หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การทำผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำในแง่ปฏิบัติ

4.1 วิธีการทำผิวสัมผัสฯ

ผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำสามารถทำขึ้นได้หลายวิธี ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

4.1.1 Point contacts ผิวสัมผัสแบบนี้เป็นแบบที่ทำในสมัยแรกๆ โดยการนำเอาลวดโลหะจี้หลอมต่อกับแว่นผลึกสารกึ่งตัวนำ แต่การทำความเข้าใจและควบคุมลักษณะสมบัติของผิวสัมผัสทำได้ลำบาก จึงถูกยกเลิกไป อย่างไรก็ดีผิวสัมผัสแบบ Point contacts นี้ได้ถูกนำไปใช้ในงานที่เกี่ยวกับกิจการวิทยุ Microwave และ Particle detectors ในยุคเริ่มต้นของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

4.1.2 Evaporated contacts ปัจจุบันผิวสัมผัสส่วนมากที่ทำขึ้นในอุตสาหกรรมการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำใช้วิธีการแบบนี้ ผิวสัมผัสทำขึ้นโดยการระเหยไอโลหะในสภาวะสูญญากาศต่ำๆ วิธีการระเหยไอโลหะขึ้นอยู่กับจุดหลอมเหลวของโลหะ กรณีโลหะมีจุดหลอมเหลวต่ำๆ เช่น อลูมิเนียม, ทอง, ทองแดง, ดีบุก, เงิน ฯลฯ ใช้การป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านภาชนะใส่โลหะ (Boat) ความร้อนเนื่องจากค่าความต้านทานของภาชนะใส่จะทำให้โลหะหลอมกลายเป็นไอไปเคลือบแว่นผลึกสารกึ่งตัวนำ ถ้าโลหะมีจุดหลอมเหลวสูง เช่น ทังสเตน, แทนทาลั่ม, โมลิบดีนั่ม, ติตาเนี่ยม ฯลฯ การระเหยทำได้โดยการยิงลำอิเล็คตรอนที่มีพลังงานสูงกระทบโลหะ เมื่ออิเล็คตรอนกระทบโลหะจะถ่ายทอดพลังงานให้จนโลหะหลอมกลายเป็นไอ

การทำสภาวะสูญญากาศต่ำๆนั้นใช้ Diffusion pump ซึ่งมีประสิทธิภาพขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิ ปกติสภาวะสูญญากาศมีค่าประมาณ 10^{-5} ทอร์ และ 10^{-7} ทอร์ (เมื่อใช้ไนโตรเจนเหลวในส่วนทำความเย็น) นอกจากนั้นยังสามารถทำสภาวะสูญญากาศได้ต่ำถึง 10^{-10} ทอร์ โดยใช้ระบบ Ion - pumped

ผิวสัมผัสแบบนี้มีลักษณะสมบัติไม่ตรงตามอุดมคตินัก เนื่องจากเกิด Interfacial layer ขึ้น ขณะนำแว่นผลึกสารกึ่งตัวนำใส่ในเครื่องเคลือบไอโลหะและขณะทำการลดสภาวะสูญญากาศลง แว่นผลึกจะทำปฏิกริยากับไอน้ำและก๊าซอื่นๆในอากาศเกิด Interfacial layer ขึ้นก่อนที่จะเคลือบ

ไอโลหะ ความหนาของ Interfacial layer ขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมผิวและวิธีการทำผิวสัมผัสฯ

การลดความหนาของ Interfacial layer ทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของแว่นผลึกประมาณ 100°- 200° เซลเซียส เพื่อไล่ไอน้ำและสิ่งแปลกปลอมบริเวณผิวก่อนระเหยไอโลหะ อย่างไรก็ดี Interfacial layer ก็ยังคงปรากฏอยู่นอกเสียจากเราจะทำการหัก (cleave) แว่นผลึกก่อนระเหยไอโลหะในสภาวะสูญญากาศประมาณ 10^{-10} ทอร์ ซึ่งสภาวะสูญญากาศขนาดนี้อัตราการเกิด Interfacial layer มีค่าต่ำมาก [46] ผิวสัมผัสแบบหลังนี้จะไม่มี Interfacial layer เลย แต่จะเกิดมี Surface states อย่างมากมายขณะทำการหัก นอกจากนั้นกระบวนการทำยังช้าและยุ่งยากจนใช้ไม่ได้ในอุตสาหกรรมการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

4.1.3 Chemical deposition การทำผิวสัมผัสโดยใช้ปฏิกริยาเคมีเป็นแบบที่ง่ายและราคาถูกที่สุดแต่ไม่ค่อยมีการทดลอง การทดลองที่ปรากฏก็แสดงรายละเอียดไม่มากพอ ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุทำให้การทดลองเสริมต่อโดยบุคคลอื่นทำได้ลำบาก การทำผิวสัมผัสโดยปฏิกริยาเคมีพอจะแบ่งได้ดังนี้

ก. Electroplating เป็นการใช้สารละลายเกลือของโลหะ (Metallic salt) ทำปฏิกริยากับแว่นผลึกสารกึ่งตัวนำ (ซึ่งต่อกับขั้วลบ) ขณะป้อนกระแสผ่านสารละลาย เนื่องจากสารกึ่งตัวนำมีค่าความต้านทานสูงกว่าโลหะ ทำให้ current distribution ไม่สม่ำเสมอซึ่งจะเป็นผลทำให้ผิวสัมผัสไม่เรียบ [47,48]

ข. Displacement plating เริ่มต้นโดยการทำอ็อกไซด์บริเวณผิวของแว่นผลึกสารกึ่งตัวนำส่วนที่ต้องการทำผิวสัมผัส แล้วนำแว่นผลึกไปชุบในสารละลายที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ โลหะจะเข้าไปแทนที่อ็อกไซด์จนหมด ความหนาของโลหะที่เคลือบแว่นผลึกมีค่าเท่ากับความหนาของชั้นอ็อกไซด์ซึ่งอาจจะบางไป การเพิ่มความหนาของโลหะก็ทำได้โดยวิธีการในข้อ ก. วิธีการแบบนี้จะให้ผิวสัมผัสที่เรียบกว่าวิธีการในข้อ ก.

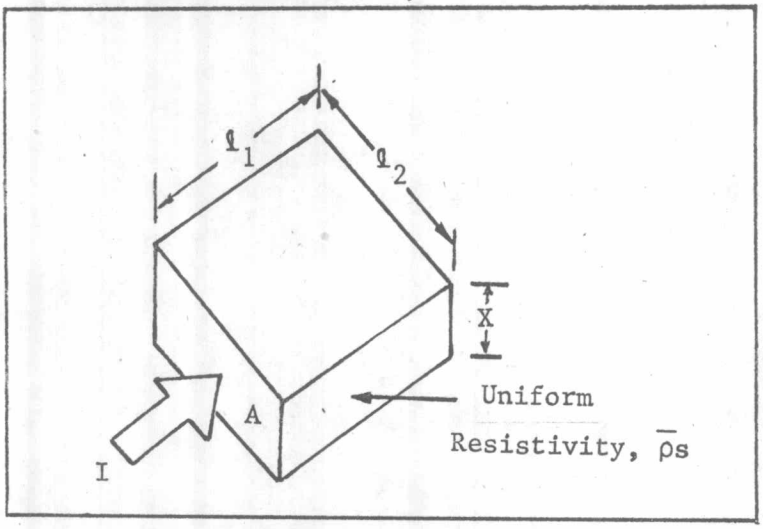
ค. Electroless plating เป็นวิธีการที่ง่ายกว่าทุกแบบ ผิวสัมผัสทำขึ้นโดยการจุ่มแช่แว่นผลึกสารกึ่งตัวนำในสารละลายเกลือของโลหะและสารจำพวก Reducing agent โลหะที่ใช้ได้แก่ นิเกิล, ทอง และทองคำขาว (Platinum) กรณีชุบนิเกิลผิวสัมผัสที่ทำจากสารกึ่งตัวนำแบบ Lapped - surface จะมีการยึดเกาะ (Adherence) ของนิเกิลดีกว่าแบบ Chemically polished surface [49]

4.1.4 Sputtered contacts ผิวสัมผัสแบบนี้ทำขึ้นโดยการติดแว่นผลึกสารกึ่งตัวนำกับขั้วไฟฟ้าข้างหนึ่งและติดแผ่นโลหะกับขั้วไฟฟ้าอีกข้างหนึ่งในสภาวะสูญญากาศต่ำๆ (ประมาณ 10^{-7} ทอร์) ตอนเริ่มต้นอาจทำการ Etch ผิวของแว่นผลึกด้วยการปล่อยประจุ (Discharge) ก่อน ต่อจากนั้นก็ปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปแล้วป้อนแรงดันไฟฟ้าคร่อมขั้วทั้งสองจนเกิดการปล่อยประจุขึ้น ไฟฟ้าที่ป้อนอาจจะเป็นไฟตรง [50] หรือไฟสลับความถี่สูงย่านความถี่วิทยุ [51] ผิวสัมผัสที่ทำโดยวิธีการนี้มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงอุดมคติมาก

4.2 การทำผิวสัมผัสฯ แบบโอห์มมิค

สิ่งที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และ 3 ไม่ว่าจะเป็น Ideality factor หรือ Barrier - Height เป็นค่าแสดงลักษณะสมบัติของผิวสัมผัสแบบเรคติฟายอิง ผิวสัมผัสแบบโอห์มมิคมีค่าแสดงลักษณะสมบัติต่างออกไปซึ่งได้แก่

ก. Sheet Resistance (เอกสารบางฉบับใช้คำว่า Sheet Resistivity แทน) เป็นค่าแสดงความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีคำจำกัดความดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1
แสดงรูปร่างซึ่งช่วยในการให้คำจำกัดความค่า Sheet Resistance ให้ชัดเจนขึ้น

จากรูปที่ 4.1 ค่าความต้านทาน $R = \dfrac{\bar{\rho}_s \ell_1}{A}$

$\bar{\rho}_s$ = Resistivity ของสาร

กรณีสารกึ่งตัวนำเราให้คำจำกัดความค่า Sheet Resistance ว่า [52]

$$R_s = \frac{\bar{\rho}_s \ell_1}{\ell_2 x} = \frac{\bar{\rho}_s}{x} \qquad \Omega/\square \qquad (4.1)$$

จากสมการ (4.1) ค่า Sheet Resistance คือ ค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ เมื่อความกว้างมีค่าเท่ากับความยาว ($\ell_1 = \ell_2$) หน่วยเป็นโอห์มต่อ 1 หน่วยพื้นที่

ค่า R_s นี้บริษัทผู้ผลิตแว่นผลึกสารกึ่งตัวนำจะระบุในใบเอกสารแนบ โดยทั่วๆไปวัดได้โดยใช้โพรบสี่เข็ม (Four point probe) กรณีที่แว่นผลึกเป็นแบบสี่เหลี่ยมดังในรูปที่ 4.1 โดยที่ $\ell_1 \neq \ell_2$

ค่าความต้านทานในแนวนอน $R = R_s \frac{\ell_1}{\ell_2}$ Ω (4.2)

ข. Contact Resistance และ Contact Resistivity ในการทดลองวัดค่าความต้านทานของชิ้นสารกึ่งตัวนำโดยการต่อขั้วโลหะทั้งสองด้านของชิ้นสารแล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ความต้านทานที่วัดได้จะมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานในอุดมคติ ค่าความต้านทานส่วนที่เกินมานี้เนื่องจาก Contact Resistance

$$R_a - R_i = 2R_c \qquad \text{โอห์ม} \qquad (4.3)$$

เมื่อ R_i = ค่าความต้านทานในอุดมคติของชิ้นสารกึ่งตัวนำ

R_a = ค่าความต้านทานที่หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่เป็นกราฟเส้นตรง

R_c = Contact Resistance

คำจำกัดความของค่า Contact Resistivity เป็นตามสมการ

$$\rho_c = \lim_{\Delta A_c \to 0} (R_c . \Delta A_c) \qquad \text{โอห์ม-ซม.}^2 \qquad (4.4)$$

เมื่อ ΔA_c = ค่าพื้นที่ตัดขวางของชิ้นสารกึ่งตัวนำ

ถ้า contact เป็นเนื้อเดียวสม่ำเสมอทำให้ current density distribution คงที่ตลอดพื้นที่จะได้

$$\boxed{\rho_c = R_c . \Delta A_c} \qquad \text{โอห์ม-ซม.}^2 \qquad (4.4)$$

ผิวสัมผัสแบบโอห์มมิคที่ดีต้องมีค่า Contact Resistivity ต่ำกว่า 10^{-7} โอห์ม- ม.^{2} (9) ถ้าค่า ρ_c มีค่าสูงกว่านี้ลักษณะสมบัติของผิวสัมผัสควรให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเป็นเส้นตรง วิธีการทำผิวสัมผัสแบบโอห์มมิคสรุปได้ดังนี้

ก. จากทฤษฎีของ Mott ผิวสัมผัสฯ ที่ $\phi_m > \phi_s$ กรณีสารกึ่งตัวนำเป็นชนิด P และ $\phi_m < \phi_s$ กรณีสารกึ่งตัวนำเป็นชนิด N จะแสดงลักษณะสมบัติแบบโอห์มมิค (บทที่ 2.1.2) แต่จากผลการทดลองส่วนมากผิวสัมผัสดังกล่าวเป็นแบบเรคติฟายอิงที่มีค่า Barrier Height ต่ำๆ

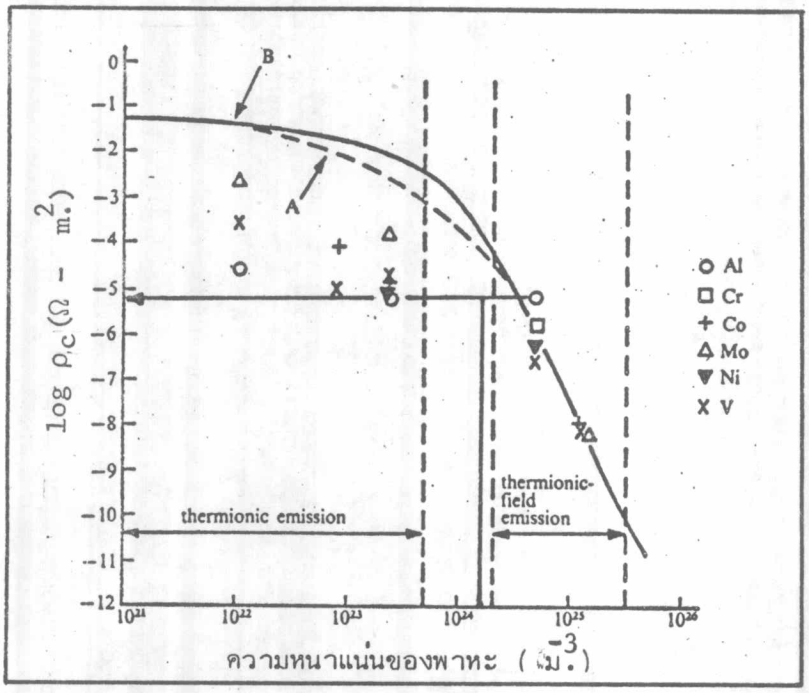
ข. พ่นทรายลงบนผิวของแว่นผลึกสารกึ่งตัวนำก่อนนำไปทำผิวสัมผัสเพื่อเพิ่ม Recombination centres ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสเนื่องจากการรวมตัวบริเวณเขตปลอดพาหะเพิ่มขึ้น (บทที่ 3.1.3) วิธีทำผิวสัมผัสฯ แบบนี้ใช้กับสารกึ่งตัวนำที่มีค่า Life time ต่ำๆ และนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำๆ ซึ่งกรณีนี้กระแสเนื่องจากการรวมตัวบริเวณเขตปลอดพาหะมีค่าสูงกว่ากระแสเนื่องจากปรากฏการณ์อื่นๆ

ค. ผิวสัมผัสฯ แบบโอห์มมิคส่วนมากทำขึ้นโดยอาศัยการทำให้ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็คตรอนและโฮลเป็นแบบ Field emission (เคลื่อนทะลุ Barrier) วิธีการนี้สารกึ่งตัวนำบริเวณที่จะสัมผัสกับโลหะมีค่าความหนาแน่นของพาหะสูง (ดูหัวข้อ3.1.2 และสมการ 3.18 ประกอบ) ค่า Contact Resistivity เปลี่ยนแปลงตามค่าความหนาแน่นของพาหะโดย Contact Resistivity ของผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบ N แปรตามองค์ประกอบสำคัญดังนี้ (53)

$$\exp(\phi_{bn}/E_{00}) \qquad \text{กรณี Field emission } (qE_{00} >> kT)$$

$$\exp\{\frac{\phi_{bn}}{E_{00}} \coth(\frac{qE_{00}}{kT})\} \qquad \text{กรณี Thermionic - field emission } (qE_{00} \simeq kT)$$

$$\exp(\frac{q\phi_b}{kT}) \qquad \text{กรณี Thermionic emission } (qE_{00} << kT)$$



รูปที่ 4.2

แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ρ_c กับ N_d ของสารกึ่งตัวนำที่เป็นชนิด N Curve A, B ได้จากการคำนวณ (54,55)

ความสัมพันธ์ระหว่าง ρ_c กับ N_d แสดงได้ด้วยรูปที่ 4.2 Curve A, B ได้จากการคำนวณ โดยกำหนด Barrier เป็นแบบ Simple และ Truncated parabolic (54) ตามลำดับ ส่วนผลการทดลองแสดงด้วยจุดลักษณะต่างๆ (55) จากรูปที่ 4.2 แสดงว่าความต้านทาน ρ_c มีค่าลดลงอย่างมากเมื่อ N_d มากกว่า 10^{25} ม.$^{-3}$

ผลการทดลองของผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบ P นั้นไม่ค่อยมีปรากฏ เนื่องจากในวงการอุตสาหกรรมผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมักจะใช้อลูมิเนียมทำผิวสัมผัสแบบโอห์มมิค เมื่อทำการอบความร้อนอลูมิเนียมจะทำปฏิกริยากับสารกึ่งตัวนำเกิดชั้น P^+ (ซึ่งมีความหนาแน่นของพาหะสูงมาก) ผิวสัมผัสที่ได้จะมีลักษณะสมบัติแบบโอห์มมิค ดังจะกล่าวถึงในบทต่อไป

หมายเหตุ ผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีเพียง 2 แบบ คือ แบบเรคติฟายอิงและโอห์มมิค ในการทำผิวสัมผัสแบบเรคติฟายอิงเราก็ไม่ทำตามวิธีการที่กล่าวมาแล้วในบทนี้

4.3 ผลของการอบความร้อน

ในการทำผิวสัมผัสแบบโอห์มมิค ผิวสัมผัสที่ทำขึ้นจะถูกนำไปอบความร้อนที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิ Eutectic ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เพื่อทำให้โลหะยึดเกาะกับสารกึ่งตัวนำแน่นขึ้นและลด

ความหนาของ Interfacial layer ข้อควรระวังในการอบความร้อนเพื่อทำผิวสัมผัสแบบโอห์มมิค คือ

ก. อุณหภูมิขณะทำการอบความร้อนต้องไม่สูงเกินไปจนโครงสร้างภายในแว่นผลึกสารกึ่งตัวนำเสียหาย

ข. โลหะที่แพร่ซึมเข้าไปในแว่นผลึกสารกึ่งตัวนำต้องไม่ลึกไปจนทำให้โครงสร้างภายในแว่นผลึกสารกึ่งตัวนำเสียหาย ปริมาณของโลหะที่แพร่ซึมเข้าไปในแว่นผลึกกำหนดโดยค่า Diffusivity และอุณหภูมิ กล่าวคือ ถ้า Diffusivity และอุณหภูมิมีค่าสูงโลหะจะแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำได้มากและรวดเร็ว

ค. หลังจากอบความร้อนโลหะบางชนิดจะทำปฏิกริยากับสารกึ่งตัวนำ เกิดชั้นสารประกอบซึ่งจะทำให้ผิวสัมผัสเป็นแบบเรคติฟายอิง เช่น กรณีโลหะนิเกิลกับซิลิกอน หลังจากอบความร้อนนิเกิลจะทำปฏิกริยากับซิลิกอนได้ชั้นของสารประกอบ Silicide ที่บริเวณผิวสัมผัส ชั้นของ Silicide ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ผิวสัมผัสเป็นแบบเรคติฟายอิงที่คงทนและมีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับอุดมคติมาก โลหะที่ทำปฏิกริยากับซิลิกอนได้ Silicide ได้แก่สารทุกชนิดยกเว้น Al, Ag, Au, Sn, Sb, Ga, Ge, Zn, Cd, In, Hg, Tl, Pb, Bi และ Be (56)

i.17716342