

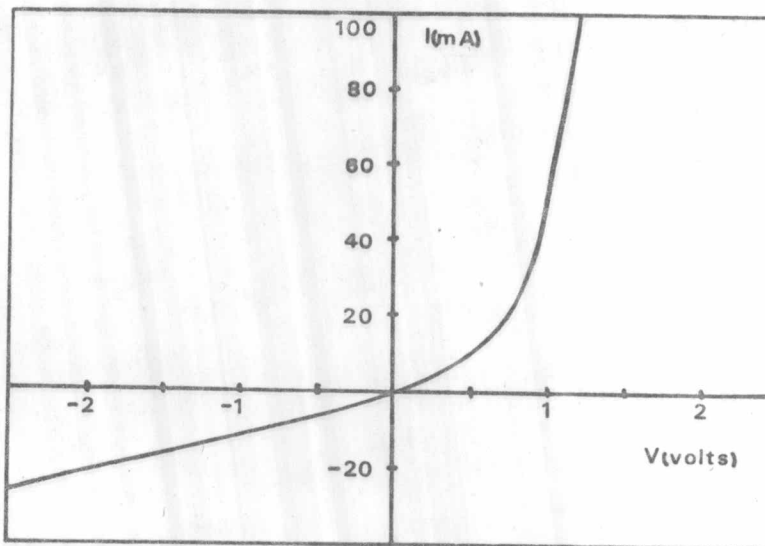
บทที่ 7

ผลการทดลอง



เราใช้ curve tracer วัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวลัมผัสฯ ได้ผลดังต่อไปนี้

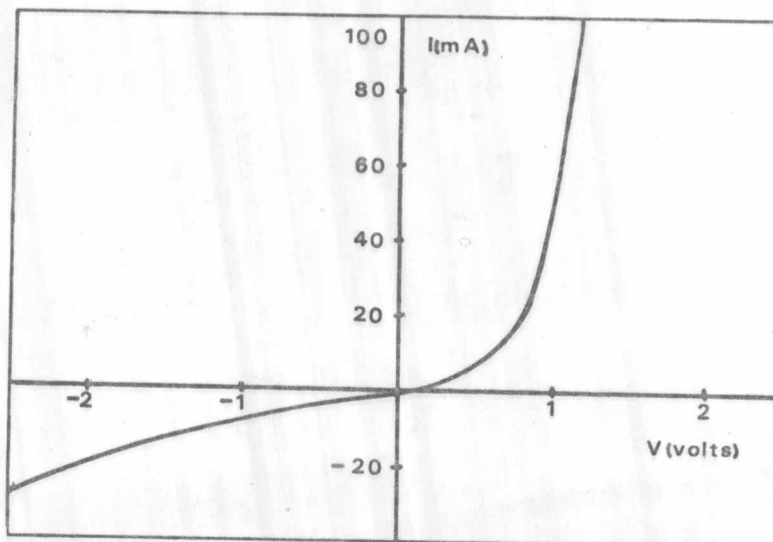
7.1 ตัวลัมผัสระหว่างแวนผลึกซิลิกอนกับอลูมิเนียม



รูปที่ 7.1

Al-pSi 5 Ω -cm

Rectifying



รูปที่ 7.2

Al-pSi 8 Ω -cm

Rectifying

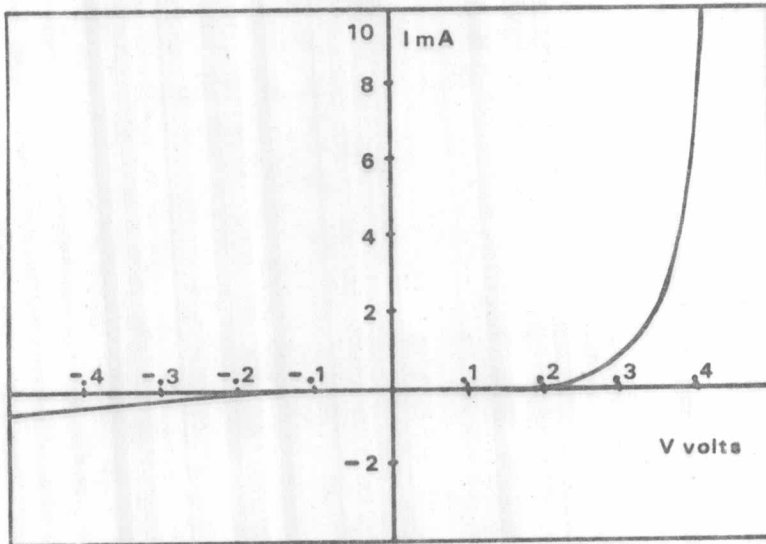


Fig 7.3

Al-nSi 0.18 Ω -cm

Rectifying

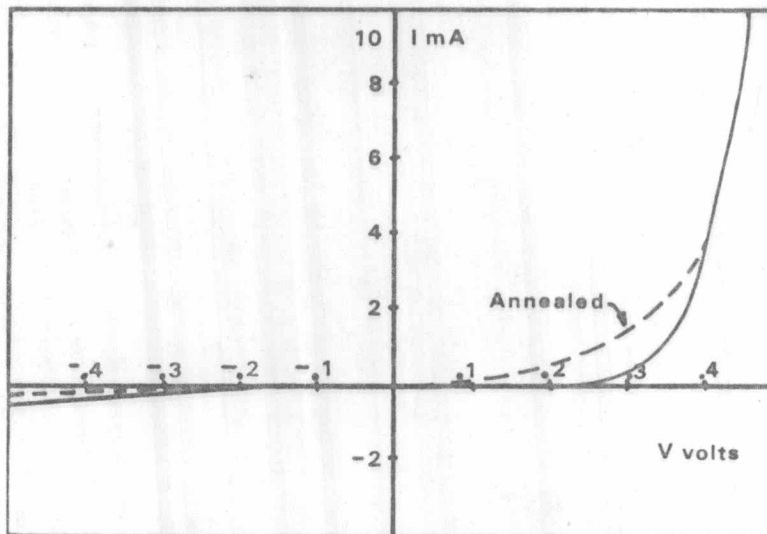
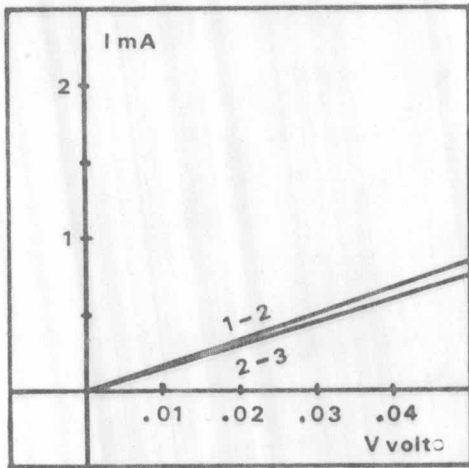


Fig 7.4

Al-nSi 0.72 Ω -cm

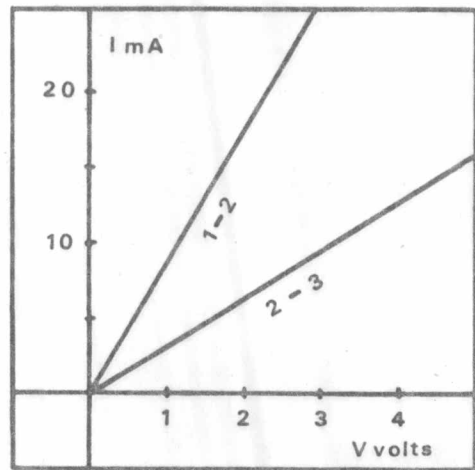
Rectifying



รูปที่ 7.5 Al-pSi 1-2 Ω-cm

Ohmic $R_c = 29 \Omega$

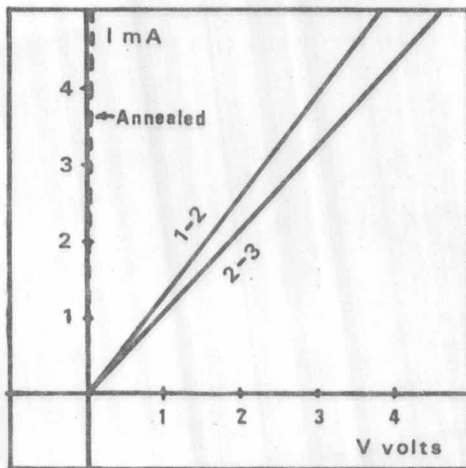
$\rho_c = 9.74 \times 10^{-6} \Omega\text{-m}^2$



รูปที่ 7.6 Al-pSi 10-20 Ω-cm

Ohmic $R_c = 49 \Omega$

$\rho_c = 1.65 \times 10^{-5} \Omega\text{-m}^2$

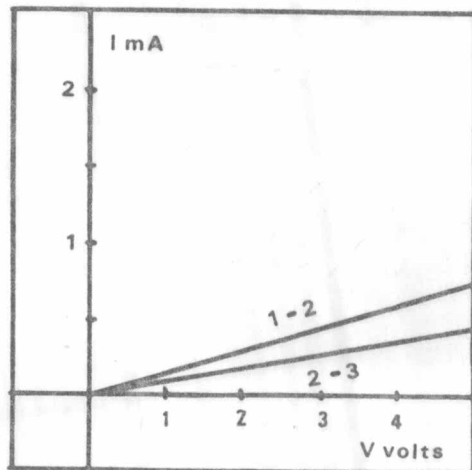


รูปที่ 7.7 Al-nSi 0.015 Ω-cm

Ohmic $R_c = 370 \Omega$

$\rho_c = 1.24 \times 10^{-4} \Omega\text{-m}^2$

$R_{\text{annealed}} = 10 \Omega$



รูปที่ 7.8 Al-nSi 1-2 Ω-cm

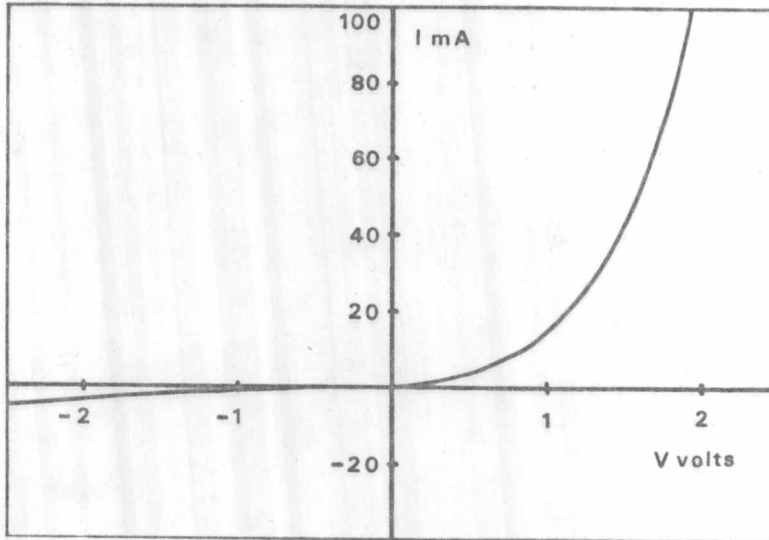
Ohmic $R_c = 1.54 \text{ k}\Omega$

$\rho_c = 5.17 \times 10^{-4} \Omega\text{-m}^2$

หมายเหตุ R_c คำนวณโดยอาศัยสมการ (5.25) และสัดส่วนจากรูปที่ 6.9

ρ_c คำนวณโดยอาศัยสมการ (4.4) และค่า R_c ที่หาได้

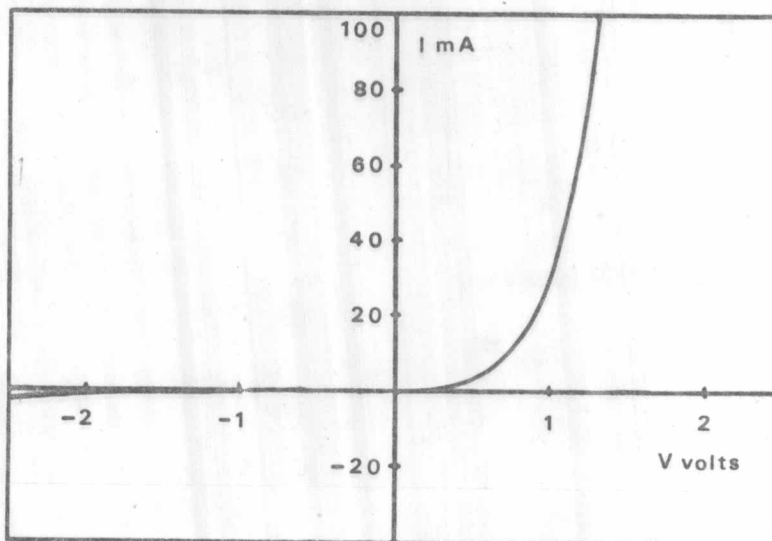
7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแวนผลึกซิลิกอนกับทอง



รูปที่ 7.9

Au-pSi 5 Ω-cm

Rectifying



รูปที่ 7.10

Au-pSi 8 Ω-cm

Rectifying

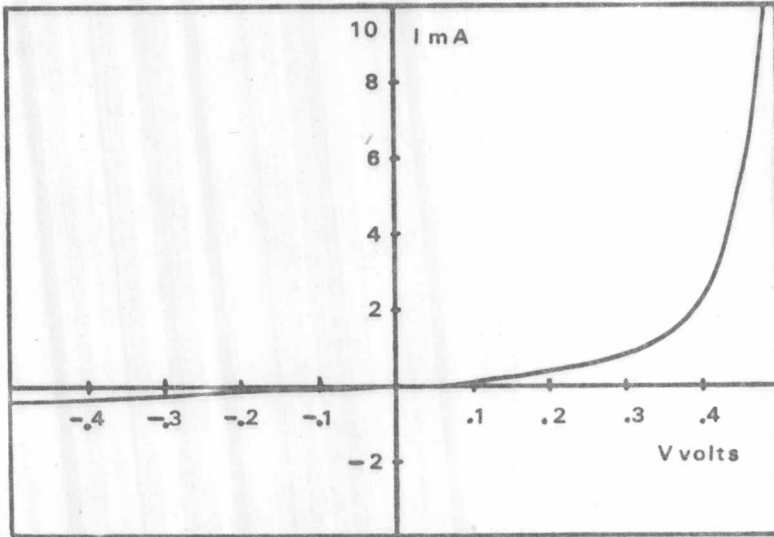


Fig 7.11

Au-nSi 0.18 Ω -cm

Rectifying

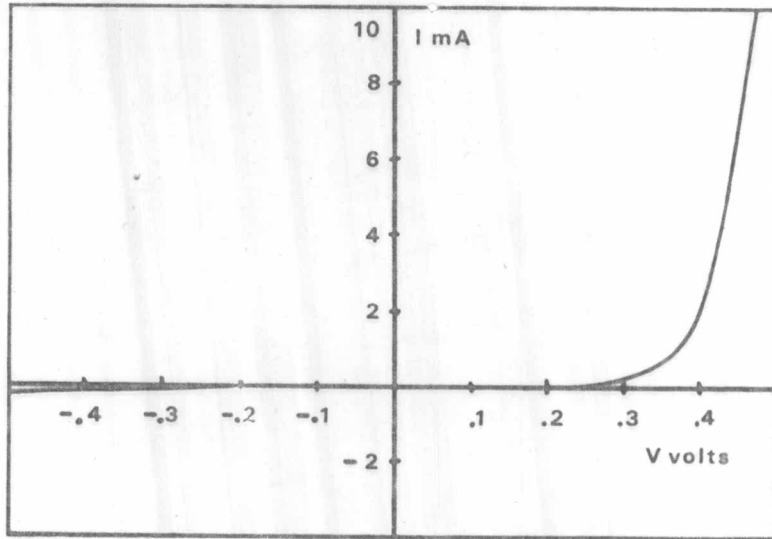
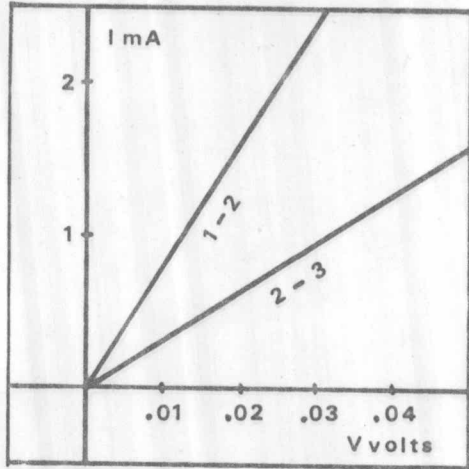


Fig 7.12

Au-nSi 0.72 Ω -cm

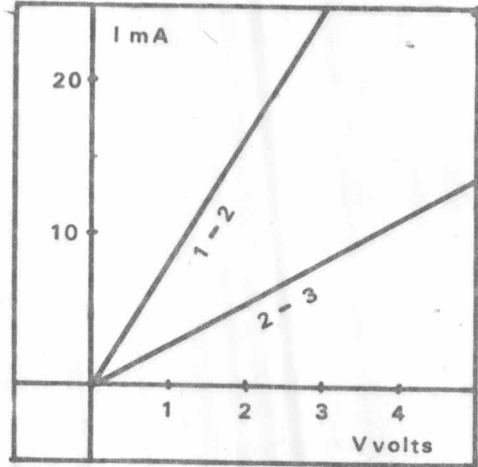
Rectifying



រូប 7.13 Au-pSi 1-2 Ω-cm

Ohmic $R_c = 5.26 \Omega$

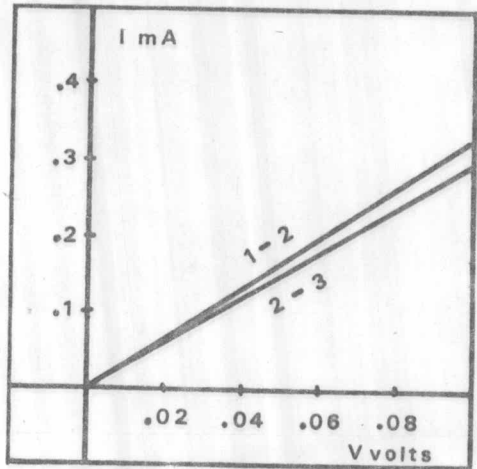
$\rho_c = 1.77 \times 10^{-6} \Omega\text{-}\mu^2$



រូប 7.14 Au-pSi 10-20 Ω-cm

Ohmic $R_c = 46.83 \Omega$

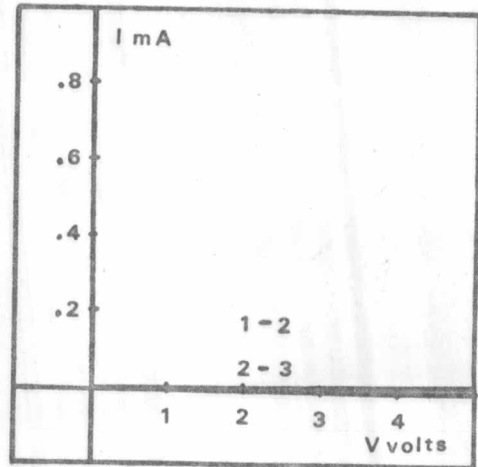
$\rho_c = 1.57 \times 10^{-5} \Omega\text{-}\mu^2$



រូប 7.15 Au-nSi .015 Ω-cm

Ohmic $R_c = 1.67 \text{ k}\Omega$

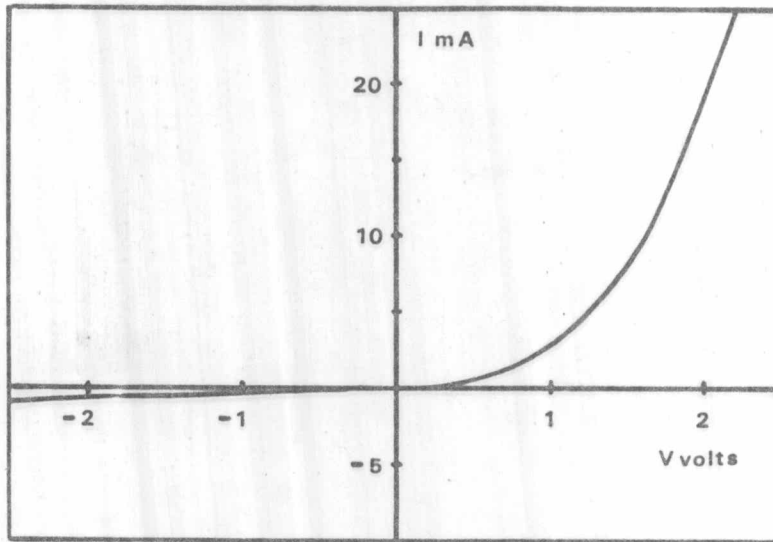
$\rho_c = 5.61 \times 10^{-4} \Omega\text{-}\mu^2$



រូប 7.16 Au-nSi 1-2 Ω-cm

Ohmic $R > 50 \text{ k}\Omega$

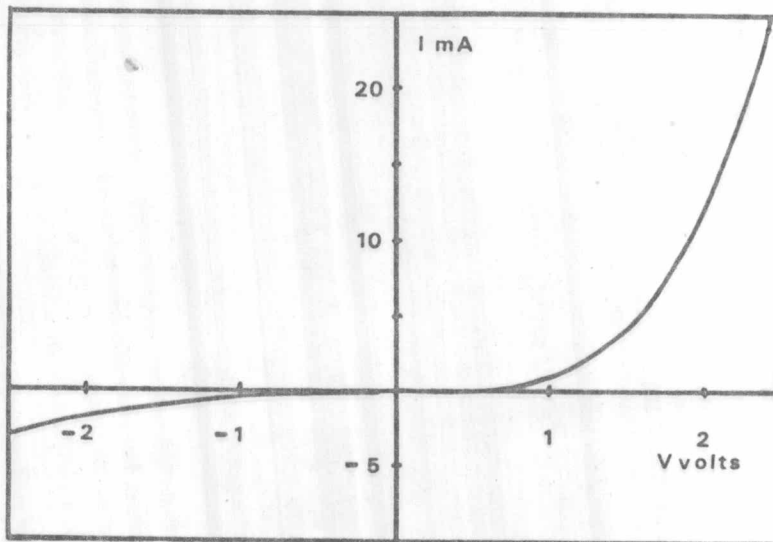
7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแวนผลิกซิลิกอนกับเงิน



รูปที่ 7.17

Ag-pSi 5 Ω -cm

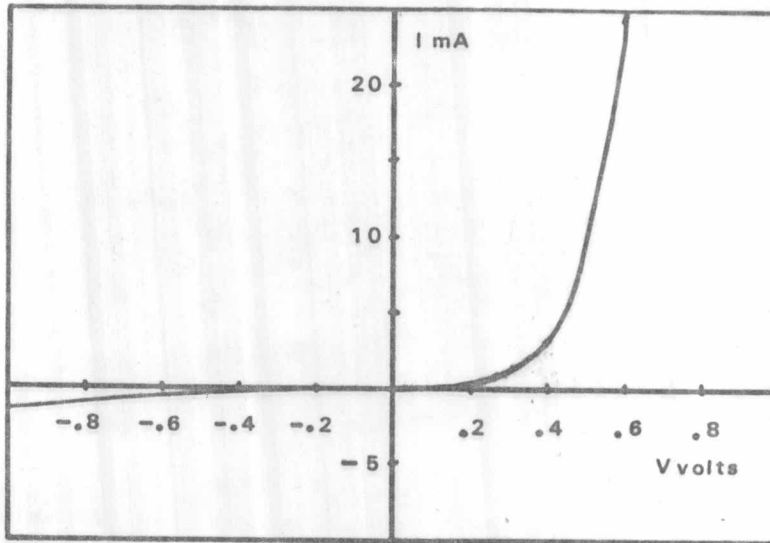
Rectifying



รูปที่ 7.18

Ag-pSi 8 Ω -cm

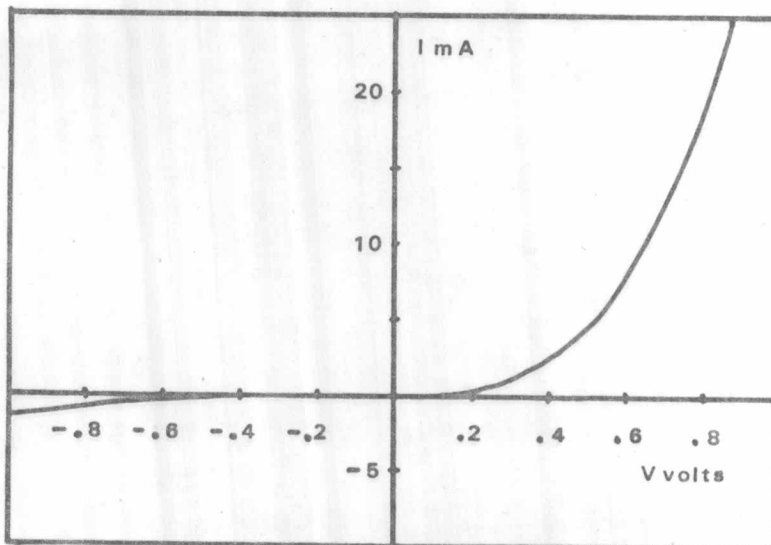
Rectifying



รูปที่ 7.19

Ag-nSi $0.18 \Omega\text{-cm}$

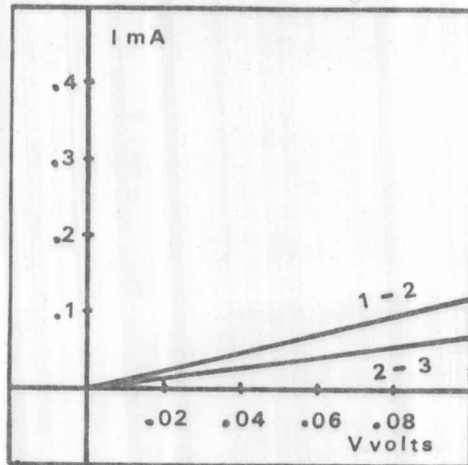
Rectifying



รูปที่ 7.20

Ag-nSi $0.72 \Omega\text{-cm}$

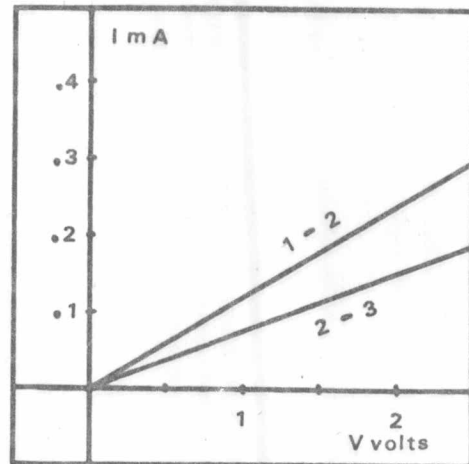
Rectifying



7.21 Ag-pSi 1-2 Ω -cm

$$\text{Ohmic } R_c = 383.63 \Omega$$

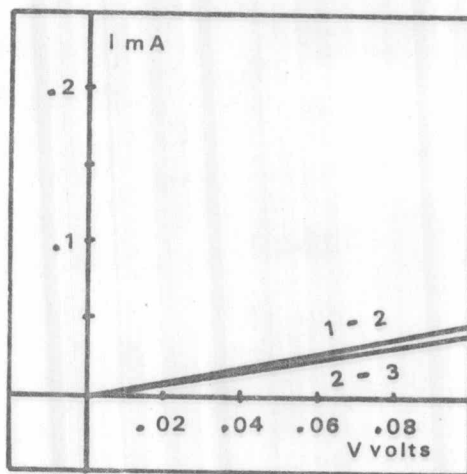
$$\rho_c = 1.29 \times 10^{-4} \Omega\text{-m}^2$$



7.22 Ag-pSi 10-20 Ω -cm

$$\text{Ohmic } R_c = 3.9 \text{ k}\Omega$$

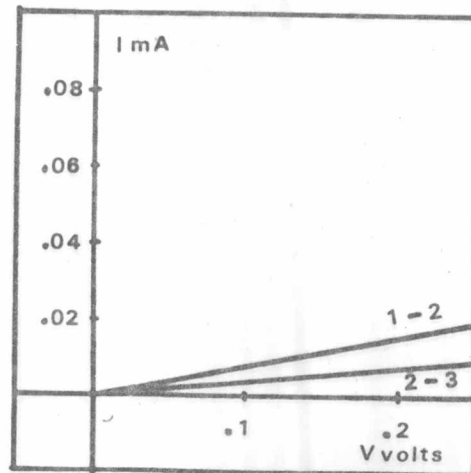
$$\rho_c = 1.31 \times 10^{-3} \Omega\text{-m}^2$$



7.23 Ag-nSi 0.015 Ω -cm

$$\text{Ohmic } 1.1 \text{ k}\Omega$$

$$\rho_c = 3.70 \times 10^{-4} \Omega\text{-m}^2$$

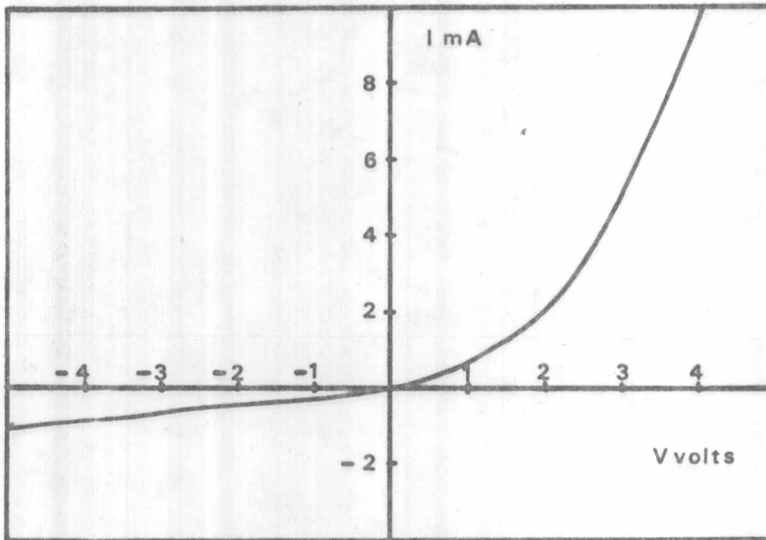


7.24 Ag-nSi 1-2 Ω -cm

$$\text{Ohmic } R_c = 5.56 \text{ k}\Omega$$

$$\rho_c = 1.87 \times 10^{-3} \Omega\text{-m}^2$$

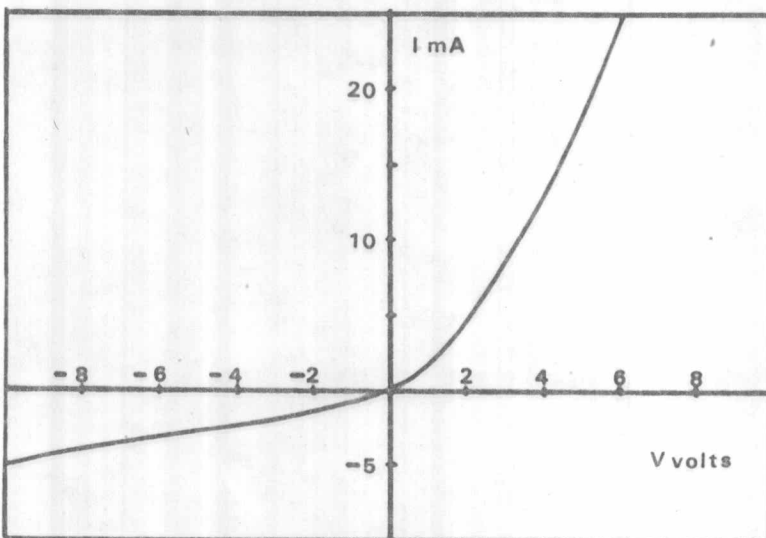
7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแวนผลึกซิลิกอนกับตีบุง



รูปที่ 7.25

Sn-pSi 5 Ω-cm

Rectifying



รูปที่ 7.26

Sn-pSi 8 Ω-cm

Rectifying

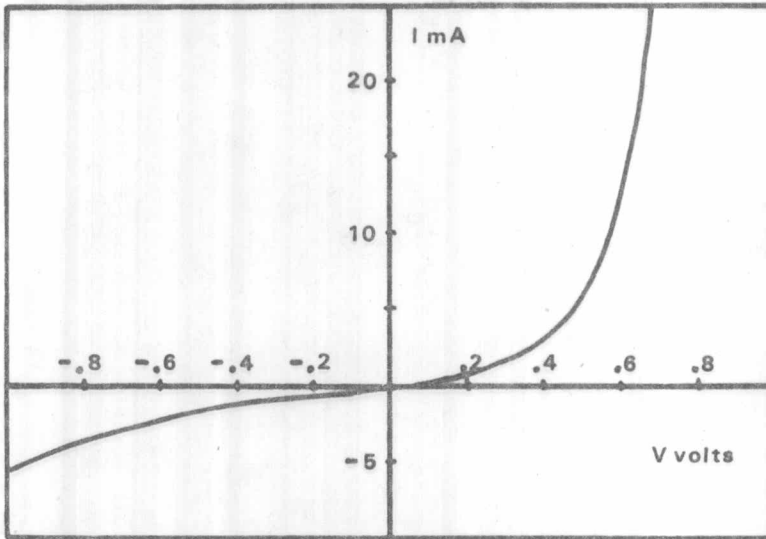


Fig 7.27

Sn-nSi 0.18 Ω -cm

Rectifying

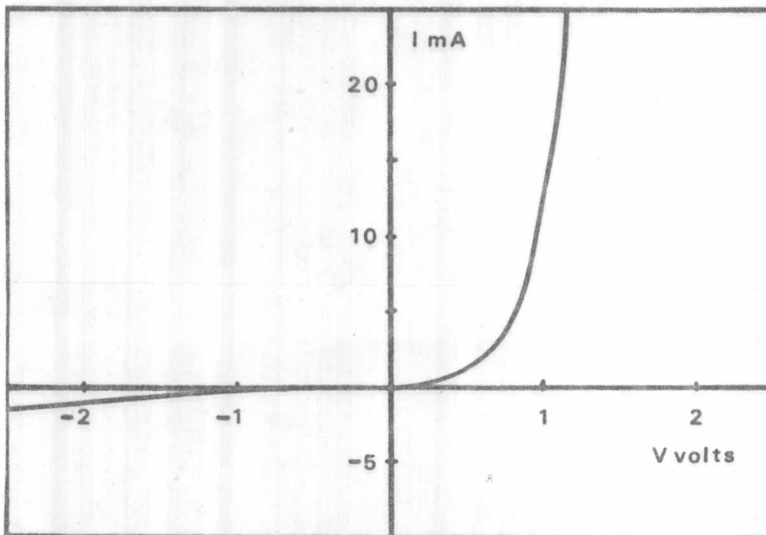
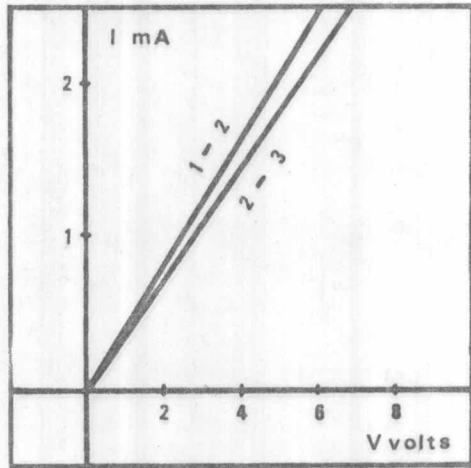


Fig 7.28

Sn-nSi 0.72 Ω -cm

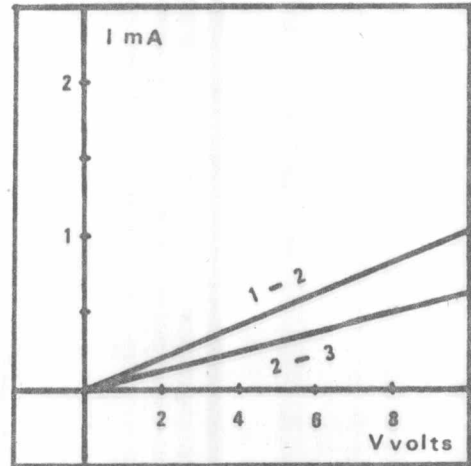
Rectifying



रूप 7.29 Sn-pSi 1-2 Ω-cm

Ohmic $R_c = 1.18 \text{ k}\Omega$

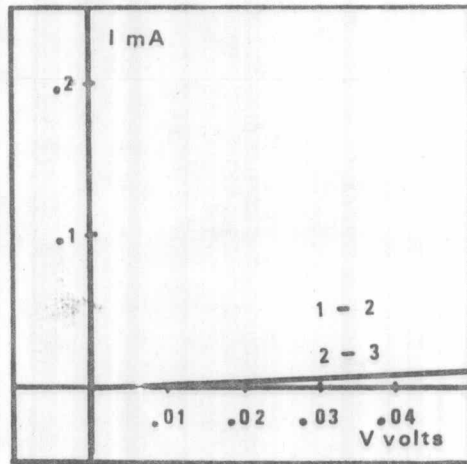
$\rho_c = 3.96 \times 10^{-4} \Omega \text{-}\mu^2$



रूप 7.30 Sn-pSi 10-20 Ω-cm

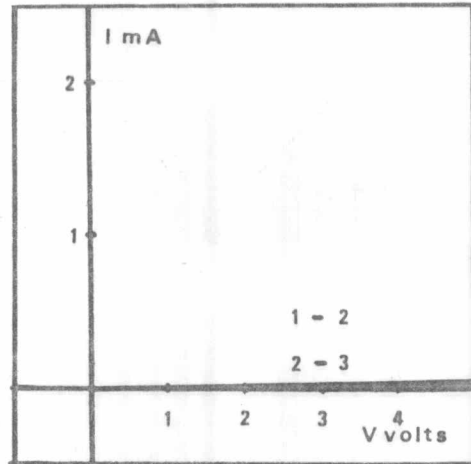
Ohmic $R_c = 4.44 \text{ k}\Omega$

$\rho_c = 1.49 \times 10^{-3} \Omega \text{-}\mu^2$



रूप 7.31 Sn-nSi 0.015 Ω-cm

ohmic $R > 5 \text{ k}\Omega$



रूप 7.32 Sn-nSi 1-2 Ω-cm

Ohmic $R > 100 \text{ k}\Omega$

7.5 ผิวสัมผัสระหว่างแว่นผลึกซิลิกอนกับนิเกิล

ผิวสัมผัสที่ทำขึ้นโดยวิธี electroless plating นั้นมีข้อเสียคือ แรงยึดเกาะระหว่างแว่นผลึกกับนิเกิลไม่แน่นพอ เมื่อเชื่อมสายต่อระหว่างนิเกิลกับหลักต่อสาย นิเกิลมักจะหลุดจากแว่นผลึกทำให้ไม่สามารถทำการวัดผลได้

นอกจากการทดลองดังกล่าวมาแล้ว ยังได้ทดลองทำผิวสัมผัสระหว่างผิวด้านหยาบ (ผิวหยาบจะมี recombination centres มาก) ของแว่นผลึกกับโลหะชนิดต่างๆ ผลปรากฏว่าขณะทำ photolithography ครั้งที่สองเพื่อ etch โลหะเป็น pattern ร่องรอยของช่องอ็อกไซด์ไม่ชัดเจน ทำให้ไม่สามารถทำตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิจัยได้

ผิวสัมผัสแบบเรกติฟายอิงที่ศึกษามีโครงสร้างเช่นเดียวกับข้อต่อกัไดโอดที่มี guard ring โครงสร้างแบบนี้คล้ายกับข้อต่อกัไดโอดต่อขนานและสวนทางกันกับไดโอดแบบหัวต่อพี-เอ็น⁽²¹⁾ เนื่องจากซิลิกอนไดโอดแบบหัวต่อพี-เอ็น มีค่าแรงดัน cut-in ประมาณ 0.6 โวลท์ ฉะนั้นความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันที่แสดงลักษณะสมบัติของผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำจึงมีค่าในช่วง 0 ถึง 0.6 โวลท์

จากผลการทดลองพบว่าผิวสัมผัสแบบเรกติฟายอิงมีค่า n และ barrier height สูงมาก และยังสังเกตได้ว่าขณะไบอัสย้อนค่ากระแสไบอัสย้อนของไดโอดมีค่าแปรตามแรงดันอย่างเด่นชัด และขณะไบอัสตามแรงดัน cut-in ของตัวอย่างส่วนมากมีค่ามากกว่า 0.6 โวลท์ ลักษณะสมบัติดังกล่าวแสดงว่า series resistance มีค่าสูงหรืออิทธิพลของ interfacial layer มีมาก ดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.3 และ 3.3

ความต้านทานของผิวสัมผัสแบบโอห์มมีคประกอบด้วยความต้านทานบริเวณผิวสัมผัสอนุกรมกับความต้านทานระหว่างขั้วต่อโลหะกับหลักต่อสาย ผู้ทำวิจัยได้ทดลองเชื่อมขั้วต่อโลหะเดียวกับหลักต่อสาย 2 หลัก แล้ววัดหาความต้านทานระหว่างหลักต่อสายทั้งสอง ปรากฏว่าความต้านทานระหว่างขั้วต่อโลหะกับหลักต่อสายมีค่า 1-10 โอห์ม โดยที่ค่าความต้านทานนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ทำผิวสัมผัสและความประณีตในการต่อสาย

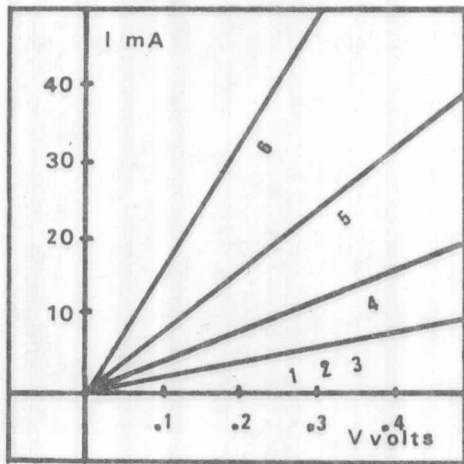
ความต้านทานที่วัดได้มีค่าสูง ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 7.7 contact resistivity ของผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับแว่นผลึกซิลิกอนชนิด N ที่มีค่าความหนาแน่นของพาหะเท่ากับ $2.5 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ มีค่าเท่ากับ $1.24 \times 10^{-4} \text{ โอห์ม-ม}^2$ เมื่อเทียบกับผลการทดลองของบุคคลอื่นดังแสดงในรูปที่ 4.2 ค่า contact resistivity ของผิวสัมผัสดังกล่าวมีค่าเพียง $10^{-5.2} \text{ โอห์ม-ม}^2$

อย่างไรก็ดีผิวสัมผัสระหว่างทองและอลูมิเนียมกับแว่นผลึกซิลิกอนชนิด P ให้ค่า contact resistivity ประมาณ 10^{-5} ถึง $10^{-6} \text{ โอห์ม-ม}^2$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความต้านทานของผิวสัมผัสแบบโอห์มมิกที่ดี (ρ_c น้อยกว่า $10^{-7} \text{ โอห์ม-ม}^2$) (9) และผิวสัมผัสที่ทำจากทองมีค่าความต้านทานต่ำที่สุดดังรูปที่ 7.13, 7.14 เปรียบเทียบกับรูปที่ 7.5, 7.6, 7.21, 7.22, 7.30 ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดลองเพื่อวัดค่า barrier height ของผิวสัมผัสระหว่างแว่นผลึกซิลิกอนชนิด P กับอลูมิเนียม ตะกั่ว เงิน ทองแดง นิกเกิล และทอง ของ Smith และ Rhoderick (70) ซึ่งแสดงผลว่าค่า barrier height ของผิวสัมผัสระหว่างแว่นผลึกซิลิกอนชนิด P กับทองมีค่าต่ำมากและต่ำกว่าผิวสัมผัสที่ทำจากโลหะอื่นๆดังกล่าว

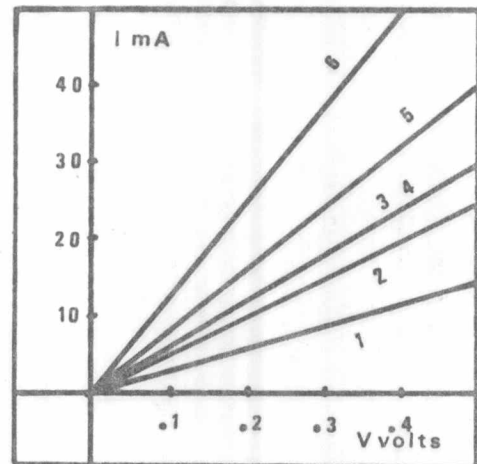
ผลจากการทดลองที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าลักษณะสมบัติของผิวสัมผัสถูกทำให้เลวลงเนื่องจากอิทธิพลของ interfacial layer

เราสามารถลดอิทธิพลของ interfacial layer โดยการอบความร้อนดังแสดงได้ด้วยเส้นประในรูปที่ 7.4 และ 7.7 เมื่ออบความร้อนผิวสัมผัสดังกล่าวที่อุณหภูมิ $550^\circ \text{ เซลเซียส}$ นาน 20 นาที ผิวสัมผัสแบบเรกติฟายอิงจะมีค่ากระแสต้านไบอัสย้อนน้อยลงและกระแสทางต้านไบอัสตามมากขึ้น ผิวสัมผัสทางด้านโอห์มมิกมีค่าความต้านทานหลังจากผิวสัมผัสถูกอบความร้อนเท่ากับ 10 โอห์ม ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความต้านทานระหว่างขั้วต่อโลหะกับหลักต่อสาย แสดงว่า R_c มีค่าลดลงอย่างมาก (R_c น้อยกว่า 10 โอห์ม) ดังเหตุผลที่จะกล่าวถึงในบทต่อไป

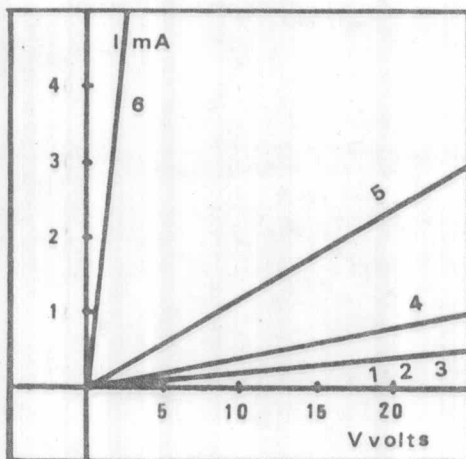
7.6 การเปลี่ยนแปลงของลักษณะสมบัติของผิวสัมผัส หลังจากอบความร้อน



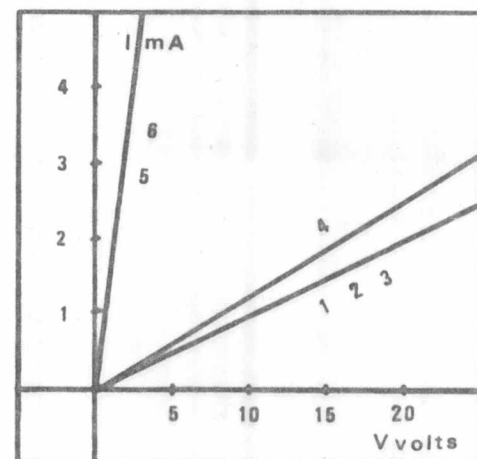
รูปที่ 7.33 Al-pSi 6.9 Ω -cm
ขณะฉาบไออลูมิเนียมแว่นผลึก
มีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 7.34 Al-pSi 6.9 Ω -cm
ขณะทำการฉาบไออลูมิเนียมแว่น
ผลึกมีอุณหภูมิประมาณ 110° เซลเซียส



รูปที่ 7.35 Al-nSi 7.4 Ω -cm
ขณะฉาบไออลูมิเนียมแว่นผลึก
มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 7.36 Al-nSi 7.4 Ω -cm
ขณะฉาบไออลูมิเนียมแว่นผลึก
มีอุณหภูมิประมาณ 110° เซลเซียส

- หมายเหตุ
1. ไม่อบความร้อน
 2. อบความร้อนที่ 300° และ 350° เซลเซียส
 3. อบความร้อนที่ 400° เซลเซียส
 4. อบความร้อนที่ 450° และ 500° เซลเซียส
 5. อบความร้อนที่ 550° เซลเซียส
 6. อบความร้อนที่ 577° และ 600° เซลเซียส

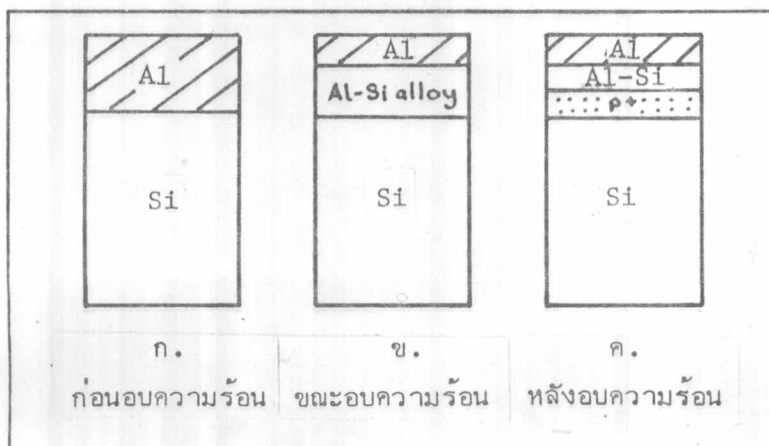
จากผลการทดลองปรากฏว่า

ความต้านทานของผิวสัมผัสแบบ Al-pSi มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบความร้อนมีค่าสูงขึ้น และมีค่าน้อยที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 550° - 600° เซลเซียส

ความต้านทานของผิวสัมผัสแบบ Al-nSi มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบความร้อนสูงขึ้น และมีค่าน้อยที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 550° - 600° เซลเซียส เช่นกัน และจากการทดลองของ Martinez (57) ให้ผลว่า ถ้าเพิ่มอุณหภูมิในการอบความร้อนผิวสัมผัส Al-nSi มากกว่า 600° เซลเซียส ค่าความต้านทานของผิวสัมผัสฯ จะเพิ่มขึ้น

ความต้านทานของผิวสัมผัสของอลูมิเนียมกับแว่นผลึกซิลิกอนแบบที่ขณะฉาบไออลูมิเนียม อุณหภูมิแว่นผลึกมีค่าเท่ากับ 110° เซลเซียส มีค่าต่ำกว่าความต้านทานของผิวสัมผัสฯ แบบที่ขณะฉาบไออลูมิเนียมอุณหภูมิแว่นผลึกมีค่าเท่าอุณหภูมิห้องปกติ แต่เมื่ออบความร้อนที่อุณหภูมิ 550° - 600° เซลเซียสแล้วความต้านทานของผิวสัมผัสทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกัน

ปรากฏการณ์ดังกล่าวทั้งหมดสามารถอธิบายด้วยรูปที่ 7.37 ดังนี้



รูปที่ 7.37

แสดงการเปลี่ยนแปลงของผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับแว่นผลึกซิลิกอน เมื่อทำการอบความร้อนที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับ 577° เซลเซียส

ผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับแว่นผลึกซิลิกอนเมื่ออุณหภูมิลดลงถึง eutectic temperature (577° เซลเซียส) ซิลิกอนจะแพร่ซึมเข้าไปในอลูมิเนียมได้มากกว่า อลูมิเนียมแพร่ซึมเข้าไปในซิลิกอนหลายเท่าตัว⁽⁵⁶⁾ จึงเกิดขึ้นโลหะผสมระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนบริเวณชั้นอลูมิเนียมที่ติดกับแว่นผลึกซิลิกอน (รูปที่ 7.37 ข.) เมื่ออุณหภูมิของผิวสัมผัสลดลงเท่าอุณหภูมิห้องจะเกิดขึ้นซิลิกอนที่มีค่าความหนาแน่นของพาหะสูง (ประมาณ $5 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$)⁽⁷¹⁾ บริเวณชั้นของซิลิกอนที่ติดกับผิวสัมผัส (รูปที่ 7.37 ค.) เนื่องจากอลูมิเนียมเป็นสารพวก acceptor

ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาแล้วเมื่อผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับแว่นผลึกซิลิกอนที่มี interfacial layer กั้นกลางอุณหภูมิลดลงถึง 577° เซลเซียส จะเกิดการแพร่ซึมของซิลิกอนทำให้ interfacial layer มีค่าความหนาแน่นลดลง

กรณีผิวสัมผัส Al-pSi แบบโอห์มมิก เมื่ออุณหภูมิลดลง ความหนาแน่นของ interfacial layer มีค่าลดลงและจะเกิดขึ้น P^+ ที่บริเวณผิวสัมผัสทำให้พาหะเคลื่อนทะลุผ่าน barrier Height ได้ง่ายขึ้น ค่าความต้านทานของ Al-pSi จึงมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความต้านทานของผิวสัมผัสมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิลดลงถึง eutectic temperature (577° เซลเซียส)

กรณีผิวสัมผัส Al-nSi แบบโอห์มมิก ความหนาแน่นของ interfacial layer จะลดลงเมื่อผิวสัมผัสอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิสูงขึ้น ขณะเดียวกันจะเกิดขึ้น P^+ ด้วย แต่ผลของการลดลงของความหนาแน่นของ interfacial layer มีค่ามากกว่า ค่าความต้านทานของผิวสัมผัสจึงมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบความร้อนสูงขึ้นระหว่าง 0° - 600° เซลเซียส เมื่ออุณหภูมิในการอบความร้อนสูงกว่า 600° เซลเซียส ซิลิกอนจะแพร่ซึมเข้าไปในอลูมิเนียมได้มากและรวดเร็วขึ้นทำให้ความหนาแน่นของชั้น P^+ มีค่ามากขึ้น ค่าความต้านทานจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับผิวสัมผัสแบบที่อุณหภูมิของแว่นผลึกขณะทำการอบโอลูมิเนียมมีค่าประมาณ 110° เซลเซียสนั้น ซิลิกอนบางส่วนจะแพร่ซึมเข้าไปในอลูมิเนียมได้ ทำให้ความต้านทานของผิวสัมผัสแบบนี้มีค่าน้อยกว่าผิวสัมผัสแบบที่อุณหภูมิของแว่นผลึกขณะทำการอบโอลูมิเนียม เท่ากับอุณหภูมิห้องปกติ แต่ปริมาณซิลิกอนที่แพร่ซึมเข้าไปในอลูมิเนียมมีจำนวนน้อยกว่า ขณะทำการอบความร้อนที่อุณหภูมิ 550° - 600° เซลเซียสมาก ทำให้ความต้านทานของผิวสัมผัสทั้งสองแบบหลังจากอบความร้อนที่อุณหภูมิ 550° - 600° เซลเซียสมีค่าใกล้เคียงกัน

นอกจากนั้นยังได้ทดลองเปลี่ยนเวลาในการอบความร้อนแต่ผลการทดลองที่ได้ไม่ดีเท่ากับเวลา 20 นาที เหตุที่ไม่ทำการศึกษาเงื่อนไขในการอบความร้อนของผิวสัมผัสระหว่างแว่นผลึกซิลิกอนกับทอง เงิน ดีบุก และนิเกิล เนื่องจาก

ก. ทอง เงิน และนิเกิล แพร่ซึมเข้าไปในซิลิกอนได้มากและรวดเร็วกว่าอลูมิเนียมหลายเท่าตัว (72) ทำให้ความหนาของชั้นโลหะดังกล่าวมีค่าลดลงอย่างมากหลังจากอบความร้อน การเชื่อมต่อสายทำได้ลำบากและความต้านทานระหว่างขั้วต่อโลหะดังกล่าวกับหลักต่อสายมีค่าสูง และโลหะที่แพร่ซึมเข้าไปในแว่นผลึกจะทำให้โครงสร้างใต้ผิวสัมผัสมีลักษณะสมบัติเปลี่ยนแปลงไป

ข. Eutectic temperature ของเงินและนิเกิล เท่ากับ 840° และ 845° เซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิดังกล่าวมีค่าสูงมาก ลักษณะสมบัติของโครงสร้างภายในแว่นผลึกซิลิกอนเปลี่ยนแปลงได้ง่าย

ค. ข้อมูลเกี่ยวกับโลหะผสมระหว่างดีบุกกับซิลิกอนยังไม่ปรากฏ (73)