

รายงานผลการวิจัย

การศึกษาความสัมพันธ์ของกล้ามเนื้อของกล้ามเนื้อเออร์เซโนด์



ชบพล อังตร เสน

บรรยง โตประเสริฐพงศ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พฤษภาคม 2530

I10342217



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

การศึกษาผิวสัมผัสไอทีเอ็มของแกลสเสียมอาร์เซไนต์

โดย

ชুমพล อินทรเสน

บรรยง ไตรประเสริฐพงศ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พฤษภาคม 2530

01230

Project Title	Ohmic contacts to GaAs
Name of the Principal Investigator	Dr. Choopoi ANTARASENA
Name of the Co-Investigator	Assoc. Prof. Dr. Banyong TOPRASERTPONG
Month-Year	May 1987

Abstract

The ohmic contacts Ni/AuGe/GaAs (n) and AuZn/GaAs (p) have been fabricated and the suitable processing techniques have been developed since the properties of ohmic contact depend considerably on the choice of metallic layers, their thickness, the metal deposition condition, the surface preparation and heat treatment procedure. By Transmission Line Method (TLM), we can measure the ohmic contact resistivity and we obtained the linear I-V characteristics with the resistivity of $3 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}^2$. We also discuss deeply the thermal behavior of various components and show that gold is main metal which acts as a selective getter of gallium around GaAs surface, germanium and zinc are used as n-type and p-type dopants respectively and nickel can control gold-semiconductor interaction. From this point of view, we then propose the model of n^{++} layer formation. In such a case the depletion region in the semiconductor become so thin that, even in a high barrier, Field Emission (FE) dominates and the contact is ohmic. Finally, we mentioned some compound semiconductor devices using these ohmic contacts such as heterojunction bipolar transistors, semiconductor lasers and solar cells.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุมัติทุนรัชดาภิเษกสมโภช
ปีระจำปีงบประมาณ 2529 เพื่อสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณรัฐบาลฝรั่งเศสและรัฐบาลญี่ปุ่น ที่ได้บริจาคครุภัณฑ์หลัก
ให้แก่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จผลตามเป้า-
หมาย

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้
อำนวยความสะดวกเรื่องสถานที่ทำการวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณสมชัย รัตนธรรมพันธ์ ที่ได้ช่วยเหลือในการวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ร่วมงานทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัว-
นำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณบัณฑิตา รักรวิเศษ คุณศุภโชค ไทยน้อย และ คุณพัฒนา
ทันตวงศ์ ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณขวัญเรือน ชันทะกิตติ ที่ได้พิมพ์รายงานฉบับนี้

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทที่		หน้า
	บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	iii
	บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	iv
1	บทนำ	1
2	ทฤษฎีของผิวสัมผัสไอเท็มมิก	5
3	การคำนวณหาค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัส	12
4	การสร้างผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ	16
5	วิธีดำเนินการวิจัย	19
6	ผลการวิจัย	25
7	การอภิปรายผล	33
8	สรุปผลการวิจัย	38
9	ข้อเสนอแนะ	41
	เอกสารอ้างอิง	44

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ถ้าจะย้อนไปดูในอดีตถึงวิวัฒนาการของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ จะเห็นว่ามีפקเตอร์อยู่ 2 ประการที่เป็นตัวกำหนดได้แก่ เทคโนโลยีทางด้านการผลิตและชนิดของสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ อาจกล่าวได้ว่า ด้วยคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารในยุคของ Ge และ Si Ge มีข้อเด่นกว่าที่ผลตอบสนองเชิงความถี่ (ดูตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติ) แต่ด้วยข้อจำกัดทางเทคโนโลยี Si จึงขยับขึ้นมามีบทบาทที่เด่นกว่า Ge Si มีคุณสมบัติทางกลและทางความร้อนที่ดีกว่าของ Ge ยิ่งกว่านั้น ออกไซด์ของ Si เอง ยังมีส่วนพัฒนาเทคโนโลยีพลาสมาในอุตสาหกรรมทางด้านไอซีในช่วง 10 ปีหลังจากที่ผ่านมา

มาถึงยุคปัจจุบัน การสื่อสารโดยการใช้แสง (Optical Communication) และการสื่อสารดาวเทียมได้ทวีความสำคัญขึ้นเรื่อย ๆ ความต้องการสิ่งประดิษฐ์ที่มีคุณสมบัติทางแสงรวมทั้งผลตอบสนองเชิงความถี่มาก ๆ จึงเกิดขึ้น นักวิจัยยุคหลังจึงเบนความสนใจมาหาสารกึ่งตัวนำแบบสารประกอบ เช่น GaAs หรือ InP ด้วยเหตุผลที่ว่า

1. มีช่วงแถบพลังงานที่กว้างกว่า สิ่งประดิษฐ์จากสารประกอบกึ่งตัวนำจึงมีความสามารถในการทำงานที่อุณหภูมิสูง ๆ ได้สูงกว่า
2. มีความเร็วของพาหะสูงกว่า จึงมีผลตอบสนองเชิงความถี่ที่สูงกว่า
3. มีเทคโนโลยีที่เหมาะสมเฉพาะสารประกอบกึ่งตัวนำ (Epitaxy) สามารถสร้างหัวต่อเฮเทอโรเจอร์ (Heterojunction) ในสิ่งประดิษฐ์พวก LED, Semiconductor Lasers และ Transistors ได้

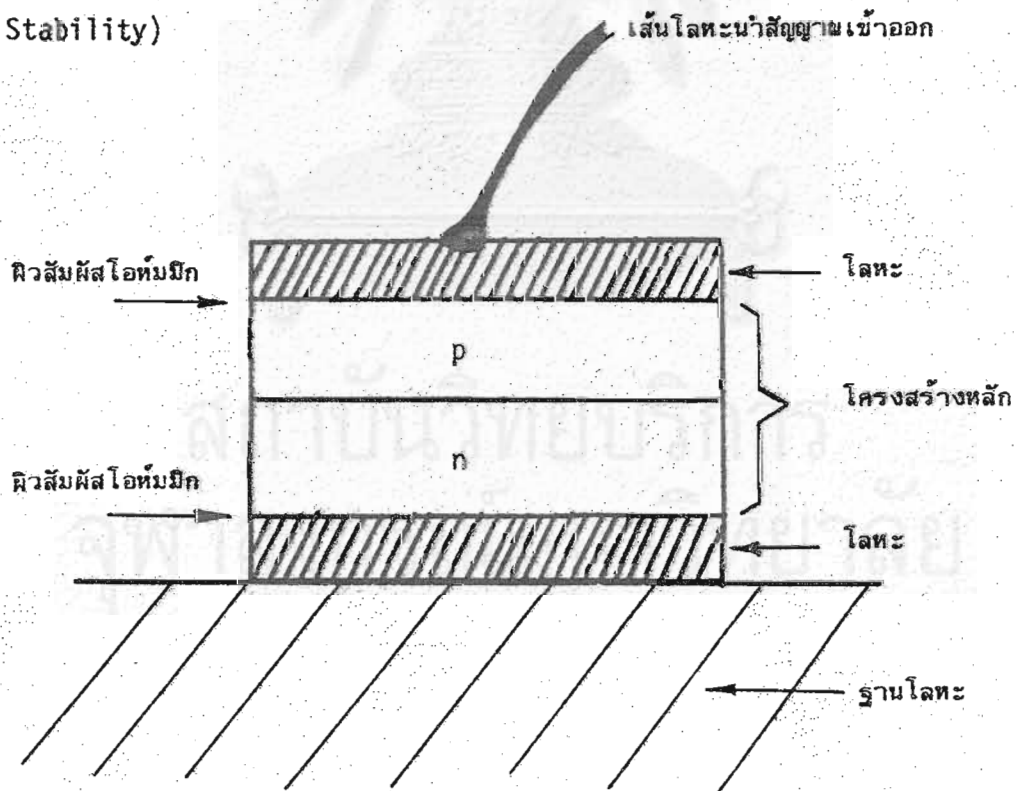
ข้อด้อยของสารประกอบกึ่งตัวนำ เช่น GaAs ก็คือ การเกิดออกไซด์โดยธรรมชาติที่ผิว ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่มีคุณภาพสูง ทั้งนี้เนื่องจากความยากในการสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิก ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนั้น คุณภาพของสิ่งประดิษฐ์จะดีหรือเลวขึ้นอยู่กับขั้นตอนพื้นฐาน 2 ขั้นตอน คือ

1. การสร้างโครงสร้างหลัก ตัวอย่างเช่น ไดโอด (Diodes) จะประกอบด้วยชั้นสารกึ่งตัวนำอย่างน้อย 2 ชั้น คือ ชั้นพี (p) และชั้น (n) ส่วนเทคโนโลยีที่ใช้สร้างอาจเป็น Epitaxy หรือ Diffusion ก็ได้
2. การสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic Contacts) หลังจากการสร้างโครงสร้างหลักจะต้องมีวิธีการที่จะดึงเอาสัญญาณไฟฟ้าในรูปของกระแสและแรงดันออกมาใช้งาน

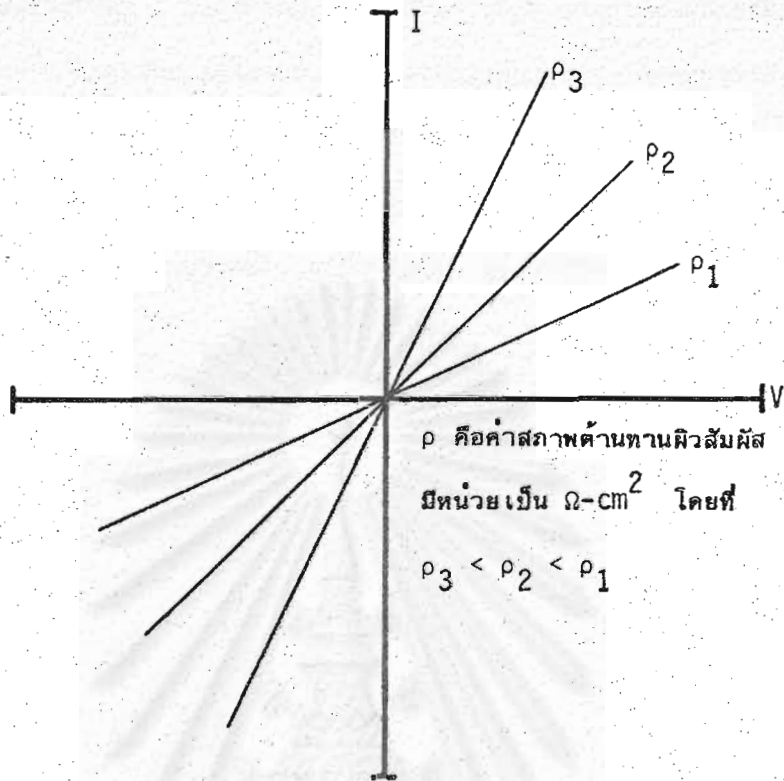
ซึ่งวิธีการนั้นทำได้โดยการสร้างชั้นโลหะบาง ๆ ลงบนผิวหน้าของชั้นของโครงสร้างหลัก แล้วต่อเส้นโลหะเพื่อนำสัญญาณไฟฟ้าเข้าออก (ตามรูปที่ 1) ถ้าลักษณะสมบัติของผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำไม่เปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของโครงสร้างหลัก (กล่าวคือ มีความเป็นเชิงเส้น) ผิวสัมผัสนี้จะเรียกว่า ผิวสัมผัสโอห์มมิก ซึ่งความเป็นผิวสัมผัสโอห์มมิกมากหรือน้อยถูกกำหนดโดย ชนิดของสารกึ่งตัวนำ ความเข้มข้นของสารเจือปน ชนิดของโลหะ และอุณหภูมิที่ใช้ในการ Anneal

ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของผิวสัมผัสโอห์มมิกจะต้องมีคุณสมบัติ 5 ข้อต่อไปนี้

1. แรงดันตกคร่อมผิวสัมผัสจะต้องน้อยกว่าแรงดันตกคร่อมโครงสร้างหลักมาก ๆ (กล่าวคือ ความต้านทานของผิวสัมผัสต้องน้อย)
2. นำไฟฟ้าได้ดีเท่ากันทั้ง 2 ทิศทาง (ตามรูปที่ 2)
3. มีความเป็นเชิงเส้นสูง (95-100%)
4. ไม่มีความสามารถในการฉีดพาหะข้างน้อย
5. ลักษณะสมบัติจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา (Reliability และ Stability)



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างหลักของไดโอดพร้อมผิวสัมผัสโอห์มมิก



รูปที่ 2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันผิวสัมผัสโอห์มมิก

ตารางที่ 1

	Ge	Si	InP	GaAs
ความกว้างแถบพลังงาน (eV)	0.67	1.1	1.3	1.43
ความคล่องตัว ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	4,000	1,500	5,000	8,500
การนำความร้อน ($\text{W}/\text{cm}^{\circ}\text{K}$ ที่ 300°K)	0.7	1.45	0.7	0.5

ซึ่งลักษณะสมบัติทั้ง 5 ข้อที่กล่าวมานี้ จะสามารถมีได้อย่างครบถ้วนก็ต่อเมื่อสามารถควบคุมกรรมวิธีผลิตผิวสัมผัสไอท่อมิกได้อย่างถูกต้องทุกขั้นตอน ตั้งแต่การเลือกความเข้มข้นของสารเจือปน ชนิดของโลหะที่ใช้ การทำความสะอาดผิวแว่นผลึก การขจัดออกไซด์ที่ผิว เทคนิคการฉาบผิว (Evaporation) และ เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนัล (Anneal) ซึ่งจะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อวิธีการวิจัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

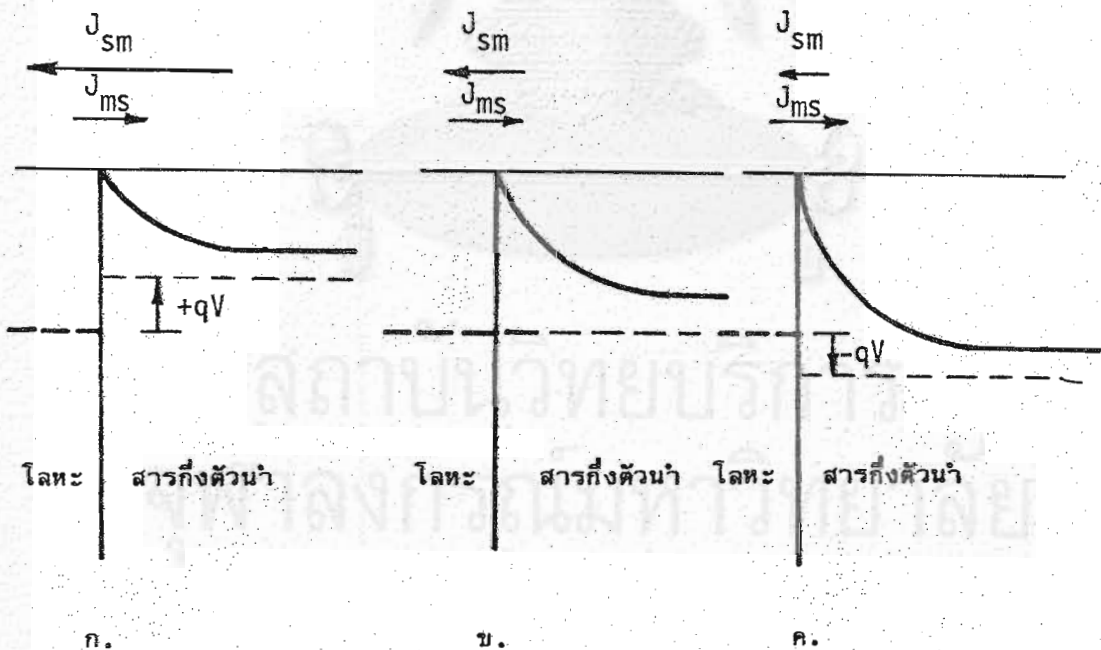
ทฤษฎีของผิวสัมผัสไอทึมิก

ในรายงานฉบับนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานทฤษฎีที่จำเป็นเท่านั้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจ
ในกระบวนการถ่ายเทของพาหะผ่านหัวต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

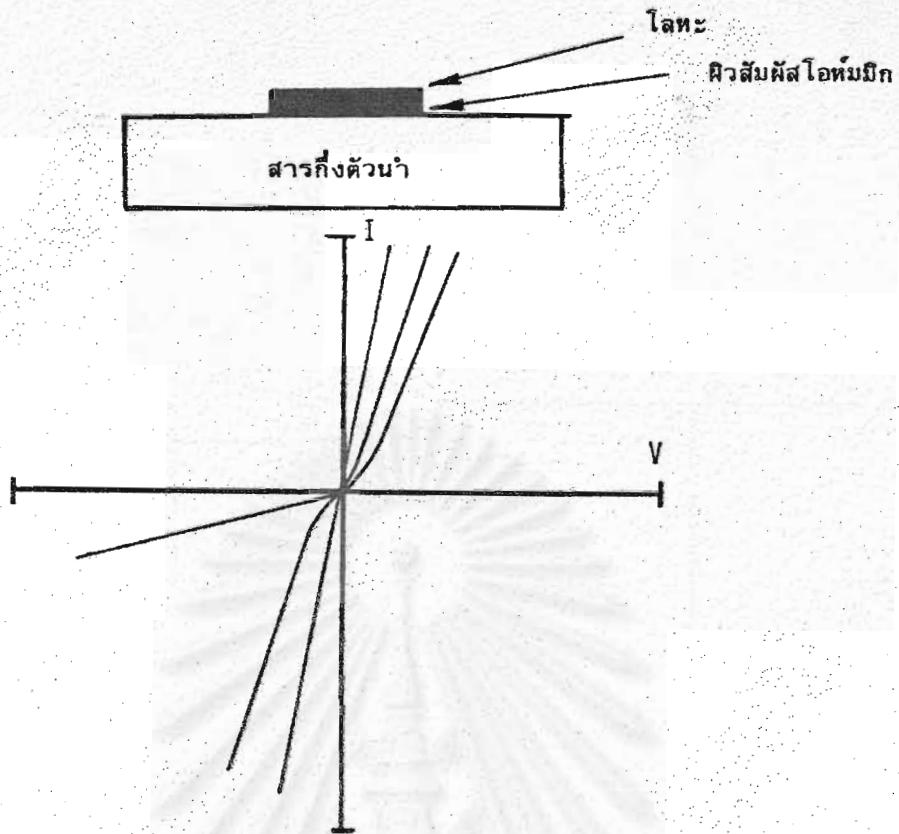
จากการทดลองสร้างหัวต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ส่วนใหญ่แล้ว พบว่าการนำกระแส
ของหัวต่อจะเป็นแบบเรียงกระแส (Rectification) กล่าวคือ จะนำกระแสได้ดีทางหนึ่ง
และจะปิดกั้นการไหลของกระแสในทิศตรงกันข้าม ทั้งนี้เนื่องจากเกิดกำแพงพลังงานศักย์ขึ้น
ที่หัวต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำ คล้าย ๆ กับ หัวต่อพี-เอ็น ซึ่งกระบวนการนำกระแสของหัวต่อ
แบบเรียงนี้ดูได้จากรูปที่ 3 ส่วนรูปที่ 4 แสดงลักษณะสมบัติของหัวต่อแบบเรียงกระแส

กระบวนการนำกระแสของหัวต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำแท้ที่จริง ประกอบด้วยกระบวนการ
การย่อย ๆ 3 กระบวนการ กล่าวคือ

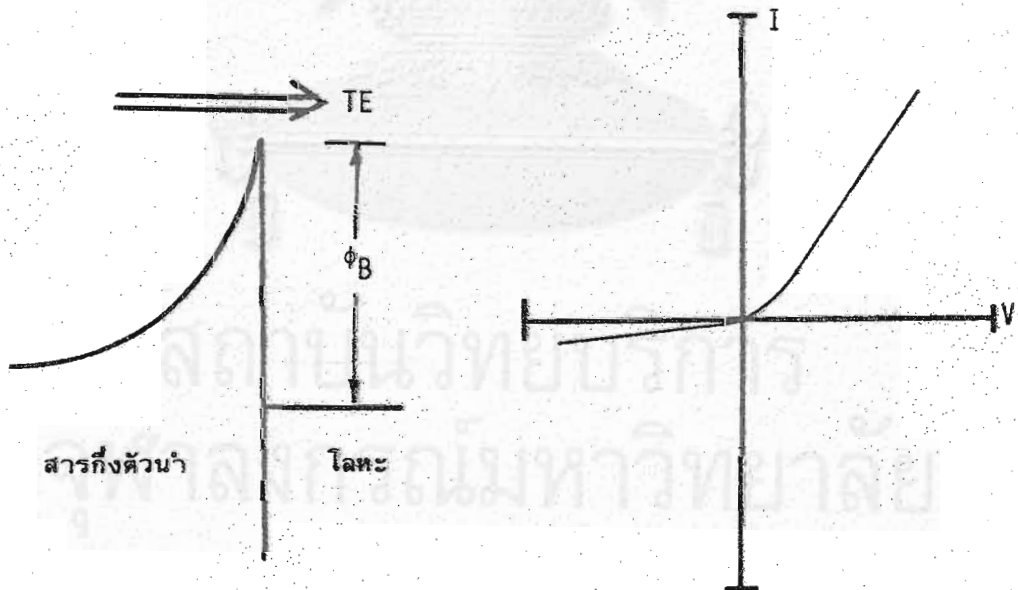
1. กระบวนการ Thermionic Emission (TE) ตามรูปที่ 5 ซึ่งพาหะจะ
ต้องกระโดดข้ามกำแพงพลังงานศักย์ให้ได้ เพื่อไหลผ่านหัวต่อ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการ
หลักของ หัวต่อแบบเรียง (Rectifying Contacts)



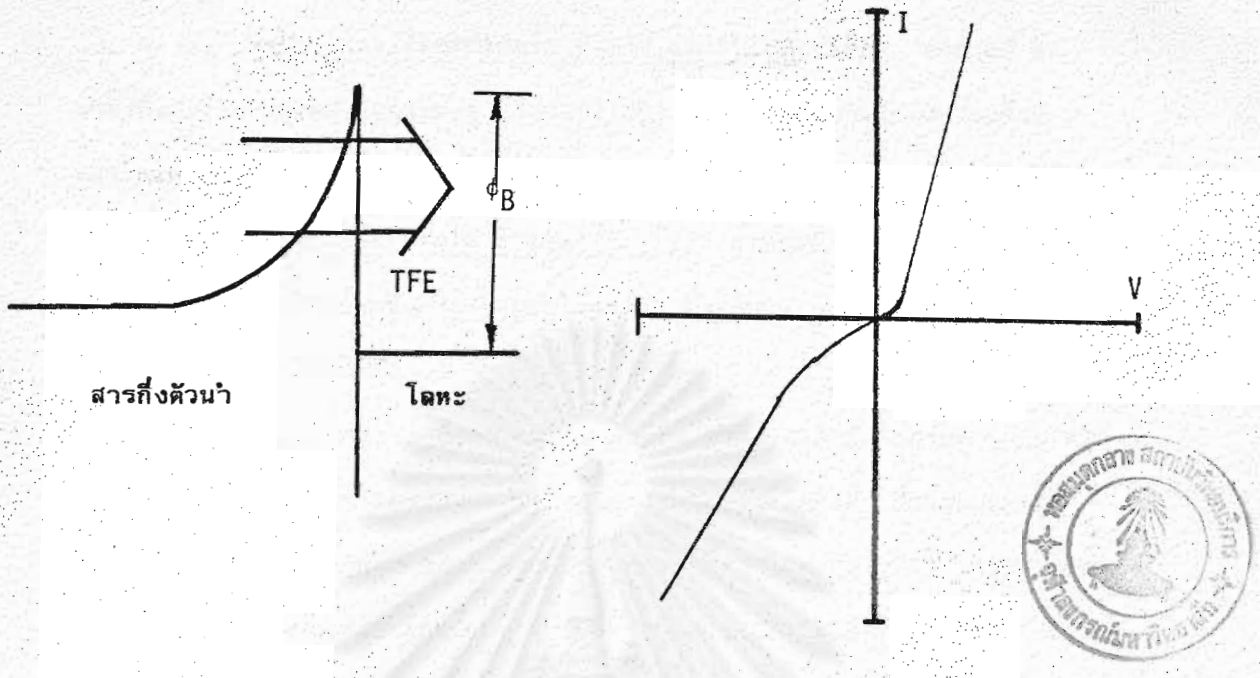
รูปที่ 3 กระบวนการนำกระแสของหัวต่อแบบเรียง ก. โบนอสเดินหน้า ข. โนโบนอส
ค. โบนอสกลับทาง



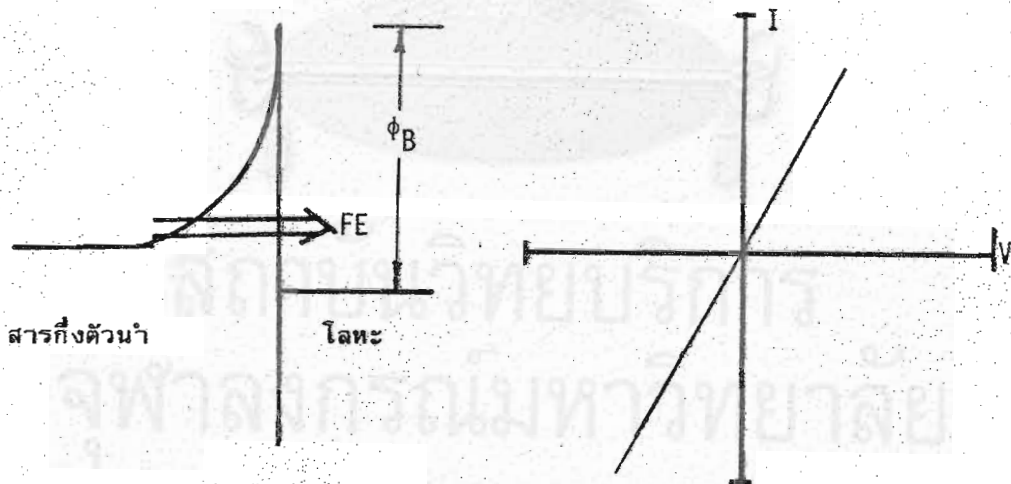
รูปที่ 4 โครงสร้างหัวค่อ และลักษณะสมบัติการนำกระแสของหัวค่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำ โดยทั่ว ๆ ไป



รูปที่ 5 Thermionic Emission (TE) และลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของหัวค่อ



รูปที่ 6 Thermionic Field Emission (TFE) และลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของหัวต่อ



รูปที่ 7 Field Emission (FE) และลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของหัวต่อ

2. กระบวนการ Thermionic Field Emission (TFE) ตามรูปที่ 6 พาทะซึ่งมีพลังงานสูงพอจะเจาะทะลุ (Tunneling) กำแพงพลังงานศักย์ส่วนบนซึ่งแคบแล้วไหลผ่านหัวต่อไป

3. กระบวนการ Field Emission (FE) ตามรูปที่ 7 พาทะสามารถเจาะทะลุกำแพงไปได้ ถ้าผนังกำแพงถูกทำให้แคบพอ ซึ่งเป็นกระบวนการหลักของผิวสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic Contacts)

กระบวนการนำกระแสทั้ง 3 กระบวนการนี้ สามารถเกิดขึ้นได้พร้อม ๆ กัน หรือไม่ก็อาจจะมีการบวนการใดกระบวนการหนึ่งเป็นกระบวนการหลักก็ได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (Temperature) ความสูงของกำแพงพลังงานศักย์ (Barrier Height) ความเข้มข้นของสารเจือปนในแวนผลึกสารกึ่งตัวนำ (Doping Concentration Profile) มวลประสิทธิผลของพาหะไฟฟ้า (Charge Carriers Effective Mass) และค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) นอกจากนี้ยังมีแฟคเตอร์อื่น ๆ อีก เช่น ลักษณะของผิวสัมผัส และโครงสร้างของโลหะผสม (Alloy) หลังจากการอบ (Anneal)

เราสามารถนิยามคุณสมบัติของผิวสัมผัสโอห์มมิก ด้วยค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัส (ρ_C , Contact Resistance) ตามสมการ

$$\rho_C = \left(\frac{\partial I}{\partial V} \right)_{V=0}^{-1} \quad (1)$$

หรือ

$$\rho_C = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} R_C \Delta S \quad (2)$$

เมื่อ R_C คือ ความต้านทานรวม

S คือ พื้นที่ของผิวสัมผัส

Yu (1) ได้แสดงค่าของ ρ_C ในรูปของสมการซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของหัวต่อ ในทุกกระบวนการที่กล่าวมาแล้ว พบว่าค่า ρ_C จะขึ้นกับ

$$\exp \frac{\phi_B}{E_{\infty}} \quad \text{สำหรับกระบวนการ FE} \quad (3)$$

$$\exp \left[\frac{\phi_B}{E_{00} \coth \left(\frac{E_{00}}{kT} \right)} \right] \quad \text{สำหรับกระบวนการ TFE} \quad (4)$$

และ

$$\exp \frac{\phi_B}{kT} \quad \text{สำหรับกระบวนการ TE} \quad (5)$$

ซึ่ง ϕ_B คือ ความสูงของกำแพงพลังงานศักย์

E_{00} คือ ค่าที่บอกความสามารถของพาทะในการทะลุทะลวงผ่านกำแพงพลังงาน ซึ่งถูกกำหนดด้วยค่าคงที่ต่าง ๆ ตามสมการ

$$E_{00} = \frac{qh}{2} \sqrt{\frac{N_{D.A.}}{m^* \epsilon}} \quad (6)$$

โดยที่

m^* คือ ค่ามวลประสิทธิผลของพาทะ

ϵ คือ Permittivity

$N_{D.A.}$ คือ จำนวนสารเจือปน

q คือ ประจุอิเล็กตรอนิกส์

h คือ ค่าคงตัว Planck

E_{00} เป็นค่าที่มีประโยชน์มาก สามารถใช้บอกลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของผิวสัมผัสไอทึมบิกได้ กล่าวคือ เมื่อ $\frac{kT}{E_{00}} \gg 1$ กระบวนการหลักคือ Thermionic Emission ทั่วๆไปจะมีลักษณะสมบัติเป็นแบบเรียงกระแส เมื่อ $\frac{kT}{E_{00}} \ll 1$ กระบวนการหลักคือ Field Emission ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เป็นแบบไอทึมบิก ส่วนในช่วงที่ $\frac{kT}{E_{00}} \approx 1$ กระบวนการหลักคือ TFE

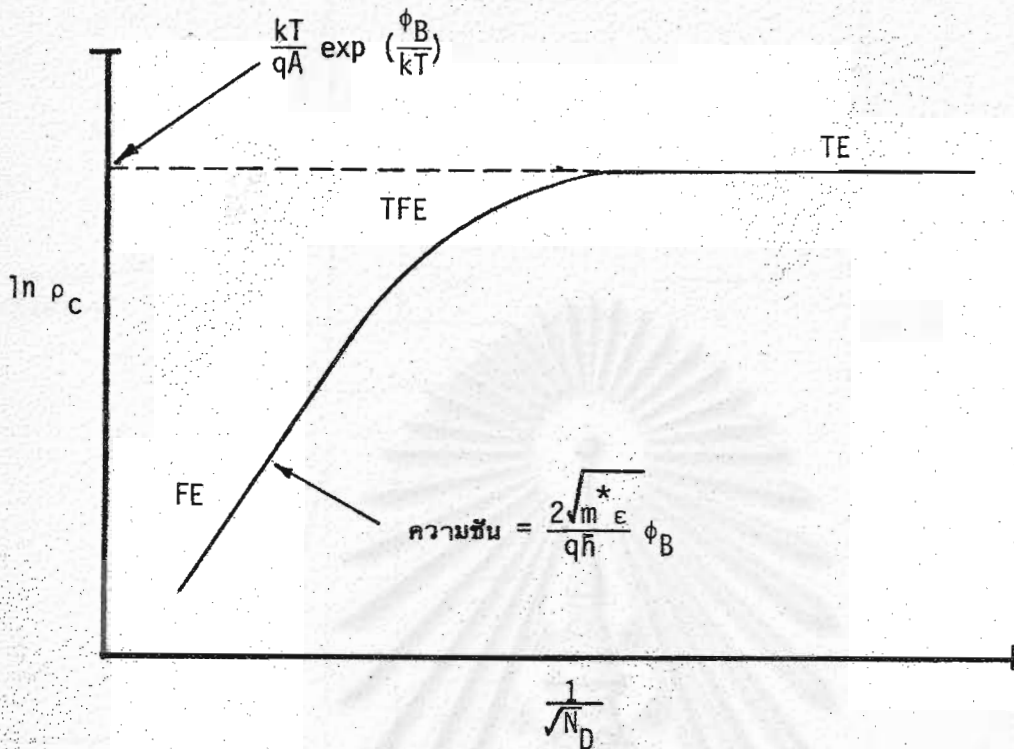
ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานผิวสัมผัสกับระดับความเข้มข้นของสารเจือปน

ในสารกึ่งตัวนำ และความสูงของกำแพงพลังงานศักย์แสดงได้ตามรูปที่ 8 ในช่วง FE

(ระดับความเข้มข้นของสารเจือปนในสารกึ่งตัวนำสูง กล่าวคือ $N_D > 5 \times 10^{17} \text{ e/cm}^2$

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น -GaAs) ค่า $\log \rho_c$ จะเป็นพหุภาคตรงกับ $(N_{D.A.})^{-1/2}$

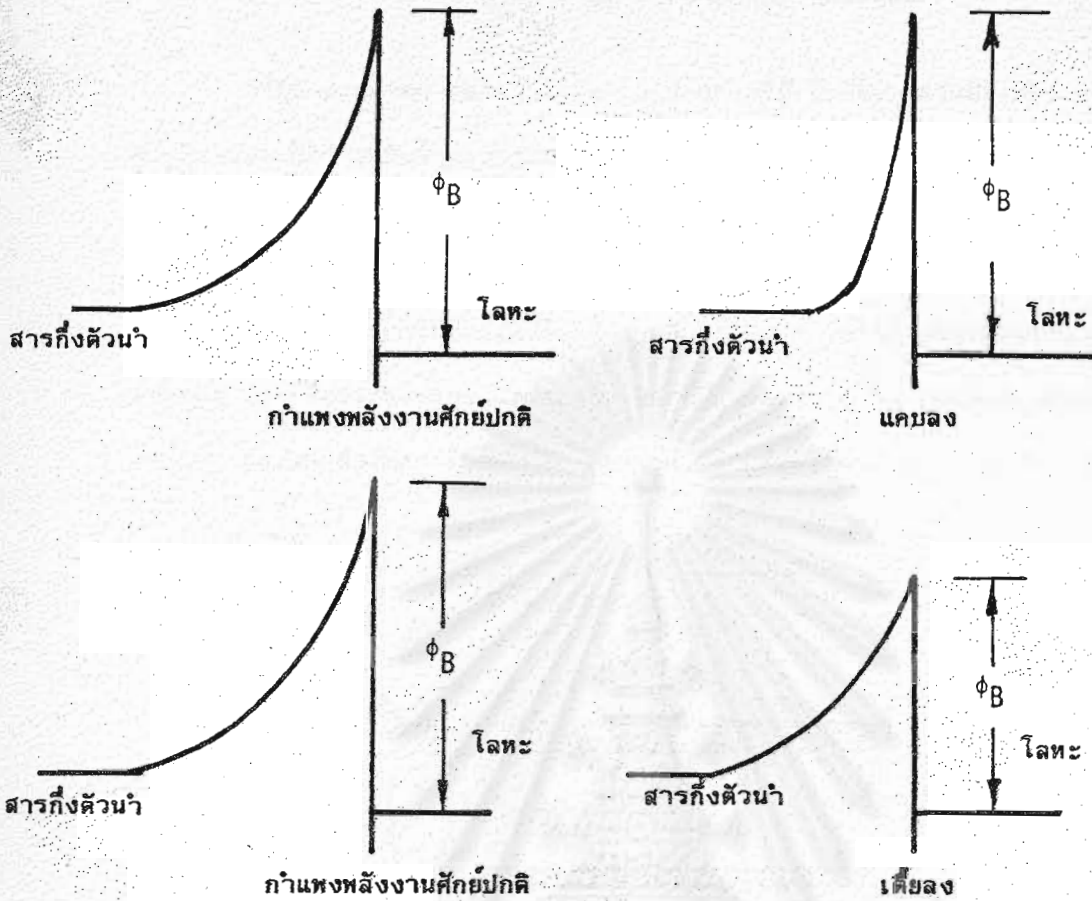
ด้วยความชัน $\frac{2\sqrt{m^* \epsilon}}{qh} \phi_B$ ในช่วง TE (ระดับความเข้มข้นของสารเจือปนต่ำ คือ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานผิวสัมผัสกับระดับความเข้มข้นของสารเจือปน ในช่วงต่าง ๆ

$N_D < 10^{16} \text{ e/cm}^3$) ρ_c มีค่าเท่ากับ $\frac{k}{qAT} \exp\left(\frac{\phi_B}{kT}\right)$ และไม่ขึ้นกับระดับความเข้มข้นของสารเจือปนในชั้นสารกึ่งตัวนำนั้น ส่วนช่วง TFE จะเชื่อมต่อระหว่าง FE กับ TE TE กับ TFE จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (ρ_c มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น) ในขณะที่ FE ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

จะเห็นได้ว่าผิวสัมผัสไอทึมมิโกอาศัยกระบวนการ Field Emission เป็นหลัก ซึ่งพาหะไฟฟ้าสามารถทะลุทะลวงผ่านกำแพงพลังงานศักย์ไปได้ ส่วนวิธีการนั้นทำได้โดยการสร้างกำแพงพลังงานศักย์ที่บางพอที่พาหะจะวิ่งทะลุผ่านไป หรือไม่ก็สร้างกำแพงพลังงานศักย์ที่แคบพอที่พาหะจะเจาะทะลุส่วนยอดของกำแพงซึ่งบางไปได้ (ดังรูปที่ 9) การสร้างกำแพงพลังงานศักย์แคบ ๆ ทำได้โดยการใช้สารกึ่งตัวนำที่ชั้นผิวหน้า (ซึ่งจะฉาบด้วยโลหะ) มีความเข้มข้นของสารเจือปนสูงพอ ($N_{D,A}$ สูงพอ) หรือถ้ากำแพงยังไม่บางพอให้ใช้เทคนิคการอบ (Anneal) วนผลึกด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic)



รูปที่ ๑ วิธีการสร้างเงื่อนไขให้เกิด Field Emission

ก็จะสามารถสร้างกำแพงพลังงานศักย์ที่แคบพอได้ วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งจะกล่าวละเอียดในหัวข้อถัดไป ส่วนวิธีลดความสูงของกำแพงพลังงานศักย์นั้น ทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงระดับ Fermi ที่ถูกกำหนดด้วยสถานะภาพผิว (Surface State) เมื่อสถานะภาพผิวเปลี่ยนแปลง ระดับ Fermi ย่อมเปลี่ยนแปลง ยกตัวอย่างเช่น ผิวหน้า GaAs ที่ถูกทำให้มีตัวอ้วยไฮของ H_2S ก่อนฉาบผิวโลหะ ความสูงของกำแพงพลังงานศักย์จะลดจาก 0.8 มาเป็น 0.4 eV ที่ระดับความเข้มข้นของสารเจือปน 10^{18} cm^{-3} ความยุ่งยากของวิธีนี้ก็คือความแน่นอนในการควบคุมสถานะภาพผิวให้ได้ตามความต้องการ

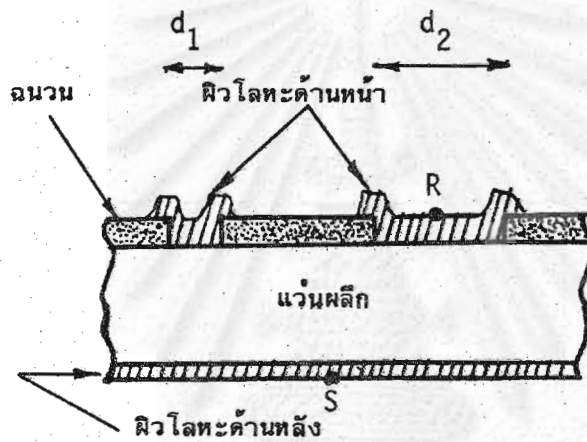
บทที่ ๓

การคำนวณหาค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัส

มีวิธีวัดค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัส (ρ_c) หลายวิธี ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง 2 วิธี ซึ่งเป็นวิธีการวัดที่นิยมกันอยู่ในปัจจุบัน

1. วิธีของ COX และ Strack

เหมาะสำหรับกรณีที่กระแสไหลตั้งฉากกับผิวสัมผัสฯ ใช้โครงสร้างผิวสัมผัสไอทม์มิก ตามรูปที่ 10 ซึ่งประกอบด้วย แถวของขั้วโลหะที่มีขนาดต่าง ๆ กัน (ปกติเป็นวงกลม) อยู่ ด้านหน้า และแถวผิวโลหะเต็มด้านหลัง ความต้านทานที่วัดได้จากจุด 2 จุด เช่น จุด R



รูปที่ 10 โครงสร้างผิวสัมผัสไอทม์มิก เมื่อวัดค่า ρ_c ตามวิธีของ COX และ Strack

และ S ในรูป เป็นความต้านทานรวม ซึ่งมีค่าตามสมการ

$$R_{T_i} = \frac{\rho_B}{\pi d_i} \tan^{-1} \left(\frac{4t}{d_i} \right) + \frac{4\rho_c}{\pi d_i^2} + R_0 \quad (7)$$

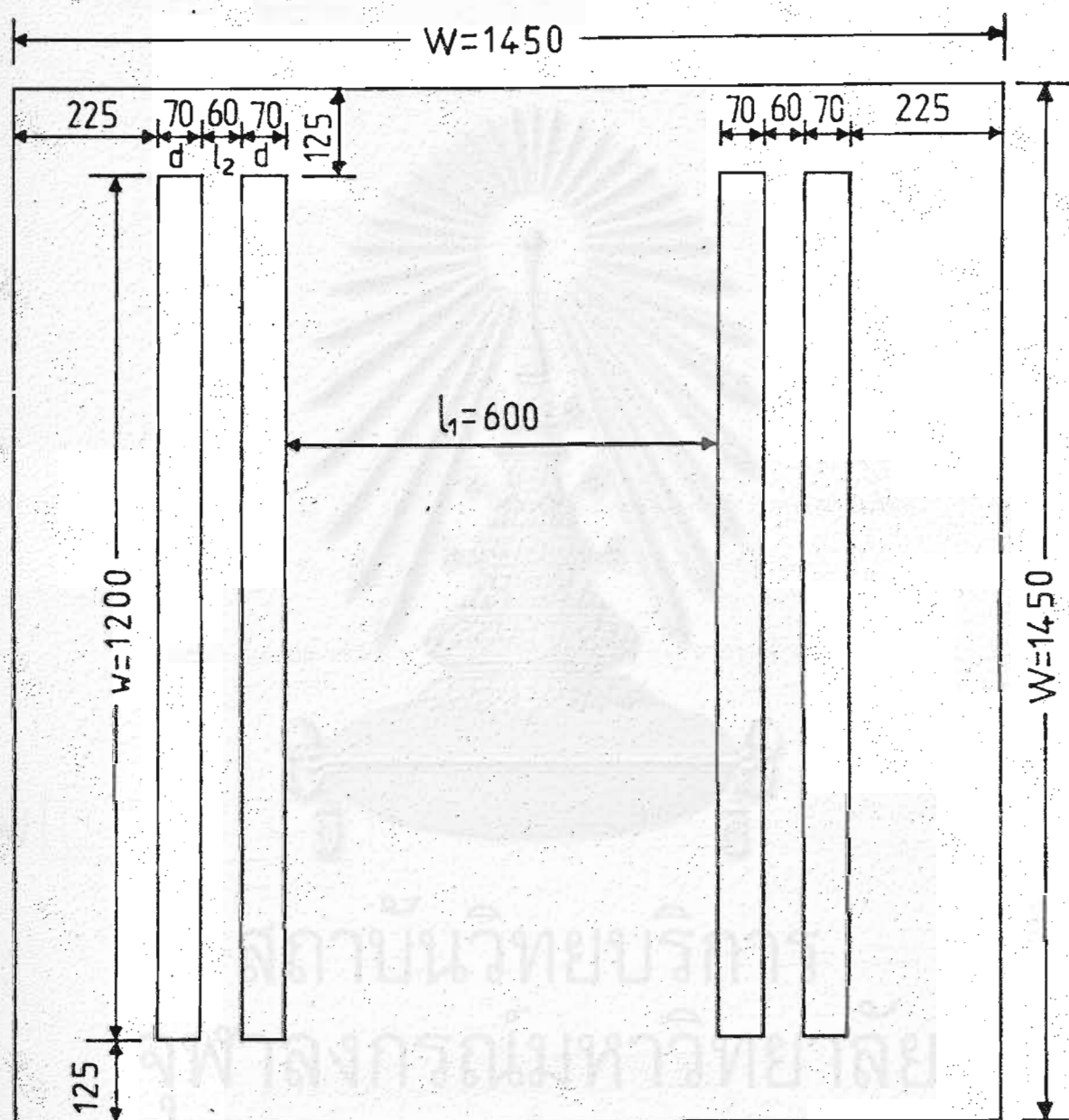
= Spreading Resistance + Contact Resistance
+ Back sided Resistance

เมื่อ d_i คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของผิวสัมผัสฯ ซึ่งมีค่าต่าง ๆ กันไป

ρ_B คือ Spreading Resistance ของแวนผลึก

R_0 คือ ความต้านทานด้านหลัง

และโดยการเขียนรูปกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R_T กับ d เราจะหาค่า ρ_c ได้



รูปที่ 11 แผนภาพผิวสัมผัสไอท์มิกแบบ 4 Contacts ขนาดเป็นไมครอน

2. Transmission Line Method (TLM)

เป็นวิธีที่เหมาะสมกับผิวสัมผัส ที่ใช้ในสิ่งประดิษฐ์หลายอย่าง มีโครงสร้างของขั้วโลหะ
 ตามรูปที่ 11 โดยอาศัย Transmission Line Model (2) ตามรูปที่ 12 สามารถ
 คำนวณหาค่า ρ_c จาก (3)

$$R_C = \frac{V_2}{I} - \left(\frac{\ell_1 + \frac{d}{2}}{\ell_1 + d} \right) \frac{V_1}{I} \tag{8}$$

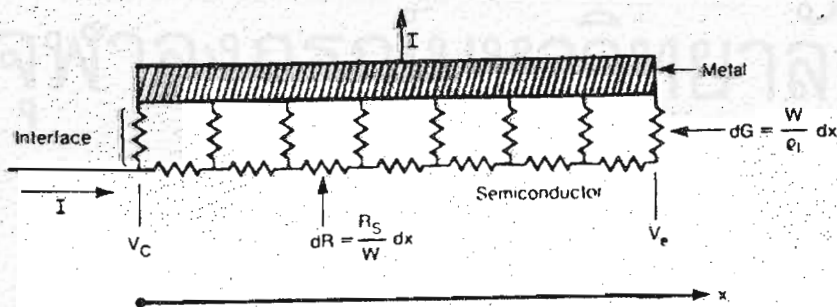
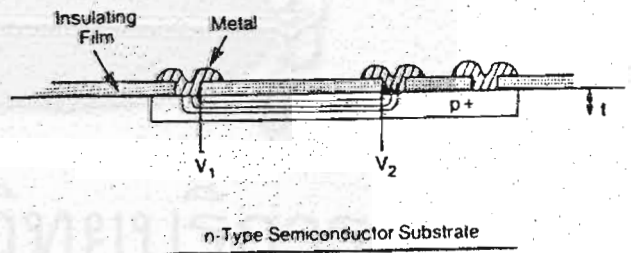
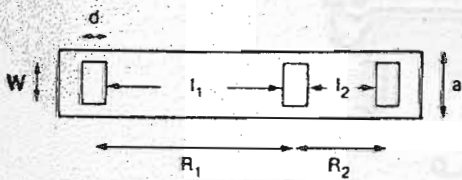
$$R_T = \frac{V_3}{I} \tag{9}$$

$$\rho_c = \frac{\sqrt{R_C^2 - R_T^2} w.d}{\cosh^{-1} \frac{R_C}{R_T}} \tag{10}$$

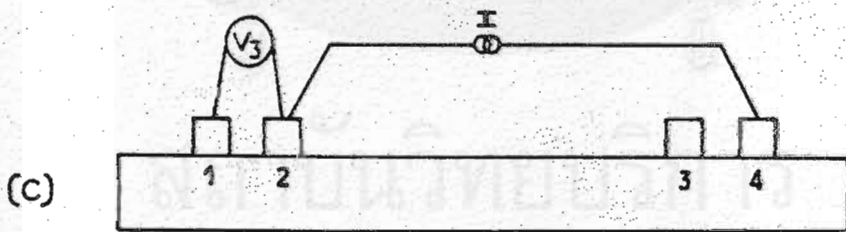
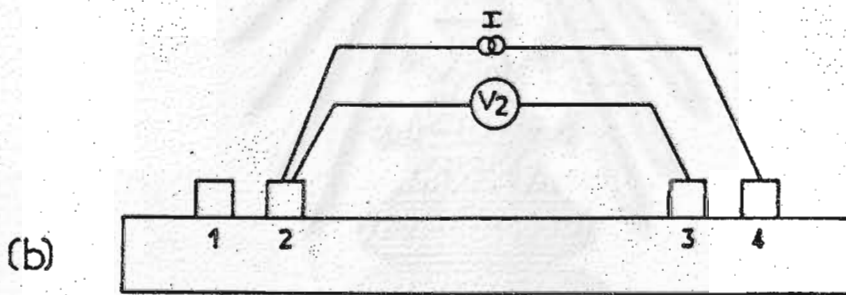
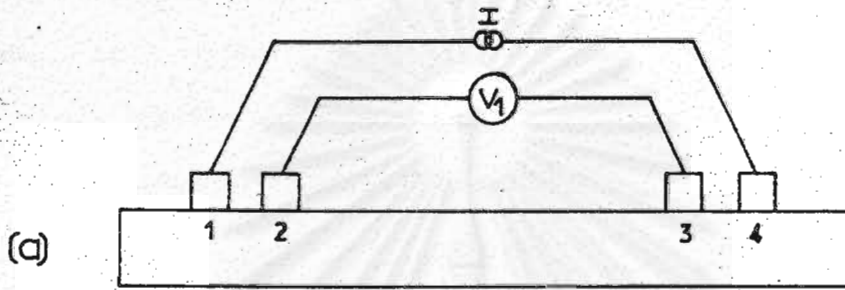
โดยที่ ℓ_1, ℓ_2, w, d เป็นขนาดของขั้วโลหะมีหน่วยเป็นไมครอน

V_1, V_2, V_3 และ I คือค่าแรงดันและกระแสที่ใช้วัดค่า ρ_c

สำหรับขั้นตอนการวัดค่า $\frac{V_1}{I}, \frac{V_2}{I}$ และ $\frac{V_3}{I}$ ดูได้จากรูปที่ 13



รูปที่ 12 Transmission Line Model



รูปที่ 13 ขั้นตอนการหาค่า $\frac{V_1}{I}$, $\frac{V_2}{I}$ และ $\frac{V_3}{I}$



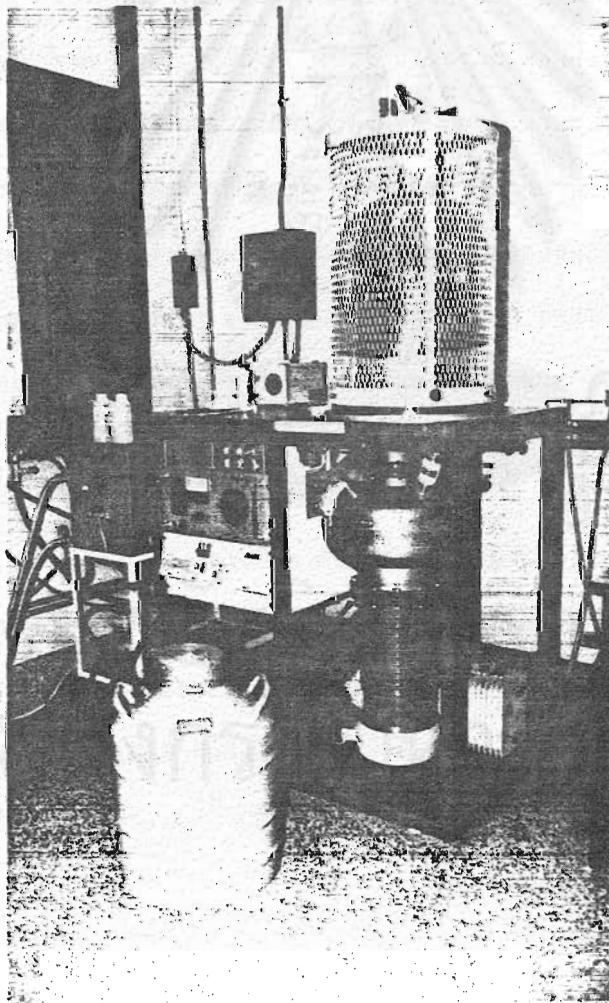
บทที่ 4

การสร้างผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

ดังได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่า ผิวสัมผัสไอทึมมีกาศัยกระบวนการ Field Emission โดยพาหะวิ่งทะลุทะลวงผ่านกำแพงพลังงานศักย์ และกล่าวว่า การทะลุทะลวงจะเป็นไปได้ ก็ต่อเมื่อกำแพงพลังงานศักย์บางพอ

ในทางปฏิบัติ เงื่อนไขที่เอื้ออำนวยให้ได้ตามความต้องการข้างต้นนั้น ขึ้นกับองค์ประกอบ 2 อย่าง กล่าวคือ

1. โลหะที่ใช้ และวิธีการฉาบผิว
2. ระดับความเข้มข้นของชั้นสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 14 Filament Evaporation

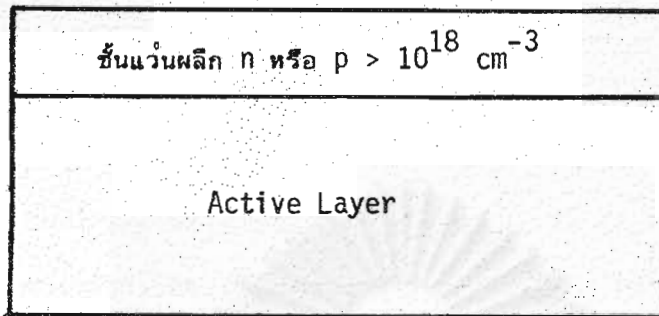
4.1 โลหะที่ใช้ และวิธีการฉาบผิว

โลหะที่ใช้ในการสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิกจะเป็นโลหะผสมประกอบด้วย 2 ส่วน คือ โลหะที่เป็นตัวทำละลาย ร่วมกับโลหะที่ทำหน้าที่เป็นสารเจือปน โลหะที่เป็นตัวทำละลาย ยกตัวอย่างเช่น ทอง (Au) และเงิน (Ag) ส่วนโลหะที่เป็นสารเจือปนจะขึ้นกับชนิดของ สารกึ่งตัวนำ ถ้าเป็นชนิดเอ็น โลหะที่ใช้จะเป็น Te, Se, Si, Ge หรือ Sn ส่วนชนิด พี โลหะที่ใช้จะเป็น Zn หรือ Be นอกจากนี้อัตราส่วนการผสมระหว่างโลหะหลักกับโลหะ สารเจือปนก็เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญ

ส่วนวิธีการฉาบผิวโลหะที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ Filament Evaporation ดัง รูปที่ 14 โดยโลหะที่ถูกใช้จะถูกใส่ลงไปในเบ้าซึ่งทำด้วยโลหะ W หรือ Mo ทั้งหมดนี้จะถูก บรรจุอยู่ในระบบสุญญากาศ $\sim 10^{-6}$ Torr เมื่อผ่านกระแสค่าสูงผ่านเบ้าจนเบ้าร้อนแดง และอุณหภูมิสูงถึงจุดที่โลหะสามารถกลายเป็นไอที่ความดันนั้น ไอโลหะจะพุ่งออกไปด้วยพลังงานจลน์ไปเกาะติดอยู่บนแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ สำหรับคุณภาพของงานที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับความสะอาดของผิวแผ่นผลึก อัตราการพุ่งของไอโลหะ และคุณภาพของสุญญากาศ ส่วนวิธีการ ฉาบผิวโลหะแบบอื่น ๆ ที่นิยมรอง ๆ ลงมาก็มี เช่น Electron Beam Evaporation และ Sputtering เป็นต้น วิธีการหลัง ๆ นี้ค่อนข้างจะแพงและยุ่งยาก

4.2 ระดับความเข้มข้นของชั้นสารกึ่งตัวนำ

เพื่อให้ค่าแรงแพงพลังงานศักย์บางที่สุด ดังนั้นชั้นสารกึ่งตัวนำที่จะนำมาสร้างผิวสัมผัส โอห์มมิก ควรจะเลือกเฉพาะที่มีความเข้มข้นสารเจือปนสูง ๆ แต่ในทางปฏิบัติชั้น สารกึ่งตัวนำมักจะใช้ Active Layer ที่มีความเข้มข้นของสารเจือปนค่าประมาณ 10^{16} - 10^{17} cm^{-3} ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดผิวสัมผัสโอห์มมิกได้ ดังนั้นจึงต้องสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีความเข้มข้นของสารเจือปนมากกว่า 10^{18} cm^{-3} ก่อนที่จะฉาบผิวด้วยโลหะดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 แสดงชั้นแฉกที่มีความเข้มข้นของสารเจือปนมากกว่า 10^{18} cm^{-3} ซึ่งต้องสร้างขึ้นก่อนการฉาบด้วยโลหะ

ส่วนวิธีการนั้นอาจจะใช้ Diffusion, Ion Implantation หรือ Epitaxy ก็ได้ แล้วแต่ความเหมาะสม หลังจากฉาบผิวโลหะลงบนชั้นสารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นแล้ว ผิวสัมผัสจะต้องผ่านการ Anneal เพื่อให้เกิดชั้นสารกึ่งตัวนำที่ผิวสัมผัสมีความเข้มข้นของสารเจือปนมากกว่า $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ขึ้นไป อาจได้ถึง 10^{20} cm^{-3} แล้วแต่ความเข้มข้นของสารเจือปนของชั้นสารกึ่งตัวนำเริ่มต้นมีมากน้อยแค่ไหน ส่วนทำไมหรือเพราะเหตุใด สารกึ่งตัวนำจึงมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จะกล่าวละเอียดในหัวข้ออภิปรายผล

สถาบันแพทย์บริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

วิธีดำเนินการวิจัย

5.1 เงื่อนไขวัสดุเริ่มต้น

1. โลหะที่ใช้ คือ AuGe + Ni สำหรับ AuGe ผสมกันในอัตราส่วน (88.12%)

ใช้กับแวนผลิกชนิด n

AuZn สำหรับแวนผลิกชนิด p ส่วนผสม 95.5% Au

2. แวนผลิกที่ใช้มีความเข้มข้นของสารเจือปนประมาณ 10^{18} cm^{-3}

5.2 ขั้นตอนการผลิต

รายละเอียด และขั้นตอนการผลิต จะแสดงเป็นข้อ ๆ พร้อมกับสรุปเป็น Flow Chart ในตอนท้าย

1. เตรียมแวนผลิก แวนผลิก GaAs ทั้งชนิด n และชนิด p จะต้องทำความสะอาดผิวก่อน ทั้งนี้เนื่องจากอาจจะมียุคออกไซด์บาง ๆ ของ GaO เกิดขึ้น นอกจากนี้อาจจะเป็นรอยขีดข่วนต่าง ๆ บนผิว สำหรับขั้นตอนการเตรียมแวนผลิกนั้นเป็นวิธีการทางเคมี ซึ่งแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2

2. ฉาบผิวโลหะ โดยใช้ Filament Evaporation ดังในรูปที่ 14 ภายใต้อุณหภูมิ 10^{-6} Torr

แวนผลิกชนิด n ฉาบ AuGe หนา 2000 Å ตามด้วย Ni หนา 500 Å

แวนผลิกชนิด p ฉาบ AuZn หนา 2000 Å

3. ถ่ายแบบผิวสัมผัสอินทรีย์แบบ 4 Contacts ด้วย Mask 4 Contacts ซึ่งได้เตรียมเอาไว้แล้วในตอนต้น โดยใช้ Mask Aligner ดังรูปที่ 16 สามารถถ่ายแบบ Photoresist ลงบนผิวหน้าโลหะได้ เพื่อใช้เป็นหน้ากากป้องกันการกัด (Etch) ของสารเคมี สำหรับขั้นตอนโดยละเอียดมีดังต่อไปนี้

- 3.1 ล้างแวนผลิกที่ฉาบผิวโลหะแล้วด้วย Trichloethylene, Acetone
H₂O-DI

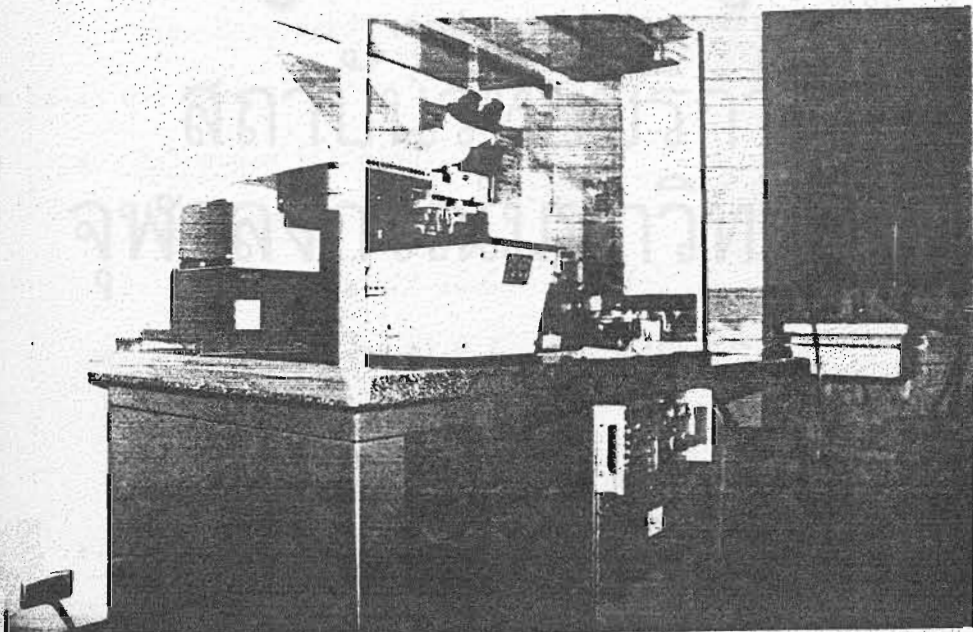
- 3.2 ออบในเตาอุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อไล่ความชื้น

- 3.3 เคลือบ Positive Photoresist AZ 1350 ของ Shipley ด้วย Photoresist Spinner ในรูปที่ 17

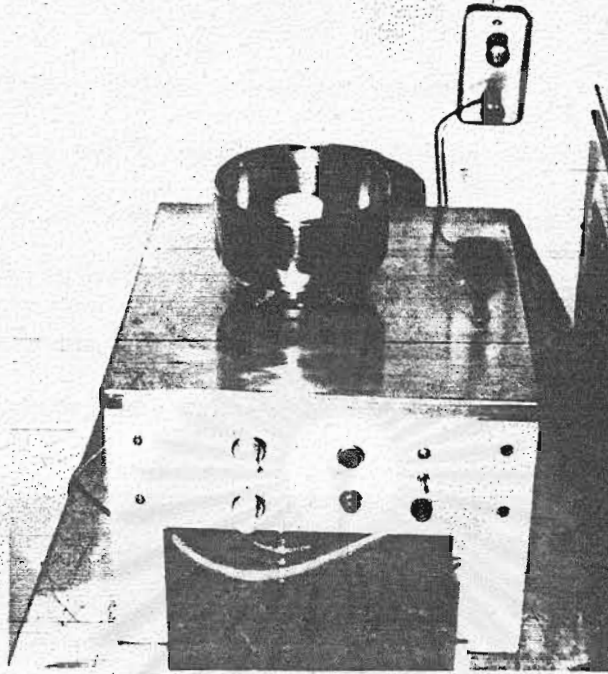
ตารางที่ 2

ขั้นตอนการเตรียมแผ่นผลึก GaAs

อันดับที่	ใช้สารละลาย	จุดประสงค์
1	Trichloethylene	ล้างคลาบไขมัน
2	Acetone	ล้าง Trichlo ที่หลง- เหลือ
3	H ₂ O-DI	ล้าง Acetone
4	เป่าแห้งด้วยก๊าซ N ₂	
5	4H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂ (30%) + H ₂ O 75°C	กัด Oxide ที่ผิว และ ขัดมันผิว
6	H ₂ O-DI	
7	HCl (50%)	กัด Oxide ที่หลง- เหลือ
8	H ₂ O-DI	
9	เป่าแห้งด้วยก๊าซ N ₂	



รูปที่ 16 เครื่อง Mask Aligner



รูปที่ 17 Photoresist Spinner.

3.4 Soft bake ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 15 นาที

3.5 Align แบบ Contact ลงบนแว่นผลึก

3.6 ฉายแสง UV ผ่านหน้ากาก

3.7 Develop : ทำการละลาย Photoresist ส่วนที่โดนแสง UV ออกไป ด้วย Photoresist Developer ส่วนไม่ถูกแสงจะยังคงอยู่

3.8 Hard Bake เพื่อเพิ่มแรงยึดของ Photoresist กับผิวหน้าของแว่นผลึก 30-40 นาที ที่อุณหภูมิ 120°C

4. กัดโลหะออก (Etching)

แว่นผลึกชนิดเอ็น

กัด Ni ด้วย HCl เข้มข้น 1-2 นาที

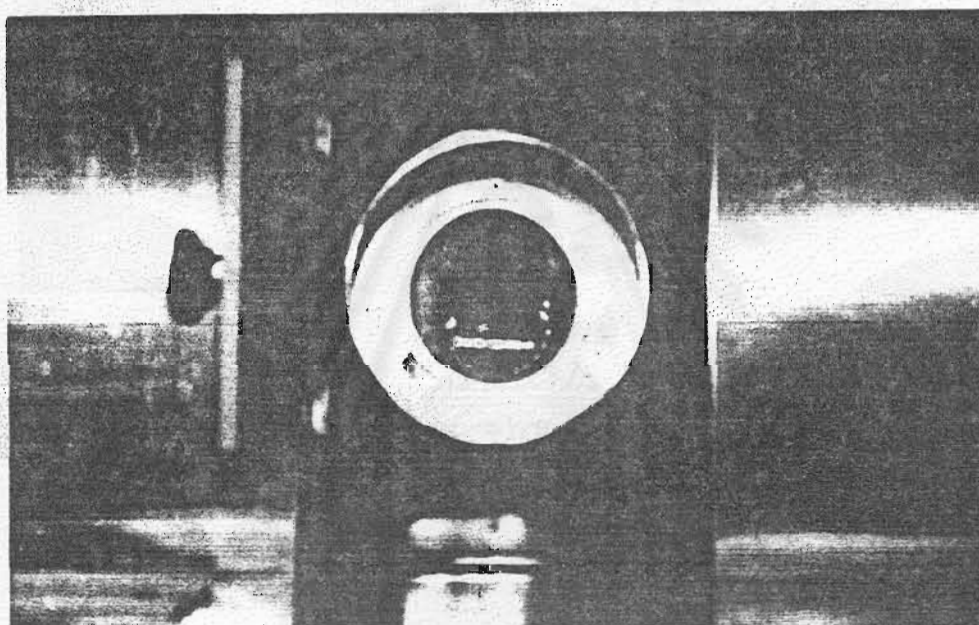
กัด AuGe ด้วย KI + I_2 เจือจาง 10 วินาที

แว่นผลึกชนิดพี

กัด AuZn ด้วย KI + I_2 เจือจาง 10 วินาที

5. ล้าง Positive Photoresist ด้วย Acetone และ H_2O -DI แล้วเป่าแห้งด้วยแก๊ส N_2

6. Annealing ในบรรยากาศของ Forming Gas $N_2 + H_2$ โดยกำหนดอุณหภูมิ 2 ค่า คือ 475 และ $500^\circ C$ และในแต่ละอุณหภูมิเปลี่ยนเวลาประมาณ 5 ค่า คือ 1 นาที 30 วินาที, 1 นาที 45 วินาที, 2 นาที, 2 นาที 15 วินาที และ 2 นาที 30 วินาที Forming Gas จะทำหน้าที่ป้องกันการเกิด Oxidation ที่ผิวโลหะ โดย N_2 เป็นแก๊สเฉื่อยหลักคั้นและปกคลุมผิวหน้าของโลหะเอาไว้ ส่วน H_2 จะทำปฏิกิริยากับ O_2 ที่หลงเหลืออยู่ เป็นการสกัดจับ O_2 ที่ผิวหน้าโลหะอีกชั้นหนึ่ง เตา Annealing แสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 Annealing Furnance

7. Device Separation ด้วยเทคนิค Diamond Scribing

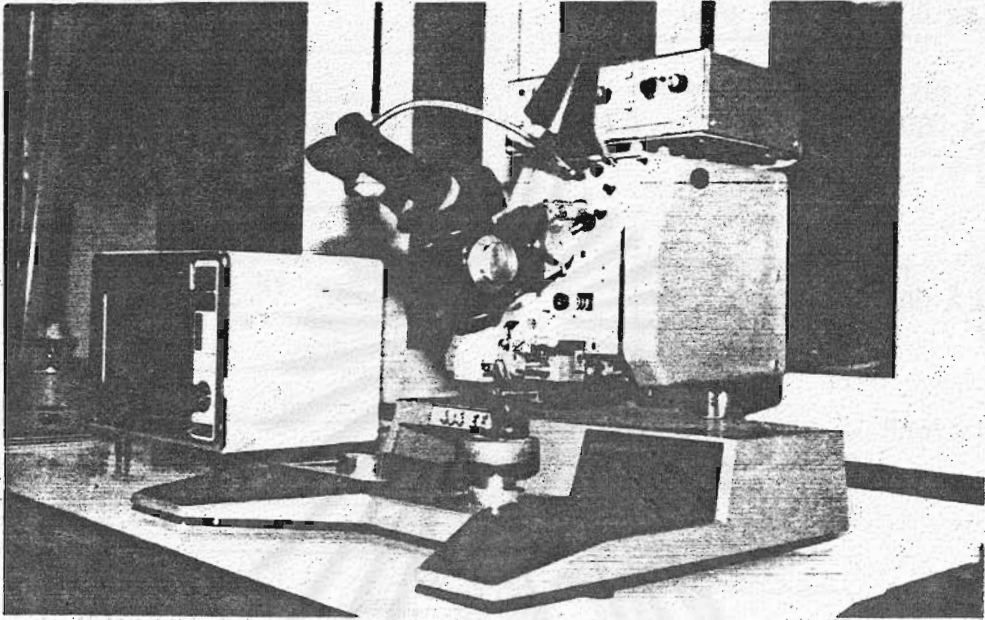
8. ตัด Die GaAs บนฐานโลหะชนิด TO-5 โดยใช้สาร Epotex สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแข็ง มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$ โดยใช้เวลา 30 นาที

9. Wire Bonder ตัดลวดโลหะ Al ด้วยเทคนิค Ultrasonic Wire Bonding ตามรูปที่ 19

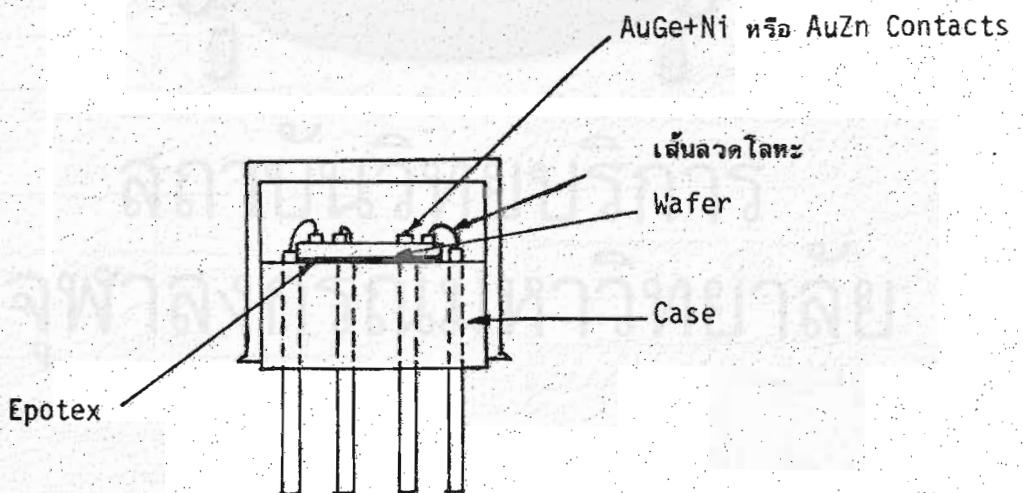
10. ปิดฝาครอบโลหะ ดังรูปที่ 20

11. วัดค่า $\frac{V_1}{I}$, $\frac{V_2}{I}$ และ $\frac{V_3}{I}$ และคำนวณหาค่า ρ_c ด้วยวิธี TLM ตามสมการ

8, 9 และ 10

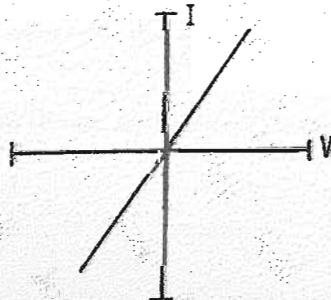
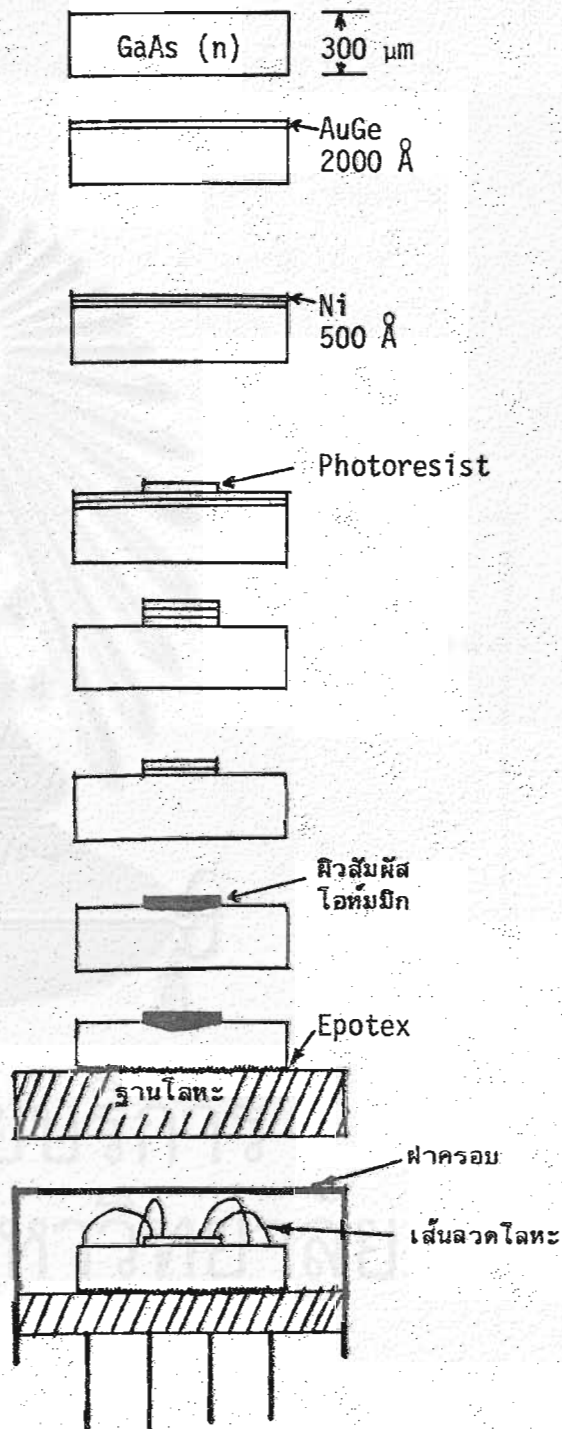
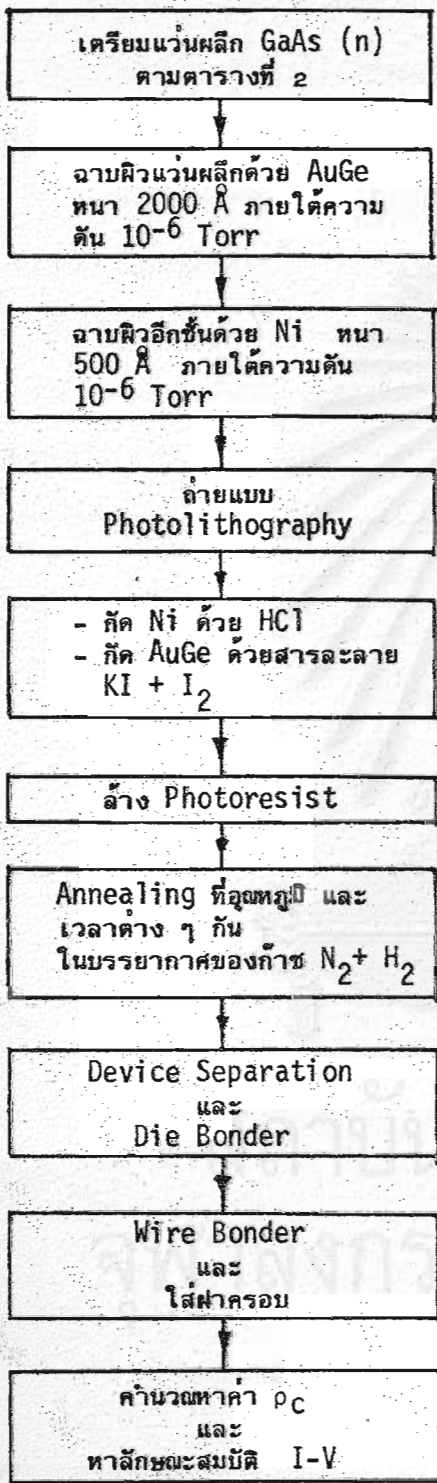


รูปที่ 19 Wire Bonder



รูปที่ 20 ฐานโลหะที่ติดตั้งแล้วพร้อมฝาครอบ

Flow Chart การผลิต



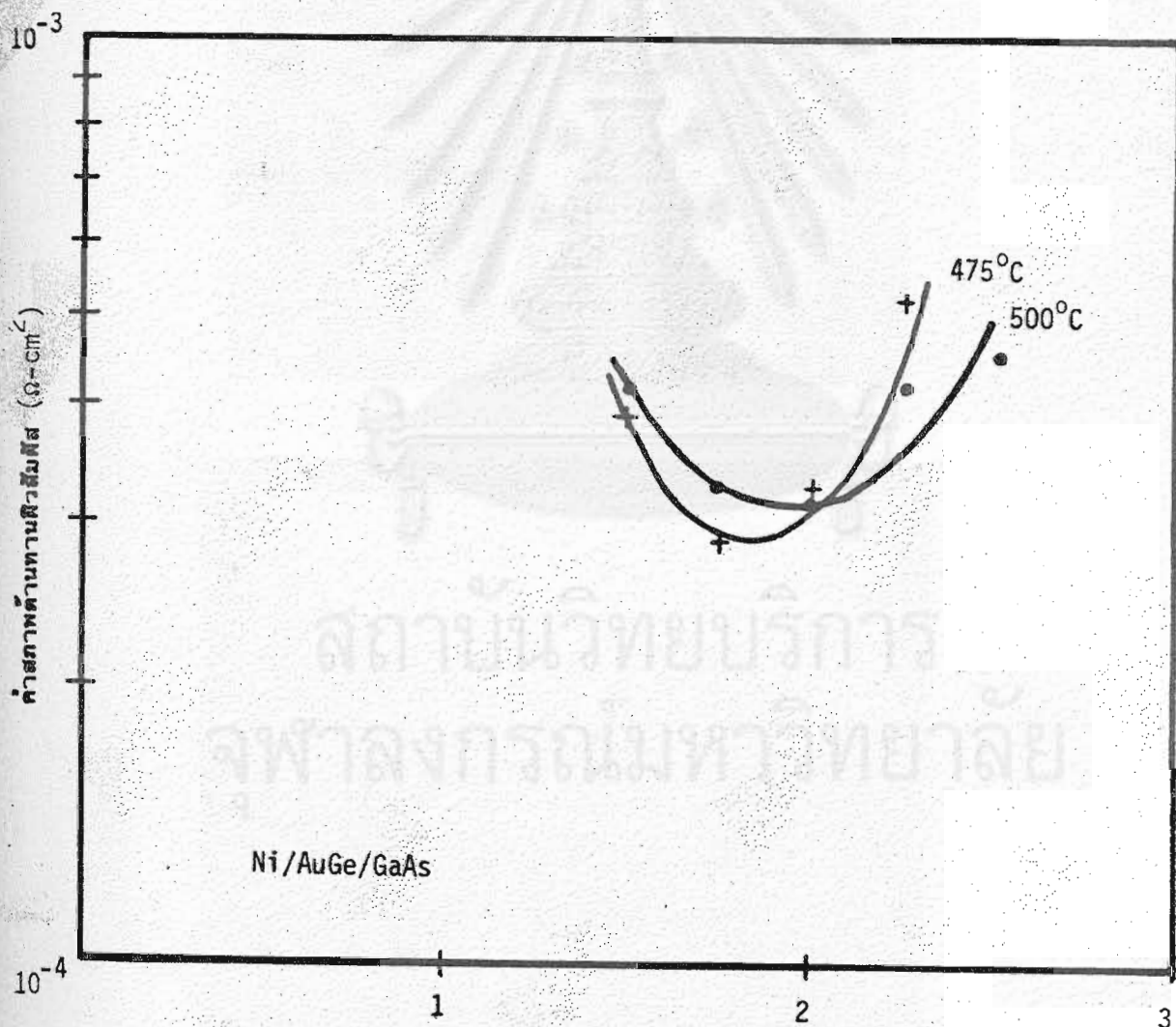
บทที่ 6

ผลการวิจัย

6.1 แวนผลึก GaAs ชนิด n

ทุกตัวอย่างมีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเป็นแบบโอห์มมิก เมื่อได้ทำการ Anneal แล้ว

ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสมีค่าต่ำสุดประมาณ $2.9 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}^2$ เมื่อทำการ Anneal ที่อุณหภูมิ 475°C ใช้เวลาประมาณ 1 นาที 45 วินาที ถึง 2 นาที เมื่อใช้เวลามากขึ้นหรือน้อยลงกว่านี้ ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสจะมีค่าสูงขึ้น แต่ไม่เกิน $6 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}^2$ และเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้น เช่น 500°C พบว่า ρ_c มีค่าสูงขึ้นในเวลาที่ใช้ Anneal เท่ากัน ดังรูปที่ 21



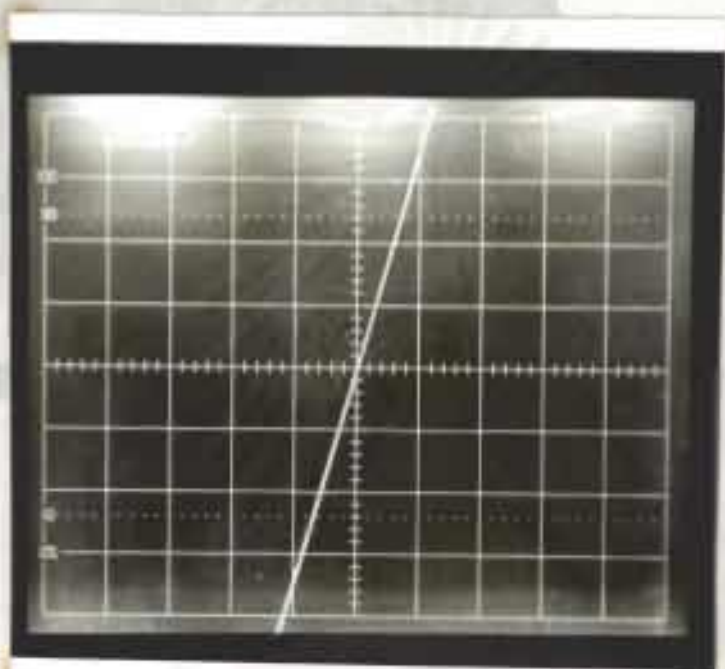
รูปที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัส กับเวลาที่ใช้ในการ Anneal โดยใช้อุณหภูมิเป็นตัวแปรค่า



6.2 แนวโน้มลักษณะ p

เป็นฟิล์มชั้นฟิล์มโพลีซิลิคอน ที่ Anneal และโมโนไซต์ Anneal และมีค่าสภาพต้านทาน
 ความต้านทานอยู่ในช่วง $5 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}^2$ ทุกตัวอย่าง ตัวอย่างที่มีค่า $\rho_c \sim 4.28 \times 10^{-4}$
 $\Omega\text{-cm}^2$ ใช้จุดเหตุในการ Anneal 400°C เวลา 2 นาที

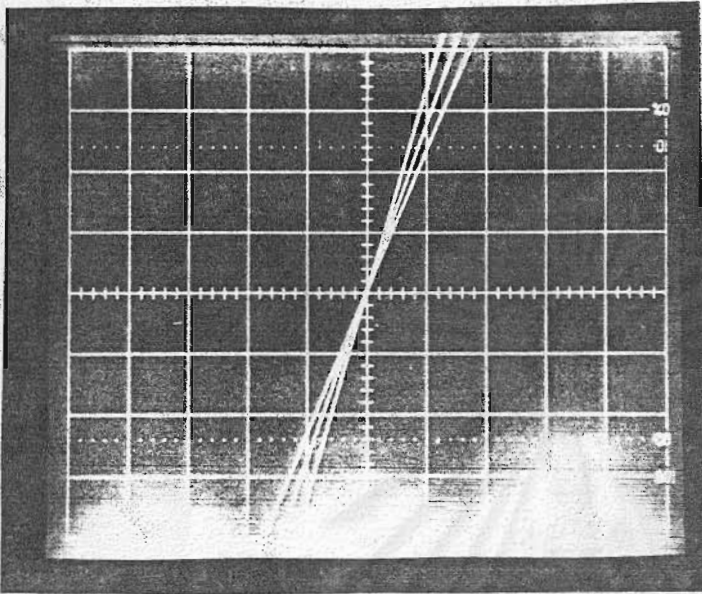
สำหรับลักษณะสมบัติการขนส่ง-แรงดันของตัวอย่างบางตัวอย่าง แสดงได้ความรูปที่ 22



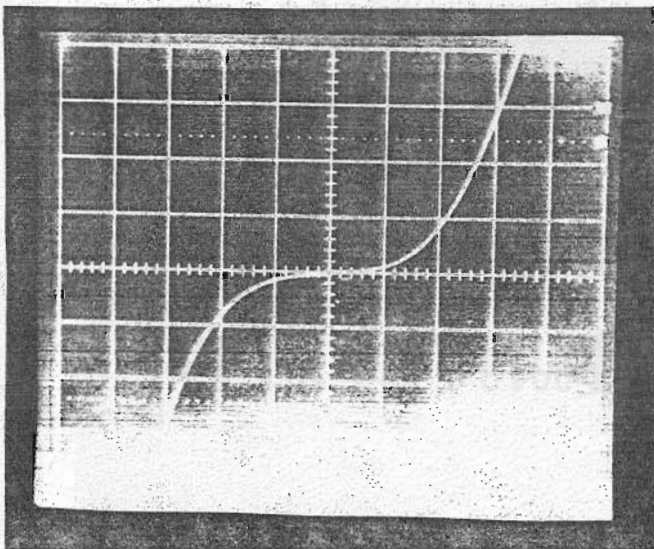
AuZn/GaAs (p)
 n.
 2 นาที 400°C



Ni/AuGe/GaAs (n)
 n.
 500°C

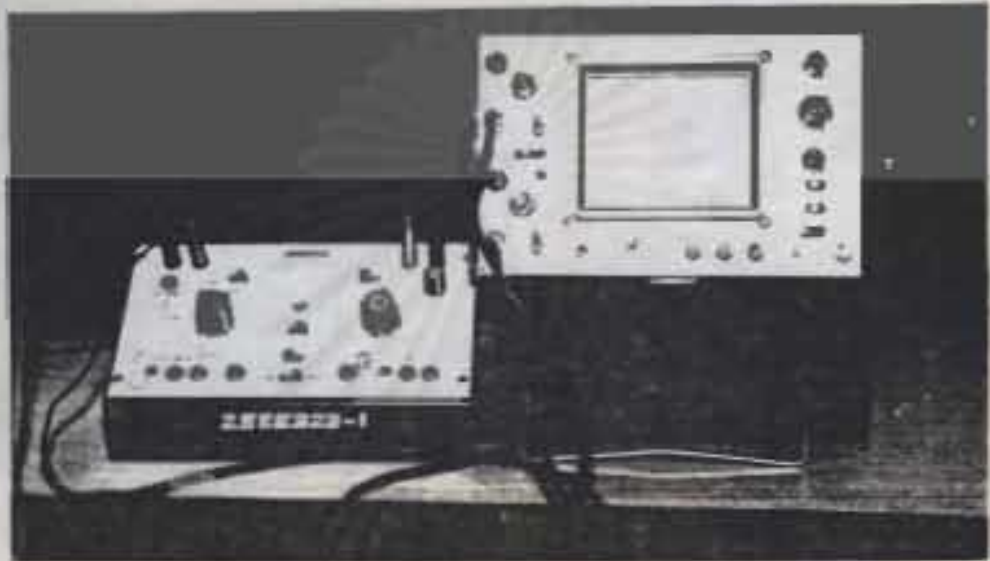


ก. Ni/AuGe/GaAs (n)
475°C



ง. Ni/AuGe/GaAs (n)
ไม่ anneal

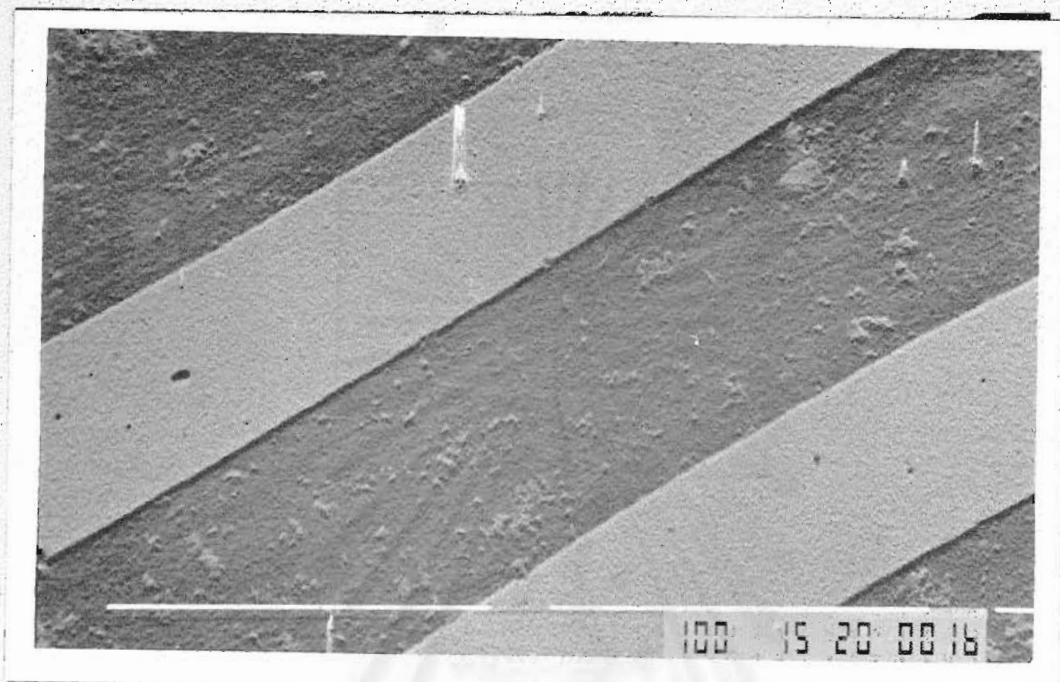
ส่วนอุปกรณ์ในการหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ประกอบด้วยวงจรมอง Oscilloscope และ Tracer ดังรูปที่ 23 ซึ่งจะเห็นถึงประจุที่ผลิตขึ้น ถูกเก็บมาอยู่ใน Socket ส่วนรูปที่ 24 (ก, ข, ค, ง, จ, ฉ, ช และ ซ) แสดงให้เห็นส่วนหนึ่งของสิ่งประจุที่ผลิตขึ้น ในแง่รูปร่าง (รูปชุดรูปตกเว้นรูปสุดท้ายถ่ายจาก Scanning Electron Microscope)



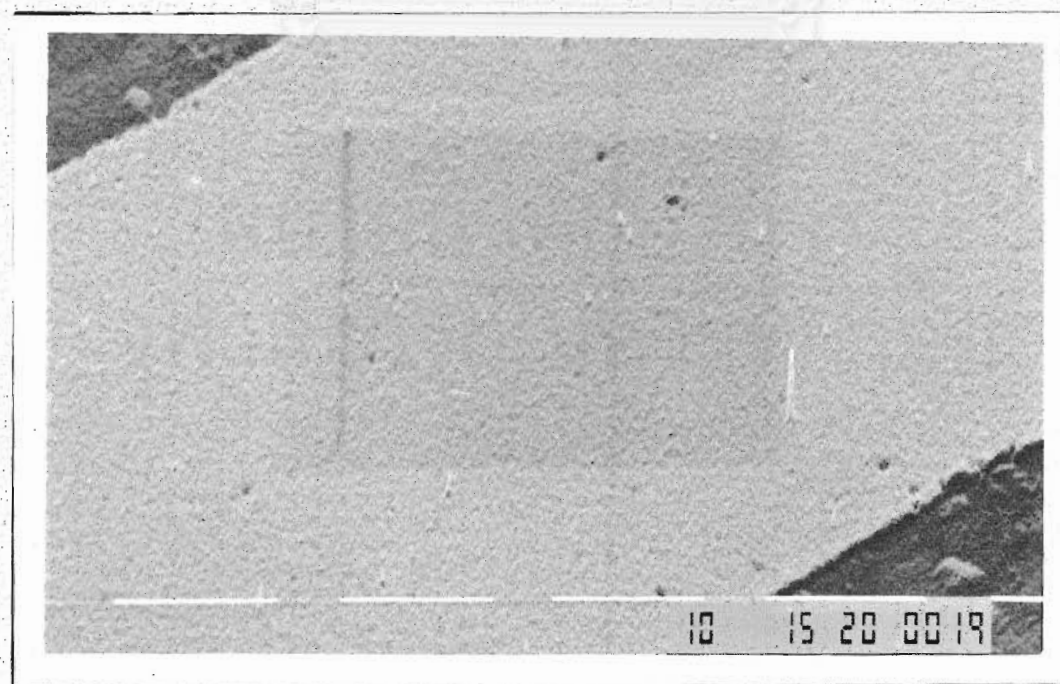
รูปที่ 23 วงจรหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันโหนดบิต



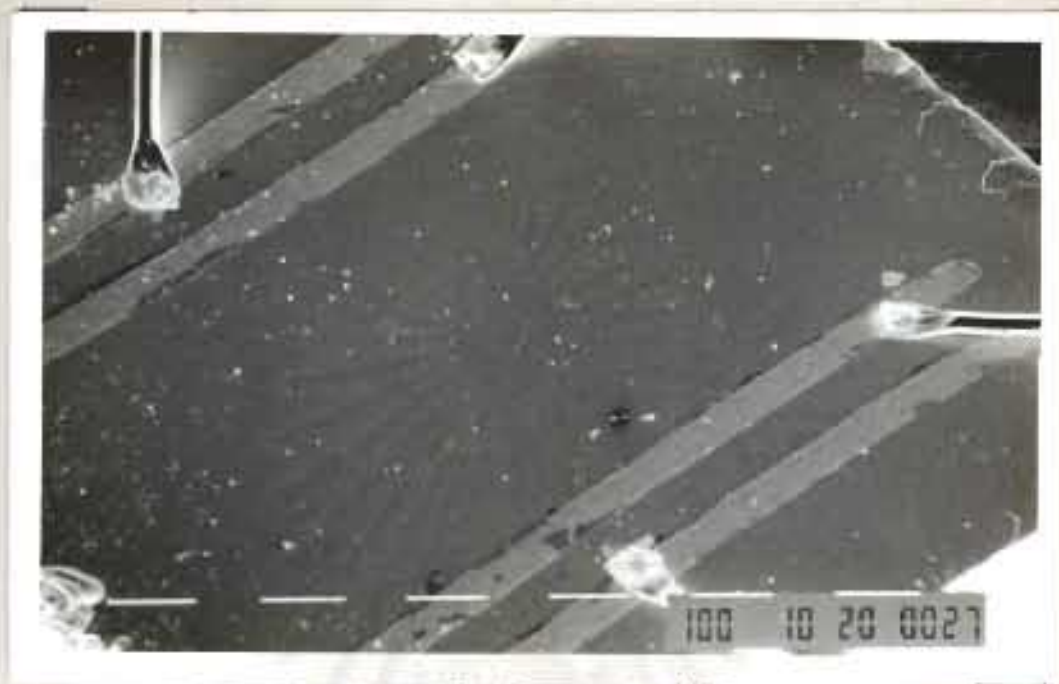
รูปที่ 24 ก. โครงสร้างของชิวิตระ 4 ชีว



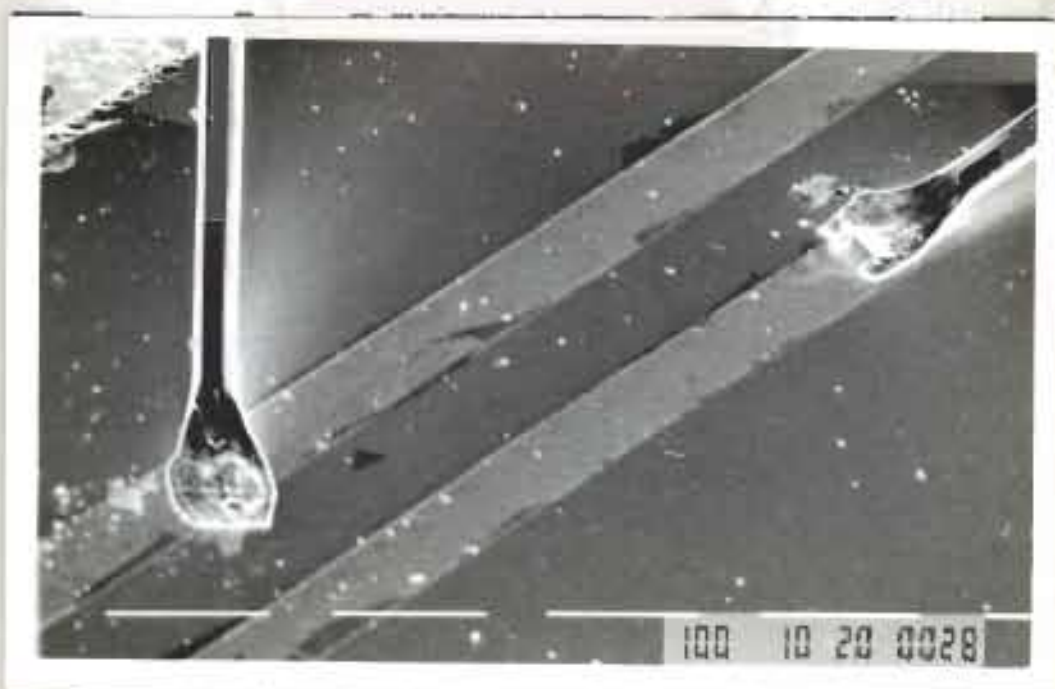
รูปที่ 24 ข. ขยายให้เห็นชั้นโลหะ 2 ชั้น



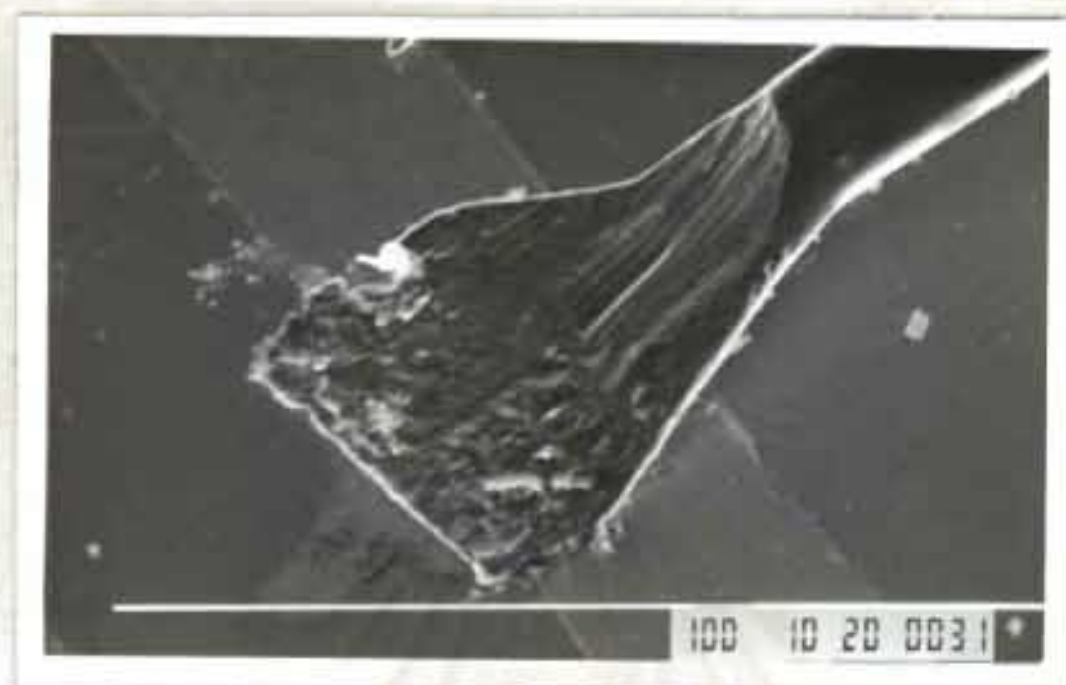
รูปที่ 24 ค. ขยายให้เห็นชั้นโลหะ 1 ชั้น



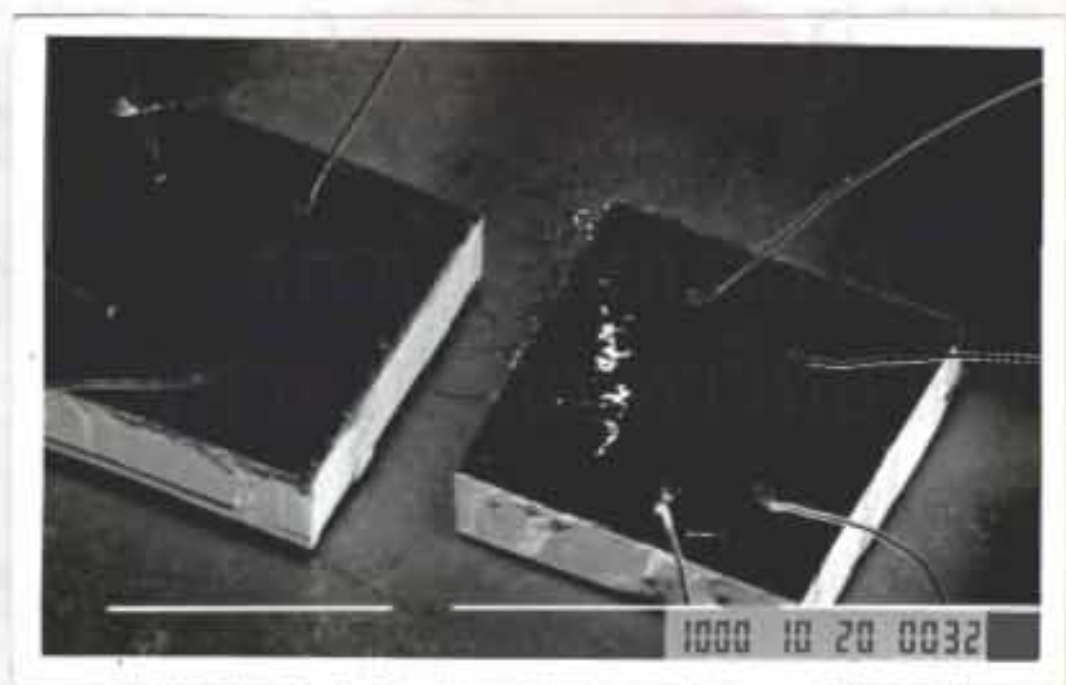
รูปที่ 24 ข. แสดงการค้ำเส้นลวดโลหะบนผิวโลหะ



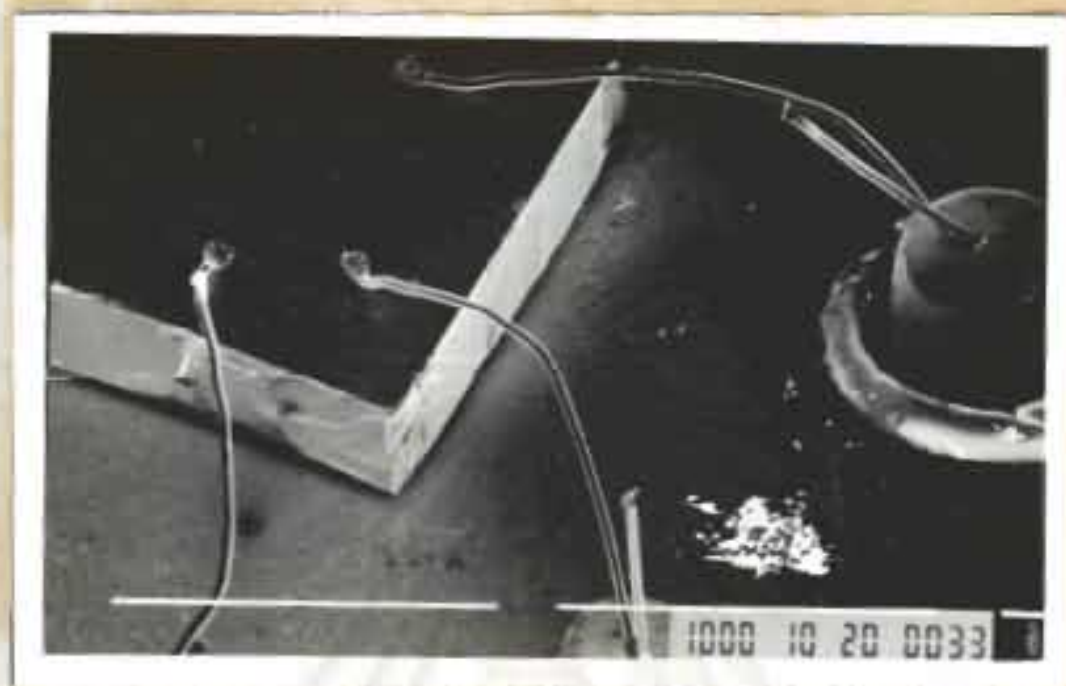
รูปที่ 24 จ. แสดงการค้ำเส้นลวดโลหะบนผิวโลหะ



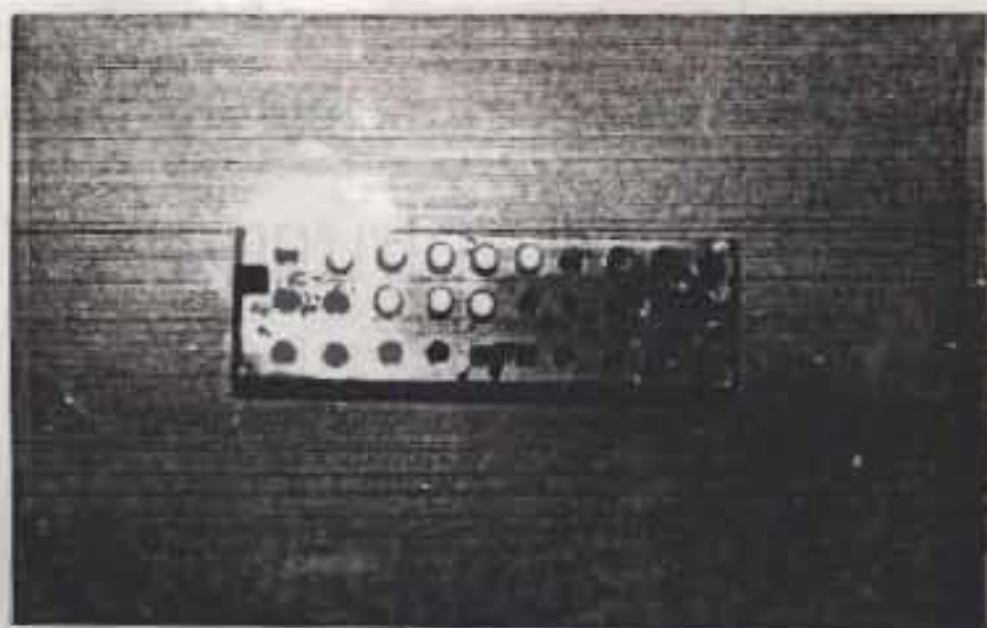
รูปที่ 24 จ. แสดงการค้ำขึ้นผิวโลหะในระบอบโหมด



รูปที่ 24 ฉ. แสดงให้เห็นส่วนหึง GaAs ที่ขึ้นโลหะ 4 ชั่วโลหะ พร้อมกับค้ำขึ้นผิวโลหะ
พร้อม



รูปที่ ๑๔ ช. แสดงการต่อเส้นลวดโลหะจากขั้วโลหะของแวน์หลอดที่ขาของฐานโลหะ

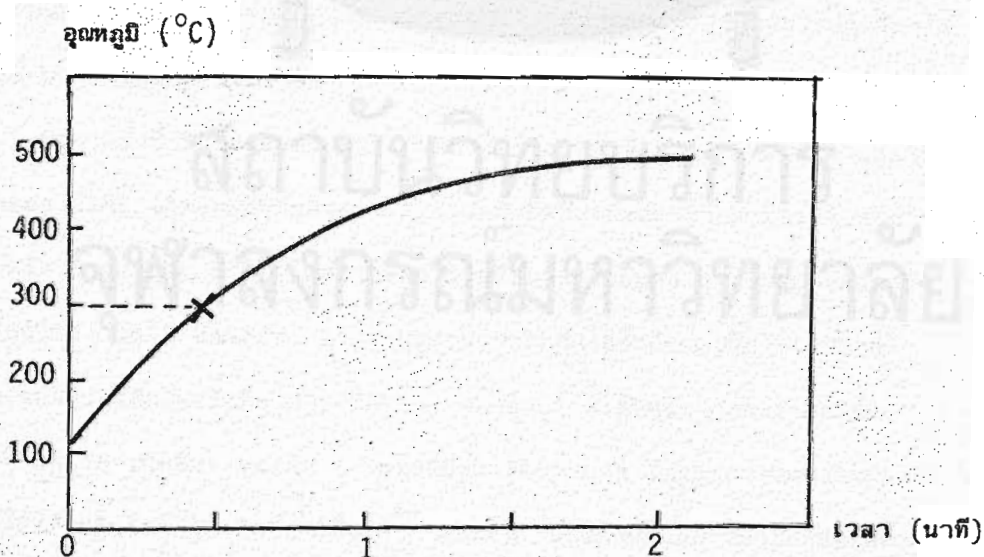


รูปที่ ๑๔ ค. ส่วนหน้าของชิ้นประกอบที่ติดตั้งบนฐานโลหะบริเวณขั้ว

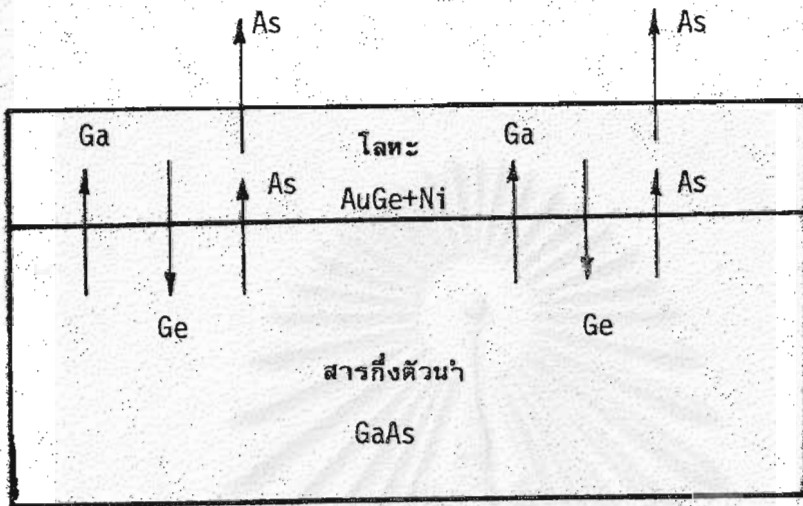
บทที่ 7

การอภิปรายผล

ก่อนจะทำการอภิปรายผลการทดลอง จะกล่าวถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึก GaAs ในขณะที่ทำการ Anneal ในช่วงที่ Anneal ที่อุณหภูมิประมาณ 500°C นั้น อุณหภูมิของแผ่นผลึกจะมีค่าสูงขึ้น ๆ ความความสัมพันธ์ในรูปที่ 25 ในขณะที่ขึ้นงานมีอุณหภูมิประมาณ 300°C (เครื่องหมาย X) ทอง (Au) ซึ่งเป็นตัวทำละลาย จะเริ่มทำการละลายผิวหน้าของ GaAs เปลี่ยนสถานะภาพของ GaAs จากของแข็งมาเป็นของเหลว Ga จะเริ่มแพร่ซึม (Diffusion) จากแผ่นผลึกวิ่งเข้าสู่ชั้นโลหะ ในขณะที่เดียวกัน Ge ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเจือปนจะแพร่ซึมเข้ามาแทนที่ที่ของ Ga ทำให้เกิดขึ้นของ GaAs ความเข้มข้นของสารเจือปนสูง (n^{++}) ในขณะที่ Ga แพร่ซึมขึ้นสู่ผิวหน้า AS ก็แพร่ซึมไปในทิศทางเดียวกัน แต่เลยหลุดลอยเป็นไอออกมา โดยสรุปจะเห็นว่าชั้น GaAs n^{++} เกิดจากการที่ Au ทำละลาย GaAs Ga และ AS แพร่ซึมขึ้นข้างบน Ge แพร่ซึมเข้าแทนที่ของ Ga ปฏิกิริยานี้จะต้องเกิดอย่างพอเหมาะพอเจาะ ถ้าเกิดปฏิกิริยาน้อยเกินไป ชั้น GaAs n^{++} ที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มข้นของสารเจือปนไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดกำแพงพลังงานศักย์ที่บาง แต่ถ้าเกิดปฏิกิริยามากเกินไป จะเหลือที่ว่างของ Ga มาก



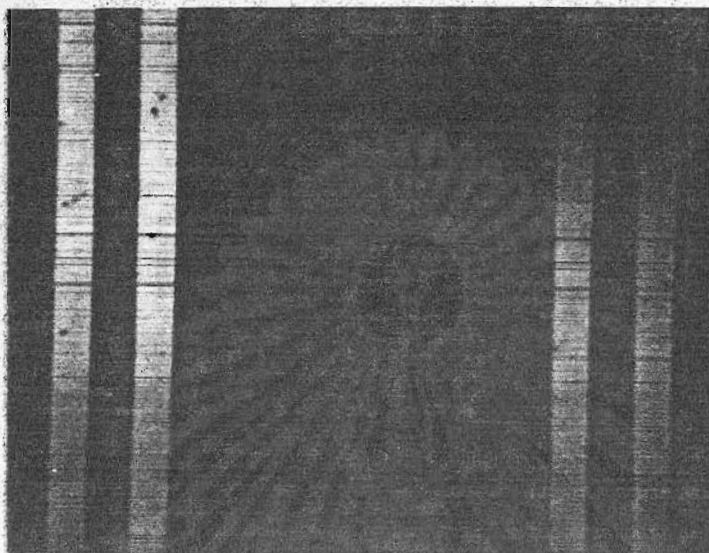
รูปที่ 25 แสดงอุณหภูมิของแผ่นผลึกในขณะที่ทำการ Anneal



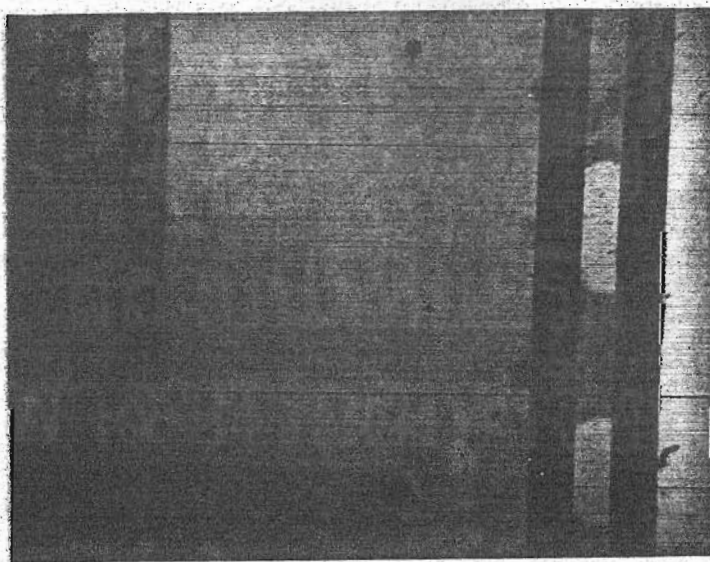
รูปที่ 26 ปฏิกิริยาระหว่างโลหะ AuGe + Ni กับแผ่นผลึก GaAs

ซึ่งทำให้เกิดขึ้นความต้านทานสูงได้ผิวสัมผัส ทำให้ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสโดยรวมมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นปริมาณของ Au (ควบคุมโดยความหนา) จะช่วยควบคุมปริมาณของปฏิกิริยาได้อีกชั้นหนึ่งนอกจากอุณหภูมิและเวลา

ปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นเสมอในการ Anneal ก็คือ การที่ Au ไม่สามารถละลายผิวหน้าของ GaAs ได้ตลอดทั่วทั้งผิวหน้า อุปสรรคนี้เกิดขึ้นเนื่องมาจากการโค้งตัวของ AuGe หรือ ผิวหน้าของ GaAs ไม่สะอาดพอ หรือมีชั้นออกไซด์บาง ๆ ขึ้นอยู่ระหว่างชั้นโลหะกับชั้นของ GaAs ซึ่งจะสังเกตได้จากรูปของผิวสัมผัสโอห์มมิกก่อนมีการ Anneal เปรียบเทียบกับผิวสัมผัสหลังที่ทำการ Anneal จุดเล็ก ๆ ที่เห็นหลังจากการ Anneal ก็คือจุดที่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น จุดเล็ก ๆ เหล่านี้มีความหมายมาก เพราะความหนาแน่นของจุดเหล่านี้ชี้ถึงปฏิกิริยาที่ได้เกิดขึ้น มีชั้น n^{++} เกิดขึ้น ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสจะมีค่าต่ำ ปัญหาการโค้งตัวของ AuGe สามารถบรรเทาเบาบางลงได้ โดยการฉาบผิวโลหะด้วยโลหะ Ni อีกชั้นหนึ่งซ้อนทับบนชั้นของ AuGe Ni จะเป็นตัวกระตุ้น Au ให้ละลาย GaAs

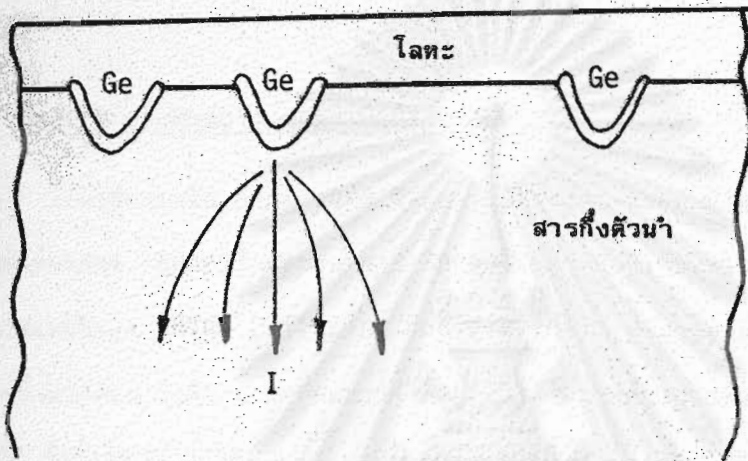


ก. ก่อนการ Anneal



ข. หลังการ Anneal

รูปที่ 27 รูปผิวสัมผัสไอศโหมมิก (AuGe + Ni/GaAs) ก่อนการ Anneal เปรียบเทียบกับ
หลังที่มีการ Anneal แล้ว



รูปที่ 28 ภาพจันของผิวสัมผัสไอทึมบิกหลังจากการ Anneal (AuGe + Ni/GaAs (n))

เพื่อที่ Ge จะได้แพร่ซึมลงไปแทนที่ แต่ปริมาณของ Ni จะต้องไม่มีมากเกินไป เพราะ Ni สามารถแพร่ซึมลงไปแย่งที่ของ Ge ได้ ทำให้ชั้น n^{++} มีค่าน้อยลง รูปที่ 28 แสดงภาพจันของจุดเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีชั้น n^{++} เกิดขึ้น และหาหะทะลุทะลวงผ่านไป

7.1 ผิวสัมผัสไอทึมบิกของแวนหลัก GaAs ชนิดเอ็น

จากรูปที่ 21 ซึ่งแสดงผลการทดลองในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัส กับเวลาที่ใช้ในการ Anneal โดยมีอุณหภูมิเป็นตัวแปรค่า นั้น ชี้ให้เห็นว่า ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัส จะมีค่าต่ำสุดเมื่อใช้เวลาประมาณ 1 นาที 45 วินาที ถึง 2 นาที ในกรณีที่ใช้เวลาในการ Anneal น้อยกว่า 1 นาที 45 วินาที ปฏิกิริยาระหว่าง Au กับ GaAs ยังเกิดขึ้นน้อย เป็นผลให้ ρ_c ยังมีค่าสูง ด้วยเหตุผลตามที่กล่าวมาแล้ว ในทางตรงกันข้ามถ้าเวลาในการ Anneal มากเกินไป ปฏิกิริยาระหว่าง

โลหะกับ GaAs มีมากเกินไป ทำให้ ρ_c มีค่าสูงขึ้นอีกด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้วเช่นกัน สำหรับผลการทดลองสำหรับอุณหภูมิต่าง ๆ กัน เช่น 475°C กับ 500°C พบว่าที่เวลาเท่ากันที่อุณหภูมิ 475°C จะได้ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสต่ำกว่า ผลการทดลองนี้อธิบายได้ในทำนองเดียวกันว่า ที่ 500°C นั้น มีปฏิกิริยาระหว่าง Au กับ GaAs ค่อนข้างรุนแรงและรวดเร็ว เกิดที่ว่างของ Ga ขึ้น จึงก่อให้เกิดขึ้นความต้านทานสูง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

7.2 ผิวสัมผัสโอห์มิกของแว่นผลึก GaAs ชนิดพี

ในกรณีแว่นผลึก GaAs ชนิดพี ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันมีคุณสมบัติโอห์มิกทั้งที่ยังไม่ได้ทำการ Anneal และที่ทำการ Anneal แล้ว ทั้งนี้เนื่องจาก Zn มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึมสูง (High Diffusion Coefficient) สามารถแพร่ซึมได้ทันทีที่สัมผัสกับผิวหน้าแว่นผลึก GaAs และเมื่อทำการ Anneal ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสจะยังมีค่าต่ำลงไปอีก ทั้งนี้เนื่องจากเกิดขึ้น p^{++} ขึ้น ด้วยเหตุผลที่ว่า Zn แพร่ซึมลงไปแทนที่ตำแหน่งของ Ga และยิ่งกว่านั้นแรงยึดเหนี่ยวของ AuZn กับผิวหน้าของ GaAs จะมีความแข็งแรงสำหรับปัญหาการโค้งตัวของ AuZn ไม่มี ดังนั้นผิวสัมผัส AuZn-GaAs (p) จึงราบเรียบไม่มี ความแตกต่างกัน ทั้งก่อนและหลังการ Anneal

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัย

ในการวิจัยนี้สามารถสร้างผิวสัมผัสโอทัมมิกสำหรับสารประกอบกึ่งตัวนำ GaAs ทั้งชนิดเอ็น และชนิดพี ที่มีค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสเพียง $3 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}^2$ เท่านั้น และมีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่มีความเป็นเชิงเส้น 100 เปอร์เซ็นต์

สำหรับกฎแวงสำคัญที่ทำให้ได้ผลสำเร็จอันนี้ อาจกล่าวได้เป็นข้อ ๆ ดังต่อไปนี้

1. วัสดุเริ่มต้น

ก. ระดับความเข้มข้นของสารเจือปน จะต้องไม่ต่ำกว่า 10^{18} cm^{-3} เพื่อว่าหลังจากทำการ Anneal จะได้ชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง $10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ เป็นผลให้ค่าแรงพล่งงานศักย์บางพอที่พาหะจะทะลุทะลวงผ่านไป

ข. โลหะจะต้องประกอบด้วยโลหะหลักผสมกับโลหะที่ทำหน้าที่เป็นสารเจือปน และอาจจะต้องมีโลหะกระตุ้นปฏิกิริยาในการผิวของ GaAs ชนิดเอ็น

ใช้ Au เป็นโลหะหลัก Ge เป็นโลหะสารเจือปน และ Ni เป็นโลหะกระตุ้นสำหรับ GaAs ชนิดเอ็น

ใช้ Au เป็นโลหะหลัก Zn เป็นโลหะสารเจือปนสำหรับ GaAs ชนิดพี

2. กรรมวิธีการผลิต

ก. ฉายผิวโลหะด้วย Filament Evaporation ภายใต้ความดัน 10^{-6} Torr โดยควบคุมความหนาให้ได้ดังต่อไปนี้

AuGe	หนา	2000	Å
Ni	หนา	500	Å
และ AuZn	หนา	2000	Å

ข. อุณหภูมิและเวลาในการ Anneal

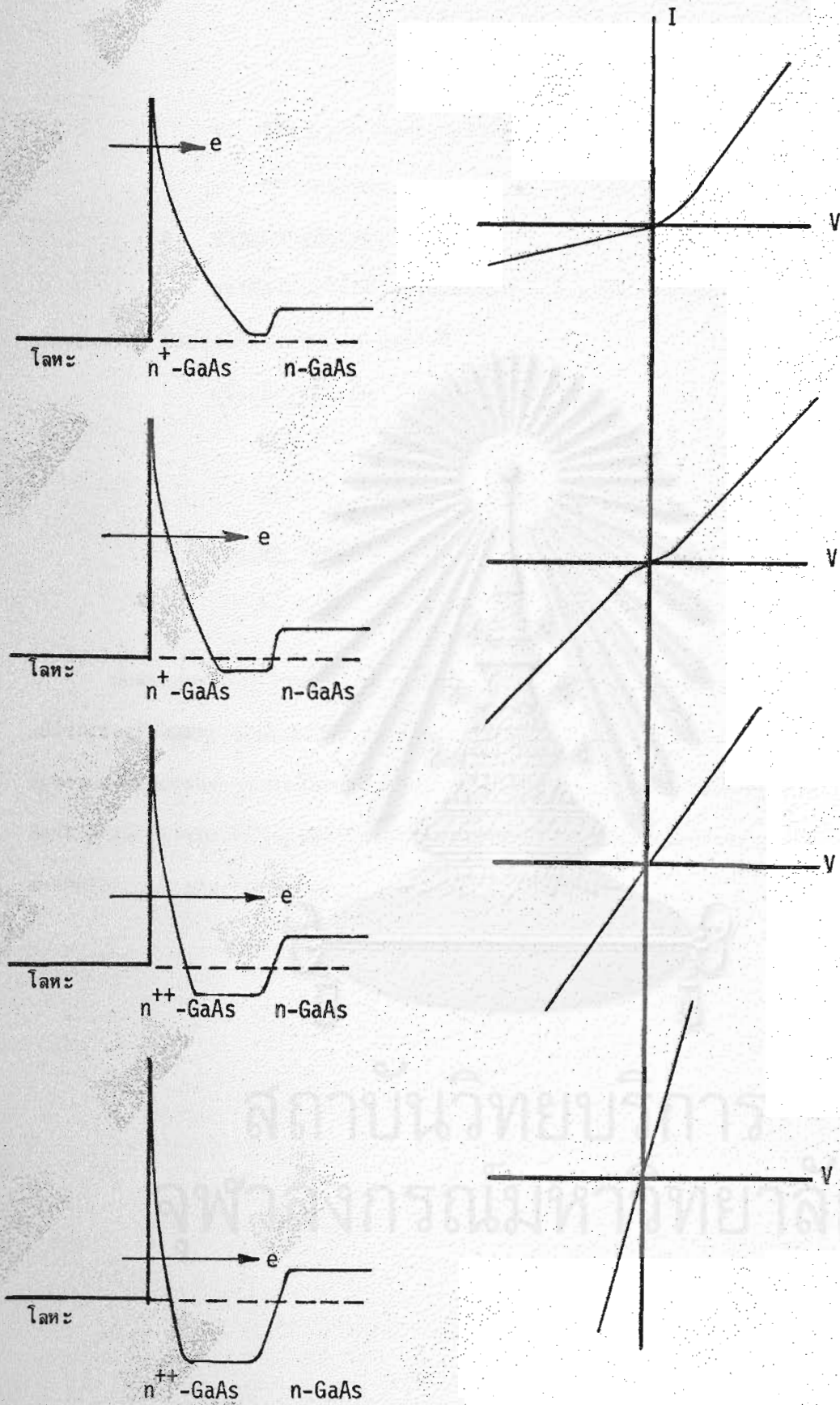
สำหรับแว่นผลึก GaAs ชนิดเอ็น ใช้อุณหภูมิ 475°C เวลา 1 นาที

45 วินาที

สำหรับแว่นผลึก ชนิดพี ใช้อุณหภูมิ 400°C เวลา 2 นาที

โดย Anneal ในบรรยากาศของ Forming Gas ($\text{N}_2 + \text{H}_2$)

ในการ Anneal นั้น ปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับผิวหน้าแว่นผลึกขึ้นอยู่กับ



รูปที่ 29 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงหลังงานศักย์ และลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่สอดคล้องกัน

1. วิธีการทำความสะอาดผิวที่ดี
2. ความหนาของ Ni ซึ่งเป็นโลหะกระตุ้นปฏิกิริยา

ค. สารละลายกัดโลหะ

การกัดโลหะได้อย่างถูกต้องแม่นยำนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลายความเข้มข้นและเวลา ซึ่งสรุปได้ตามชนิดของโลหะดังนี้

แว่นผลึก ชนิดเอ็น

HCl เข้มข้น กัด Ni หนา 500 Å ใน 2 นาที

KI + I₂ เจือจาง กัด AuGe หนา 2000 Å ใน 10 วินาที

แว่นผลึก ชนิดพี

KI + I₂ เจือจาง กัด AuZn หนา 2000 Å ใน 10 วินาที

ก่อนจมนทสรุปขอ เสนอรูปร่างของผิวสัมผัสไอห่มมิกด้วยภาพต่อเนื่องของการเปลี่ยนแปลงลักษณะของกำแพงพลังงานศักย์ในขณะที่กำลัง Anneal ผิวสัมผัสควบคู่ไปกับลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่สอดคล้องกัน จะเห็นว่าภาพสุดท้ายเมื่อกำแพงพลังงานศักย์บางที่สุด เราจะได้ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสต่ำที่สุด และลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุด

สถาบันวิจัยบริการ

ฟาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



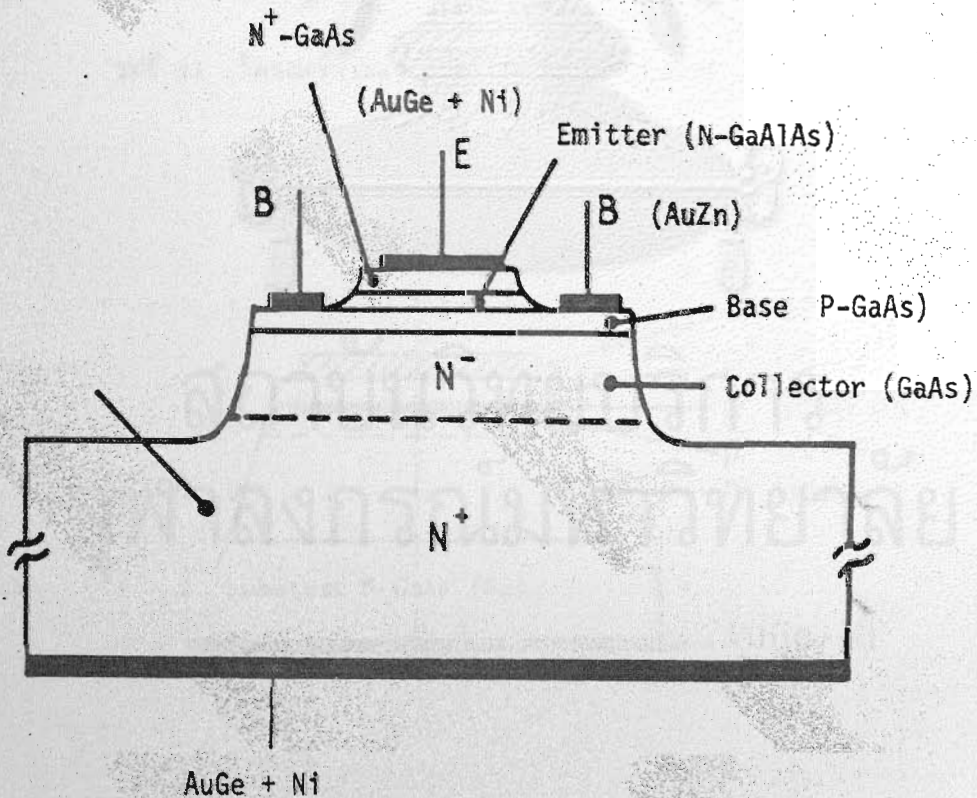
บทที่ ๑

ข้อเสนอแนะ

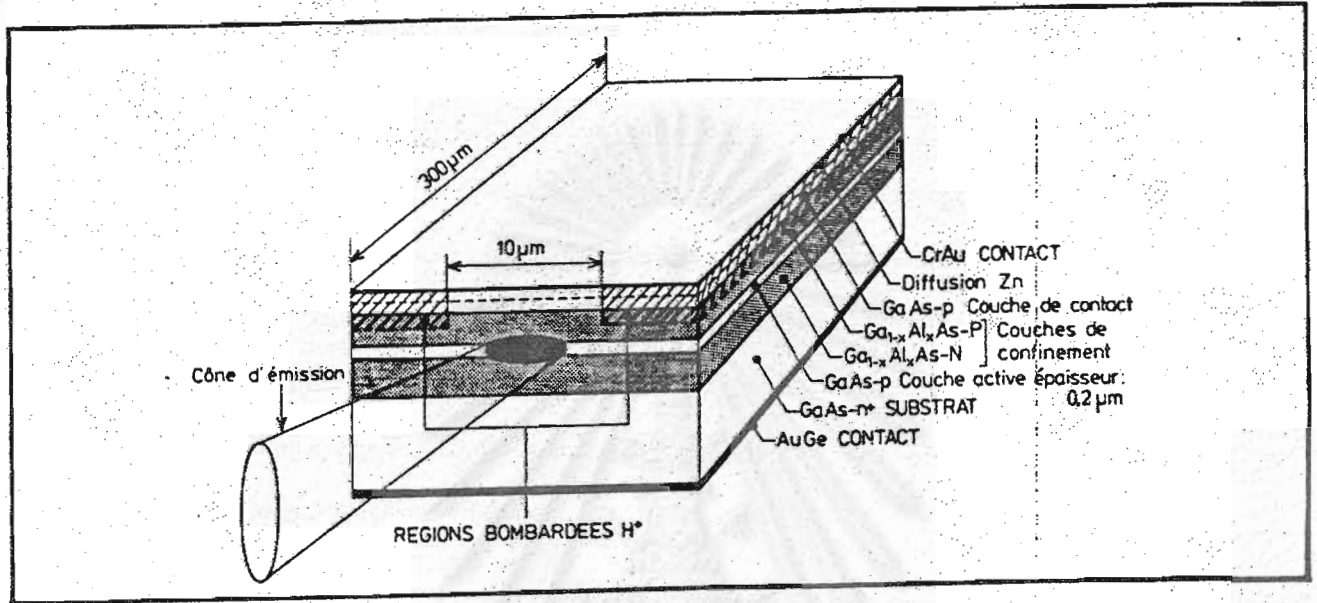
จากผิวสัมผัสไอทึมิก $\text{AuGe} + \text{Ni}/\text{GaAs}$ (n) และ AuZn/GaAs (p) ที่สร้างขึ้น นับเป็นจุดเริ่มต้นของเทคโนโลยีสารประกอบกึ่งตัวนำ เพราะสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิดต้องใช้ผิวสัมผัสไอทึมิกในการติดต่อกับโลกภายนอก และต้องเป็นผิวสัมผัสไอทึมิกที่ดีด้วย ถ้าต้องการให้สิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นมีคุณภาพดี ผลตอบสนองเชิงความถี่สูง จะขอเสนอตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างจากสารประกอบกึ่งตัวนำ GaAs และต้องใช้ผิวสัมผัสไอทึมิกเป็นหัวใจในการทำงาน ๓ ตัวอย่าง กล่าวคือ

1. Heterojunction Bipolar Transistors

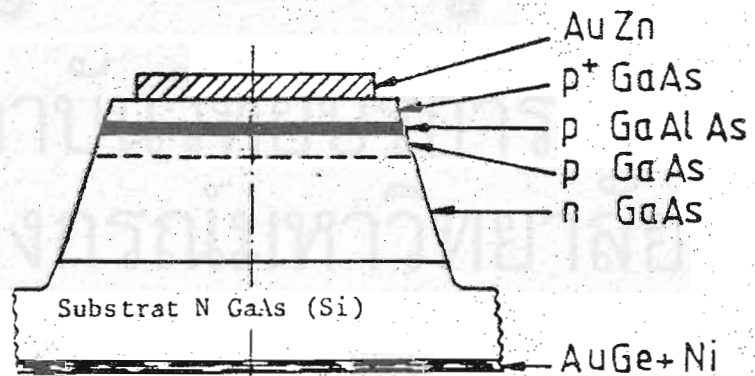
มีโครงสร้างดังรูปที่ 30 ซึ่งจะเห็นว่าผิวสัมผัสไอทึมิกอยู่ ๓ ตำแหน่ง คือ ที่ Emitter, Base และ Collector โดยที่ Emitter และ Collector เป็นผิวสัมผัสไอทึมิกชนิด $\text{AuGe} + \text{Ni}/\text{GaAs}$ (n) และที่ Base เป็นผิวสัมผัสไอทึมิกชนิด AuZn/GaAs (p)



รูปที่ 30 โครงสร้างของ Heterojunction Bipolar transistor



รูปที่ 31 โครงสร้างของ Semiconductor Laser



รูปที่ 32 โครงสร้างของ GaAlAs/GaAs Solar Cell

2. Semiconductor Laser Diodes

เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถเปล่งแสงสีเดียวได้ และมีการประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง (Optical Fiber Communication) มีโครงสร้างดังรูปที่ 31 ใช้ผิวสัมผัสโอห์มิกทั้ง 2 ชนิดเช่นกัน

3. เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก GaAs

เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจาก Si มีโครงสร้างดังรูปที่ 32 และใช้ผิวสัมผัสโอห์มิกทั้ง 2 ชนิดเช่นเดียวกัน

ในระยะเวลาอันใกล้นี้ ห้องวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจะเริ่มประดิษฐ์สร้าง Semiconductor Laser Diodes โดยใช้เคา Liquid Phase Epitaxy เป็นเทคโนโลยีหลัก และใช้ผิวสัมผัสโอห์มิกที่ได้พัฒนาขึ้นมาใช้งาน ซึ่งผู้วิจัยหวังว่าจะประสบความสำเร็จเช่นเดียวกับงานวิจัยชิ้นนี้



สภามหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. A.Y.C. YU, "Electron Tunneling and Contact Resistance of Metal-Silicon Contact Barriers", Solid-St. Electron, Vol. 13, 1970, pp. 239-247.
2. H.H. Berger, "Models for Contacts to Planar Devices", Solid-St. Electron, Vol. 15, 1972, pp. 145-158.
3. B. Toprasertpong, "Contribution a l'Etude des Contacts Ohmiques Metal-Semiconducteur Cas de l' Au-Zn/GaAs (p)", Thesis, Toulouse, France, 1980.



สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย