บทที่ 2

ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

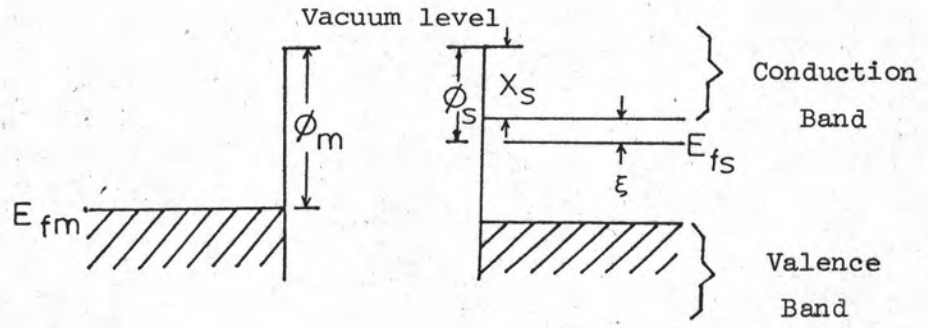
ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ผิวสัมผัสแบบเรียงกระแส (Rectifying contact) หรือ ผิวสัมผัสช็อตต์กี้แบร์เรียร์ (Schottky barrier contact) ซึ่งมีลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันเป็นแบบเรียงกระแส และผิวสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic contact) ซึ่งมีลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันเป็นแบบเชิงเส้น (linearity) ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดนี้สามารถอธิบายด้วยแบบจำลองของช็อตต์กี้ (Schottky model) แบบจำลองของบาร์ดีน (Bardeen model) และแบบจำลองที่เสนอโดย Cow และ Sze

2.1 แบบจำลองของช็อตต์กี้ (Schottky model)[3][4]

ช็อตต์กี้แบร์เรียร์ที่เกิดขึ้นในผิวสัมผัสของโลหะ-สารกึ่งตัวนำนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพของแถบพลังงาน (Energy band Diagram) ของโลหะและสารกึ่งตัวนำจากรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงแผนภาพของแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ค่า Work function ของโลหะคือ Φ_m เป็นปริมาณของพลังงานที่ใช้ในการย้ายอิเล็กตรอนจากระดับเฟอร์มิ (E_{fm}) (Fermi level) ไปสู่ระดับสุญญากาศ (Vacuum level) ค่า Work function ของสารกึ่งตัวนำคือ Φ_s เป็นผลรวมของปริมาณสองค่าคือปริมาณของ electron affinity (X_s) ซึ่งเป็นปริมาณพลังงานที่ใช้ในการย้ายอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำสุดใน Conduction band (E_c) ไปสู่ระดับสุญญากาศ (Vacuum level) และปริมาณของพลังงานระดับเฟอร์มิ (Fermi level) ξ ดังนั้น Φ_s ของสารกึ่งตัวนำจะมีค่าตามสมการที่ (2.1)

$$\Phi_s = X_s + \xi \qquad (2.1)$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

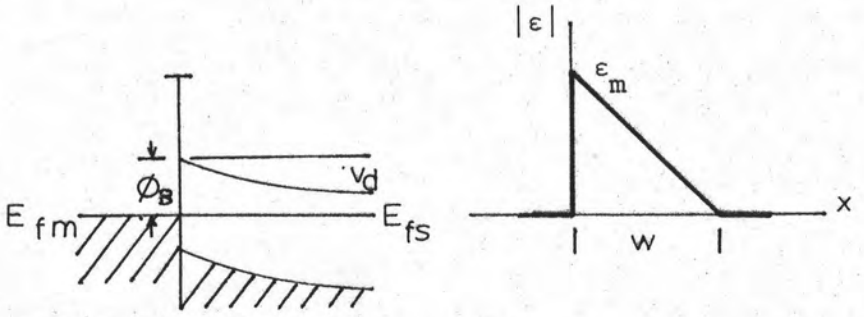


รูปที่ 2.1 แผนภาพแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ

ค่า ξ เป็นปริมาณพลังงานระดับเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำ (E_{fs}) ซึ่งเป็นค่าสัมพัทธ์ที่วัดเทียบกับขอบล่างของ Conduction band เพื่อให้ง่ายในการพิจารณาเราให้ระดับพลังงานเป็นแบบแบนราบ (Flat band) ในกรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และ $\phi_s < \phi_m$ เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาต่อกัน โดยสมมุติให้ระดับสุญญากาศ (Vacuum level) ทั้งโลหะและสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากัน อิเล็กตรอนจะถ่ายเทจากด้านสารกึ่งตัวนำไปสู่โลหะ ในขณะเดียวกันจะเกิดการสะสมประจุขึ้นที่ผิวต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากการถ่ายเทของอิเลกตรอนจนกระทั่งเกิดการสมดุลทำให้ระดับเฟอร์มิในโลหะและสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากันตามสมการที่ (2.2)

$$E_{fm} = E_{fs} \qquad (2.2)$$

ผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่แสดงในรูปที่ 2.2 ให้สารกึ่งตัวนำถูกโด๊ปอย่างสม่ำเสมอ ผลจะทำให้เกิด Depletion depth มีความกว้าง W และสนามไฟฟ้า ϵ มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับระยะทาง หากกำหนดให้ความสูงของแบร์เรียร์ ϕ_B เป็นค่าผลต่างของระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะและขอบล่างของ Conduction band ของสารกึ่งตัวนำ



(ก) (ข)

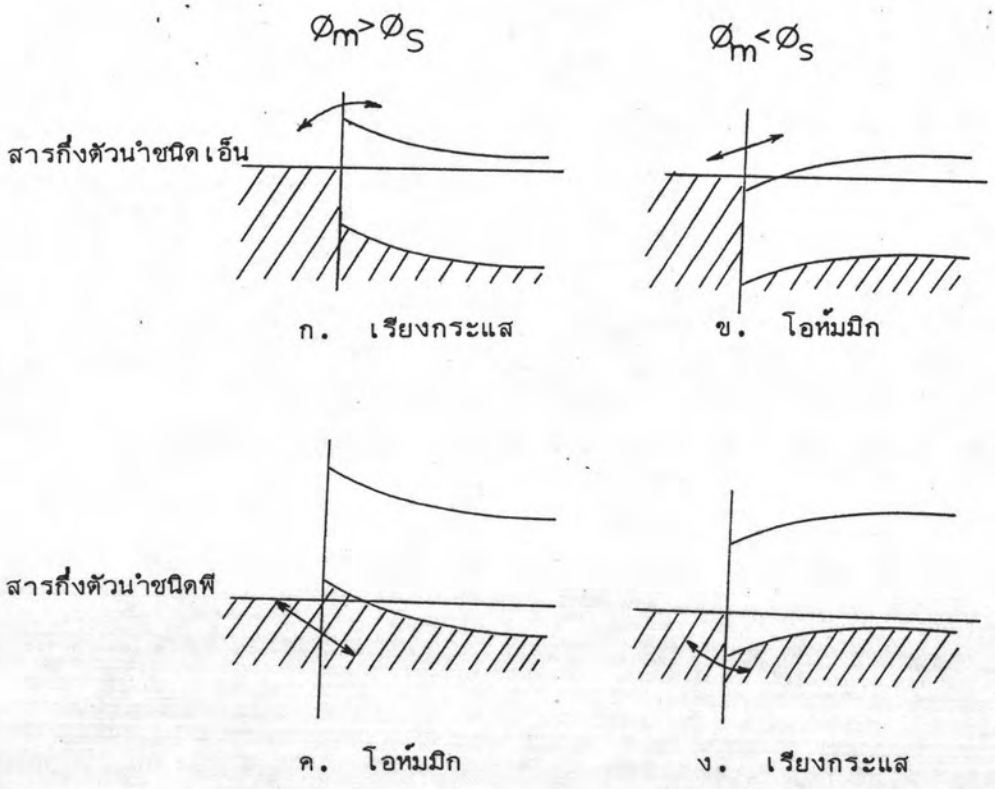
รูปที่ 2.2 (ก) แผนภาพแถบพลังงานของผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำและ
(ข) สนามไฟฟ้าที่กระจายอยู่ในผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

ดังนั้นค่าความสูงของแบร์เรียร์ที่เกิดบริเวณผิวสัมผัสมีค่าตามสมการที่ (2.3)

$$\phi_B = \phi_m - X_s \qquad (2.3)$$

จากข้างต้นผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำของช็อตต์กี้ตามสมการที่ (2.3) แบร์เรียร์จะกั้นการเคลื่อนที่ของพาหะที่เคลื่อนที่จากโลหะไปสู่สารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีค่า ϕ_B ที่แปรตามค่า ϕ_m ของโลหะ แต่ความเป็นจริงแล้วค่า ϕ_B ที่เกิดขึ้นนั้นมิได้เป็นไปตามแบบจำลองของช็อตต์กี้ เนื่องจากผลของ Surface state ที่เกิดขึ้นในผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

คำว่า "แบร์เรียร์" ในที่นี้หมายถึงปริมาณพลังงานที่อิเล็กตรอนในโลหะใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านผิวสัมผัสเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ สำหรับแบร์เรียร์ในสารกึ่งตัวนำนั้นคือ V_d ซึ่งเป็นค่า Diffusion potential หรือ Band bending ในสารกึ่งตัวนำในสภาวะสมดุลค่า V_d ขึ้นอยู่กับค่าไบอัสที่ป้อนให้และไม่มีผลต่อการเรียงกระแสอันเป็นลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันในช็อตต์กี้ไดโอด



รูปที่ 2.3 แผนภาพแถบพลังงานของผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำในแบบจำลองของช็อตต์กี้

ต่อไปเราจะมาพิจารณาทฤษฎีของช็อตต์กี้ เราจะได้ผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ 4 แบบ ตามรูปที่ 2.3 นิยามคำว่า "โอห์มมิก" ในรูปที่ 2.3 ค นั้นหมายถึงผิวสัมผัสที่ไม่มีแบร์เรียร์ที่มาต่อต้านการไหลของพาหะข้างมาก (Majority carrier) ในสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นแบบจำลองของช็อตต์กี้จึงสามารถทำนายลักษณะสมบัติของผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำได้ว่าในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งๆนั้นกับโลหะชนิดใดที่นำมาสร้างผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะสมบัติเป็นแบบเรียงกระแส (Rectifying) หรือ แบบโอห์มมิก อย่างไรก็ตามจากการทดลองส่วนใหญ่พบว่า Φ_m ที่เกิดขึ้นจริงนั้นมิได้เป็นไปตามแบบจำลองนี้

2.2 แบบจำลองของบาร์ดีน (Bardeen model)[3][4]

ในความเป็นจริงของผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำนั้นมี surface States เกิดขึ้นกั้นกลางระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ หากจำนวนของ surface States ที่เกิดขึ้นในผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำมีจำนวนที่เพียงพอ ค่า Φ_B ที่เกิดขึ้นนั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับค่า Φ_m ซึ่งค่า Surface state ในที่นี้หมายถึง electronic state localized ที่ผิวของผลึกสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเกิดจากตำแหน่งที่ขาดหายไป โดยนิยามว่า Φ_o เป็นตำแหน่งของพลังงานที่เรียกว่า neutral level ซึ่งวัดเทียบกับ valence band อันเป็นค่าพลังงานของ Surface states ที่เป็นกลาง หาก state นั้นมีพลังงานที่มีค่ามากกว่า Φ_B ทำให้ state นั้นมีประจุลบและ state เหล่านั้นจะแสดงตัวเป็น Acceptor ถ้าหาก state นั้นมีค่าพลังงานต่ำกว่า Φ_B ทำให้ Surface นั้นมีประจุบวก State เหล่านั้นจะแสดงตัวเป็น Donor และค่าตัวแปร Φ_B นี้หากพิจารณา Surface State จากตัวแปรนี้ก็จะเป็นการง่ายในการอธิบาย Surface ที่เราต้องการพิจารณา

สมมุติให้มีชั้นฉนวนบางที่กั้นระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ ชั้นฉนวนนี้จะมีความต่างศักย์ (Potential difference) ป้องกันการไหลของพาหะ หากจำนวนระดับเฟอร์มิที่ผิวของสารกึ่งตัวนำนั้นอยู่ที่ Φ_B ค่า Band bending ในแบบจำลองของช็อตกี้ที่เกิดจากผลต่างของ Φ_s และ Φ_m ซึ่งผลต่างของความต่างศักย์นั้นมีค่า $\Phi_m - \Phi_s$ ชั้นฉนวนบางนี้ โดยชั้นฉนวนจะเป็นเขตปลอดพาหะที่เกิดระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ และการสะสมของพาหะที่บริเวณผิวต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประจุในเขตปลอดพาหะ จึงทำให้ Φ_B ที่เกิดขึ้นนั้นไม่ขึ้นกับค่า Φ_m ดังนั้น E_{fs} ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากับ

$$\Phi_B = E_g - \Phi_o \qquad (2.4)$$

2.3 แบบจำลองที่เสนอโดย Cowley และ Sze[3][4]

จากรูปที่ 2.4 เมื่อสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็นและมีค่าเปอร์มิตติวิตี ϵ_s มีชั้น Interfacial หนา δ และ เปอร์มิตติวิตี ϵ_i ดังนั้น Surface state ที่เกิดขึ้นมีความหนาแน่น N_{ss} และระดับนิวตรอล Φ_o เราจะได้ค่า Φ_B (barrier energy) มีค่า

$$\Phi_B^o = \gamma(\Phi_m - X_s) + (1-\gamma)(E_g - \Phi_o) \qquad (2.5)$$

ซึ่ง

$$\gamma = \epsilon_i / (\epsilon_i + qN_{ss}\delta) \qquad (2.6)$$

จากสมการ (2.6) ตัวแปร γ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 โดยแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นของ surface state ถ้า $qN_{ss}\delta >> \epsilon_i$ จะได้ $\gamma \simeq 1$ ผลที่เกิดขึ้นในเงื่อนไขนี้จะทำให้สมการที่ (2.5) เป็นแบบจำลองของช็อตต์กี้ ในสมการที่ (2.1) ถ้า $qN_{ss}\delta >> \epsilon_i$ จะได้ $\gamma << 1$ ผลที่ได้จากสมการที่ (2.5) จะกลายเป็นสมการที่ (2.2) ซึ่งเป็นสมการของแบบจำลองของบาร์ดีน โดยสมการที่ (2.5) แสดงให้เห็นว่าค่า Φ_B นั้นไม่ขึ้นกับค่าของ Electron affinity ของสารกึ่งตัวนำแต่เพียงอย่างเดียว เนื่องจากค่าผลต่างของ $\Phi_m - \Phi_s$ ที่ปรากฏใน Interfacial layer ทำให้เกิดเขตปลอดพาหะขึ้นในชั้นฉนวนที่มีค่า Φ_B ไม่เท่ากับ Φ_B^o (ค่าพลังงานแบร์เรียร์ในกรณีที่มีค่าไบอัสมีค่าเท่ากับศูนย์) แต่ขึ้นกับค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการไบอัส ดังนั้นค่า Φ_B จะมีค่าตามสมการที่ (2.7)

$$\Phi_B = \Phi_B^o - \alpha E_m \qquad (2.7)$$

ซึ่ง E_m คือค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำและ α ทีค่าเป็นหน่วยความยาวซึ่งมีค่าตามสมการที่ (2.8)

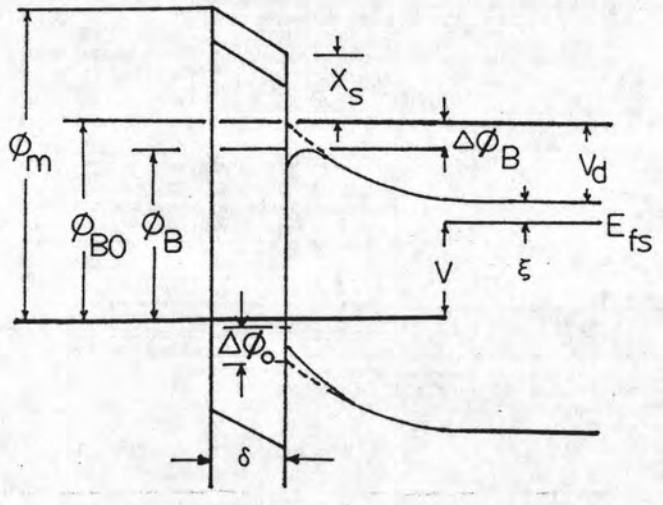
$$\alpha = \delta\epsilon_s / (\epsilon_i + qN_{ss}\delta) \qquad (2.8)$$

หาก $qN_{ss}\delta >> \epsilon_i$ จะได้ $\alpha = 0$ ดังนั้น $\phi_B \simeq \phi_{B0}$ และค่าแบร์เรียร์ที่เกิดขึ้นนั้นไม่ขึ้นกับค่าสนามไฟฟ้าและ Band Bending ในสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจำนวนของ Surface state ที่ผิวสัมผัสโลหะสารกึ่งตัวนำ จึงมีผลต่อค่า Barrier energy หาก $N_{ss} = 0$ $\alpha = \delta\epsilon_s/\epsilon_i$ จะทำให้ ϕ_B ขึ้นกับค่า E_m ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นไดโอดแบบช็อตต์กี้ภายในเงื่อนไขไบอัสย้อน ค่า E_m ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีความสม่ำเสมอของพาหะในเนื้อนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.9)

$$E_m = ((2qN_d/\epsilon_s)(V_d - kT/q))^{1/2} \qquad (2.9)$$

ซึ่ง $V_d = \phi_{B0} - \xi - V$

ตามรูปที่ 2.4 สมมุติให้ V=-20 Volts ในสารกึ่งตัวนำแกลเลี่ยมอาร์เซไนด์ที่มีความเข้มข้นของพาหะ 10^{15} cm^{-3} และชั้น interfacial layer ϕ_{B0} นั้นมีค่า 0.8 eV และให้ δ = 10 Å และ $\epsilon = 4\epsilon_o$ จะได้ αE_m = 4 meV ประมาณ 5% ของ ϕ_{B0} ในกรณีที่ $N_{ss} = 0$ ดังนั้นค่า ϕ_{B0} นั้นเป็นค่าเกิดขึ้นในเงื่อนไขที่ชั้น Interfacial layer บางที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้หรือว่าไม่มีเลย



รูปที่ 2.4 แผนภาพแถบพลังงานของผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่ถูกเสนอโดย Cowley และ Sze ภายใต้แรงดันไบอัสตามมีค่า V

กลไกของการแยกตัวของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากผิวของโลหะเข้าไปในเนื้อของสารกึ่งตัวนำ แต่ยังคงสภาวะสมดุลที่ผิวของโลหะจึงเกิดแรงดึงดูดเหมือนว่ามีประจุบวกเสมือนเกิดภายในโลหะ ซึ่งมีระยะห่างจากผิวของโลหะและสารกึ่งตัวนำในระยะเท่ากับระยะที่อิเล็กตรอนอยู่ห่างจากผิวและมีจำนวนประจุเท่ากันด้วย ถ้าผิวสัมผัสของโลหะมีสภาพเป็นตัวนำสมบูรณ์เส้นแรงของสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงขึ้นในเขตปลอดพาหะ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Image-force ซึ่งมีค่า

$$\Delta\phi_B = (qE_m/4\eta\epsilon'_s)^{1/2} \qquad (2.10)$$

ซึ่ง ϵ'_s คือ ค่า dynamic Permittivity ของสารกึ่งตัวนำ ปกตินั้นมีค่าน้อยกว่า Static permittivity ϵ_s

โดยค่า Image-force นั้นจะอยู่ในระดับต่ำกว่าแบร์เรียร์อยู่ประมาณ $\Delta\phi_B$ ตามสมการที่ (2.10) เราจะได้สมการเป็น

$$\phi_B = \phi_B^o - \alpha E_m - \Delta\phi_B \qquad (2.11)$$

หรือ

$$\phi_B = \phi_{Bo} - \Delta\phi_B \qquad (2.12)$$

ซึ่ง $\phi_{Bo} = \phi_B^o - \alpha E_m$ เป็นค่าแบร์เรียร์ที่มีไบอัสเป็นศูนย์และไม่มีผลของ Image-force ตามสมการที่ (2.7)

หากพิจารณาสมการที่ (2.3) ในแบบแบนราบ (Flatband) ของแถบพลังงาน พลังงานแบร์เรียร์ (Barrier energy) ที่เกิดระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี เราจะได้สมการที่ (2.12)

$$\phi_{B_n}^o + \phi_{B_p}^o = E_g \qquad (2.13)$$

เมื่อพิจารณาผลของ Interfacial layer และ Surface state เราจะได้สมการตามสมการที่ (2.13) ซึ่งเราสามารถใช้ในการทำนายค่าแบร์เรียร์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีได้ หากเราทราบค่าแบร์เรียร์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$\Phi_{Bno}+\Phi_{Bpo} = E_g \qquad (2.14)$$

ซึ่งค่า Φ_{Bno} และ Φ_{Bpo} เป็นค่าแบร์เรียร์ที่สภาวะไบอัสมีค่าเท่ากับศูนย์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีตามลำดับ