

บทที่ 3

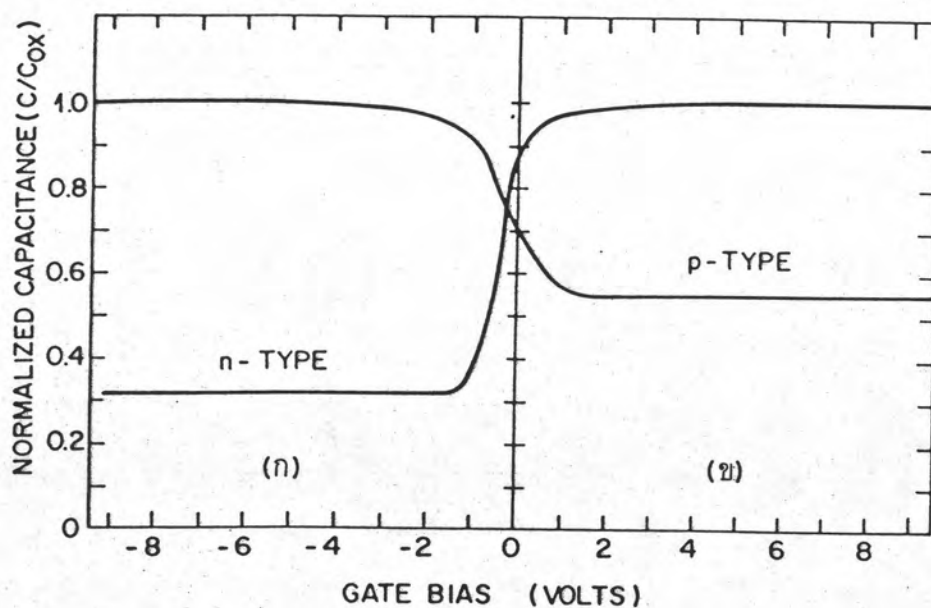
การวัดสมบัติบ่งชี้ทางไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS
ด้วยวิธีการวัดลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้า

ในบทที่ 2 เราได้กล่าวถึงลักษณะโครงสร้าง MIS และทฤษฎีเกี่ยวกับความจุ-แรงดันไฟฟ้า จะพบว่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ขึ้นกับค่าแรงดันไบแอส และมีความสัมพันธ์กับสมบัติบ่งชี้ทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแผ่นรองรับของโครงสร้างนี้ ในบทนี้จะใช้โครงสร้าง MIS นี้เป็นอุปกรณ์เพื่อใช้ศึกษาสมบัติบ่งชี้ทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแผ่นรองรับด้วยวิธีการวัดลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้า ข้อมูลที่สำคัญที่จะได้คือ ชนิดของพาหะข้างมาก, ความเข้มข้นสารเจือปน, โพรไฟล์สารเจือปน และช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย เป็นต้น จะได้กล่าวถึงหลักพื้นฐานในการวัดและแบบจำลองที่ใช้อธิบาย และจากแบบจำลองในบทนี้เราจะนำไปใช้สร้างเป็นโปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ผลในหัวข้อ 4.6.4 ในบทที่ 4 ต่อไป

3.1 ชนิดของพาหะข้างมาก

การตรวจสอบชนิดของพาหะข้างมากของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแผ่นรองรับของโครงสร้าง MIS จะทราบได้จากการวัดลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูง โดยการสังเกตความชันของกราฟในช่วงที่เกิดชั้นปลอดพาหะสำหรับสารกึ่งตัวนำที่เป็นชนิดเอ็น ความชันจะมีค่าเป็นบวกในขณะที่ชนิดที่ความชันจะเป็นลบ ผลที่ได้นี้เกิดจากการที่แรงดันไบแอสที่ใช้ในการบ่อนที่ขั้วโลหะเพื่อผลักพาหะข้างมากออกจากบริเวณใกล้กับรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ เช่น ถ้าพาหะข้างมากเป็นโฮลหรือประจุบวกในการที่จะไบแอสให้เกิดชั้นปลอดพาหะจะต้องบ่อนแรงดันไบแอสให้เป็นบวกมากขึ้น ค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ในขณะนี้จะเป็ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฉนวนและของบริเวณปลอดพาหะจะลดลงเนื่องจากชั้นปลอดพาหะกว้างออกมากขึ้น ดังนั้นจะเห็นความชันของกราฟความจุ-แรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้จะมีค่าเป็นลบ และในทางกลับกันค่า

ความชันดังกล่าวจะมีค่าเป็นบวกสำหรับพาหะข้างมากที่เป็นอิเล็กตรอน ตัวอย่างของความแตกต่างของกราฟลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูง เมื่อสารกึ่งตัวนำที่เป็นแผ่นรองรับมีพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอน (ชนิดเอ็น) และโฮล (ชนิดพี) แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กราฟลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูงของโครงสร้าง MIS
 ก. ชนิดเอ็น
 ข. ชนิดพี

3.2 ปริมาณความเข้มข้นสารเจือปน

หลักพื้นฐานที่ใช้ในการวัดปริมาณความเข้มข้นสารเจือปนนี้คือค่าความกว้างมากที่สุดของชั้นปลอดพาหะมีค่าขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นสารเจือปนของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแผ่นรองรับของโครงสร้าง MIS ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.1.1 ในบทที่ 2 เราได้สมการที่ 2.10 ดังนี้

$$x_{d\max} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 \phi_s(\text{inv})}{qN_A}} \quad 3.1$$

ที่ความกว้าง $x_{d\max}$ นี้ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นปลอดพาหะจะมีค่าคงสมการ

$$C_{sc(\min)} = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 A}{x_{d\max}} \quad 3.2$$

เมื่อ A คือพื้นที่ของขั้วโลหะของโครงสร้าง MIS

จากสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 เราจะได้ความเข้มข้นสารเจือปนมีค่าคงสมการ

$$N_A = \frac{2\phi_s(\text{inv})}{q\epsilon_s \epsilon_0} \cdot \left(\frac{C_{sc(\min)}}{A}\right)^2 \quad 3.3$$

สำหรับค่า $\phi_s(\text{inv})$ หาได้จาก

$$\phi_s(\text{inv}) = \frac{1}{q} (E_g/2 + \tau) \approx E_g/q \quad 3.4$$

โดยที่ E_g คือความกว้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

τ คือระดับเฟอร์มิวัตจากกึ่งกลางของแถบพลังงาน

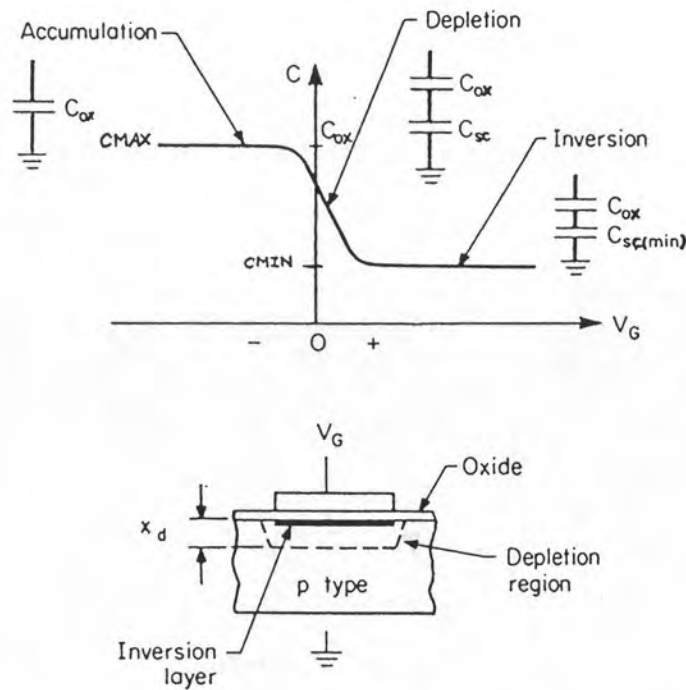
ในทางปฏิบัติค่าความเข้มข้นของสารเจือปนจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ระดับพลังงาน τ จะมีค่าน้อยกว่า $E_g/2$ เล็กน้อย การประมาณให้ $\phi_s(\text{inv}) \approx E_g/q$ ค่าความผิดพลาดในการวัดปริมาณนี้จะ

ผิดพลาดไปเล็กน้อย

เมื่อแทนค่า $\phi_s(inv) = E_g/q$ ในสมการที่ 3.4 ลงในสมการที่ 3.3 เราจะได้

$$N_A = \frac{2E_g}{q^2 \epsilon_s \epsilon_0} \cdot \left(\frac{C_{sc(min)}}{A} \right)^2 \quad 3.6$$

สำหรับค่าความจุไฟฟ้าของชั้นปลอดพาหะที่กว้างมากที่สุดคือ $C_{sc(min)}$ จะหาได้จากการวัดลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูง ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างกราฟความจุ-แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูงและการหาค่า $C_{sc(min)}$

จากกราฟเราจะได้อ่านค่า C_{MAX} และค่า C_{MIN} โดยที่ C_{MAX} เป็นค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฉนวน ส่วน C_{MIN} คือค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฉนวนต่อเนื่องกับค่าความจุไฟฟ้าของชั้นปลอดพาหะที่กว้างมากที่สุด ดังสมการ

$$C_{MAX} = C_{ox} \quad 3.7$$

$$C_{MIN}^{-1} = C_{MAX}^{-1} + C_{sc(min)}^{-1} \quad 3.8$$

จากสมการที่ 3.8 จะได้

$$C_{sc(min)} = \frac{C_{MAX} \cdot C_{MIN}}{C_{MAX} - C_{MIN}} \quad 3.9$$

แทนค่าสมการที่ 3.9 ลงในสมการที่ 3.6 จะได้

$$N_A = \frac{2E_g}{q^2 \epsilon_s \epsilon_o} \cdot \left(\frac{C_{MAX} \cdot C_{MIN}}{C_{MAX} - C_{MIN}} \right) / A^2 \quad 3.10$$

เมื่อ N_A คือความเข้มข้นสารเจือปนมีหน่วยเป็น cm^{-3}

E_g คือความกว้างของแถบพลังงานมีหน่วยเป็น eV

ϵ_s คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

q คือประจุของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} coulomb

ϵ_o คือค่าเพอร์มิติวิตีของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 8.86×10^{-14} F/cm

C_{MAX} คือค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุดมีหน่วยเป็น Farad

C_{MIN} คือค่าความจุไฟฟ้าที่น้อยที่สุด มีหน่วยเป็น Farad

A คือพื้นที่ของขั้วโลหะมีหน่วยเป็น cm^2

จากสมการที่ 3.10 จะพบว่า ความเข้มข้นสารเจือปนจะมีค่าขึ้นกับ E_g แบบเชิงเส้นในขณะที่มีค่าขึ้นกับพื้นที่กำลังสอง ดังนั้นความถูกต้องของค่า N_A จะขึ้นกับความถูกต้องในการวัดพื้นที่เป็นอันมาก

3.3 โพรไฟล์สารเจือปน [๑]

หลักพื้นฐานที่ใช้ในการวัดโปรไฟล์ของสารเจือปนคือความกว้างของชั้นปลอดพาหะ จะขึ้นกับความเข้มข้นสารเจือปนที่ไอออนไนซ์บริเวณขอบของชั้นปลอดพาหะ แบบจำลองที่จะใช้อธิบายต่อไปนี้จะใช้กับรอยต่อ PN ชนิดเป็นชั้นข้างเดียว (one side step junction) และใช้กับโครงสร้าง MIS โดยใช้วัดโปรไฟล์ของสารเจือปนบริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำใกล้กับรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ

ตามแบบจำลองต่อไปนี้จะสมมุติอะตอมของสารเจือปนไอออนไนซ์หมดจากรูปที่ 3.3 แสดงการกระจายของประจุ, สนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า สำหรับกรณีทั่วไป เมื่อเราป้อนแรงดันไบแอสเพิ่มขึ้น dV_T จะเป็นผลให้ชั้นปลอดพาหะกว้างออกไป $d\omega$ และโปรไฟล์ของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 3.3 ค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจะหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟประจุไฟฟ้าและระยะทาง ดังสมการ

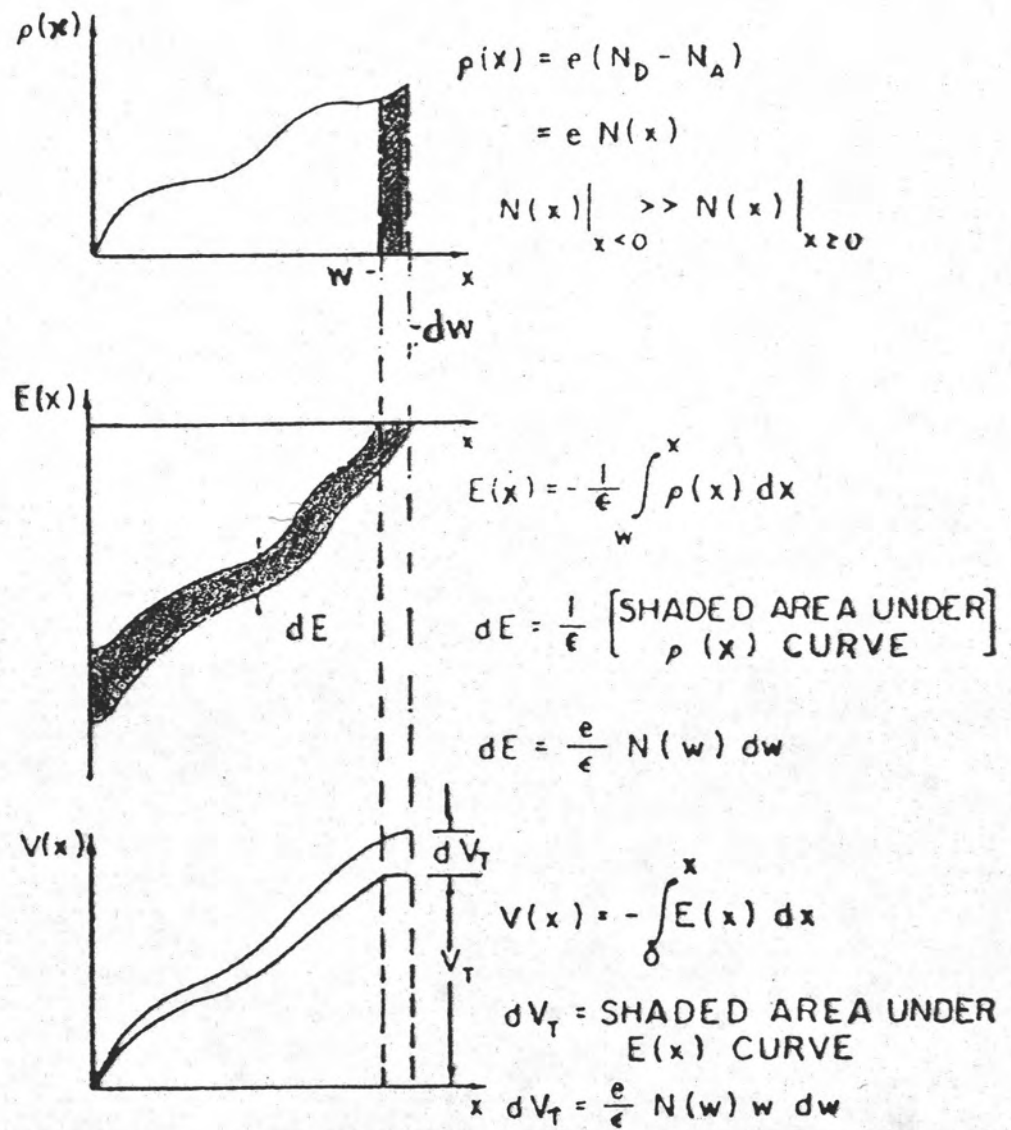
$$dE = \frac{q}{\epsilon_s \epsilon_0} \cdot N(\omega) d\omega \quad 3.11$$

โดยที่ q คือประจุของอิเล็กตรอน

ϵ_s คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

ϵ_0 คือค่าเพอร์มิติวิตีของสุญญากาศ

$N(\omega)$ คือความเข้มข้นสารเจือปนสุทธิที่บริเวณขอบของชั้นปลอดพาหะ และค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป dV_T จะหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟสนามไฟฟ้าและระยะทาง ส่วนที่แรเงา จะได้



รูปที่ 3.3 การกระจายของประจุ, สนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของรอยต่อชนิดเป็นชั้นข้างเดียว

$$dV_T = \frac{q}{\epsilon_S \epsilon_0} \cdot N(\omega) \omega d\omega \quad 3.12$$

$$= 2 \frac{q}{\epsilon_S \epsilon_0} \cdot N(\omega) d(\omega^2) \quad 3.13$$

และค่าความจุไฟฟ้าของชั้นปกคลุมที่ความกว้าง ω มีค่า

$$C = \frac{\epsilon_S \epsilon_0 A}{\omega} \quad 3.14$$

โดยที่ A คือพื้นที่ของรอยต่อ (กรณีที่เป็นรอยต่อ PN)

จากสมการที่ 3.13 และสมการที่ 3.14 เราจะได้

$$N(\omega) = \frac{2}{q \epsilon_S \epsilon_0 A^2} \left(\frac{d(\frac{1}{C^2})}{dV_T} \right)^{-1} \quad 3.15$$

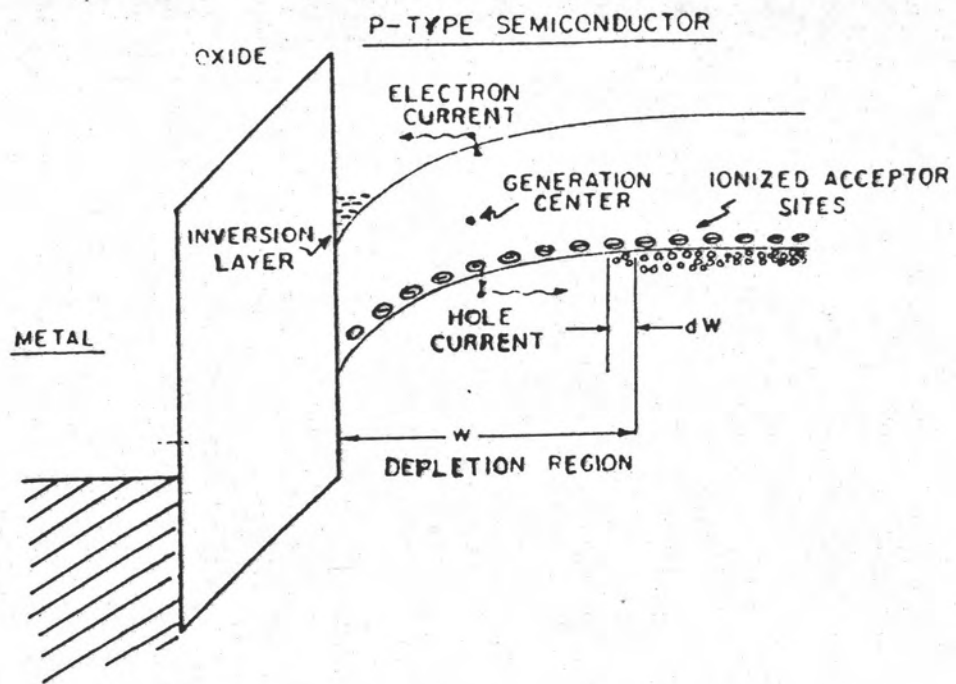
$$\omega = \frac{\epsilon_S \epsilon_0 A}{C} \quad 3.16$$

สมการที่ 3.15 และสมการที่ 3.16 เป็นสมการพื้นฐานในการคำนวณโปรไฟล์ของสารเจือปน เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.2 จะพบว่าค่า $N(\omega)$ มีค่าขึ้นกับพื้นที่เป็นอันมาก แต่อย่างไรก็ตามลักษณะของโปรไฟล์ยังคงเหมือนเดิมเนื่องจากมิได้ขึ้นกับพื้นที่ [9]

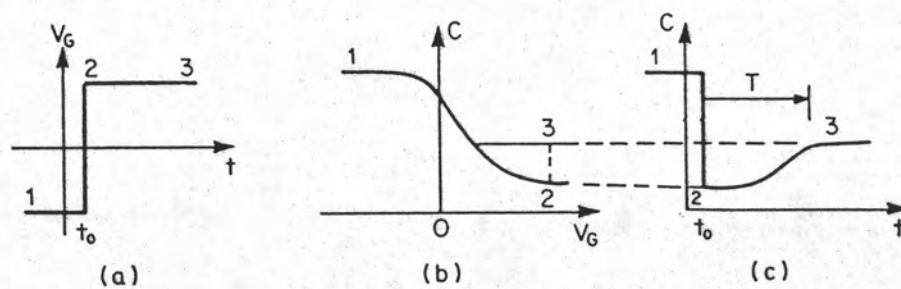
3.4 ช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย

ช่วงชีวิตของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำเป็นเวลาที่ใช้ในการกลับคืนสู่สภาวะสมดุล ทางความร้อน หลังจากที่มีการรบกวนสภาวะสมดุล นั้น ตัวอย่างของการรบกวน เช่น การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำอย่างทันทีทันใด โดยการฉายแสงที่เป็นพัลส์ไปยังสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น และเมื่อมีการรบกวนเกิดขึ้น ปริมาณความเข้มข้นของพาหะข้างมากและพาหะข้างน้อยจะมีการเปลี่ยนแปลง เช่น ถ้าการรบกวนทำให้ปริมาณพาหะข้างน้อยลดลงจากปริมาณที่จุดสมดุล กระบวนการที่ทำให้ปริมาณนี้กลับสู่สภาวะสมดุล คือ กระบวนการเจเนเนอเรชัน (generation process) ในทางตรงข้ามถ้าการรบกวนทำให้ปริมาณพาหะข้างน้อยมีปริมาณเพิ่มขึ้น กระบวนการที่ทำให้กลับสู่สภาวะสมดุล คือ กระบวนการรีคอมบิเนชัน (recombination process) เป็นต้น

การวัดช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยโดยใช้โครงสร้าง MIS เราใช้วิธีที่เรียกว่า "คาปาซิแตนซ์ ทรานเซียนท์ (Capacitance Transient)" คือการวัดค่าความจุไฟฟ้ากับเวลา หลักพื้นฐานที่ใช้วัดคือ การสังเกตช่วงเวลาในการสร้างชั้นอินเวอร์ชันเมื่อป้อนแรงดันไบแอสในทิศทางที่ทำให้เกิดชั้นอินเวอร์ชันอย่างรวดเร็ว ในทางปฏิบัติแรงดันไบแอสนี้จะใช้เป็นพัลส์ป้อนที่ขั้วโลหะเพื่อผลักพาหะข้างมากจากบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เราใช้พัลส์ลบและชนิดพีใช้พัลส์บวก การผลักพาหะข้างมากอย่างรวดเร็ว เช่นนี้จะทำให้ชั้นปลอดพาหะกว้างออก และเมื่อเวลาผ่านไป พาหะข้างน้อยจะรวมตัวกันสร้างชั้นอินเวอร์ชันขึ้นมา ชั้นอินเวอร์ชันนี้จะกั้นสนามไฟฟ้าที่ขั้วโลหะจะเป็นผลให้ชั้นปลอดพาหะหดตัวลงมาที่จุดสมดุล ความร้อน และจะมีค่าคงที่ดังรูปที่ 3.4 ในรูปที่ 3.5 เป็นกราฟแสดงการวัดด้วยวิธีเช่นนี้ ช่วงเวลาที่สนใจคือจากจุด 2 ไปยังจุด 3 ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการสร้างชั้นอินเวอร์ชัน



รูปที่ 3.4 การหาค่าของชั้นปลอดพาหะเมื่อชั้นอินเวอร์ชันสร้างขึ้น



รูปที่ 3.5 การวัดลักษณะความจุไฟฟ้า-เวลา

- ก. แรงดันไบแอส
- ข. กราฟความจุ-แรงดันไฟฟ้า
- ค. กราฟความจุไฟฟ้า-เวลา

แบบจำลองที่ใช้อธิบายเสนอโดย Grosvalet et al [8] โดย
การสมมุติว่าพาหะข้างน้อยที่จะมารวมตัวกันสร้างชั้นอินเวอร์ชันเกิดจากการสร้าง
คู่อิเล็กตรอน-โฮลเนื่องจากความร้อนที่เจนนอร์เรชั่น เช่น เฟอร์รอนที่ตำแหน่งใกล้เคียง
กึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน ช่วงเวลาที่ใช้ในการกลับสู่สภาวะสมดุลจะสัมพันธ์
กับช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย ดังสมการ

$$T = 2 \tau \frac{N_A}{n_i} \quad 3.17$$

โดยที่ τ คือช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยมีหน่วยเป็นวินาที

N_A คือปริมาณความเข้มข้นสารเจือปนมีหน่วยเป็น cm^{-3}

n_i คือปริมาณความเข้มข้นพาหะเมื่อปราศจากสารเจือปน
มีหน่วยเป็น cm^{-3}

→ T คือช่วงเวลาในการกลับสู่จุดสมดุลมีหน่วยเป็นวินาที

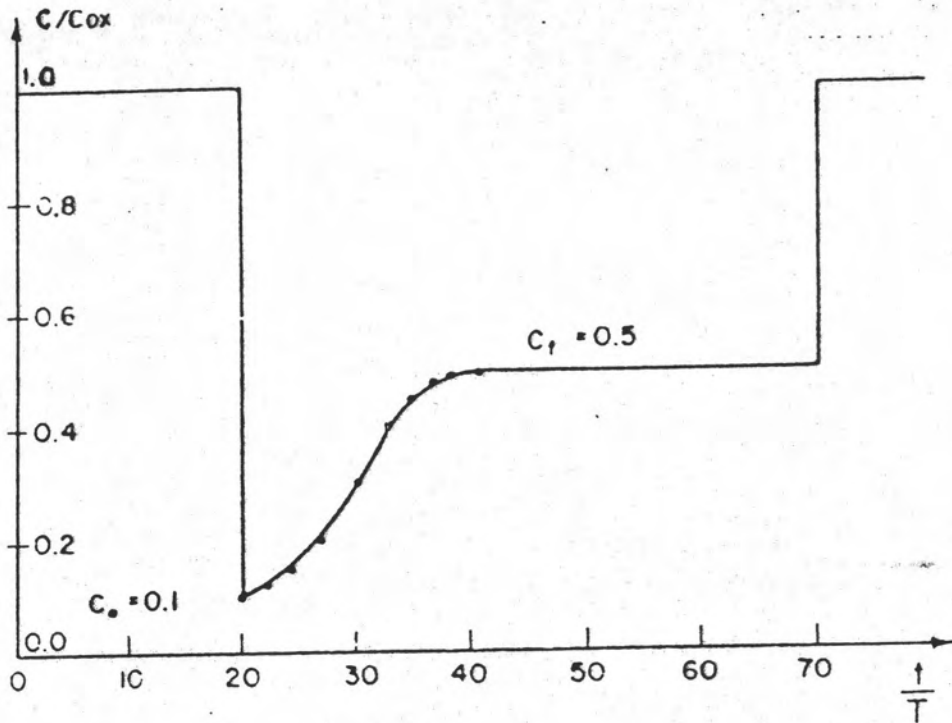
สำหรับแบบจำลองที่มีความถูกต้องกว่า เสนอโดย Heiman [9]
กราฟลักษณะความจุไฟฟ้า-เวลาจะอธิบายโดยสมการ

$$\frac{C_o}{C_{\min}} \left[\ln \left(\frac{C_{\min}/C - 1}{C_{\min}/C_o - 1} \right) + \left(\frac{C_{\min}}{C} - \frac{C_{\min}}{C_o} \right) \right] = -\frac{t}{T} \quad 3.18$$

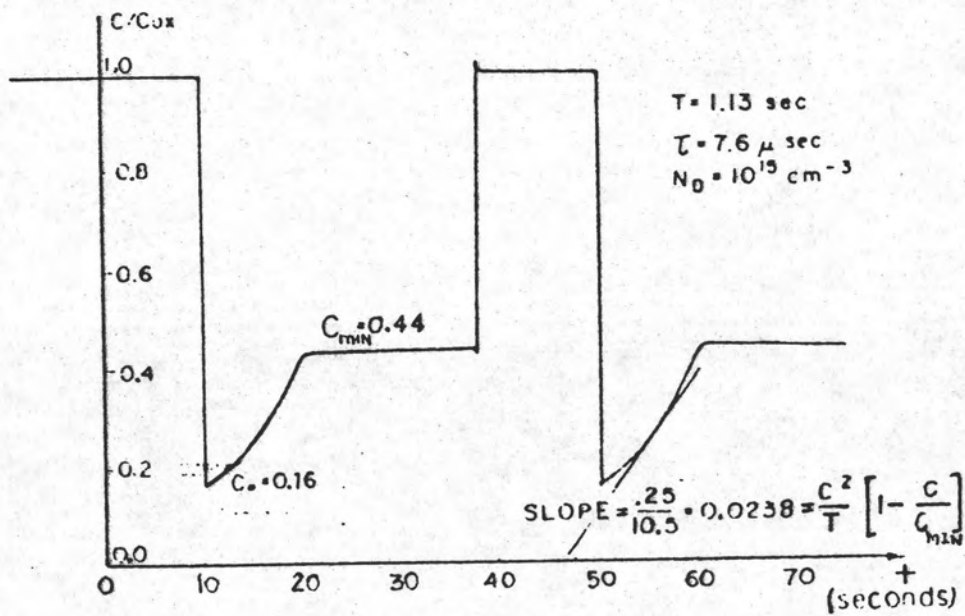
สำหรับ T หาได้จาก

$$T = \frac{1}{\text{ความชันกราฟ } C-T} \cdot \frac{C_o^2}{C_o} \left(1 - \frac{C}{C_{\min}} \right) \quad 3.19$$

สมการที่ 3.18 เมื่อ $C_o = 0.1$ และ $C_{\min} = 0.5$ แสดง
ดังรูปที่ 3.6 และตัวอย่างการหาค่า T จากกราฟแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 รูปกราฟที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 3.18 เมื่อ $C_o = 0.1$ และ $C_{min} = 0.5$



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการคำนวณ T จากกราฟ

ดังแสดงในกราฟรูปที่ 3.7 คำนวณค่าความชันได้เท่ากับ 0.0238
 เมื่อแทนค่า $C_0 = 0.16$ และ $C_{min} = 0.44$ คำนวณ T จาก
 สมการ 3.19 ได้เท่ากับ 1.13 วินาที เมื่อแทนค่า T ลงในสมการที่ 3.17
 กำหนดค่าความเข้มข้นสารเจือปนเท่ากับ $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ n_i เท่ากับ
 $1.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ จะหาค่าช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย τ ได้เท่ากับ
 7.6 μs ที่อุณหภูมิห้อง