



ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

การสร้างไดโอดจากฟิล์มบางของเพชร
DIAMOND THIN FILM DIODE

โดย

นางสาว กันทิมา กฤตยาภาณิษฐ์ 36014021
นางสาว ทิพวัลย์ จิตรสุภาพ 36014166
นาย วุฒิชัย ธรรมสาโรช 36014424

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. วิสุทธิ์ ลีตี่รุ่งเรือง

ปริญญาโทสำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2539

วัน เดือน ปี.....-1.๑๑.25๓๙.....
เลขทะเบียน.....0-3838-1.....
เลขเรียกหนังสือ.....T.39.401.๑๖๘๘๓.....

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2539

ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างไดโอดจากฟิล์มบางเพชร

ผู้จัดทำ

1. นางสาว กันทิมา กฤตยาวาณิช 36014021
2. นางสาว ทิพวัลย์ จิตรสุภาพ 36014166
3. นาย วุฒิชัย ธรรมลาโร 36014424



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างไดโอดจากฟิล์มบางของเพชร

DIAMOND THIN FILM DIODE

กันทิมา กฤตยาพาณิชย์ 36014021

ทิพวัลย์ จิตรสุภาพ 36014166

วุฒิชัย ธรรมสาโรช 36014424

โครงการนี้ได้รับการตรวจสอบแล้วพร้อมที่จะทำการสอบได้



(ผศ.ดร. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

การสร้างไดโอดจากฟิล์มบางของเพชร

กันทิมา กฤตยาวานิชย์

ทิพวัลย์ จิตรสุภาพ

วุฒิชัย ธรรมสาโรช

ผศ. ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

ปัจจุบันวงจรรวมส่วนใหญ่ใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็น ซิลิกอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นหลัก แต่สารสองชนิดนี้มีค่าพลังงานของแถบพลังงานต้องห้าม 1.12 eV และ 1.43 eV ตามลำดับซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้

จากคุณสมบัติของเพชรที่ค่าพลังงานของแถบพลังงานต้องห้าม 5.5 eV และมีความคล่องตัวของพาหะสูง จึงนำที่จะนำมาทดแทนสารสองชนิดข้างต้นได้ ซึ่งสามารถที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ ปรินซิปีพื้นฐานนี้จะได้อธิบายถึงการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยกระบวนการ CVD (Chemical Vapour Deposition) แบบความร้อน และทำการศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อ รวมถึงการนำฟิล์มเพชรที่ได้มาประยุกต์ใช้งานเป็น ซอตตีไดโอดและทำการทดสอบคุณสมบัติเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่างๆ และประยุกต์ใช้งานเป็นเป็น แบคเวิร์ดไดโอด ซึ่งเป็นไดโอดแบบ hetero junction คือเป็นรอยต่อของสารต่างชนิดกันต่อไป

DIAMOND THIN FILM DIODE

Kantima Kittayawanich

Tippawon Jitsuparp

Vuthichai Tumasaroj

Assr. Prof. WisutTitiroongruang

1996

ABSTRACT

Recently, the elements used in integrated circuit are silicon and GaAs , but they have a narrow bandgap 1.12 eV and 1.43 eV respectively. So that, they cannot stand in high temperature . From the record, the diamond have a bandgap 5.5 eV and high mobility therefor , it should be replaced Si and GaAs and they can use in high temperature.

In this project the diamond films synthesized from thermal filament for studying film contact. You can fabricate to schottky diode and test its characteristics at vary temperature ; then apply to backward diode that is a kind of the hetero junction diodes.

คำนำ

เนื่องด้วยเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำมีประโยชน์อย่างมากในปัจจุบัน แดวนำมาใช้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ในรูปแบบของอุปกรณ์และวงจรรวม จึงได้มีผู้ทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในปัจจุบันได้แก่ ซิลิกอน และ แกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งพบว่าสารทั้งสองชนิดมีข้อจำกัดทางการใช้งานที่อุณหภูมิสูง จากการศึกษาพบว่าเพชรสามารถที่จะนำมาใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ เนื่องจากสมบัติบางประการ เช่น ค่าความคล่องตัวของพาหะสูง , ค่าสนามไฟฟ้าพังทะลายสูง , เสถียรภาพของอุณหภูมิที่พื้นผิวสูง และมีค่าความนำความร้อนสูง

จึงทำการหาวิธีสังเคราะห์ฟิล์มเพชรขึ้น และนำฟิล์มเพชรที่สร้างได้ไปสร้างเป็นรอยต่อซึ่งเป็นพื้นฐานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไป

สารบัญ

| | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อ | I |
| ABSTRACT | II |
| คำนำ | III |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความเป็นมา | 1 |
| 1.2 CVD แบบความร้อน | 2 |
| 1.2.1 หลักการ CVD แบบความร้อน | 3 |
| 1.2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น | 5 |
| 1.3 กระบวนการสร้าง | 6 |
| 1.3.1 กระบวนการเตรียมแผ่นฐานรอง | 6 |
| 1.3.1.1 การชุบด้วยสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ | 6 |
| 1.3.1.2 การขัดด้วยครีมเพชร | 8 |
| 1.3.2 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค | 8 |
| 1.3.3 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรชนิดเอ็น | 11 |
| 1.3.4 การสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี | 12 |
| 1.4 กระบวนการสร้างรอยต่อระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชรด้วยวิธีlift-off | 12 |
| 1.4.1 การทำความสะอาดพื้นผิวฟิล์มเพชรเริ่มต้น | 13 |
| 1.4.2 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี | 13 |
| 1.4.3 การเคลือบชั้นโลหะในสุญญากาศ | 13 |
| 1.4.4 กระบวนการการซินเดอริง (sinrering) | 13 |
| 1.5 กระบวนการสร้างฟิล์มชนิดรอยต่อp-I | 14 |
| 1.6 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร | 14 |
| 1.6.1 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy | 14 |
| 1.6.2 การศึกษาฟิล์มเพชรชนิดพี | 18 |
| 1.6.2.1 ลักษณะพื้นผิวที่ค่า B/C ต่าง ๆ | 19 |
| 1.6.2.2 การวิเคราะห์ชนิดความนำไฟฟ้าของฟิล์มโดยอาศัยหลักการซีเบก | 19 |
| 1.6.2.3 การหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า | 21 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| บทที่ 2 รอยต่อ | |
| 2.1 การเติมสารเจือ | 26 |
| 2.2 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี | 28 |
| 2.3 แบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชร | 30 |
| 2.3.1 แบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก | 30 |
| 2.3.2 แบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชรชนิดพี | 32 |
| บทที่ 3 ขอตตีก์ไดโอด | |
| 3.1 ทฤษฎี | 37 |
| 3.1.1 ทฤษฎีรอยต่อของขอตตีก์ไดโอด | 37 |
| 3.1.2 กระแสใน ขอตตีก์ไดโอด | 40 |
| 3.2 ขอตตีก์ไดโอดจากฟิล์มเพชรชนิดพี | 42 |
| 3.3 การทดลองและผลการทดลอง | 43 |
| 3.3.1 การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะชนิดต่าง ๆ กับฟิล์มเพชร | 43 |
| 3.3.2 การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อ P-I | 48 |
| 3.3.3 การศึกษาคุณสมบัติของขอตตีก์ไดโอด | 52 |
| 3.3.4 การศึกษาคุณสมบัติของขอตตีก์ไดโอดกับอุณหภูมิ | 55 |
| บทที่ 4 แบคเวอริต์ไดโอด | |
| 4.1 ชนิดของแบคเวอริต์ไดโอด | 63 |
| 4.1.1 ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ | 63 |
| 4.1.2 ชนิดที่ไม่มีความต้านทานเชิงลบ | 65 |
| 4.2 กระบวนการสร้างแบคเวอริต์ไดโอด | 67 |
| 4.3 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็น | 67 |
| 4.4 การทดลองและผลการทดลอง | 69 |
| บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ | 73 |
| เอกสารอ้างอิง | 78 |
| กิตติกรรมประกาศ | 79 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนสัมผัส กรณี ($\phi_s < \phi_m$) | 28 |
| รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีภายหลังจากสัมผัส กรณี ($\phi_s < \phi_m$) | 29 |
| รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนสัมผัส ในกรณี ($\phi_m < \phi_s$) | 29 |
| รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีภายหลังจากสัมผัส ในกรณี ($\phi_m < \phi_s$) | 30 |
| รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิก | 32 |
| รูปที่ 2.9 แสดงแบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชรชนิดพี | 33 |
| รูปที่ 3.1 (ก) แผนภาพแสดงโครงสร้างรอยต่อของขอตติ์ไดโอด | 37 |
| (ข) แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนสัมผัส | 37 |
| (ค) แสดงแรงดันที่รอยต่อและความกว้างของบริเวณปลอดพาหะภายหลังจากสัมผัส | 38 |
| รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำในสภาพความเป็นจริง | 39 |
| รูปที่ 3.3 แสดงการไหลของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำชนิดพีไปยังโลหะ เมื่อให้ไบแอสตรง | 40 |
| รูปที่ 3.4 แสดงการไหลของอิเล็กตรอนจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ เมื่อให้ไบแอสย้อนกลับ | 41 |
| รูปที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติของกระแส - แรงดันในขอตติ์ไดโอด | 41 |
| รูปที่ 3.6 แสดงภาพตัดขวางของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชร | 44 |
| รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะกระแส - แรงดันของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก | 45 |
| รูปที่ 3.8 แสดงคุณลักษณะกระแส - แรงดันของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชรชนิดพี | 45 |
| รูปที่ 3.9 แสดงภาพตัดขวางของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร | 45 |
| รูปที่ 3.10 แสดงคุณลักษณะกระแส - แรงดันของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก | 45 |
| รูปที่ 3.11 แสดงคุณลักษณะกระแส - แรงดันของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี | 46 |
| รูปที่ 3.12 แสดงภาพตัดขวางของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพชร | 47 |
| รูปที่ 3.13 แสดงคุณลักษณะกระแส - แรงดันของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก | 47 |
| รูปที่ 3.14 แสดงคุณลักษณะกระแส - แรงดันของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี | 48 |
| รูปที่ 3.15 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่อP-I | 50 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 3.16 (ก) แสดงไดอะแกรมโครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดพีและชนิดอินทรีซิค | 51 |
| รูปที่ 3.16 (ข) แสดงไดอะแกรมโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อP-I | 51 |
| รูปที่ 3.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของกระแส - แรงดัน ของรอยต่อออลูมิเนียม - ฟิล์มเพชร | 53 |
| รูปที่ 3.18 แสดงการหาค่ากระแสอิ่มตัวโดยการประมาณ | 54 |
| รูปที่ 3.19 แผนภาพแสดงการศึกษาคุณสมบัติของขอตติ์ไดโอดที่อุณหภูมิต่าง ๆ | 56 |
| รูปที่ 3.20 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติของขอตติ์ไดโอดที่อุณหภูมิต่างๆ | 58 |
| รูปที่ 3.21 แสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดันของรอยต่อออลูมิเนียมและฟิล์มเพชรชนิดพี | 60 |
| รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานเมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาสัมผัส | 62 |
| รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแบคเวอริตไดโอดชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ เมื่อให้ไบอัสย้อนกลับ | 63 |
| รูปที่ 4.3 ก , ข , ค แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแบคเวอริตไดโอดชนิดที่มี ความต้านทานเชิงลบ | 64 |
| รูปที่ 4.4 แสดงกราฟของแบคเวอริตไดโอดชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบเมื่อให้ไบอัสตรง | 65 |
| รูปที่ 4.5 ก แสดงระดับพลังงานเฟอร์มิของแบคเวอริตไดโอดชนิดที่ไม่มีความต้านทานเชิงลบ | 65 |
| ข แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแบคเวอริตไดโอดชนิดที่ไม่มีความต้านทานเชิงลบ เมื่อให้ไบอัสย้อนกลับ | 66 |
| รูปที่ 4.6 (ก) แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแบคเวอริตไดโอดชนิดที่ไม่ มีความต้านทานเชิงลบ | 67 |
| (ข) กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของแบคเวอริตไดโอดชนิด ที่ไม่มีความต้านทาน | 67 |
| รูปที่ 4.7 แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็นที่แยกกันอยู่ เชิงลบ | 68 |
| รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดพี และซิลิกอนชนิดเอ็น เมื่อนำ มาสัมผัสกันที่ภาวะสมดุลย์ | 68 |
| รูปที่ 4.10 แสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดันของแบคเวอริตไดโอดที่ 25°C | 71 |
| รูปที่ 4.11 แสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดันของแบคเวอริตไดโอดที่ 50°C | 71 |
| รูปที่ 4.12 แสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดันของแบคเวอริตไดโอดที่ 70°C | 72 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 1.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรเปรียบเทียบกับ สารกึ่งตัวนำซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ | 6 |
| ตารางที่ 1.2 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อ คาร์บอนต่าง ๆ | 24 |
| ตารางที่ 3.1 แสดงความสูงของกำแพงศักย์ (V) สำหรับโลหะและ สารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดพีต่าง ๆ | 40 |
| ตารางที่ 3.2 แสดงค่าแรงดันออกที่อุณหภูมิต่างๆของเทอร์โมคัปเปอ์ สายสี่ขา-ขาว | 57 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

การเริ่มสังเคราะห์เพชรนั้น เริ่มจากทราบว่าเพชรเป็นรูปหนึ่งของคาร์บอน โดยในปี ค.ศ. 1797 Smitson Tennant ได้ทำการเผาเพชรในออกซิเจน (O_2) ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ (CO_2) และส่วนที่เหลือคือคาร์บอน (ถ่าน)

ในปี ค.ศ. 1955 General Electric Research Laboratories Buddy ได้ทำการสังเคราะห์เพชรเป็นผลสำเร็จ โดยใช้ความร้อนและแรงอัดจนทำให้กราไฟต์เปลี่ยนรูปเป็นเพชร แต่เรายังสามารถสังเคราะห์เพชรได้ที่ความดันและอุณหภูมิต่ำด้วย การสร้างที่มีความสมดุลง่ายทางความร้อน จะใช้วิธีการสังเคราะห์จากสภาวะก๊าซซึ่งเป็นก๊าซผสมระหว่างไฮโดรคาร์บอนกับไฮโดรเจน โดยไฮโดรเจนจะเป็นตัวแยกกราไฟต์ออกไป แต่ไม่แยกเพชรออก ดังนั้นไฮโดรเจนอะตอมจึงมีความสำคัญมากในการสร้างเพชรที่ความดันต่ำ

การสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ เริ่มทำอย่างจริงจังประมาณปี ค.ศ.1970 หลังจากนั้นก็มีเทคนิคเกิดขึ้นมากมายในการสร้างเพชรที่ความดันต่ำ เช่น

1. Radio frequency Chemical Vapour Deposition (RFCVD)
2. Microwave plasma enhanced Chemical Vapour Deposition (MPECVD)
3. Hot filament Chemical Vapour Deposition (HFCVD)

โดยเทคนิคทั้งหมดอยู่บนพื้นฐานที่ทำให้ไฮโดรเจน (H_2) แตกตัวบริเวณพื้นผิวที่สร้างเพื่อกำจัดกราไฟต์

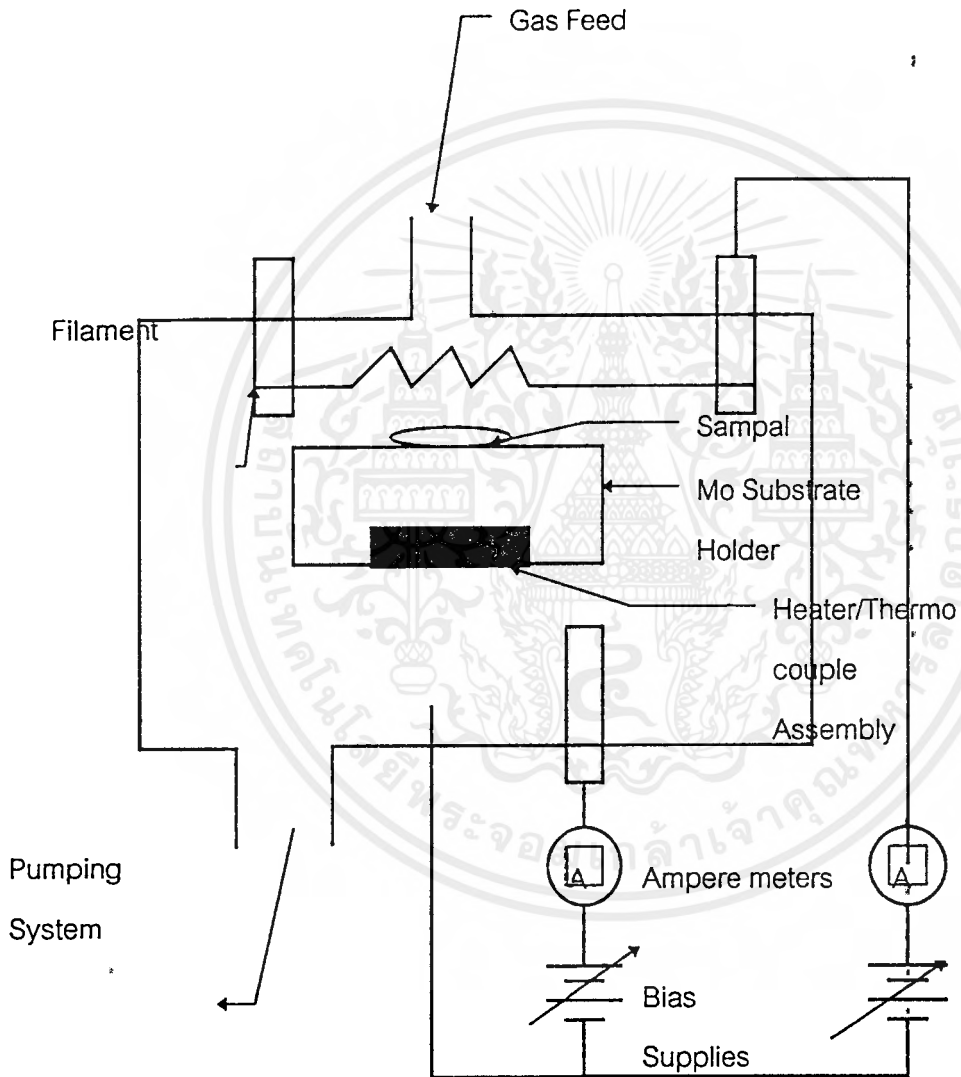
ที่ความดันต่ำวิธีที่นิยมใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร คือ CVD (Chemical Vapour Deposition)

แบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. Thermal activate CVD
2. High frequency plasma enhanced CVD
3. Direct current (dc) discharge assisted CVD

ในโครงการนี้วิธีที่ใช้ คือ Thermal activated CVD (CVD แบบความร้อน)

1.2 CVD แบบความร้อน (Thermal activated CVD)



รูปที่ 1.1 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์ HFCVD

จากรูปที่ 1.1 ขดลวดที่ใช้เป็นไส้หลอดสามารถใช้ทั้งสแตน (หรือ แทนทาลัม, โมลิบดีนัม, เรเนียม) ถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 2,000 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไฮโดรเจน (H₂) และ"อโดคาร์บอนที่ผสมอยู่ด้วยกัน แยกออกจากกันโดยความเข้มข้นของ มีเทน เป็น 0.1-0.2 % ในไฮโดรเจนที่ความดัน 50 -100 ทอร์ ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรองประมาณ 1 เซนติเมตร โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรอง แต่ฐานรองจะมีอุณหภูมิระหว่าง 800 -1,000 องศาเซลเซียส ผลจากการกระตุ้นด้วยความร้อนจะทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอน เกิดการแพร่และปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณผิว (ฐานรองสามารถ ปล่อยกระแสบวก เพื่อให้เกิดการแตกตัวของก๊าซบริเวณนี้มากขึ้น ทำให้อัตราการก่อตัวของก๊าซเพิ่มขึ้น โดยความหนาของฟิล์มที่ได้ขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้)

ข้อดีของ HFCVD

1. ง่าย
2. ราคาถูก
3. สามารถสร้างฟิล์มครอบคลุมฐานรองขนาดใหญ่ได้

ข้อเสียของ HFCVD

1. ไส้หลอดเปราะ และผิครุปร่าง
2. ที่อุณหภูมิสูงเกิดการก่อตัวของคาร์บายด์ที่ไส้หลอด

1.2.1 หลักการ CVD แบบความร้อน

คุณสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำ เพชรในธรรมชาติมีค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ อยู่ในช่วง 10^{12} ที่ 140 องศาเซลวิน ถึง 10^5 ที่อุณหภูมิห้อง ความคล่องตัวของโฮล (Hole mobility) $1,800 \text{ cm}^2/\text{V-sec}$. ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (e⁻ mobility) $2,000 \text{ cm}^2/\text{V-sec}$.

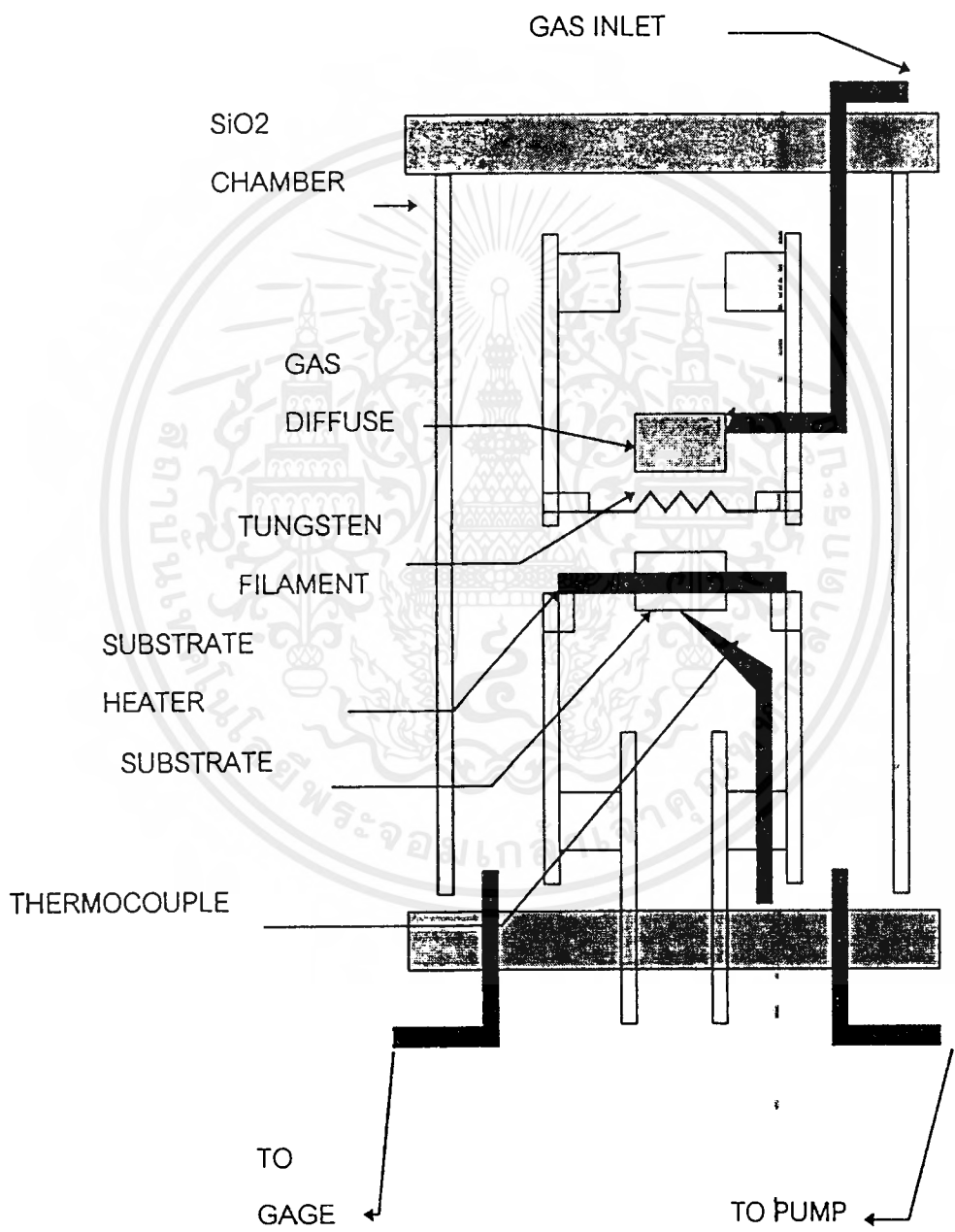
เงื่อนไขในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD

1. ต้องทำการกระตุ้นก๊าซเฟสที่อุณหภูมิสูง หรือกระตุ้นด้วยพลาสมา (อาจใช้ 2วิธีร่วมกัน)
2. ก๊าซเฟสต้องประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน เช่น ไฮโดรคาร์บอนแบบต่าง ๆ
3. ระบบต้องมีอะตอมของตัวที่จะกำจัดกราฟิตเข้มข้นเพียงพอ ปกติใช้ไฮโดรเจน H₂ ,

OH , O₂ , F₂

4. ต้องทำการเตรียมพื้นผิวฐานรองเพื่อรองรับการเกิดนิวเคลียส
5. กระบวนการสร้างต้องมีแรงที่สามารถขับอะตอมคาร์บอนจากก๊าซเฟสไปที่ฐานรอง ส่วนใหญ่แรงที่ใช้ขับจะอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิหรือใช้การเป่าจากก๊าซเฟสไปที่ฐานรอง นอกจากนี้ยังสามารถใช้สนามไฟฟ้าช่วย

การปฏิบัติการขั้นต้นนั้นต้องทำอย่างรอบคอบ แต่อย่างไรก็ตามเงื่อนไขทั้งหมดนี้อาจทำให้เกิดเพชรหรือไม่ก็ได้ โดยจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ 1,800 - 2,300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 1.2 แสดงแผนภาพไดอะแกรมของระบบ CVD แบบความร้อน

1.2.2. การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

จากตารางที่ 1.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ เนื่องจากทราบแล้วว่าเพชรเป็นรูปหนึ่งของคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุหมู่ 4 และเป็นประเภทสารกึ่งตัวนำ จึงมีคุณสมบัติในการที่จะนำมาสร้างอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้เช่นเดียวกับซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์

จากตารางสามารถสรุปความสำคัญของเพชรได้ดังนี้

1. เมื่อเปรียบเทียบค่าของแถบพลังงานต้องห้าม (E_g) พบว่าเพชรมีค่า 5.5 eV ซึ่งมีค่ามากกว่าซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์มาก ดังนั้นในการที่จะทำให้เพชรแตกตัวให้พาหะทั้งโฮลและอิเล็กตรอนต้องใช้พลังงานสูง จึงเหมาะที่จะนำไปใช้งานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูงๆ เพื่อจะทำให้สามารถให้พาหะออกมาได้อย่างเหมาะสม ซึ่งที่อุณหภูมิสูงๆ ซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ไม่สามารถที่จะควบคุมพาหะได้

2. เพชรมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ และมีค่าความคล่องตัวของโฮลสูง ทำให้สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ดี

| Materials | Si | GaAs | Diamond |
|----------------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| crystal structure | diamond | zinc blende | diamond |
| energy gap(V) | 1.12 | 1.43 | 5.5 |
| electron mobility(cm ² /Vs) | 1500 | 8500 | 2000 |
| hole mobility(cm ² /Vs) | 600 | 400 | 1800 |
| dielectric constant | 11 | 12.8 | 5.7 |
| lattice constant(A) | 5.431 | 5.653 | 3.567 |
| density(g/cm ³) | 2.42 | 5.32 | 3.515 |
| breakdown field(V/cm) | 5x10 ⁶ | 6x10 ⁶ | 10x10 ⁶ |
| saturated velocity(cm/s) | 10 ⁷ | 2x10 ⁷ | 2.7x10 ⁷ |
| thermal conductivity(W/cmK) | 1.5 | 0.5 | 20 |

ตารางที่ 1.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์

1.3 กระบวนการสร้าง

1.3.1 กระบวนการเตรียมแผ่นฐานรอง การสร้างฟิล์มเพชรจากฐานรองที่ไม่ใช่เพชรนั้นมีวัสดุหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้เป็นฐานรองได้ ยกตัวอย่างเช่น Si , SiC , WC , Ta , W , Mo และ Al_2O_3 เป็นต้น โดยวัสดุที่เลือกมาทำเป็นฐานรองในการสร้างฟิล์มเพชรจะเป็นซิลิกอน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีใช้อยู่แล้วในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่าง ๆ ก่อนที่จะนำฐานรองไปใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรนั้น ต้องมีการเตรียมฐานรองก่อน วิธีที่นำเสนอเป็นวิธีการเตรียมฐานรองโดยใช้การขัดด้วยครีมเพชร และการชุบด้วยสารละลายของผงเพชรผสมเอทิลแอลกอฮอล์มีรายละเอียดการเตรียมดังนี้คือ

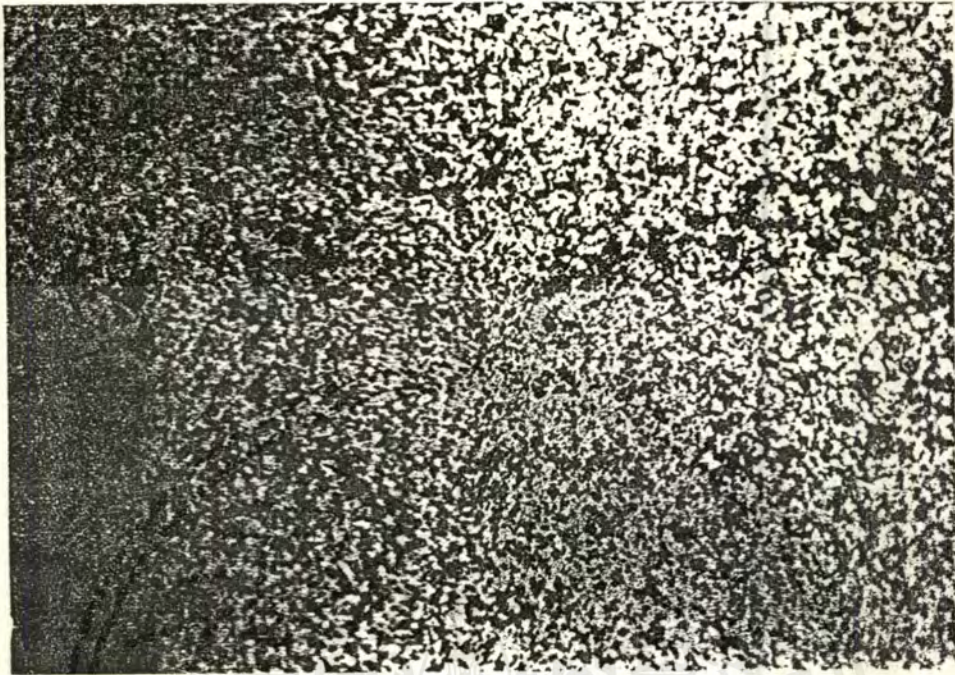
1.3.1.1 การชุบด้วยสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์

สำหรับการเตรียมด้วยวิธีนี้ผงเพชรที่ใช้มีขนาดประมาณ 0.05 ไมครอน กระทำโดยการนำผงเพชรผสมในเอทิลแอลกอฮอล์จากนั้นนำไป Supersonic เป็นเวลา 3 นาทีเพื่อให้ผงเพชรกระจายออก ลักษณะของผงเพชรและสารละลายที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 1.3 นำฐานรองซิลิกอนที่แยกส่วนเรียบร้อยแล้ว (ขนาด 5x6 มิลลิเมตร) มาชุบในสารละลายแล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จากการตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ฐานรองมีลักษณะของเม็ดเพชรที่กระจายอยู่ทั่วไปดังรูปที่ 1.4

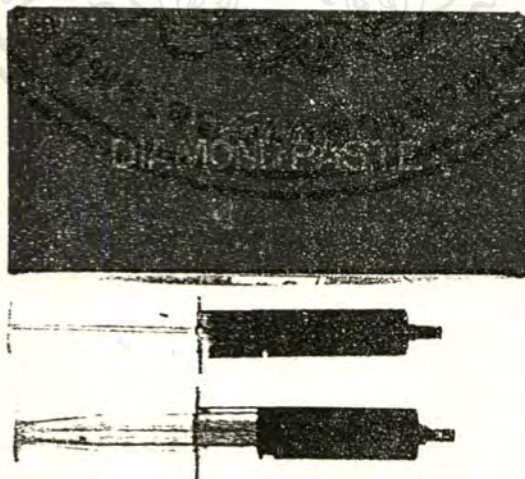


รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะของสารละลายของผงเพชรในเอทิลแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการค้าเท่านั้น เมื่ออยู่ในที่ต้นฉบับขอรับรองว่าไม่มีการแก้ไขใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

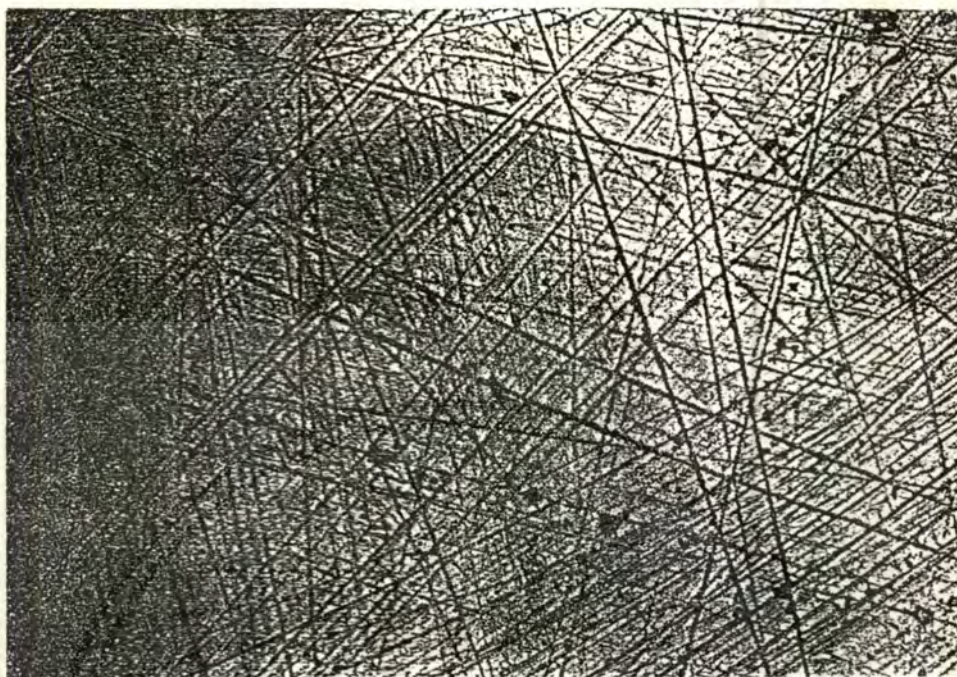


รูปที่ 1.4 แสดงลักษณะพื้นผิวที่ได้จากการขบสลายผงเพชร



รูปที่ 1.5 แสดงครีมเพชรที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.6 แสดงพื้นผิวของแผ่นฐานรอง silicon ที่ขัดด้วยครีมเพชร

1.3.1.2 การขัดด้วยครีมเพชร

การเตรียมแผ่นฐานรองด้วยวิธีนี้จะใช้ครีมเพชรที่มีขนาด 5 ไมครอน และ 9 ไมครอน ครีมเพชรที่มีลักษณะดังรูปที่ 1.5 การขัดฐานรองจะขัดในลักษณะวนไปรอบๆเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง หลังจากขัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำแผ่นไปทำความสะอาด โดยมีวิธีการดังนี้

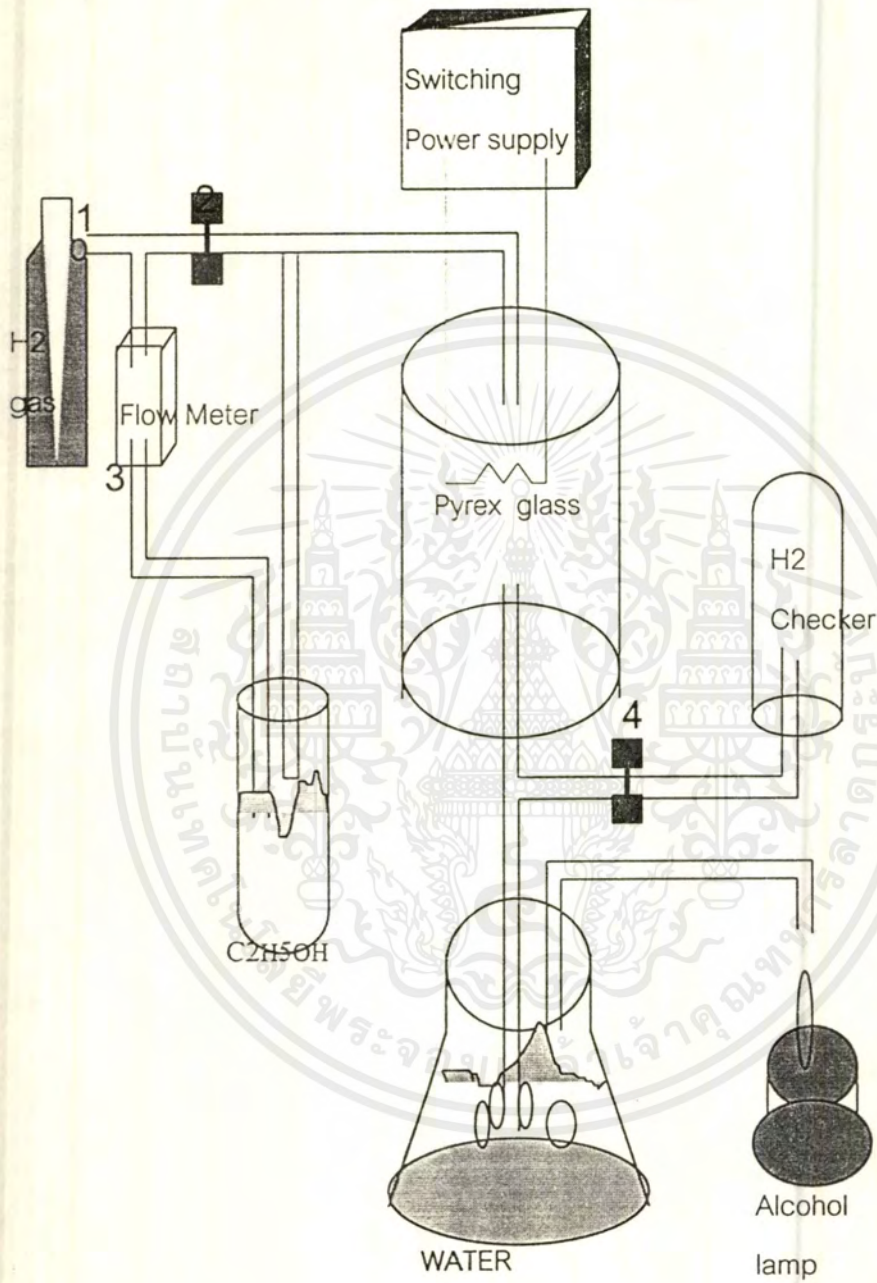
- 1) ต้มฐานรองที่ขัดเสร็จแล้วในไตรโคโลอะซิโตน (Trichloacetone) เป็นเวลา 5 นาที
- 2) super sonic ในอะซิโตน (acetone) เป็นเวลา 3 นาที
- 3) ล้างด้วยน้ำ DI (Deionized water)
- 4) เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

จากนั้นนำแผ่นฐานรองไปดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ลักษณะพื้นผิวของฐานรองที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 1.6 กรณีที่ดูแล้วร่องรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นมีน้อยต้องนำไปขัดใหม่ สำหรับร่องรอยที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวล่อให้เกิดการนิวเคลียสของฟิล์มเพชรขึ้น หลังจากเตรียมชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการแยกชิ้นงานให้มีขนาดกว้าง 5 มิลลิเมตรและยาว 6 มิลลิเมตร เพื่อนำไปใช้งานต่อไป

1.3.2 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค

สำหรับกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรนั้น จะใช้วิธีการ CVD แบบความร้อน จากระบบที่ประกอบขึ้นเอง โดยกระบวนการสร้างพิจารณาจากรูปที่ 1.7 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้คือ

1. ตรวจสอบวาล์ว 2 และ 3 ให้อยู่ที่ตำแหน่งเปิดออก ส่วนวาล์ว 4 ให้ปิดไว้
2. เปิดวาล์ว 1 ของถังก๊าซไฮโดรเจน ปรับวาล์ว 1 ให้ได้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 200 ml/min จับเวลา 15 นาที (เพื่อให้ระบบเป็นบรรยากาศของไฮโดรเจน)
3. ปรับวาล์ว 2 เพื่อแบ่งก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนให้ไหลผ่าน Flow meter โดยปรับวาล์ว 4 จนกระทั่งอ่านสเกลของ Flow meter ได้อัตราการไหล 10 ml/min
4. ปรับวาล์ว 3 ให้ได้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเหลือ 70 ml/min พร้อมทั้งปรับวาล์ว 4 ให้ได้อัตราการไหล 10 ml/min จับเวลา 15 นาที
5. เปิดวาล์ว 4 เพื่อตรวจสอบระบบว่าเป็นก๊าซไฮโดรเจน โดยจุดไฟเผาก๊าซในหลอด จากนั้นปิดวาล์ว 4
6. จุดตะเกียงแอลกอฮอล์ และเปิดพัดลมระบายความร้อน
7. จ่ายกระแสให้กับไส้ทั้งสแตน (ค่อย ๆ เพิ่มกระแส) เพิ่มกระแสจนสามารถวัดอุณหภูมิที่ไส้หลอดให้มีค่าเหมาะสม (กระแสที่ใช้ประมาณ 7-8 แอมแปร์ AC)
8. ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่โดยใช้ Portable Radiation Thermometer ของ CHINO
9. ปรับระยะห่างระหว่างฐานรองกับไส้หลอดทั้งสแตนให้มีค่าประมาณ 1-2 มิลลิเมตร
10. ใช้เวลาในการสร้าง 2 ชั่วโมง
11. ปิดแหล่งจ่ายกระแส (ค่อย ๆ ลดลง) พร้อมทั้งปิดวาล์ว 1
12. รอจนกระทั่งก๊าซที่ค้างอยู่ไหลออกหมด จึงดับตะเกียงแอลกอฮอล์
13. ปิดวาล์ว 2 รอจนระบบเย็นจึงนำฟิล์มออกมาทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

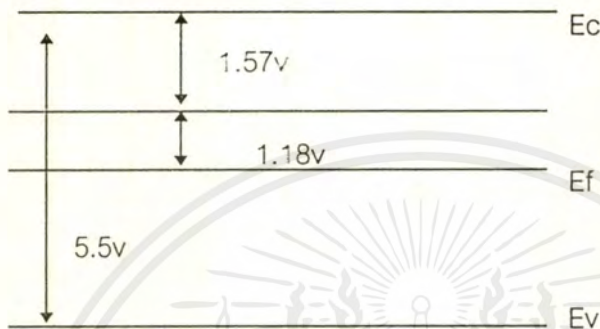


รูปที่ 1.7 แสดงแผนภาพกระบวนการสร้างแผ่นฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3 กระบวนการสร้างฟิล์มเซรชนิดเอ็น

ในที่นี้จะไม่ขอเสนอเกี่ยวกับกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรชนิดเอ็น เนื่องจากถ้าพิจารณาถึงอะตอมของไนโตรเจน พบว่าระดับพลังงานของไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่าแถบความนำเท่ากับ 1.57 eV ดังรูป

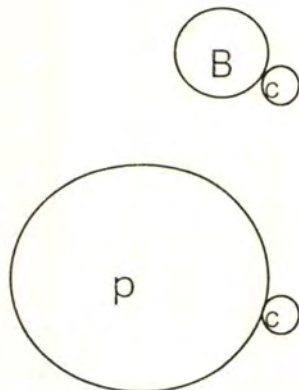


รูปที่ 1.8 แสดงระดับพลังงานของไนโตรเจน

จากรูปที่ 1.8 จะเห็นว่าถ้าใช้ไนโตรเจนเป็นสารเจือในเพชรจะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิเดิม (E_f) เลื่อนขึ้นมาอยู่ที่ระดับใหม่ (E_f) ซึ่งยังห่างจากแถบความนำ (E_c) เท่ากับ 1.57 eV ถือเป็นระยะห่างมากเกินไปที่จะแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้ เมื่อเทียบกับซิลิกอน (Si) ซึ่งมีช่องว่างพลังงาน (band gap) กว้างเพียง 1.1 eV เราจึงไม่สามารถใช้ไนโตรเจนเป็นสารเจือได้

ในกรณีของฟอสฟอรัสพิจารณาได้ดังนี้

อะตอมของฟอสฟอรัสมีขนาดใหญ่กว่าของเพชรมาก เมื่อใช้เป็นสารเจือในเพชร จะทำให้ลักษณะโครงสร้างผิดรูปไป จึงทำให้ไม่สามารถควบคุมความนำไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 แสดงขนาดของอะตอมฟอสฟอรัสและโบรอนเมื่อเทียบกับอะตอมเพชร

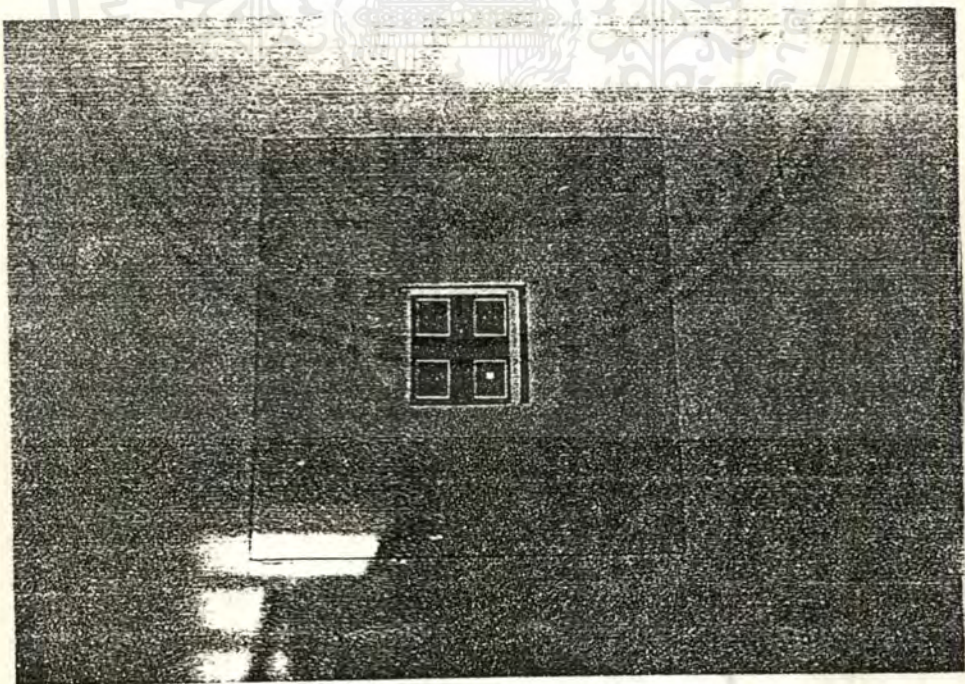
1.3.4 การสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี

กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีมีขั้นตอนการสร้างเช่นเดียวกับกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 1.7 จะแตกต่างตรงแหล่งจ่ายที่ใช้เป็นสารละลายของโบรอนไตรออกไซด์ในเอทิลแอลกอฮอล์แทนที่จะเป็นเอทิลแอลกอฮอล์อย่างเดียว สำหรับการสร้างฟิล์มเพชรที่มีอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนมีค่าต่าง ๆ นั้นทำโดยการเปลี่ยนแหล่งจ่ายเป็นสารละลายที่เตรียมที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนมีค่าตามต้องการ

เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของอะตอมสารเจือของโบรอน ระบบที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีจึงสร้างขึ้นใหม่อีกชุดหนึ่ง โดยแยกออกจากระบบที่ใช้สร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค

1.4 กระบวนการสร้างรอยต่อระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชรด้วยวิธีlift-off

ในการนำฟิล์มเพชรที่สร้างได้ไปศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ต้องมีการสร้างขั้วโลหะ สำหรับวิธีที่นำเสนอเป็นอีกวิธีหนึ่งของการสร้างรอยต่อโลหะที่เหมาะสมสำหรับใช้กับฟิล์มเพชร คือวิธี lift-off การสร้างเริ่มจากการสร้างกระจกต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 1.10 ส่วนรายละเอียดขั้นตอนการสร้างวิธีนี้แบ่งเป็นขั้นตอนย่อยๆดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 1.10 แสดงกระจกต้นแบบในการสร้างขั้วโลหะนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.1 การทำความสะอาดพื้นผิวฟิล์มเพชรเริ่มต้น

การทำความสะอาดพื้นผิวเป็นการกำจัดคราบไขมันและสิ่งเจือปนต่างๆออกจากพื้นผิวฟิล์มเพื่อให้มีความสะอาดในการนำไปทำกระบวนการต่อไป มีขั้นตอนดังนี้

1. ต้มในไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที
2. ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องล้างความถี่สูง (Supersonic cleaner) เป็นเวลา 3 นาที
3. ล้างด้วยน้ำ DI (Deionization water)
4. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

1.4.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

โฟโตลิโธกราฟีเป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายจากกระจกต้นแบบลงบนฟิล์มที่เคลือบน้ำยาไวแสงไว้ วิธีการ lift-off นี้ใช้น้ำยาไวแสงที่ใช้เป็นชนิดบวก ขั้นตอนการสร้างมีดังนี้

1. นำฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. เคลือบน้ำยาไวแสง Az โดยใช้เครื่องสปินเนอร์ (Spinner) ที่ความเร็ว 2000 รอบ/นาที นำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)
3. นำฟิล์มที่เคลือบน้ำยาไวแสงไปฉายลวดลายด้วยเครื่อง Mask aligner เป็นเวลา 3 นาที
4. ล้างฟิล์มด้วย Az developer
5. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

1.4.3 การเคลือบชั้นโลหะในสุญญากาศ

การเคลือบชั้นโลหะ (Au, Al) ในสุญญากาศ กระทำที่ความดัน 1.3×10^{-6} ทอร์โดยวิธีแบบความร้อนด้วยเครื่อง vacuum evaporator จากการเคลือบจะให้ความหนาของชั้นโลหะประมาณ 1 ไมครอน

1.4.4 กระบวนการการซินเตอร์ริง (sintering)

การซินเตอร์ริง กระทำเพื่อให้รอยต่อระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชรเกาะติดแน่นขึ้น กระทำในบรรยากาศของไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000cc/min กรณีของทองคำ ทำการซินเตอร์ริงกระทำที่อุณหภูมิ 890 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที สำหรับกรณีอลูมิเนียม จะซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที

1.5 กระบวนการสร้างฟิล์มชนิดรอยต่อ p-i

การสร้างฟิล์มชนิดรอยต่อ p-i วิธีการสร้างเริ่มจากการสร้างฟิล์มชนิดอินทรีนซิก ตามด้วยกระบวนการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 1.3.2 จากนั้นนำฟิล์มไปสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี เพื่อให้เกิดรอยต่อชั้นของฟิล์มชนิดอินทรีนซิกกับชนิดพีขึ้น ซึ่งเรียกสั้น ๆ ว่า รอยต่อ p-i โดยในการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีจะสร้างผ่านหน้ากากที่สร้างจากการกัดแผ่นซิลิกอนด้วยน้ำยา KOH ให้ทะลุเป็นช่อง แล้วนำไปติดบนฐานรองที่สร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นเมื่อทำการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี เกิดฟิล์มขึ้นตรงบริเวณที่ทำการเปิดช่องไว้ตามต้องการ รูปที่ 1.11 เป็นภาพตัดขวางของรอยต่อ p-i



รูปที่ 1.11 แสดงภาคตัดขวางของรอยต่อ p-i

1.6 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร มีหลายเทคนิคด้วยกันที่มีการนำมาใช้งาน โดยเทคนิคที่ใช้สามารถบอกคุณลักษณะทางเคมี ซึ่งชี้เฉพาะความแตกต่างของคาร์บอนเฟสในเทอมขององค์ประกอบและพันธะทางเคมี และคุณลักษณะทางฟิสิกส์ที่ศึกษารูปร่างและคุณสมบัติโครงสร้างของฟิล์ม

1.6.1 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy

Raman Spectroscopy ใช้ในการศึกษาการสั่นของอะตอมภายในโครงสร้างของเนื้อสารหรือบริเวณพื้นผิวของผลึก พบว่าเทคนิคนี้ได้มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีการ CVD เนื่องจากสามารถแยกความแตกต่างชนิดของพันธะทางเคมีได้ ดังนั้น Raman Spectroscopy จึงเป็นเทคนิคที่นิยมกันอย่างมาก และมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีการ CVD

การทำงานของ Raman Spectroscopy จะอาศัยปรากฏการณ์กระเจิงของแสงเข้าช่วย โดยหลักการของปรากฏการณ์ดังกล่าวคือ การวัดการลดลงของความเข้มของลำแสงที่ผ่านไปในตัวกลางที่ไม่มีมีการดูดกลืนผลของ Raman จะขึ้น อยู่กับปรากฏการณ์กระเจิงของโมเลกุลโดยอยู่บน

พื้นฐานที่ว่า การกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้น เป็นผลจากการชนกันระหว่างโฟตอนกับการสั่นของแลททิซ หรือโฟนอน การกระเจิงของ Raman อาศัยเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นเดียวในการกระตุ้นทำให้เกิดคู่ของโฟนอนกับโฟตอน สนามไฟฟ้าของความเข้มนำแสงบังคับแสงให้มีคลื่นไปทางเดียวในผลึกซึ่งมีความสัมพันธ์กับ Polarizability ดังสมการ

$$P = \alpha E \quad (1.1)$$

โดยที่ P เป็นโมเมนต์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

E เป็นสนามไฟฟ้า

α เป็น Polarizability

เมื่อเกิดการสั่นของแลททิซเป็นภาวะการกระตุ้นของ Raman ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง Polarizability Raman มีการปล่อยโฟตอนบางส่วนออกมาจากการสั่นของไดโพลซึ่งมีทั้งที่มีความถี่เหมือนกับลำแสงตกกระทบ (elastic rayleigh scattering) หรือมีการเลื่อนไปของความถี่ มีค่าเท่ากับความถี่การสั่นของแลททิซ (inelastic stokes or anti-stokes scattering)

$$P = E_0 \alpha_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + 1/2 E_0 \sum \alpha_n (\cos 2\pi(\nu_0 - \nu_n)t + \cos 2\pi(\nu_0 + \nu_n)t) \quad (1.2)$$

โดยที่ E_0 เป็นสนามไฟฟ้าของลำแสงที่ตกกระทบ

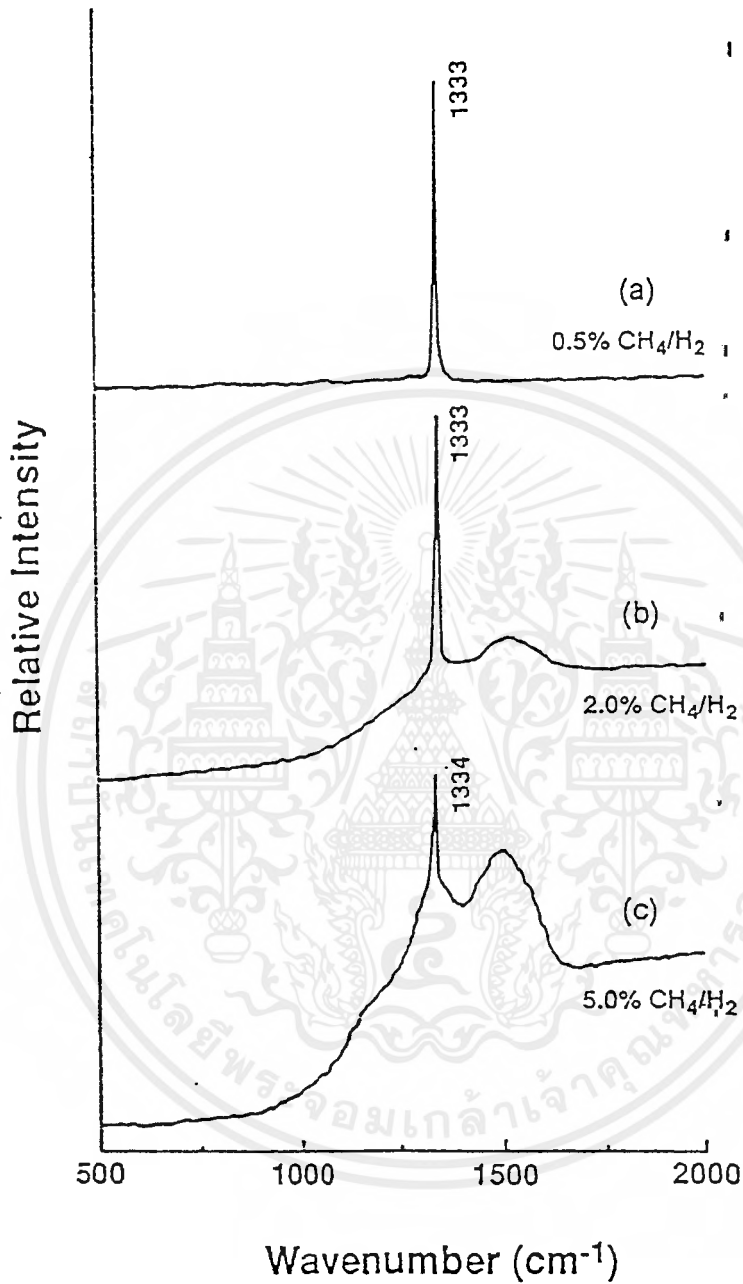
t เป็นเวลา

ν_0 เป็นความถี่ของลำแสงที่ตกกระทบ

ν_n เป็นความถี่ของโฟนอน

α_n เป็น Polarizability ในฟังก์ชันของโหมดการสั่น

Stokes scattering (เป็นปรากฏการณ์ปกติของ Raman) เกิดขึ้นเมื่อผลึกได้รับพลังงานจากลำแสง ทำให้เกิดการสั่นของแลททิซขึ้น ในขณะที่ Anti-Stokes scattering เกิดจากการทำลายของความร้อนที่กระตุ้นการสั่น โหมดการสั่นจะขึ้นอยู่กับพันธะของอะตอมในของแข็ง ดังนั้น Raman spectrum สามารถใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของของแข็งได้



รูปที่ 1.12 แสดง Raman Spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธี CVD ที่เงื่อนไขต่างๆ

Raman scattering มีประโยชน์ในการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของคาร์บอน โดยเฉพาะฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีการ CVD ซึ่งจะมีความไวต่อธรรมชาติของพันธะคาร์บอน ดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

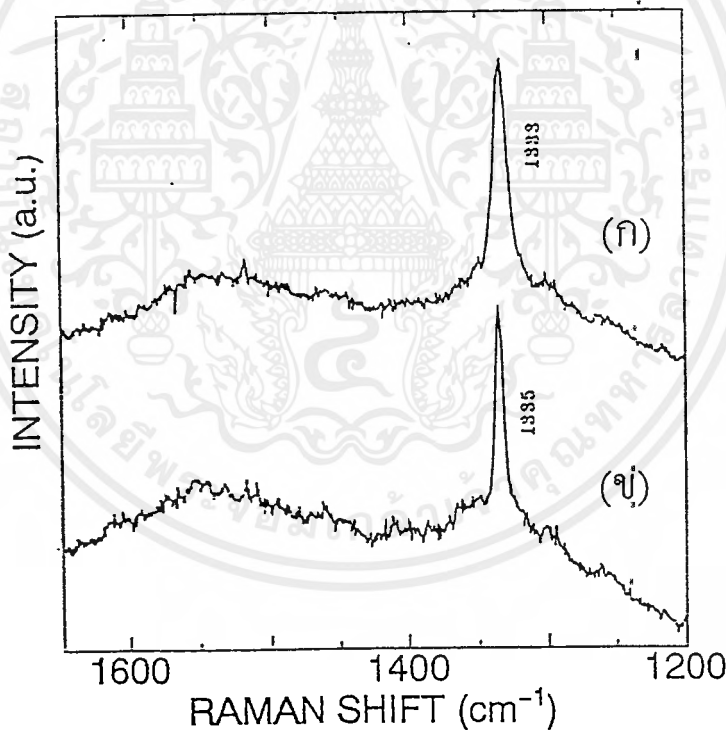
นั่นจึงสามารถแยกชนิดของคาร์บอนออกเป็น เพชร , กราไฟท์ , อมอร์ฟัสคาร์บอน และ ไฮโดรจิเนต คาร์บอน สำหรับเพชรแล้ว ความเข้มอันดับแรกของยอด Raman อยู่ที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} และ อันดับสองมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ 2458 cm^{-1} ส่วนของกราฟิต์ ความเข้มอันดับแรกและอันดับสอง อยู่ที่ตำแหน่ง 1580 cm^{-1} และ 3240 cm^{-1} ตามลำดับ รวมทั้งยอดที่เกิดที่ตำแหน่ง 1355 cm^{-1} ที่เป็น ของ microcrystalline graphite สำหรับในเทอมของอมอร์ฟัสคาร์บอน ยอดมีลักษณะกว้างออกที่ ตำแหน่งประมาณ 1550 cm^{-1} และ 1355 cm^{-1} ด้วยเหตุที่ประสิทธิภาพของ Raman scattering สำหรับ กราไฟท์ มีค่ามากกว่าเพชร ดังนั้นจำนวนคาร์บอนที่เป็นกราฟิต์ในฟิล์มเพชรที่สร้างด้วย วิธี CVD จำนวนน้อย ๆ สามารถที่จะตรวจพบได้ Raman spectroscopy จึงเป็นเทคนิคที่มีความไว และประสิทธิภาพในการทดสอบคุณภาพของฟิล์มในเทอมของชนิดพันธะ นอกจากนี้ จากการกว้าง ออกและเลื่อนไปของ Raman peak สามารถดูความสมบูรณ์ของโครงสร้างของผลึกได้

รูปที่ 1.12 เป็นตัวอย่างของ Raman spectra สำหรับฟิล์มเพชรที่สร้างภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่าง กัน สำหรับฟิล์มที่สร้างภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม สเปกตรัมมีลักษณะแคบที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ซึ่งเป็นของผลึกเพชร (ดังรูปที่ 1.12 a) ลักษณะการกว้างออกของยอดจากจุดศูนย์กลางที่ ตำแหน่งประมาณ 1500 cm^{-1} รวมทั้งยอดของเพชรที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} จะพบจากฟิล์มที่ สร้างภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เหมาะสมดังรูปที่ 1.12 b ฟิล์มจะมีความเป็นเพชรน้อยลง และจะมี ลักษณะเป็น " diamond like " หรือ อมอร์ฟัสคาร์บอนฟิล์ม ทำให้ยอดดังกล่าวเพิ่มขึ้นและยอด 1332 cm^{-1} มีค่าลดลงหรืออาจหายไป ดังแสดงในรูปที่ 1.12 c ข้อสังเกตที่สำคัญจากการเปรียบเทียบสเปกตรัมที่แตกต่างกัน ลักษณะสำคัญของพันธะ sp^3 ของเพชรเกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำกว่า 1332 cm^{-1} ในขณะที่ยอดที่เกิดจากพันธะ sp^2 ของกราฟิต์เกิดขึ้นที่ตำแหน่งความถี่สูงกว่า 1332 cm^{-1} ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากพันธะระหว่าง sp^2 คาร์บอนมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะระหว่าง sp^3

Raman spectroscopy มีประโยชน์อย่างมากต่อการวิเคราะห์ปริมาณความสัมพันธ์ของ sp^3 กับ sp^2 โดยถ้าทราบความแรงของการกระเจิงสัมพันธ์สามารถที่จะพิจารณาจำนวนสัมพันธ์ ขององค์ประกอบของเพชรและกราฟิต์ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธี CVD ได้ ในอีกทางหนึ่งกราฟิต์มีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีขาวยาว ส่วนในเพชรจะไม่มี การดูดกลืนทำให้แสงผ่านเพชรได้ ตลอด ดังนั้นถ้าฟิล์มมีกราฟิต์ประกอบอยู่ แสงที่ผ่านไปในสารจะไม่เป็นระเบียบ

การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรที่สร้างได้จะพิจารณาจาก Raman spectrum สำหรับเพชรในธรรมชาติ นั้น Raman spectrum มียอดเกิดขึ้นที่ 1332 cm^{-1} พันธะเคมีของเพชรมีพันธะเป็นแบบ sp^3 โดยทั่วไปฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการ CVD ยอดที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะมีความ

กว้างอยู่ในช่วงเลขคลื่น 1500 cm^{-1} ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลเนื่องจากพันธะ sp^2 หรือพันธะของกราฟไฟต์ จาก รูปที่ 1.13 แสดง Raman spectrum ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy โดยที่ รูป 1.13 (ก) เป็นของฟิล์มที่มีระนาบ (111) มียอดอยู่ที่ตำแหน่ง 1333 cm^{-1} และรูปที่ 1.13 (ข) เป็นของฟิล์มที่มีระนาบ (100) มียอดอยู่ที่ตำแหน่ง 1335 cm^{-1} เปรียบตำแหน่งยอดของระนาบทั้งสองพบว่าฟิล์มที่มีระนาบ (111) มียอดใกล้เคียงกับตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ซึ่งเป็นของเพชรในธรรมชาติมากกว่าระนาบ (100) แสดงว่าฟิล์มที่มีระนาบ (100) มีองค์ประกอบของพันธะ sp^2 มากกว่าของฟิล์มที่มีระนาบเป็น (111) ดังนั้นผลที่ได้จากการวัดด้วย Raman spectroscopy จึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่า ฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติเป็นเพชร โดยมีตำแหน่งเลขคลื่นในกั คี ฌ กั บ ของเพชรในธรรมชาติการที่ยอดของสเปกตรัมมีการเลื่อนตำแหน่งไปเล็กน้อยเป็นผลจากพันธะ sp^2 ของกราฟไฟต์ที่เกิดขึ้นบนฟิล์ม



รูปที่ 1.13 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy ของ
 (ก) ระนาบ (111) (ข) ระนาบ (100)

1.6.2 การศึกษาฟิล์มเพชรชนิดพี

จากตอนที่ผ่านมาเป็นการศึกษาเบื้องต้นของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก

เนื่องจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกนั้นไม่เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

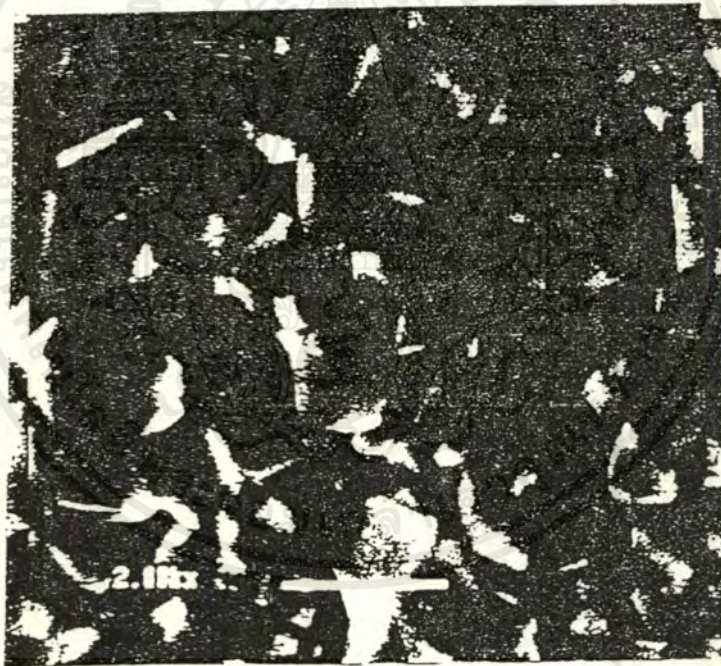
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเป็นผลจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี โดยการเจืออะตอมสารเจือโบรอน ทำให้ได้ฟิล์มเพชรชนิดพี สำหรับในตอนนี้ได้กล่าวถึงการนำฟิล์มเพชรชนิดพี ไปศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่นสภาพต้านทานไฟฟ้า และความเข้มข้นของพาหะเป็นต้น

1.6.2.1 ลักษณะพื้นผิวที่ค่า B/C ต่าง ๆ

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนต่าง ๆ กัน พบว่าพื้นผิวจะมีรูปร่างลักษณะคล้ายกันทั้งหมด รูปที่ 1.14 เป็นตัวอย่างลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่เคลือบบนฐานรองซิลิกอน จากภาพถ่าย SEM สร้างภายใต้เงื่อนไขของค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนมีค่าเป็น 1000 ppm จากรูป ลักษณะพื้นผิวจะไม่เรียบและลักษณะผลึก เป็นแบบผลึกรวม (polycrystalline) การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อนนั้นจะได้อัตราการเคลือบของฟิล์มบนฐานรองมีค่าประมาณ 8-10 ไมโครเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 1.14 แสดงภาพถ่ายฟิล์มจาก SEM ที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน 1,000 ppm

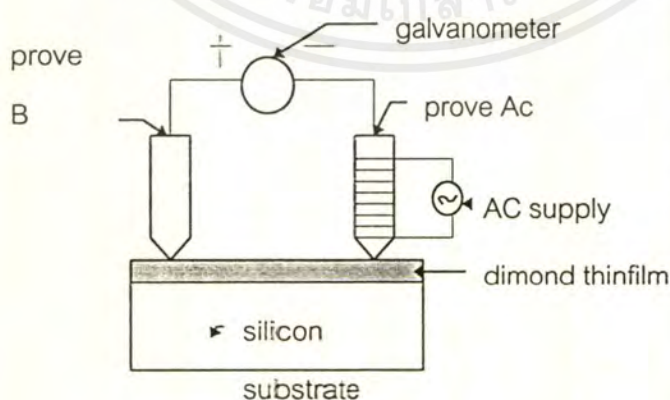
1.6.2.2 การวิเคราะห์ชนิดความนำไฟฟ้าของฟิล์มโดยอาศัยหลักการซีเบก

ปรากฏการณ์ซีเบก (SEEBECK EFFECT) เป็นปรากฏการณ์ที่ได้จากการสังเกตจากการทดลองโดยการนำเอาตัวนำ 2 ชนิด ที่แตกต่างกันที่มีปลายด้านหนึ่งต่อเชื่อมติดกัน ส่วนอีกปลายหนึ่งไม่ได้มีการเชื่อมติดกัน เมื่อมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างส่วนที่เชื่อมติดกันกับส่วนที่ไม่ได้เชื่อมต่อกันแล้วจะทำให้มีความต่างศักย์เกิดขึ้น ระหว่างส่วนที่ไม่ได้ต่อเชื่อมติดกัน ในทำนองเดียว
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัน ถ้าเราให้วัสดุสารกึ่งตัวนำได้รับความร้อนที่ปลายด้านหนึ่งซึ่งทำให้อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามแท่งวัสดุ และพบว่ามีการปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามมาคือ มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุพาหะ เนื่องจากความเข้มข้นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ความเข้มข้นของประจุพาหะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแพร่ของประจุพาหะในแท่งวัสดุขึ้น

จากหลักการซีเบกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ชนิดความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชร ว่ามีพาหะหลักในการนำกระแสชนิดใด การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติดังกล่าว จะใช้ชุดอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 1.15 จากรูปจะเห็นว่า ชุดอุปกรณ์ประกอบด้วยเข็ม 2 เล่ม ที่ติดบนฟิล์มเพชร ที่เคลือบบนฐานรองซิลิกอน โดยเข็ม A มีลวดทั้งลวดพันอยู่โดยรอบ ทำหน้าที่เป็นเข็มความร้อน ส่วนเข็ม B จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง นำกัลวานออร์มิเตอร์ มาต่อระหว่างเข็มทั้งสองโดยใช้ขั้วบวกต่อเข้ากับเข็ม B และขั้วลบต่อเข้ากับเข็ม A เริ่มให้ความร้อนแก่เข็ม A ถ้าเข็มของกัลวานออร์มิเตอร์ชี้ไปทางบวก แสดงว่าชนิดพาหะในการนำกระแส คือ โฮล แต่ถ้าเข็มของกัลวานออร์มิเตอร์ชี้ไปทางลบ แสดงว่าพาหะหลักในการนำกระแสเป็นอิเล็กตรอน

ผลการทดลองที่ได้หลังจากให้ความร้อนกับเข็ม A ปรากฏว่าเข็มของกัลวานออร์มิเตอร์ชี้เอนไปทางด้านบวก แสดงว่ามีประจุเคลื่อนที่จากเข็ม A ไปยังเข็ม B แล้งผ่านกัลวานออร์มิเตอร์ทางขั้วบวก ทำให้เข็มของกัลวานออร์มิเตอร์ชี้เบนไปทางบวก ดังนั้นพาหะหลักในการนำกระแสของฟิล์มเพชรที่ทำการวัดนี้ คือโฮล จึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่า ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี



รูปที่ 1.15 แสดงอุปกรณ์การหาชนิดพาหะในการนำกระแสของฟิล์มเพชร

1.6.2.3 การหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

จากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแส

$$J = \sigma E$$

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (1.3)$$

ระหว่างความหนาแน่นของกระแส J และสนามไฟฟ้า E และ σ แสดงสภาพนำไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนกลับของสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ เราสมมติว่า กระแส I ไหลผ่านสารกึ่งตัวนำที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง A (cm^2) และยาว L (cm) โดยมีศักดาตกคร่อมเท่ากับ V (V) เนื่องจากความหนาแน่นของกระแส J เท่ากับ I/A (A/cm^2) และสนามไฟฟ้า E เท่ากับ V/L (V/cm) ดังนั้นสมการ จะกลายเป็น

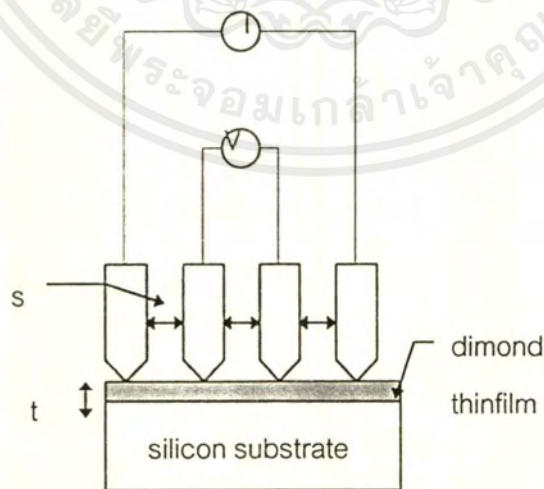
$$I/A = 1V/\rho L \quad (1.4)$$

ความต้านทาน R ของสารกึ่งตัวนำเท่ากับ $R=V/I$ ดังนั้น

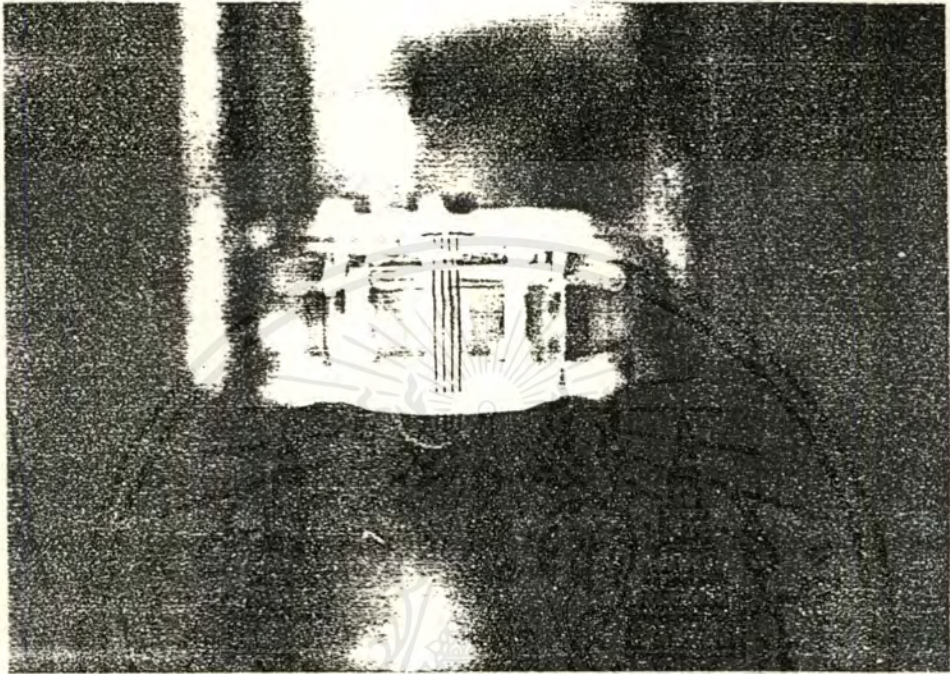
$$R = V/I = \rho L/A \quad (1.5)$$

หรือ

$$\rho = RA/L \quad (1.6)$$



รูปที่ 1.16 แสดงหลักการของเทคนิคไฟร์พอยท์โพรบ



รูปที่ 1.17 แสดงเครื่องมือวัดของเทคนิคไพร์พอยท์ไพโรบ

ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าจะใช้วิธีไพร์พอยท์ไพโรบซึ่งมีหลักการแสดงได้ดังรูปที่ 1.16 ส่วนเครื่องมือวัดแสดงได้ดังรูปที่ 1.17 มีระยะห่างระหว่างหัวเข็ม 0.5 mm หลักการทำงานกระทำโดยจ่ายกระแส I ผ่านเข็มนอก 2 เข็ม ส่วนคักดาจะวัดโดยใช้โวลต์มิเตอร์ ระหว่างเข็มด้านใน สภาพต้านทานไฟฟ้า คำนวณจากแรงดัน , กระแส , ระยะห่างระหว่างเข็ม และความหนาของสารกึ่งตัวนำ

สำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดใหญ่ ($t \gg s$) สภาพต้านทานไฟฟ้าคำนวณจาก

$$\rho = 2\pi s v / I \quad (1.7)$$

โดยที่ ρ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega\text{-cm}$) V เป็นแรงดันที่วัดได้ (V)
 s เป็นระยะห่างระหว่างหัวเข็ม (cm) I เป็นกระแสจากแหล่งจ่าย (A)

ในกรณีที่ความหนาของสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อยกว่า s มาก ($t \ll s$) จะได้ว่า

$$\rho = (\pi t / \ln 2)(V / I) = 4.532 (tV / I) \quad (1.8)$$

โดยที่ ρ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega\text{-cm}$) V เป็นแรงดันที่วัดได้ (V)
 t เป็นระยะห่างระหว่างหัวเข็ม (cm) I เป็นกระแสจากแหล่งจ่าย (A)

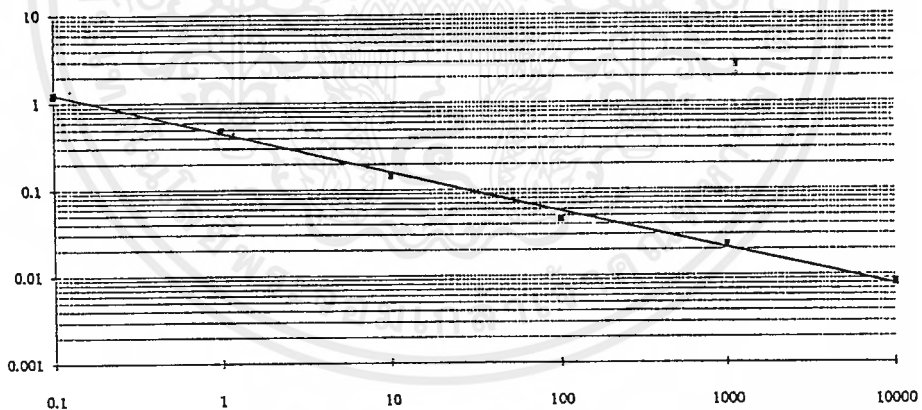
เนื่องจากสารตัวอย่างเป็นฟิล์มเพชรซึ่งมีความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างหัวเข็ม ดังนั้นในการคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าจะใช้สมการ (1.8) การทดลองทำการวัดค่าแรงดันที่ค่าอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนเป็น 0.1 ppm , 1 ppm , 10ppm , 100ppm , 1000ppm , 10000ppm โดยจ่ายกระแสคงที่ 453 ไมโครแอมป์ สรุปค่าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 1.2

| B / C | ความหนา | กระแส | แรงดัน | สภาพต้านทานไฟฟ้า |
|---------|-------------|-------------|--------|-----------------------|
| (ppm) | (μm) | (μA) | (mV) | ($\Omega - cm$) |
| 0.1 | 14 | 453 | 86.564 | 1.2119 |
| 1 | 14 | 453 | 33.779 | 0.4729 |
| 10 | 14 | 453 | 10.421 | 0.1459 |
| 100 | 14 | 453 | 3.233 | 0.0453 |
| 1000 | 14 | 453 | 1.586 | 0.0222 |
| 10000 | 14 | 453 | 0.594 | 8.32×10^{-3} |

ตารางที่ 1.2 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนต่าง ๆ

จากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนต่าง ๆ สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 1.18

สภาพต้านทานไฟฟ้า($\Omega-cm$)



อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน(ppm)

รูปที่ 1.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนต่าง ๆ

จากกราฟที่ได้มีความชันเป็นลบสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์

$$\rho = 1/q\mu p \quad (1.9)$$

$$\log \rho = \log 0.5 * \log p \quad (1.9)$$

$\log 0.5 = -0.3$ ดังนั้น

$$\log \rho \propto -\log p \quad (1.10)$$

จะได้ว่า

$$(\ln \rho) \propto (-\ln p) \quad (1.11)$$

ซึ่งตรงกับความสัมพันธ์

$$\rho = 1 / q\mu p \quad (1.12)$$

โดยที่ ρ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega\text{-cm}$) q เป็นประจุไฟฟ้า (C)
 μ เป็นค่าความคล่องตัวของพาหะ ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) p เป็นความเข้มข้นของพาหะ (cm^{-3})

เนื่องจากความเข้มข้นของพาหะแปรผันโดยตรงกับอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน จากความสัมพันธ์ (1.10) ได้ว่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนควรเป็นเชิงเส้นกับความชัน -1 ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มจึงแปรผกผันกับอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน นอกจากนี้ความสัมพันธ์ สามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะได้ ถ้าทราบค่าความคล่องตัวของพาหะ

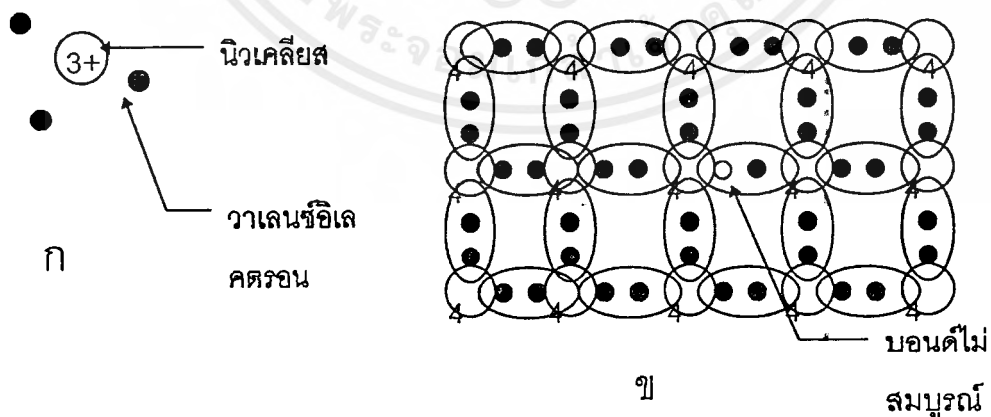
บทที่ 2

รอยต่อ

2.1 การเติมสารเจือ

สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิค (Intrinsic Semiconductor) ถูกนำไปใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor devices) ได้น้อยมาก เนื่องจากมีสภาพความนำไฟฟ้าต่ำ การนำสารกึ่งตัวนำไปใช้งานนั้น จึงจำเป็นต้องมีสิ่งที่จะต้องมีการเติมสารเจือ (Impurity) ลงในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ เมื่อถูกเติมสารเจือแล้ว ความนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณสารเจือที่เติมลงไป โดยปริมาณสารเจือเพียงเล็กน้อยจะมีผลทำให้ความนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก การเติมสารเจือเรียกว่า doping และสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมสารเจือนี้ เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอกทรีนซิค (Extrinsic Semiconductor) ซึ่งโดยปกติสารเจือที่ใช้จะเป็นธาตุหมู่ 3 หรือหมู่ 5 โดยหมู่ 3 จะทำให้ได้สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type Semiconductor) แต่ในโครงงานนี้จะกล่าวถึงแต่สารกึ่งตัวนำชนิดพีเท่านั้น

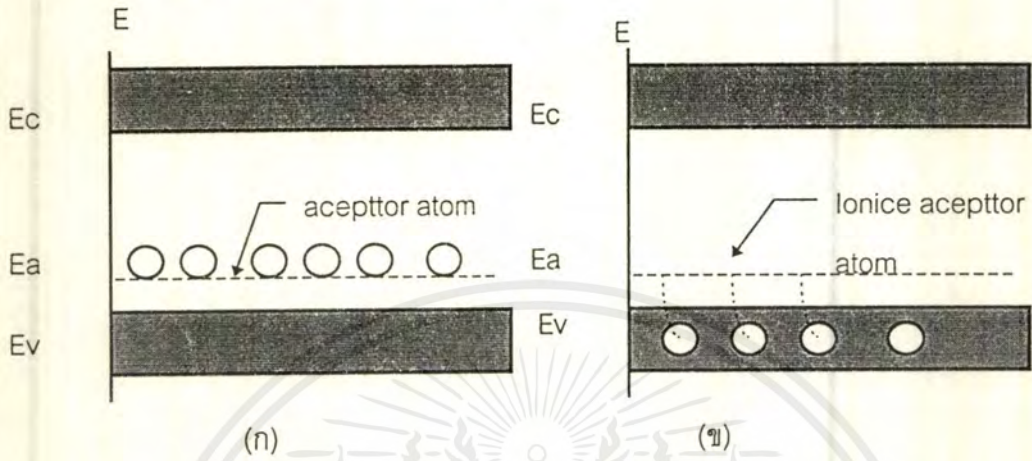
การเติมธาตุหมู่ 3 เช่น โบรอน (B) อลูมิเนียม (Al) อินเดียม (In) แกลเลียม (Ga) ทำให้สารกึ่งตัวนำอินทรีนซิคมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยธาตุหมู่ 3 ที่เติมลงไปนั้นเราเรียกว่า สารเจือผู้รับ (acceptor atom) เนื่องจากธาตุหมู่ 3 มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว เมื่อเติมลงไปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค ทำให้พันธะไม่สมบูรณ์โดยขาดอิเล็กตรอนไป 1 ตัว แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1(ก) แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของอะตอมสารเจือชนิดพีและ

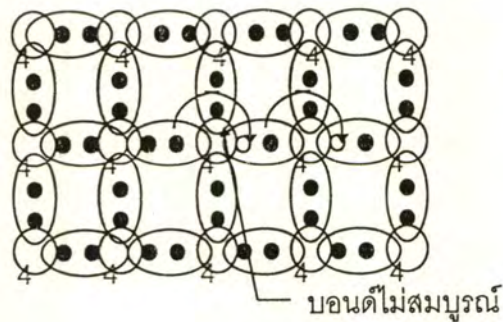
(ข) แสดงการเกาะเกี่ยวกันระหว่างอะตอมของสารเจือชนิดพีและอะตอมสารกึ่งตัวนำ

พิจารณาโครงสร้างแถบพลังงานได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2(ก) โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดที่เมื่ออุณหภูมิ 0 องศาเซลวิน
(ข) เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 0 องศาเซลวิน

จากรูปที่ 2.2 จะเกิดโฮลขึ้นที่ระดับพลังงานสารเจือผู้รับ (E_A) ซึ่งอยู่เหนือแถบพลังงานวาเลนซ์เพียงเล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลวิน จะยังไม่มี การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังระดับพลังงานดังกล่าว แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (พลังงานเพิ่มขึ้นเพียง 0.01 eV) อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์จะมีพลังงานพอที่จะไปอยู่ที่ระดับพลังงานสารเจือผู้รับได้ ทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปตามที่ว่างเหล่านี้ ทำให้ดูเหมือนว่าโฮลเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังที่ว่างของพันธะที่ไม่สมบูรณ์

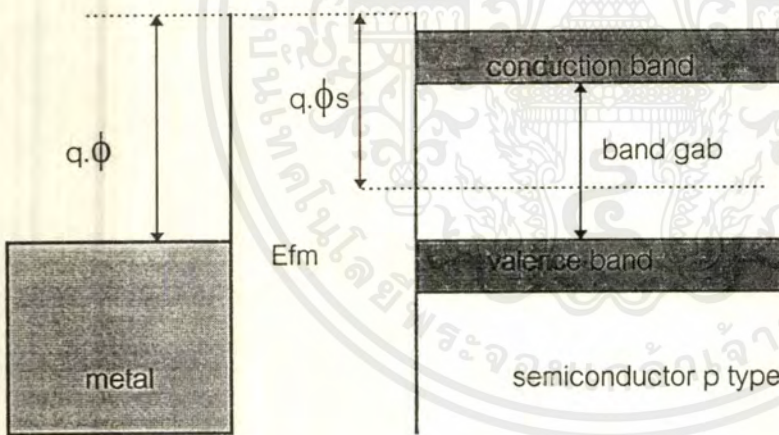
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำชนิดพีมีโฮลมากกว่าอิเล็กตรอนมาก ประจุพาหะที่มีจำนวนมาก เราเรียกว่า " พาหะส่วนมาก " (majority carriers) ส่วนประจุพาหะที่มีจำนวนน้อย เรียกว่า " พาหะส่วนน้อย " (minority carriers) ดังนั้นพาหะส่วนมากของสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ โฮล และของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น คือ อิเล็กตรอน

2.2 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี

รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะแสดงคุณสมบัติตามลักษณะการไหลของกระแส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำ โดยแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

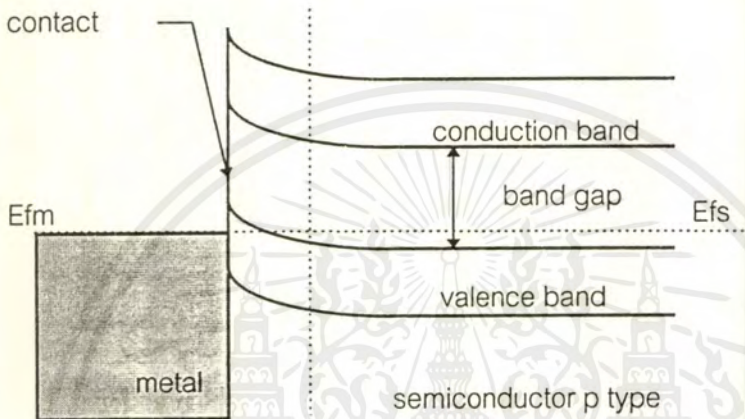
1. รอยต่อที่มีความนำไฟฟ้าสูง จะไม่มีผลต่อทิศทางการไหลของกระแส เรียกรอยต่อชนิดนี้ว่า " รอยสัมผัสอโฮมมิก " (ohmic contact) แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนสัมผัส กรณี ($\phi_s < \phi_m$)

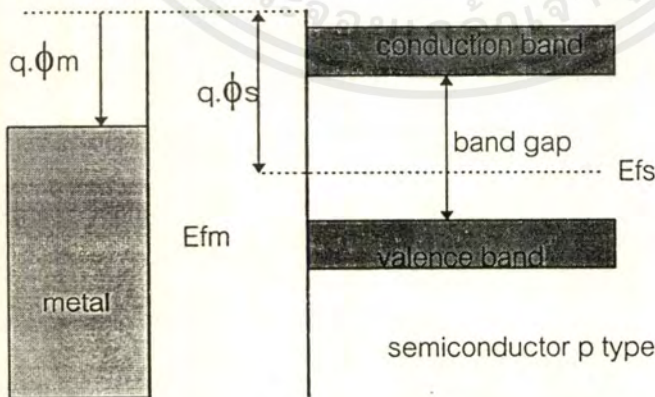
จากรูปเมื่อค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของโลหะ

($\phi_s < \phi_m$) ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (E_{fs}) จะอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ (E_{fm}) ดังรูปที่ 2.4 เมื่อนำมาสัมผัสกันจะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำชนิดพีไปยังโลหะ จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มิของสารทั้งสองมีค่าเท่ากัน ซึ่งจะเห็นว่าในภาวะสมดุล จะไม่มีกำแพงศักย์ของโฮลเกิดขึ้นที่รอยต่อ นั่นคือ โฮลสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้อย่างอิสระ ดังรูปที่ 2.5



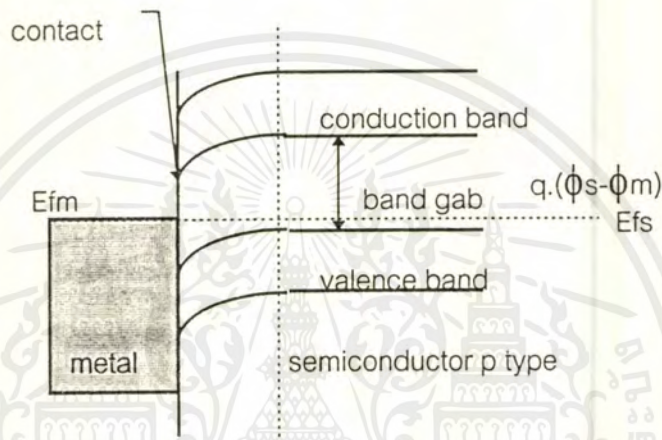
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีภายหลังจากสัมผัส กรณี ($\phi_s < \phi_m$)

2. รอยต่อที่แสดงคุณสมบัติในการเรกติไฟต์ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนสัมผัส ในกรณี ($\phi_m < \phi_s$)

จากรูปที่ 2.6 เมื่อค่าฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ($\phi_m < \phi_s$) ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (E_{fs}) จะอยู่ต่ำกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ (E_{fm}) เมื่อนำมาสัมผัสกัน จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากโลหะ ไปสารกึ่งตัวนำชนิดพี จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มิของสารทั้งสองมีค่าเท่ากัน จะเห็นว่าในภาวะสมดุลย์จะเกิดกำแพงศักย์ของโฮลขึ้นที่รอยต่อ โดยมีการสะสมของอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีภายหลังจากสัมผัส ในกรณี ($\phi_m < \phi_s$)

2.3 แบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชร

2.3.1 แบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก ความนำจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก ซึ่งก็คือการที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานจากภายนอกเพิ่มขึ้น พอที่จะเปลี่ยนไปอยู่ที่ระดับพลังงานในแถบความนำ และจะทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ การเกิดประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก เกิดได้เฉพาะในกรณีนี้เท่านั้น และจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นในแถบความนำจะเท่ากับจำนวนโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ และอาจเขียนสมการได้เป็น

$$n = p = n_i \quad (2.1)$$

โดยที่ n เป็นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

p เป็นความหนาแน่นของโฮลอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n_i เป็นความหนาแน่นของประจุพาหะชนิดใดชนิดหนึ่งในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก หรือ เรียกสั้น ๆ ว่าความหนาแน่นของพาหะอินทรีนซิก

อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากภายนอกนั้นอาจจะขึ้นไปอยู่ยังระดับพลังงานในแถบความนำได้ ถ้าพลังงานจากภายนอกที่อิเล็กตรอนได้รับมีค่ามากกว่า E_g (แถบพลังงานต้องห้าม หรือช่องว่างแถบพลังงาน) หรือถ้าหากพลังงานจากภายนอกมีค่าน้อยกว่า E_g แล้ว อิเล็กตรอนนี้จะตกกลับลงมายังที่ว่างตามเดิมในแถบวาเลนซ์ ซึ่งกลายเป็นการรวมตัวใหม่นั้นเอง ในสภาวะสมดุลย์ความร้อนความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบความนำ (n) และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ (p) จะมีค่าคงที่ ความหนาแน่นของประจุพาหะทั้งสองจะเปลี่ยนแปลงและขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นจำนวนของอิเล็กตรอนในแถบความนำ คือ

$$n = N \cdot P(E_g) \quad (2.2)$$

โดยที่ $P(E_g)$ เป็นโอกาสของอิเล็กตรอนซึ่งจะมีพลังงานที่ระดับ E_g โดยสามารถหาได้จากเฟอร์มิไดแรคฟังก์ชัน

N เป็นจำนวนของอิเล็กตรอนทั้งหมดที่มีอยู่ในแถบพลังงานทั้งหมด

ดังนั้นเมื่อแทนค่า $P(E_g)$ จะได้ว่า

$$N_c = N / 1 + \exp[(E_g - E_f)/kT] \quad (2.3)$$

โดยที่ E_f เป็นระดับเฟอร์มิ

เนื่องจากในกรณีของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก อิเล็กตรอนทั้งหมดอยู่ในแถบวาเลนซ์ จึงได้ว่า $E_g = 0$ และเมื่อพิจารณาจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ จะได้ว่า

$$N_v = N / 1 + \exp[-E_f/kT] \quad (2.4)$$

โดยที่ N เป็นผลรวมของจำนวนอิเล็กตรอนในแถบความนำ (N_c) และในแถบวาเลนซ์ (N_v) ดังนั้นจะเขียนได้เป็น

$$N = N / 1 + \exp[(E_g - E_f) / kT] + N / 1 + \exp[-E_f/kT] \quad (2.5)$$

ในที่สุดจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_f = E_g/2 \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) แสดงให้เห็นว่าสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค จะมีระดับเฟอร์มิอียูที่ตำแหน่งกึ่งกลางพอดีระหว่างขอบของแถบความนำ และแถบวาเลนซ์ หรืออยู่ที่กึ่งกลางของแถบพลังงาน ต้องห้าม ดังนั้นจึงสามารถเขียนแบบจำลองแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิคได้ดังรูปที่ 2.8 โดยในกรณีของเพชรจะมีช่องว่างแถบพลังงาน E_g มีค่า 5.5 eV



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิค

2.3.2 แบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชรชนิดพี

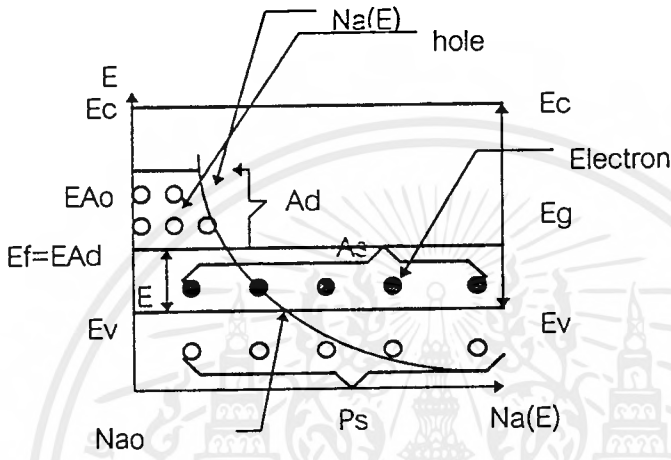
ในตอนนี้นำเสนอแบบจำลองอย่างง่าย เพื่ออธิบายกลไกความนำของฟิล์มเพชรชนิดพีซึ่งประกอบด้วยสถานะของสิ่งเจือปนสองชนิดที่เกิดจากโบรอนอะตอม จากผลการทดลองให้ข้อเสนอแนะว่า อะตอมโบรอนที่เข้าไปฟอร์มตัวในฟิล์มเพชร ทำให้เกิดสถานะของสารเจือที่ซับซ้อนขึ้น Mort et al. และ Srikanth และ Ashok ได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันการกระจายของสถานะที่เกิดขึ้นในช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มเพชร เมื่อเจืออะตอมโบรอนในสารกึ่งตัวนำทั่วไป เช่น Si ทำให้เกิดการแทนที่ของอะตอมขึ้น และมีระดับ shallow acceptor เดียวเกิดขึ้น ความลึกของระดับดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมสารเจือ สำหรับกรณีของการเจืออะตอมสารเจือโบรอนลงในฟิล์มเพชร สถานะของสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อน พิจารณาได้จากผลการทดลองที่มีลักษณะการกระจายแบบเอ็กโปเนนเชียล เมื่ออะตอมโบรอนถูกวางในแลทธิซของเพชร อะตอมของโบรอนไม่เพียงแทนที่เท่านั้น แต่ยังทำให้เกิดช่องขึ้นซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างกันของรัศมีของอะตอม

ระหว่างคาร์บอนและโบรอน นอกจากนี้ทำให้เกิดตำหนิหลายชนิดขึ้น ตำหนิหนึ่งที่เกิดขึ้นเป็นระดับ

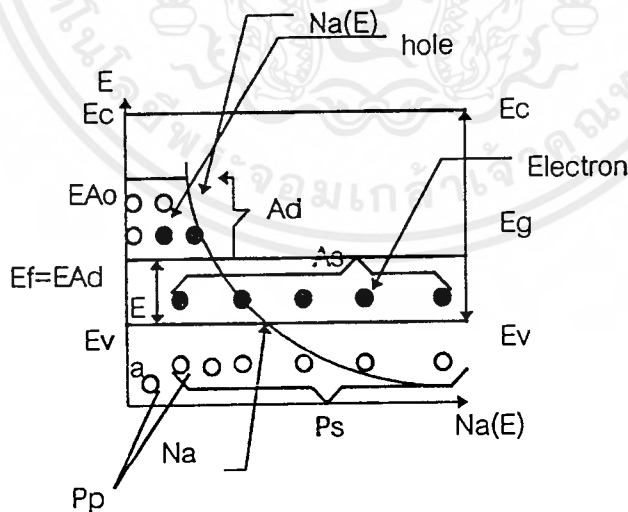
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

acceptor เดี่ยวที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับแถบวาเลนซ์ และอะตอมอื่นจะทำให้เกิดตำหนิหลายอย่าง ซึ่งระดับ acceptor มีการกระจายอย่างกว้างอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานต้องห้าม



(ก) อุณหภูมิต่ำ



(ข) อุณหภูมิสูง

รูปที่ 2.9 แสดงแบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชรชนิดที

จากรูปที่ 2.9 แสดงแบบจำลองแถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดพี ที่มีการโด๊ปอะตอมสารเจือปน โดยจะสมมติให้มีระดับ shallow acceptor (A_{Sh}) เกิดขึ้นหนึ่งแห่ง และระดับ deeper acceptor (A_D) ที่กระจายอยู่จาก E_{A_D} ถึง $E_F = E_{A_D}$ พิจารณาบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ใสจากแถบวาเลนซ์จะถูกกระตุ้นเฉพาะจาก A_{Sh} -center เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมมีค่าเพิ่มสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ใสที่ถูกกระตุ้นจะเริ่มเกิดจาก A_D -center นั่นก็คือ A_D -center เกิดการไอออไนซ์เกิดไอออนลบขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9(ข)

สภาพความนำไฟฟ้า σ_c ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำสามารถเขียนได้เป็น

$$\sigma_c = q\mu_p N_A \quad (\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}) \quad (2.7)$$

โดยที่ N_A เป็นความหนาแน่นของสารเจือที่ A_{Sh} -center มีค่าใกล้เคียงกับ p_s

จากผลการทดลองที่ได้จาก Srikanth และ Ashok พบความหนาแน่นของสถานะพลังงานหรือจำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยพลังงาน $N_A(E)$ ($\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$) ของ A_D -center ในเทอมของพลังงานสามารถอธิบายได้จากสมการ

$$N_A(E) = N_{A0} \exp[(E_V - E) / kT_i] \quad (\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}) \quad (2.8)$$

โดยที่ N_{A0} เป็นความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ขอบด้านบนของแถบวาเลนซ์

k เป็นค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzman constant)

T_i เป็นพารามิเตอร์ของอุณหภูมิ ที่มีลักษณะการกระจายของ A_D -center ความหนาแน่นสุทธิของ A_D -center มีค่า N_A ซึ่งได้จากการอินทิเกรตตั้งสมการ

$$N_A = \int_{E_F = E_{A_D}}^{E_{A_D}} N_A(E) dE \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (2.9)$$

การที่อะตอมสารเจือมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ระดับเฟอร์มิ E_F เข้าใกล้ขอบของแถบวาเลนซ์ เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (2.9)

$$N_A = N_{A0} kT_i \left[\exp((E_V - E_F) / kT_i) - \exp((E_V - E_{A_D}) / kT_i) \right] \quad (2.10)$$

จากความสัมพันธ์ $E_F - E_V = E_{A_D} - E_V = E_a$ สมการ (2.10) เขียนได้เป็น

$$E_a = kT_i \ln \left[(N_A / kT_i N_{A0}) + \exp(-(E_{A_D} - E_V) / kT_i) \right]^{-1} \quad (2.11)$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะใช้ได้เฉพาะ $N_A (=0.01 N_B)$ ความสัมพันธ์

$$E_a \propto -kT_i \ln(N_B/kT_i N_{AD}) \quad (2.12)$$

และ

$$dE_a / dN_B = -kT_i / N_B < 0 \quad (2.13)$$

สมการที่ (2.12) และ (2.13) แสดงให้เห็นว่าพลังงานกระตุ้น E_a ลดลงเมื่อ N_B เพิ่มขึ้นเป็นลำดับ

การกระตุ้นโฮลจาก A_D -center เริ่มที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส แบบจำลองแถบพลังงานดังรูปที่ 2.14(ข) สอดคล้องกับคุณลักษณะข้างต้น ค่าความนำไฟฟ้าที่บริเวณอุณหภูมิสูงหาได้จาก

$$\begin{aligned} \sigma &= q\mu_p p_0 + \sigma_L \\ &= q\mu_p (p_0 + N_A) \end{aligned} \quad (2.14)$$

โดยที่ p_0 เป็นความหนาแน่นของโฮลที่ถูกกระตุ้นจาก A_D -center ไปในแถบวาเลนซ์ เนื่องจากความสัมพันธ์ $E_a \gg kT$ จากการใช้การประมาณของโบลต์ซมันน์ สามารถหาค่าความเข้มข้นของโฮลจาก

$$p_0 = \int_{-\infty}^{E_v} S_p(E) \cdot f_p(E) dE \quad (2.15)$$

โดยที่ $S_p(E)$ และ $f(E)$ เป็นความหนาแน่นของสถานะในแถบวาเลนซ์ และฟังก์ชันการกระจายโบลต์ซมันน์ของโฮล ตามลำดับ มีค่า

$$S_p(E) = (1/2\pi^2) (2m_p/h^2) (E_v - E)^{1/2} \quad (2.16)$$

$$f_p(E) = \exp((E - E_v)/kT)$$

(2.17)

โดยที่ m_p และ $h(=h/2\pi)$ เป็นมวลยังผลของโฮล และค่าคงที่ของไดแรค จากการอินทิเกรตสมการ (2.15) จะได้

$$P_D = 2 (2\pi kT m_p / h^2)^{3/2} \times \exp(-E_f - E_v / kT) \\ = N_v \exp(-E_g / kT) \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (2.18)$$

โดยที่ N_v และ E_g มีค่าเป็น

$$N_v = 2(2\pi kT m_p / h^2)^{3/2} \quad (\text{cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}) \quad (2.19)$$

$$E_g = E_f - E_v \quad (\text{eV}) \quad (2.20)$$

โดยที่ N_v เป็น effective state density ของแถบวาเลนซ์ แทนค่าสมการ (2.11) ในสมการ (2.18) จะได้ว่า

$$P_D \propto N_v (N_A / kT \cdot N_{A0})^{1/4} \quad (2.21)$$

ความสัมพันธ์ข้างต้นหมายถึง $N_A = 0.01 N_B$ P_D มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ N_A เพิ่มขึ้น จากสมการ (2.14) และ (2.18) สูตรของการหาค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเป็น

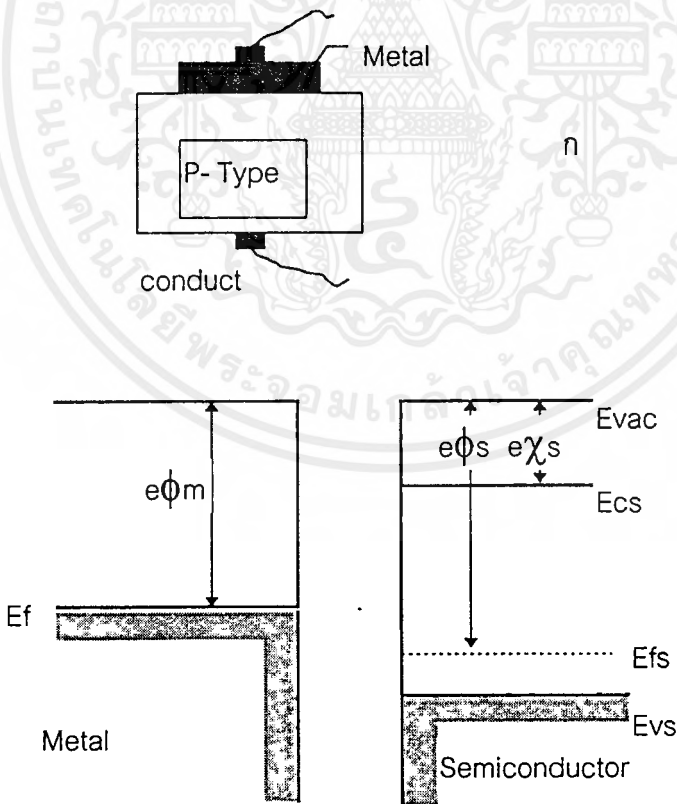
$$\sigma = q\mu_p \{ N_v \exp(-E_g / kT) + N_A \} \quad (\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}) \quad (2.22)$$

บทที่ 3 ขอตต์กัไดโอด

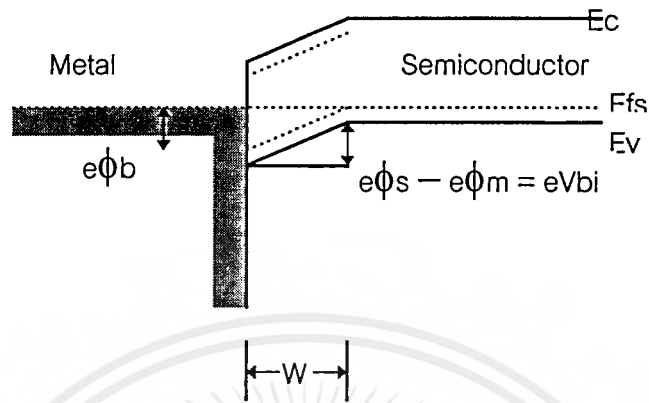
3.1 ทฤษฎี

3.1.1 ทฤษฎีรอยต่อของขอตต์กัไดโอด

ขอตต์กัไดโอดเป็นไดโอดที่แตกต่างจากไดโอดทั่วไป เนื่องจากโครงสร้างประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือพี ทำให้มีความเร็วในการทำงานสูงเหมาะสำหรับใช้งานในย่านความถี่สูง แต่ในโครงงานนี้ทำการทดลองเฉพาะรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีเท่านั้น โดยปรกติแล้วขอตต์กัไดโอดนิยมสร้างจากรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เนื่องจากค่าความคล่องตัว (mobility) ของอิเล็กตรอนมีค่ามากกว่าโฮลมาก แต่สำหรับเพชรค่า mobility ของอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นขอตต์กัไดโอดที่สร้างมาจากโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีจึงสามารถนำมาพิจารณาได้



๗



รูปที่ 3.1 (ก) แผนภาพแสดงโครงสร้างรอยต่อของขอตติกไดโอด

(ข) แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนสัมผัส

(ค) แสดงแรงดันที่รอยต่อและความกว้างของบริเวณปลอดพาหะภายหลัง

สัมผัส

โดยที่

eX_s = อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ

$e\phi_s$ = work function ของสารกึ่งตัวนำ

$e\phi_m$ = work function ของโลหะ

W = ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าค่า work function ของโลหะ มีค่าน้อยกว่า work function ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ($e\phi_m < e\phi_s$) เมื่อนำสารทั้งสองชนิดมาสัมผัสกันจะเกิดการถ่ายเทประจุ โดยที่อิเล็กตรอนจากโลหะจะไหลไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี จนเกิดภาวะสมดุลย์ คือระดับพลังงานเฟอร์มิของสารทั้งสองเท่ากัน เกิดกำแพงศักย์จึงทำให้รอยต่อมีคุณสมบัติในการเรกติไฟต์ โดยค่าแรงดันภายในแสดงได้ดังนี้

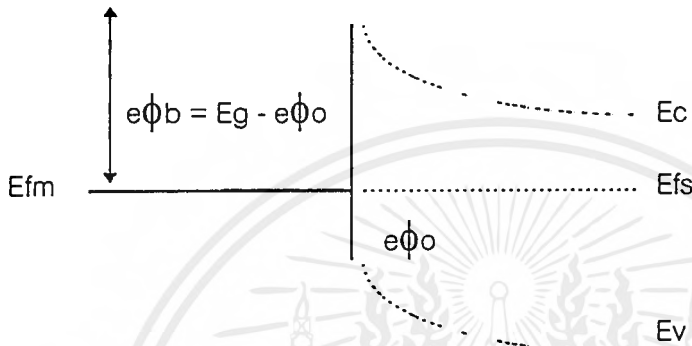
$$eV_{bi} = e\phi_s - e\phi_m \quad (3.1)$$

ค่าความสูงของกำแพงศักย์ (height of barrier) แสดงได้ดังสมการ

$$e\phi_b = e\phi_m - eX_s \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในสภาวะความเป็นจริง รอยต่อจะมีความบกพร่องเกิดขึ้นอันเนื่องจากปรากฏการณ์ทางเคมี หรือความไม่สมบูรณ์ของพันธะ ถ้าความหนาแน่นของช่องว่างแถบพลังงานที่อยู่ใกล้ $e\phi_0$ มีค่ามาก ดังนั้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในบริเวณปลอดพาหะ ไม่สามารถถูกกระตุ้นให้ข้ามไปยังระดับเฟอร์มิได้ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำในสภาวะความเป็นจริง ผลดังกล่าวนี้ทำให้ความสูงของกำแพงศักย์ มีค่าเปลี่ยนไป

$$e\phi_0 = E_g - E_{\phi_0} \quad (3.3)$$

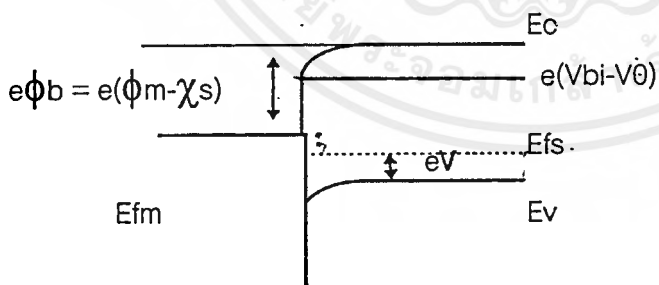
โดยที่ความสูงของกำแพงศักย์นี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของศักย์ ดังตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงความสูงของกำแพงศักย์ (V) สำหรับโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพีต่างๆ

| Schottky metal | n Si | p Si | n GaAs |
|-------------------|------|------|--------|
| Aluminum ,Al | 0.7 | 0.8 | |
| Titanium , Ti | 0.5 | 0.61 | |
| Tungsten , W | 0.67 | | |
| Gold , Au | 0.79 | 0.25 | 0.9 |
| Silver , Ag | | | 0.88 |
| Platinum , Pt | | | 0.86 |
| PtSi | 0.85 | 0.2 | |
| NiSi ₂ | 0.7 | 0.45 | |

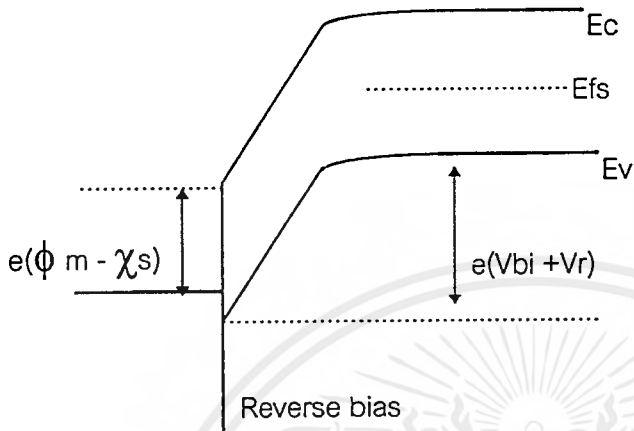
3.1.2 กระแสใน ซอตต์กีไดโอด

กระแสที่ไหลในซอตต์กีไดโอดจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของแรงดันภายใน (V_{bi}) กับแรงดันภายนอก (V) จากรูปที่ 3.3 การที่อิเล็กตรอนจะไหลข้ามรอยต่อได้นั้น ต้องมีการให้แรงดันภายนอกซึ่งมีศักย์ตรงกันข้ามกับแรงดันภายใน (ไบอัสตรง) เพื่อหักล้างกับแรงดันภายใน ($V_{bi} - V$)



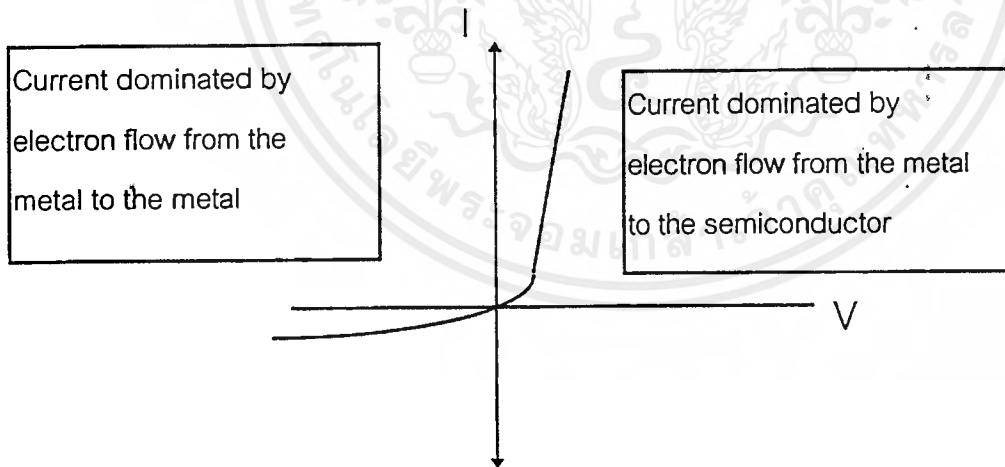
Forward bias

รูปที่ 3.3 แสดงการไหลของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำชนิดพีไปยังโลหะ เมื่อให้ไบอัสตรง



รูปที่ 3.4 แสดงการไหลของอิเล็กตรอนจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ เมื่อให้ไบอัสย้อนกลับ

จากรูปที่ 3.4 ถ้ามีการให้แรงดันภายนอกในทิศทางเดียวกับแรงดันภายใน (ไบอัสย้อนกลับ) จะทำให้แรงดันที่รอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้น ($V_{bi} + V$) ทำให้ได้กราฟ I-V curve ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติของกระแส - แรงดันในขอตัก์ไดโอด

สมการกระแส

กำหนดให้อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำมีการกระจายแบบโบลซ์มันท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_A = P_o \exp [- e(V_{bi} - V) / k_B T] \quad (3.4)$$

$$P_o = N_V \exp [- (E_{F_s} - E_V) / k_B T] \quad (3.5)$$

$$N_V = 2 \left(2\pi m_e^* k_B T / h^2 \right)^{3/2} \quad (3.6)$$

ดังนั้น

$$N_A = N_V \exp [- (e\phi_s - eV) / k_B T] \quad (3.7)$$

กระแสรวมที่ไหลข้ามรอยต่อเมื่อให้แรงดันภายนอก (V) จะเป็นดังนี้

$$I = I_s [\exp (eV / k_B T) - 1] \quad (3.8)$$

$$I = A (m^* k_B^2 / 2\pi^2 h^3) T^2 \exp [- (e\phi_b / k_B T)] \quad (3.9)$$

โดยที่

P_o = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก

N_A = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

k_B = ค่าคงที่ของโบลซ์มันท์

N_V = effective state density ของแถบความนำ

m_n^* = effective mass ของ hole

V_{bi} = ค่าแรงดันภายในของรอยต่อ

h = ค่านิจของแพลงค์

3.2 ข้อต่อที่ไดโอดจากฟิล์มเพอร์ชนิดพี

กระบวนการสร้างข้อต่อที่ไดโอด

ข้อต่อที่ไดโอดที่เกิดจากรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำเจือไนเซียมในการเกิด โลหะต้องมีค่าฟังก์ชันงานน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาเชื่อมต่อกันบริเวณรอยต่อจะเกิดมีกำแพงศักย์ขึ้น ทำให้สามารถควบคุมทิศทางกระแสของกระแสได้

โดยควบคุมจากขั้วของแรงดันที่ป้อนให้กับระบบ ดังนั้นรอยต่อที่เกิดขึ้นจึงมีคุณสมบัติเป็นไดโอด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำรอยต่อระหว่างทองกับฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิก ในขณะที่รอยต่อระหว่างอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรมีกำแพงศักย์เกิดขึ้น ดังนั้นจึงนำอลูมิเนียมมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของโลหะในการสร้างขอตักไดโอด

การสร้างขอตักไดโอดมีกระบวนการสร้างดังนี้คือ

1. สร้างฟิล์มเพชรชนิดพีตามกระบวนการที่ได้กล่าวมาแล้ว
2. นำฟิล์มเพชรมาทำความสะอาดพื้นผิวด้วยสารละลายอิมิตัวของ $C_2O_3 + H_2SO_4$ ที่อุณหภูมิ $170^{\circ}C$ เป็นเวลา 3 นาที
3. จากนั้นล้างด้วยสารละลายเดือคของ H_2O_2 และ $30\% NH_4OH$ ในอัตราส่วน 1:1
4. ล้างด้วยน้ำ DI
5. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
6. นำฟิล์มที่ทำความสะอาดแล้วไปนำขั้วโลหะทอง โดยการเคลือบในสุญญากาศที่ความดัน 1.3×10^{-6} ทอร์
7. นำไปซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $890^{\circ}C$ เป็นเวลา 12 นาที
8. นำฟิล์มไปเคลือบอลูมิเนียมในสุญญากาศที่ความดัน 1.3×10^{-6} ทอร์เช่นกัน และนำไปซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ เป็นเวลา 12 นาที

จากวิธีการสร้างในข้อที่ 2 และ 3 เป็นวิธีการทำความสะอาดพื้นผิวของฟิล์มซึ่งจะทำให้ส่วนของคาร์บอนที่ไม่มีโครงสร้างเป็นเพชรหลุดออกหมด

3.3 การทดลอง

3.3.1 การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะชนิดต่าง ๆ กับฟิล์มเพชร คุณสมบัติรอยต่อของทองคำกับฟิล์มเพชร

แผ่นฟิล์มเพชรประกอบด้วยขั้วรอยต่อทองคำสองขั้วดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยป้อนแรงดันให้กับขั้วทั้งสอง คุณลักษณะของกระแส - แรงดัน แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก สำหรับฟิล์มเพชรชนิดพีแสดงได้ดังรูป 3.8 ลักษณะของกราฟทั้งสองที่ได้มีลักษณะเป็นเชิงเส้น กรณีของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก สามารถอธิบายได้ โดยพิจารณาจากขนาดอะตอมของทองคำซึ่งมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับเพชรที่เป็นรูปหนึ่งของคาร์บอน ดังนั้นอะตอมของทองคำจึงไม่ก่อพันธะกับเพชร ดังนั้นจึงสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ทำให้มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก สำหรับกรณีของฟิล์มเพชรชนิดพีสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาจากฟังก์ชันงาน (work function) ของทองคำกับเพชร พบว่าฟังก์ชันงานของทองคำมีค่ามากกว่าเพชร ดังนั้นระดับเฟอร์มิของเพชรจะอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของทองคำ เมื่อนำทองคำกับเพชรมาเชื่อมต่อกัน ทำให้ไม่มี

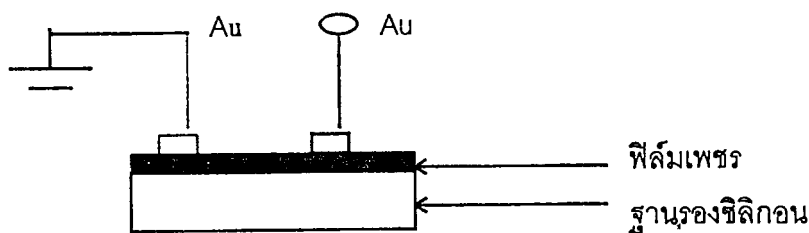
พลังงานศักย์ของโฮลเกิดขึ้น นั่นคือโฮลจากฟิล์มเพชรชนิดที่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้โดยอิสระ ซึ่งรอยต่อในลักษณะนี้มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก

คุณสมบัติของรอยต่อออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร

ออลูมิเนียมถูกสร้างเป็นขั้วทั้งสองของฟิล์มเพชร ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ผลของคุณลักษณะกระแส - แรงดันของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก และชนิดพีแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 ตามลำดับ ลักษณะของกราฟที่ได้ไม่เป็นเชิงเส้นจะสังเกตเห็นว่ามีแรงดันตกคร่อมเกิดขึ้นที่รอยต่อโดยจากกราฟจะมีค่าแรงดันค่าหนึ่งซึ่งมีกราฟไม่เชิงเส้น จากผลการทดลองที่ได้กรณีของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกสามารถอธิบายโดยพิจารณาจากขนาดอะตอมของออลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กใกล้เคียงกับคาร์บอน ทำให้เกิดการก่อกันระขึ้น สำหรับกรณีของฟิล์มเพชรชนิดที่สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน หรือพิจารณาจากฟังก์ชันงานออลูมิเนียม และเพชร พบว่าออลูมิเนียมมีฟังก์ชันงานน้อยกว่าเพชร ระดับเฟอร์มิของฟิล์มเพชรจึงอยู่ที่ระดับต่ำกว่าระดับเฟอร์มิของออลูมิเนียม เมื่อนำมาสัมผัสกันจึงเกิดมีกำแพงศักย์ขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ดังนั้นรอยต่อจึงมีคุณสมบัติในการเรกติไฟเออร์ ได้คล้ายกับรอยต่อพีเอ็น

คุณสมบัติของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพชร

ทำการสร้างขั้วอินเดียมสองขั้วเป็นฟิล์มเพชร ดังแสดงในรูปที่ 3.12 จากนั้นทำการศึกษาคุณลักษณะกระแส - แรงดันของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกมีลักษณะดังรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 สำหรับรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มชนิดพี ลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นเชิงเส้นเหมือนกับกรณีของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชร สามารถอธิบายผลการทดลองที่ได้โดยพิจารณาจากขนาดอะตอมของอินเดียมเมื่อเทียบกับคาร์บอน พบว่ามีขนาดใหญ่กว่ามาก ดังนั้นอะตอมของอินเดียมจึงไม่ก่อกันระกับเพชรเพียงแต่เข้าไปแทรกตัวอยู่ ทำให้สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระรอยต่อจึงไม่มีกำแพงศักย์เกิดขึ้น ลักษณะของรอยต่อจึงเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก

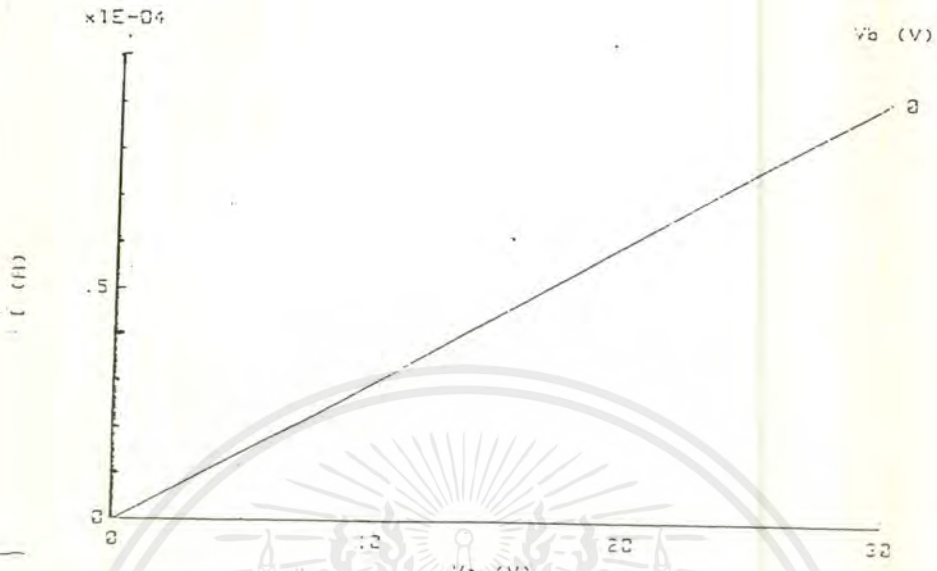


รูปที่ 3.6 แสดงภาพตัดขวางของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชร

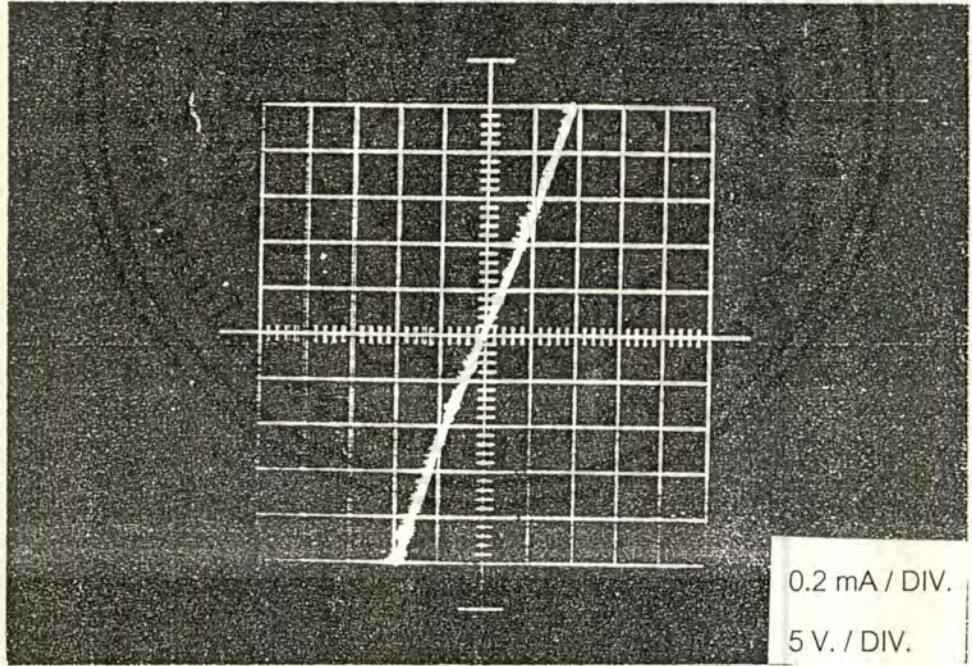
I-V CHARACTERISTICS

HP 4051A

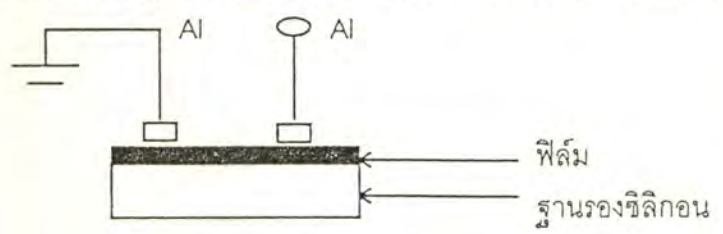
SAMPLE= INTRINSIC PU-AU



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะกระแส - แรงดันของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก



รูปที่ 3.8 แสดงคุณลักษณะกระแส - แรงดันของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชรชนิดพี



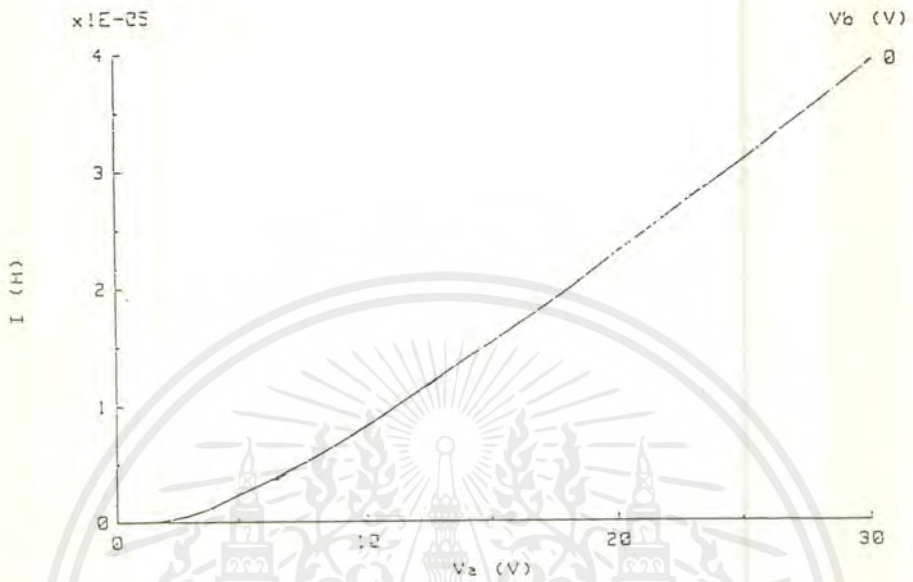
รูปที่ 3.9 แสดงภาพตัดขวางของรอยต่อออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

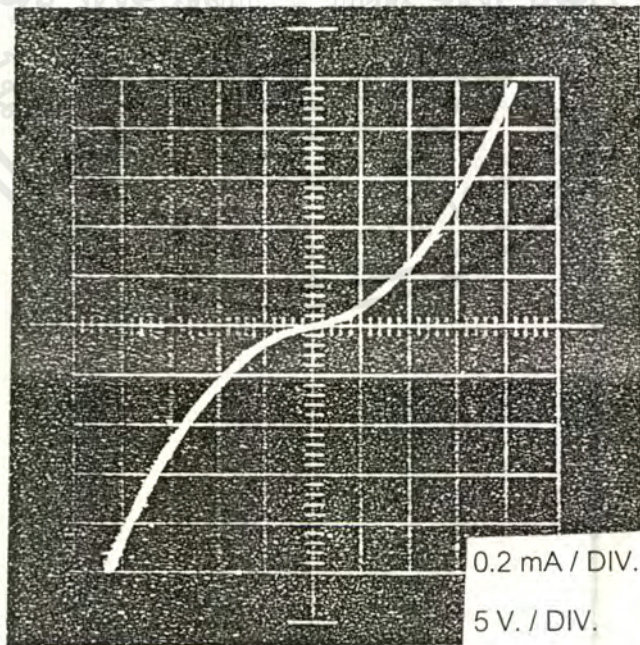
I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= INTRINSIC BI-2I

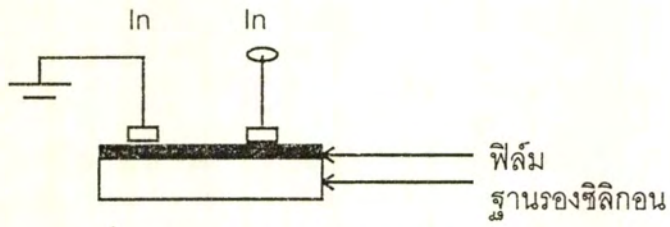


รูปที่ 3.10 แสดงคุณลักษณะกระแส - แรงดันของรอยต่อออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค

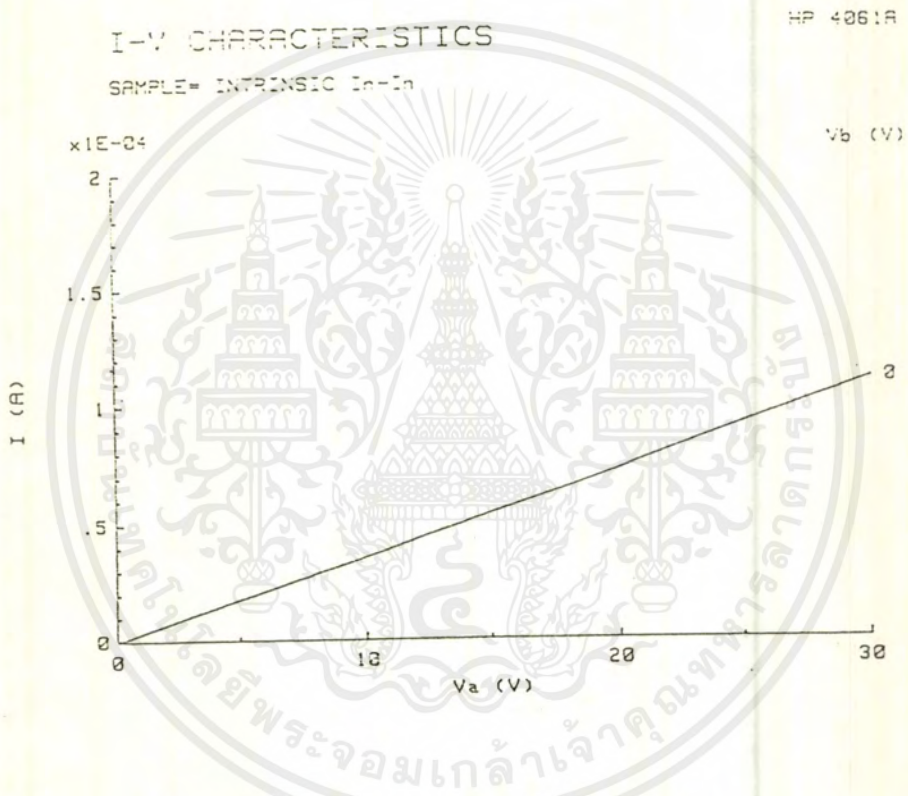


รูปที่ 3.11 แสดงคุณลักษณะกระแส - แรงดันของรอยต่อออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงภาพตัดขวางของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพชร



รูปที่ 3.13 แสดงคุณลักษณะกระแส - แรงดันของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก

พาหะ แต่เมื่อทำการไบอัสย้อนกลับมากขึ้น เป็นผลให้บริเวณรอยต่อมีบริเวณสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบดริฟท์ของพาหะจากสนามไฟฟ้าขึ้น เกิดมีกระแสไหลเนื่องจากบริเวณ อินทรีนซินคมีพาหะน้อยมากเมื่อเทียบกับทางด้านพี ทำให้ปริมาณกระแสที่ไหลอยู่ในระดับนาโน แอมป์ จากผลการทดลองที่ได้จึงกล่าวได้ว่ารอยต่อ P-I มีคุณสมบัติเป็นไดโอด เช่นเดียวกับรอยต่อ พี - เอ็น

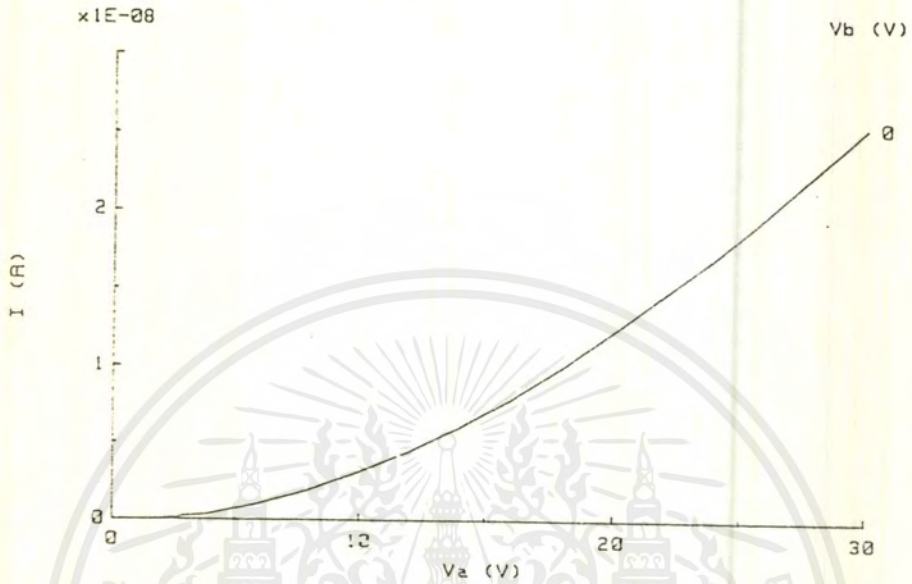
พิจารณาในเทอมของไดโอด ต้องทำการศึกษาค่าแรงดันภายใน (built - in voltage) ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อโดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่คำนวณได้ก่อนมาเชื่อมต่อกัน แสดงได้ดังรูป 3.16 ก

เมื่อรอยต่อ พี - อินทรีนซิค เกิดขึ้นจะเห็นว่าเนื่องจากด้านทั้งสองของรอยต่อมีความแตกต่างกันของความหนาแน่นพาหะ กล่าวคือ โฮลทางด้านพีจะมีค่ามากกว่าทางด้านอินทรีนซิคเป็นเหตุให้เกิดมีแรงกระทำต่อพาหะให้เคลื่อนที่ผ่านรอยต่อ เพื่อให้ด้านทั้งสองมีพาหะเท่ากัน ดังนั้นพาหะจากทางด้านพี ซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าจะแพร่ไปยังทางด้านอินทรีนซิค ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่า นั่นคือ โฮลทางด้านพี จะแพร่ข้ามทางด้านอินทรีนซิคจะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ ดังนั้น อะตอมสารเจือผู้รับทางด้านพีที่บริเวณรอยต่อมีสภาพเป็นไอออนลบ ส่วนทางด้านอินทรีนซิคมีสภาพเป็นไอออนบวกทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นบริเวณรอยต่อ ช่วยต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลจากทางด้านพี จนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอจนทำให้รอยต่ออยู่ในภาวะสมดุล ที่บริเวณรอยต่อซึ่งมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น จะเป็นบริเวณที่ไม่มีพาหะ อยู่เนื่องจากพาหะจะถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้าผลักออกไปจากบริเวณนี้ บริเวณดังกล่าวนี้เรียกว่าบริเวณปลอดพาหะ ในบริเวณปลอดพาหะนี้เองที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างด้านพีและด้านอินทรีนซิคขึ้น ซึ่งเรียกว่าแรงดันภายในที่เราจะทำการหาค่าผลของระหว่างรอยต่อพี-อินทรีนซิคที่เกิดขึ้นทำให้แถบพลังงานมีลักษณะดังรูปที่ 3.16 ข

I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE# INTRINSIC - P-TYPE

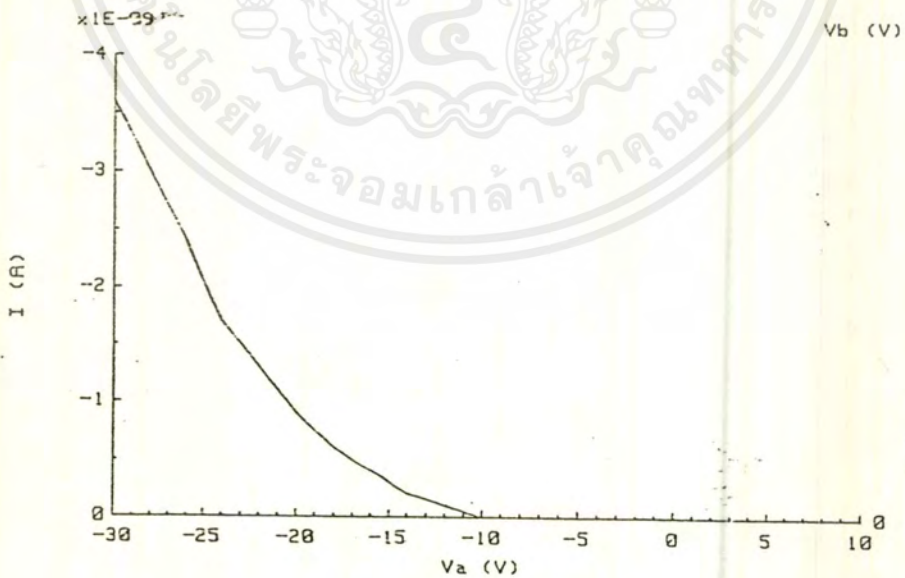


(ก)กรณีการไบอัสไปข้างหน้า

I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

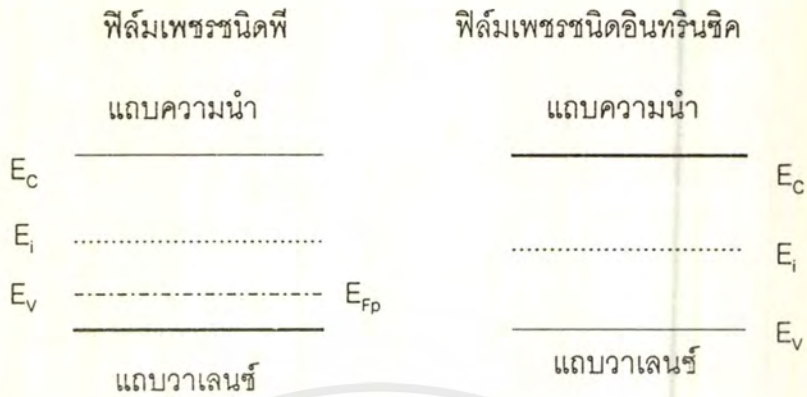
SAMPLE# INTRINSIC - P-TYPE



(ข)กรณีการไบอัสย้อนกลับ

รูปที่ 3.15 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่อ P-I

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16(ก) แสดงไดอะแกรมโครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดพีและชนิดอินทรีนซิก



รูปที่ 3.16 (ข) แสดงไดอะแกรมโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อ P-I

พิจารณาจากรูป 3.16 ค่าแรงดันภายในมีค่าเท่ากับ $E_i - E_{Fp}$

เนื่องจากกรณีของเพชร $E_g = 5.5 \text{ eV}$ กรณีของอินทรีนซิก $E_i = E_g / 2 = 2.75 \text{ eV}$ และจากการศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มเพชรชนิดพี ที่อัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน 1,000 ppm มีค่าพลังงานกระตุ้นเป็น 0.068 eV หรือ $E_{Fp} - E_v = 0.068 \text{ eV}$ ดังนั้นแรงดันภายในมีค่า

$$qV_b = E_i - E_{Fp} = 2.75 - 0.068 \text{ eV} = 2.682$$

$$V_{\text{out}} = 2.682 \text{ V}$$

จากการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณกับค่าที่ได้จากการทดลองพบว่ามีค่าเท่ากัน

3.3.3 การศึกษาคุณสมบัติของขอตดักไดโอด

ขอตดักไดโอดเป็นไดโอดชนิดหนึ่งที่เกิดจากรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ เนื่องมาจากการเกิดเป็นผลจากความแตกต่างกันของฟังก์ชันงาน เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาเชื่อมต่อกันจึงทำให้เกิดกำแพงศักย์ขึ้น โดยกำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นมีผลต่อการเคลื่อนที่ของพาหะซึ่งในที่นี้พิจารณาพาหะส่วนใหญ่เป็นโฮลเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ถ้าฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีรอยต่อจะมีคุณสมบัติในการเร่งดีไฟเออร์เช่นเดียวกับรอยต่อพี-เอ็น

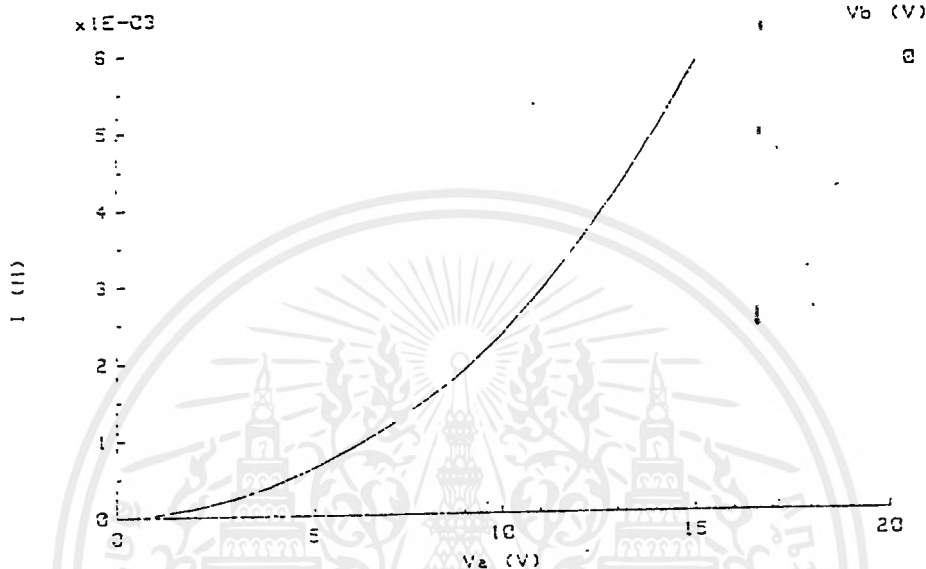
คุณสมบัติทางไฟฟ้า

จากการศึกษาคุณสมบัติของโลหะชนิดต่าง ๆ กับฟิล์มเพชรชนิดพี พบว่าโลหะอินเดียมและทองคำจะให้รอยต่อแบบโอห์มมิกในขณะที่โลหะอลูมิเนียมจะให้รอยต่อแบบขอตดัก จากคุณสมบัติดังกล่าวของอลูมิเนียม จึงนำอลูมิเนียมมาสร้างเป็นรอยต่อเพื่อสร้างเป็นขอตดักไดโอด โดยมีกระบวนการสร้างดังที่กล่าวไว้แล้วในตอน 4.6 หลังจากทำการสร้างชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำชิ้นงานมาศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง HEWETT PACKARD รุ่น 4061A Semiconductor / Component Test System ผลการทดลองจากการไปอัสไปข้างหน้าให้กับชิ้นงานคุณลักษณะของกระแส - แรงดัน เป็นดังรูป 3.17

I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE# NUMBER 135



รูปที่ 3.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ (I - V) forward bias ของรอยต่อออลูมิเนียม - ฟิล์มเพชร

พิจารณาจากสมการ

$$I = I_s [\exp(qV / kT) - 1] \quad (3.10)$$

$$I_s = AA' T^2 \exp(-q\phi_{bp} / kT) \quad (3.11)$$

โดยที่ I_s = กระแสอิ่มตัว หาได้จากการประมาณจากกราฟของกระแส-แรงดันที่เขียนในรูปล็อกเชิงเส้นโดยพิจารณาบริเวณที่ $V = 0$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.34

n = Ideality Factor กรณีที่มีการโดปะอะตอมสารเจือจำนวนมากหรือทำงานที่

อุณหภูมิต่ำ ค่า n จะมีค่าเป็นหนึ่ง

A = พื้นที่

k = ค่าคงที่ของโบลต์มันต์

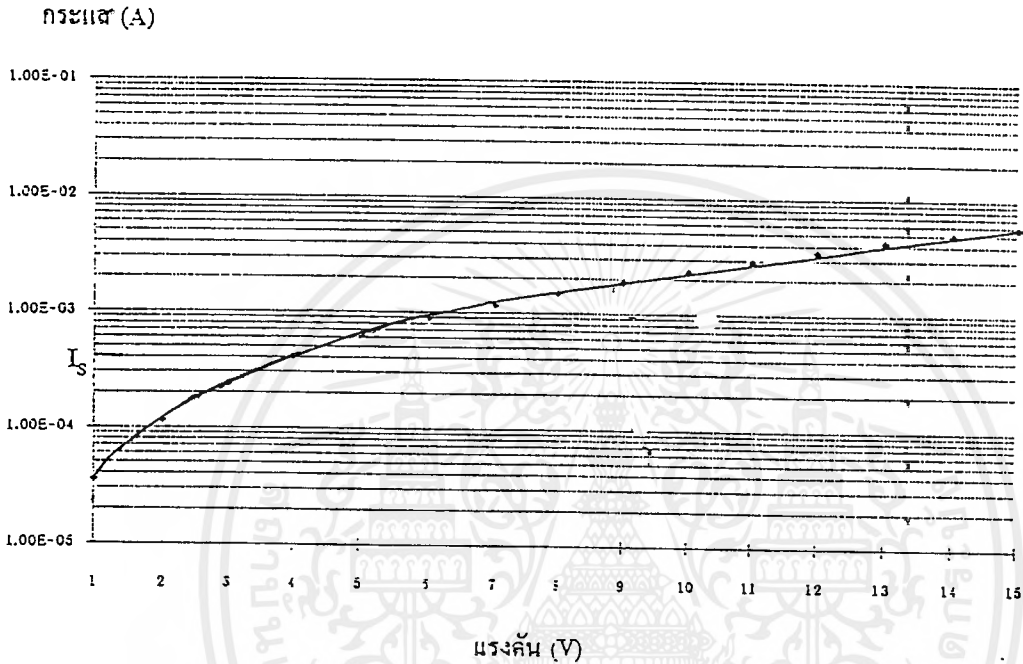
T = อุณหภูมิสมบูรณ์

ϕ_{bp} = ความสูงของกำแพงศักย์

$$A' = \text{Effective Richardson Constant} = 4\pi q m' k^2 / h^3$$

ดังนั้นจากสมการ (5.12) จะได้ว่า

$$\phi_{Bo} = (kT/q) \ln (AA'^2/I_s) \quad (3.12)$$



รูปที่ 3.18 แสดงการหาค่ากระแสอิ่มตัวโดยการประมาณ

ก่อนอื่นต้องทำการหาค่า Effective Richardson Constant จาก

$$A' = 4\pi q m' k^2 / h^3 \quad (3.13)$$

กรณีของเพชร $m' = 0.25 m_0$ หรือ $m' = 2.277357 \times 10^{-31} \text{ kg}$

สำหรับพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าดังนี้คือ

$$q = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ A-s}$$

$$h = 6.62617 \times 10^{-34} \text{ J-s}$$

$$k = 1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

แทนค่าสมการจะได้

$$A' = 3 \times 10^5 \text{ A/m}^2 \cdot \text{K}^2$$

พิจารณาจากกราฟรูปที่ 3.14 ค่า $I_s = 4 \times 10^{-4}$ A ทำการวัดที่อุณหภูมิ $T = 293$ K พื้นที่ของรอยต่อ 1 mm^2 เมื่อนำไปแทนค่าใน สมการ (5.13) ค่าความสูงของกำแพงศักย์มีค่าเป็น

$$\phi_{sp} = 0.57 \text{ V}$$

เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้กับที่อ่านได้จากกราฟในรูปที่ 3.13 พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียง ดังนั้นเราจึงได้ขอตติโดโอดที่มีค่าแรงดันภายในเป็น 0.57 V ที่สามารถนำไปใช้งานต่อไป

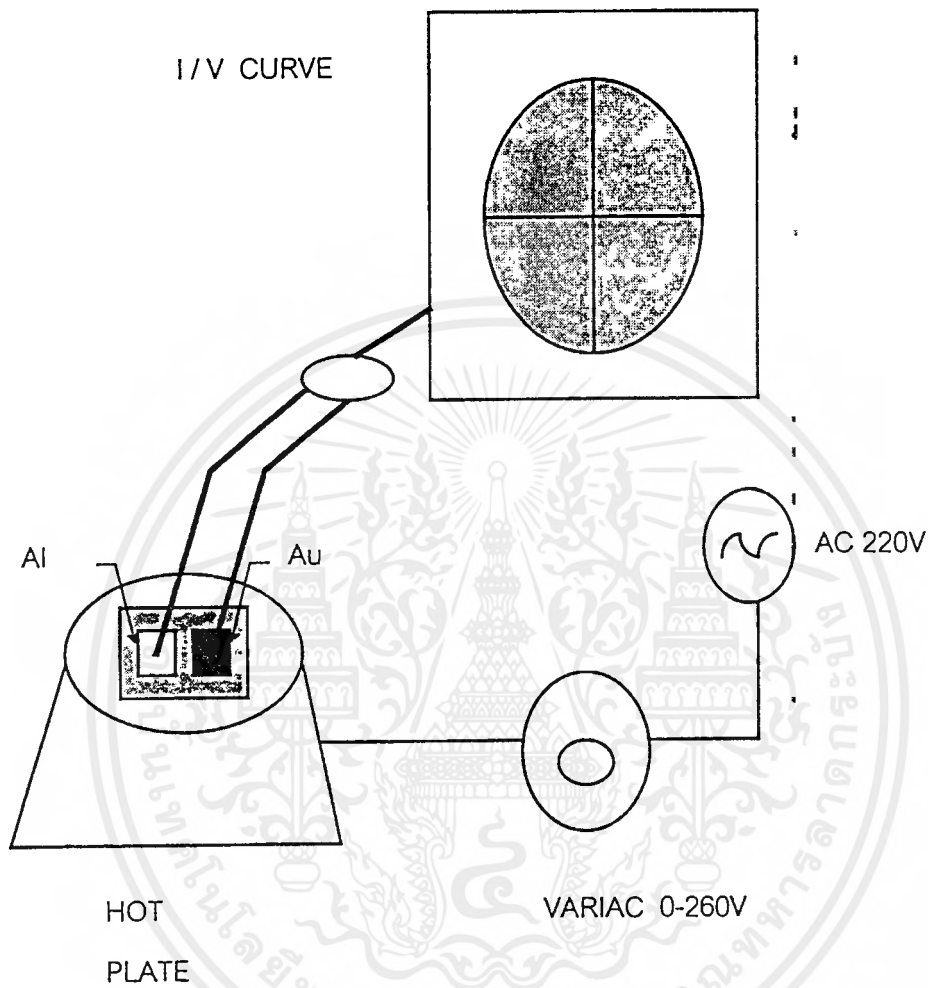
3.3.4 การศึกษาคุณสมบัติของขอตติโดโอดกับอุณหภูมิ

การทดลอง

ทำการทดลองศึกษาคุณสมบัติของขอตติโดโอดที่อุณหภูมิต่าง ๆ

วิธีการทดลอง

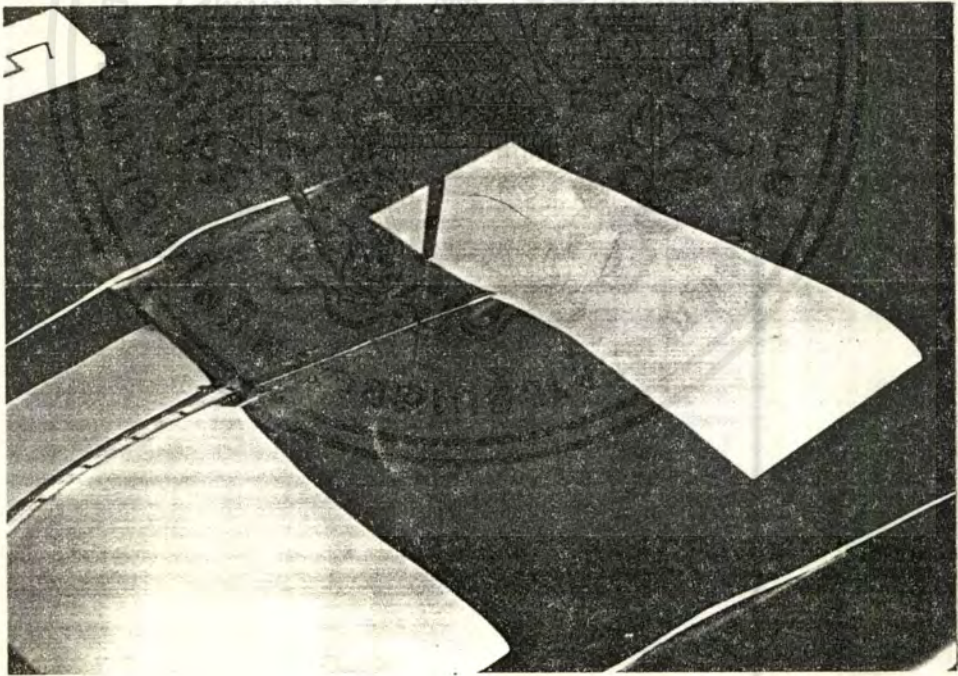
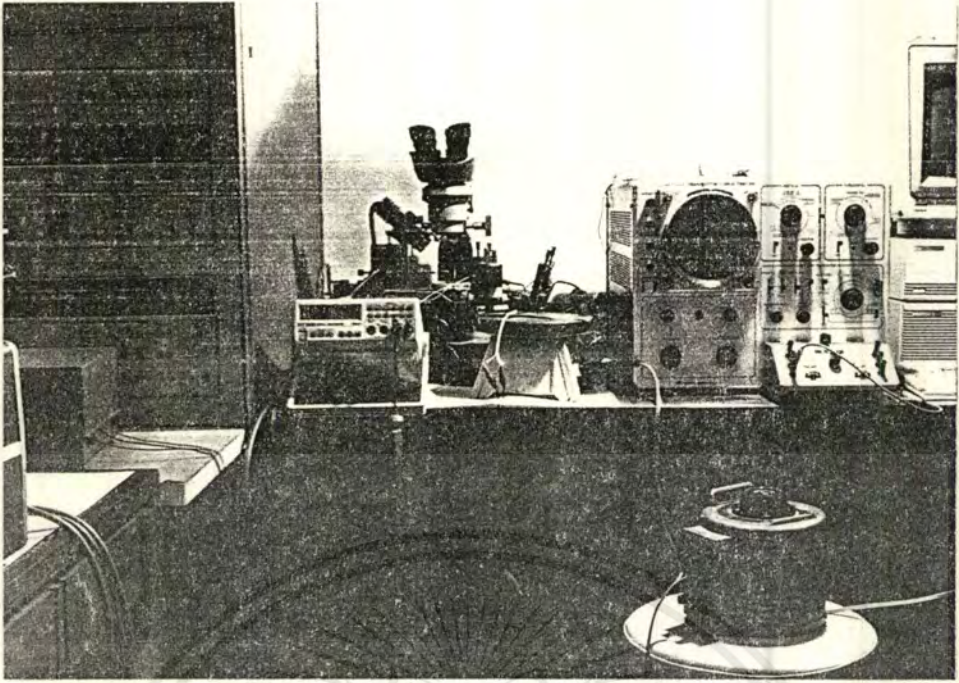
1. นำขอตติโดโอดที่สร้างขึ้นวางบน hot plate โดยใช้แผ่นทองแดงเป็นตัวนำความร้อน เพื่อป้องกันมิให้อุปกรณ์สัมผัสกับ hot plate โดยตรง
2. ป้อนแรงดันค่าต่าง ๆ โดยการปรับ variac เพื่อควบคุมอุณหภูมิของ hot plate ให้ได้ตามต้องการ
3. การวัดอุณหภูมิจะใช้ thermocouple ซึ่งต่ออยู่กับแผ่นทองแดงข้างหนึ่งของสาย ส่วนอีกข้างหนึ่งทำการวัดแรงดันตกคร่อม ด้วย DVM แล้วเปรียบเทียบว่าแรงดันที่ได้กับตาราง
4. ใช้ probe จับที่ขั้วสัมผัสทั้งสองของชิ้นงาน แล้วทำการวัดคุณสมบัติของกระแส - แรงดัน โดยใช้เครื่อง curve tracer



รูปที่ 3.19 แผนภาพแสดงการศึกษาคอนสมบัติของขอตติ์ไดโอดที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าแรงดันออกที่อุณหภูมิต่างๆของเทอร์โมคัปเปิล Type K (nickle / chromium
- nickle / aluminium)

| t(°C) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| -200 | -5.891 | -6.035 | -6.158 | -6.262 | -6.344 | -6.404 | -6.441 | -6.458 | | |
| -100 | -3.553 | -3.852 | -4.138 | -4.410 | -4.669 | -4.912 | -5.141 | -5.354 | -5.550 | -5.730 |
| (-)0 | 0.00 | -0.392 | -0.777 | -1.156 | -1.527 | -1.889 | -2.243 | -2.586 | -2.920 | -3.242 |
| (+)0 | 0.00 | 0.397 | 0.798 | 1.203 | 1.611 | 2.022 | 2.436 | 2.805 | 3.266 | 3.681 |
| 100 | 4.095 | 4.508 | 4.919 | 5.327 | 5.733 | 6.137 | 6.539 | 6.939 | 7.338 | 7.737 |
| 200 | 8.137 | 8.537 | 8.938 | 9.341 | 9.745 | 10.151 | 10.560 | 10.969 | 11.381 | 11.793 |
| 300 | 12.207 | 12.623 | 13.093 | 13.456 | 13.874 | 14.292 | 14.712 | 15.132 | 15.552 | 15.974 |
| 400 | 16.395 | 16.818 | 17.241 | 17.664 | 18.088 | 18.513 | 18.938 | 19.363 | 19.788 | 20.214 |
| 500 | 20.640 | 21.066 | 21.493 | 21.919 | 22.346 | 22.772 | 23.198 | 23.624 | 24.050 | 24.476 |
| 600 | 24.902 | 25.327 | 25.751 | 26.176 | 26.599 | 27.022 | 27.445 | 27.867 | 28.288 | 28.709 |
| 700 | 29.128 | 29.547 | 29.965 | 30.383 | 30.799 | 31.214 | 31.629 | 32.042 | 32.455 | 32.866 |
| 800 | 33.277 | 33.686 | 34.095 | 34.502 | 34.909 | 35.314 | 35.718 | 36.121 | 36.524 | 36.925 |
| 900 | 37.325 | 37.724 | 38.122 | 38.519 | 38.915 | 39.310 | 39.703 | 40.096 | 40.488 | 40.879 |
| 1000 | 41.269 | 41.657 | 42.045 | 42.432 | 42.817 | 43.202 | 43.585 | 43.968 | 44.349 | 44.729 |
| 1100 | 45.108 | 45.486 | 45.863 | 46.238 | 46.612 | 46.985 | 47.356 | 47.726 | 48.095 | 48.462 |
| 1200 | 48.828 | 49.192 | 49.555 | 49.916 | 50.276 | 50.633 | 50.990 | 51.344 | 51.697 | 52.049 |
| 1300 | 52.398 | 52.747 | 53.093 | 53.439 | 53.782 | 54.125 | 54.466 | 54.807 | | |

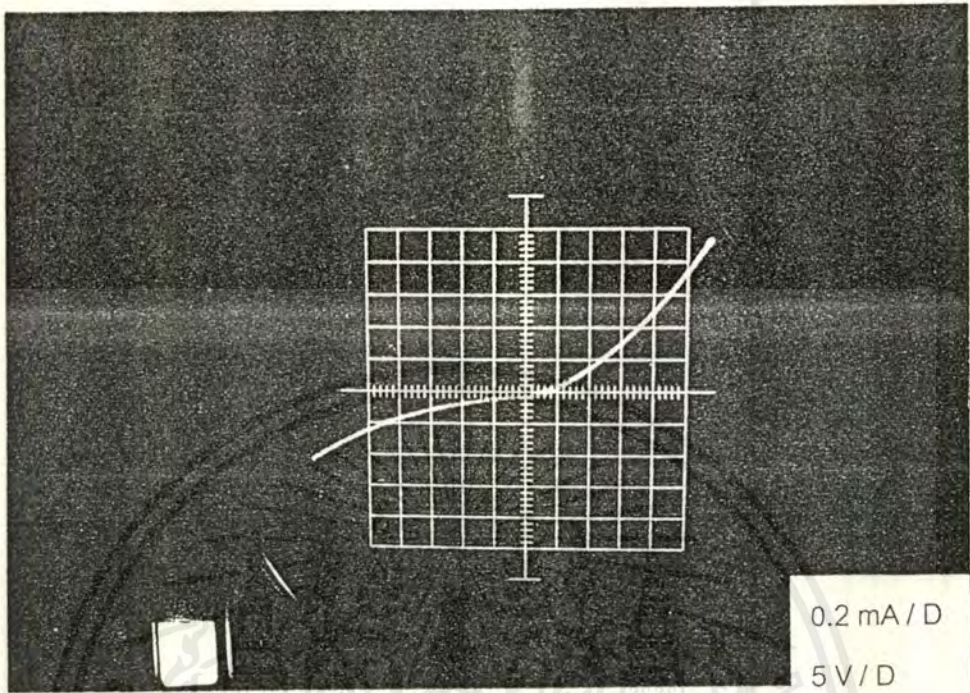


รูปที่ 3.20 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติของชอตตี๊กไดโอดที่อุณหภูมิต่าง ๆ

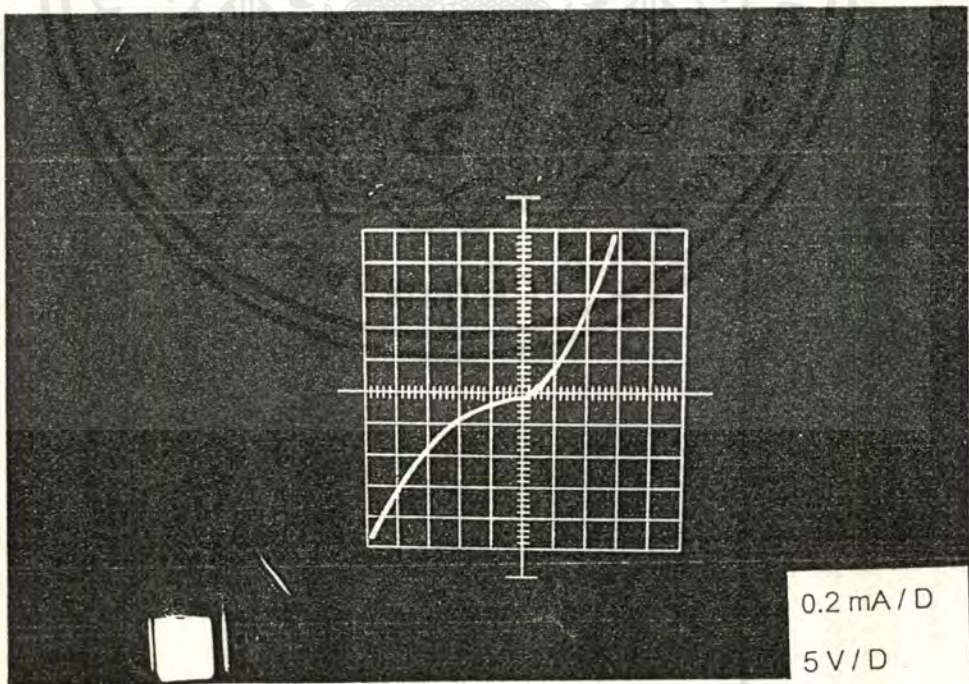
ผลการทดลองวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของชอตตี๊กไดโอดที่อุณหภูมิต่างๆ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใช้

ขอตึกไดโอดที่ใช้ทดสอบนั้นสร้างขึ้นจากฟิล์มเพชรชนิดพี โดยใช้ลูมิเนียมเป็นรอยต่อแบบเรกติไฟต์และใช้ทองคำเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก โดยใช้ชุดอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.2 มีดังนี้

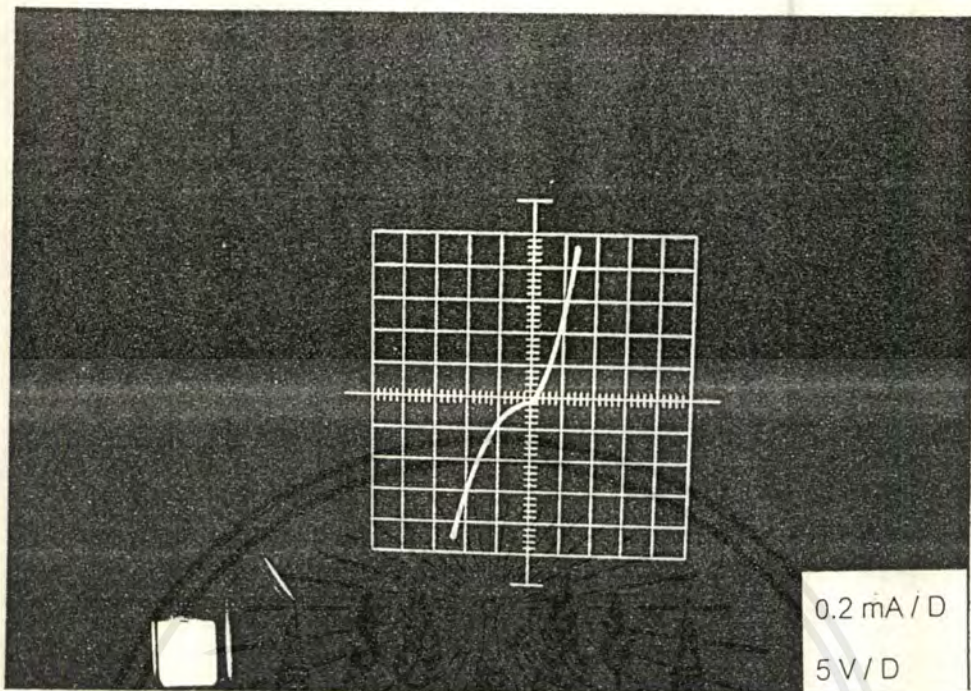


(ก)

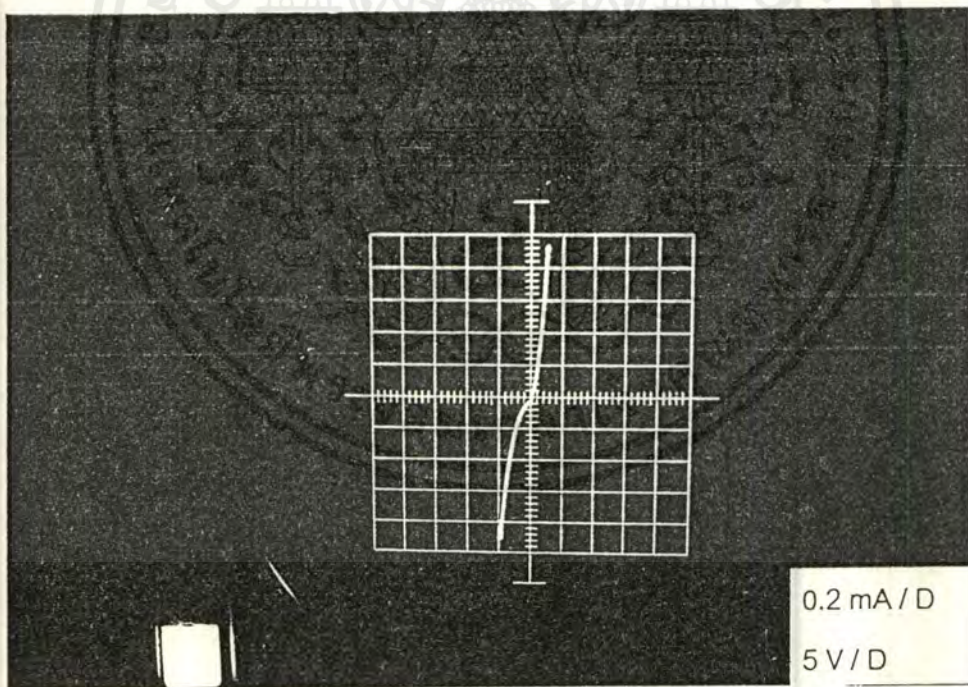


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ 59



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.21 แสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดันของรอยต่อออลูมิเนียมและฟิล์มเพชรชนิดที่
ที่อุณหภูมิต่างๆ

(ก) ที่อุณหภูมิห้อง

(ค) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

(ข) ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

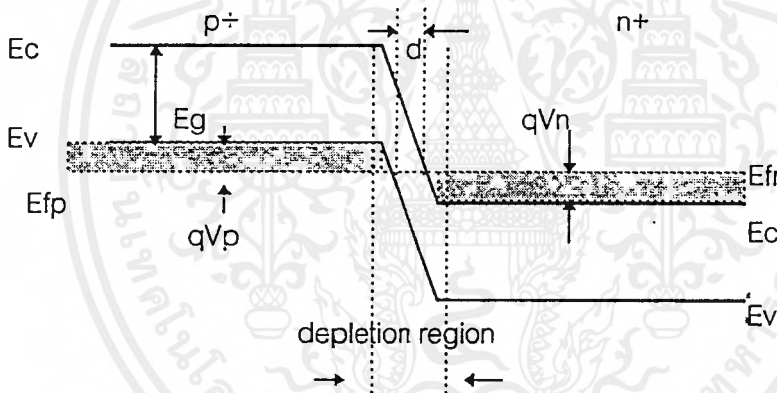
(ง) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออุปกรณ์

เมื่อพิจารณาถึงค่าช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามของเพชรที่มีค่า 5.5 eV ซึ่งการที่จะกระตุ้นพาหะให้เกิดพาหะอิสระในแถบความนำจึงต้องใช้พลังงานสูง ดังนั้นการทำงานของอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างเพชรจะสามารถทำงานได้ดีในอุณหภูมิสูง ในขณะที่อุปกรณ์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นยกตัวอย่างเช่น ซิลิกอน และ แกลเลียม อาร์เซไนด์ ที่มีช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามแคบคือมีค่า 1.12 eV และ 1.45 eV ตามลำดับ จะไม่สามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูง หรือที่อุณหภูมิสูงมาก ๆ จะไม่สามารถทำงานได้เลย เนื่องจากไม่สามารถควบคุมปริมาณพาหะได้เหมาะสม เพื่อศึกษาการทำงานของขอตติ์โคโดตที่เกิดจากรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี ถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณลักษณะของกระแส - แรงดันของอุปกรณ์ว่ามีลักษณะอย่างไร จึงทำการศึกษาคุณลักษณะของกระแส-แรงดัน ในรูปที่ 3.21 พบว่าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้แรงดัน breakdown ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลจากพลังงานความร้อนที่จ่ายให้กับอุปกรณ์จะไปกระตุ้นพาหะให้เกิดพาหะอิสระได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 400°C อุปกรณ์ยังคงสามารถทำงานได้ ซึ่งสังเกตได้จากกราฟยังคงมีแรงดันตกคร่อมรอยต่อ แต่แรงดันของการ breakdown มีค่าลดลงกว่าขณะทำงานที่อุณหภูมิต่ำ (25°C) ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าขอตติ์โคโดตที่มีโครงสร้างเป็นเพชรสามารถทำได้ที่อุณหภูมิสูง เป็นข้อดีของสารกึ่งตัวนำเพชรที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ต้องการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

บทที่ 4 แบบเวอร์ดไดโอด

แบบเวอร์ดไดโอดเป็นไดโอดที่มีการแพร่อะตอมสารเจือด้านทั้งสองของรอยต่อ P-N ในปริมาณความหนาแน่นของสารเจือสูง (degenerate) แต่อย่างน้อยกว่า ทันแนลไดโอด (tunnel diode) โดยใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพีต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยเมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมาสัมผัสกัน จะเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มิของสารทั้งสองมีค่าเท่ากัน และผลจากการแพร่อะตอมสารเจือในปริมาณความหนาแน่นสูงที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ ทำให้ระยะ d แคบมาก ปริมาณที่ใช้ในการแพร่อะตอมสารเจือคือ $V_p \cong (\Xi_v - E_{c_p}) / q$ และ $V_n = (E_{F_n} - E_c) / q$ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานเมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาสัมผัส

ที่อุณหภูมิมากกว่า 0 องศาเคลวิน อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานที่แถบวาเลนซ์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะเคลื่อนที่ไปที่ระดับเฟอร์มิ ทำให้เกิดโฮลขึ้นในบริเวณระหว่างแถบวาเลนซ์กับระดับพลังงานเฟอร์มิ เรียกบริเวณที่มีโฮลมากนี้ว่า empty states ส่วนบริเวณที่อยู่ใต้ระดับเฟอร์มิลงไปจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากกว่าบริเวณ empty states เรียกบริเวณนี้ว่า filled states

ในทางกลับกัน ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนจากระดับเฟอร์มิจะเคลื่อนที่ไปที่แถบความนำได้ ทำให้บริเวณระหว่างแถบความนำ กับระดับพลังงานเฟอร์มิมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมาก เกิดเป็น filled states และบริเวณเหนือระดับพลังงานเฟอร์มิขึ้นไป จะมีความหนา

แน่นของโฮล มากกว่าบริเวณ filled states จึงเกิดเป็นบริเวณ empty states กระแสที่ไหลภายใน แบคเวิร์ตไดโอดจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีบริเวณ filled states ตรงกับบริเวณ empty states

4.1 ชนิดของแบคเวิร์ตไดโอด

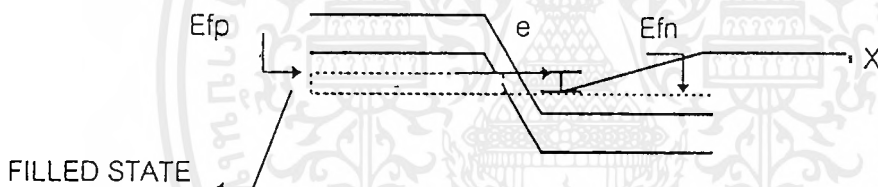
เมื่อพิจารณาจากปริมาณความหนาแน่นของสารเจือที่ใช้ในการแพร่ จะสามารถแบ่งแบคเวิร์ตไดโอดออกได้เป็นสองชนิดคือ

1. ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ
2. ชนิดที่ไม่มีควมต้านทานเชิงลบ

4.1.1 ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ

เกิดจากการ degenerate ในปริมาณ $V_p > 0$ และ $V_n > 0$ ดังรูปที่ 4.1

กรณีไบอัสย้อนกลับ จะทำให้ระดับพลังงานทางด้านที่เลื่อนสูงขึ้นในขณะที่ทางด้านเลื่อนต่ำลง ดังรูปที่ 4.2

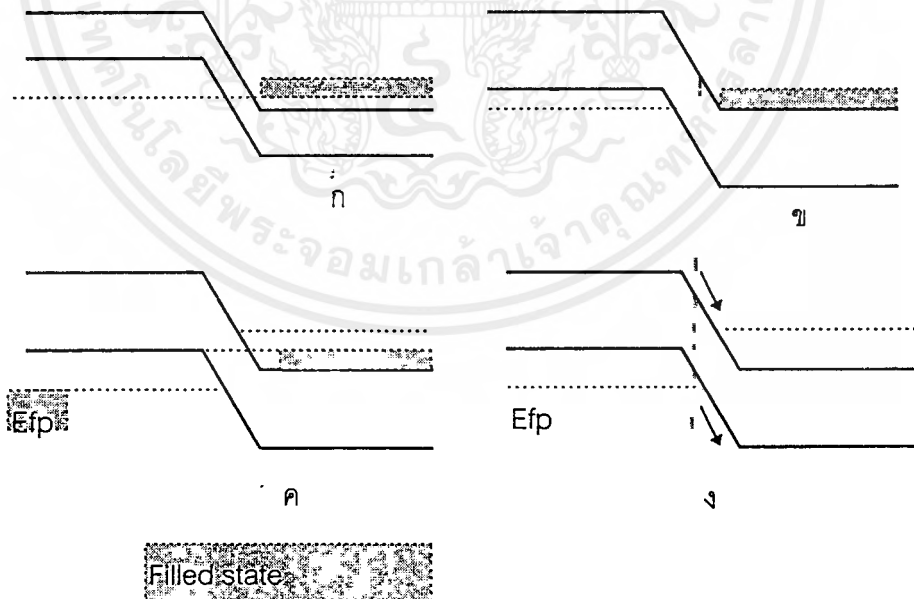


รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแบคเวิร์ตไดโอดชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ เมื่อให้ไบอัสย้อนกลับ

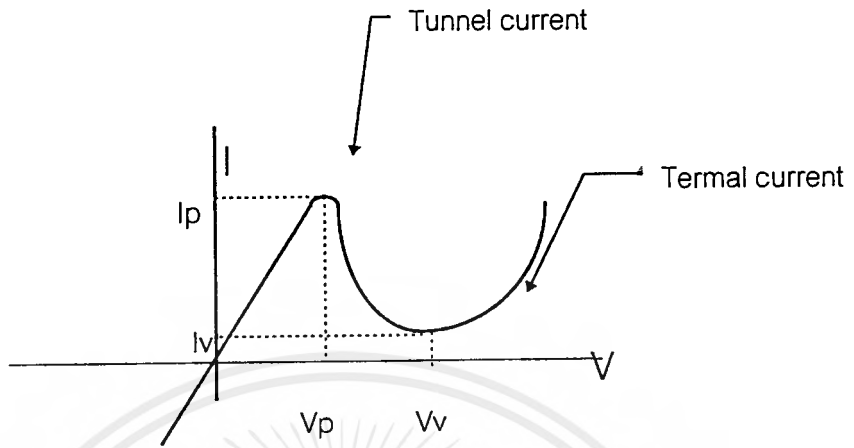
จะเห็นได้ว่า บริเวณใต้ระดับพลังงานเฟอร์มิทางด้านที่ filled states ตรงกับบริเวณ empty states ทางด้านอื่นเป็นระยะ x ทำให้อิเล็กตรอนจาก filled states พุ่งด้านที่ไหลทะลุผ่านช่องว่างพลังงาน (band gap) ไปยังบริเวณ empty states ของทางด้านอื่น เกิดกระแสไหลอย่างมากภายในทิศทางของการไบอัสย้อนกลับ

กรณีไบอัสตรง เมื่อให้ไบอัสค่าน้อยระดับพลังงานทางด้านที่ j เลื่อนต่ำลงในขณะที่ระดับพลังงานทางด้านอื่นเลื่อนสูงขึ้น ทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิทางด้านอื่น (E_{fn}) จะอยู่สูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของทางด้านที่ (E_{fp}) เกิดมีบริเวณ filled states ของอื่นอยู่ตรงกับบริเวณ empty states ของทางด้านที่ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ทะลุช่องว่างพลังงานจากทางด้าน

กรณีไบอัสตรง เมื่อให้ไบอัสค่าน้อยระดับพลังงานทางด้านพี จะเลื่อนต่ำลงในขณะที่ระดับพลังงานทางด้านเอ็นเลื่อนสูงขึ้น ทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิทางด้านเอ็น (E_{Fn}) จะอยู่สูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของทางด้านพี (E_{Fp}) เกิดมีบริเวณ filled states ของเอ็นอยู่ตรงกับบริเวณ empty states ของทางด้านพี อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ทะลุช่องว่างพลังงานจากทางด้านเอ็นไปยังด้านพี ดังรูปที่ 4.3 ก เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นกระแสจะเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าสูงสุด (I_p : peak current) ดังรูปที่ 4.3 ข และเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นมากกว่า V_p จะทำให้บริเวณที่ตรงกันของ filled states กับ empty states น้อยลง กระแสจะเริ่มน้อย ดังรูปที่ 4.3 ค จนถึงค่าต่ำสุด (I_v , V_v) เมื่อขอบบนของแถบวาเลนซ์ทางด้านพี อยู่ตรงกับขอบล่างของแถบความนำทางด้านเอ็นพอดี เมื่อให้ไบอัสมากกว่า V_v จะไม่มีกระแสที่เกิดจากการทะลุผ่านช่องว่างพลังงานอีกต่อไป แต่จะเกิดมีกระแสเนื่องจากความร้อนขึ้น (thermal current) ในลักษณะเดียวกับกระแสที่ไหลในไดโอดธรรมดาทั่วไป ดังรูปที่ 4.3 ง กระแสและแรงดันของแบคเวร็ดไดโอดชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ แสดงดังรูปที่ 4.4 ส่วนของกราฟในบริเวณที่ลดลงจาก I_p จนถึงกระแสต่ำสุด I_v คือความต้านทานเชิงลบ



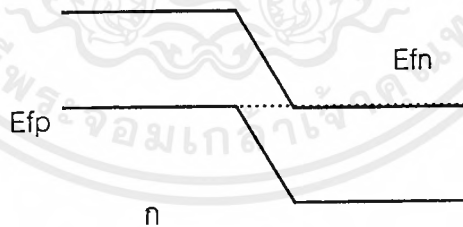
รูปที่ 4.3 ก , ข , ค , ง แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแบคเวร็ดไดโอดชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ เมื่อให้ไบอัสตรง



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟของแบบควิรต์ไดโอดชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบเมื่อให้ไบอัสตรง

4.1.2 ชนิดที่ไม่มี ความต้านทานเชิงลบ

เกิดจากการ degenerate ในปริมาณ $v_p \cong 0$, $v_n \cong 0$ ทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นอยู่ที่ขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ และขอบล่างสุดของแถบความนำตามลำดับ ดังรูปที่ 4.5 ก



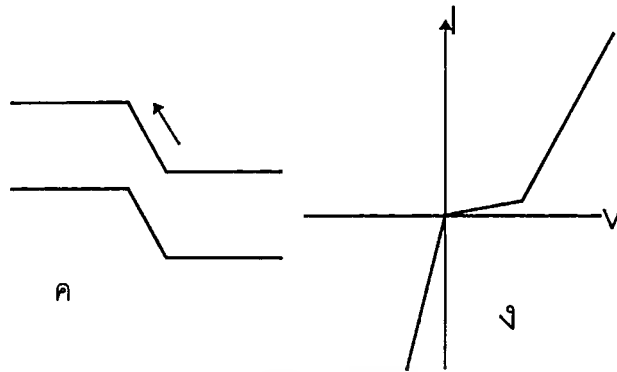
รูปที่ 4.5 A แสดงระดับพลังงานเฟอร์มิของแบบควิรต์ไดโอดชนิดที่ไม่มี ความต้านทานเชิงลบ

กรณีไบอัสย้อนกลับ ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะเลื่อนสูงขึ้นในขณะที่เอ็นจะเลื่อนต่ำลง ระดับพลังงานเฟอร์มิทางด้านพีจะอยู่สูงกว่าทางด้านเอ็น เกิดมี filled states ทางด้านพีตรงกับ empty states ทางด้านเอ็น เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทางด้านพีทะลุผ่านช่องว่างพลังงานไปยังด้านเอ็น เกิดการไหลของกระแสอย่างมาก ดังรูปที่ 4.5 ข



รูปที่ 4.5 ข แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแบบเวรีดไดโอดชนิดที่ไม่มีความต้านทานเชิงลบ เมื่อให้ไบอัสย้อนกลับ

กรณีไบอัสตรง จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิทางด้านเอ็นอยู่สูงกว่าทางด้านพี จึงไม่มีบริเวณที่ตรงกันของ filled states และ empty states กระแสที่เกิดจากการไหลทะลุผ่านช่องว่างพลังงานของอิเล็กตรอน จึงไม่เกิดขึ้นคงเหลือแต่กระแสที่เกิดขึ้นจากความร้อน (thermal current) (รูปที่ 4.6 ก) ตามปรกติเท่านั้น เนื่องจากการแพร่อะตอมส่วรเจือในปริมาณมาก ทำให้แรงดันภายในของรอยต่อ พี-เอ็น มีค่าสูง แรงดันเริ่มต้น (therhold voltage) จึงมีค่ามาก กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส - แรงดัน ของแบบเวรีดไดโอดชนิดที่ไม่มีความต้านทานเชิงลบ แสดงดังรูปที่ 4.6 ข



รูปที่ 4.6 (ก) แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแบคเวอริตไดโอดชนิดที่ไม่มีความต้านทานเชิงลบ
กรณีไบอัสตรง

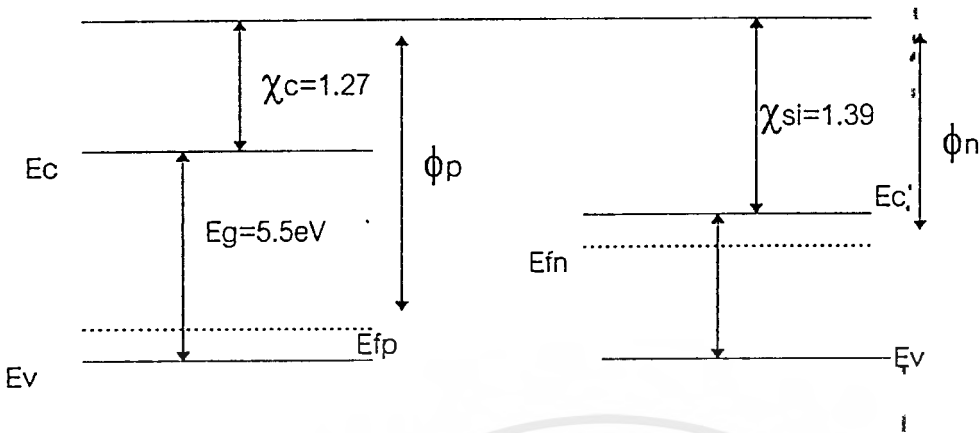
(ข) กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของแบคเวอริตไดโอดชนิดที่ไม่มีความต้านทาน
เชิงลบ

4.2 กระบวนการสร้างแบคเวอริตไดโอด

หลังจากที่ได้ทำการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีลงบนฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็นด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อนแล้ว นำฟิล์มมาทำความสะอาดพื้นผิวด้วยสารละลายอิมิดของ CrO_3 และ H_2SO_4 ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นล้างด้วยสารละลายเดือดของ H_2O_2 และ 30% NH_4OH ในอัตราส่วน 1: 1 ซึ่งวิธีการที่กล่าวมาจะทำให้ส่วนคาร์บอนที่ไม่มีโครงสร้างเป็นเพชรหลุดออกมาหมด นำฟิล์มที่ทำทำความสะอาดแล้วไปทำขั้วโลหะทองโดยการเคลือบในสุญญากาศที่ความดัน 1.3×10^{-6} ทอร์ จากการเคลือบจะได้ความหนาของชั้นโลหะ ประมาณ 1 ไมครอน ขนาดประมาณ 1 mm นำไปทำกระบวนการ ซินเตอร์ริง (sintering) ที่อุณหภูมิ 890 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที เพื่อให้รอยต่อระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชรเกาะติดแน่นขึ้น สุดท้ายนำไปเคลือบกาวเงินที่ด้านล่างสุดของอุปกรณ์

4.3 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็น

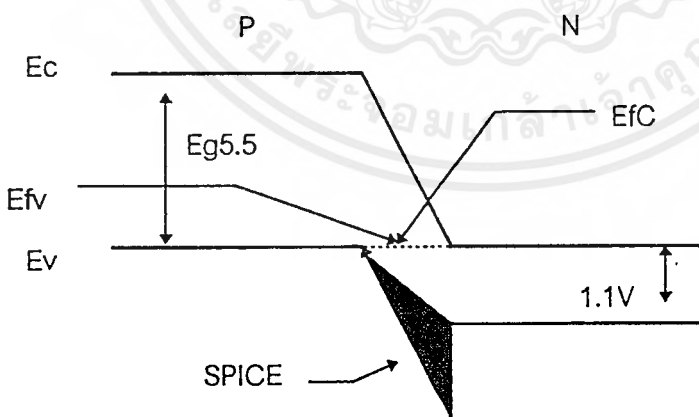
แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชรกับซิลิกอนแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็นที่แยกกันอยู่

จากรูป χ_c และ χ_{si} เรียกว่า อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) เป็นช่วงความแตกต่างของระดับพลังงานระหว่างสูญญากาศและระดับแถบความนำ (E_c) ของสารกึ่งตัวนำเพชรและซิลิกอน ตามลำดับ ซึ่งของเพชรมีค่า 1.27 eV และของซิลิกอนมีค่า 1.39 eV

เมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองมาเชื่อมต่อกัน จะทำให้เกิดการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดพี ไปสู่สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็น จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มิของสารทั้งสองมีค่าเท่ากัน หรืออยู่ในสภาวะสมดุลของการถ่ายเทประจุ จะได้แถบพลังงานที่ภาวะสมดุล ดัง รูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดพี และซิลิกอนชนิดเอ็นเมื่อนำมาสัมผัสกันที่ภาวะสมดุลย์

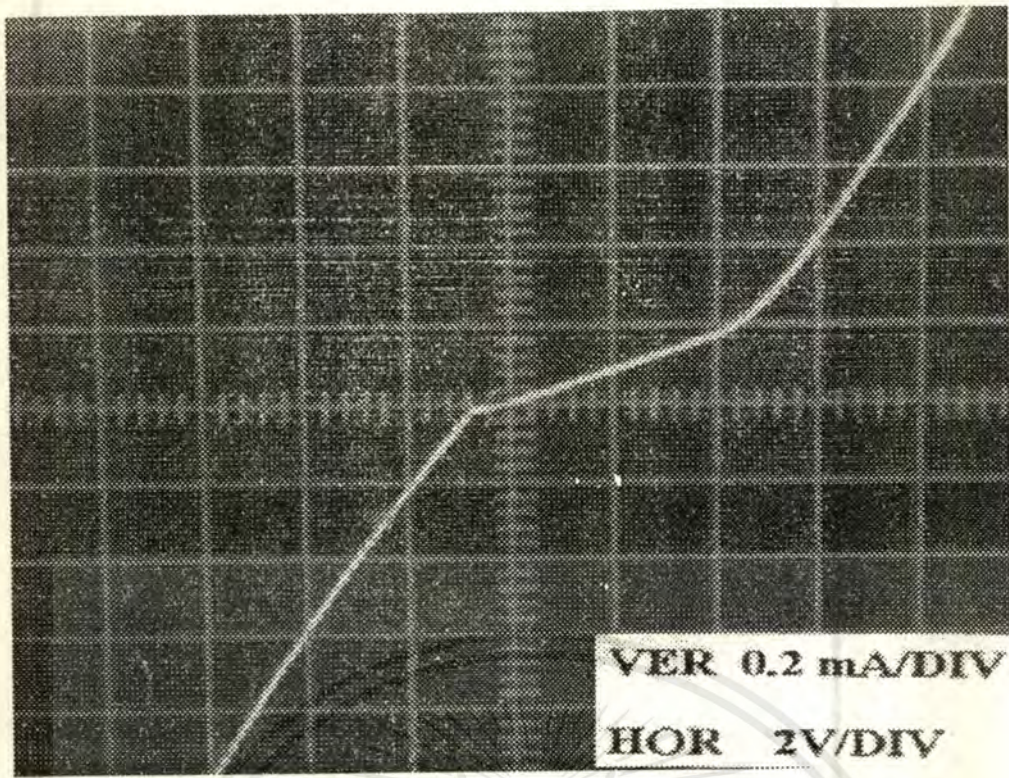
เนื่องจากความกว้างของช่องว่างพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดที่ (5.5 eV) และซิลิกอนชนิด เอ็น (1.1eV) มีค่าต่างกันมากในภาวะสมดุลจึงเกิดส่วนที่ยื่นเกินออกมา (spike) เนื่องจากที่ภาวะ สมดุลย์ จะมีการถ่ายเทประจุระหว่างรอยต่อ เพื่อให้ระดับเฟอร์มิอยู่ที่ระดับเดียวกัน จึงเปรียบ เหมือนมีการยกระดับพลังงานทางฝั่งเอ็น ที่เป็นซิลิกอนให้สูงขึ้นมา และช่องว่างระหว่างรอยต่อ ความกว้างของ Gap ต้องมีขนาดเท่ากันตลอด

4.4 การทดลอง

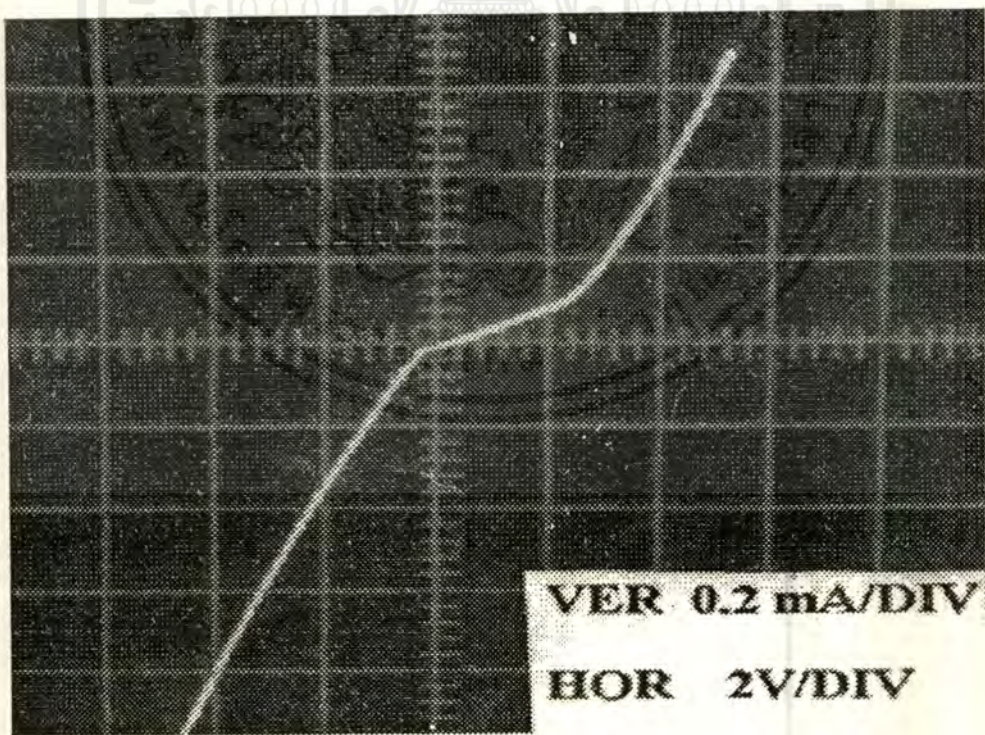
การศึกษาคุนสมบัติของแบคเวอริตไดโอดที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีขั้นตอนการทดลอง และ อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่นเดียวกับการทดลองในเรื่องของขอตักไดโอด

ผลการทดลอง



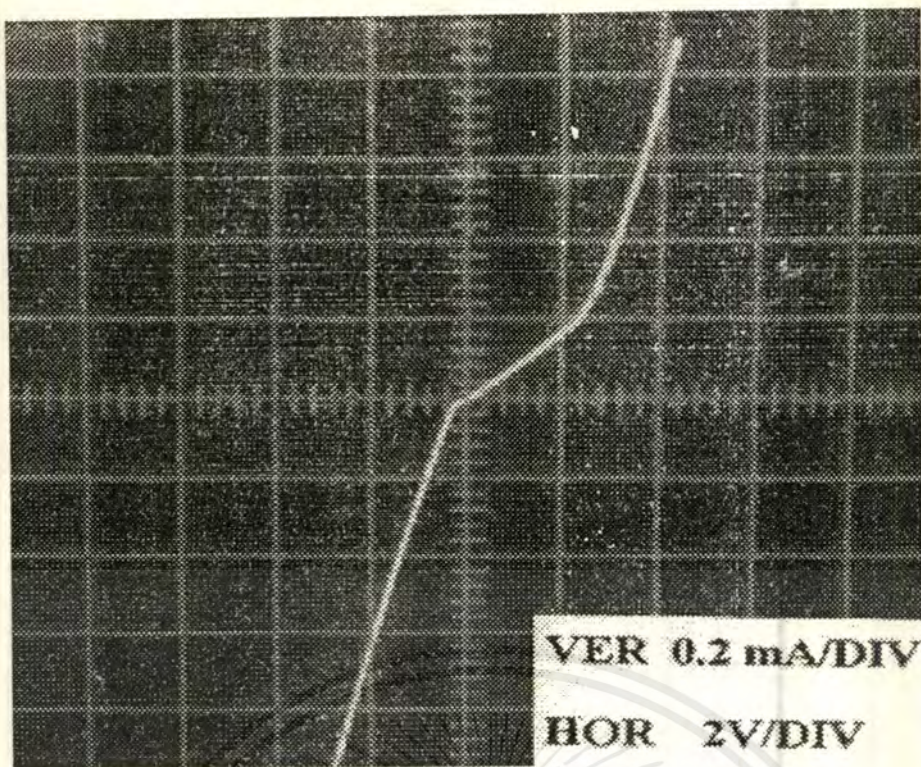


รูปที่ 4.10 คุณลักษณะของกระแสและแรงดันที่ 25 °C



รูปที่ 4.11 คุณลักษณะของกระแสและแรงดันที่ 50 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 คุณลักษณะของกระแสและแรงดันที่ 70 °C



วิเคราะห์ผลการทดลอง

พิจารณาสมการที่ (4.1)

$$P_p = N_v \times e^{-\Delta E / kT} \quad (4.1)$$

โดย P_p = จำนวนอะตอมสารเจือผู้รับ (โบรอน)

N_v = จำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์

ΔE = ความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิของเพชรชนิดที่ (E_{fp}) กับ

พลังงานวาเลนซ์ (E_v)

K = ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์

T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

จากสมการสามารถหาค่า ΔE ได้เท่ากับ 0.33 eV และนำไปหาค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำเพชร ได้จากสมการ (4.2)

$$\phi_c = \chi_c + 5.5 - \Delta E \quad (4.2)$$

ซึ่งจะได้ค่า ϕ_c ของเพชรเท่ากับ 6.44 eV ต่อมา หาค่าฟังก์ชันงานของซิลิกอนชนิดเอ็นซึ่งหาได้ด้วยวิธีเดียวกับ สารกึ่งตัวนำเพชรชนิดพี โดย ϕ_s มีค่าเท่ากับ 2.22 eV ซึ่งฟังก์ชันงานทั้งสองจะแตกต่างกันอยู่ 4.22 eV เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้กับค่าที่อ่านได้จากรูปที่ 4.1 พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันเราจึงได้แบบเวรีตโตโอดที่มีค่าแรงดันภายในเป็น 4.22 eV ที่สามารถนำไปใช้งานต่อไป

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

5.1 งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาวิจัยและพัฒนาสารกึ่งตัวนำ โดยมุ่งศึกษาเจ็ดเพชร โดยชั้นแรกได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรขึ้น ด้วยวิธีการ CVD ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ปลอดภัย และราคาถูก การที่เลือกศึกษาสารกึ่งตัวนำเพชรนี้ เนื่องจากคุณสมบัติทางธรรมชาติของเพชร มีข้อดีหลายประการ เมื่อเทียบกับซิลิกอน จึงน่าที่จะนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor devices) ที่มีคุณภาพสูงได้ คุณสมบัติที่ดีของเพชรเช่น

1. มี energy bandgap กว้างมาก คือประมาณ 5.5 eV โดยมากกว่าซิลิกอนที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งมี energy bandgap กว้างเพียง 1.1 eV เนื่องจาก energy bandgap ที่กว้างมากนี้มีผลทำให้ ค่าแรงดันพังทะลาย (Breakdown voltage) มีค่าสูงและสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี
2. ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน และโฮล (mobility) ใกล้เคียงกันและมีค่าสูง ทำให้สามารถนำมาทำ device ที่มีคุณภาพสูงได้ดี

ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นนั้น ใช้วิธีการ CVD แบบความร้อนที่ความดันบรรยากาศ โดยแหล่งจ่ายเป็นไอระเหยของ เอทิลแอลกอฮอล์กับก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเงื่อนไขที่เหมาะสมมีดังนี้

1. อุณหภูมิของไส้หลอดมีค่าประมาณ 1000 องศาเซลเซียส
 2. อัตราการไหลของก๊าซ ต้องมีปริมาณไม่มากหรือน้อยจนเกินไป
- สำหรับในโครงการนี้ เราใช้ชุดการทดลองดังรูปที่ 1.7 ซึ่งมีเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างดังนี้
- อุณหภูมิไส้หลอดและฐานรองมีค่า 2,060 และ 950 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
 - อัตราการไหลของแหล่งจ่ายเป็น 10 มิลลิลิตร / นาที
 - อัตราส่วนของเอทิลแอลกอฮอล์ ต่อก๊าซไฮโดรเจน เป็น 14% โดยปริมาตร
 - ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรอง เป็น 1.4 มิลลิเมตร กระทำที่ความดันบรรยากาศ

ต่อมาจึงนำฟิล์มเพชรที่ได้ไปตรวจสอบคุณสมบัติ ว่าเป็นเพชรจริงหรือไม่ ผลจากการตรวจสอบชิ้นงานที่สร้างได้ พบว่ามีการก่อตัวของฟิล์มเพชรในระนาบต่างๆ เช่น ระนาบ (111), (100) โดยแต่ละระนาบที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างของผลึกที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นจึงนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ โดยวิธีการซีเบกใช้ในการตรวจสอบชนิดของพาหะส่วนมากที่นำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่ามีโพลเป็นพาหะหลักโดยดูได้จากทิศของเข็มกลวงอไมเตอร์ ที่เคลื่อนไปทางซ้ายดังรูปที่ 1.15
วิธีการ โฟร์พอยท์โพรบ ใช้ในการหาค่าความหนาแน่นของพาหะส่วนใหญ่ เป็นต้น
จากนั้นจึงนำฟิล์มเพชรที่สร้างได้ไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

5.2 ในการนำฟิล์มเพชรที่สร้างได้ไปประยุกต์ในการใช้งานจริงนั้น จะต้องทำการสร้างขั้วสัมผัสขึ้น
โดยขั้วสัมผัสนั้นจะมีคุณสมบัติของรอยต่อแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ohmic contact เป็รอยต่อที่กระแสผ่านได้ เสมือนเป็นตัวต้านทานตัวหนึ่ง
2. rectify contact เป็นรอยต่อที่ให้คุณสมบัติในการเรกติไฟร์

จากการทดลองพบว่า รอยต่อระหว่างอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร เป็นรอยต่อแบบเรกติไฟร์
และรอยต่อระหว่างทองคำและอินเดียมกับฟิล์มเพชร มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก จาก
คุณสมบัติของรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรนี้ จึงนำมาพัฒนาเป็นขอตติ์ไดโอด โดย
ทำการสร้างขอตติ์ไดโอดจากฟิล์มเพชรชนิดพี และทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆกัน พบว่าที่
อุณหภูมิสูงอุปกรณ์จะมีค่า แรงดันพังทะลายลดลง แต่ยังสามารถทำงานได้ (จากการทดลอง
สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 400 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจสูงกว่านี้ได้) เมื่อเปรียบเทียบกับ
ขอตติ์ไดโอดจากซิลิกอนทั่วไป พบว่าไม่สามารถทำงานที่สูงได้

ต่อมาได้ทำการพัฒนาโดยการสร้าง Backward diode ขึ้นจากฟิล์มเพชรชนิดพีและซิลิกอน
ชนิดเอ็น และทำการทดสอบการทำงานที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าแรงดันพัง
ทะลายมีค่าลดลง แต่ยังคงสามารถทำงานได้

จึงสรุปได้ว่าอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างจากฟิล์มเพชรสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี
แต่มีข้อเสียเพียงเล็กน้อย คือ ค่าแรงดันภายในมีค่าสูง เนื่องจาก energy bandgap ของเพชรมีค่า
มาก ทำให้การใช้งานทางด้าน forward ต้องใช้แรงดันไบอัสสูงกว่าไดโอดทั่วไป แต่จากการ
ทดลองทั้งหมดนี้ พอจะสรุปได้ว่าสารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นจากเพชร สามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ
สูง และมีศักยภาพเพียงพอที่จะพัฒนาเป็นอุปกรณ์อื่นๆที่มีความซับซ้อน และอาจผลิตขึ้นเป็น
อุตสาหกรรมได้ในอนาคต

5.3 ปัญหาในการทดลอง

พบว่าในการสังเคราะห์ฟิล์มชะนั้น ปัญหาหลักที่ทำให้การทดลองล่าช้า หรือไม่สามาร
งสังเคราะห์เพชรได้ในบางครั้ง มีดังนี้

1. อัตราการไหลของก๊าซพบว่า ถ้าความเข้มข้นของก๊าซมากเกินไปจะทำให้เกิดคาร์บอนมากจนไม่เกิดฟิล์มเพชรเลย (อัตราการไหลที่เหมาะสมเป็น 10 มิลลิเมตรต่อนาที) และอัตราส่วนของ เอทิลแอลกอฮอล์ต่อก๊าซไฮโดรเจนเป็น 14 ต่อ 100
2. การเตรียมฐานรองของซิลิกอนในการสร้างฟิล์มเพชรนั้นตัวฐานรองต้องใช้ในการชุบสารละลายผงเพชรในเอทิลแอลกอฮอล์ เนื่องจากจะทำให้อัตราการเกิดฟิล์มเพชรสูงสุด
3. อุณหภูมิของไส้หลอดควรมากกว่า 2,000 องศาเซลเซียส (ใช้ที่ 2,060 องศาเซลเซียส) และควรมีระยะห่างระหว่างฐานรองกับไส้หลอด 1.4 มิลลิเมตร รวมถึงอายุการใช้งานของไส้หลอดทั้งสแตนด์ เกิดการเสียรูปและขาดง่าย ทำให้เกิดฟิล์มเพชรไม่สม่ำเสมอ
4. เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่ยังใหม่จึงหาเอกสารอ้างอิงได้ยาก
5. ระบบที่ใช้ (CVD แบบความร้อน) เป็นระบบที่ปลอดภัยสูงและง่ายต่อการสร้าง ส่วนข้อเสียคือ ได้อัตราการเกิดฟิล์มช้าและควบคุมความหนาของฟิล์มได้ไม่แน่นอน ทำให้เมื่อนำมาสร้างเป็น devices คุณภาพจึงไม่ดีนัก

กิตติกรรมประกาศ

การที่กลุ่มผู้วิจัยสามารถทำการทดลองวิจัย และเรียบเรียงปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์นั้น กลุ่มวิจัยขอขอบคุณผศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษาแนะแนวทางตลอดจนที่แนะข้อผิดพลาดต่างๆ จนสามารถทำการทดลองได้ตามเป้าหมาย ขอขอบคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช ผู้ให้คำปรึกษาในเรื่องทฤษฎี backward diode และแถบพลังงาน ขอขอบคุณ อ.สมศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้คำแนะนำด้านการทดลองต่างๆ ขอขอบคุณ สัญญา คุณขาว และ บัญชา กิติรังษี ที่แนะนำการทำรายงานและการทดลองต่างๆ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน

กันทิมา กฤตยาภาณิษฐ์
ทิพวัลย์ จิตรสุภาพ
วุฒิชัย ธรรมสาโรช

เอกสารอ้างอิง

- 1) เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล ,สมศักดิ์ เขียวศิริกุล,ผศ.รศ.ดร.สมเกียรติ์ ศุภเดช
“ การลึงเคราะห์ฟิล์มบางของเพชรด้วย CVD แบบความร้อนที่พระจอมเกล้าฯ”
ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 16 พ.ศ. 2536
- 2) นริศ จันทรแดง Synthesis of diamond semiconductor
- 3) C. Kittel, “ Introduction To Solid State Physics,” John Wiley & Sons, New York, Sixth Edition ,chap 1
- 4) E.H Rhoderick. “Metal-semiconductor contacts,” Clarendon Press ,Oxford, 1978
- 5) K. Okano, H. Naruki,Y.Akiba,T. Kurosu, M. Jida and Y. Hirose, “ Synthesis of diamond thin films having semiconductive Properties, “ Japanese Journal of Appild Physics, Vol.27, No.2, February, 1988,p.L 173-175
- 6) ไพรัช รัชชพงษ์ และสมเกียรติ์ ศุภเดช. “ อิเล็คทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ” , (กรุงเทพ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2521)
- 7) WEI ZHU, BRAIN R. STONE, BRAAD E. WILLIAMS, AND JEFFREY T. GLASS, “ Growth and Characterization of diammond films on Nondiamond Substraaaaates for Electronic Applications” Proceeding of The IEEE ,Vol .79 NO.5 MAY 1991 P.621-646
- 8)GENNADY SH. GILDENBLAT, SENIOR MEMBER, IEEE, STEPHEN A. GROT, AND ANDRZEJ BADZIAN “The Electrical Properties and Device Applications of Homoepitaxial and Poly crystalline Diaamond Films” Proceeding of the IEEE, VAL79 NO.5 MAY 1991 P.647