

กระบวนการสร้างเมสเฟท  
MESFET FABRICATION PROCESS



โดย  
นายดุสิต มูลโคตร  
นายอนิวัฒน์ นีรงค์บุตร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2543

รฟ.  
ดษนค  
85/3

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 42641  
วัน, เดือน, ปี..... - 5 ส.ย. 2545

b.....  
i.....

กระบวนการสร้างเมสเฟท  
MESFET FABRICATION PROCESS

โดย

นายดุสิต มุลโคตร 41013170

นายอนิวัฒน์ นีรงค์บุตร 41013201

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2543

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง กระบวนการสร้างเมสเฟท

ผู้จัดทำ

1. นายดุสิต มุลโคตร 41013170
2. นายอนิวัฒน์ นิงค์บุตร 41013201



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กระบวนการสร้างเมสเฟท

นายดุสิต มูลโคตร  
นายอนิวัฒน์ นิรงค์บุตร  
รศ.ดร.วิสุทธิ รุติรุ่งเรือง  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2543

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีเกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากจะใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำจำพวกซิลิกอน (Si) และแกเลียมอาเซไนท์ (GaAs) ในการสร้าง ซึ่งสารกึ่งตัวนำทั้งสองนี้จะมีข้อจำกัดในการใช้งานคือ เมื่อทำงานที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลเกิดขึ้นมากเนื่องจากค่าแถบพลังงานต้องห้ามมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงมีการศึกษาฟิล์มเพชรขึ้น และจากการศึกษาทำให้เราทราบว่าฟิล์มเพชรนั้นมีคุณสมบัติที่ดีกว่าซิลิกอน (Si) และ แกเลียมอาร์เซไนต์ (GaAs) เช่น มีแถบพลังงานที่กว้างกว่าคือ  $5.5\text{eV}$  ความคล่องตัวของประจุพาหะ แรงดันพังทลายและค่าความนำความร้อนจะมีค่าสูงกว่าด้วย ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเหมาะที่จะนำไปใช้ทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ดี

ในโปรเจคนี้เป็นการนำเสนอการสร้าง MESFET จารสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชร โดยเราจะทำการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้าง หลักการทำงานของ MESFET ตลอดจนจะทำการทดลองคุณเกี่ยวกับสมบัติของรอยต่อแบบต่างๆได้แก่ รอยต่อแบบโอห์มมิกและรอยต่อแบบชอตตีที่สร้างบนฟิล์มเพชร

## MESFET FABRICATION PROCESS

Mr.Dusit Moolkote

Mr.Aniwat Nirongbood

Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongruang

2000

### ABSTRACT

Now, technology of semiconductor device use mostly silicon and Germanium . The operation of these devices shows high leakage current in high temperature system cause of low energy bandgap such as 1.12 eV for silicon and 1.43 eV for GaAs . So semiconducting diamond is studied cause of better physical properties such as wider bandgap (5.5eV) ,high charge –carrier mobility, high breakdown voltage and high thermal conductivity

In this project we will be presents MESFET made from diamond film. In this section educated about structure , process working of it and are experimented propertied of contact to build on diamond film such as ohmmic contact and shottky contact .

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานเล่มนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษากระบวนการประดิษฐ์สาคึ่งตัวนำ ประเภท สนามไฟฟ้า เมสเฟท(MESFET) เนื้อหาภายในได้รวบรวมพื้นฐานการทำงานตลอดจนทฤษฎีและคุณสมบัติรอยต่อ โดยเน้นทางด้านกระบวนการสร้างและการทดลองเพื่อนำไปใช้ประกอบในกระบวนการสร้างเมสเฟทและยังอาจเป็นประโยชน์ในการศึกษาสำหรับผู้ที่มีความสนใจ รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชา การประยุกต์ใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์ 2 (Electronic Circuit Application II)

ในการจัดทำรายงานฉบับนี้ผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ที่ให้โอกาสและข้อเสนอแนะในการจัดทำตลอดจนรุ่นพี่ปริญญาโททุกท่านที่ให้คำแนะนำอำนวยความสะดวกและคอยให้กำลังใจเสมอมา จึงทำให้รายงานฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วย ทางผู้จัดทำหวังว่าข้อมูลที่ทำการค้นคว้าศึกษาจะเป็นประโยชน์บ้างสำหรับผู้ที่มีความสนใจที่จะศึกษาในเรื่องนี้ต่อไป

นายดุสิต มูลโคตร

นายอนิวัฒน์ นิรงค์บุตร

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
บทที่ 2 ทฤษฎีของเพชร วิธีการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรและการตรวจสอบ	4
2.1 ลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเพชร	4
2.1.1 ลักษณะโครงสร้างของเพชร	4
2.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร	5
2.2 หลักของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน	5
2.2.1 ในระบบต้องมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ	6
2.2.2 ในระบบต้องกระตุ้นก๊าซอนุภาคของคาร์บอน	6
2.2.3 ในระบบอุณหภูมิของฐานรองต้องเหมาะสม	6
2.2.4 ในระบบต้องมีการเตรียมพื้นที่ผิวของฐานรอง	6
2.3 กลไกของการเกิดฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD	8
2.3.1 กระบวนการกระตุ้นก๊าซเฟส	8
2.4 การวิเคราะห์และการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร	9
2.4.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM	10
2.4.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy	12
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการทำงานของ MESFET	16
3.1 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ	16
3.1.1 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีกรณี $\phi_m < \phi_s$	16
3.1.1.1 รอยต่อขอตติ์ขณะได้รับแรงดันไบอัส	19
3.1.2 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีกรณี $\phi_m > \phi_s$	20
3.2 โครงสร้างและพื้นฐานการทำงานของ MSESFET	23
3.3 คุณสมบัติของ MESFET	26
3.3.1 การทำงานลักษณะเชิงเส้นของ MESFET	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การทำงานในช่วงถึงพินช์ออฟของ MESFET	29
บทที่ 4 กระบวนการสร้างและการทดลอง	37
4.1 กระบวนการเตรียมแผ่นฐานรอง	37
4.1.1 การทำความสะอาดเบื้องต้นผิวหน้าฐานรองซิลิกอน	37
4.1.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร	37
4.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร	39
4.3 กระบวนการสร้าง MESFET	41
4.3.1 การสร้างซอสและเดรน	41
4.3.1 การสร้างเกต	43
4.3.3 กระบวนการ Sintering	43
4.4 กระบวนการสร้าง MESFET เพื่อศึกษาผลของเงื่อนไขต่างๆ	44
4.4.1 ศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อ	44
4.4.2 ศึกษาผลการทำงานของ MESFET	44
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	46
5.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร	46
5.2 ผลการตรวจสอบรอยสัมผัสแบบขอตตีกี้	47
5.2.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสเดรน-เกต	47
5.2.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสซอส-เกต	48
5.3 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติรอยสัมผัสแบบโหนดมีระหว่างซอสกับเดรน	49
5.4 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET	50
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผล	57
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก	61

## สารบัญภาพ

รูปที่ 1.1	แสดงไดอะแกรมของเครื่องมือ HFCVD	2
รูปที่ 2.1	ลักษณะโครงสร้างของผลึกเพชร	4
รูปที่ 2.2	แผนภาพกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์เพชร ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน [1]	8
รูปที่ 2.3	แสดงลักษณะรูปร่างของฟิล์มเพชรแบบต่างๆจากการถ่าย SEM [6]	11
รูปที่ 2.4	แสดงตัวอย่างการวัดความหนาของฟิล์มเพชรที่ได้จากภาพถ่าย SEM [6]	12
รูปที่ 2.5	ลักษณะสเปกตรัมของเพชรธรรมชาติ และเพชรที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน [8]	14
รูปที่ 3.1	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและฟิล์มเพชรชนิดพีใน ขณะ (a) ก่อนสัมผัส (b) ภายหลังจากสัมผัส (c) ความหนาแน่นประจุ บริเวณปลอดพาหะและ (d) สนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อ ในกรณี $\phi_m < \phi_s$ [9,10,12]	18
รูปที่ 3.2	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและฟิล์มเพชรชนิดพีใน ขณะได้รับแรงดันไบอัส ในกรณี $\phi_m < \phi_s$ (a) ขณะได้รับไบอัสตรง (b) ขณะได้รับไบอัสกลับ	20
รูปที่ 3.3	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีใน กรณี $\phi_m > \phi_s$ (a) ก่อนสัมผัส (b) ภายหลังจากสัมผัส และ (c) ความ หนาแน่นประจุบริเวณปลอดพาหะ [9,12]	21
รูปที่ 3.4	โครงสร้างของ MESFET	23
รูปที่ 3.5	แสดงโครงสร้างของ MESFET ขณะที่ยังไม่มีการให้ไบอัส	24
รูปที่ 3.6 (a)	แสดงการให้ไบอัสแก่ MESFET แบบกราวด์ เกท	25
รูปที่ 3.6 (b)	แสดงความสัมพันธ์แรงดัน $V_{DS}$ และกระแส $I_D$ ของ MESFET	25
รูปที่ 3.6 (c)	แสดงการให้ไบอัสที่เกทของ MESFET	25
รูปที่ 3.7(a)	แสดงคุณสมบัติของ MESFET ขณะแรงดัน $V_{DS}$ ต่ำๆ	26
รูปที่ 3.7(b)	แสดงคุณสมบัติเชิงเส้นของกระแส $I_D$ ของ MESFET ขณะแรงดัน $V_{DS}$ ต่ำๆ	27
รูปที่ 3.8	แสดงโครงสร้างภายในของ MESFET เมื่อแรงดันเดรนมีค่าสูงขึ้น	29
รูปที่ 3.9	แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน $I_D$ - $V_{DS}$ ของ MESFET	34
รูปที่ 3.10	แสดง Transfer characteristics ของ MESFET	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1	ครีมเพชรที่ใช้ในการขัดผิวหน้าซิลิกอนขนาดเมล็ดฝัก 0.25 ไมครอน	38
รูปที่ 4.2	ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าฐานรองซิลิกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์หลังจาก ขัดด้วยครีมเพชรขนาดเมล็ด 0.25 ไมครอน	38
รูปที่ 4.3	ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD	39
รูปที่ 4.4	แสดงเครื่องมือการทำ CVD	40
รูปที่ 4.5	แสดงลำดับการเคลือบทองและอลูมิเนียม	42
รูปที่ 4.6	แสดงรูป MESFET	45
รูปที่ 4.7	แสดงรูป MESFET อีกแบบ	45
รูปที่ 5.1	ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรจากการสังเคราะห์ ด้วยวิธี HFCVD	46
รูปที่ 5.2	ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี HFCVD	47
รูปที่ 5.3	คุณลักษณะกระแส $I_{DG}$ - แรงดัน $V_{DG}$ ของรอยสัมผัสเดรน-เกต	48
รูปที่ 5.4	คุณลักษณะกระแส $I_{SG}$ - แรงดัน $V_{SG}$ ของรอยสัมผัส ซอส-เกต	49
รูปที่ 5.5	คุณลักษณะกระแส $I_{DS}$ - แรงดัน $V_{DS}$ ของรอยสัมผัส ซอส-เดรน	49
รูปที่ 5.6	ความสัมพันธ์ของกระแสเดรน $I_D$ กับแรงดันเดรน $V_{DS}$ เมื่อให้ไบอัสกลับที่เกต	50
รูปที่ 5.7	ความสัมพันธ์ของกระแสเดรน $I_D$ กับแรงดันเดรน $V_{DS}$ เมื่อให้ไบอัสตรงที่เกต	51
รูปที่ 5.8	แสดงโครงสร้างภายในของชิ้นงานที่ได้จากการสร้าง	52
รูปที่ 5.9	แสดงวงจรสมมูลของโครงสร้างชิ้นงาน	53
รูปที่ 5.10	แสดงวงจรสมมูลที่แรงดัน $V_{gs}$ เท่ากับ 0 V	54
รูปที่ 5.11	แสดงวงจรสมมูลขณะแรงดัน $V_{ds}$ เป็น 0 ที่แรงดัน $V_{gs}$ ค่าต่างๆ	54
รูปที่ 5.12 (a)	แสดงการหาค่าความต้านทานภายในของไดโอดขณะไบอัสตรง และไบอัสกลับ (b) แสดงคุณลักษณะการนำกระแสของชิ้นงานที่ แรงดันค่าต่างๆ	55

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

การสังเคราะห์เพชรนั้น เริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ได้มีการค้นพบว่าเพชรเกิดจากการเปลี่ยนรูปของผลึกคาร์บอน โดยการค้นพบในเรื่องนี้มีขึ้นในปี ค.ศ. 1797 Smitson Tennant ได้ทดลองเผาเพชรในบรรยากาศของออกซิเจน ( $O_2$ ) ทำให้เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เมื่อเผาไปเรื่อยๆ ส่วนที่เหลืออยู่ก็คือคาร์บอน(ถ่าน) ต่อจากนั้นก็ได้มีการคิดค้นหาวิธีการต่างๆในการสังเคราะห์เพชร จนปี ค.ศ.1955 General Electric Reserch Labotories Buddy ก็ได้ทำการสังเคราะห์เพชรเป็นผลสำเร็จ โดยใช้วิธีการให้ความร้อนและแรงอัดแก่กราไฟท์เพื่อให้เปลี่ยนรูปเป็นเพชร นอกจากนี้วิธีนี้แล้ว ก็ยังมีการค้นพบอีกว่าการสังเคราะห์เพชรนั้นสามารถทำที่ความดันต่ำและอุณหภูมิที่ต่ำได้ด้วย

การสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ เริ่มมีการทำอย่างจริงจังประมาณปี ค.ศ. 1970 หลังจากนั้น ก็มีการสร้างด้วยเทคนิคต่างๆมากมายส่วนการสร้างที่ความดันต่ำนั้นมีตัวอย่างของเทคนิคเช่น เทคนิค

Low pressure Chemical Vapour Deposition(LPCVD),Radio frequency Chemical Vapour Deposition (RFCVD),Microwave plasma enhanced Chemical Vapour Deposition (MPECVD) ,Hot filament Chemical Vapour Deposition (HFCVD) เทคนิคทั้งหมดจะอยู่บนพื้นฐานที่ทำให้ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) แตกตัวบริเวณพื้นผิวที่สร้างเพื่อกำจัด กราไฟต์

วิธีการของ CVD(Chemical Vapour Deposition) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆดังนี้

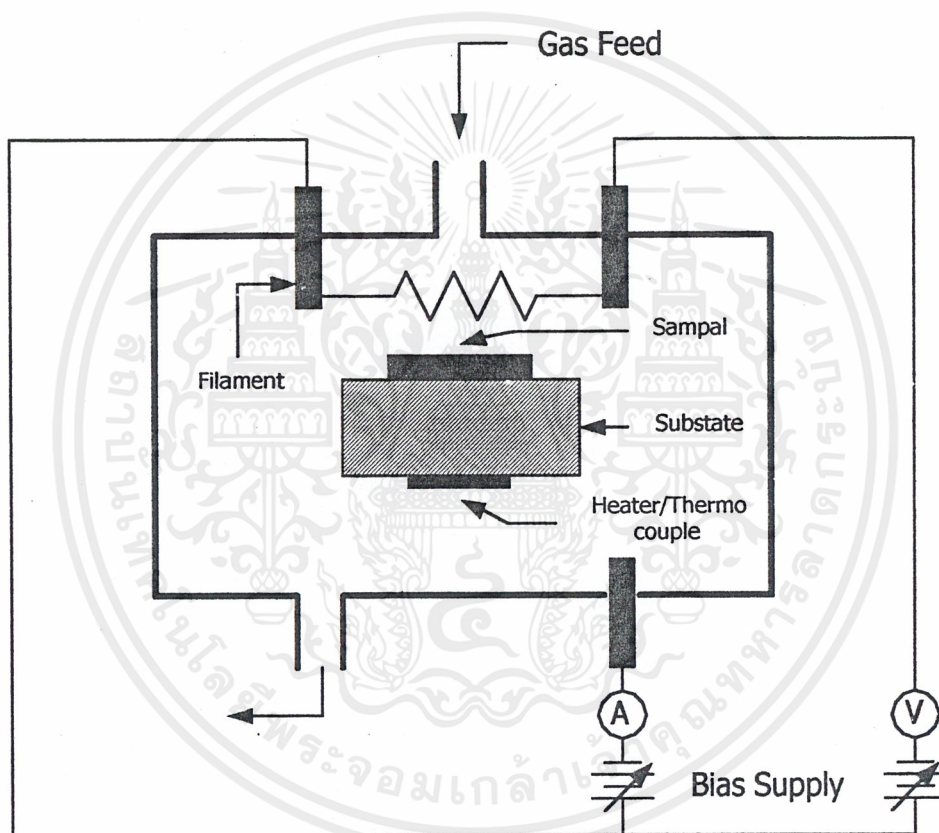
- 1.Thermal activate Chemical Vapour Deposition
- 2.High frequency plasma enhanced Chemical Vapour Deposition
- 3.Direct current discharge assisted Chemical Vapour Deposition

สำหรับการสร้างฟิล์มเพชรในโครงการนี้อาศัยวิธีการของ Thermal activate Chemical Vapour Deposition (CVD แบบความร้อน) โดยใช้เทคนิค Hot filament Chemical Vapour Deposition (HFCVD) จากรูปที่ 1.1 เราสามารถใช้ทั้งสแตน แพนทาร์ม โมลิบดีนัม เรเนียม เป็นได้ตลอดได้ การทดลองนี้เราใช้ทั้งสแตน ไล่หลอดจะถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 2000 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และไฮโดรคาร์บอนที่ผสมกันเกิดการแตกตัวแยกออกจากกัน จะเห็นว่ามีส่วนของฐานรองวางอยู่ใต้หลอด ระยะห่างระหว่างฐานรองกับหลอดจะห่างกันประมาณ 1 เซนติเมตร ผลจากการกระตุ้นเพื่อทำให้เกิดความร้อนนั้นจะส่งผลให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอนเกิดการแพร่และปฏิกิริยาเคมีการแตกตัวของก๊าซบริเวณไล่หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเทคนิค Hot filament Chemical Vapour Deposition (HFCVD) นี้มีทั้งข้อดีและข้อเสียดังนี้  
คือ

- ข้อดี
1. ทำง่าย
  2. ราคาถูก
  3. สร้างครอบคลุมฐานรองขนาดใหญ่ได้
- ข้อเสีย
1. ได้ผลดเปราะง่าย
  2. ที่อุณหภูมิสูงมีการก่อตัวของคาร์บอน



รูปที่ 1.1 แสดงไดอะแกรมของเครื่องมือ HFCVD

จากการศึกษาคุณสมบัติของเพชร (diamond) ทางฟิสิกส์ทำให้เราพบว่าเพชรมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายอย่างด้วยกัน อาทิเช่น มีความคล่องตัวของอิเล็กตรอนสูง ( $2000 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) มีความคล่องตัวของโฮลสูง ( $1800 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) มีช่องว่างของแถบพลังงาน (band gap) ที่กว้าง ( $5.45 \text{ eV}$ ) มีค่าสภาพนำความร้อนสูง ( $20 \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) และยังมี High saturated carrier velocity ( $2 \times 10^7 \text{ cm s}^{-1}$ ) จะเห็นว่าคุณสมบัติของเพชรมีค่าแตกต่างไปจากคุณสมบัติของซิลิกอน (Silicon) และแกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลียมอาเซไนด์ (Galium arsenide) คือเพชรจะมีช่องว่างแถบพลังงาน (bandgap) กว้าง สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูง มีความแข็งแรงทนต่อการสึกหรอ สภาพนำความร้อนสูง มีความไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีต่ำ ทั้งหมดล้วนแล้วแต่เป็นข้อได้เปรียบของเพชร ดังนั้นจึงเหมาะอย่างยิ่งที่จะนำเพชรไปประยุกต์ใช้ในการใช้งานทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

การทำงานของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์จะถูกจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิ ตัวอย่างเช่นซิลิกอนจะถูกจำกัดให้ใช้งานที่อุณหภูมิ 200° C เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้บอนด์แตกตัวจนทำให้กลายเป็นสารกึ่งตัวนำอินทรินสิค (Intrinsic Semiconductor) สำหรับแกเลียมอาร์เซไนด์สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าซิลิกอน แต่ก็จะถูกจำกัดที่อุณหภูมิประมาณ 400° C เนื่องจากผลของการสลายตัว (Decomposition Effect) สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากเพชรจะมีข้อได้เปรียบตรงจุดนี้เพราะสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า เนื่องจากคุณสมบัติของเพชรที่มีช่องว่างของแถบพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนในโควาเลนบอนด์แตกได้ยาก หรือต้องใช้อุณหภูมิสูงจึงจะทำให้บอนด์แตกนั่นเอง



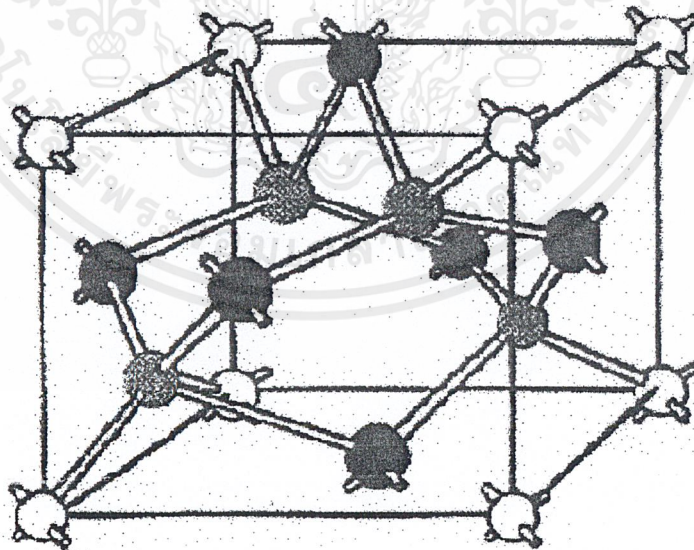
## บทที่ 2

### ทฤษฎีของเพชร วิธีสังเคราะห์ฟิล์มเพชร และการตรวจสอบ

#### 2.1 ลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเพชร [1]

##### 2.1.1 ลักษณะโครงสร้างของเพชร

คาร์บอนเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ 4 สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปอื่นได้ อาทิเช่น กราไฟต์ หรือ เพชร เป็นต้น ปัจจุบันได้มีผู้สนใจค้นคว้า วิจัยเกี่ยวกับเพชร โดยเฉพาะเกี่ยวกับการสังเคราะห์เพชร ด้วยเทคนิคและวิธีการต่างๆมากมาย เพชรที่ได้จากการสังเคราะห์นั้นต้องอาศัยส่วนของอะตอมคาร์บอนที่ประกอบในระบบเป็นหลัก ในบางครั้งเราจะพบว่าเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์นั้นไม่มีคุณสมบัติเป็นเหมือนเพชรที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ทั้งนี้ก็เนื่องจากมีสารอื่นปนอยู่ด้วย ตัวอย่างเช่น กราไฟต์ อมอร์ฟัสคาร์บอน เป็นต้น ในโครงสร้างของผลึกเพชรที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ อะตอมของคาร์บอนจะจับตัวเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า "Diamond Structure" ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 จากรูปจะพบว่าภายในยูนิทเซลล์จะมีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอมเรียงตัวกันแบบ Face Center Cubic (FCC) และอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอมอยู่ในตำแหน่ง  $\frac{1}{4}$  เมื่อวัดตามแนวทะแยงมุมจากมุมของยูนิทเซลล์ อะตอมของคาร์บอนนี้จะจับตัวกันเป็นลักษณะวงแหวนหกเหลี่ยม โดยอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการเหลื่อมในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกันจากระนาบ



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของผลึกเพชร

## 2.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร

เมื่อเปรียบเทียบเพชรกับซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์จะพบว่า เพชรเป็นโครงสร้างรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งอยู่ในธาตุหมู่ 4 สามารถนำมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำได้ เพชรมีค่าความนำความร้อนสูงกว่าซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ ดังนั้นจึงสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงได้ดี เพชรมีช่องว่างแถบพลังงานต้องห้าม (5.45eV) ซึ่งสูงกว่าซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์จึงสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่า เนื่องจากสามารถที่จะควบคุมประจุพาหะได้ โดยไม่มีผลของอุณหภูมิมาเกี่ยวข้อง และเพชรยังมีความคล่องตัวของโฮลสูงและค่าไดอิเล็กทริกต่ำทำให้ทำงานที่ความถี่สูงได้ดี

จากที่ได้กล่าวมาสามารถเขียนตารางเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชร silicon และ Gallium arsenide ที่อุณหภูมิ  $T = 300\text{ K}$  ได้ดังตารางที่ 2.1 [2-3]

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่  $T=300\text{K}$

Property	Unit	Diamond	Si	GaAs
Energy gap	eV	5.45	1.1	1.43
Electron mobility	$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$	2000(5)	1500	8500
Hole mobility	$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$	1800(5)	600	400
Breakdown field	V/cm	$10 \times 10^6$	$5 \times 10^6$	$6 \times 10^6$
Resistivity	$\Omega \cdot \text{cm}$	$10^{16}$	$10^3$	$10^9$
Saturated electron velocity	cm/s	$2.7 \times 10^7$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
Dielectric Constant		5.7	11	12.5
Lattice constant	$\text{\AA}$	3.567	5.431	5.653
Thermal conductivity	W/cm.K	20	1.5	0.46

\* สำหรับกรณีสารกึ่งตัวนำเพชรชนิด Polycrystalline [4]

## 2.2 หลักการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน

ในการศึกษาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรในปริมาณที่น้อยจะอาศัยการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน (Hot-Filament CVD) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างที่ความดันต่ำหรือความดันบรรยากาศ และเป็นวิธีที่นิยมเนื่องจากค่อนข้างง่ายไม่ซับซ้อนและที่สำคัญคือ ต้นทุนในการสร้างต่ำ โดยมีหลักการพื้นฐานในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่สำคัญดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 ในระบบต้องมีไฮโดเจนเป็นองค์ประกอบ

Augus et al. [5] ได้เสนอได้เสนอถึงพฤติกรรมของอะตอมไฮโดเจน เป็นส่วนสำคัญในการกำจัดและลดปริมาณกราฟาไฟต์ ทำให้อะตอมคาร์บอนโครงสร้างเพชรยังคงมีพันธะแบบ  $sp^3$ อยู่นอกจากนั้นยังคงช่วยให้เพชรมีเสถียรภาพมากขึ้นด้วย เนื่องจากไฮโดเจนจะช่วยเข้าไปก่อพันธะกับอะตอมคาร์บอนบริเวณพื้นผิวที่พันธะขาดอยู่ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนพันธะแบบ  $sp^3$  ของเพชรไปเป็นแบบ  $sp^2$  หรือ  $sp^1$  ได้

### 2.2.2 ในระบบต้องกระตุ้นก๊าซอนุมูลคาร์บอน

ไม่ว่าจะกระตุ้นด้วยความร้อน พลาสมา หรือ combustion เพื่อให้ได้อะตอมคาร์บอนออกมา โดยอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชรขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งผ่านอะตอมคาร์บอนสู่ฐานรอง ซึ่งส่วนมากแล้วในกระบวนการ CVD แรงที่ใช้ส่งอะตอมคาร์บอนจะอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างบริเวณที่ก๊าซเฟสถูกกระตุ้นกับพื้นผิวฐานรอง หรืออาจใช้การเป่าก๊าซเฟสไปยังฐานรองรวมไปถึงการใช้สนามไฟฟ้าในการช่วยการส่งผ่าน

### 2.2.3 ในระบบอุณหภูมิฐานรองต้องมีความเหมาะสม

วิธี CVD แบบความร้อนทั้งหมดที่กล่าวมาเพชรจะก่อตัวบนพื้นผิวของฐานรองที่อุณหภูมิตั้งแต่  $500^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1200^{\circ}\text{C}$  แล้วแต่กระบวนการที่ใช้ถ้าอุณหภูมิของฐานรองมีค่าสูงหรือต่ำเกินไปจากนี้ อาจทำให้เกิดกราฟาไฟต์หรือ Diamond-like carbon (DLC) ได้

### 2.3.4 ในระบบต้องมีการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิดสูง หากมีการเตรียมพื้นผิวฐานรองเพื่อรองรับการนิวเคลิเอชัน ซึ่งกระบวนการเตรียมพื้นผิวที่ใช้มีหลายวิธีด้วยกัน โดยแต่ละวิธีจะให้อัตราการเกิดฟิล์มเพชรไม่เท่ากัน นอกจากนี้ยังรวมไปถึงฐานรองที่ใช้ บริเวณพื้นผิวต้องไม่มีตัวเร่งต่างๆที่ทำให้เกิดกราฟาไฟต์ และต้องมีข้อจำกัดในการแพร่ของอะตอมคาร์บอนลงไปใในเนื้อของฐานรองที่อุณหภูมิที่ทำการสร้าง ในกระบวนการสร้างนั้น ต้องใช้หลักการทั้งสี่ข้อนี้มารวมกันเพื่อผลออกมาจะได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพดี อัตราการเกิดฟิล์มเพชรมีค่าสูง หากขาดข้อหนึ่งข้อใดไป ผลที่ออกมาจะไม่ใช่เพชร คืออาจเป็นกราฟาไฟต์ , อมอร์ฟัสคาร์บอน หรือ Diamond-like carbon ก็ได้โดยวิธีการที่ใช้ในการควบคุมเงื่อนไขทั้งสี่ข้อดังกล่าว สามารถใช้เทคนิคหลายอย่างควบคุมตามความเหมาะสม

สำหรับในการทดลองครั้งนี้ จะใช้การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Filament-Assisted Thermal CVD ดังที่ได้กล่าวมาบ้างแล้ว ซึ่งฟิล์มเพชรที่ได้มีคุณภาพดี ราคาต้นทุนต่อการสร้างต่ำ

และยังสามารถสร้างได้ในบริเวณกว้างโดยบริเวณที่เกิดเพชรจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของไส้หลอด เนื่องจากบริเวณรอบๆ ไส้หลอดมีการกระตุ้นของก๊าซเฟสเกิดขึ้น

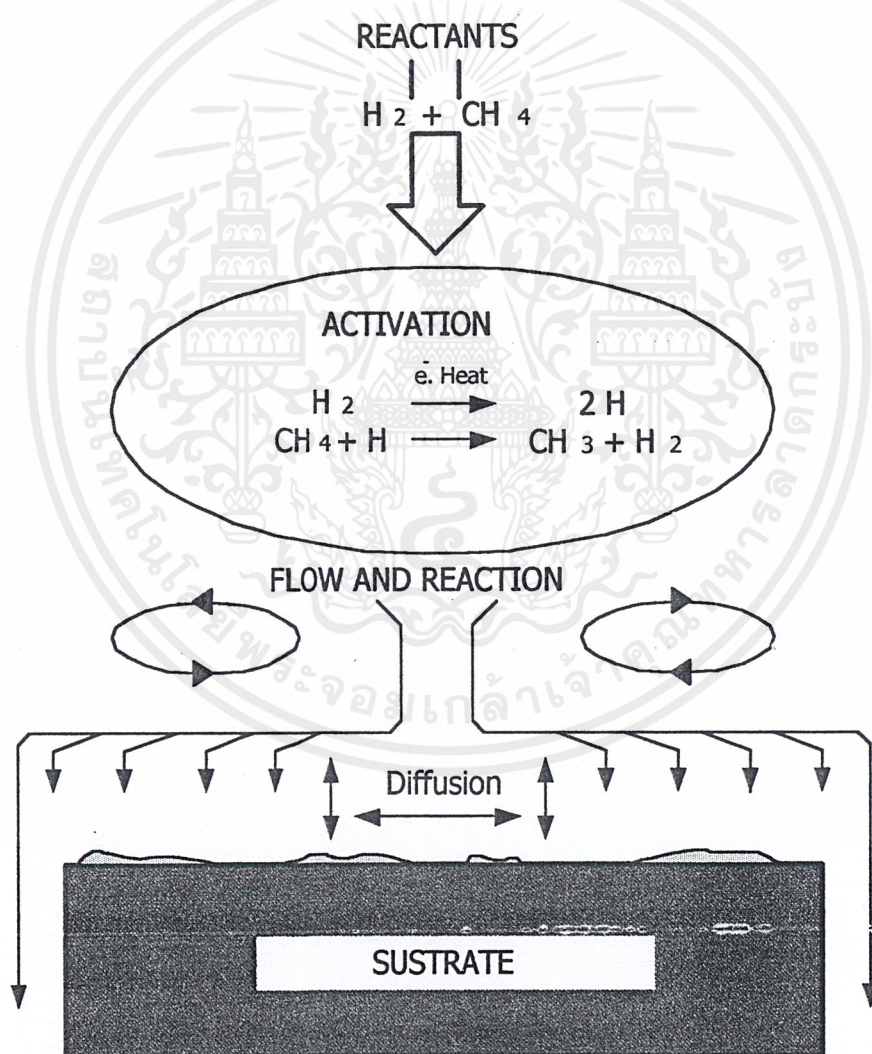
อย่างไรก็ตามข้อเสียของวิธีนี้คือมักจะเกิดการเสื่อมสภาพของไส้หลอดเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างก๊าซไฮโดรคาร์บอนกับไส้หลอด อีกทั้งขณะทำการสร้างเพชรเป็นเวลานานไส้หลอดจะมีการย่อยหรือบิดเบี้ยว เนื่องจากค่าแรงดึงดูดของโลกและความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรองมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นความร้อนของฐานรองมีค่าไม่สม่ำเสมอทั้งแผ่น ส่งผลต่อคุณภาพของฟิล์มที่ได้ Wolden et. al.[3] ได้ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของไส้หลอด , เส้นผ่าศูนย์กลาง , ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรอง พบว่าค่าต่างๆเหล่านี้มีผลทำให้คุณสมบัติของฐานรองเปลี่ยนไป และยังพบอีกว่าหากคุณสมบัติของฐานรองมีความสม่ำเสมอ ความหนาของฟิล์มเพชรที่ได้จะมีขนาดเท่ากันตลอด ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มจำนวนไส้หลอด หรือระยะห่างระหว่างฐานรองกับไส้หลอดในกรณีที่ได้หลอดมีจำนวนมากกว่าหนึ่งอันคุณสมบัติของฐานรองจะมีความสม่ำเสมอ จุดที่ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรองมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับระยะห่างของไส้หลอดแต่ละอัน อย่างไรก็ตามคุณภาพของฟิล์มเพชรจะมีค่าลดลง เมื่อระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรองเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากกระบวนการส่งผ่านของอนุโมเลกุลก๊าซในรีแอคเตอร์จะมีค่าจำกัดในการแพร่ก๊าซที่ใช้ในกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร ส่วนมากนิยมใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (เช่น  $\text{CH}_4$  ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  ,  $\text{CH}_3\text{OH}$  , หรือ  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  ) ผสมกับก๊าซไฮโดรเจนในอัตราส่วนที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น เงื่อนไขการสร้างอาจใช้อัตราส่วนของก๊าซ  $\text{CH}_4$  ต่อไฮโดรเจนน้อยกว่า 1 % อัตราการไหลของก๊าซ 100 sccm. ความดันที่ใช้ต่ำกว่า 100 ทอร์ คุณสมบัติฐานรองประมาณ  $800^\circ\text{C}$  และอุณหภูมิไส้หลอดอยู่ระหว่าง  $2,000 - 2,200^\circ\text{C}$  ฐานรองที่ใช้อาจเป็น Si หรือ Mo จากเงื่อนไขฟิล์มเพชรที่ได้มีอัตราการก่อตัวประมาณ  $1 \mu\text{m/hr}$  มีวิธีที่ช่วยในการเกิดฟิล์มเพชรวิธีหนึ่งคือการไบอัสระหว่างไส้หลอดกับฐานรอง นั่นคือเหมือนกับว่าเป็นการนำเอาวิธีแบบ Hot filament ร่วมกับกระบวนการพลาสมา โดยเพิ่มสนามไฟฟ้าและเหนี่ยวนำให้เกิดประจุขึ้นมาในระบบแบบความร้อน ภายใต้การไบอัสระบบจะประพุดิตัวคล้ายไดโอดเนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนจากไส้หลอด ( โลหะที่อุณหภูมิสูงกว่า  $2,000^\circ\text{C}$  ) มีค่ามากกว่าฟลักซ์อิเล็กตรอนจากฐานรอง ( อุณหภูมिन้อยกว่า  $1,000^\circ\text{C}$  ) นั่นคือถ้าฐานรองมีสถานะเป็นบวกเมื่อเทียบกับไส้หลอด(Forward bias) กระแสอิเล็กตรอนจากไส้หลอดจะไหลสู่ฐานรองอย่างมาก ถ้าฐานรองถูกไบอัสแบบย้อนกลับทำให้ไม่มีการไหลของอิเล็กตรอน จนกระทั่งค่าแรงดันวิกฤต ( ประมาณ  $-160\text{ V}$  ) กระแสอิเล็กตรอนจะมีจำนวนมาก ซึ่งที่ค่าแรงดันวิกฤตนี้ก่อให้เกิด DC-plasma ขึ้นในระบบ การไบอัสแต่ละแบบส่งผลให้ฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติต่างๆสลับกันไป

## 2.3 กลไกการเกิดฟิล์มเพชรของวิธี CVD

### 2.3.1 กระบวนการกระตุ้นก๊าซเฟส

การสร้างเพชรด้วยกระบวนการ CVD มีหลักการพื้นฐานคือต้องการกระตุ้นก๊าซเฟสด้วยพลังงานสถานะสูง เพื่อจุดประสงค์ 2 อย่างดังนี้

1. ทำให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุล ซึ่งพร้อมจะเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวที่พื้นผิว
2. แยกโมเลกุลไฮโดรเจนเพื่อสร้างสมดุล ความหนาแน่นสูงของก๊าซเฟสของอะตอมไฮโดรเจนโดยทั่วไปแล้วรีแอคเตอร์ที่ใช้กระตุ้นมีอยู่ 4 วิธีที่นิยมคือ Hot-filament, Microwave plasma reactors, Dc arcjet reactor และ Combustion-synthesis reactors



รูปที่ 2.2 แผนภาพกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์เพชร  
ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้ว่าแต่ละระบบการสร้างมีความแตกต่างกันในแง่ของรูปแบบทางวิศวกรรมแต่ทั้งหมดจะมีลักษณะสำคัญพื้นฐานเหมือนกัน คือทำให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพดีออกมา พลังงานจำนวนมากที่ใช้จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าหรือเคมี ทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนแตกตัว การสร้างจะกระทำที่ความดันต่ำ (ประมาณ  $10 \text{ torr}^{-1} \text{ atm}$ ) เพื่อป้องกันการรวมตัวกันของอะตอมของไฮโดรเจนกลับไปสู่รูปของโมเลกุล อุณหภูมิของก๊าซเพลสที่มีค่าสูงกว่า  $1700^\circ \text{C}$  เกิดขึ้นที่บริเวณ Activation zone การระบายความร้อนทั้งแบบแอคทีฟหรือพาสซีฟเป็นตัวรักษาระดับอุณหภูมิของฐานรองให้มีค่าประมาณ  $925^\circ \text{C}$

อย่างไรก็ตามกระบวนการส่งผ่านจะมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงในรีแอคเตอร์ทั้ง 4 ชนิดรีแอคเตอร์ชนิด Hot-filament และ Microwave plasma มีการแพร่เป็นส่วนสำคัญเหมือนกับว่าตรงนั้นไม่มีความ ความเร็วหรือความหนาแน่นของ "Boundary layer" ดังนั้นจึงมักจะพบการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในอุณหภูมิ ความเร็วหรือความหนาแน่นของอนุภาคระหว่างบริเวณกระตุ้น (Hot-filament หรือ Plasma ball) และพื้นผิวการเกิดในแต่ละรีแอคเตอร์ ส่วนรีแอคเตอร์ชนิด Arc jet และ Combustion CVD เป็นชนิดที่มีความเร็วสูง (ตัวอย่างเช่น อาจสูงเกินกว่า  $10^5 \text{ cm/s}$ ) ดังนั้นจึงมีการพาเป็นส่วนสำคัญ ชั้นบางๆ ของ Boundary layer ในอุณหภูมิ, ความเร็วและความหนาแน่นจะเกิดขึ้นใกล้ๆกับพื้นผิวที่เกิด

จากแผนภาพในรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในรีแอคเตอร์ CVD รีแอคเตอร์หรือก๊าซที่ใส่เข้าไปคือ ก๊าซผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจน ซึ่งเป็นที่นิยมใช้สำหรับรีแอคเตอร์แบบ Hot-filament และ Plasma รีแอคเตอร์ที่เข้าไปในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง หรือพลังงานสูงจะถูกกระตุ้นภายในบริเวณนั้น ปฏิริยาเคมีเริ่มเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลไฮโดรเจนแตกตัวออกเป็นไฮโดรเจนอะตอม ถูกส่งผ่านโดยการไหลการแพร่และการพาจากรีแอคเตอร์ไปยังฐานรองที่บริเวณใกล้ฐานรอง การแพร่จะเข้าสู่บริเวณที่การไหลหยุดนิ่งซึ่งถูกเรียกว่า "Boundary layer" พื้นผิวบนฐานรองจะเกิดการดูดกลืน การคาย การแพร่ที่พื้นผิวหรือเข้าไปในเนื้อสารและเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นประโยชน์ต่อการเกิดเพชรและมีความสำคัญเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ

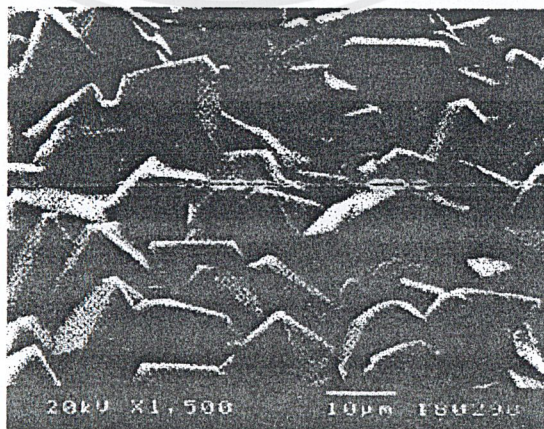
#### 2.4 การวิเคราะห์และตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

ภายหลังจากกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเสร็จสิ้นแล้ว ชิ้นงานที่ได้จะถูกนำตรวจสอบและวิเคราะห์หาคุณสมบัติของเพชรต่อไป การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรมีหลายวิธีการแล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งาน อาทิเช่น ถ้าต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร พื้นที่เกิดฟิล์มเพชรหรือแม้แต่ความหนาของเพชรที่เกิดขึ้น นิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) แต่หากต้องการวิเคราะห์ถึงพันธะของอะตอมคาร์บอน

ที่จับตัวกัน เพื่อตรวจสอบว่าเป็นเพชร , กราไฟต์ , อมอร์ฟัส หรือ DLC เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy จะถูกนำมาใช้ หรือถ้าต้องการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร อาทิ เช่น ความคล่องตัวของประจุพาหะ , ความหนาแน่นของประจุพาหะ เทคนิคการวัดด้วย Hall effect จะถูกเลือกใช้งาน สำหรับในการทดลองครั้งนี้จะใช้เทคนิคในการวิเคราะห์คือ วิธีการ Scanning Electron Microscopy ( SEM ) และเทคนิคการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy

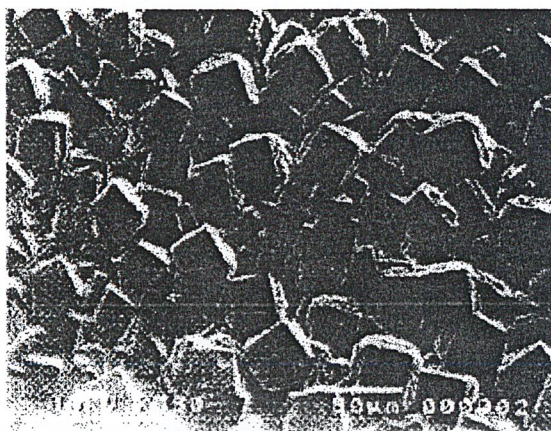
#### 2.4.1. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM [1,5]

SEM ( Scanning Electron Microscopy ) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) หลักการพื้นฐานของ SEM คือการทำการกวาดโฟกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโฟกัสให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กที่สุดได้ถึง 10 - 20 nm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบ ซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุลย์ ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด CRT ( Cathode-ray tube ) นอกจากนี้เทคนิคต่างๆในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ทำให้ได้รูปร่างลักษณะของฟิล์มแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสร้าง โดยทั่วไปแล้วฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร ( โดยเฉพาะฐานรอง Si ) บริเวณผิวจะมีความขรุขระและรูปร่างของพื้นผิวที่พบส่วนมากจะมี 4 แบบคือ 1. ระนาบ  $\{111\}$  ซึ่งเป็นระนาบที่ต้องการใช้ในการศึกษาในปริญญาโทฉบับนี้ 2. ระนาบ  $\{100\}$  3. ระนาบรวม ( Polycrystalline ) และ 4. Cauliflower-like หรือ Microcrystalline ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งลักษณะของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้าง โดยเฉพาะอุณหภูมิของฐานรองและความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอนต่อก๊าซไฮโดรเจน

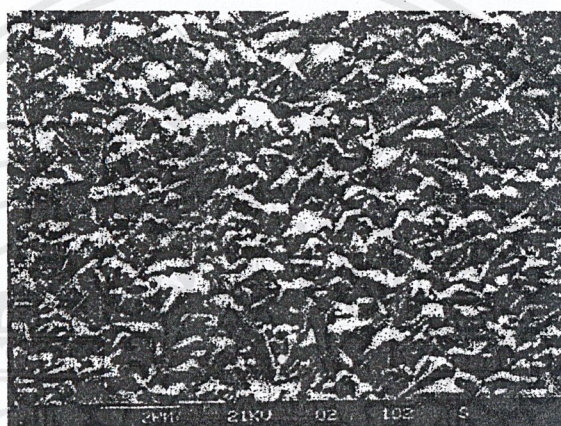


(a) ระนาบ  $\{111\}$

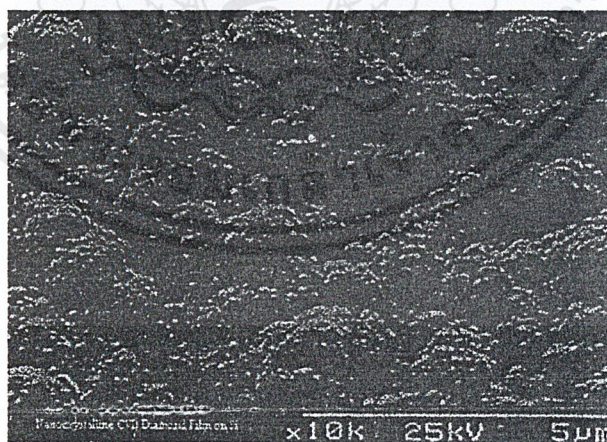
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) ระนาบ {100}



(C) Polycrystalline faces

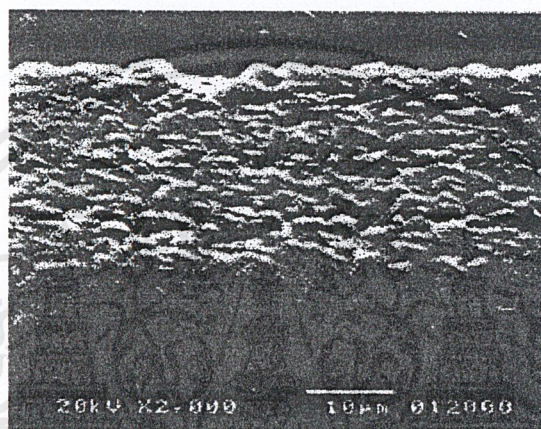


(d) Cauliflower-like or microcrystalline

รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะรูปร่างของฟิล์มเพชรแบบต่างๆจากการถ่าย SEM [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.3 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM ซึ่งหากใช้ร่วมกับการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman spectroscopy จะช่วยให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพมากขึ้นเช่น Raman spectrum ที่ได้จากการวัดชิ้นงานที่มีผิวหน้าแบบ Cauliflower-like ในรูปที่ 2.3 d จะมียอดกราฟลดลง และเกิดยอดของกราฟไฟต์ขึ้นมา เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการตรวจสอบพื้นผิวของเพชรรูปอื่นๆ ( 2.3 a ถึง 2.3 c ) พบว่าฟิล์มเพชรที่มีลักษณะพื้นผิวแบบรูปที่ 2.3 d แสดงคุณสมบัติเพชรน้อยกว่าชนิดอื่นๆ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ SEM หาความหนาของฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นได้ ดังตัวอย่างจากรูปที่ 2.4 อีกด้วย



รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการวัดความหนาของฟิล์มเพชรที่ได้จากภาพถ่าย SEM [6]

#### 2.4.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy [1,5]

Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยมีความไวต่อการแยกเฟสของเพชรและกราฟไฟต์สูง แม้ว่าจะมีกราฟไฟต์เพียงเล็กน้อยก็ตามเนื่องจากประสิทธิภาพการกระเจิงของกราฟไฟต์มีค่ามากกว่าของเพชรตำแหน่งและความกว้างของยอดจาก Raman spectrum จะเป็นตัวแสดงชนิดของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ตรวจสอบได้

หลักการพื้นฐานของ Raman spectroscopy คือการสั่นของอะตอมภายในโครงสร้างของเนื้อสารหรือผิวหน้าของผลึก ทำให้สามารถแยกความแตกต่างของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนได้ การทำงานของ Raman spectroscopy อาศัยปรากฏการณ์การกระเจิงทางแสง โดยหลักการของปรากฏการณ์ดังกล่าวคือการวัดการลดลงของความเข้มของลำแสงที่ผ่านไปในตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน ผลของ Raman จะขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์การกระเจิงของโมเลกุล ซึ่งอยู่บนพื้นฐานที่ว่าการกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการชนกันระหว่างโฟตอนกับการสั่นของแลตทิซหรือโฟ

นอน ทำให้เกิดคู่ของโฟตอนและโฟนอน สนามไฟฟ้าของความเข้มลำแสงเป็นตัวบังคับให้แสงมีคลื่นไปทางเดียวในผลึก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ Polarizability ดังสมการ

$$P = \alpha E$$

โดยที่ P คือ โมเมนต์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น  
E คือ สนามไฟฟ้า  
 $\alpha$  คือ Polarizability

เมื่อมีการสั่นของแลตทิซเกิดขึ้นอันเป็นภาวะการกระตุ้นของ Raman ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง Polarizability Raman จะปล่อยโฟตอนบางส่วนออกมา โดยโฟตอนนี้จะเกิดการสั่นของไดโพล ซึ่งมีทั้งความถี่เหมือนกับลำแสงตกกระทบ (Elastic rayleigh scattering) ที่มีการเคลื่อนไปของความถี่ ซึ่งมีค่าเท่ากับความถี่ของการสั่นของแลตทิซ (Inelastic stokes or anti-stokers scattering) :

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

โดยที่

$E_0$  คือ สนามไฟฟ้าของลำแสงที่ตกกระทบ

t คือ เวลา

$\nu_0$  คือ ความถี่ของลำแสงที่ตกกระทบ

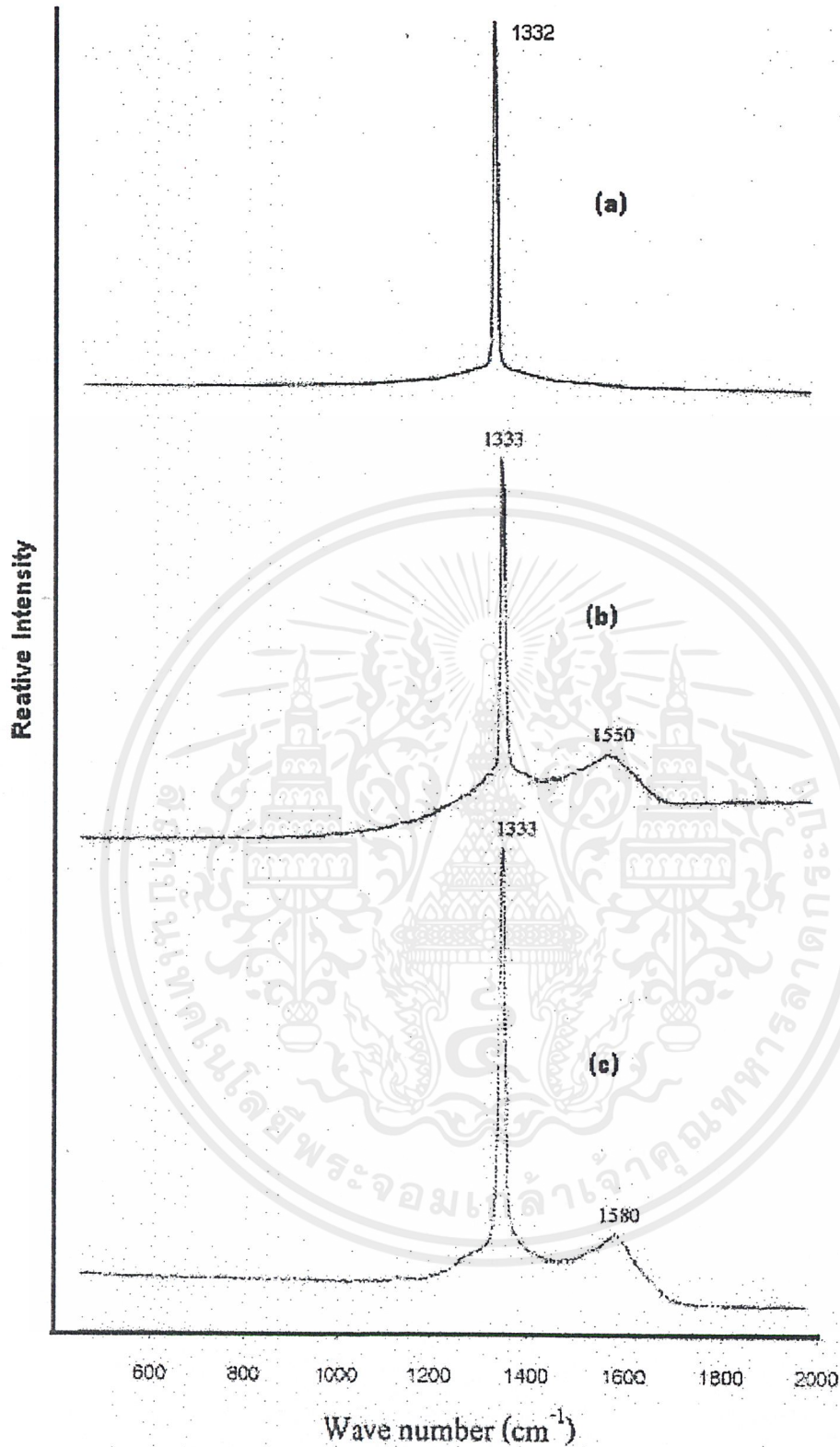
$\nu_n$  คือ ความถี่ของโฟนอน

$\alpha_n$  คือ Polarizability ในฟังก์ชันของโหมดการสั่น

ปรากฏการณ์ "Stokes scattering" เกิดขึ้นเมื่อผลึกได้รับพลังงานจากลำแสง ทำให้เกิดการสั่นของแลตทิซขึ้น ขณะที่ปรากฏการณ์ "Anti-stokes scattering" เกิดจากการทำลายของความร้อนที่กระตุ้นการสั่น โหมดของการสั่นจะขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างอะตอมในของแข็ง ดังนั้น Raman spectrum สามารถใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของของแข็งได้เป็นอย่างดี

ดังนั้นจึงสามารถจำแนกประเภทต่างๆ ของโครงสร้างคาร์บอนได้ เช่น เพชร กราไฟต์ และคาร์บอนอะมอร์ฟัส เป็นต้น โดยค่าที่สเปกตรัมของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5(a) และลักษณะสเปกตรัมของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5(b) และ 2.5 (c) โดยที่ค่ายอดของกราฟ Raman อันดับหนึ่งสำหรับคาร์บอนโครงสร้างเพชร อะมอร์ฟัสและกราฟไฟต์ จะมีค่าอยู่ที่  $1333 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1550 \text{ cm}^{-1}$  และ  $1580 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ จากรูปที่ 2.5(b) และ 2.5(c) บอกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ลักษณะสเปกตรัมของเพชรธรรมชาติ และเพชรที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี CVD แบบขาดลวดความร้อน [8]

- (a) เพชรธรรมชาติ
- (b) เพชรสังเคราะห์ที่มีปริมาณคาร์บอนอะมอร์ฟัสปะปนอยู่
- (c) เพชรสังเคราะห์ที่มีปริมาณกราฟิตปะปนอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่า फिल्मเพชรที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นเพชรที่ใกล้เคียงธรรมชาติ และบริสุทธิ์มาก แต่ยังมีปริมาณกราฟาइटและคาร์บอนอะมอร์ฟัสปะปนอยู่บ้างข้อดีที่สุดของการวิเคราะห์คุณสมบัติของ फिल्मเพชรด้วย Raman spectroscopy นี้ คือเป็นวิธีที่ไม่ทำให้ชิ้นงานหรือ फिल्मเพชรที่ตรวจสอบเสียหาย หรือทำลายโครงสร้าง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานต่อได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## ทฤษฎีและหลักการทำงานของ MESFET

การทำงานของเมสเฟท(MESFET) จะอาศัยการเคลื่อนที่ของประจุพาหะส่วนมากของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเป็นฐานรอง โดยกระแสที่เกิดขึ้นเรียกว่ากระแสเดรน ( $I_D$ ) ส่วนการควบคุมปริมาณกระแสจะอาศัยแรงดันที่ป้อนให้กับขาเกต ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมช่องทางเดินกระแส (Channel) ดังนั้นกระแสเดรน ( $I_D$ ) ที่เกิดขึ้นจึงเป็นกระแสอันเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโฮล (hole) ในการอธิบายการทำงานของ MESFET เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของ MESFET มีเกตโลหะซึ่งต่อกับชั้นสารกึ่งตัวนำในลักษณะรอยสัมผัสแบบชอตต์กี ส่วนเดรนกับซอสต่อกับชั้นสารกึ่งตัวนำในลักษณะรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก (ohmmic contact) ซึ่งคุณสมบัติของรอยต่อทั้งสองจะอธิบายรายละเอียดในบทนี้

#### 3.1 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ [7,9,10]

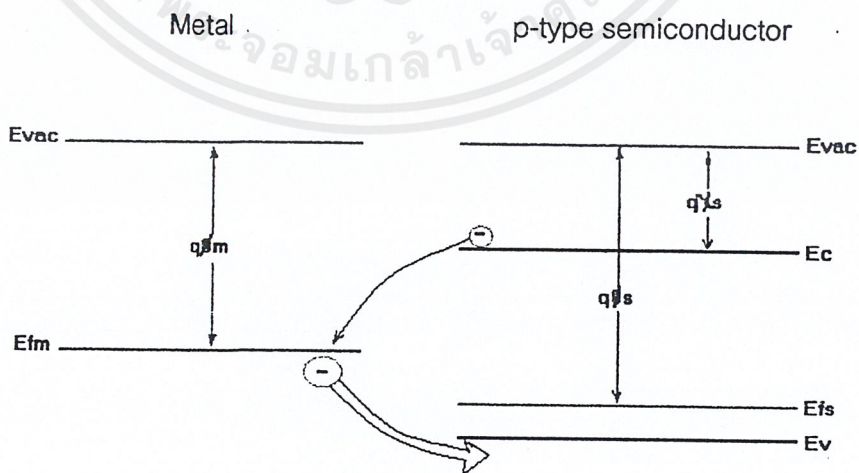
จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเมสเฟทถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยคุณสมบัติของรอยต่อแบบชอตต์กีและรอยต่อแบบโอห์มมิก รอยต่อระหว่างขาเดรนและซอสที่เชื่อมต่อกับผลึกสารกึ่งตัวนำนั้นเราใช้เป็นจุดส่งผ่านกระแสที่ไหลจากซอสไปเดรน ดังนั้นเราจึงต้องออกแบบให้รอยต่อมีความนำสูง เพื่อที่จะไม่มีผลต่อปริมาณกระแสหรือทิศทางกระแสที่ไหลผ่าน คุณสมบัติรอยต่อนี้เราเรียกว่า รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก (ohmmic contact) โดยทั่วไปซอสกับเดรนจะอาศัยการสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ เช่น ทอง (Au) นิกเกิล (Ni) ในส่วนของเกตเราใช้เป็นตัวควบคุมช่องทางเดินกระแส (Channel) ดังนั้นจึงต้องให้รอยต่อตรงจุดนี้สามารถควบคุมปริมาณและทิศทางกระแส โดยเราเรียกรอยต่อตรงจุดนี้ว่ารอยต่อแบบ ชอตต์กี (shottky junction) ในโครงสร้างของเมสเฟทเราใช้อะลูมิเนียม (Al) เชื่อมต่อระหว่างขาเกตกับสารกึ่งตัวนำเพอร์ซินิกพี โดยทั่วไปรอยต่อจะแสดงคุณสมบัติออกมาว่าเป็นรอยต่อชนิดใดนั้นเราสามารถดูได้จากค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะกับ สารกึ่งตัวนำ เราสามารถวิเคราะห์จำแนกลักษณะและคุณสมบัติรอยต่อต่างๆ ได้ดังนี้

##### 3.1.1 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี กรณี $\phi_m < \phi_s$

เพื่อให้เข้าใจคุณสมบัติของรอยต่อแบบชอตต์กีขอยกตัวอย่างดังรูปที่ 3.1 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและพีลัมเพอร์ซินิกพี โดยระดับเฟอร์มิของโลหะ  $E_{Fm}$  มีฟังก์ชัน

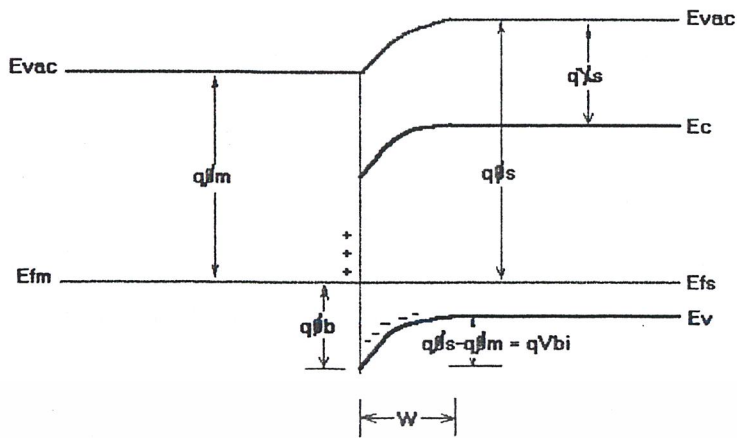
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งาน (work function) เท่ากับ  $q\phi_m$  ส่วนในฟิล์มเพชรชนิดที่จะแสดงระดับเฟอร์มิ  $E_{F_s}$  โดยมีฟังก์ชันงานเท่ากับ  $q\phi_s$  และมีอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) เท่ากับ  $q\chi_s$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (a) และเมื่อนำโลหะและฟิล์มเพชรชนิดที่นี้มาต่อสัมผัสกันโดย  $\phi_m < \phi_s$  เนื่องจากฟังก์ชันงานของทั้งสองไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดมีการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสองโดยอิเล็กตรอนในแถบความนำของสารกึ่งตัวนำชนิดที่จะเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปยังโลหะแต่ก็เป็นเพียงการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยจึงไม่มีผลทำให้อิเล็กตรอนในโลหะเปลี่ยนแปลงไปมาก และในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนจากโลหะจะเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อไปยังแถบวาเลนซ์ (valence band) ของฟิล์มเพชรชนิดที่ (ในทางตรงกันข้ามโฮลจากฟิล์มเพชรชนิดที่จะเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปยังโลหะ) ซึ่งจะเป็นการเคลื่อนที่ของประจุพาหะส่วนมากทั้งนี้เพราะฟิล์มเพชรชนิดที่มีโฮลสูงนั่นเอง การถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสองจะเกิดขึ้นจนกระทั่งระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองอยู่ในระดับเดียวกันผ่านตลอดรอยสัมผัส ซึ่งจะอยู่ในภาวะสมดุลความร้อน เนื่องจากอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อเข้าไปทางด้านฟิล์มเพชรชนิดที่จึงทำให้เกิดมีอ็อนลอบของอะตอมสารเจือผู้รับขึ้นที่ชั้นสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดที่ดังแสดงในรูปที่ 3.1(b) และทำให้เกิดมีสนามไฟฟ้าภายในชั้นที่บริเวณรอยต่อ สนามไฟฟ้าดังกล่าวจะมีทิศทางช่วยต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโลหะ และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในที่สุดก็สามารถหยุดยั้งการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ สนามไฟฟ้าที่ช่วยต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนี้สามารถเขียนให้เห็นชัดได้โดย การงอโค้งขึ้นของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยสัมผัสกับโลหะ ซึ่งมีความหมายว่าเกิดกำแพงศักย์ป้องกันการเคลื่อนที่ของโฮลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะโดยกำแพงศักย์มีความสูง  $q(\phi_s - \phi_m)$  ดังนั้นในภาวะสมดุลความร้อนจึงไม่มีกระแสใดๆ ไหลผ่านรอยต่อนี้

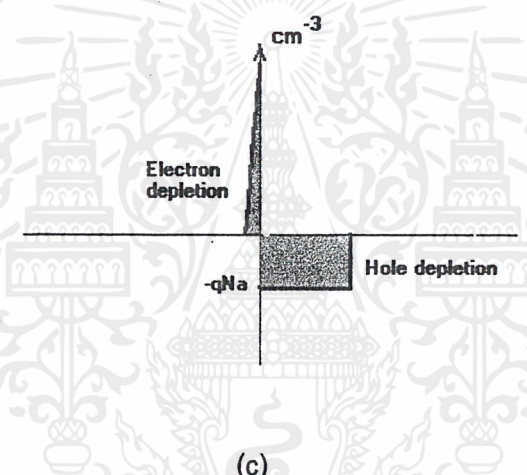
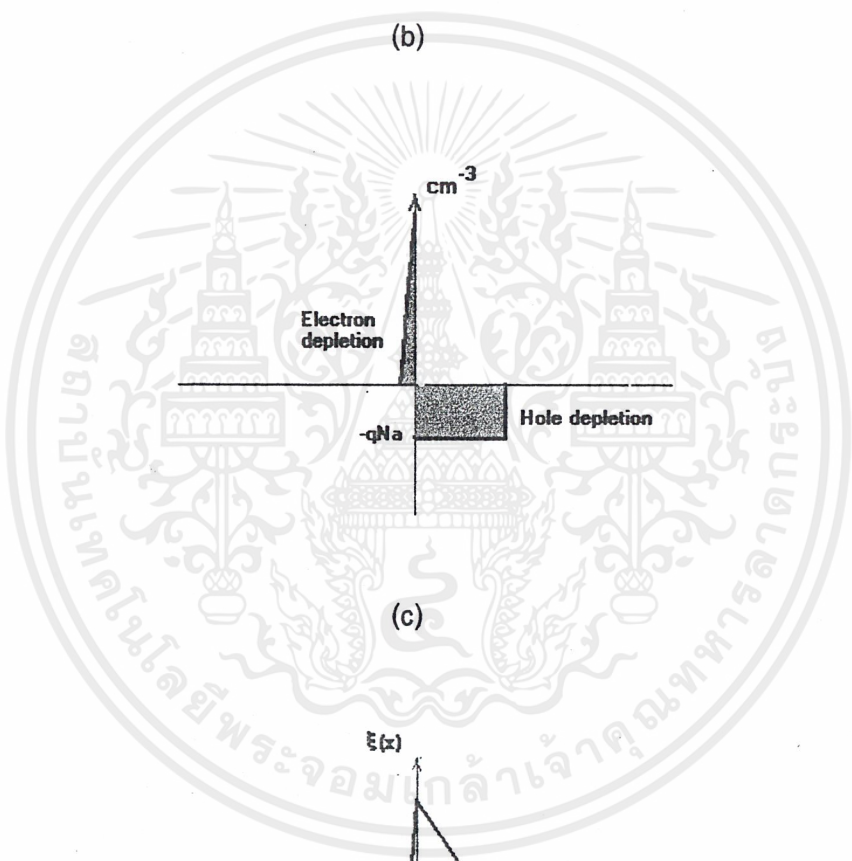


(a)

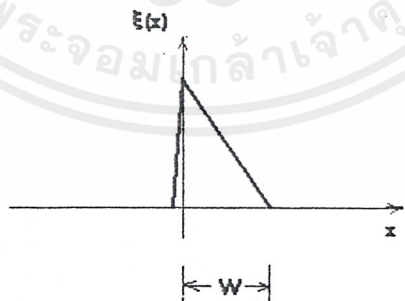
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)



(c)



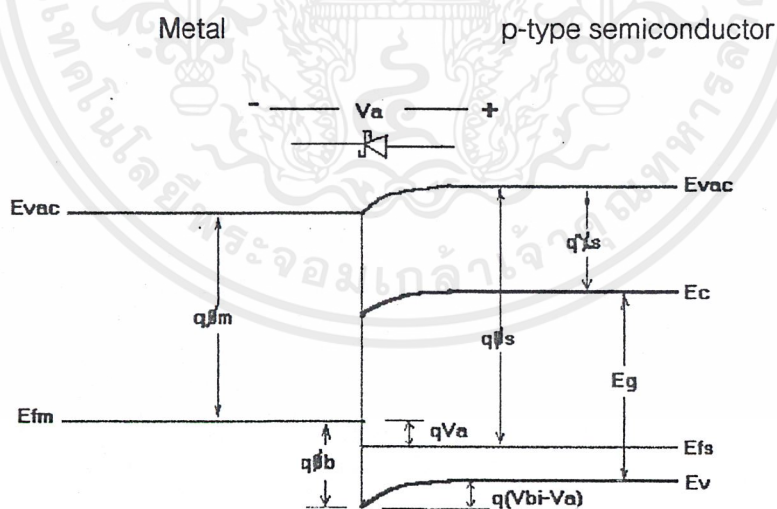
(d)

รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและฟิล์มเพชรชนิดพีในขณะ (a) ก่อนสัมผัส (b) ภายหลังจากสัมผัส (c) ความหนาแน่นประจุบริเวณปลอดพาหะ และ (d) สนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อ ในกรณีที่  $\phi_m < \phi_s$  [9,10,12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

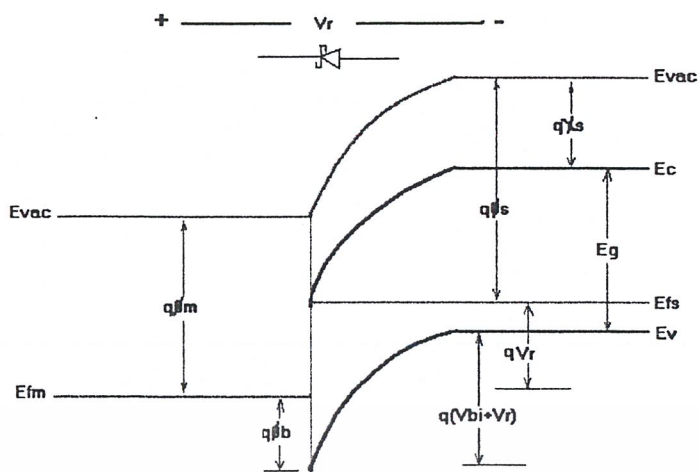
### 3.1.1.1 รอยต่อชอตต์กีขณะได้รับแรงดันไบอัส

ในกรณีที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสกลับโดยทางด้านฟิล์มเพชรชนิดพีมีศักย์เป็นลบ เมื่อเทียบกับทางด้านโลหะ จะทำให้ระดับพลังงานทุกระดับในฟิล์มเพชรชนิดพีมีค่าเพิ่มจากภาวะเดิม ด้วยปริมาณ  $q \cdot V_a$  อิเล็กตรอนโวลต์ ( $V_a$  คือแรงดันที่ไบอัสให้กับรอยต่อ) ดังนั้นความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายกว้างกว่าเดิม ในภาวะนี้ถือว่ารอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ กระแสไหลจากสารกึ่งตัวนำที่ไหลไปยังโลหะ จะถูกขัดขวางไว้ด้วยกำแพงศักย์ที่มีขนาดความสูงมาก อย่างไรก็ตามก็จะมีกระแสของอิเล็กตรอนบางส่วนจากสารกึ่งตัวนำสามารถไหลเข้าไปในโลหะได้ โดยที่ปริมาณของกระแสไม่เกี่ยวข้องกับแรงดันไบอัสแต่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิรอยต่อซึ่งเราอาจเรียกว่าเป็น "กระแสรั่วของรอยต่อ" ก็ได้ กรณีที่ให้ไบอัสตรงให้แก่รอยต่อ กล่าวคือทางด้านสารกึ่งตัวนำมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับศักย์ทางด้านโลหะ กรณีนี้จะทำให้ความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อมีขนาดเล็กลงและความกว้างของบริเวณปลอดพาหะก็จะลดลงด้วย ดังนั้นจึงทำให้กระแสของไหลจำนวนมากไหลผ่านสารกึ่งตัวนำเข้าไปในรอยต่อทางด้านโลหะ ดังนั้นเราจึงเห็นได้ชัดว่ารอยต่อระหว่างโลหะและฟิล์มเพชรพีชนิดซึ่ง  $\phi_m < \phi_s$  จะมีคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ได้เช่นเดียวกับกับรอยต่อพี-เอ็น โดยทั่วไปคือยอมให้กระแสไหลผ่านในกรณีไบอัสตรงเท่านั้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.2



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



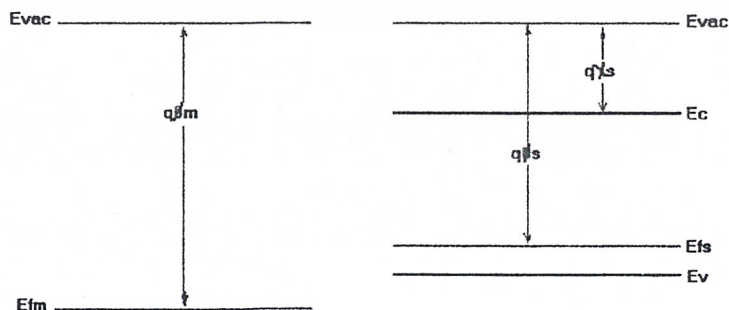
(b)

รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและฟิล์มเพชรที่ชนิดในขณะได้รับแรงดันไบอัส ในกรณี  $\phi_m < \phi_s$  (a) ขณะได้รับไบอัสตรง (b) ขณะได้รับไบอัสกลับ

3.1.2 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี กรณี  $\phi_m > \phi_s$

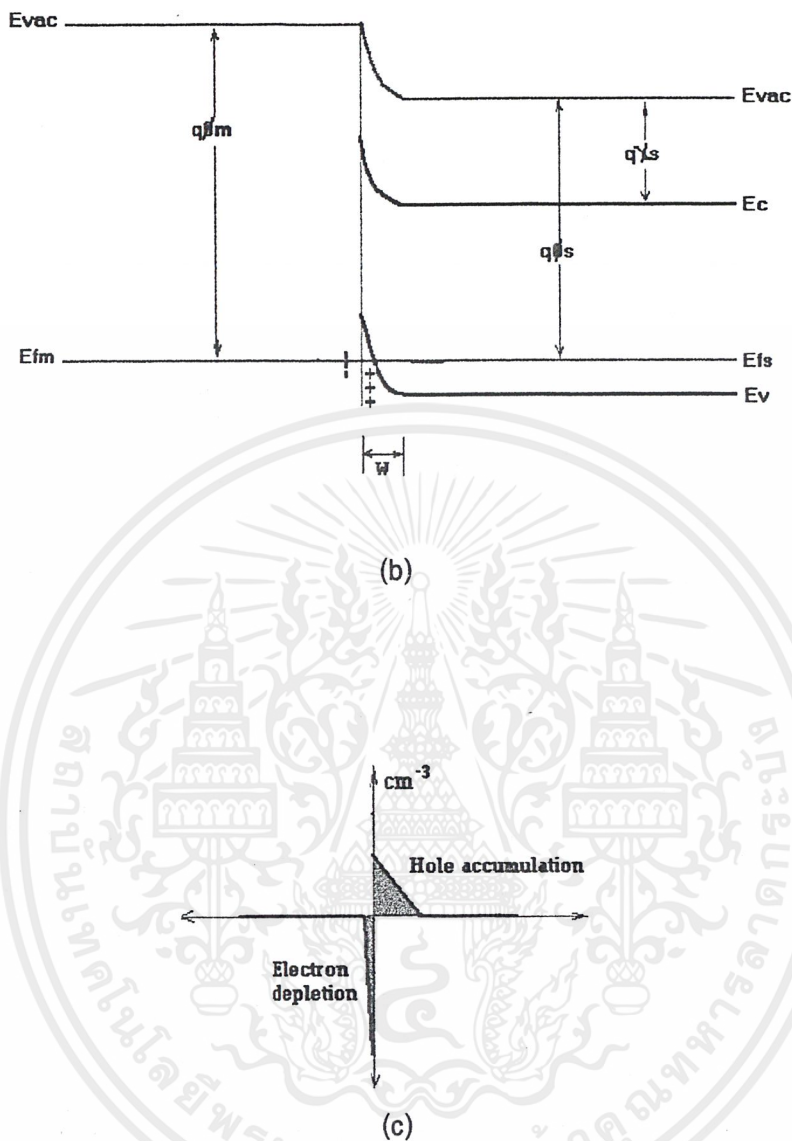
กรณีซึ่ง  $\phi_m > \phi_s$  ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ  $E_{Fs}$  จะอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ  $E_{Fm}$  ดังนั้นรูปที่ 3.3 (a) ซึ่งเป็นภาวะก่อนสัมผัส และเมื่อนำมาสัมผัสกันกระทั่งอยู่ในภาวะสมดุลแล้วลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแสดงได้ดังรูปที่ 3.3(b)

Metal p-type semiconductor



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีในกรณีที่  $\phi_m > \phi_s$  (a) ก่อนสัมผัส (b) ภายหลังจากสัมผัส และ (c) ความหนาแน่นประจุบริเวณปลอดพาหะ [9,12]

กล่าวคือ เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีมาสัมผัสกัน เนื่องจากฟังก์ชันงานของสารทั้งสองไม่เท่ากันจึงเกิดมีการถ่ายเทประจุระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพีและโลหะ ซึ่งการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสองนี้จะหยุดลงเมื่อระดับเฟอร์มิอยู่ในระดับเดียวกัน นั่นคือโฮลจากสารกึ่งตัวนำชนิดพีสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้โดยอิสระ ซึ่งรอยต่อดังกล่าวจะมีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าฟังก์ชันงานของ อลูมิเนียม ทองคำ คาร์บอน และบางโลหะ

work functions of some metals

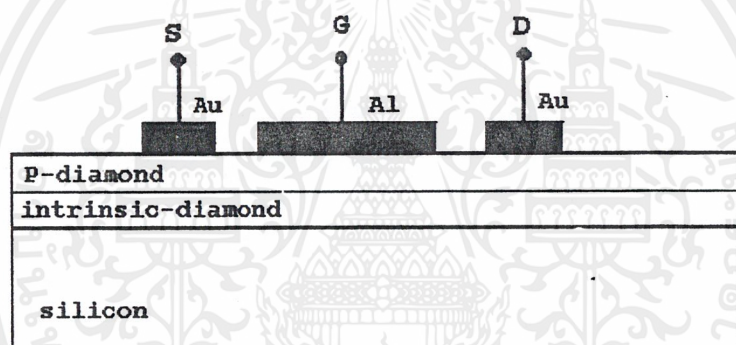
Element	work function, $\phi_m$ (volt)
Ag, silver	4.26
Al, aluminium	4.28
Au, gold	5.10
Cr, chromium	4.50
Mo, molybdenum	4.60
Ni, nickel	5.15
Pd, palladium	5.12
Pt, platinum	5.65
Ti, titanium	4.33
W, tungsten	4.55
C, Carbon	4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหัวข้อที่แล้วเราได้อธิบายถึงคุณสมบัติของรอยต่อทั้งสองแบบคือ รอยสัมผัสแบบชอตต์กี (shottky contact) และรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก (ohmic contact) ไปแล้ว ในบทนี้เราจะนำเอาคุณสมบัติพื้นฐานดังกล่าวมาวิเคราะห์การทำงานของ MESFET เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการนำ MESFET ไปใช้งาน

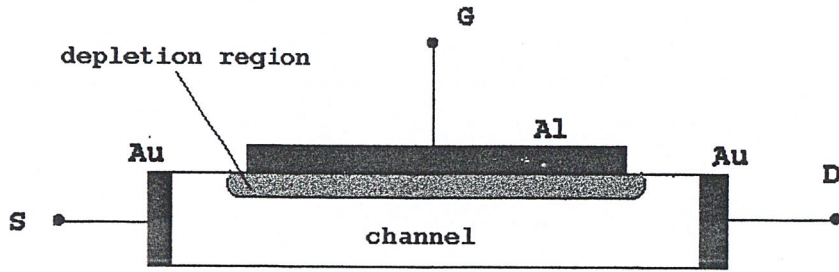
### 3.2 โครงสร้างและพื้นฐานการทำงานของ MESFET

การทำงานของ MESFET จะคล้ายกับการทำงานของ JFET เพียงแต่ว่า MESFET ขั้วเกตจะเป็นโครงสร้างของรอยต่อแบบเรกติไฟรระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำแทนรอยต่อแบบพีเอ็นของ JFET สำหรับเมทเพทที่ใช้ในการทดลองนี้จะเป็นเมทเพทที่มีแกนแนบสร้างมาจากฟิล์มเพชรชนิดพี โดยมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของ MESFET

เพื่อความสะดวกในการศึกษาการทำงานของ MESFET นี้ เราจะทำการพิจารณาโครงสร้างพื้นฐานของทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 กล่าวคือ เป็นแท่งผลึกหลายรูปของสารกึ่งตัวนำชนิดพีเพชร ที่มีรอยสัมผัสโอห์มมิกอยู่ที่ปลายทั้งสองด้านซึ่ง อยู่ตรงข้ามกันของแท่งผลึก และมีโลหะอลูมิเนียมต่อชั้นอยู่ตรงกลาง โดยส่วนของโลหะนี้ ถูกเรียกว่า “เกต” (Gate) G ที่ปลายทั้งสองด้านของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ถูกเรียกว่าซอส (Source) และปลายอีกด้านหนึ่งถูกเรียกว่าเดรน (Drain) ซึ่งในการอธิบายการทำงานเราจะพิจารณาว่าการกระจายของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่กระจายอย่างสม่ำเสมอและรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะเป็นรอยต่อที่สมบูรณ์

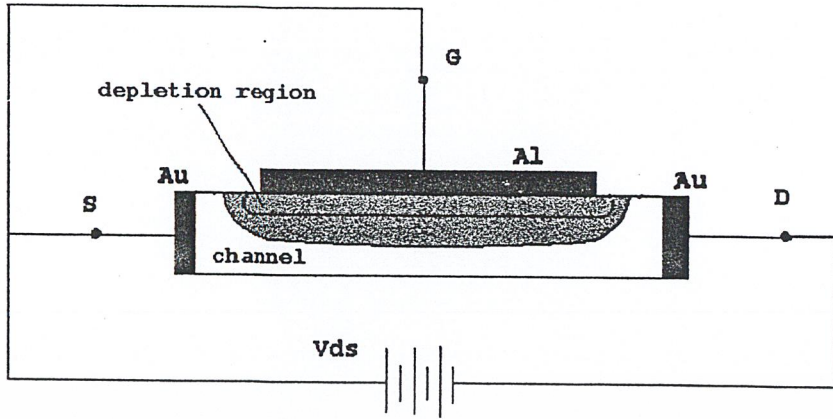


รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของ MESFET ขณะที่ยังไม่มีการให้ไบอัส

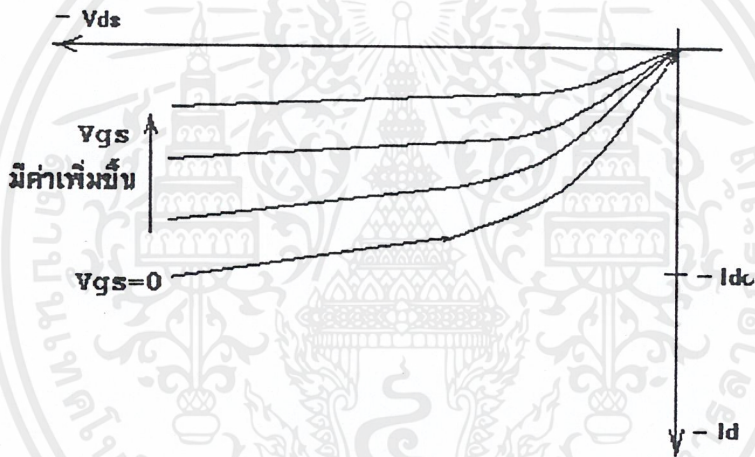
การอธิบายคุณสมบัติการทำงานของ MESFET สามารถอธิบายได้จากการพิจารณาโครงสร้างดังรูปที่ 3.6 เมื่อให้เกตถูกต่อเข้ากับขั้วซอส S โดยที่ขั้วของซอส S และเดรน D ถูกให้แรงดันไบอัส  $V_{DS}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (a) แล้วผลจากการให้ไบอัสดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดมีกระแส  $I_D$  ซึ่งเป็นกระแสเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโฮลไหลจากขั้วซอสไปยังเดรน และเพราะว่าในแท่งผลึกมีค่าความต้านทาน R ดังนั้นเมื่อมีกระแสไหลผ่านจึงทำให้เกิดมีแรงดัน IR ตกคร่อมแท่งผลึก และศักย์ที่จุดต่างๆ ภายในแท่งผลึกนี้จะมีค่าแตกต่างกันไป กล่าวคือจะมีค่าแรงดันต่ำสุดที่ขั้วซอสแล้วค่อยๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งใกล้ขั้วเดรนเข้าไป ขณะที่เกตต่ออยู่กับขั้วของซอส รอยต่อข้อต่อที่ระหว่างโลหะกับแท่งผลึกชนิดพีเพอร์จะอยู่ในสภาวะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับและค่าของแรงดันไบอัสนี้จะเพิ่มขึ้นกระทั่งที่ตำแหน่ง D รอยต่อข้อต่อที่นี้จะถูกให้ไบอัสย้อนกลับด้วยค่าสูงสุด

ขณะที่แรงดันไบอัส  $V_{DS}$  มีค่าเพิ่มมากขึ้นความกว้างของช่องทางเดินกระแสในทรานซิสเตอร์นี้จะแคบลงเนื่องจากบริเวณปลอดพาหะแผ่ขยายกว้างขึ้น ดังนั้นค่าความต้านทานระหว่างซอสไปยังเดรนก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งที่แรงดันไบอัสค่าหนึ่งซึ่ง  $V_{DS} = V_p$  ซึ่งเราเรียกแรงดันนี้ว่า แรงดันพินช์ออฟ (pinch-off voltage) แล้วบริเวณปลอดพาหะจากเกตจะขยายปิดช่องทางเดินกระแส และที่ๆ ซึ่งแรงดันของเดรนมีค่ามากกว่าค่าแรงดันพินช์ออฟ แล้วกระแสเดรนก็จะอยู่ในภาวะอิ่มตัว และจะมีค่าคงที่อยูค่าหนึ่ง คือ  $I_{D0}$  ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเดรน  $V_{DS}$  และกระแสเดรน  $I_D$  ดังในรูปที่ 3.6 (b) เส้นกราฟที่เรากล่าวถึงนี้ก็คือเส้นกราฟขณะที่แรงกันเกต  $V_{GS} = 0$

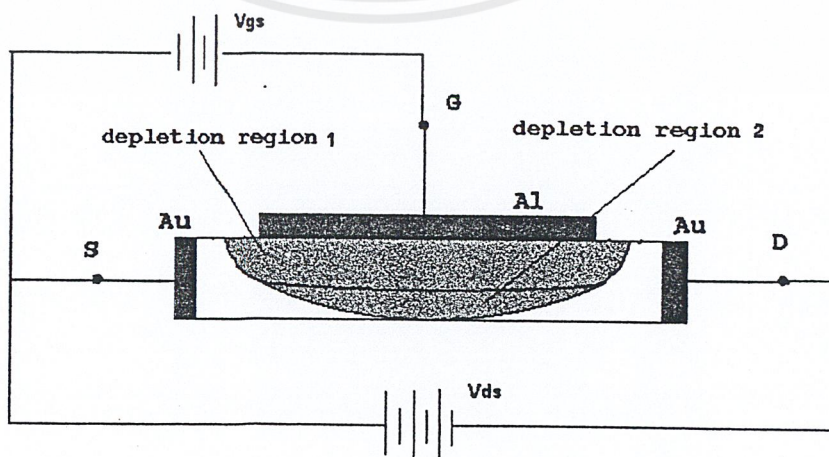
นอกจากนี้แล้วถ้าหากเราเพิ่มแรงดันไบอัสคงที่ค่าหนึ่ง  $V_{GS}$  ให้แก่เกตซึ่งแสดงในรูปที่ 3.6 (c) ในขณะที่ยังไม่มีการไหล  $I_D$  ( $V_{DS} = 0$ ) บริเวณปลอดพาหะส่วนที่ 1 จะแผ่กระจายเข้ามาในช่องทางเดินของกระแสอย่างสม่ำเสมอตลอดแนวผลึก และในขณะที่  $V_{DS} \neq 0$  จะทำให้มีกระแส  $I_D$



รูปที่ 3.6 (a) แสดงการให้ไบอัสแก่ MESFET แบบกราวด์ เกท



รูปที่ 3.6 (b) แสดงความสัมพันธ์แรงดัน  $V_{DS}$  และกระแส  $I_d$  ของMESFET



รูปที่ 3.6 (c) แสดงการให้ไบอัสที่เกตของ MESFET

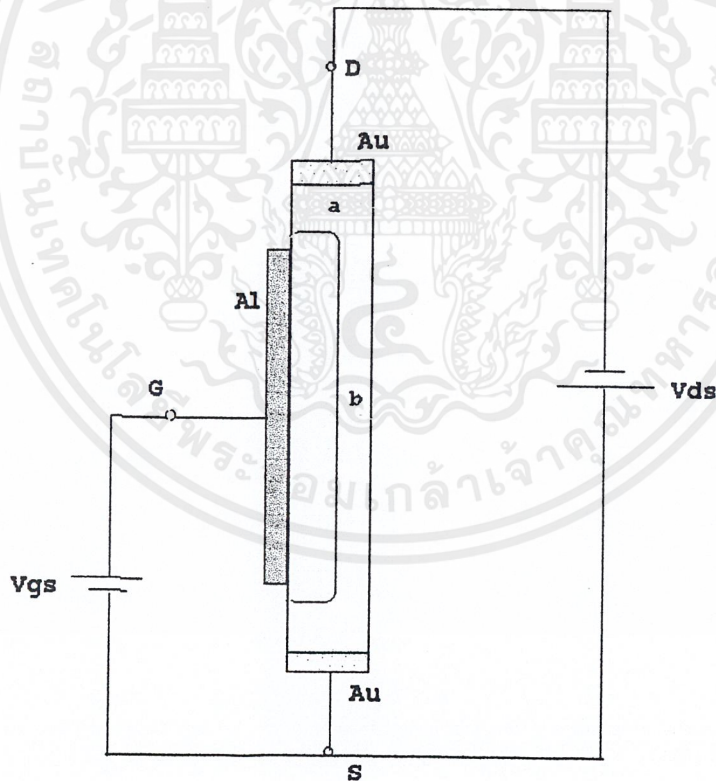
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ เนื่องจากการให้แรงดันไบอัส  $V_{DS}$  จะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะส่วนที่ 2 ขึ้นโดยมีลักษณะคล้ายๆ กับรูปลิ้มซ้อนทับส่วนที่ 1 ซึ่งเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากแรงดัน  $V_{GS}$  ในภาวะเช่นนี้จะทำให้เกิดกรณีพินช์ออฟจะมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ถูกกล่าวมาแล้ว และกระแสอิมิต์  $I_{D0}$  ซึ่งปรากฏจะมีค่าต่ำกว่าปกติผลดังกล่าวนี้จะทำให้ได้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_D - V_{DS}$  มีหลายเส้นดังแสดงในรูปที่ 3.6 (b)

ดังนั้นเราสามารถควบคุมกระแส  $I_D$  ได้โดยแรงดันไบอัสเกต การทำงานในลักษณะนี้ของ MESFET เราเรียกว่าเป็นลักษณะ ดีพลีชันโหมด (depletion-mode)

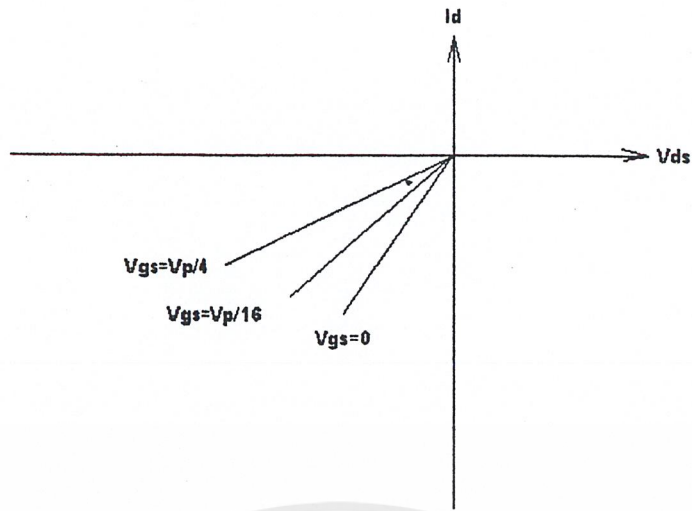
### 3.3 คุณสมบัติของ MESFET [7,11]

#### 3.3.1 การทำงานลักษณะเชิงเส้นของ MESFET



รูปที่ 3.7(a) แสดงคุณสมบัติของ MESFET ขณะแรงดัน  $V_{DS}$  ต่ำๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7(b) แสดงคุณสมบัติเชิงเส้นของกระแส  $I_d$  ของ MESFET ขณะแรงดัน  $V_{DS}$  ต่ำๆ

ขณะที่  $V_{DS}$  มีค่าต่ำๆ จนอาจประมาณว่าช่องทางเดินกระแสมีความนำไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งกรณีดังกล่าวนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 3.7(a) ซึ่งจากโครงสร้างเราอาจให้เหตุผลว่า  $N_d \gg N_a$  ดังนั้นบริเวณปลอดพาหะจะขยายลึกเข้ามาทางสารกึ่งตัวนำเพอร์ซนิตพี ซึ่งความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนี้แสดงได้ด้วยสมการที่ (1)

$$dp = \left[ \frac{2\epsilon(V_0 + V_{GS})N_d}{qNa(Na + N_d)} \right]^{1/2}$$

$N_d \gg N_a$

$$dp = \left[ \frac{2\epsilon(V_0 + V_{GS})}{qNa} \right]^{1/2} \quad (1)$$

และเมื่อพิจารณารูปที่ 3.7(a) แล้วจะได้ว่า

$$dp = a - b = \left[ \frac{2\epsilon(V_0 + V_{GS})}{qNa} \right]^{1/2} \quad (2)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$b = a - \left[ \frac{2\epsilon(V_0 + V_{GS})}{qNa} \right]^{1/2} \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3) จะเห็นว่าเมื่อค่า  $V_{GS}$  เพิ่มขึ้นขนาดของ  $b$  จะลดลงและเกิดปรากฏการณ์  
 พินช์ออฟ เมื่อแรงดันเกต  $V_{GS}$  มีค่ามากพอที่จะทำให้ช่องทางเดินกระแสปิดสนิทหรือก็คือ  $b = 0$   
 เมื่อ  $V_{GS} = V_p$  ซึ่งเป็นแรงดันพินช์ออฟ ดังนั้น

$$a = \left[ \frac{2\epsilon(V_0 + V_p)}{qNa} \right]^{1/2} \quad (4)$$

หรือ

$$V_p = \frac{qNa \cdot a^2}{2\epsilon} - V_0 \quad (5)$$

เมื่อนำสมการที่ (4) แทนลงในสมการที่ (3) เพื่อหาค่าของ  $b$  เทอมของ  $a, V_0$  และ  $V_{GS}$  จะได้ว่า

$$b = a \left[ 1 - \left( \frac{V_0 + V_{GS}}{V_0 + V_p} \right)^{1/2} \right] \quad (6)$$

ช่องทางเดินกระแสมีความนำไฟฟ้า  $G$  โดยที่

$$G = \frac{\sigma_p \cdot b \cdot w}{\ell} = q \cdot Na \cdot \mu_p \cdot b \cdot \frac{w}{\ell} \quad (7)$$

โดย  $w$  คือ ความกว้างของเกต

$\mu_p$  คือ ความคล่องตัวของโฮล

ดังนั้นในขณะที่แรงดันที่เดรน  $V_{DS}$  มีค่าน้อยๆ กระแส  $I_d$  ที่เกิดขึ้นก็คือ

$$I_d = Vd \cdot G = q \cdot Na \cdot \mu_p \cdot b \cdot \frac{w}{\ell} \cdot V_{DS}$$

แทนค่า  $b$  ด้วยสมการที่ (6) ได้

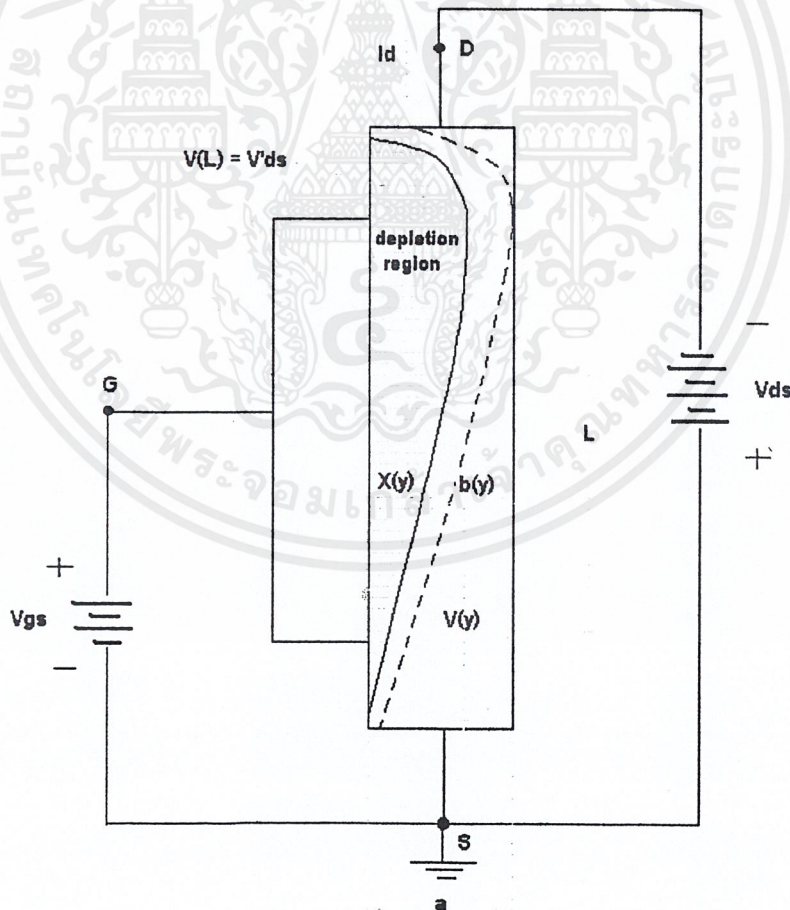
$$I_d = \frac{q \cdot Na \cdot \mu_p \cdot w \cdot a}{\ell} \left[ 1 - \left( \frac{V_0 + V_{GS}}{V_0 + V_p} \right)^{1/2} \right] V_{DS} \quad (8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกฏนำไปใช้

สมการที่ (8) นี้จะใช้ได้ก็เฉพาะกรณี  $V_{GS}$  มีค่าน้อยกว่าขนาดของ  $V_p$  หรือ  $|V_{GS}| < |V_p|$  กล่าวคือ ใช้ได้กับภาวะก่อนที่จะเกิดปรากฏการณ์พินช์ออฟ สมการที่ (8) นี้แสดงให้เห็นว่า ขณะเมื่อแรงดันเดรนมีค่าต่ำๆ และมีแรงดันไบอัสที่เกต  $V_{GS}$  ค่าหนึ่งแล้วกระแสเดรน  $I_d$  จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างเป็นเชิงเส้นกับค่าของแรงดันเดรน ดังนั้นทรานซิสเตอร์นี้จึงกระทำตัวเสมือนเป็นความต้านทานที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่เกตดังแสดงในรูปที่ 3.7 (b)

### 3.3.2 การทำงานในช่วงถึงพินช์ออฟของMESFET

ในขณะที่แรงดันไบอัสที่เดรนมีค่ามากกว่าในตอนที่แล้ว พิจารณาขณะเกิดการอิมิตัวดังในรูปที่ 3.8 ซึ่งแรงดันบวก  $V_{GS}$  เป็นแรงดันที่จ่ายให้เกต และแรงดันลบ  $V_{DS}$  เป็นแรงดันที่จ่ายให้กับเดรน โดยขอสต้ออยู่กับกราวด์



รูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างภายในของ MESFET เมื่อแรงดันเดรนมีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณปลอดพาหะจะขยายลึกเข้าไปในช่องทางเดินกระแสมากยิ่งขึ้น เมื่อ  $V_{GS}$  เท่ากับ  $V_p$  ช่องทางเดินกระแสจะถูกปิดลง การอิมิต์ที่แสดงในรูปที่ 3.8 สามารถที่จะคำนวณความกว้าง  $X(y)$  ของบริเวณปลอดพาหะในช่องทางเดินกระแสที่ระยะทาง  $y$  จากขั้วซอสได้ดังนี้

$$X(y) = dp = k_1 \sqrt{V_0 + V_R(y)} \quad (9)$$

โดยที่

$$k_1 = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q \cdot Na}} \quad (10)$$

$Na$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับในสารกึ่งตัวนำเพอร์ซนิตี

$V_R(y)$  แรงดันไบอัสกลับที่รอยต่อระหว่างเกตกับช่องทางเดินกระแสที่ระยะทาง  $y$  ในช่องทางเดินกระแส

ที่ระยะทาง  $y$  ในช่องทางเดินกระแส

แรงดัน  $V_R(y)$  สามารถเขียนได้ว่า

$$V_R(y) = V_{GS} - V(y) \quad (11)$$

ซึ่ง  $V(y)$  คือ แรงดันระหว่างตำแหน่งใดๆในช่องทางเดินกระแสกับขั้วซอส สำหรับ P-channel MESFET,  $V(y)$  จะมีค่าเป็นลบ

แทนเทอมในสมการที่ (11) ในสมการที่ (9) ได้

$$X(y) = dp = k_1 \sqrt{V_0 + V_{GS} - V(y)} \quad (12)$$

ความกว้างของช่องทางเดินกระแส  $b(y)$  ที่ระยะทาง  $y$  ในช่องทางเดินกระแสสามารถหาได้จากการพิจารณารูปที่ 3.8 คือ

$$b(y) = a - X(y) \quad (13)$$

แทนสมการที่ (12) ในสมการที่ (13) ได้

$$b(y) = a - k_1 \sqrt{V_0 + V_{GS} - V(y)} \quad (14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $a$  คือ ความลึกของช่องทางเดินกระแส

ohm's Law สำหรับความนำไฟฟ้าในช่องทางเดินกระแส คือ

$$J_y = \sigma \xi_y \quad (15)$$

ซึ่ง  $J_y$  คือ ความหนาแน่นของกระแสในทิศทาง  $y$

$\xi_y$  คือ สนาม ไฟฟ้าในทิศทาง  $y$

$\sigma$  คือ ความนำไฟฟ้าของบริเวณช่องทางเดินกระแสเพชรชนิดพี  
สมการที่ (15) สามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{-Id}{w.b(y)} = -\sigma \frac{dV(y)}{dy} \quad (16)$$

โดย  $w$  คือ ความกว้างของช่องทางเดินกระแส

กระแส  $I_d$  จะมีค่าคงที่ในช่องทางเดินกระแส อินทิเกรตสมการที่ (16) ตามช่องทางเดินกระแสจะได้

$$Id \int_0^L dy = \sigma.w. \int_0^{V(L)} b dv \quad (17)$$

โดย  $V(L)$  คือ แรงดันในช่องทางเดินกระแสตามระยะทาง  $L$  จากขอส

ที่ตำแหน่งในช่องทางเดินกระแสซึ่งทำให้เกิดการพินชออฟและอาจจะพิจารณาที่ภายใน  
โหนดเดรน แรงดันเดรนขอส  $V_{DS}$  จากภายนอกจะมาตกคร่อมจุดซึ่งเกิดการพินชออฟมากที่สุด ถ้า  
ให้  $V(L) \approx V_{DS}$  แทนสมการที่ (14) ในสมการที่ (17) และทำการอินทิเกรต จะได้

$$Id \int_0^L dy = \sigma.w. \int_0^{V(L)} [a + k_1 \sqrt{V_0 + V_{GS} - V(y)}] dv$$

$$Id = G_0 \left[ V_{DS} + \frac{2}{3} \frac{k_1}{a} (V_0 + V_{GS} - V_{DS})^{3/2} - \frac{2}{3} \frac{k_1}{a} (V_0 + V_{GS})^{3/2} \right] \quad (18)$$

โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_0 = \frac{\sigma wa}{\ell} \quad (19)$$

ค่าของ  $K1/a$  ซึ่งปรากฏในสมการที่ (18) สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (9) โดยให้ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ  $X(y)$  เท่ากับ  $a$  จะได้

$$a = k_1 \sqrt{V_0 + V_p} \quad (20)$$

และเขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{k_1}{a} = \frac{1}{\sqrt{V_0 + V_p}}$$

แทนลงในสมการที่ (18) ได้

$$I_d = G_0 \left[ V_{DS} + \frac{2(V_0 + V_{GS} - V_{DS})^{3/2} - (V_0 + V_{GS})^{3/2}}{3(V_0 + V_p)^{1/2}} \right] \quad (21)$$

โดยการประมาณว่า  $V_0$  มีค่าน้อยกว่า  $V_{GS}$  และ  $V_p$  มากจึงตัดทิ้งได้ จากสมการที่ (21) ทำการจัดสมการใหม่ได้

$$I_d = G_0 \left[ V_{DS} + \frac{2(V_{GS} - V_{DS})^{3/2} - (V_{GS})^{3/2}}{3(V_p)^{1/2}} \right] \quad (22)$$

และโดยการกำหนดให้  $V_{DS} - V_{GS} = V_{GD}$  ซึ่งเป็นแรงดันเดรน-เกต หรือก็คือ  $V_{GS} - V_{DS} = V_{GD}$  ดังนั้น

$$I_d = G_0 \left[ V_{GS} \left( 1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{V_{GS}}{V_p}} \right) - V_{GD} \left( 1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{V_{GD}}{V_p}} \right) \right] \quad (23)$$

และที่สำคัญก็คือสมการนี้ใช้ได้เฉพาะในกรณีที่  $V_{GD}$  มีค่าน้อยกว่า  $V_p$  เท่านั้น เพราะว่าเมื่อ  $V_{GD} = V_{GS} - V_{DS} = V_p$  แล้ว ช่องทางเดินของกระแสจะถูกปิดสนิทซึ่งในภาวะนี้เราเรียกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาวะพินช์ออฟ (pinch off) และเมื่อเลยภาวะพินช์ออฟนี้แล้ว การวิเคราะห์การทำงานของทรานซิสเตอร์แบบนี้จะมีความยุ่งยากและซับซ้อน แต่อย่างไรก็ดีจากกล่าวโดยย่อๆ ได้ว่า เมื่อ  $V_{GD}$  มีค่ามากกว่า  $V_p$  แล้วแรงดันเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมอยู่ที่บริเวณปลอดพาหะ ตรงบริเวณใกล้ๆ กับด้านเดรนจึงทำให้สนามไฟฟ้าในบริเวณดังกล่าวมีค่าสูง โวลต์ซึ่งมาถึงบริเวณนี้จะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว เข้าไปในเดรนและผลจากการเพิ่มค่า  $V_{GD}$  และ  $V_{DS}$  จะทำให้ตำแหน่งที่เกิดการพินช์ออฟเปลี่ยนแปลงไป โดยตำแหน่งนี้จะเลื่อนเข้ามาใกล้บริเวณทางด้านซอส S แต่อย่างไรก็ดีการเลื่อนตำแหน่งของจุดพินช์ออฟนี้จะทำให้กระแสเดรน  $I_d$  มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก หรือก็คือกระแสเดรนอยู่ในภาวะอิมิตัว

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเดรน  $I_d$ - $V_{DS}$  จากสมการที่ (22) หรือ (23) แสดงได้ดังในรูปที่ 3.9 โดยจะเห็นว่าภายหลังจากเกิดปรากฏการณ์พินช์ออฟแล้วกระแสเดรนจะอิมิตัว ค่าของกระแสอิมิตัวแต่ละค่าของแรงดัน  $V_{GS}$  นั้นก็คือ  $I_{D0}$  ซึ่งหาได้จากสมการที่ (23) โดยการพิจารณาว่า  $V_{GD}-V_{DS} = V_{GD} = V_p$  ดังนั้น

$$I_d = G_0 \left[ V_{GS} \left( 1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{V_{GS}}{V_p}} \right) - \frac{V_p}{3} \right] \quad (24)$$

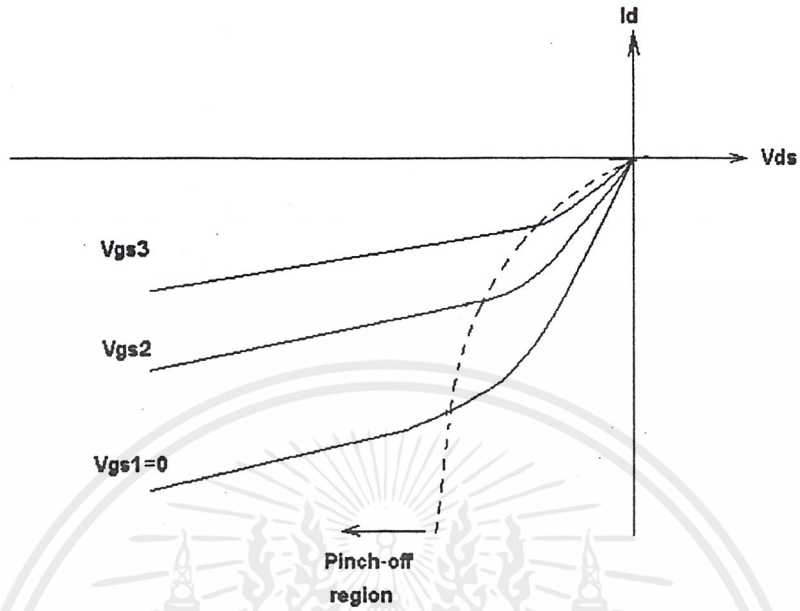
และค่าของกระแสเดรนอิมิตัวในกรณีที่แรงดันเกต  $V_{GS}$  มีค่าเป็น 0 คือ  $I_{D0}$  ซึ่งหาได้จากสมการที่ (24)

$$I_{D0} = -G_0 \frac{V_p}{3} \quad (25)$$

และเมื่อแทนค่าสมการที่ (25) ลงในสมการที่ (24) จะได้สมการใหม่เป็น

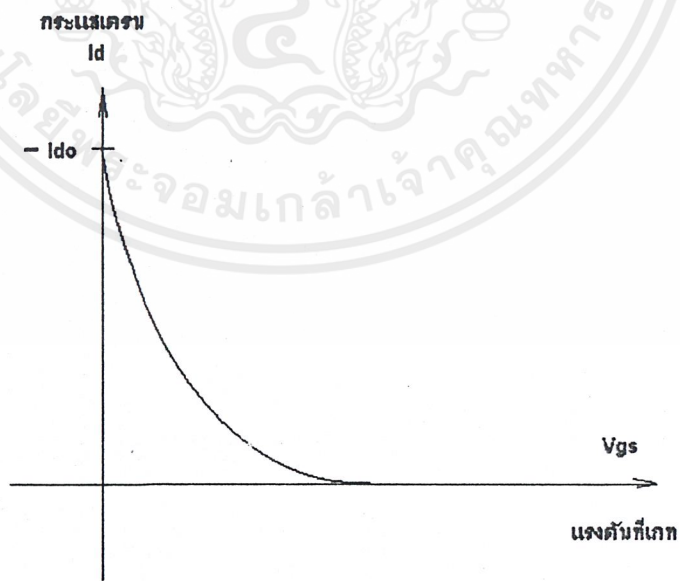
$$I_{ds} = I_{D0} \left[ 1 - 3 \frac{V_{GS}}{V_p} + 2 \left( \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^{3/2} \right] \quad (26)$$

จากสมการที่ (26) สามารถพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน  $I_d$  และแรงดันเกต  $V_{GS}$  ในภาวะพินช์ออฟหรือที่เรียกว่า Transfer characteristic ของ MESFET สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน  $I_d$ - $V_{ds}$  ของ

MESFET



รูปที่ 3.10 แสดง Transfer characteristics ของ MESFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ของค่าความนำไฟฟ้าของ MESFET ขณะที่อยู่ในภาวะเหนือจุด  
พินช์ออฟ คือค่า  $g_m$  หาได้จากสมการ (26) โดย

$$g_m = \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_g} \Big|_{dคงที่} \quad (27)$$

จากสมการที่ (26) โดยแทน  $V_p = V_{GS} - V_{DS}$  จะได้

$$I_{ds} = I_{d0} \left[ 1 - 3 \frac{V_{GS}}{V_{GS} - V_{DS}} + 2 \left( \frac{V_{GS}}{V_{GS} - V_{DS}} \right)^{3/2} \right]$$

ดังนั้น

$$g_m = \frac{\partial}{\partial V_g} \left[ I_{d0} \left\{ 1 - 3 \frac{V_{GS}}{V_{GS} - V_{DS}} + 2 \left( \frac{V_{GS}}{V_{GS} - V_{DS}} \right)^{3/2} \right\} \right]$$

$$g_m = I_{d0} \frac{3V_{DS}}{V_p^2} \left[ 1 - \sqrt{\frac{V_{GS}}{V_p}} \right] \quad (28)$$

ค่า  $g_m$  เรียกว่าทรานคอนดักแตนซ์(transconductance) และค่าสูงสุดคือ  $g_{m0}$  จะปรากฏ  
เมื่อ  $V_{GS} = 0$  ดังนั้น

$$g_{m0} = I_{d0} \frac{3V_{DS}}{V_p^2} \quad (29)$$

โดย จาก  $V_{GS} - V_{DS} = V_p$  เมื่อค่า  $V_{GS} = 0$  ดังนั้น  $-V_{DS} = V_p$  แทนลงในสมการที่ (29) ได้

$$g_{m0} = -I_{d0} \frac{3}{V_p} \quad (30)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (30) กับสมการที่ (25) แล้วจะพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g_{m0} = G_0$$

ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ที่แรงดันเกตค่าต่างๆ นั้นอาจประมาณได้โดย

$$g_m \approx g_{m0} \left[ 1 - \left( \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^{1/2} \right]$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้าง MEFET ที่สร้างจากฟิล์มเพชรโดยเริ่มจากการสร้างฟิล์มเพชรบนแผ่นซิลิกอนเพื่อนำไปใช้สร้างรอยต่อต่างๆ อันเป็นส่วนประกอบของโครงสร้าง MEFET อันได้แก่ รอยต่อแบบโอห์มมิกเป็นส่วนรอยต่อที่อยู่ระหว่างของเดรน (Drain) และส่วนของซอส (Source) กับฟิล์มเพชร รอยต่อแบบชอตตีก็ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ระหว่างขาเกต (Gate) กับสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชร โดยมีกระบวนการทำตามลำดับดังต่อไปนี้

#### 4.1 กระบวนการเตรียมแผ่นฐานรอง

การทดลองนี้ เลือกใช้ซิลิกอนเป็นฐานรองในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยใช้ซิลิกอนชนิดพีระนาบ (100) มีความหนาประมาณ 400 ไมครอน ก่อนที่จะนำฐานรองซิลิกอนนี้ไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จำเป็นต้องทำความสะอาดเบื้องต้น และเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอนดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 การทำความสะอาดเบื้องต้นผิวหน้าฐานรองซิลิกอน

- กำจัดสิ่งสกปรก ผุนละอองบนผิวหน้าซิลิกอนในน้ำ DI (Deionized water) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning) แล้วล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง
- ลอกชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าฐานรองด้วยกรด HF 5% แล้วล้างออกด้วยน้ำ DI
- กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะบริเวณผิวหน้าโดยการต้มด้วยกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$  acid)
- ล้างกรด  $\text{HNO}_3$  ด้วยการต้มในน้ำ DI และล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $\text{N}_2$
- กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมันบริเวณผิวหน้า โดยการต้มด้วยสารละลายไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)
- ล้างสารละลายไตรคลอโรเอทิลีนออกด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง และล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกชั้นออกไซด์ออกด้วยสารละลายกรด HF 5% และล้างออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้ง

##### 4.1.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร

หลังจากการทำความสะอาดเบื้องต้นกับฐานรองซิลิกอนครบทุกขั้นตอนตามหัวข้อที่ 4.1.1 แล้วจะทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอนก่อนนำไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชร เพื่อเป็นการกระตุ้นฐานรองให้มีความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันเพิ่มมากขึ้นโดยการทดลองนี้ เลือกใช้การขัดด้วยครีมเพชรเป็นการเตรียมผิวฐานรอง ครีมเพชรที่ใช้ในการขัดมีขนาดของเม็ดผลึก 0.25 ไมครอน ดัง

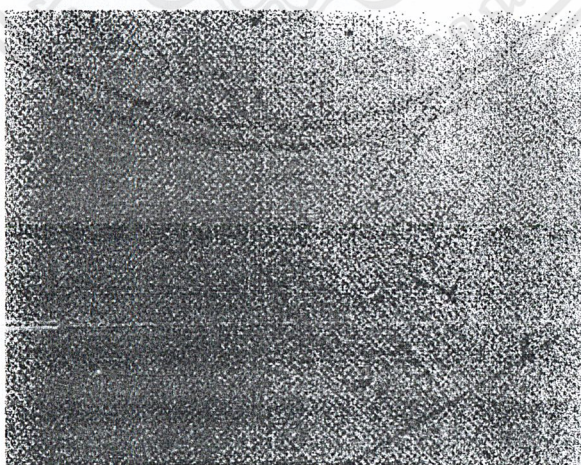
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงในรูปที่ 4.1 ใช้เวลาในการขัดประมาณ 1-2 ชั่วโมงหลังจากนั้นจึงทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิกอนอีกครั้งเพื่อล้างครีมนเพชรออกด้วยวิธีดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ครีมนเพชรที่ใช้ในการขัดผิวหน้าซิลิกอนขนาดเมล็ดผลึก 0.25 ไมครอน

- ต้มแผ่นซิลิกอนในสารละลายไตรคลอโรเอทิลีนเพื่อล้างครีมนเพชรออก
- ล้างสารละลายไตรคลอโรเอทิลีนออกด้วยอะซิโตนโดยสั่งในเครื่องสั่งความถี่สูง
- ล้างอะซิโตนออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- กำจัดชั้นออกไซด์ที่อาจจะเกิดขึ้นอีกครั้งด้วยสารละลายกรด HF 5 %
- ล้างกรด HF 5 % ออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนอีกครั้ง



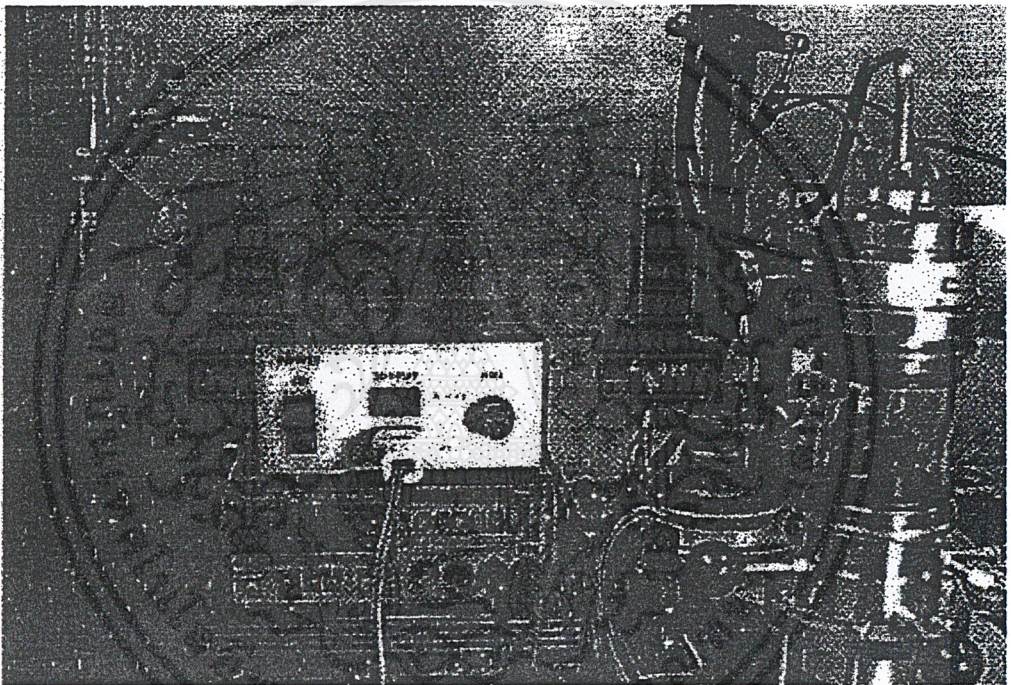
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าฐานรองซิลิกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์หลังจากขัดด้วยครีมนเพชรขนาดเมล็ด 0.25 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำแผ่นซิลิกอนนี้ไปตรวจสอบรอยขีดที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งลักษณะผิวหน้าที่ผ่านการขีดด้วยครีมเพชรนี้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นฐานรองที่พร้อมจะนำไปสังเคราะห์ฟิล์มต่างๆได้ต่อไป

#### 4.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

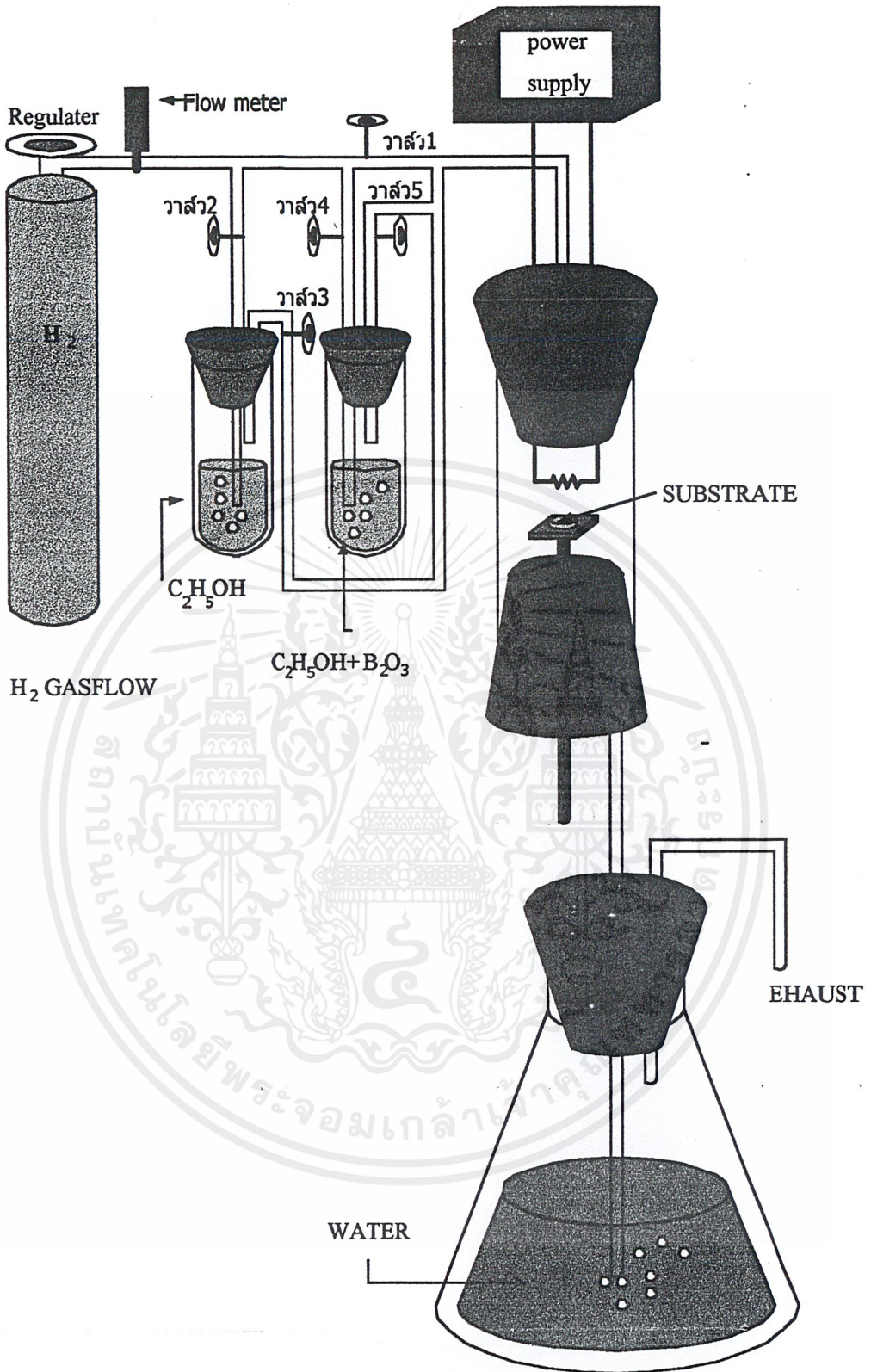
การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรทั้งชนิดพีและชนิดอินทรีนซิคในการวิจัยนี้ จะอาศัยวิธี CVD แบบ Hot-Filament (HFCVD) ด้วยชุดเครื่องมือในรูปที่ 4.3 โดยจะมีไดอะแกรมของระบบ CVD ที่ใช้ได้อย่างง่ายๆดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งมีขั้นตอนในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

- ปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจนจากถังผ่านวาล์ว 1 เข้าใน chamber ช่วงเวลาหนึ่ง (15 นาที) เพื่อให้ภายใน chamber เป็นบรรยากาศของไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว
- ปิดวาล์ว 1 แล้วเปิดวาล์ว 2 และ 3 เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนไหลผ่านแหล่งจ่ายเป็นตัวพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้า chamber ด้วยอัตราการไหลคงที่ ควบคุมโดย Flow meter
- ค่อยๆจ่ายกระแสอย่างช้าๆ ให้กับไส้หลอดทั้งสแตนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของไส้หลอดจนมีอุณหภูมิประมาณ 2000°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงเครื่องมือการทำ CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปรับระยะห่างระหว่างไส้หลอดทั้งสแตงกับฐานรองซิลิกอนให้มีระยะห่างที่เหมาะสม
- สร้างฟิล์มเพชรอินทรีนซิค โดยใช้เวลาในการสร้างประมาณ 60 นาที
- ปิดวาล์วที่ 2 และ 3 เปิดวาล์ว 4 และ 5 เพื่อทำการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี โดยใช้เวลา 40 นาที
- เมื่อครบระยะเวลาที่ต้องการสร้างแล้วจึงค่อยๆลดระยะของฐานรองซิลิกอนให้ต่ำลงจากไส้หลอดหลายๆ พร้อมกับลดการจ่ายกระแสลงอย่างช้าๆ
- ปิดถังก๊าซไฮโดรเจนและรอจนกระทั่งก๊าซไฮโดรเจนในระบบที่ยังค้างอยู่ออกจนหมด
- นำชิ้นงานที่ได้ไปใช้ในกระบวนการถัดไปหรือตรวจสอบต่อไปได้

#### 4.3 กระบวนการสร้าง MESFET

ในกระบวนการนี้จะมีการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร 2 ลักษณะ นั่นคือ การสร้างรอยสัมผัสแบบขอตติ์โดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วสัมผัสบนฟิล์มเพชรชนิดพีเพื่อสร้างเกตและการสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มิกโดยใช้โลหะทองคำเป็นขั้วสัมผัสบนฟิล์มเพชรชนิดพีเพื่อสร้างซอสและเดรน ตามที่กล่าวเอาไว้ในบทที่ 3 โดยมีขั้นตอนการสร้างดังจะกล่าวต่อไปนี้

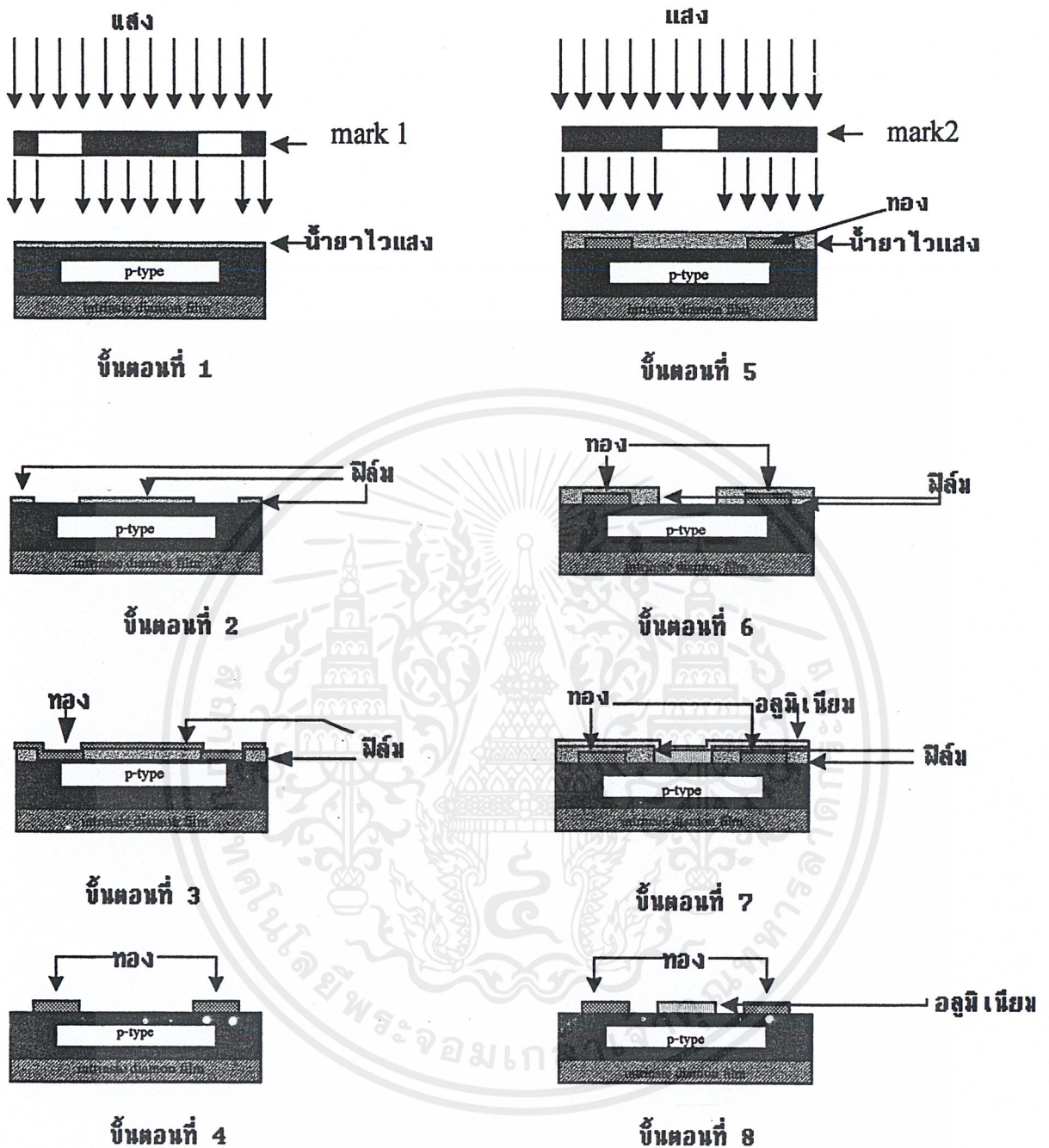
##### 4.3.1 การสร้างซอสและเดรน

ในขั้นตอนนี้ใช้โลหะทองคำสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มิก เพื่อทำการสร้างขั้วซอส (Source) และขั้วเดรน (Drain) ซึ่งมีลำดับขั้นตอนดังนี้

##### 4.3.1.1 กระบวนการทำความสะอาดพื้นผิวฟิล์มเพชรเริ่มต้น

จำเป็นต้องมีการทำความสะอาดพื้นผิวเพื่อกำจัดคราบไขมันและสิ่งสกปรกหรือสิ่งเจือปนต่างๆออกจากพื้นผิวฟิล์มเพชรก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการต่อไป มีขั้นตอนดังนี้

1. ล้างในน้ำ DI
2. ต้มในไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที
3. ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสันความถี่สูง (Supersonic cleaner) เป็นเวลา 3 นาที
4. ล้างด้วยน้ำ DI
5. เป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน



รูปที่ 4.5 แสดงลำดับการเคลือบทองและอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.1.2 กระบวนการเคลือบทองลงบนฟิล์มเพชร

นำมาผ่านกระบวนการโฟโวลติโทกราฟี ซึ่งในกระบวนการพิมพ์ลวดลายจากกระจกต้นแบบลงบนฟิล์มที่ผ่านการเคลือบน้ำยาไวแสง มีขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นไล้ความชื้นที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ 5014) โดยสปินเนอร์ที่ 3000 รอบ/นาทีเป็นเวลา 20 วินาที
- อบฟิล์มที่ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกมาร์คที่ I (Mark I) ใช้เวลา 1 นาที
- Develop ฟิล์มโดยทำดังนี้
  - จุ่มในน้ำยา AZ develop 2 แก้ว แก้วละ 1 นาทีแล้วล้างน้ำ DI 2 แก้วๆ ละ 10 วินาที
- อบฟิล์มที่ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- ทำการเคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบสูญญากาศ (Vacuum Evaporator)
- ทำการลอกฟิล์มโดยมีวิธีดังนี้
  - จุ่มในน้ำยา Acetone
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
  - เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

#### 4.3.2 การสร้างเกต

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า ในการทดลองครั้งนี้เลือกใช้โลหะอลูมิเนียมเป็นรอยลัมผัสแบบขดตติกับฟิล์มเพชรชนิดพี โดยในวิธีการเคลือบก็ใช้หลักการเดียวกันกับวิธีเคลือบทองเพียงแต่เปลี่ยนมาใช้อลูมิเนียมในมาร์คที่ 2 (Mark II)

การเคลือบชั้นโลหะในสูญญากาศ (Au, Al) จะทำภายใต้ความดัน  $1.3 \times 10^{-6}$  ทอริโดยวิธีแบบความร้อนด้วยเครื่อง Vacuum evaporator จากการเคลือบจะให้ความหนาของชั้นโลหะประมาณ 1 ไมครอน

#### 4.3.2 ขบวนการ sintering

โดยการนำชิ้นงานที่ได้ทิ้งไว้ในบรรยากาศของไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 12 นาที

#### 4.4 กระบวนการสร้าง MESFET เพื่อศึกษาผลของเงื่อนไขต่างๆ

##### 4.4.1 ศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อ

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสแบบชอตต์กีและรอยสัมผัสแบบโอห์มิก โดยขึ้นงานแต่ละแผ่นที่นำมาวัดยังได้ควบคุมปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ B:C (อัตราส่วนผสมระหว่างโบรอนกับเอทิลแอลกอฮอล์) โดยมีอัตราส่วน B:C ในปริมาณที่ใช้คือ 10ppm มีขั้นตอนการสร้างดังนี้

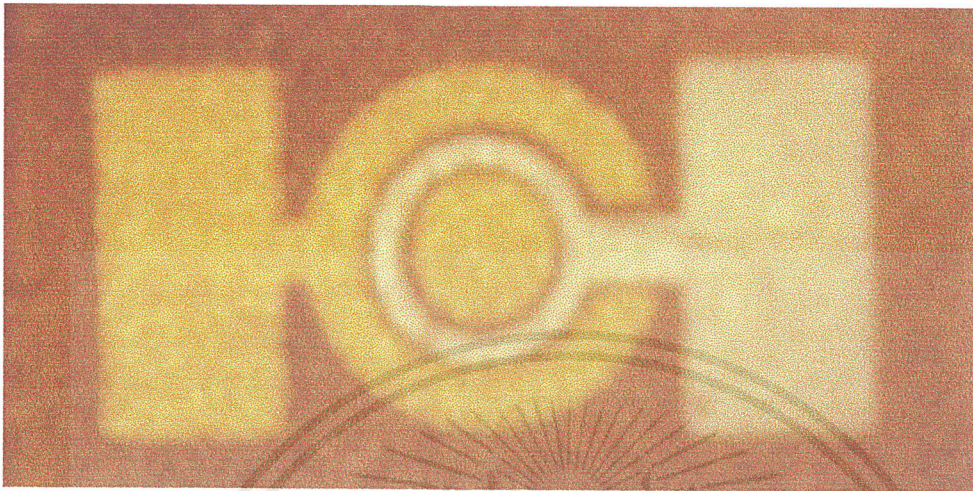
- นำแผ่นฐานรองซิลิกอนชนิดพี ระบาย<100> มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 4.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองของซิลิกอนตามหัวข้อที่ 4.1.2
- ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคและฟิล์มเพชรชนิดพีตามหัวข้อที่ 4.2 โดยในที่นี้ใช้อัตราส่วน B:C ค่า 10ppm
- กำจัดเขม่าคาร์บอนหรือพวกกราไฟต์ด้วยการต้มด้วยสารละลายของ  $H_2SO_4 + CrO_4$  ล้างออกด้วยการต้มด้วยสารละลายกรด  $HCl + HNO_3$  ต้มในน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซ  $N_2$
- ตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วยวิธี Raman spectroscopy และ SEM
- ทำการสร้าง MESFET ตามหัวข้อที่ 4.3

##### 4.4.2 ศึกษาผลการทำงานของ MESFET

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET เมื่อทำการให้ไบอัสโดยที่  $V_{gs}$  มีค่าต่างๆ ขั้นตอนในการวัดเราใช้เครื่องมือ HP4061A เป็นเครื่องมือที่ทำหน้าที่จกการและควบคุมการไบอัส โดยมีขั้นตอนการวัดดังนี้

- เปิดเครื่อง HP4061A
- วางชิ้นงานลงบนฐานของโพรบ (Probe) แล้วทำการปรับหัวโพรบจิมลงบนขั้วโลหะ
- เข้าสู่โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการจกไบอัสรอยต่อ แล้วทำการป้อนหรือกำหนดช่วงในการวัดและช่วงแสดงผลการวัด พร้อมทั้ง step หรือ ความละเอียดในการวัด
- RUN โปรแกรม รอสักครู่จะปรากฏ รูปภาพและข้อมูลที่ได้จากการวัด

จากกระบวนการสร้างที่กล่าวมาสามารถแสดงรูปร่างของ MESFET ได้ดังในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ซึ่งแสดงรูปร่างของ MESFET ที่ได้ทำการสร้างขึ้นมา เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของ MESFET



รูปที่ 4.6 แสดงรูป MESFET



รูปที่ 4.7 แสดงรูป MESFET อีกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

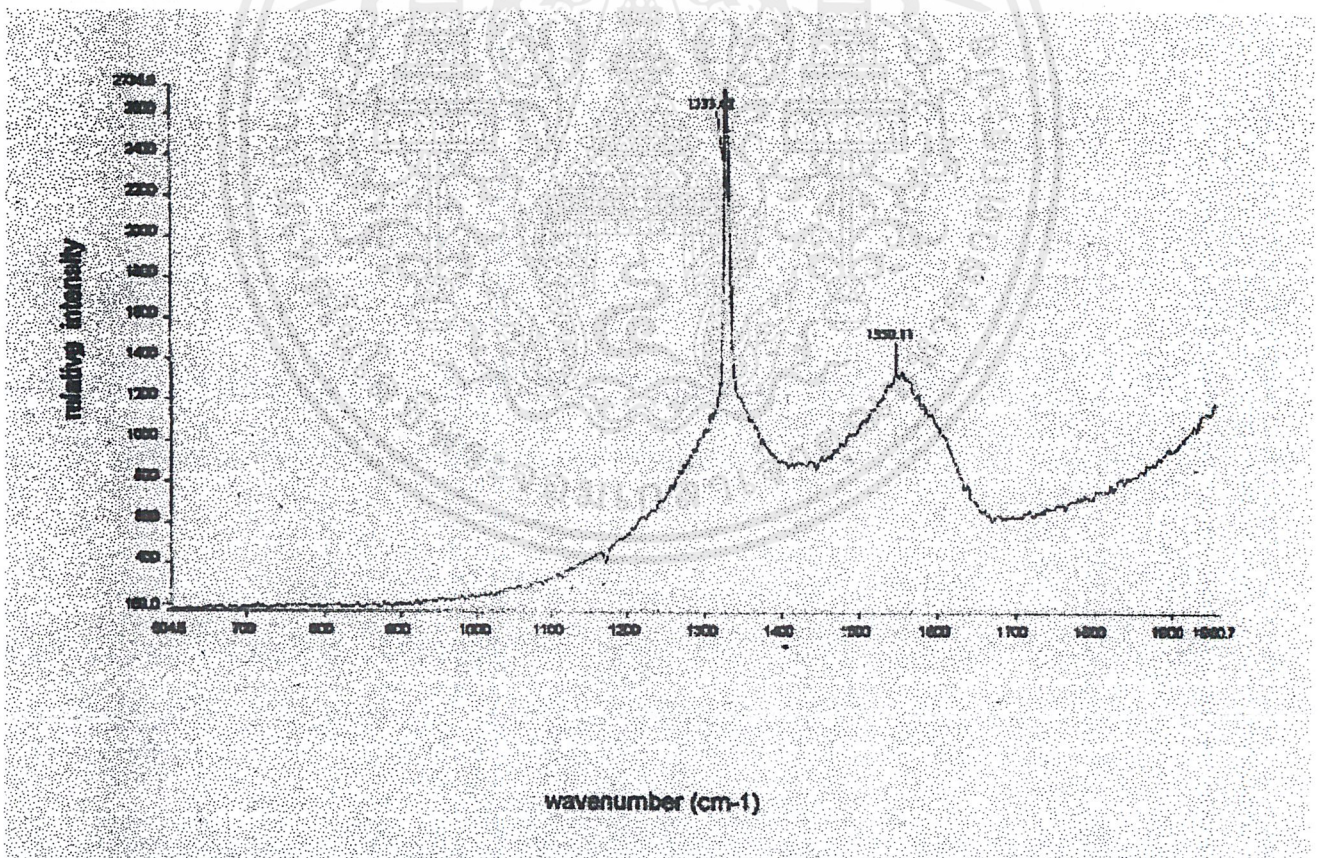
## บทที่ 5

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อผ่านกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิกอนเสร็จแล้ว เราก็จะนำแผ่นชิ้นงาน มาวัดและตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สร้างได้ว่ามีคุณสมบัติเป็นอย่างไรบ้าง ซึ่งในบทนี้จะเสนอถึงผลการทดลองพร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ดังต่อไปนี้

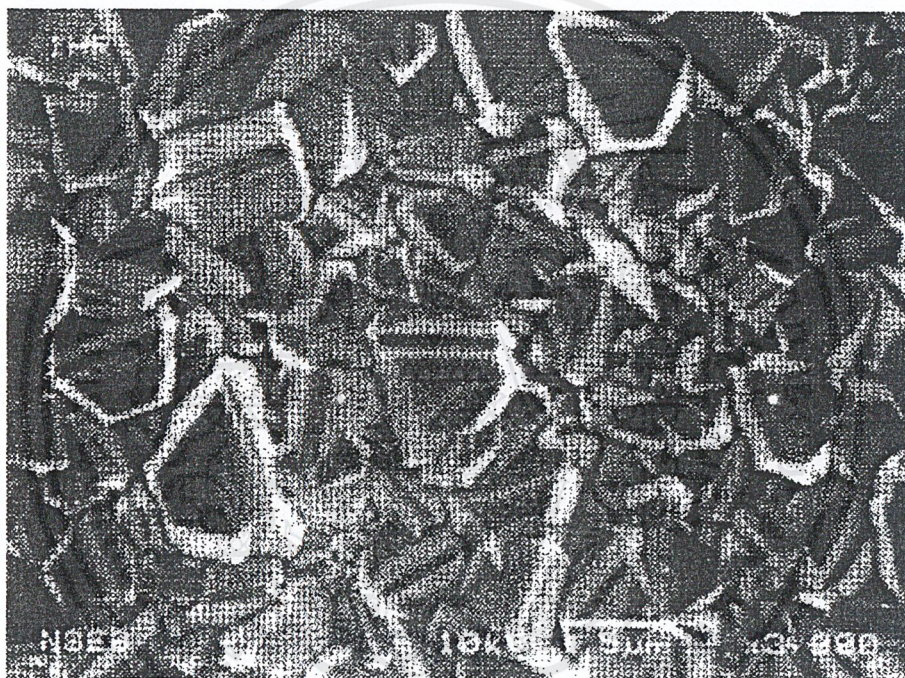
#### 5.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

สำหรับในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ก่อนที่จะนำไปสร้างเป็น MESFET เพื่อศึกษาผลของเงื่อนไขอื่น ๆ อีกต่อไป โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรนี้จะอาศัย Raman Spectroscopy และ Scanning Electron Microscopy เพื่อตรวจสอบความเป็นเพชร และลักษณะพื้นผิวของเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธี HFCVD ตามลำดับซึ่งแสดงดังในรูปที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรจากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD

จากรูปที่ 5.1 เป็นการตรวจสอบด้วยวิธี Raman spectroscopy ซึ่งผลที่ได้เมื่อเรานำค่าไปเปรียบเทียบกับตารางแสดง Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆ ของคาร์บอน [13] ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่ายอดคลื่นของ Raman spectrum ที่วัดได้จากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์นี้มีค่าอยู่ที่  $1333\text{ cm}^{-1}$  อย่างชัดเจน ถือได้ว่าได้ฟิล์มเพชรที่มีค่าใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติ แม้ว่าจะมียอดของอะมอร์ฟัส ( $1550\text{ cm}^{-1}$ ) รวมอยู่ด้วยแต่ความสูงของยอดกราฟต่ำกว่ามาก นั่นคือฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติเป็นเพชรและมีปริมาณอะมอร์ฟัสต่ำมาก นอกจากนี้เมื่อทำการตรวจสอบด้วยวิธี SEM จะได้ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ในรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างหนึ่งของฟิล์มเพชรชนิดพีและฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก

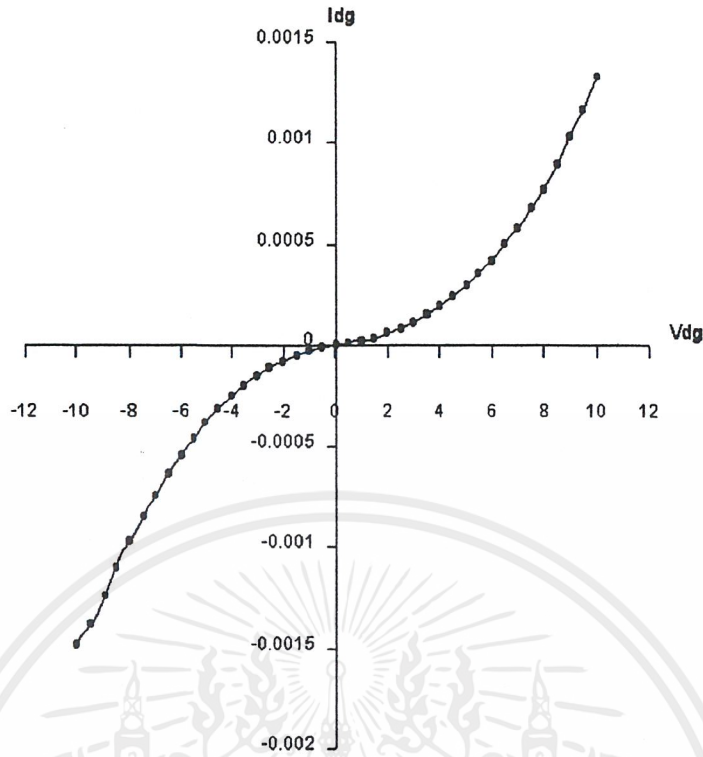


รูปที่ 5.2 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี HFCVD

## 5.2 ผลการตรวจสอบรอยสัมผัสแบบขดดัก

### 5.2.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัส เทรน-เกท

หลังจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพีจากการเติมสารเจือปนด้วยอัตราส่วน B:C 10 ppm และทำการ สร้างขั้วโลหะ เกท ซอส และเดรน แล้วก็ให้นำ MESFET มาตรวจสอบคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างเดรนกับเกทจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.3

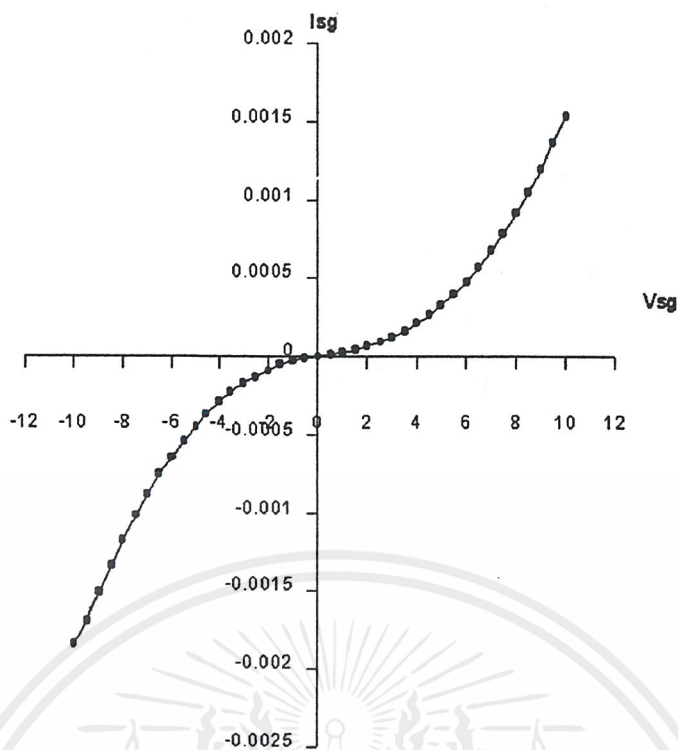


รูปที่ 5.3 คุณลักษณะกระแส  $I_{DG}$ - แรงดัน  $V_{DG}$  ของรอยสัมผัสเดรน-เกต

จากผลการทดลองที่ได้จะพบว่ารอยสัมผัสระหว่างเกตกับฟิล์มเพอร์ซันดพีเป็นรอยสัมผัสแบบชอตติก เมื่อให้ไบอัสตรงรอยต่อชอตติกนี้จะเริ่มนำกระแสเมื่อค่า  $V_{GD}$  มีค่าประมาณ 0.5 โวลท์ และเมื่อให้ไบอัสกลับแกัรอยต่อจะเกิดกระแสไหลเนื่องจากการเบรคดาวที่แรงดัน  $V_{DG}$  มีค่าประมาณ 0.7 โวลท์ เป็นผลให้เมื่อเราให้ไบอัสกลับที่แรงดันมากกว่า 0.7 โวลท์แล้วจะมีกระแสรั่วไหลมาก

### 5.2.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัส ซอส-เกต

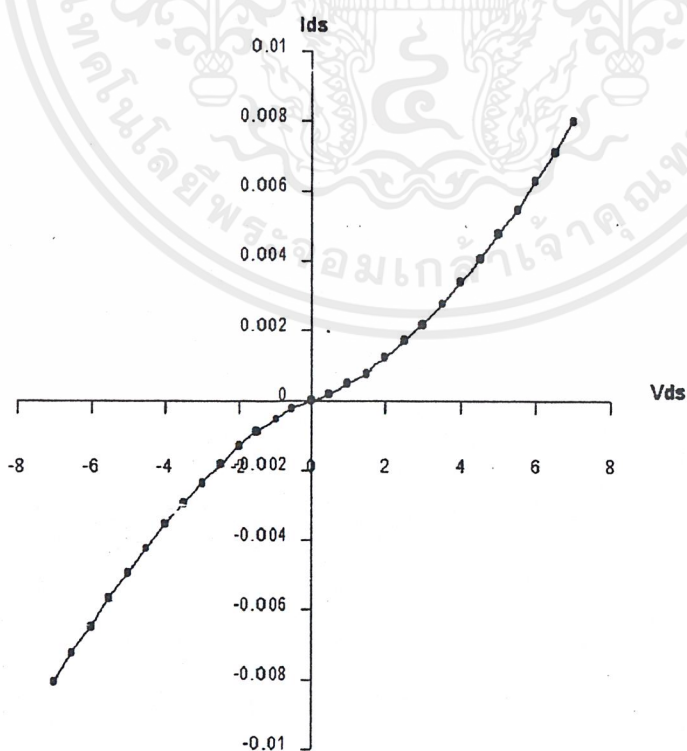
เมื่อเราทำการวัดคุณสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างซอสกับเกตโดยการให้ไบอัสแกัรอยสัมผัสดังกล่าวผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งจะพบว่าคุณสมบัติของรอยสัมผัสซอสกับเกตมีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสแบบชอตติกเช่นเดียวกับรอยสัมผัสระหว่างเดรนกับเกต โดยเมื่อเราให้ไบอัสจะพบว่าไดโอดตัวนี้จะเริ่มนำกระแสที่ 0.5 โวลท์ และเมื่อให้ไบอัสกลับที่แรงดันมากกว่า 0.7 โวลท์ จะมีกระแสรั่วไหลค่ามากเช่นเดียวกับกรณีของรอยสัมผัสเดรน-เกต



รูปที่ 5.4 คุณลักษณะกระแส  $I_{SG}$ - แรงดัน  $V_{SG}$  ของรอยสัมผัส ซอส-เกต

### 5.3 ผลการตรวจสอบรอยสัมผัสแบบโอห์มมิระหว่างซอสกับเดรน

เมื่อทำการวัดคุณสมบัติรอยต่อระหว่างซอสกับเดรนผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5.5



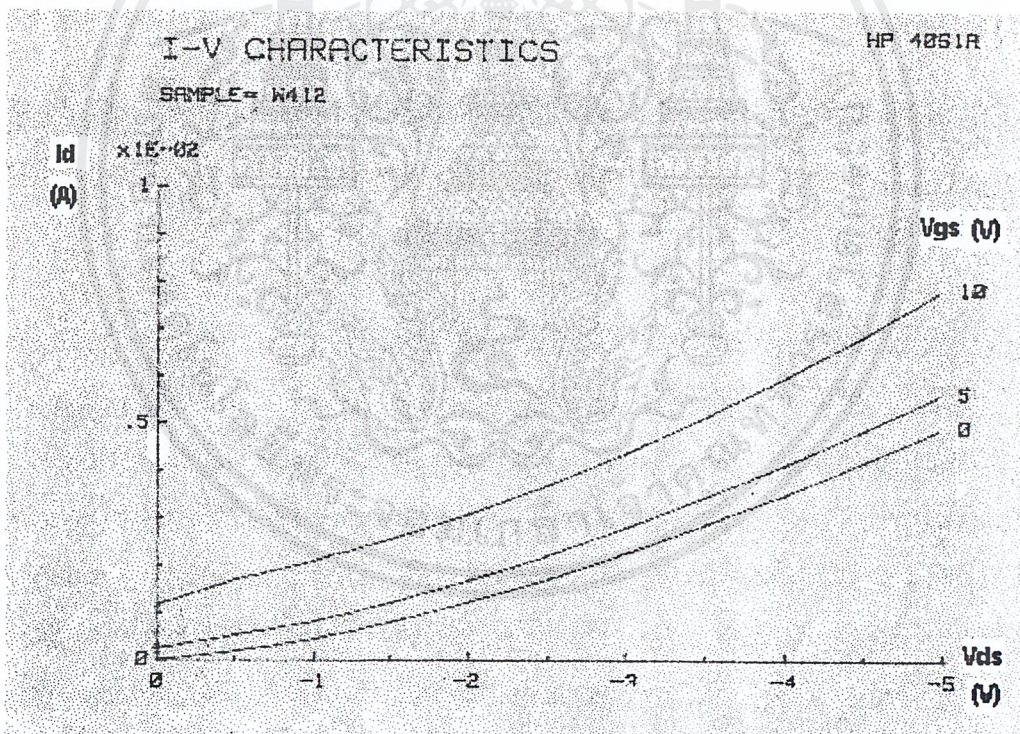
รูปที่ 5.5 คุณลักษณะกระแส  $I_{DS}$ - แรงดัน  $V_{DS}$  ของรอยสัมผัส ซอส-เดรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

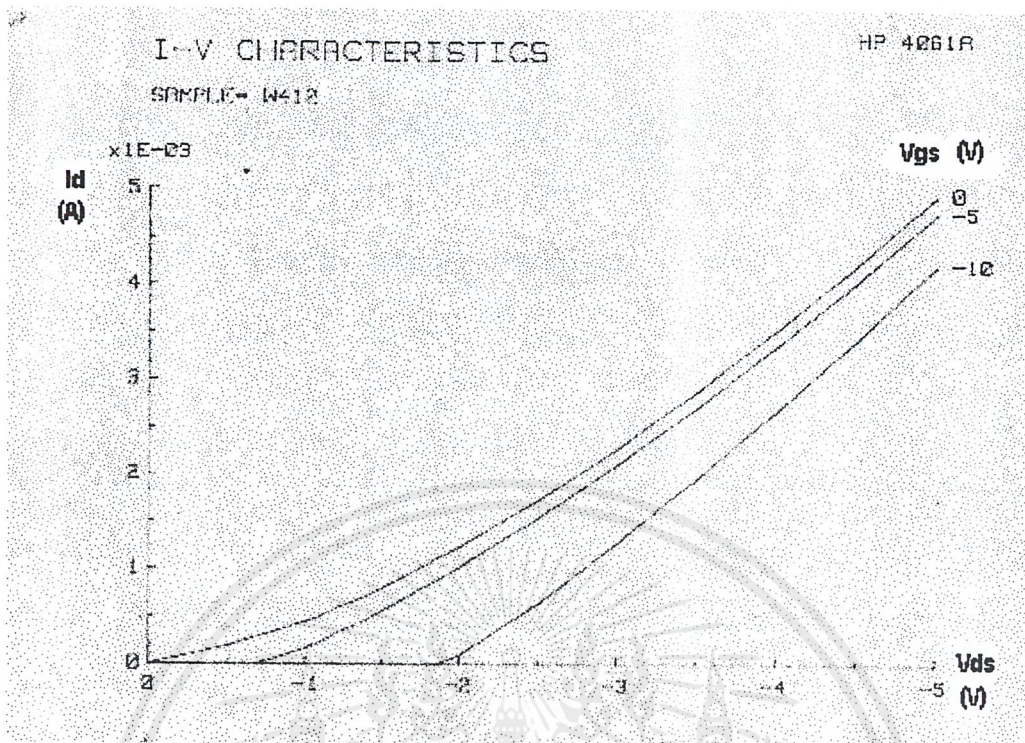
จากผลการทดลองที่ได้จะพบว่ารอยสัมผัสระหว่างเดรน-ซอส ซึ่งเป็นรอยสัมผัสระหว่างทองคำกับสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดที่มีลักษณะของกราฟโค้งงอในช่วงของการให้แรงดัน  $V_{DS}$  ที่มีค่าต่ำซึ่งกราฟจะไม่เป็นเชิงเส้น และเมื่อให้แรงดัน  $V_{DS}$  มีค่ามากยิ่งขึ้นการนำกระแส  $I_{DS}$  ก็จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ดังนั้นเราอาจกล่าวได้ว่ารอยสัมผัสเดรนซอสมีลักษณะเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิกโดยที่เมื่อแรงดัน  $V_{DS}$  มีค่าต่ำรอยสัมผัสนี้จะเป็นรอยสัมผัสโอห์มิกที่ไม่ดี และเมื่อแรงดัน  $V_{DS}$  มีค่ามากยิ่งขึ้นรอยสัมผัสนี้ก็จะกลายเป็นรอยสัมผัสโอห์มิกที่ดีคือมีลักษณะของกราฟกระแส-แรงดัน เป็นเชิงเส้น

#### 5.4 การตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET

หลังจากการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานต่างๆ แล้วเราก็จะทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET เพื่อหาความสัมพันธ์ของกระแสเดรน  $I_D$  กับแรงดันเดรน  $V_{DS}$  ในขณะที่ให้แรงดันเกต  $V_{GS}$  ค่าต่างๆ



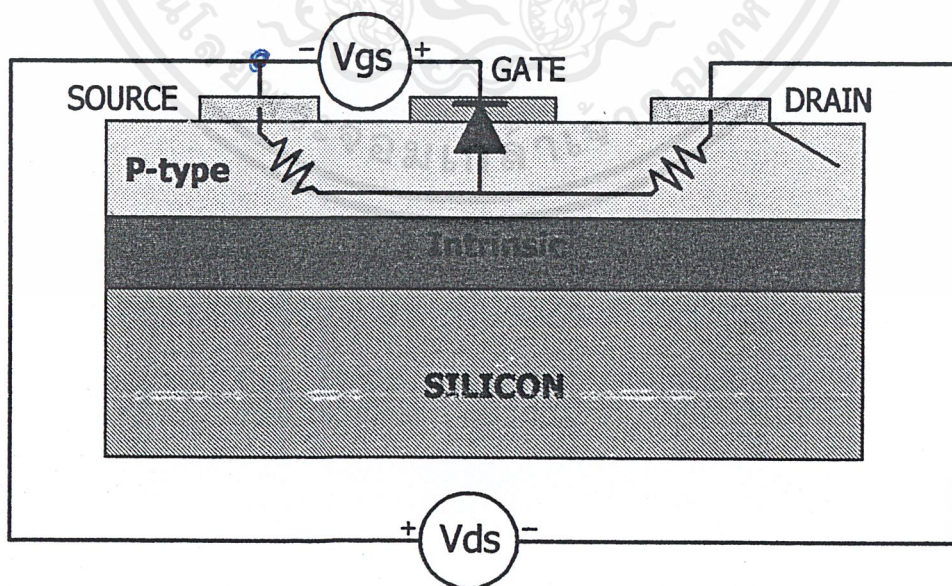
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรน  $I_D$  กับแรงดันเดรน  $V_{DS}$  เมื่อให้ไบอัสกลับที่เกต



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรน  $I_D$  กับแรงดันเดรน  $V_{DS}$  เมื่อให้ไบอัสตรงที่เกต

เมื่อทำการให้ไบอัสที่เดรนด้วยแรงดัน  $V_{DS}$  และให้แรงดันไบอัสกลับที่เกต  $V_{GS}$  ผลการทดลองวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 จากผลการทดลองที่ได้จะพบว่ากราฟที่ได้ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันตามทฤษฎีของ MESFET ที่ได้กล่าวไว้คือในทางทฤษฎีแล้วเมื่อเราทำการให้แรงดันไบอัสกลับแก่อรอยสัมผัสแบบขอตติก็แล้วกระแสเดรน  $I_D$  จะต้องมีค่าลดลงตามสมการที่(22) แต่ผลที่ได้จากการทดลองค่ากระแสเดรน  $I_D$  กลับมีค่าเพิ่มมากขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติของรอยต่อขอตติที่ระหว่างเกตอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดที่มีค่ากระแสรั่วไหลสูงขณะที่เราทำการให้ไบอัสกลับนั่นเองซึ่งเราจะทำการพิจารณาผลที่ได้จากรูปที่ 5.6 ต่อไป สำหรับในกรณีที่ให้ไบอัสเดรนด้วยแรงดัน  $V_{DS}$  เหมือนเดิมแต่ให้ไบอัสตรงที่เกตด้วยค่าแรงดัน  $V_{GS}$  ผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 5.7 โดยกราฟที่แสดงในรูปที่ 5.7 เมื่อให้ไบอัสตรงที่เกต  $V_{GS}$  มีค่าเพิ่มมากขึ้นในทางทฤษฎีของ MESFET แล้วกระแสเดรน  $I_D$  จะไม่เพิ่มขึ้นกล่าวคือกระแสเดรนจะมีค่าสูงสุดที่  $V_{GS}=0$  V คือมีค่าเท่ากับ  $I_{D0}$  แต่จากผลการทดลองที่ได้เมื่อให้ไบอัสตรงที่เกต  $V_{GS}$  มีค่าเพิ่มมากขึ้นกลับมีกระแสไหลน้อยลงซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎีของ MESFET ซึ่งเราจะกล่าวถึงสาเหตุดังกล่าวต่อไป

เมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 5.6 และ 5.7 พบว่าเมสเฟทที่ได้จากกระบวนการสร้างนั้น มีคุณสมบัติการทำงานไม่เป็นไปตามทฤษฎีการนำกระแสของเมสเฟทหรือกล่าวคือ ส่วนของขาเกตไม่สามารถควบคุมปริมาณช่องทางเดินกระแสให้แคบลงในขณะที่ป้อนแรงดันไฟบวกที่ขาเกต และไม่สามารถขยายช่องทางเดินกระแสให้กว้างขึ้นได้ขณะที่ป้อนแรงดันไฟลบที่ขาเกต เราจึงได้ทำการวิเคราะห์หาเหตุผลว่าทำไมถึงได้กราฟในลักษณะดังกล่าว ซึ่งจากการวิเคราะห์พอจะสรุปได้ว่า ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของชิ้นงานไม่เป็นไปตามโครงสร้างเมสเฟท แต่จะมีลักษณะโครงสร้างเหมือนดังรูปที่ 5.8 จากรูปอธิบายได้ว่าคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีเสมือนมีไดโอดตัวหนึ่งต่อคั่นอยู่ระหว่างรอยต่อ โดยที่คุณสมบัติของไดโอดตัวนี้จะมีแรงดันตกคร่อมบริเวณรอยต่อในกรณีไบอัสตรงอยู่ประมาณ 0.5 โวลต์โดยมีค่าความต้านทานภายในค่าๆ หนึ่ง และกรณีทางด้านไบอัสกลับจะมีค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่ต่ำมากประมาณ 0.8 โวลต์โดยที่มีค่าความต้านทานภายในค่าๆ หนึ่งเช่นกัน ซึ่งไม่เป็นไปตามโครงสร้างของเมสเฟท ที่ว่าบริเวณรอยต่อนี้ต้องแสดงคุณสมบัติเป็นรอยต่อแบบข้อตัก (ใช้กราฟในรูปที่ 5.3 และ 5.4 ที่ได้จากการวัดรอยต่อบริเวณขาเกตกับซอสและขาเกตกับเดรน พิจารณารูปประกอบ) และถ้าพิจารณาต่อถึงคุณสมบัติการนำกระแสบริเวณรอยต่อระหว่างทองคำกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งเป็นส่วนของขาเดรนกับซอส (โดยพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 5.5 ประกอบ) ในทางทฤษฎีของเมสเฟทคุณสมบัติระหว่างรอยต่อแบบนี้ต้องเป็นโอห์มิกได้จากกราฟที่ได้พบว่าคุณสมบัติการนำกระแสบริเวณรอยต่อนี้ สามารถนำกระแสได้สองทางแต่กราฟไม่เป็นเชิงเส้นมากนักทั้งนี้อาจจะมีผลเนื่องจากรอยสัมผัสทองคำกับสารกึ่งตัวนำอาจจะสัมผัสไม่ทั่วถึงจึงทำให้เกิด air gap บริเวณรอยสัมผัสซึ่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น



รูปที่ 5.8 แสดงโครงสร้างภายในของชิ้นงานที่ได้จากการสร้าง

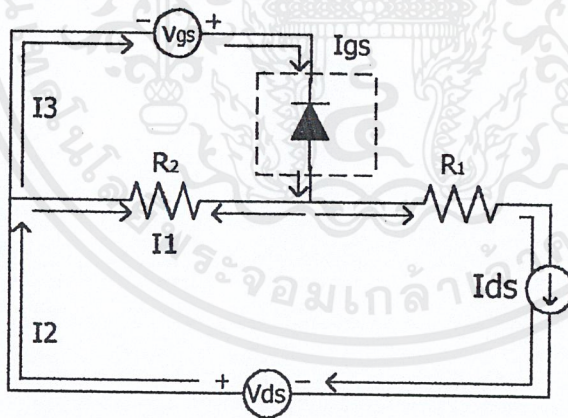
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณรอยสัมผัสซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการนำกระแสผ่านรอยต่อบริเวณนี้

จากกราฟในรูปที่ 5.5 พิจารณาขณะที่ให้ไบอัสที่ขาเดรนเป็นลบเมื่อเทียบกับซอส หรือขาเดรนเป็นบวกเมื่อเทียบกับซอสเมื่อทำการคำนวณค่าความต้านทานออกมาในช่วงที่นำกระแสช่วงหนึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 900 โอห์ม ซึ่งคำนวณได้จาก ผลต่างของแรงดันหารด้วยผลต่างของกระแสในช่วงที่มีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุด

$$\text{ค่าความต้านทาน} = \Delta v / \Delta I \quad \Omega \text{ (โอห์ม)}$$

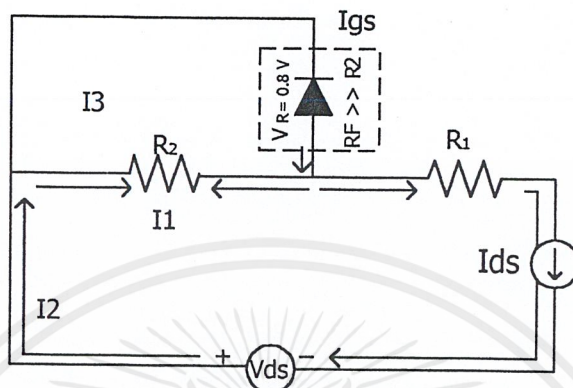
จึงเขียนวงจรสมมูลย์เทียบเคียงกับคุณสมบัติการนำกระแสของชิ้นงานที่ได้จากการสร้างในขณะที่มีการไบอัสได้ดังรูปที่ 5.9 โดยในส่วนของความต้านทานระหว่างขาเดรนและซอสก็คือความต้านทานเนื้อสารของฟิล์มเพชรชนิดพี ซึ่งแทนค่าด้วย  $R_1$  และ  $R_2$  ค่าความต้านทานทั้งสองตัวนี้จะมีค่าประมาณเท่ากันเพราะจากโครงสร้างเราออกแบบให้ระยะจากเกตไปซอสและจากเกตไปเดรนเท่ากัน ส่วนของไดโอดแทนคุณสมบัติรอยต่อระหว่างเกตกับสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชร โดยที่ไดโอดมีคุณสมบัติการนำกระแสช่วงไบอัสตรงและไบอัสกลับ ค่าความต้านทานภายในขณะนำกระแสในแต่ละช่วงใช้กราฟในรูปที่ 5.3 และ 5.4 ประกอบในการพิจารณา วงจรในรูปที่ 5.9 เมื่อทำการคำนวณค่ากระแสในขณะป้อนแรงดัน  $V_{gs}$  เป็นบวกและลบที่ค่าต่างๆ แล้วค่าที่ได้ปรากฏว่าสอดคล้องกับกราฟในรูปที่ 5.6 และ 5.7



รูปที่ 5.9 แสดงวงจรสมมูลของโครงสร้างชิ้นงาน

ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 5.6 เมื่อพิจารณาที่ระดับแรงดันที่เกตมีค่า 0 โวลต์และให้แหล่งจ่าย  $V_{ds}$  เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะเสมือนซอสแหล่งจ่าย  $V_{gs}$  ไดโอดได้รับไบอัสตรงแต่จะมีค่าความต้านทานที่สูงมากค่าๆ หนึ่งต่อขนานอยู่กับความต้านทาน  $R_2$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่า จึงเสมือนความต้านทานรวมเท่ากับ  $R_2$  นั้นเอง เพราะฉะนั้นกระแสที่ไหลในวงจรจะมาจากแหล่งจ่าย  $V_{ds}$  ที่เดียว โดยจะไหลผ่านเฉพาะ  $R_1$  และ  $R_2$  เท่านั้น สมการค่าของกระแส  $I_{ds}$  จะมีค่าดังนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_{ds} = V_{ds} - 0.8 / (R_2 + R_1)$  แอมป์



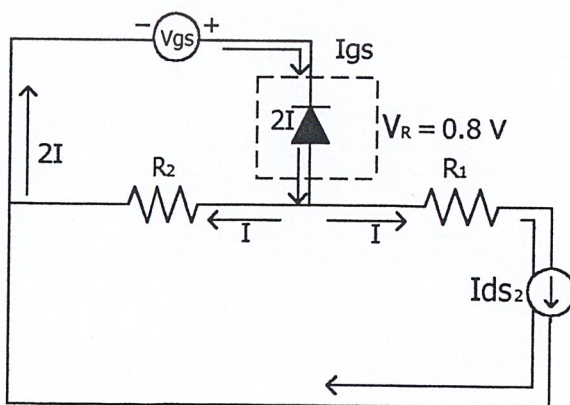
รูปที่ 5.10 แสดงวงจรสมมูลที่แรงดัน  $V_{gs}$  เท่ากับ 0 V

และถ้าพิจารณาที่ระดับแรง  $V_{gs}$  เป็นบวกมากขึ้น จะพบว่าขณะที่  $V_{ds}$  มีค่าเท่ากับ 0 ค่ากระแสเดรนจะไม่เป็นศูนย์แต่จะมีกระแสเดรนค่าๆ หนึ่งคือลักษณะของกราฟจะเลื่อนขึ้น กล่าวคือระดับของกระแสเดรนที่ระดับแรงดัน  $V_{ds}$  เป็น 0 มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นกระแสอันเกิดมาจากแหล่งจ่าย  $V_{gs}$  ที่ไหลผ่านไดโอดนั่นเอง แล้วผ่าน  $R_1$  และ  $R_2$  นั้นเอง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$I_{ds} = (V_{gs} - V_o - 2IR_f) / R_2$

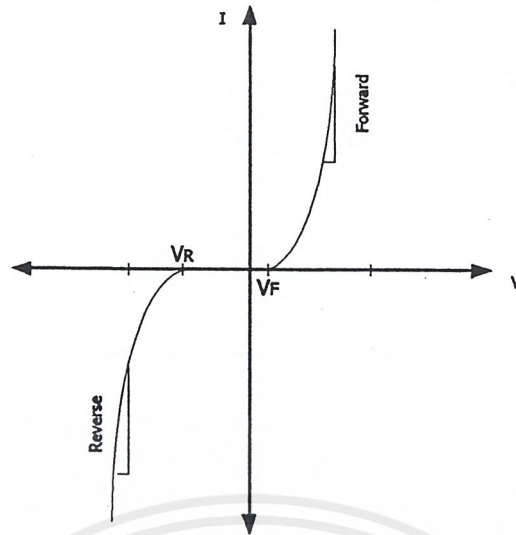
โดยที่ค่ากระแส 2I หาได้จาก

$I_{ds}$

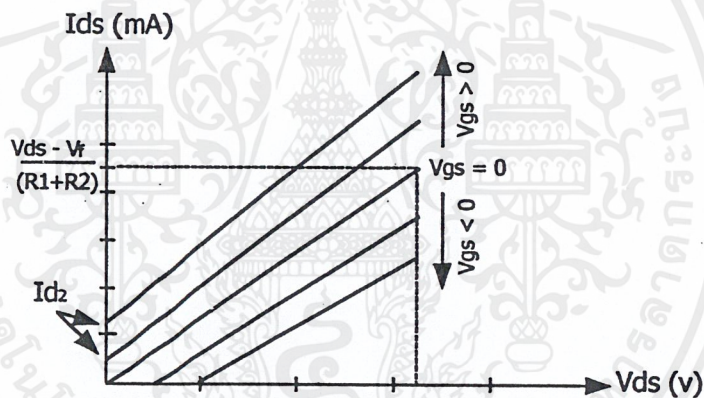


รูปที่ 5.11 แสดงวงจรสมมูลขณะแรงดัน  $V_{ds}$  เป็น 0 ที่แรงดัน  $V_{gs}$  ค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 5.12 (a) แสดงการหาค่าความต้านทานภายในของไดโอดชนิดไอส์ตรก และไบอัสกลับ  
(b) แสดงคุณลักษณะการนำกระแสของชิ้นงานที่แรงดันค่าต่างๆ

และถ้าพิจารณาขณะป้อนแหล่งจ่าย  $V_{GS}$  เป็นลบ แล้วป้อนแรงดัน  $V_{DS}$  ที่ค่าต่างๆจะมีผลทำให้กราฟเลื่อนไปทางขวา กล่าวคือที่ระดับแรงดัน  $V_{GS}$  เป็นลบ จะต้องจ่ายแรงดัน  $V_{DS}$  ที่ระดับหนึ่งก่อนถึงเริ่มมีกระแส  $I_{DS}$  เกิดขึ้นซึ่งพิจารณาได้ว่าทั้งนี้เนื่องจาก กระแส  $I_{DS}$  คือกระแสในส่วนที่ไหลผ่าน  $R_1$  เมื่อป้อนแหล่งจ่าย  $V_{GS}$  ให้กับวงจรก็จะเกิดกระแส  $I_{DS}$  ที่มีทิศการไหลตรงข้ามกับกระแสอันเกิดจากส่วนของแหล่งจ่าย  $V_{DS}$  เพราะฉะนั้นถ้าต้องการให้เกิดกระแส  $I_{DS}$  ที่ไหลตามหัวของแหล่งจ่าย  $V_{DS}$  ก็จะต้องป้อนแหล่งจ่าย  $V_{DS}$  ค่าๆหนึ่งที่ทำให้เกิดกระแสไหลผ่าน  $R_1$  ที่มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสในทิศตรงกันข้ามก่อน เหตุผลเป็นเช่นนี้เองจึงทำให้กราฟเลื่อนไปทางขวา แต่ถ้าแรงดัน  $V_{ds}$  ไม่มากพอที่จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่าน  $R_1$  ไปหักล้างกับกระแสอันที่ไหลผ่าน  $R_1$  ที่เกิดจากแหล่งจ่าย  $V_{gs}$  ที่มีทิศตรงกันข้ามก็จะทำให้เกิดกระแสที่มีค่าเป็นลบ หรือกระแสเดรอนที่ไหลตามหัวของแหล่งจ่าย  $V_{gs}$

จากการทดลองและการวิเคราะห์ผ่านมาถึงแม้ผลการวิจัยจะไม่สามารถสร้างเมสเฟทออกมาสำเร็จ แต่เราก็ได้อุปกรณ์ตัวใหม่ที่มีคุณสมบัติการทำงานดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งถ้าหากพิจารณาถึงการทำงานจะเห็นช่วงระดับความแตกต่างของกระแสที่ระดับแรงดัน  $V_{gs}$  ค่าต่างๆ เราจึงอาจนำค่าความต่างของช่วงกระแสไปประยุกต์ใช้งานได้



## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์

จากกระบวนการต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น เป็นการวิจัยและทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติของฟิล์มเพชร เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เหตุผลที่นำเรื่องนี้มาทำการวิจัยค้นคว้าและทดลอง ทั้งนี้ก็เนื่องจากคุณสมบัติทางธรรมชาติของเพชรมีข้อดีหลายประการเหมาะในการนำมาพัฒนาเป็นตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งคุณสมบัติของเพชรพอจะสรุปเป็นข้อๆได้ดังนี้

1. มี Energy bandgap กว้างประมาณ 5.5eV มากกว่าซิลิกอนที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันซึ่งมีค่า Energy bandgap กว้างเพียง 1.1 eV เท่านั้นเองเนื่องจากค่า Energy bandgap กว้างจะทำให้ค่าแรงดันพังทะลาย (Breakdown Voltage) ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีค่าสูงตามไปด้วย และยังทำให้สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงได้อีกด้วย

2. มีค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและความคล่องตัวของโฮลสูง ( 200 cm/v.s และ 1800 cm/v.s ตามลำดับ )

3. มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ มีค่าประมาณ 5.7

4. เป็นวัสดุที่มีความคงทนและความแข็งตัวสูง

เพชรที่เรานำมาใช้วิจัยและนำมาสร้างเป็นสารกึ่งตัวนำนั้นได้จากการสร้างโดยใช้กระบวนการ CVD แบบความร้อนที่ความดันบรรยากาศ มีหลักการทำคือใช้แหล่งจ่ายเป็นไอสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ กับก๊าซไนโตรเจน ซึ่งต้องทำภายใต้เงื่อนไขดังนี้

1. ในระบบต้องมีอะตอมของไนโตรเจนปรากฏอยู่

2. อัตราการไหลของก๊าซสารเจือต้องเหมาะสมไม่มากเกินไปหรือน้อยเกินไปการทดลองใช้ประมาณ 10 มิลลิลิตร/นาที

3. อุณหภูมิของไส้หลอดต้องมีค่าประมาณ 1000 องศาเซลเซียส และฐานรองก็ต้องมีอุณหภูมิที่พอเหมาะด้วย การก่อตัวของเพชรที่พื้นผิวของฐานรองจะเริ่มตั้งแต่ 500°C ถึง 1200 °C

4. ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรองต้องเหมาะสมไม่ใกล้หรือห่างเกินไป ระยะที่ใช้ในการสร้างประมาณ 1.4 มิลลิเมตร

เพชรที่ได้จากกระบวนการสร้างจะมีลักษณะเป็นฟิล์มบางๆ ซึ่งเป็นชนิดพี เมื่อผ่านกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเสร็จแล้วก็จะนำมาวิเคราะห์และตรวจสอบดูว่าเพชรที่ได้จากกระบวนการสร้างนั้นมีคุณสมบัติอย่างไร ผลจากการตรวจสอบชิ้นงานด้วยเทคนิค raman spectroscopy และการถ่ายภาพฟิล์มจาก SEM ซึ่งผลการตรวจสอบพบว่าฟิล์มเพชรที่ได้เป็น แบบโพสิ และมีส่วนของอะมอร์ฟัสเกิดขึ้นปะปนอยู่ และกราฟไฟร์ จากการนำฟิล์มเพชรมาทำการสร้างรอยต่อ หรือข้อสัมผัสโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยโลหะที่ใช้มี 2 ชนิดคือ ทอง และอะลูมิเนียม จากการทดลองวัดคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะทั้งสองกับสารกึ่งตัวนำนั้นสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทดังนี้คือ

1. รอยต่อระหว่างทองคำกับสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรแสดงคุณสมบัติเป็นรอยต่อแบบ โอห์มมิก (Ohmic contact) เสมือนเป็นความต้านทานตัวหนึ่ง คือยอมให้กระแสผ่านได้สองทิศทาง

2. รอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรแสดงคุณสมบัติเป็นรอยต่อแบบชอตตี (Schottky contact) เสมือนเป็นไดโอดตัวหนึ่ง คือยอมให้กระแสผ่านได้ทิศทางเดียว

เมื่อนำคุณสมบัติรอยต่อที่ได้จากการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเมสเฟท โดยอาศัยคุณสมบัติความเป็นรอยต่อโอห์มมิก ( Ohmic contact ) ระหว่างทองคำกับสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพีมาสร้างส่วนของชาเดรน(Drain) และชาซอส (Source) และใช้คุณสมบัติความเป็นรอยต่อแบบชอตตี (Schottky contact ) ระหว่างอะลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพี มาสร้างส่วนของชาเกต ( Gate ) หลังจากผ่านกระบวนการสร้างเสร็จแล้ว ก็ทำการวัดคุณสมบัติการทำงาน ( I-V Characteristic ) ของชิ้นงาน โดยผลที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.6 เมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าเมสเฟทที่ได้จากกระบวนการสร้างนั้น มีคุณสมบัติการทำงานไม่เป็นไปตามทฤษฎีการนำกระแสของเมสเฟทหรือกล่าวคือ ส่วนของชาเกตไม่สามารถควบคุมปริมาณช่องทางเดินกระแสให้แคบลงในขณะที่ป้อนแรงดันไฟบวกที่ชาเกต และไม่สามารถขยายช่องทางเดินกระแสให้กว้างขึ้นได้ขณะป้อนแรงดันไฟลบที่ชาเกต ซึ่งจากการวิเคราะห์พอจะสรุปได้ว่า ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของชิ้นงานไม่เป็นไปตามโครงสร้างเมสเฟท แต่จะมีลักษณะโครงสร้างเหมือนดังรูปที่ 5.8 จากรูปอธิบายได้ว่าคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี เสมือนมีไดโอดตัวหนึ่งต่อคั่นอยู่ระหว่างรอยต่อ โดยที่คุณสมบัติของไดโอดตัวจะมีแรงดันตกคร่อมบริเวณรอยต่อในกรณีไบอัสตรงอยู่ประมาณ 0.5 โวลต์โดยมีค่าความต้านทานภายในค่าๆหนึ่ง และกรณีทางด้านไบอัสกลับจะมีค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่ต่ำมากประมาณ 0.8 โวลต์โดยที่มีค่าความต้านทานภายในค่าๆหนึ่งเช่นกัน ซึ่งไม่เป็นไปตามโครงสร้างของเมสเฟท ที่ว่าบริเวณรอยต่อนี้ต้องแสดงคุณสมบัติเป็นรอยต่อแบบชอตตี ทั้งนี้อาจจะมีผลเนื่องจากรอยสัมผัสทองคำกับสารกึ่งตัวนำอาจจะสัมผัสไม่ทั่วถึงจึงทำให้เกิด air gap บริเวณรอยซึ่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นบริเวณรอยต่อซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการนำกระแสผ่านรอยต่อบริเวณนี้

จากการทดลองและการวิเคราะห์ผ่านมาถึงแม้ผลการวิจัยจะไม่สามารถสร้างเมสเฟทออกมาสำเร็จ แต่เราก็ได้อุปกรณ์ตัวใหม่ที่มีคุณสมบัติการทำงานดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งถ้าหากพิจารณาถึงการทำงานจะเห็นช่วงระดับความแตกต่างของกระแสที่ระดับแรงดัน Vgs ค่าต่างๆ เราจึงอาจนำค่าความต่างของช่วงกระแสไปประยุกต์ใช้งานได้ นอกจากนี้เรายังได้เรียนรู้ถึงปัญหาและแนวทางแก้ไขในส่วนของการสร้างเมสเฟทอันจะเป็นประโยชน์ในการวิจัย การออกแบบ และการสร้างเมสเฟท ซึ่งปัญหาและแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ พอจะสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ปัญหาในการสร้างฟิล์มเพชรโดยวิธี CVD เป็นกระบวนการสร้างควบคุมความหนาที่แน่นอนของฟิล์มเพชร ได้ยาก
2. ฟิล์มเพชรที่สร้างได้ตรวจสอบพบว่ามีส่วนของกราฟไฟต์และอะมอร์ฟิสม์ปนอยู่ อาจแก้ไขด้วยการนำฟิล์มเพชรที่ได้ไปผ่านกระบวนการแอนนีกก่อนที่จะนำไปสร้าง MESFET
3. รอยต่อในส่วนของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีกระแสรั่วไหลในปริมาณมาก ซึ่งอาจจะมาจากสาเหตุที่ฟิล์มเพชรมีส่วนของกราฟไฟต์ และ อะมอร์ฟิสม์
4. คุณสมบัติบริเวณรอยต่อระหว่างทองกับสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพีเป็นโอห์มมิกที่ไม่ดีนัก
5. ทั้งนี้เนื่องจากรอยสัมผัสของทองคำกับฟิล์มเพชรเกิด air gap แก้ไขได้โดยการการ sintering หลังจากขั้นตอนการสร้างรอยสัมผัสทองคำกับฟิล์มเพชรเสร็จ



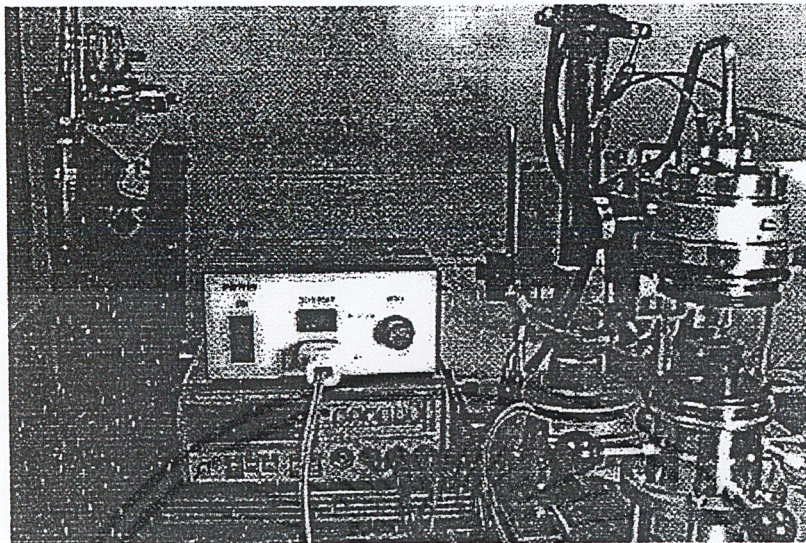
## เอกสารอ้างอิง

- [1] Robert F. Davis. *Diamond Films and Coatings*. New Jersey: Noyes Publication. 1993.
- [2] J. E. Field. *The Properties of Natural and Synthetic Diamond*. London: Harcourt Brace Janovich Publisher. 1992.
- [3] J. E. Field. *The Properties of Diamond*. London: Academic Press, Inc. 1979.
- [4] Iida M., Maekawa H., Kimura H., Akiba Y., Hirose Y., Kurosu T. and Matsumae Y.  
"Electrical Conduction Mechanism in Polycrystalline p-type Diamond Films."  
2<sup>nd</sup> International Conference on the Applications of Diamond Films and Related Materials. 1993, pp.367-370.
- [5] Lawrence S. Pan, Don R. Kania. *Diamond: Electronic Properties and Applications*. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers. 1995.
- [6] กอบศักดิ์ ศรีประภา. "การศึกษาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเฉพาะพื้นที่ด้วยวิธี CVD แบบ ความร้อน." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
- [7] สมเกียรติ ศุภเดช. *สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ*. พิมพ์ครั้งที่ 7. 2540.
- [8] ภาณุพันธ์ โอฟารกิจไพบุลย์. "การศึกษาคุณสมบัติของไดโอด"ตรงสร้าง MIS จากสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [9] Kanaan Kano. *Semiconductor Devices*. New Jersey: Prantice-Hall International, Inc. 1998.
- [10] Jasprit Singh. *Semiconductor Devices an introduction*. Newyork: McGraw-Hill, Inc. 1994.
- [11] Paul R. Gray and Robret G Meyer. *Analysis and Desing of Analog Integrated Circuits*. New York: john Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [12] M. J. Cook. *Semiconductor Device*. New York: Prentice-Hall. 1992.
- [13] L. S. Pan, D.R. Kania, "Diamond Electronic properties and application", Kluwer Academic Publishers. London. 1995.

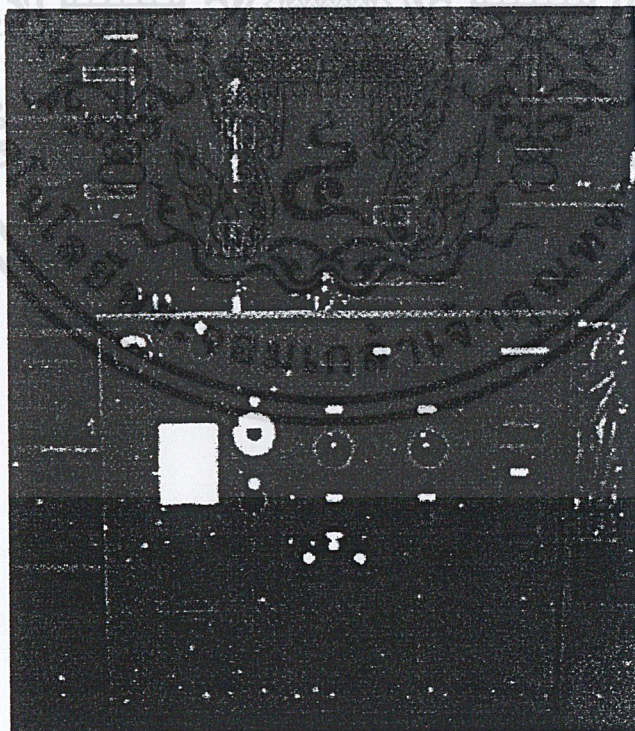


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

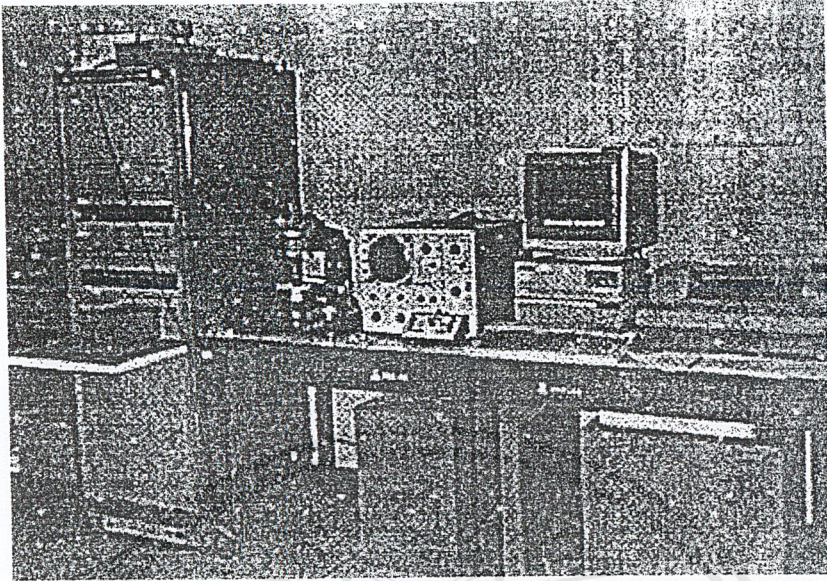


รูปที่ 1 ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

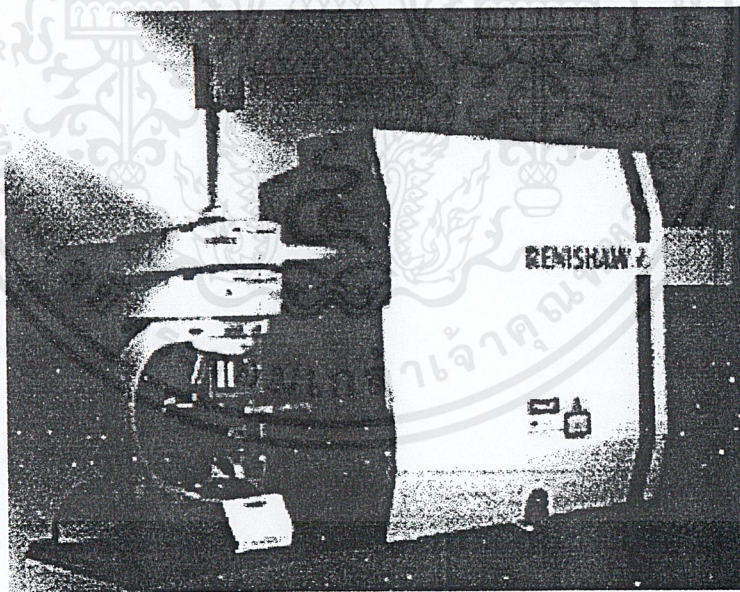


รูปที่ 2 เครื่อง Vacuum Evaporator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

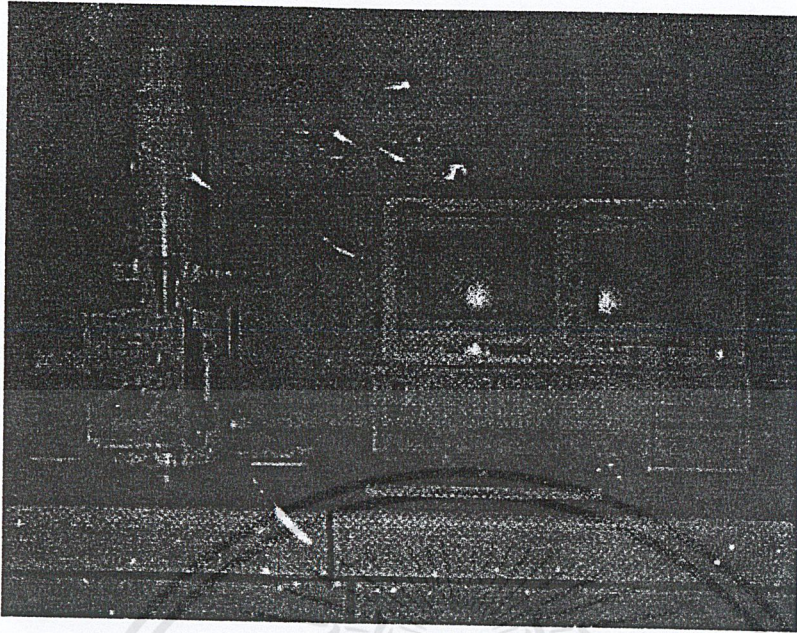


รูปที่ 3 เครื่องมือวัด Hewlett Packard 4061A (Semiconductor/Component Test System)

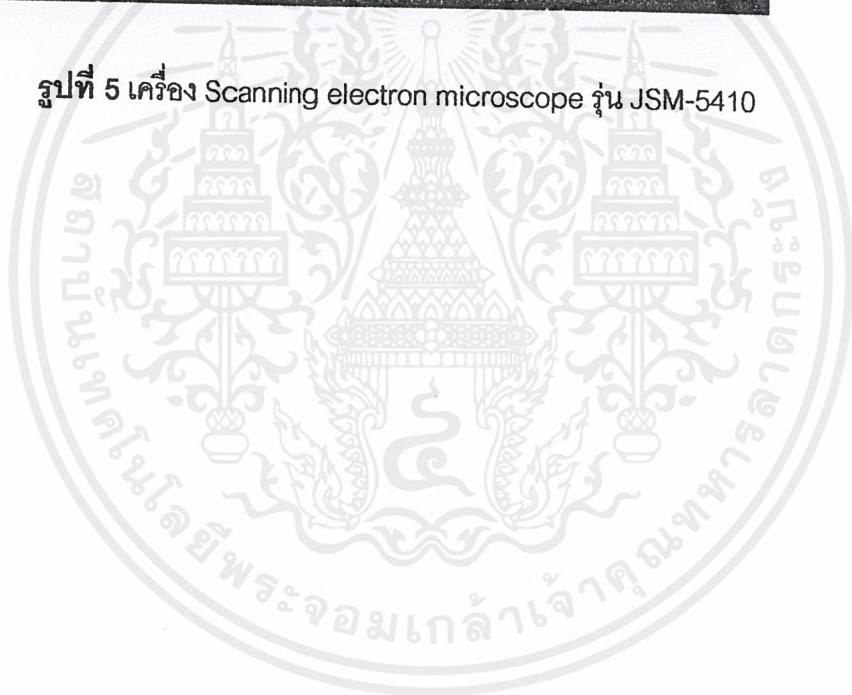


รูปที่ 4 Raman Spectroscopy system 2000 ของบริษัท Renishaw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 เครื่อง Scanning electron microscope รุ่น JSM-5410



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
$E_0$	ระดับพลังงานที่สูญญากาศ
$E_{Fm}$	ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ
$E_{Fs}$	ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ
$E_C$	ระดับพลังงานความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ
$E_i$	ระดับพลังงานอินทรินซิก
$E_V$	ระดับพลังงานวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ
$E_g$	ช่องว่างแถบพลังงาน
$\phi_s$	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
$\phi_m$	ฟังก์ชันงานของโลหะ
$\phi_B$	ค่าความสูงกำแพงศักย์
$V_0$	ค่าพลังงานไฟฟ้าภายใน
$\chi_s$	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ
$d_p$	บริเวณปลอดพาหะที่ขยายลึกเข้าไปทางด้านพี
$w$	ความกว้างของเกต
$L$	ความยาวของเกต
$G$	ความนำไฟฟ้า
$J_y$	ความหนาแน่นของกระแสในทิศทาง $y$
$\xi_y$	สนามไฟฟ้าในทิศทาง $y$
$\mu_n$	ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน
$g_m$	ทรานคอนดักแตนซ์
$V_A$	แรงดันไบอัสภายนอก
$V_P$	แรงดันพินช์ออฟ
$V_{GS}$	แรงดันเกต
$V_{DS}$	แรงดันเดรน
$I_d$	กระแสเดรน
$I_{do}$	กระแสเดรนอิ่มตัวในกรณีที่แรงดันเกตมีค่าเป็นศูนย์
$I_{ds}$	กระแสเดรนอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\epsilon_1$	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นอินทรีนซิค
$\epsilon_0$	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในสูญญากาศ
$\epsilon_s$	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ
$N_D$	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้
$N_A$	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์เทคนิค

กระตุ้น	Activation
กราไฟต์	Graphite
การกัด	Etching
การนิวเคลียสไอออน	Nucleation
การสะสมประจุพาหะ	Accumulation of Carrier
ครีมเพชร	Diamond Paste
ความคล่องตัว	Mobility
ความเร็วดริฟท์	Drift Velocity
ความสูงของกำแพงศักย์	Barrier Height
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	Dielectric Constant
ค่าคงที่แลตทิซ	Lattice Constant
เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ	Vacuum Evaporator
ฉนวน	Insulator
ขอตักไดโอด	Schottky Diode
แชนแนล	Channel
ฐานรอง	Substrate
ไตรคลอโรเอทิลีน	Trichloroethylene
แถบพลังงานต้องห้าม	Forbidden Energy Band
น้ำบริสุทธิ์	De-ionized Water
บริเวณปลอดประจุพาหะ	Depletion Region
ไบอัสตรง	Forward Bias
ไบอัสย้อนกลับ	Reverse Bias
พลังงานกระตุ้น	Activation Energy
พิกัดความต้านทานทางไฟฟ้า	Resistivity
เพชรโครงผลึกเชิงซ้อน	Polycrystalline Diamond
เพชรโครงผลึกเดี่ยว	Single-crystal Diamond
ฟังก์ชันงาน	Work Function
ฟิล์มเพชรชนิดพี	P-type Diamond
ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก	Intrinsic Diamond

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์เทคนิค(ต่อ)

ภาวะสมดุลย์ความร้อน	Thermal Equilibrium
ยูนิตเซลล์	Unit Cell
รอยสัมผัสแบบชอตตี	Schottky Contact
รอยสัมผัสแบบโอมหิมิค	Ohmic Contact
แรงดันพินช์ออฟ	Pinch-off Voltage
ศักย์ไฟฟ้าภายใน	Built-in Voltage
ไส้ทั้งสแตน	Tungsten Wire
อิเล็กตรอน	Electron
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	Electronic Device
เอทิลแอลกอฮอล์	Ethyl-alcohol
โฮล	Hole