



บทที่ 3

สมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์

บทนำ

สมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าซึ่งใช้จำแนกและวิเคราะห์รอยต่อวิวิธพันธุ์ คือ ลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ และลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าไม่เพียงแต่จะได้ทราบข้อมูลลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและรอยต่อ เช่น ชนิดของรอยต่อวิวิธพันธุ์และค่าศักย์ระหว่างรอยต่อเท่านั้น แต่ยังบอกถึงการนำไปใช้งานของรอยต่อนั้นๆอีกด้วย โดยที่สมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์นั้น จะขึ้นกับการก่อตัวของรอยต่อและระดับการโด๊ปของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่นำมาสร้างเป็นรอยต่อ^๑

ลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์^{9,10,12}

เมื่อมีการใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในรอยต่อพี - เอ็น จะทำให้ความสมดุลงความร้อนของความหนาแน่นประจุเสียไป ดังนั้นในการคำนวณหาลักษณะเฉพาะกระแส -

ความต่างศักย์นี้ มีข้อกำหนดสมมุติฐาน 4 ข้อ คือ

1. บริเวณรอยต่อเป็นรอยต่อแบบฉับพลัน
2. ใช้การประมาณค่าฟังก์ชันการแจกแจงของเฟอร์มิ - ไดเรค ด้วยฟังก์ชันการแจกแจงของแมกซ์เวลล์ - โบลซ์มัน
3. มีการฉีดของพาหะต่ำ นั่นคือ ความหนาแน่นพาหะข้างน้อยที่ฉีดเข้ามา เนื่องจากสนามไฟฟ้าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความหนาแน่นของพาหะข้างมาก
4. ไม่มีกระแสเกิดในบริเวณดีพลีชัน และกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลคงที่ตลอดทั้งบริเวณดีพลีชัน

จากสมมุติฐานทั้ง 4 ข้อนี้ พิจารณาที่สมดุลงความร้อน อิเล็กตรอนในด้าน เอ็น และโฮลในด้าน พี เป็น

$$n = n_i \exp[(E_f - E_i) / kT] = n_i \exp[q(\psi - \phi) / kT] \quad (3.1)$$

$$p = n_i \exp(q(\phi - \psi)) \quad (3.2)$$

โดยที่

$$\psi = -E_i / q \quad \text{และ} \quad \phi = -E_f / q$$

เมื่อมีสนามไฟฟ้าใส่เข้าไป ความหนาแน่นพาหะข้างน้อยที่ด้านทั้งสองของรอยต่อจะเปลี่ยนไป แต่ผลคูณของ p และ n ต้องไม่มากกว่า n_i^2 , ($np < n_i^2$) ค่า E_f ทั้งของ อิเล็กตรอนและโฮลเปลี่ยนไป ซึ่งกำหนดโดย

$$n = n_c \exp[-(E_c - E_{F_n}) / kT] = n_i \exp[q(\psi - \phi_n) / kT] \quad (3.3)$$

$$p = n_v \exp[-(E_{F_p} - E_v) / kT] = n_i \exp[q(\phi_p - \psi) / kT] \quad (3.4)$$

โดยที่ ϕ_n คือ ระดับเฟอร์มิเสมือน (quasi-Fermi level) ของอิเล็กตรอน

ϕ_p คือ ระดับเฟอร์มิเสมือนของโฮล

นำสมการที่ (3.3) คูณกับ (3.4) จะได้

$$pn = n_i^2 \exp[q(\phi_p - \phi_n) / kT] \quad (3.5)$$

จะเห็นว่า สำหรับการไบแอสตรง ($\phi_p - \phi_n > 0$) และ $pn > n_i^2$ เมื่อมีการไบแอสย้อนจะได้ว่า ($\phi_p - \phi_n < 0$) และ $pn < n_i^2$ ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างรอยต่อนี้กำหนดโดย

$$V = \phi_p - \phi_n$$

นำค่า V ไปแทนในสมการ (3.5) จะได้

$$pn = n_i^2 \exp(qV / kT) \quad (3.6)$$

ดังนั้น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในด้าน p ที่ระยะ $x = -x_p$ จะเป็น

$$n_p = (n_i^2 / p_p) \exp(qV / kT) = n_{\infty} \exp(qV / kT) \quad (3.7)$$

โดยที่ n_{∞} เป็นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในด้านที่ ขณะอยู่ในภาวะสมดุลความร้อน ในทำนองเดียวกัน ความหนาแน่นของโฮลจะเป็น

$$p_n = p_{\infty} \exp(qV / kT) \quad (3.8)$$

จากสมการความต่อเนื่อง ที่สถานะคงตัว (steady state) และสมมติฐานข้างต้น จะสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ได้เป็น ¹⁴

$$J_n = qD_n (\partial n / \partial x) \quad (3.9)$$

ในทำนองเดียวกัน ความหนาแน่นกระแสของโฮล เป็น

$$J_p = -qD_p (\partial p / \partial x) \quad (3.10)$$

สำหรับความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอน ที่ระยะ $x = x_n$ จะเป็น

$$J_n = qD_n (\partial n / \partial x)_{x=x_n} = (qD_n n_{\infty} / L_n) (e^{qV/kT} - 1) \quad (3.11)$$

และ

$$J_p = -qD_p (\partial p / \partial x)_{x=x_p} = (qD_p p_{\infty} / L_p) (e^{qV/kT} - 1) \quad (3.12)$$

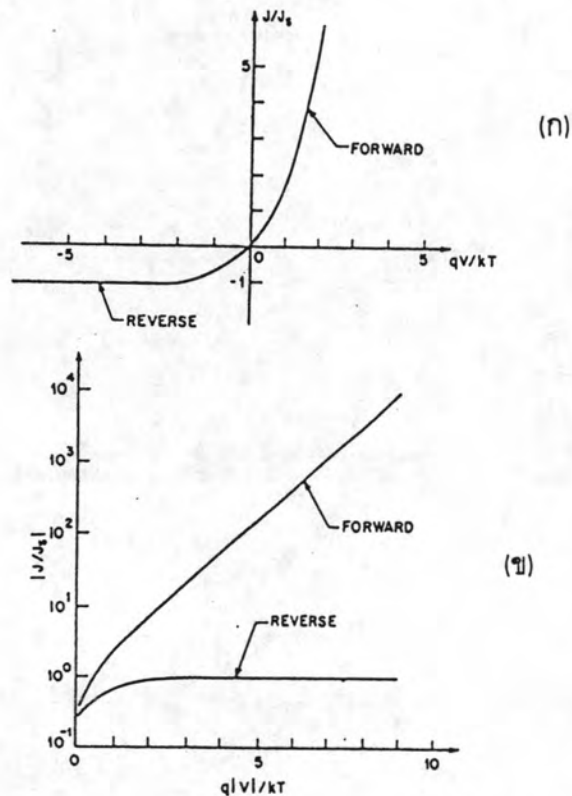
ดังนั้น ความหนาแน่นกระแสสุทธิที่ผ่านรอยต่อจะเป็น

$$J = J_p + J_n = J_s (e^{qV/kT} - 1) \quad (3.13)$$

โดยที่

$$J_s = (qD_p p_{\infty} / L_p) + (qD_n n_{\infty} / L_n) \quad (3.14)$$

สมการที่ (3.13) รู้จักกันดีในชื่อสมการของช็อคเคย์ (Shockley's equation) สำหรับ ไดโอด จะเห็นว่า เมื่อ $V > 0$ หรือ ไบแอสตรงกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกับค่า V แต่ในทางกลับกัน เมื่อ $V < 0$ หรือการไบแอสย้อน ความหนาแน่นกระแสจะลดลง จนกระทั่งอิ่มตัวที่ค่า $-J_s$ เมื่อเขียนกราฟระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ที่ใส่เข้าไป จะได้กราฟ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงลักษณะสอกระแส - ศักย์ไฟฟ้า จุดมคติ

(ก) Linear plot

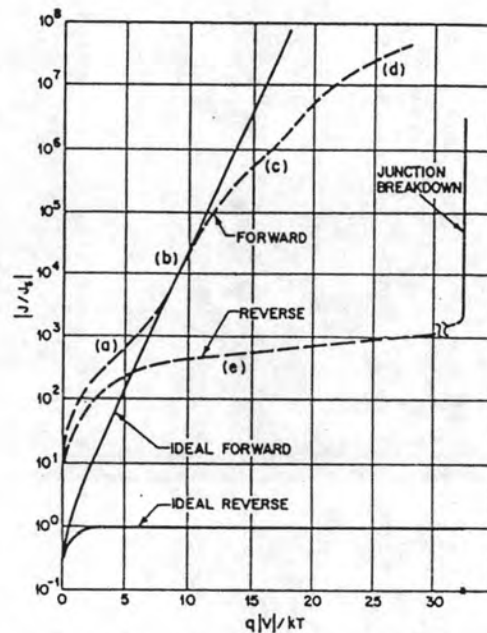
(ข) Semilog plot¹⁰

จากสมการของ Shockley อธิบายลักษณะสอกระแส - ความต่างศักย์ ของรอยต่อแบบ พี-เอ็น ได้เฉพาะที่ความหนาแน่นกระแสต่ำๆ ส่วนที่เบี่ยงเบนไปจากกราฟในจุดมคติอย่างมาก ดังรูปที่ 3.2 เนื่องจาก

1. ผลจากสถานะผิว (surface effect)
2. มีการเกิดและการรวมตัวกันของพาหะในชั้นดีฟิสิชัน
3. มีการลอดผ่าน (tunnel) ของพาหะ ระหว่างสถานะในช่องว่างแถบพลังงาน

4. มีการฉีดของพาหะสูง (high injection) เมื่อมีการไบแอสตรงเพียงเล็กน้อย
5. ผลจากความต้านทานของแผ่นรองรับสูง ที่ต่ออนุกรมอยู่ (series resistance effect)

จากผลที่เกิดขึ้นทั้ง 5 ข้อนี้ โดยปกติเมื่อการไบแอสไม่สูงมากนัก ผลที่เกิดจากการเกิดและรวมตัวกันของพาหะในชั้นดีพลีชันจะมากกว่าข้ออื่นๆ



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงลักษณะสอกระแส - ศักย์ไฟฟ้าของไดโอดที่ทำจาก Si

- a. Generation - recombination current region
- b. Diffusion current region
- c. High - injection region
- d. Series resistance effect
- e. Reverse leakage current due to generation and surface effect⁹

จากการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์นั้น สามารถจะอธิบายถึงกลไกการนำไฟฟ้าได้ ซึ่งโดยทั่วไปจะทำให้ได้ข้อมูลของค่าศักย์ระหว่างรอยต่อและความไม่ต่อเนื่องของระดับพลังงานที่ขอบของแถบการนำและขอบของแถบวาเลนซ์ ณ บริเวณผิวสัมผัสรอยต่อวิวิธพันธุ์ เนื่องจากการขึ้นกับขั้วของความต่างศักย์ที่ป้อนเข้าไปที่รอยต่อและขณะทำการวัด ดังนั้น จึงทำให้สามารถจำแนกลักษณะเฉพาะออกเป็นแบบไบแอสตรงและไบแอสย้อนอีกด้วย

ความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์นั้น จะเปลี่ยนไปตามแต่แบบจำลองต่างๆที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ซึ่งได้กล่าวอย่างละเอียดไว้แล้วในบทที่ 2

ในทางปฏิบัตินั้น ความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ สำหรับลักษณะเฉพาะแบบไบแอสตรงสามารถเขียนได้เป็น ⁷

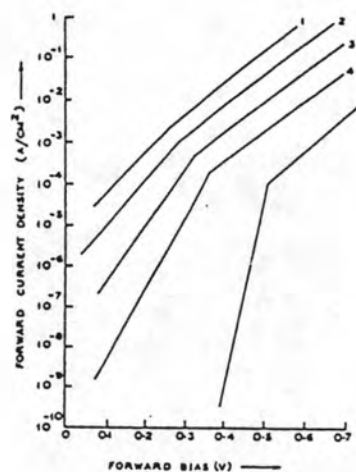
$$I \propto \exp(qV/nkT) \quad (3.15)$$

โดยที่ n เป็นตัวแปรคงที่ จึงนิยามว่า ตัวแปรทางอุดมคติ (Ideality factor) ซึ่งจะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ซึ่งความสัมพันธ์ในสมการ (3.15) นี้ เป็นความสัมพันธ์พื้นฐานของแบบจำลองต่างๆ เช่น แบบจำลองการแพร่ แบบจำลองแบบปลดปล่อย และ แบบจำลองแบบปลดปล่อย - รวมตัว เป็นต้น

ในบางกรณีจะพบว่า ความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์จะมีการแปรผันกับอุณหภูมิด้วย ความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์แทนที่จะใช้ตามสมการ (3.15) เขียนได้เป็น

$$I \propto \exp(AV) \cdot \exp(BV) \quad (3.16)$$

โดยที่ A และ B เป็นเทอมคงที่ ซึ่งจะขึ้นอยู่เฉพาะกับความต่างศักย์และอุณหภูมิตามลำดับ ซึ่งสมการ (3.16) นี้ จะมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองการทะลุผ่าน - การรวมตัว



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์แบบไบแอสตรง และรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-Ge / n-GaAs ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากกราฟในรูป 3.3 นั้น ความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ นิยมเขียนในเชิงของกราฟแบบกึ่งล็อก (similog) และค่าของตัวแปรต่างๆ สามารถหาได้จากกราฟกึ่งล็อกนี้ กล่าวคือ จากความชันของกราฟ สามารถจะนำไปคำนวณค่าของตัวแปรอุดมคติได้ และ จุดตัดแกนของกระแส จะบอกถึงค่าของกระแสอิ่มตัว ซึ่งพบว่า ค่าของตัวแปรอุดมคติ ในรูปที่ 3.3 นั้น จะอยู่ในช่วง 1 - 2 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า กลไกกระแสจะเป็นไปตามแบบจำลองการรวมตัว

การเลือกใช้แบบจำลองต่างๆซึ่งมีค่าความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ ที่ต่างกันให้เหมาะสมกับผลการทดลองที่ได้ ก็เป็นปัจจัยหลักในการวิเคราะห์หรือต่อวิวิธพันธุ์ที่ได้ด้วย

ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ ^{6.7}

การวัดค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อ ($C = dQ / dV$) โดยเป็นฟังก์ชันกับค่าของการไบแอสย้อนนั้น เป็นวิธีการทดลองที่ให้ผลที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์กับศักย์ ณ บริเวณดีพลีชัน และการกระจายของประจุในรอยต่อวิวิธพันธุ์ โดยพบว่า ค่าสถานะผิวรอยต่อจะมีผลต่อการนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ ซึ่งในบางกรณีก็จะไม่นำมาคิดด้วย

1. การวิเคราะห์ความเข้มข้นของการโด๊ป (doping concentration) ^{6.8,11}

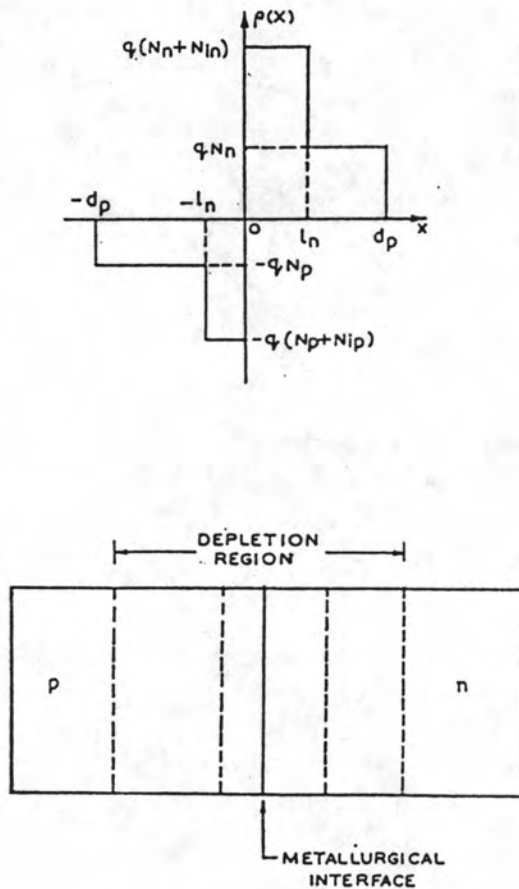
เมื่อนำสารกึ่งตัวนำสองชนิดซึ่งมีลักษณะการนำไฟฟ้าต่างกันมาสัมผัสประกบเข้าเป็นรอยต่อกัน จะเกิดมีการเคลื่อนย้ายถ่ายเทประจุจากสารชนิดหนึ่งไปยังสารอีกชนิดหนึ่ง จนกว่าสารทั้งสองนั้นจะมีระดับเฟอร์มิเท่ากัน การเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ เป็นที่มาของการเกิดชั้นดีพลีชัน (depletion layer) ขึ้น ณ บริเวณผิวรอยต่อ โดยไม่คำนึงถึงผลของสถานะผิวรอยต่อจากบทที่ 2 ความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดต่างสามารถเขียนได้ว่า

$$C = [q\epsilon_n\epsilon_p N_n N_p / 2(\epsilon_n N_n + \epsilon_p N_p)^{1/2} \cdot (V_0 - V)]^{-1/2} \quad (3.17)$$

โดยที่ N_n และ N_p คือ ความเข้มข้นของผู้ให้ (donor) และผู้รับ (acceptor) ตามลำดับ ϵ_n และ ϵ_p คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น และชนิด พี ตามลำดับ V_0 คือ ค่าศักย์ built-in-junction potential, V คือ ค่าความต่างศักย์ที่ถูกป้อนเข้าไป และ q คือ ค่าของประจุ จากสมการ (3.17) นี้ พบว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C^2 กับ ค่าความต่างศักย์ป้อนย้อนกลับ V จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยที่ถ้าทำการประมาณกราฟต่อไปตัดที่แกนของความต่างศักย์ จะสามารถบอกถึงค่าของศักย์รอยต่อ V_0 ได้

$$C = [q\epsilon_n\epsilon_p N_n N_p / 2(\epsilon_n N_n + \epsilon_p N_p)]^{1/2} (V_D - V - \phi_m - B_2 Q_{is}^2)^{1/2} \quad (3.19)$$

ซึ่งจากสมการ (3.19) นี้ ถ้านำไปเขียนเป็นกราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง C^2 กับ V เหมือนในกรณีสมการ (3.17) พบว่า จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงเช่นกัน แต่จุดตัดแกนความต่างศักย์ของกราฟจากสมการ (3.19) นั้น จะได้ค่าของความต่างศักย์ปรากฏ (apparent built-in-junction voltage) ในเทอม $(V_D - B_2 Q_{is}^2)$ แทนที่จะเป็นเพียงความต่างศักย์ built-in voltage ดังสมการ (3.17)



รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของรอยต่อพี-เอ็น โดยมีสถานะพื้นผิวกระจายทั้งขอบเขตความกว้างและทั้ง space - charge region ภายในบริเวณดีฟิสิชัน

จากรูป 3.4 นั้น อธิบายถึงความจุไฟฟ้าของรอยต่อแบบบิวริวิธพันธุ์ ชนิด พี - เอ็น ซึ่งในที่นี้จะไม่นับถึงผลของอิเล็กตริกไดโพล แต่มีสถานะผิวสัมผัสกระจายอยู่ทั่วทั้งบริเวณขอบเขตจำกัด, $(l_n + l_p)$ โดยที่ประจุสุทธิของสถานะผิวสัมผัสจะไม่ขึ้นกับความต่างศักย์ที่ถูกบ่อนสมการของความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของรอยต่อ จะสามารถเขียนได้เป็น

$$C = [q\epsilon_n\epsilon_p N_n N_p / 2(\epsilon_n N_n + \epsilon_p N_p)]^{1/2} [V_0 - V - (q/2)(Y + X/2K)] \quad (3.20)$$

$$\text{โดย } K = \epsilon_n N_n + \epsilon_p N_p,$$

$$X = N_n l_n = N_p l_p,$$

$$\text{และ } Y = (N_n l_n^2 / \epsilon_n) + (N_p l_p^2 / \epsilon_p)$$

จากสมการแสดงความจุไฟฟ้าของรอยต่อทั้ง 3 กรณีที่กล่าวมาแล้ว จะพบว่าเราจะสามารถจะหาค่าของความเข้มข้นของการโด๊ปได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C^2 กับ V_{bias} ตามแต่กรณี

Anderson ยังได้อธิบายถึง ลักษณะความจุไฟฟ้าของรอยต่อบิวริวิธพันธุ์แบบเป็นขั้นตอน โดยสามารถเขียนได้ในรูปของสมการอย่างง่าย คือ

$$C = C_0 (V_0 - V)^{-1/\alpha} \quad (3.21)$$

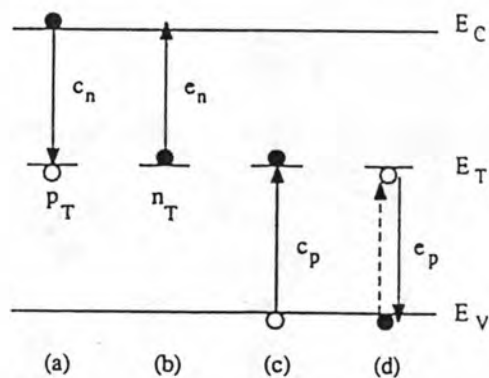
โดย α จะเป็นค่าคงที่ ซึ่งมีค่ามากกว่า 2 โดยกราฟความสัมพันธ์ของ C^2 กับ V_{bias} จะยังคงให้ค่าของ V_0 และความเข้มข้นของการโด๊ปเช่นเดิม

2. การวิเคราะห์สิ่งเจือระดับลึก (deep-level impurities)^{1,11}

โดยปกติสารกึ่งตัวนำทุกชนิดจะมีสิ่งเจืออยู่ภายในเสมอ ซึ่งสิ่งเจือนี้อาจเป็นอะตอมที่ทำให้เกิดการโด๊ป ซึ่งจะเรียกว่าสิ่งเจือระดับตื้น (shallow-level impurities) หรือเป็นศูนย์กลางของการเกิดขบวนการรวมตัว (recombination center) ที่เป็นสิ่งเจือระดับลึก ซึ่งจะทำให้เกิดการลดลงของค่าชั่วชีวิตของสารนั้นๆ หรือในบางครั้งจะเป็นการเพิ่มสภาพต้านทานของชั้นซับสเตรท (substrate) สิ่งเจือส่วนมากจะเกิดขึ้นโดยความไม่ตั้งใจในกระบวนการก่อตัวของสารกึ่งตัวนำ หรือในการประดิษฐ์เป็นรอยต่อแบบต่างๆ แต่สิ่งเจือบางชนิดก็สามารถขจัดออกได้

ในระหว่างขั้นตอนของกระบวนการประดิษฐ์

โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกเดี่ยวสารกึ่งตัวนำที่สมบูรณ์จะประกอบด้วยแถบการนำและแถบวาเลนซ์ ซึ่งจะคั่นกลางด้วยช่องว่างแถบพลังงาน เมื่อโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำนี้ถูกอะตอมแปลกปลอมจากภายนอกเข้าไปรบกวน หรือมีการบกพร่องของผลึก (crystal defect) จะมีการเกิดขึ้นของระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องในช่องว่างแถบพลังงาน แสดงดังเส้นระดับ E_T ในรูปที่ 3.5 ในแต่ละเส้นนั้นเป็นจุดบกพร่องซึ่งมีระดับพลังงานเท่ากับ E_T ซึ่งจุดบกพร่องเช่นนี้จะเรียกว่า ศูนย์กลางการก่อเกิด - รวมตัว (generation - recombination center, G - R) หรือ แทรป (traps) โดยถ้า ศูนย์กลางการก่อเกิด - รวมตัว นี้วางตัวอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน จะเรียกว่า สิ่งเจือระดับพลังงานลึก (energy level impurities) หรือเรียกสั้นๆว่า สิ่งเจือระดับลึก (deep - level impurities) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของกระบวนการรวมตัว ในกรณีที่ แทรปมีการครอบครองพาหะอยู่แล้ว และจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของกระบวนการก่อเกิด หรือค่าความหนาแน่นของพาหะ มีค่าต่ำกว่าค่าที่จุดสมดุลย์ เช่น ใน space - charge region ของรอยต่อแบบ พี - เอ็น เมื่อมีการไบแอสย้อน



รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีสิ่งเจือระดับลึก และกลไกการจับ - ปล่อยพาหะ

โดยทั่วไปสารกึ่งตัวนำเช่น Si, Ge และ GaAs จะมีสิ่งเจือระดับลึกที่มาจากสิ่งเจือจำพวกโลหะ เช่น เหล็ก, ทอง และทองแดง แต่ในบางกรณี สิ่งเจือระดับลึกก็สามารถเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกได้ เช่น การบิดตำแน่ง (dislocation), การเป็นตะกอน (precipitates), การเกิดตำแน่งที่ว่าง (vacancies) เป็นต้น

ในรูป 3.5 นั้น จะมีกลไกเกิดขึ้น 4 รูปแบบด้วยกัน คือ (a) เป็นกลไกการจับอิเล็กตรอน , (b) เป็นกลไกการปลดปล่อยอิเล็กตรอน , (c) เป็นกลไกการจับโฮล และ (d) เป็นกลไกการปลดปล่อยโฮล กระบวนการรวมตัวนั้น จะเกิดจาก (a) และตามด้วย (c) ส่วนกระบวนการก่อกำเนิดนั้น จะเกิดจากกลไก (b) และตามด้วยกลไก (d) แต่ในบางครั้งจะเกิดมีกระบวนการดักจับ (trapping event) เกิดขึ้น คือ จะเกิดกลไกแบบ (a) และตามด้วยการเกิดกลไก (b) หรือ (c) แล้วจะจบลงที่กลไก (d)

การที่สิ่งเจือจะประพฤติตัวเป็นแตรป หรือเป็นศูนย์กลางของกระบวนการก่อกำเนิด - รวมตัว นั้น จะขึ้นอยู่กับระดับเฟอร์มิในช่องว่างแถบพลังงาน, อุณหภูมิ และส่วนตัดขวางการจับ (capture cross section) ของสิ่งเจือ โดยปรกติ ถ้าสิ่งเจือนั้นๆ มีพลังงานอยู่ในช่วงกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน ก็จะเป็นศูนย์กลางของกระบวนการก่อกำเนิด - รวมตัว แต่ถ้าอยู่ใกล้ๆ ขอบของแถบพลังงานก็จะประพฤติตัวเป็นแตรป

จากในหัวข้อที่แล้ว พบว่า สามารถที่จะหาค่าความเข้มข้นของพาหะได้จากกราฟความสัมพันธ์ของ C^2 และ V นั้น สำหรับผู้ให้ระดับตื้น (shallow - level donors) และผู้รับระดับลึก (deep - level acceptors) จะได้ว่า

$$C^2 = K^2 \{ [V_{\infty} - V] / [N_0 - n_T(t)] \} \quad (3.22)$$

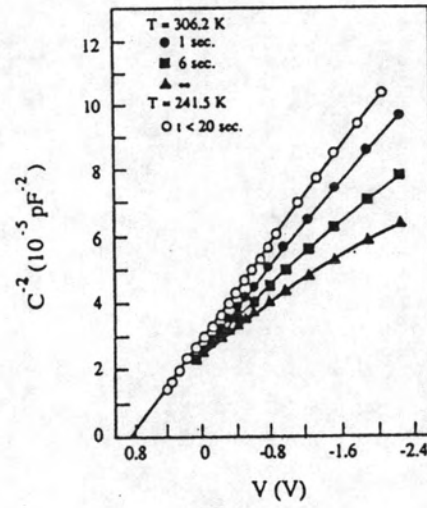
โดย $n_T(t)$ คือประจุที่เป็นลบเมื่อมีการจับอิเล็กตรอน ซึ่งพบว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอนให้ศูนย์กลางของกระบวนการก่อกำเนิด - รวมตัว กลับมามีสภาพเป็นกลางนั้น จะขึ้นกันกับเวลา เพราะฉะนั้น จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ และ V ที่เวลา $t=0$ และ $t=\infty$ โดยให้ความชันของกราฟเขียนแทนได้เป็น

$$S(t) = -dV/d(1/C^2) \quad (3.23)$$

จะได้ว่า

$$S(\infty) - S(0) = K^2 [n_T(0) - n_T(\infty)] \quad (3.24)$$

โดย $n_T(0) \sim N_T$ และ $n_T(\infty) \sim 0$ สำหรับ $e_n \gg e_p$ ดังนั้น ผลต่างระหว่างความชันของ กราฟทั้งสองเส้นจะสามารถนำไปสู่ค่าความเข้มข้นของสิ่งเจือระดับลึกได้ ซึ่งการวัดแบบนี้เป็นการวัดที่สถานะคงที่ (steady - state measurement)



รูปที่ 3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ C^2 และ V ซึ่งมีการแปรไปกับเวลาที่อุณหภูมิ 506.2K และ 241.5K¹¹