิสูง ๆ จะช่วยในการลดกับดักประจุที่รอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากอะตอมของแก๊สเหล่านี้บางอะตอมจะเกิดพันธะกับพันธะที่ไม่สมบูรณ์ตรงรอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ กับดักประจุที่รอยต่อจึงถูกกำจัดออกไป นั่นคือ สถานะทางพลังงานของกับดักประจุที่อยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะหายไปด้วยการแอนเนลจะไม่ช่วยให้ปริมาณประจุในฉนวนลดลง อย่างไรก็ตามพบว่า การแอนเนลในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน และอาร์กอน (Ar<sub>2</sub>) โดยปราศจากไออน้ำที่อุณหภูมิต่ำ ๆ จะสามารถลดปริมาณประจุในฉนวน แต่จะทำให้ความหนาแน่นของกับดักประจุที่รอยต่อเพิ่มขึ้น

### 6.2.2.2 กักประจุในฉนวน ( $Q_{oc}$ )

กักประจุนี้เกิดจากข้อบกพร่อง หรือความไม่สมบูรณ์ภายในเนื้อฉนวน กักเหล่านี้จะกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อฉนวน และสามารถเพิ่มปริมาณขึ้นได้โดยการฉายแสงที่มีพลังงานสูง หรือฉายรังสีเอ็กซ์ หรือการบอมบ์ (bombardment) ด้วยอิเล็กตรอนพลังงานสูง ฉนวนที่มีคุณภาพดีควรมีกักประจุดังกล่าวน้อยที่สุด ซึ่งสามารถลดปริมาณได้โดยการแอนเนลที่อุณหภูมิไม่สูงนัก ในขั้นตอนสุดท้ายของการสร้างฉนวน

### 6.2.2.3 ประจุในฉนวนที่อยู่กับที่ ( $Q_f$ )

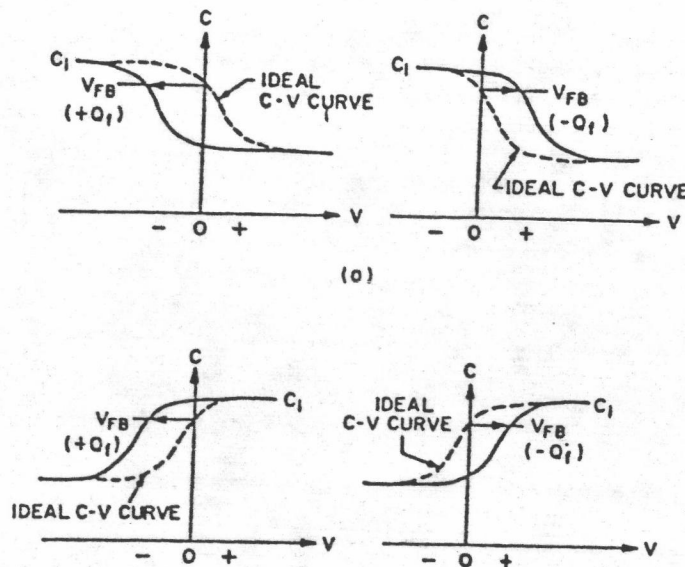
ประจุเหล่านี้มีอยู่ลึกเข้าไปในเนื้อฉนวน ห่างจากรอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ประมาณ 30 Å เป็นประจุที่อยู่กับที่ และอยู่แบบสุ่ม (random) ตลอดทั่วบริเวณนี้ โดยจะมีปริมาณคงที่แม้ว่าจะเพิ่มความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัส ประจุที่อยู่กับที่นี้ส่วนมากเป็นประจุบวก มีประจุลบอยู่เพียงเล็กน้อย จึงมีลักษณะคล้ายแผ่นประจุบาง ๆ ที่อยู่ลึกเข้าไปในเนื้อฉนวนห่างจากรอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำประมาณ 30 Å [54] ปริมาณของประจุจะมากหรือน้อยขึ้นกับเงื่อนไขการสร้างฉนวน การแอนเนล และทิศทาง (orientation) ของระนาบผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมักพบอยู่ในสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จากการเพิ่มปริมาณธาตุให้ต่างไปจากสโตยชิโอเมตริกเล็กน้อย [54] คาดว่าประจุที่อยู่กับที่นี้เกิดจากอะตอมของสารกึ่งตัวนำ ที่อยู่ในรูปของไอออนได้เคลื่อนที่เข้ามาในฉนวน และหยุดอยู่กับที่เมื่อสิ้นสุดกระบวนการสร้างฉนวน หรืออาจเกิดจากกักประจุที่รอยต่อถูกกำจัดออกไปด้วยการแอนเนลฉนวน ในขั้นตอนสุดท้ายของการสร้างฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 6.28 [54]



รูปที่ 6.28 แสดงการเคลื่อนที่ของไอออนของผู้ให้ที่ถูกไอออนไนซ์แล้วจากสารกึ่งตัวนำเข้าไปในฉนวน

เนื่องจากการเกิด ไอออนของผู้ให้ที่ถูก ไอออนไนซ์แล้ว ความกว้างของช่วงดัดลิ้น จะต้องมิต่ำกว่าขณะที่  $Q_f = 0$  ดังนั้นในกรณีช่วงดัดลิ้น และกรณีเริ่มเกิดช่วงกลับกลาย ค่าความจุ จึงมีค่าสูงกว่ากรณีอุดมคติ เป็นเหตุให้เกิดการเลื่อนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ ไปทางซ้าย (ถ้า  $Q_f$  เป็นบวก) และจะเลื่อนไปทางขวา (ถ้า  $Q_f$  เป็นลบ) ดังรูปที่ 6.29 ซึ่งค่าความต่างศักย์ที่ไม่ทำให้แถบพลังงานโด่ง ( $V_{FB}$ ) จะหาได้จากสมการ

$$V_{FB} = \frac{Q_f}{C_i} \tag{6.74}$$

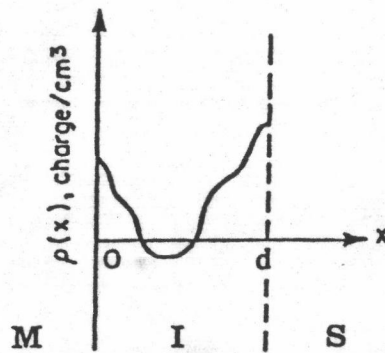


รูปที่ 6.29 แสดงการเลื่อนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ไปจากกรณีอุดมคติในลักษณะต่าง ๆ ขึ้นกับชนิดของประจุในฉนวนที่อยู่กับที่

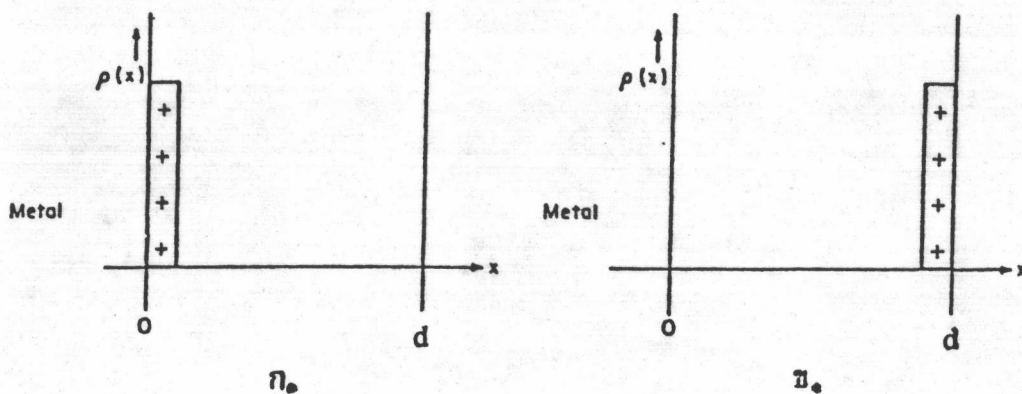
6.2.2.4 ประจุในฉนวนที่เคลื่อนที่ได้ ( $Q_m$ )

ประจุเหล่านี้คือ ไอออนของธาตุบางชนิดที่ปลอมปน เข้ามาในกระบวนการการสร้าง ฉนวน ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ภายในฉนวนทำให้เกิดแชนแนล (channel) ขึ้นทั้ง ๆ ที่ ยังไม่มีการไบอัสกลับทางแก่ตัวเก็บประจุแบบ MISFET จึงมีกระแสไฟฟ้าไหลจากขอสไปยังเดรนได้

เป็นต้นเหตุทำให้อุปกรณ์ใช้งานได้ไม่คงทนถาวร [52] ประจุในฉนวนที่เคลื่อนที่ได้ มักเป็นพวกไอออนของโลหะอัลคาไล เช่น  $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Li}^+$  เป็นต้น ส่วนใหญ่เกิดจากการล้างหลอดแก้วควอทซ์ด้วยสารละลายเคมี ทำให้เกลือโซเดียม, ลิเทียม, โพแทสเซียม เหลือเกาะติดแน่นหลอดแก้วควอทซ์อยู่ กลายเป็นสิ่งปลอมปนอยู่ในสารกึ่งตัวนำที่เตรียมขึ้นมา [52] ประจุพวกนี้จะกระจายอยู่ทั่วไปภายในฉนวน โดยเฉพาะตรงบริเวณรอยต่อจะมีปริมาณมากมาย ดังรูป 6.30 และสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายเมื่อตัวเก็บประจุแบบ MIS ถูกไบอัส จากรูปที่ 6.31 จะเห็นได้ว่าเห็นไบอัสกลับทาง สนามไฟฟ้าจะผลักไอออนบวกเหล่านี้ เข้าไปที่รอยต่อระหว่างโลหะกับฉนวน ( $x_0 = 0$ ) ความต่างศักย์ที่ทำให้แถบพลังงานไม่โค้งจะเป็นไปตามกรณีอุดมคติ หรืออาจเลื่อนไปจากกรณีอุดมคติเพียงเล็กน้อย และเมื่อไบอัสตรง ไอออนบวกจะถูกสนามไฟฟ้าผลักให้ไปอยู่ที่รอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ความต่างศักย์ที่ทำให้แถบพลังงานไม่โค้ง ในกรณีนี้จะเลื่อนไปมากที่สุด



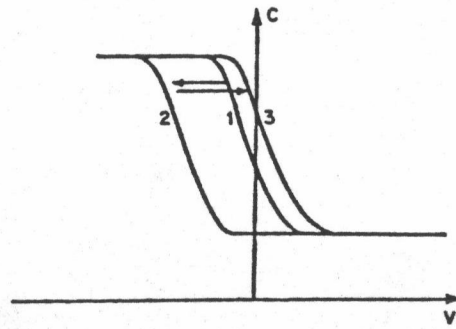
รูปที่ 6.30 แสดงการกระจายของประจุภายในฉนวน



รูปที่ 6.31 แสดง ก.  $V_{FB}$  มีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อ ไอออนบวกถูกสนามไฟฟ้าผลักมาอยู่ที่รอยต่อระหว่างโลหะกับฉนวน ข.  $V_{FB}$  มีค่าสูงสุด เมื่อไอออนบวกถูกสนามไฟฟ้าผลักมาอยู่ที่รอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ

ถ้ามีการเติมออกซิเจน ขณะไบอัสแก่ตัวเก็บประจุแบบ MIS จะสามารถแบ่งแยกชนิดของไอออนออกมาได้ มีรายงานว่า [52] จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ Si ชนิดพี ที่อุณหภูมิห้องดังรูปที่ 6.32 กราฟที่ 1 ถ้าไบอัสความต่างศักย์กลับทาง 30V แล้วเติมออกซิเจนจนกระทั่งถึง 250°C เป็นเวลา 3 นาที จะมี  $\text{Na}^+$  เคลื่อนที่ไปยังรอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ เมื่อลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ขณะที่ยังไบอัสค่าเดิมอยู่แล้วนำตัวเก็บประจุแบบ MIS นี้มาเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ที่อุณหภูมิห้องจะได้กราฟเลื่อนไปทางซ้ายดังรูปที่ 6.32 กราฟที่ 2 ถ้าไบอัสความต่างศักย์ตรง 30V แล้วเติมออกซิเจนจนถึง 250°C เป็นเวลา 3 นาที จึงลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ขณะยังไบอัสค่าเดิมอยู่ แล้วนำตัวเก็บประจุแบบ MIS นี้มาเขียนกราฟ ที่อุณหภูมิห้อง จะได้กราฟเลื่อนไปทางขวาดังรูปที่ 6.32 กราฟที่ 3 (เลื่อนผ่านกราฟที่ 1) ขณะนี้  $\text{Na}^+$  เคลื่อนที่ไปยังรอยต่อระหว่างโลหะกับฉนวน อย่างไรก็ตามพบว่าความแตกต่างของความต่างศักย์ที่ทำให้แถบพลังงานไม่โค้งของกราฟที่ 1, 2 และ 3 มีค่าน้อยกว่า 0.1 V การที่กราฟที่ 3 อยู่ใกล้กราฟที่ 1 นั้นอธิบายได้ว่าเป็นผลเนื่องจากมีไอออนถูกจับ เกิดเพิ่มขึ้นมารวมกับผลเนื่องจาก  $\text{Na}^+$  ด้วยมักเกิดในกรณีที่ไม่ได้ทำการแอนเนลิ่งขึ้นฉนวนหรือ แอนเนลิ่งขึ้นฉนวนไม่ดีพอ เมื่อไบอัสแก่ตัวเก็บประจุแบบ MIS ด้วยค่าความต่างศักย์สูง ๆ พาหะที่ถูกสร้างขึ้นมาจากกัมมันตภาพรังสีในช่วงคลื่นสั้นที่ถูก ไอออนไนซ์แล้วจะถูกเร่งจนมีพลังงานสูง สามารถเคลื่อนที่ลอดผ่านจากผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ Si มาถูกจับอยู่ที่ระยะลึกเข้าไปในชั้นฉนวน 100 Å โดยที่ถ้าไบอัสกลับจะเป็นการไหลของอิเล็กตรอน และถ้าไบอัสตรงจะเป็นการไหลของโฮล ผลเหล่านี้จะสังเกตจากเมื่อไบอัสกลับความต่างศักย์ที่ทำให้แถบพลังงานไม่โค้ง ( $V_{FB}$ ) จะเลื่อนไปทางขวา เมื่อไบอัสตรงความต่างศักย์ที่ทำให้แถบพลังงานไม่โค้งจะเลื่อนไปทางซ้าย การเลื่อนของกราฟที่เกิดเนื่องจากมีไอออนถูกจับ จะมีทิศทางตรงข้ามกับการเลื่อนของกราฟที่เกิดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของ  $\text{Na}^+$  การนำตัวเก็บประจุแบบ MIS มาแอนเนลิ่งในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน จะช่วยลดผลของการมีไอออนถูกจับได้





รูปที่ 6.32 แสดงการเลื่อนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ไปจากการที่อุดมคติ เนื่องจากประจุในฉนวนที่เคลื่อนที่ได้ของตัวเก็บประจุ แบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ Si ชนิดพี

ที่ค่าไบอัสสูงมากประจุในฉนวนที่เคลื่อนที่ได้ สามารถลอดผ่านชั้นฉนวนไปยังโลหะ ผ่านออกสู่วงจรภายนอก จึงกล่าวได้ว่าอิทธิพลของประจุเหล่านี้สามารถทำให้เกิดสภาวะบังทลาย ที่ค่าไบอัสต่ำกว่าค่าไบอัสที่ทำให้เกิดสภาวะบังทลายในกรณีอุดมคติ [55] แต่สามารถป้องกัน ผลเช่นนี้ได้ด้วยการเคลือบฟิล์มบาง ๆ ลงบนชั้นฉนวนอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งจะช่วยให้ตัวเก็บประจุมีความคงทนถาวรดีขึ้น ฟิล์มบางที่มีสมบัติไม่ยอมให้ประจุชนิดนี้ เคลื่อนผ่านได้ ได้แก่ สารประกอบไนไตรต์,  $Al_2O_3$  และ  $P_2O_5$  ที่มีปริมาณ  $SiO_2$  ผสมอยู่มาก ๆ เป็นต้น [54]

เนื่องจาก ประจุในฉนวนมีมากมายหลายชนิด แต่ละชนิดต่างก็มีผลทำให้ลักษณะของ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ เบี่ยงเบนไปจากกรณีอุดมคติทั้งสิ้น เพื่อให้ง่าย จะพิจารณาว่าประจุทั้งหมดรวมกันเป็นความหนาแน่นประจุสุทธิในฉนวน ( $Q_i$ ) ดังสมการ

$$Q_i = Q_{it} + Q_f + Q_{no} + Q_{ox} \quad (6.75)$$

ประจุสุทธิในฉนวนเหล่านี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุชนิดตรงกันข้ามขึ้นที่โลหะ เกทและ สารกึ่งตัวนำ ถ้ายังไม่คิดผลของความแตกต่างระหว่างเว็รกฟังก์ชันของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ (กำหนดให้  $\phi_{ms} = 0$ ) แลบทพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะโค้งเนื่องจากการข่มขุมของประจุ ที่ถูกเหนี่ยวนำดังกล่าว ดังนั้นต้องไบอัสกลับทางด้วยค่าความต่างศักย์ที่ทำให้เกิดพลังงานไม่โค้ง ( $V_{FB}$ ) ซึ่งจะมีค่าดังสมการ [56]

$$V_{FB} = -E_1 x_o \quad (6.76)$$

เมื่อ  $E_1$  คือค่าสนามไฟฟ้าภายในฉนวน

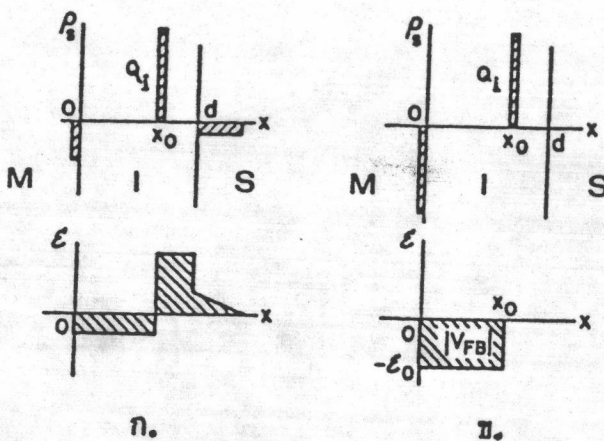
จากการคำนวณโดยใช้กฎของเกาส์ จะได้ว่าประจุสุทธิต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ( $Q_1$ ) ที่ก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าดังกล่าวมีค่าเท่ากับ

$$Q_1 = \epsilon_1 E_1 \tag{6.77}$$

แทน (6.77) ลงในสมการ (6.76) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} V_{FB} &= - \frac{Q_1 x_0}{\epsilon_1} \\ &= - \frac{Q_1 x_0}{C_1 d} \end{aligned} \tag{6.78}$$

โดยที่ประมาณว่าประจุสุทธิในฉนวน ( $Q_1$ ) อยู่ห่างจากโลหะเป็นระยะ  $x_0$   
 ดังรูปที่ 6.33



- รูปที่ 6.33 ก. แสดงประจุสุทธิในฉนวนเสมือนว่าอยู่รวมกัน และห่างจากโลหะเป็นระยะ  $x_0$  ในกรณีที่ยังไม่มีกระแสไบอัส  
 ข. แสดงประจุสุทธิในฉนวน เมื่อมีการไบอัสกลับทางเพื่อให้ได้เงื่อนไขการที่แถบพลังงานไม่ได้

ดังนั้นการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ จะเลื่อนไปทางซ้าย เมื่อ  $Q_1$  เป็นประจุบวก และจะเลื่อนไปทางขวา เมื่อ  $Q_1$  เป็นประจุลบจากการที่กราฟเชิงอุดมคติ ดังรูปที่ 6.34 ความต่างศักย์ที่ทำให้แถบพลังงานไม่ได้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและตำแหน่ง ( $x_0$ )

ของประจุสุทธิ ถ้าประจุสุทธิเหล่านี้อยู่ใกล้กับโลหะ เช่น เมื่อ  $x_0 = 0$  แล้วจะไม่มีประจุสะสมอยู่ที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นความต่างศักย์ที่ทำให้แถบพลังงานไม่โค้งจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังรูปที่ 6.34 ก. ถ้าประจุสุทธิเหล่านี้อยู่ที่บริเวณใกล้ ๆ กับสารกึ่งตัวนำ เช่น  $x_0 = d$  จากสมการที่ (6.78) จะได้ว่า

$$V_{FB} = -\frac{Q_1}{C_1} \quad (6.79)$$

นั่นคือ ความต่างศักย์ที่ทำให้แถบพลังงานไม่โค้ง ( $V_{FB}$ ) จะมีค่ามากที่สุด และจะเลื่อนไปทางซ้ายเมื่อประจุสุทธิเป็นประจุลบ ด้วยเหตุนี้จากการสังเกตทิศทางเคลื่อนของกราฟไปจากกรณีอุดมคติ จะสามารถนำมาใช้บอกชนิดของประจุได้ว่าเป็นประจุสุทธิชนิดบวกหรือชนิดลบ

สำหรับกรณีที่ประจุสุทธิกระจายทั่วไปในชั้นฉนวน จะได้ว่า

$$V_{FB} = \frac{1}{C_1} \left[ \frac{q}{d} \int_0^{x_0} \rho(x) dx \right] \quad (6.80)$$

ซึ่ง  $\rho(x)$  คือ ความหนาแน่นของประจุสุทธิในฉนวนต่อหน่วยปริมาตร ซึ่งเป็นผลรวมของความหนาแน่นของกับดักประจุในฉนวน [ $\rho_{oc}(x)$ ] ความหนาแน่นของประจุในฉนวนที่อยู่กับที่ [ $\rho_c(x)$ ] และความหนาแน่นของประจุในฉนวนที่เคลื่อนที่ได้ [ $\rho_{mo}(x)$ ]

สมมติว่าระยะทางเฉลี่ยที่ความหนาแน่นประจุสุทธิกระจายในฉนวนเท่ากับ  $\bar{x}$  โดยมีนิยามว่า [58]

$$\bar{x} = \frac{\int_0^{x_0} x \rho(x) dx}{\int_0^{x_0} \rho(x) dx} \quad (6.81)$$

และเนื่องจาก ประจุสุทธิต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด ( $Q_1$ ) มีค่าดังสมการ

$$Q_1 = q \int_0^{x_0} \rho(x) dx \quad (6.82)$$

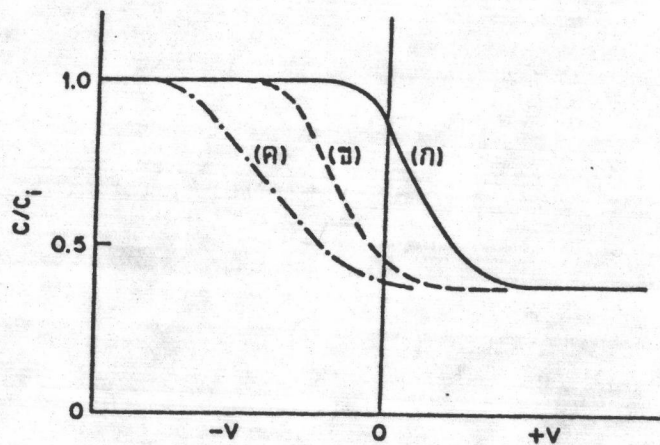
แทนสมการที่ (6.81), (6.82) ลงในสมการที่ (6.80) จะได้ว่า

$$V_{FB} = \frac{Q_1 \bar{x}}{C_1 d} = \frac{\bar{x} Q_1}{\epsilon_1} \quad (6.83)$$

ถ้าผลต่างของเวิร์กฟังก์ชันระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำไม่เท่ากับศูนย์ ความต่างศักย์ที่ทำให้แถบพลังงานไม่โค้งที่เลื่อนไปจากกรณีอุดมคติจะเป็นดังสมการ

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_f + Q_{mo} + Q_{ot} + Q_{it}}{C_1} \quad (6.84)$$

ประจุในฉนวนซึ่งอาจเป็นประจุที่อยู่กับที่ และ หรือประจุที่เคลื่อนที่ได้ และ/หรือ กับดักประจุในฉนวน จะมีผลทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ เลื่อนไปจากกรณีอุดมคติ ดังรูปที่ 6.34 ข. แต่ถ้ามีกับดักประจุที่รอยต่อ นอกจากกราฟจะเลื่อนไปจากกรณีอุดมคติแล้วความชันของกราฟยังเบี่ยงเบนไปจากเดิม เนื่องจากกราฟจะชี้ออกจากกรณีอุดมคติ ดังรูปที่ 6.34 ค. นอกจากนี้ยังมีผลทำให้ค่าความจุที่ช่วงขุมเฉพาะคงที่ที่ค่าไบอัสตรงสูงมากด้วย



รูปที่ 6.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ในกรณี

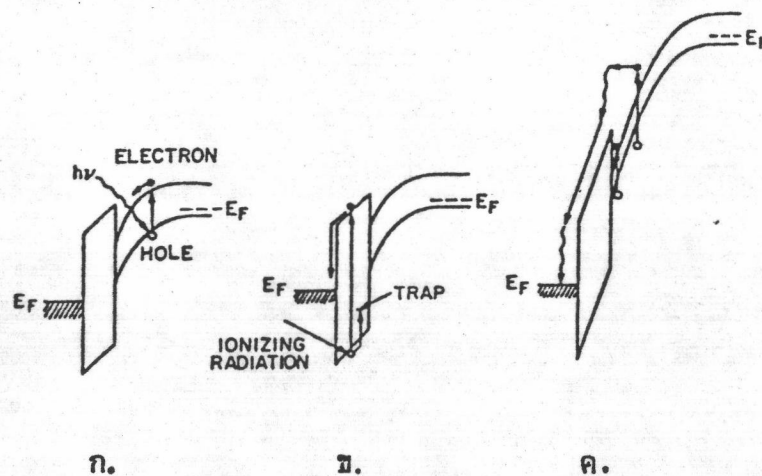
- ก. อุดมคติ
- ข. ผลเนื่องจากประจุในฉนวนที่อยู่กับที่
- ค. ผลเนื่องจากกับดักประจุที่รอยต่อ

### 6.2.3 กักประจุภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ [58]

กักประจุภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ มักเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก เช่น ตรงบริเวณขอบของเกรนผลึกออกพันธิต์แต่ละเกรน เป็นต้น กักประจุชนิดนี้จะมีสถานะทางพลังงานกระจายอยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ มีทั้งระดับพลังงานผู้ให้และผู้รับ ดังนั้นเมื่อไบอัสแก่ตัวเก็บประจุด้วยความต่างศักย์สูง หรือเมื่อมีการฉายแสง ฉายรังสี เน้มนอกเหนือจากตัวเก็บประจุขณะมีการไบอัสคงที่ค่าหนึ่ง จะเกิดขบวนการสร้างประจุขึ้นมาจากกักประจุเหล่านี้ เนื่องจากประจุของพาหะที่ถูก ไอออไนซ์ออกมาจากกักประจุเหล่านี้ จะเคลื่อนที่มาชุมนุมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำตรงที่ต่อกับฉนวน จึงเป็นต้นเหตุทำให้ แถบพลังงานโค้ง ค่าความจุจึงเพิ่มขึ้นจากกรณีอุดมคติ

### 6.2.4 อิทธิพลภายนอก

อิทธิพลภายนอกที่มีผลต่อการทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ เบี่ยงเบนไปจากกรณีอุดมคติมีมากมาย ได้แก่ การฉายแสง การฉายรังสี การไบอัสความต่างศักย์ จนถึงสภาวะนึ่งทกลาย เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 6.35



รูปที่ 6.35 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของตัวเก็บประจุแบบ MIS กรณีต่าง ๆ คือ

- ก. อิทธิพลของการฉายแสง
- ข. อิทธิพลของการฉายรังสี
- ค. อิทธิพลของการไบอัสความต่างศักย์จนถึงสภาวะนึ่งทกลาย

#### 6.2.4.1 การฉายแสงแก่ตัวเก็บประจุแบบ MIS ขณะไบอัสความต่างศักย์คงที่ค่าหนึ่ง [58]

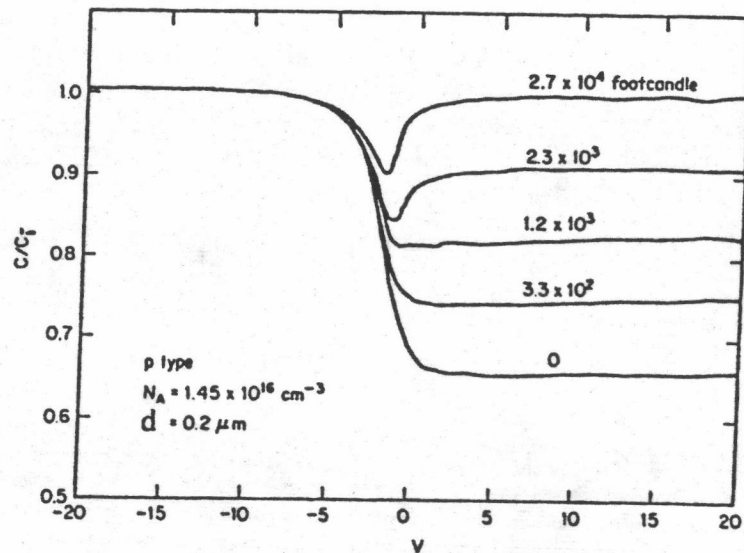
การฉายแสงจะทำให้เกิดขบวนการสร้างประจุของพาหะที่ถูกโฮลในชั้นแล้วออกมาจากกับดักชนิดต่าง ๆ ภายในช่วงดิลลิชันของสารกึ่งตัวนำ เมื่อไบอัสความต่างศักย์เข้าไปประจุเหล่านี้จะเคลื่อนที่มาชุมนุมอยู่ตรงผิวหน้าสารกึ่งตัวนำตรงที่ต่อกับฉนวน ทำให้แถบพลังงานโค้งมากขึ้น ความกว้างของช่วงดิลลิชันจะลดลง ค่าความจุช่วงกลับกลายจึงมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีอุดมคติ ค่าความจุนี้เรียกว่า โฟโตคาปาซิแตนซ์ (photocapacitance)

#### 6.2.4.2 การฉายแสงแก่ตัวประจุแบบ MIS ขณะเพิ่มความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสตัวเก็บประจุ [52]

เมื่อทำการฉายแสงลงบนตัวเก็บประจุแบบ MIS ขณะเพิ่มความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสตัวเก็บประจุจะทำให้เกิดผล 2 กรณีคือ

1. จะทำให้ค่าช่วงเวลาของขบวนการการเกิดพาหะข้างน้อยในช่วงกลับกลายลดน้อยลง (มีค่าน้อยกว่าช่วงเวลาของการเกิดช่วงกลับกลายในกรณีไม่ได้มีการฉายแสง 10 เท่า [55])
2. จะทำให้เกิดขบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอน หรือ โฮลออกจากกับดักประจุในฉนวน แล้วพาหะที่ถูกปลดปล่อยออกมา จะวิ่งข้ามรอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ เข้า ไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือ ถ้าเกิดขบวนการการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกับดักประจุในฉนวนอิเล็กตรอน จะวิ่งข้ามรอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ เข้ามาชุมนุมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ ส่วนโฮลจะถูกกับดักประจุในฉนวนจับไว้

นอกจากนี้พลังงานแสงจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นจากกับดักที่อยู่ในช่วงดิลลิชันของสารกึ่งตัวนำ ทำให้พาหะที่ถูกโฮลในชั้นแล้ว เคลื่อนที่มาชุมนุมอยู่ที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ การสะสมประจุเหล่านี้จะทำให้ความกว้างของช่วงดิลลิชันลดลง ทำให้แถบพลังงานโค้งมากขึ้นขณะที่ค่าไบอัสเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 6.35 ก. จึงทำให้ค่าความจุช่วงกลับกลายมีค่าเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่ได้มีการฉายแสงค่าความจุนี้เรียกว่า โฟโตโวลท์เตจ คาปาซิแตนซ์ (photovoltage capacitance) [58] กรณีที่สองจะเกิดมากกว่ากรณีที่หนึ่งเมื่อทำการวัดโดยใช้ความถี่สูง [54] แต่ผลของการฉายแสงจะไม่มีอิทธิพลต่อตัวเก็บประจุแบบ MIS ถ้าฉนวนมีความหนาแน่นมากกว่า  $100 \text{ \AA}$  เนื่องจากกับดักประจุในฉนวนที่เคลื่อนที่ได้จะกระจายตัวไปภายใน ฉนวนที่ระยละเอียดกว่านี้ อิทธิพลของแสงจึงส่งไปไม่ถึง [52] อย่างไรก็ตามความต่างศักย์ที่ทำให้ แถบพลังงานไม่โค้งที่เลื่อนไปจากกรณีอุดมคติ สามารถทำให้ค่าที่เลื่อนไปลดน้อยลงได้ด้วย การแอนนัลตัวเก็บประจุที่อุณหภูมิต่ำซึ่งลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ ในกรณีนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 6.36



รูปที่ 6.36 แสดงอิทธิพลของแสงต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ Si ชนิดพี

#### 6.2.4.3 การฉายรังสีแกมมาในตัวเก็บประจุแบบ MIS [54]

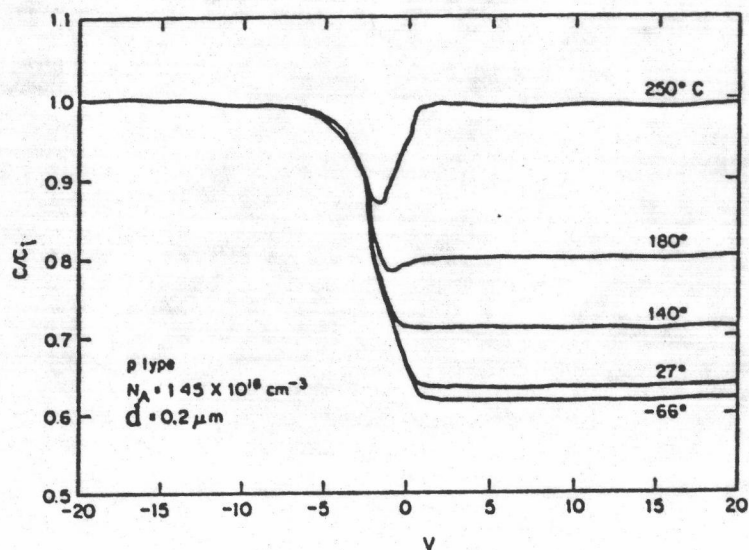
การฉายรังสีชนิดต่าง ๆ เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา เป็นต้น ผลงานของรังสี จะสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นในฉนวนโดยการทำให้พันธะอะตอมของฉนวนขาดออกจากกัน ขณะเพิ่มค่าไบอัสกลับแกตัวเก็บประจุ สนามไฟฟ้าจะผลักคู่อิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้นมาให้เคลื่อนที่ไปยังโลหะเกต และจะผลักโฮลให้เคลื่อนที่ไปยังกับดักรอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 6.35 ข. จึงทำให้ปริมาณกับดักประจุที่รอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าเปลี่ยนเป็นเพิ่มค่าไบอัสตรงบ้าง ก็ยังคงเกิดปรากฏการณ์เช่นเดิม แต่โฮลจะถูกจับไว้ที่รอยต่อระหว่างโลหะกับฉนวนแทน กรณีนี้ จะทำให้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ เลื่อนไปจากกรณีอุดมคติเล็กน้อย และผลการทดลองที่ได้ จะคล้ายกับกรณีการเลื่อนของกราฟ เนื่องจากผลของกับดักประจุที่รอยต่อ และ/หรือกับดักประจุในฉนวน

6.2.4.4 การไบอัสความต่างศักย์จนถึงสภาวะจะพังทลายแก่ตัวเก็บประจุแบบ MIS [54]

ผลของกรณีที่นี้จะคล้ายกับกรณีที่ช่วงดัดลึชันกว้างมากกว่ากรณีปรกติ เมื่อ  $\psi_s = 2 \psi_B$  ดังกราฟรูปที่ 6.17 ค. เมื่อค่าไบอัสถึงสภาวะพังทลาย พาหะที่อยู่ในแถบดักภายในช่วงดัดลึชันจะถูก ไอออไนซ์ออกมา และถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าความเข้มสูงเคลื่อนที่มาสะสมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 6.35 ค. ประจุของพาหะที่ถูก ไอออไนซ์แล้วบางอนุภาคจะมีพลังงานสูงพอที่จะเคลื่อนที่ข้ามพันธขอบของกัมบังศักย์ของสารกึ่งตัวนำเข้าไปในฉนวนได้ สภาวะพังทลายจะเกิดขึ้นที่ค่าไบอัสสูงมากถ้าฉนวนมีความหนาเพิ่มขึ้น

6.2.4.5 ผลของอุณหภูมิต่อการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS [55,59]

อุณหภูมิจะมีผลต่อขบวนการสร้าง-การรวมกันของอิเล็กตรอนกับโฮล มักเกิดกรณีที่ช่วงดัดลึชันกว้างมากกว่ากรณีปรกติ เมื่อ  $\psi_s = 2 \psi_B$  ขบวนการสร้าง-การรวมกันของอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นช้ามาก เมื่ออุณหภูมิต่ำลง เมื่อเทียบกับช่วงความเร็วของการไบอัสแต่ละค่า ประจุในช่วงกลับกลายจึงเกิดช้ามากกว่ากรณีเกิดช่วงดัดลึชันกว้างมากกว่ากรณีปรกติ เชิงอุดมคติที่อุณหภูมิห้อง จึงทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ที่อุณหภูมิต่ำเลื่อนไปมากกว่ากรณีเกิดช่วงดัดลึชันกว้างมากกว่าปรกติ เชิงอุดมคติที่อุณหภูมิห้อง ผลของอุณหภูมิจะคล้ายกับผลของการฉายแสง ดังแสดงในรูปที่ 6.37



รูปที่ 6.37 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ Si ชนิดพี [52]



ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับตัวเก็บประจุแบบ MIS ทั้งกรณีตัวเก็บประจุแบบ MIS เชิงอุดมคติ และอิทธิพลต่าง ๆ ที่ทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ ที่วัดโดยใช้ความถี่สูง เบี่ยงเบนไปจากกรณีอุดมคติมาพอสมควร สำหรับบทต่อไปจะกล่าวถึงวิธีการเตรียมสาร เพื่อนำไปศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และ GaAs โดยการนำมาทำเป็นตัวเก็บประจุแบบ MIS และโดยอาศัยการใช้สมการต่าง ๆ ในบทนี้ หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ออกมา ตามลำดับ