หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
รอยต่อแบบโอห์มมิก

ในบทนี้จะพิจารณาว่า กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการนำโลหะมาต่อกับสารกึ่งตัวนำ เกิดเพราะอะไร และควรทำอย่างไรถ้าไม่ต้องการให้เกิดกำแพงศักย์ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ MIS, MOS, MISFET, MIOS, DMOS เหล่านี้ นอกจากจะขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำ และวิธีทำ แล้วปัญหาอีกอย่างที่พบว่าเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของอุปกรณ์เหล่านี้ก็คือ การทำรอยต่อแบบโอห์มมิก ซึ่งถ้าไม่ได้รอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดีจริง ๆ สมบัติต่าง ๆ ที่เราวัดได้จากการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ (C-V measurement) ก็จะเกิดค่าความผิดพลาดขึ้น เนื่องจากมีกำแพงศักย์ ที่เกิดจากการโค้งของแถบพลังงาน (band bending) ตรงผิวรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ทำให้มีการสะสมประจุตรงบริเวณผิวรอยต่อนี้ ดังนั้นค่าความจุที่วัดได้ จึงมีผลมาจากค่าความจุที่เกิดในช่วงนี้ด้วย ดังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.1 สาเหตุของการเกิดกำแพงศักย์ [37,38,39]

การเกิดกำแพงศักย์เนื่องจากโลหะต่อกับสารกึ่งตัวนำมีสาเหตุมาจาก

1. ค่าเวิร์กฟังค์ชัน (work function) ของโลหะกับของสารกึ่งตัวนำไม่สอดคล้อง (mismatch) กัน
2. เกิดมีสถานะผิว (surface state) บนผิวของสารกึ่งตัวนำ สถานะผิวนี้เกิดจากการสิ้นสุดความเป็นคาบที่ผิวของผลึก
3. มีชั้นบาง ๆ ของสารอื่นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ [40] ชั้นบาง ๆ นี้ทำให้เกิดกำแพงศักย์ขึ้นได้ เพราะเหตุผลข้อ 1 และ 2

4.1.1 กำแพงศักย์เกิดจากความไม่สอดคล้องของเวิร์กฟังค์ชันของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

ก่อนอื่นจะพิจารณานิยามของเวิร์กฟังค์ชัน และอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) กล่าวคือเวิร์กฟังค์ชันของโลหะคือ ϕ_m หมายถึงพลังงานที่ใช้ในการยกอิเล็กตรอนจากระดับเฟอร์มิ (Fermi level) ของโลหะไปยังระดับสุญญากาศ (vacuum level) ของโลหะสำหรับ เวิร์กฟังค์ชันของสารกึ่งตัวนำคือ ϕ_s หมายถึงพลังงานที่ใช้ในการยกอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ ไปยังระดับสุญญากาศของสารกึ่งตัวนำ และ

อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ χ_s หมายถึงพลังงานที่ใช้ในการยกอิเล็กตรอนจากขอบล่าง (bottom edge) ของแถบนำของสารกึ่งตัวนำไปยังระดับสุญญากาศของสารกึ่งตัวนำ

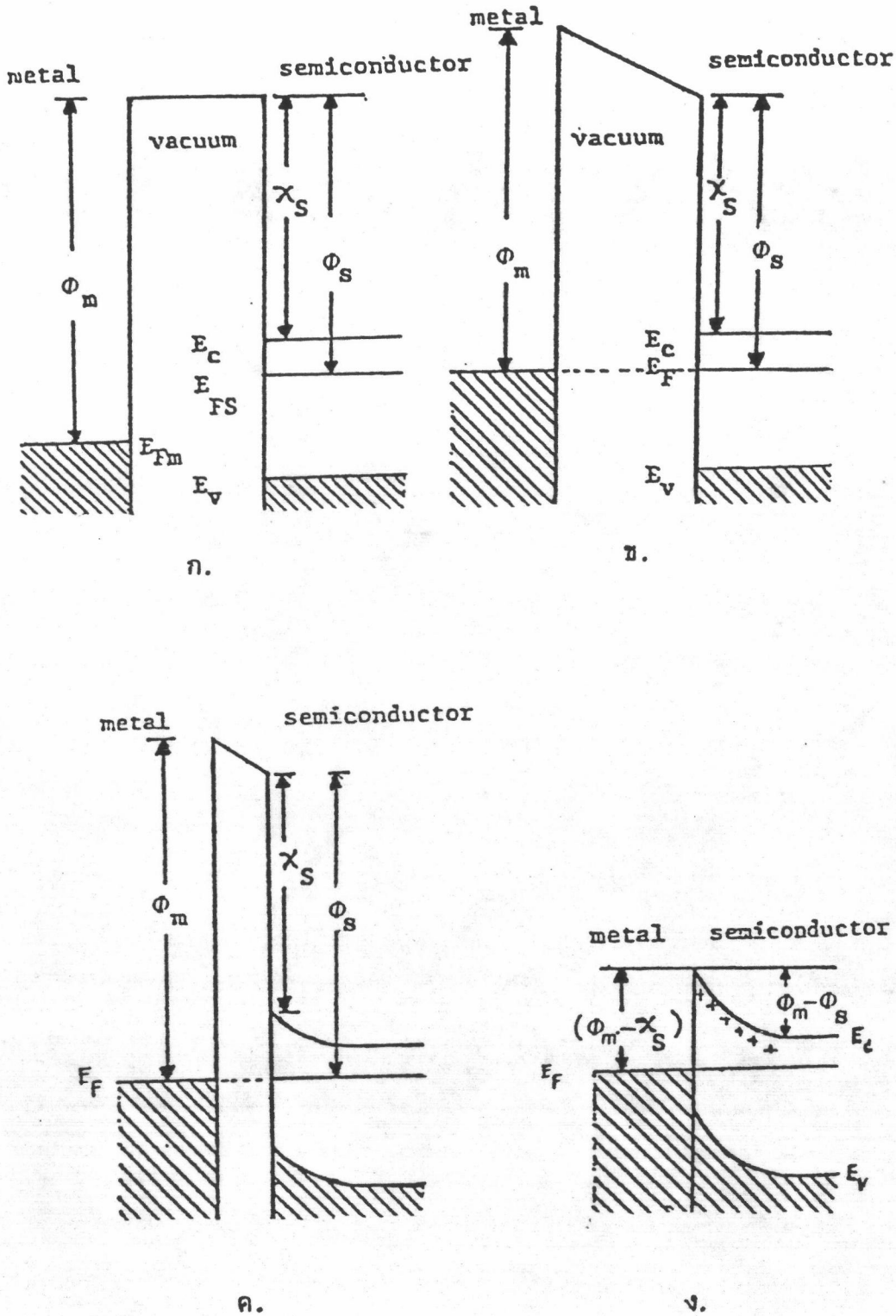
เมื่อนำโลหะที่มีค่าเวิร์กฟังค์ชัน ϕ_m มาต่อกันกับสารกึ่งตัวนำที่มีค่าเวิร์กฟังค์ชัน ϕ_s และมีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี χ_s ถ้าเวิร์กฟังค์ชันของโลหะไม่เท่ากับของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งก็คือระดับเฟอร์มิของทั้งสองไม่เท่ากัน อิเล็กตรอนอิสระ จะไหลจากข้างที่มี เวิร์กฟังค์ชันน้อยคือข้างที่มีระดับเฟอร์มิสูงกว่าไปยังข้างที่มีเวิร์กฟังค์ชันมากคือ ข้างที่มีระดับพลังงานเฟอร์มิต่ำกว่า ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระของสารกึ่งตัวนำจะไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้เกิดการโค้งของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งการโค้งนี้อาจทำให้เกิดกำแพงศักย์ขึ้นได้ เพื่อความเข้าใจจึงแบ่งการพิจารณาเป็น 4 ขั้นตอน ดังในรูป 4.1 คือ

ก. เมื่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำอยู่ห่างกัน

ข. เมื่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำอยู่ในสมดุลความร้อน (thermal equilibrium) แต่ยังคงอยู่ห่างกัน

ค. พิจารณาต่อจากข้อ ข. โดยขยับให้โลหะและสารกึ่งตัวนำเข้าใกล้กัน

ง. พิจารณาต่อจากข้อ ค. เมื่อโลหะติดกันกับสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 4.1 แสดงการเกิดกำแพงศักย์เนื่องจากโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเมื่อ $\phi_m > \phi_s$ และกำแพงศักย์ที่ปรากฏ ณ. รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีค่าเท่ากับ $(\phi_m - \chi_s)$

รูปที่ 4.1 ก. แสดงให้เห็นระดับพลังงานของโลหะและของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดย $\phi_m > \phi_s$ เมื่ออยู่ห่าง ๆ กัน ซึ่งเราสมมุติว่าระดับสุญญากาศของโลหะเป็นระดับเดียวกับระดับสุญญากาศของสารกึ่งตัวนำ

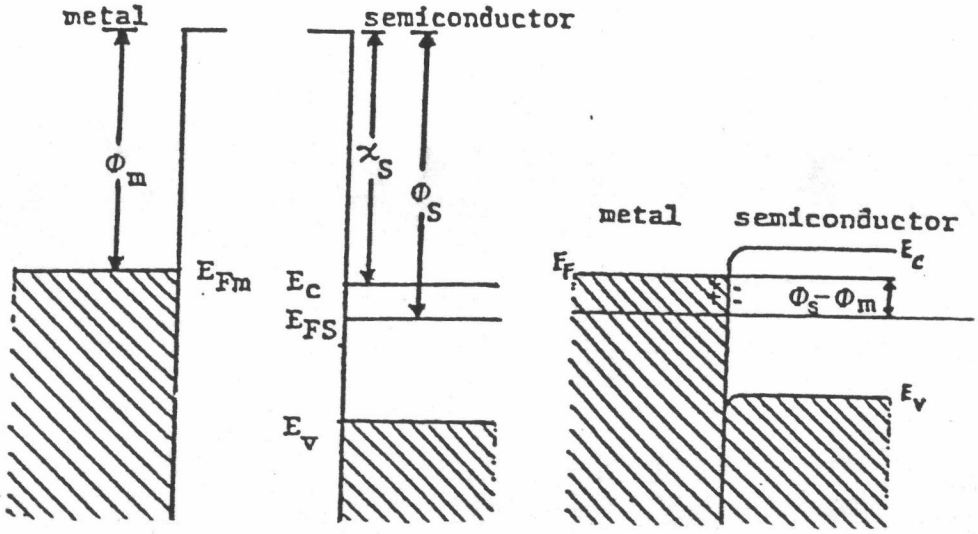
รูปที่ 4.1 ข. แสดงเมื่อโลหะและสารกึ่งตัวนำ อยู่ในสมดุลเชิงความร้อน แต่ยังคงอยู่ห่างกัน ซึ่งทำได้โดยการต่อสายไฟเข้ากับโลหะและสารกึ่งตัวนำในรูป 4.1 ก. เนื่องจากระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าของโลหะ อิเล็กตรอนอิสระจึงไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ โดยจะหยุดไหล เมื่อพลังงานระดับเฟอร์มิของทั้งสองข้างเท่ากัน ถ้าโลหะกับสารกึ่งตัวนำอยู่ห่างกันเป็นอนันต์ (infinity) จะมีประจุลบกระจายอย่างสม่ำเสมอในโลหะ และจะมีประจุบวกกระจายอย่างสม่ำเสมอในสารกึ่งตัวนำ จึงทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระกระจายอย่างสม่ำเสมอในสารกึ่งตัวนำ แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจึงไม่โค้ง

รูปที่ 4.1 ค. เมื่อขยับรูป 4.1 ข. ให้โลหะและสารกึ่งตัวนำเข้าใกล้กันอีก ตรงบริเวณใกล้ ๆ รอยต่อทางด้านโลหะจะมีประจุลบเพิ่มขึ้น และตรงใกล้ ๆ รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำก็จะมีประจุบวกเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระของสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณใกล้ ๆ รอยต่อจะลดลง แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำตรงใกล้ ๆ รอยต่อจึงโค้งขึ้น

รูปที่ 4.1 ง. เมื่อนำโลหะมาติดกับสารกึ่งตัวนำ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระของสารกึ่งตัวนำตรงใกล้ ๆ รอยต่อจะลดน้อยลงอีก แถบพลังงานจึงโค้งขึ้นอีก การโค้งของแถบพลังงาน จะทำให้เกิดกำแพงศักย์ขวางกั้นการไหลของอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าเท่ากับ $\phi_m - \chi_s$

ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ถ้า $\phi_m < \phi_s$ อิเล็กตรอนอิสระจะไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ และแถบพลังงานจะโค้งลงดังรูป 4.2 ซึ่งรอยต่อแบบนี้เป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกอันเป็นรอยต่อที่เราต้องการ

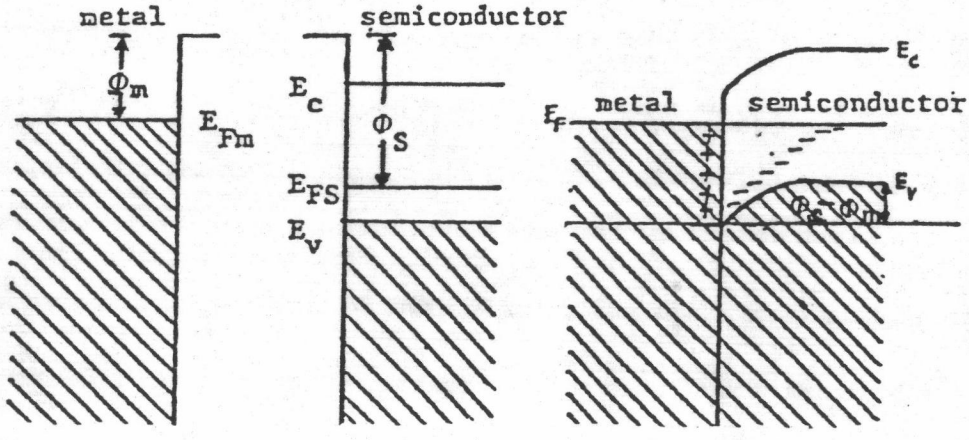
I17503048



ก. ข.

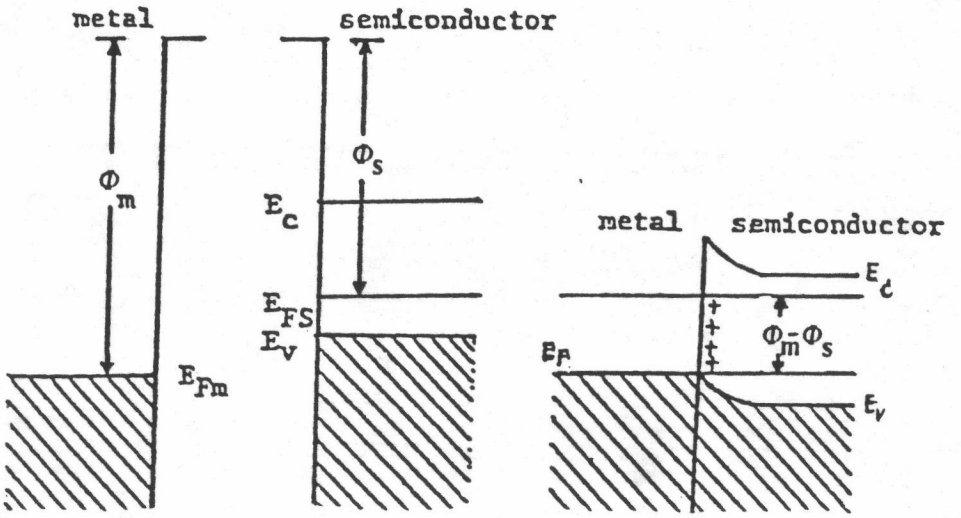
รูปที่ 4.2 แสดงรอยต่อแบบโอห์มมิกในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อ $\phi_m < \phi_s$

ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะเกิดกำแพงศักย์เมื่อ $\phi_m < \phi_s$ ดังรูปที่ 4.3 และจะเกิดรอยต่อแบบโอห์มมิกเมื่อ $\phi_m > \phi_s$ ดังรูปที่ 4.4



ก. ข.

รูปที่ 4.3 แสดงการเกิดกำแพงศักย์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีเมื่อ $\phi_m < \phi_s$

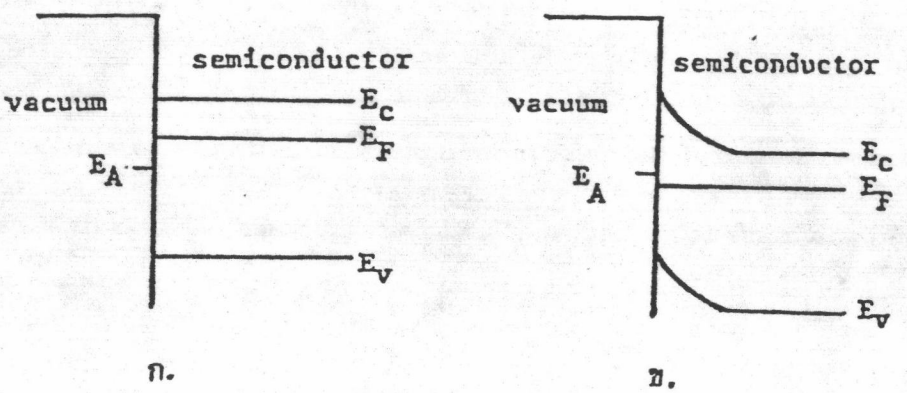


ก. ข.

รูปที่ 4.4 แสดงรอยต่อแบบโอห์มมิกในสารกึ่งตัวนำชนิดพีเมื่อ $\phi_m > \phi_s$

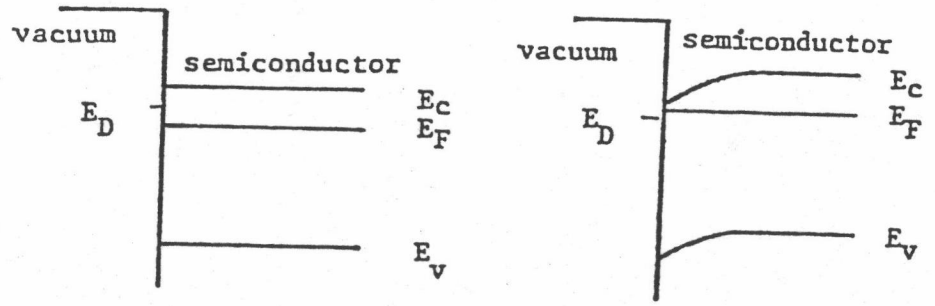
4.1.2 <u>กำแพงศักย์เกิดจากสถานะผิวของสารกึ่งตัวนำ</u> [40]

เมื่อความเป็นคาบของผลึกสิ้นสุดลงที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดสถานะผิวขึ้น โดยอาจเป็นสถานะเสมือนผู้รับ (acceptor like) คือ E_A หรืออาจเป็นสถานะเสมือนผู้ให้ (donor like) คือ E_D ถ้าระดับพลังงานของสถานะผิวที่เสมือนผู้รับอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนอิสระจะไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังผิวทำให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำโค้งขึ้น ดังรูป 4.5 หรือถ้าระดับพลังงานของสถานะผิว ที่เสมือนผู้ให้อยู่เหนือระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนอิสระจะไหลจากผิว ไปยังสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำโค้งลงดังรูป 4.6



ก. ข.

รูปที่ 4.5 แสดงการโค้งของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเนื่องจากสถานะผิว E_A ที่เสมือนผู้รับ



รูปที่ 4.6 แสดงการโค้งของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเนื่องจากสถานะผิว E_D ที่เสมือนผู้ให้

แต่ถ้าระดับพลังงานของสถานะผิวที่เสมือนผู้รับ อยู่เหนือระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ หรือถ้าระดับพลังงานของสถานะผิวที่เสมือนผู้ให้อยู่ใต้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ ทั้งสองกรณีนี้จะไม่เกิดการโค้งของแถบพลังงานเลย

4.1.3 <u>กำแพงศักย์เกิดจากชั้นบาง ๆ ของสารอื่นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ</u>

ชั้นบาง ๆ ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำนี้มักเป็นพวก ออกไซด์ (oxide) หรือ ไนไตรด์ [40] ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นยากที่จะหลีกเลี่ยงได้ เพราะตามปรกติแล้วผิวของสารกึ่งตัวนำจะสัมผัสกับอากาศซึ่ง ทั้งออกซิเจนหรือไนโตรเจนในอากาศ มักทำปฏิกิริยากับสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นชั้นบาง ๆ ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดกำแพงศักย์ได้ ตามเหตุผลในข้อ 4.1.1 และ 4.1.2

นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำที่รอยต่ออันเนื่องมาจากมีอะตอมของโลหะ แพร่เข้าไปก็จะมีผลทำให้เกิดกำแพงศักย์ได้ด้วย

4.2 <u>รอยต่อแบบโอห์มมิก</u>

ในการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสิ่งสำคัญคือ ต้องมีการต่อขั้วไฟฟ้าออกจากสารกึ่งตัวนำ รอยต่อระหว่างโลหะ ที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำจะต้องมีความต้านทานน้อย

เมื่อเทียบกับความต้านทานของชั้นสารกึ่งตัวนำ (bulk resistance) เพื่อที่ว่าความต่างศักย์ที่ให้กับอุปกรณ์ (applied voltage) จะได้ไม่ตกคร่อม (voltage drop) ที่รอยต่อมากนักคือต้องไม่เกิดกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมาขัดขวาง การไหลของกระแส (nonblocking current) ลักษณะที่บ่งบอกสมบัติของรอยต่อแบบโอห์มมิกคือ ค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ (specific contact resistance, R_c) ซึ่งนิยามขึ้นตามสมการ [13]

$$R_c \equiv \left(\frac{\partial J}{\partial V}\right)^{-1}_{V=0}$$

สำหรับรอยต่อแบบโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปน้อย (low doping) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อจะมาจากขบวนการเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน ค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อจะเป็นไปตามสมการ [13]

$$R_c = \frac{k}{qA^{*}T} \exp(\phi_B/kT)$$

ดังนั้นถ้ากำแพงศักย์ (ϕ_B) มีค่าน้อยจะทำให้ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อมีค่าน้อยด้วย

สำหรับรอยต่อแบบโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปมาก (highly doping) กำแพงศักย์จะแคบลง ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อส่วนใหญ่จะมาจากขบวนการลอดผ่านกำแพงศักย์ (tunneling current) ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อจะเป็นไปตามสมการ [13]

$$R_c \simeq \exp\left[2\frac{(\epsilon_s m_e)}{\hbar}(\phi_B/\sqrt{N_D})\right]$$

นั่นคือ ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อจะมีค่าน้อยลงในขณะที่ความหนาแน่นของสิ่งเจือปน (N_D) เพิ่มขึ้น

4.3 วิธีควรทำเมื่อต้องการรอยต่อแบบโอห์มมิก [10,41,42,43]

หัวข้อ 4.1 ได้แสดงให้เห็นถึงสาเหตุของการเกิดกำแพงศักย์ ดังนั้นถ้าต้องการรอยต่อแบบโอห์มมิกคือ ไม่ต้องการกำแพงศักย์ จึงควรทำดังนี้

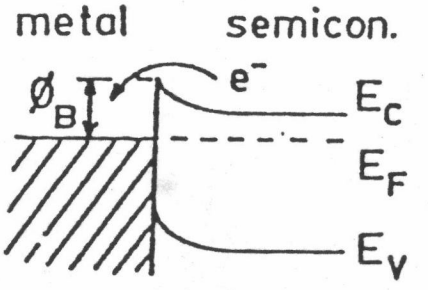
1. เลือกโลหะที่มีค่าเวิร์กฟังค์ชันน้อย ๆ สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และเลือกโลหะที่มีค่าเวิร์กฟังค์ชันมาก ๆ สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี เพื่อให้ได้กำแพงศักย์ที่มีค่าต่ำอันจะทำให้ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อมีค่าน้อย ซึ่งจะทำให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดี

ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ก.

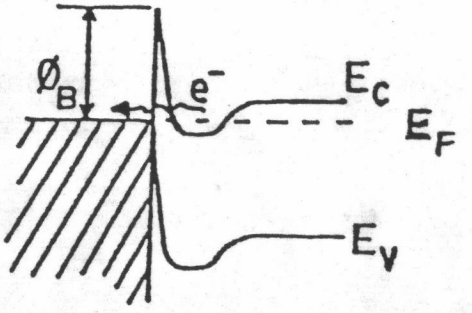
2. เลือกโลหะที่เป็นผู้ให้ (donor) เมื่อเป็นสารอสุทธิ (impurity) เช่น พวกกลุ่มห้าสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แล้วพยายามทำให้โลหะแพร่ (diffuse) เข้าไปในสารกึ่งตัวนำ และเลือกโลหะที่เป็นผู้รับ (acceptor) เมื่อเป็นสารอสุทธิ เช่น พวกกลุ่มสามสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี แล้วพยายามทำให้โลหะแพร่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำ การโด๊ปมาก ๆ กำแพงศักย์จะแคบลง กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อส่วนใหญ่จะมาจากขบวนการลอดผ่านกำแพงศักย์ (tunneling current) จึงทำให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิก ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ข.

3. ถ้าทำตามข้อ 1 และข้อ 2 แล้วยังไม่ได้รอยต่อแบบโอห์มมิก ให้ลองทำให้ผิวของสารกึ่งตัวนำ เป็นรอยขูดขีด เพราะการขูดขีดจะทำให้เกิดสถานะผิวขึ้น ซึ่งสถานะผิวที่เกิดขึ้นนี้ อาจทำให้ ความสูงของกำแพงศักย์ลดน้อยลง ดังนั้นรอยต่อนี้จะกลายเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกได้ด้วย

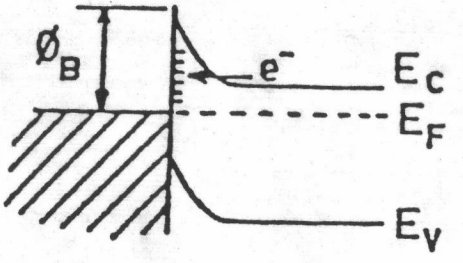
4. รอยต่อแบบโอห์มมิกยังทำได้ จากการเตรียมรอยต่อที่มีความบกพร่องของผลึกเป็นจำนวนมากพอเหมาะ (suitably large density of defect sites) [41,42] หรือพยายามสร้างกับดัก (traps) ขึ้นมาตรงผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากข้อบกพร่องของผลึกชนิดต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นสถานะผิวที่เกิดจากข้อบกพร่องผลึกที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (intrinsic defect surface state) หรือเป็นสถานะผิวที่เกิดจากข้อบกพร่องผลึกที่เกิดจากสารอสุทธิ (extrinsic defect surface states) และสิ่งสกปรกบนผิวของสารกึ่งตัวนำ หรือเป็นการขาดออกของพันธะที่ผิวสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำให้ความเป็นคาบของผลึกสิ้นสุดลงที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ตำแหน่งความบกพร่องเหล่านี้จะเป็นศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลซึ่งจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อได้ ดังแสดงในรูป 4.7 ค



ก.



ข.



ค.

รูปที่ 4.7 แสดงกลไก (mechanism) การเกิดรอยต่อแบบโอห์มมิก

ก. รอยต่อที่กำแพงศักย์มีค่าต่ำ

ข. รอยต่อที่เกิดจากการโด๊ปมาก ๆ ด้วยโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า

ค. รอยต่อที่มีศูนย์กลางการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล

ในทางปฏิบัติการทราบเพียงค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อเท่านั้น ยังไม่เหมาะกับการนำมาใช้งาน แต่ถ้าทราบทั้งค่าความสูงของกำแพงศักย์ (barrier height) และค่าความหนาแน่นของกระแสที่มากที่สุด [11,43] ขณะที่รอยต่อไม่แสดงการขัดขวางการไหลของกระแส (nonblocking contact) ในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานจะเหมาะสำหรับการบอกลักษณะของรอยต่อแบบโอห์มมิกมากกว่าการใช้ค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ

การที่จะเลือกใช้โลหะให้เหมาะสมกับสารกึ่งตัวนำเพื่อให้ได้ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าต่ำนั้นทำได้ไม่ง่ายนัก แต่การที่จะทำให้ได้ตำแหน่งอ้อบกพร่องผลึกอันเหมาะสมที่รอยต่อนั้นจะทำให้เกิดกับดัก (traps) ขึ้นตรงบริเวณรอยต่อซึ่งในทางปฏิบัติพบว่าการให้ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำที่รอยถูดขีดเป็นวิธีการที่ง่ายและเหมาะสม [10] ดังนั้นเราจะเลือกใช้วิธีทำให้ผิวของสารกึ่งตัวนำเป็นรอยถูดขีด ซึ่งจะทำให้รอยต่อมีศูนย์กลางการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล นอกจากนี้ถ้าเลือกโลหะที่เหมาะสม สำหรับสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดเอ็นและชนิดพีเพื่อให้ได้รอยต่อที่มีกำแพงศักย์ค่าต่ำด้วย จะทำให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดีซึ่งสมบัติของโลหะที่จะนำมาใช้ทำรอยต่อแบบโอห์มมิก ควรมีสมบัติดังต่อไปนี้คือ

1. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
2. ยึดติดแน่นกับอุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์ได้ดี
3. ไม่เสื่อมคุณภาพง่ายเกินไปในสภาวะแวดล้อมที่ใช้งาน
4. เชื่อมต่อสายเข้ากับอุปกรณ์ภายนอกได้ง่าย

สำหรับการวิจัยในที่นี้ได้เลือกใช้กาวนำไฟฟ้า (silver paint) และ In เป็นโลหะทำรอยต่อแบบโอห์มมิกกับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ GaAs ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดวิธีทำการทดลองในบทต่อไป