

การศึกษาและการสร้าง DIAMOND MESFET

THE STUDY AND FABRICATION OF DIAMOND MESFET

พีระวุฒิ ชินวรรังสี

PERAWUT CHINNAVORNRUNGSEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตพิเศษ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-9546-81-4

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและการสร้าง Diamond MESFET

THE STUDY AND FABRICATION OF DIAMOND MESFET



พีระวุฒิ ชินวรรังสี

PERAWUT CHINNAVORNRUNGSEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-9546-81-4

THE STUDY AND FABRICATION OF DIAMOND MESFET

PERAWUT CHINNAVORNRUNGSEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2002

ISBN 974-9546-81-4

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและการสร้าง Diamond MESFET
นักศึกษา	นายพีระวุฒิ ชินวรรังสี
รหัสประจำตัว	40061058
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ จิตรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MESFET ที่นำสารกึ่งตัวนำเพชรมาใช้ โดยในขั้นแรกจะทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคด้วยวิธีไฮโดรเจนเทอร์มิเนชันโดยไม่มีการเติมอะตอมสารเจือชนิดอื่น ๆ เลย ที่ช่วงเวลา 3-15 นาที และอุณหภูมิอยู่ในช่วง 500-700 °C หลังจากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของชั้นความนำไฟฟ้านี้พบว่า ชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้นั้นมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี และความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้นี้มีค่า 76-151 nm ซึ่งความหนาของชั้นความนำไฟฟ้านี้แปรผันตรงกับเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ หลังจากนั้นทำการสร้าง MESFET บนชั้นความนำไฟฟ้านี้ พบว่าทรานซิสเตอร์สามารถทำงานได้ใน 2 โหมด คือ เอ็นฮานซ์เม้นท์โหมด และ ดีพลีทชันโหมด ซึ่งพบว่าชั้นความนำไฟฟ้าที่บางที่สุดจะสามารถทำงานในแบบเอ็นฮานซ์เม้นท์โหมดได้ จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET พบว่าค่าทรานส์คอนดักแตนซ์มีค่า 11.35 $\mu\text{S}/\text{mm}$ และสามารถตอบสนองความถี่ได้ 25 kHz เมื่อทำการทดสอบสภาวะในการทำงานที่มีอุณหภูมิสูง พบว่า MESFET ที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนี้ มีเสถียรภาพในการทำงานจนถึงอุณหภูมิ 200 °C

Thesis Title	The Study and Fabrication of Diamond MESFET
Student	Mr. Perawut Chinnavornrungsee
Student ID	40061058
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This thesis presents the fabrication technique and properties of Diamond MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor). The conductive layer synthesized on intrinsic diamond film by H₂ termination process, were studied at various conditions : time 3-15 mins and temperature 500-700 °C. It's found that the conductive layer performed the property of p-type semiconductor and the layer thickness is proportional to both of time and temperature from H₂ termination. After metallization on layer, the electrical properties of MESFET were investigated. They were found that MESFET was capable to operate as Depletion-mode and Enhancement-mode by forming the thinnest conductive layer. The frequency response and transconductance of MESFET were 25 kHz and 11.35 μS/mm, respectively. At higher temperature ambient , MESFET can perform the operational stability to 200 °C.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ ลีดิษฐ์เรือง เป็นอย่างสูงสำหรับคำแนะนำ ความรู้ และความเอาใจใส่ดูแลต่างๆ ที่ได้รับ เพื่อแก้ไขปัญหาต่างๆ ด้วยดีมาตลอด ขอขอบพระคุณ อ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยด้วยดีเสมอมา ขอขอบพระคุณอาจารย์คณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน

ขอขอบพระคุณ คุณจรรยา นามเสนาะ (พี่ห่ม) สำหรับความเป็นห่วงและดูแล พี่ภควัต สรวัยสุวรรณ พี่กอบศักดิ์ ศรีประภา พี่ภาณุพันธ์ โอฟารกิจไพบูลย์ เพื่อนๆ น้องๆ ห้องวิจัยสารนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงาน รวมทั้งคุณอู๋ และคุณจุกจากบัณฑิตศึกษาด้วย

ขอขอบคุณ คุณ ไชยร วิทยาขจรศาสตร์ และ คุณ ธรรมนิษฐ์ จากบริษัท NS Electronic ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง Raman Spectroscope ขอขอบคุณคุณอนุชา เรืองพาณิชย์ จาก TMEC ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวัด ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากมูลนิธิการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร ทุนงบประมาณเพื่อการศึกษาในระดับบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาด้วยดี

ท้ายที่สำคัญที่สุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในทุก ๆ สิ่ง ที่ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่น้องทุกคนที่สนับสนุนและมอบให้อย่างมีคุณค่าด้วยดีมาตลอดเวลา

พีระวุฒิ ชินวรรังสี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
สัญลักษณ์.....	XIII
ศัพท์เทคนิค.....	XV
คำนำ.....	XVII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 ทรานซิสเตอร์ประเภทผลของสนามไฟฟ้า (Field-Effect Transistor).....	1
1.3 สารกึ่งตัวนำเพชร.....	4
1.4 คุณสมบัติต่าง ๆ ของเพชร.....	5
1.4.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	5
1.4.2 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น.....	6
1.5 เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี Thermal Enhance CVD.....	7
1.6 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	11
1.6.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy).....	11
1.6.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy.....	12
บทที่ 2 ทรานซิสเตอร์ประเภทผลของสนามไฟฟ้าโครงสร้างแบบ MESFET.....	15
2.1 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ.....	15
2.1.1 รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ (Rectify contact).....	15
2.1.2 รอยสัมผัสแบบโอห์มิก (Ohmic contact).....	19
2.2 โครงสร้างและการทำงานของทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MESFET.....	22
2.2.1 ทรานซิสเตอร์ชนิดพีแซนแนลแบบดีพลีทชันโหมด.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2 ทรานซิสเตอร์ชนิดพีแชนแนลแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด.....	24
2.2.3 การทำงานของทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MESFET.....	25
2.3 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MESFET.....	27
2.3.1 ทรานส์คอนดักแตนซ์ (Transconductance : g_m).....	30
2.3.2 แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage : V_T).....	31
2.4 การตอบสนองความถี่.....	33
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง.....	36
3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง.....	36
3.1.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเบื้องต้น.....	36
3.1.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร.....	37
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	38
3.3 กระบวนการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้า.....	40
3.3.1 การตรวจสอบชนิดของพาหะส่วนมากของชั้นความนำไฟฟ้า.....	40
3.3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้า.....	42
3.4. การออกแบบและกระบวนการสร้าง Diamond MESFET.....	42
3.4.1 การออกแบบ MESFET.....	43
3.4.2 กระบวนการสร้าง Diamond MESFET.....	44
3.5 การศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของ MESFET.....	48
3.5.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสขอตี.....	48
3.5.2 การศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET.....	49
3.5.2.1 การศึกษาผลของความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่มีผลต่อ ค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET.....	49
3.5.2.2 การศึกษาผลของความหนาแน่นของโฮลที่มีผลต่อ ค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET.....	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.3 การศึกษาเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าที่มีผลต่อ คุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET.....	50
3.5.4 การศึกษาขนาดความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสที่มีผลต่อ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET.....	51
3.5.5 การศึกษาการตอบสนองความถี่ของ MESFET.....	51
3.5.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET.....	52
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	53
4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของชั้นความนำไฟฟ้า.....	53
4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้า.....	54
4.2.1 ผลการตรวจสอบชนิดของพาหะส่วนมากของชั้นความนำไฟฟ้า.....	54
4.2.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้า.....	55
4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของ MESFET.....	64
4.3.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสขอตติ.....	65
4.3.2 ผลการศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET.....	66
4.3.2.1 ผลของความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่มีผลต่อ ค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET.....	67
4.3.2.2 ผลของความหนาแน่นของโฮลที่มีผลต่อ ค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET.....	72
4.3.3 ผลการศึกษาเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าที่มีผลต่อ คุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET.....	73
4.3.4 ผลการศึกษาขนาดความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแส ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET.....	77
4.3.5 ผลการศึกษาการตอบสนองความถี่ของ MESFET.....	79
4.3.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET.....	83
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	84

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	86
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	89

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับซิลิคอน และแกเลียมอาร์เซไนด์.....	6
1.2 แสดงค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆ ของคาร์บอน....	14
4.1 ค่าความต้านทาน(Ω)ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	57
4.2 ค่าแรงดันพันธ์ทรู V_{pt} (V) ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ ตามเงื่อนไขต่างๆ.....	59
4.3 ค่าความหนา a (nm) ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	60
4.4 ค่าพิภักความต้านทาน ρ (Ω -cm) ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	63
4.5 ค่าความหนาแน่นประจุโฮล p (cm^{-3}) ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	64
4.6 ค่าระดับพลังงานเฟอร์มิเทียบกับระดับพลังงานวาเลนซ์ E_f-E_v (eV) ของ ชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	64

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะโครงสร้างของ FET ซึ่งมีขั้วเกตเป็นตัวควบคุมขนาดของช่องทางเดินกระแส.....	2
1.2 ลักษณะโครงสร้างของ FET ชนิดต่างๆ (a)MOSFET (b)JFET (c)MESFET.....	3
1.3 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกเพชร.....	5
1.4 แผนภาพระบบ Hot-Filament-Assisted Thermal CVD.....	7
1.5 แผนภาพระบบ Microwave Plasma CVD	8
1.6 แผนภาพระบบ Combustion Flame Assisted CVD.....	8
1.7 แผนภาพกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน.....	9
1.8 ลักษณะรูปร่างพื้นผิวด้านหน้าของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM.....	12
1.9 ลักษณะสเปกตรัมของเพชรธรรมชาติ และเพชรที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน.....	13
2.1 แบบจำลองแถบพลังงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี (a) ก่อนสัมผัส (b) ที่สภาวะสมดุลความร้อน.....	16
2.2 แบบจำลองแถบพลังงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ($\phi_m < \phi_{sp}$) (a) กรณีไบอัสตรง (b) กรณีไบอัสกลับ.....	18
2.3 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสขอตติ์กี.....	18
2.4 แบบจำลองแถบพลังงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี (a)ก่อนสัมผัส (b)ที่สภาวะสมดุลความร้อน.....	20
2.5 แบบจำลองแถบพลังงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ($\phi_m > \phi_{sp}$) (a) กรณีไบอัสตรง (b) กรณีไบอัสกลับ.....	21
2.6 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสแบบโอห์มิก.....	21
2.7 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบ MESFET.....	22
2.8 โครงสร้าง MESFET ชนิดพีแชนแนลแบบดีพลีชันโหมด.....	23
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน และสัญลักษณ์ของ MESFET ชนิดพีแชนแนลแบบดีพลีชันโหมด.....	24
2.10 โครงสร้าง MESFET ชนิดพีแชนแนลแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด.....	24

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน และสัญลักษณ์ของ MESFET ชนิดพีแชนแนลแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ใหม่	25
2.12 ภาพตัดขวางของ MESFET ชนิดพีแชนแนลภายใต้สภาวะแรงดันไบอัสค่าต่าง ๆ	26
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันของ MESFET ชนิดพีแชนแนล	26
2.14 ภาพตัดขวางของ MESFET ชนิดพีแชนแนลแสดงขนาดของพารามิเตอร์ค่าต่าง ๆ	27
2.15 ภาพตัดขวางของบริเวณช่องทางเดินกระแสที่มีขนาด Δy	28
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_T, V_P และ V_{bi} ของ MESFET ชนิดพีแชนแนล (a)แบบดีพลีชันใหม่ (b)แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ใหม่	32
2.17 วงจรเสมือนของ MESFET ในกรณีที่ความถี่สูง	33
3.1 ลักษณะรอยขีดที่เกิดขึ้นจากการขีดด้วยครีมเพชรขนาด $0.25 \mu\text{m}$	37
3.2 ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD	38
3.3 ไดอะแกรมระบบ CVD อย่างง่ายที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์มเพชร	39
3.4 อุปกรณ์การหาชนิดของพาหะส่วนมากของชั้นความนำไฟฟ้า	41
3.5 ตัวอย่างขนาดของต้นแบบ MESFET ที่ออกแบบ	43
3.6 กระเจกต้นแบบที่ใช้เป็นโฟโตมาสก์	44
3.7 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง Diamond MESFET	46
3.8 วงจรที่ใช้วัดการตอบสนองของความถี่ของ MESFET	52
4.1 ลักษณะของ Raman spectrum ของชั้นความนำไฟฟ้า	53
4.2 ลักษณะผิวหน้าของชั้นความนำไฟฟ้า	54
4.3 อุปกรณ์การหาชนิดของพาหะส่วนมากของชั้นความนำไฟฟ้า	55
4.4 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 500°C และ ใช้เวลาค่าต่าง ๆ ด้วยวิธี H-termination	56
4.5 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600°C และ ใช้เวลาค่าต่าง ๆ ด้วยวิธี H-termination	56
4.6 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 700°C และ ใช้เวลาค่าต่าง ๆ ด้วยวิธี H-termination	57

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้ากับเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยวิธี H-termination.....	58
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นความนำไฟฟ้ากับเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยวิธี H-termination.....	61
4.9 แผนภาพแสดงกระบวนการเกิดโฮลในฟิล์มเพชร.....	61
4.10 (ก) แสดงการเกิดขึ้นของชั้นความนำไฟฟ้าชนิดพี (ข) แสดงลักษณะแถบพลังงานของชั้นความนำไฟฟ้า.....	62
4.11 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของขั้วเกต-ซอส ของ MESFET.....	65
4.12 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของขั้วเกต-เดรน ของ MESFET.....	66
4.13 วงจรที่ใช้ในการหาค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET.....	67
4.14 ตัวอย่างผลการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET ในกรณีที่ ชั้นความนำไฟฟ้าหนา 76 nm.....	68
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ กับ V_{GS} ของ MESFET ในกรณีที่ ชั้นความนำไฟฟ้าหนา 76 nm.....	69
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ กับ V_{GS} ของ MESFET ในกรณีที่ ชั้นความนำไฟฟ้า มีความหนาต่าง ๆ.....	69
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET กับความหนา ของชั้นความนำไฟฟ้า.....	70
4.18 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ที่มีการทำงานในแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (ชั้นความนำไฟฟ้าหนา 76 nm).....	71
4.19 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ที่มีการทำงานในแบบดีพลีทชันโหมด (ชั้นความนำไฟฟ้าหนา 123 nm).....	72
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET กับความหนาแน่นของโฮล.....	73
4.21 วงจรที่ใช้ในการวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET.....	74
4.22 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ที่สร้างจากชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้อุณหภูมิใน การสังเคราะห์ 600 °C และใช้เวลา 3 นาที.....	74

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ที่สร้างจากชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ 600 °C และใช้เวลา 5 นาที.....	75
4.24 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ที่สร้างจากชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ 600 °C และใช้เวลา 10 นาที.....	75
4.25 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ที่สร้างจากชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ 600 °C และใช้เวลา 15 นาที.....	76
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง g_{msat} กับความยาวของช่องทางเดินกระแส.....	78
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง g_{msat} กับความกว้างของช่องทางเดินกระแส.....	78
4.28 วงจรที่ใช้วัดการตอบสนองของความถี่ของ MESFET.....	79
4.29 ผลการทดสอบการตอบสนองของความถี่.....	80
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอทพุทที่ทำการนอัมัลไลซ์กับความถี่ของ MESFET ที่มีขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแส 20 μm และความกว้างของช่องทางเดินกระแส 200 μm	80
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอทพุทที่ทำการนอัมัลไลซ์กับความถี่ของ MESFET ที่มีขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแส 40 μm และความกว้างของช่องทางเดินกระแส 200 μm	81
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอทพุทที่ทำการนอัมัลไลซ์กับความถี่ของ MESFET ที่มีขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแส 60 μm และความกว้างของช่องทางเดินกระแส 200 μm	81
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองของความถี่ของ MESFET กับความยาวของช่องทางเดินกระแส.....	82
4.34 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่ากระแส I_{DS} ของ MESFET.....	83
ก-1 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของ JEOL รุ่น JCM-5410.....	87
ก-2 Raman spectroscope รุ่น System 2000 ของบริษัท Renishaw.....	87
ก-3 เครื่องมือวัด Hewlett Packard 4156 B.....	88

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

	ความหมาย
a	ความหนาของชั้นความนำไฟฟ้า
A	พื้นที่ผิวขั้วสัมผัส
A*	ค่าคงที่ Richardson
C _g	ค่าความจุไฟฟ้าที่เกต
D	ขั้วเดรนของ MESFET
E ₀	ระดับพลังงานที่สูญญากาศ
E _c	ระดับพลังงานความนำ
E _F	ระดับพลังงานเฟอร์มิ
E _g	ช่องว่างแถบพลังงาน
E _v	ระดับพลังงานวาเลนซ์
f _α	ผลคูณของอัตราขยายกระแสและความกว้างของความถี่
f _T	ความถี่คัทออฟ
G	ขั้วเกตของ MESFET
G ₀	ค่าความนำของช่องทางเดินกระแสในขณะที่ไม่มีบริเวณปลอดพาหะ
g _m	ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์
h	ค่าคงที่ของ Planck
I _D	ค่ากระแสเดรน
k	ค่าคงที่ของ Boltzman
L	ความยาวของช่องทางเดินกระแส
m [*] _h	ค่ามวลยังผลของโฮล
N _A	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับ
p	ค่าความหนาแน่นของโฮล
S	ขั้วซอสของ MESFET
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์
V _a	แรงดันไบอัสภายนอก

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
V_{bi}	แรงดันภายใน
V_D	แรงดันที่ขั้วเดรน
V_G	แรงดันที่ขั้วเกต
V_P	แรงดันพินช์ออฟ
V_{pt}	แรงดันพินช์ทรู
V_T	แรงดันขีดเริ่ม
W	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ
Z	ความกว้างของช่องทางเดินกระแส
ϵ	ค่า permittivity ของสารกึ่งตัวนำ
ρ	ค่าพิกัดความต้านทาน
ϕ_B	ค่าความสูงกำแพงศักย์ต่อหนึ่งอิเล็กตรอน
ϕ_m	ฟังก์ชันงานของโลหะต่อหนึ่งอิเล็กตรอน
ϕ_s	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำต่อหนึ่งอิเล็กตรอน
μ_p	ค่าความคล่องตัวของโฮล
χ_s	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ

ศัพท์เทคนิค

กระแสดริฟ	Drift Current
กระแสเดรน	Drain Current
กระแสอิ่มตัว	Saturated Current
กราไฟต์	Graphite
กล้องถ่ายภาพย่อส่วน	Reduction Camera
การตอบสนองความถี่	Frequency Response
การนิวเคลียสเอน	Nucleation
การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	X-ray Diffraction
กาวเงิน	Silver Paste
ขบวนการโฟโตลิโธกราฟี	Photolithography
ครีมเพชร	Diamond Paste
ความถี่คัทออฟ	Cut-off Frequency
ความสูงของกำแพงศักย์	Barrier Height
ค่าคงที่แลตทิซ	Lattice Constant
เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ	Vacuum Evaporator
เครื่องล้างความถี่สูง	Ultrasonic Cleaning
ช่องทางเดินกระแส	Channel
ชอตต์กีไดโอด	Schottky Diode
ชั้นความนำไฟฟ้า	Conductive Layer
ซินเตอร์ริง	Sintering
ฐานรอง	Substrate
ดีพลีชันโหมด	Depletion Mode
ไตรคลอโรเอทิลีน	Trichloroethylene
ทรานส์คอนดักแตนซ์	Transconductance
น้ำบริสุทธิ์	De-ionized Water
บริเวณปลดพาหะ	Depletion Region
ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	Bipolar Transistor
ไบอัสกลับ	Reverse Bias

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ไบอัสตรง	Forward Bias
ประจุพาหะส่วนมาก	Majority Carrier
ปรากฏการณ์ซีเบค	Seebeck Effect
พินช์ออฟ	Pinch Off
ฟังก์ชันงาน	Work Function
ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค	Intrinsic Diamond Film
โฟโตมาสก์	Photo Mask
ภาวะสมดุลความร้อน	Thermal Equilibrium
ยูนิตเซลล์	Unit Cell
ยูนิโพลาร์ทรานซิสเตอร์	Unipolar Transistor
รอยสัมผัสแบบชอตต์กี	Schottky Contact
รอยสัมผัสแบบโอห์มิก	Ohmic Contact
แรงดันขีดเริ่ม	Threshold Voltage
แรงดันภายใน	Built-in Voltage
แลตทิซ	Lattice
วงแหวนหกเหลี่ยม	Tetrahedral
สัญญาณรบกวน	Noise
สารกึ่งฉนวน	Semi-insulating
ไส้ทั้งสแตน	Tungsten Wire
ออกไซด์	Oxide
อิเล็กตรอน	Electron
อิเล็กตรอนอันดับที่สอง	Secondary Electron
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	Electronic Device
เอทิลแอลกอฮอล์	Ethyl-alcohol
เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด	Enhancement Mode
แอนนัล	Anneal
โฮล	Hole
ไฮโดรคาร์บอน	Hydrocarbon
ไฮโดรเจนเทอร์มิเนชัน	H-Termination

คำนำ

ในปัจจุบันนี้ฟิล์มเพชรได้เป็นที่รู้จักกันมากขึ้น ด้วยคุณสมบัติที่ดีหลายด้านของฟิล์มเพชรที่ดีกว่าสารกึ่งตัวนำที่ใช้กันในปัจจุบัน อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์ได้ง่าย ไม่ซับซ้อนและค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ ซึ่งเป็นที่สนใจในหมู่นักวิจัยในเชิงวิศวกรรมและเชิงพาณิชย์ ซึ่งได้มีการประยุกต์ใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์หลายอย่าง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็เช่นเดียวกัน ได้ทำการศึกษาและการสร้าง MESFET จากฟิล์มเพชรโดยรายละเอียดของการวิจัยและการสร้างมีดังนี้

ในบทที่ 1 จะกล่าวถึงความเป็นมา และชนิดของทรานซิสเตอร์ประเภทผลของสนามไฟฟ้า และคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มเพชรตลอดจนถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร เช่น วิเคราะห์พื้นผิวและลักษณะของระนาบและปริมาณฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์เพื่อบ่งบอกความเป็นไปได้ของการเป็นฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยระบบ CVD แบบความร้อน

ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดพี และทฤษฎีของ MESFET ซึ่งจะมีรายละเอียดของโครงสร้างและการทำงานของ MESFET คุณสมบัติกระแสและแรงดันของ MESFET รวมทั้งคุณสมบัติการตอบสนองของควมถี่ของ MESFET เป็นต้น

ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงกระบวนการสร้าง MESFET ซึ่งต้องผ่านกระบวนการและเทคโนโลยีวงจรรวมต่างๆซึ่งนำมาประยุกต์ในการสร้าง MESFET ในครั้งนี้

ในบทที่ 4 เป็นการเสนอผลการทดลอง เริ่มด้วยการวิเคราะห์คุณสมบัติของชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้, คุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้า และ ผลการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของ MESFET รวมทั้งจะกล่าวถึงผลของการแปรค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ความหนาของชั้นความนำไฟฟ้า, ค่าความหนาแน่นของโฮล, ขนาดความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแส และ การตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์นี้ สุดท้ายจะเป็นผลอันเนื่องมาจากอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่ออุปกรณ์ทั้งหมดที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่ามีผลเป็นอย่างไร รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้โดยใช้ทฤษฎีในบทที่ 2 นำมาประกอบในการวิเคราะห์

ในบทที่ 5 เป็นส่วนของการสรุปผลการทดลองทั้งหมดที่ได้ทำในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายผู้ทำการวิจัยหวังว่า งานวิจัยครั้งนี้คงจะเป็นประโยชน์ไม่มากนักน้อยสำหรับผู้อ่านหรือ ผู้ที่จะต้องการพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไป

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

แนวคิดในการควบคุมการไหลของกระแสในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยการควบคุมความหนาแน่นของประจุพาหะได้ถูกค้นพบมาเป็นเวลาหลายปีแล้ว ในปี 1926 Julius Lilienfeld ได้จดทะเบียนแนวความคิดนี้ ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีที่มีในขณะนั้นไม่สามารถที่จะสร้างเป็นอุปกรณ์ได้ จนกระทั่งหลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 จบลง Bell Labs ได้ทำการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการขยายสัญญาณโดยใช้สารกึ่งตัวนำซึ่งมีโครงสร้างเป็น Field Effect Device จากการศึกษาพบว่าการสร้าง field effect transistor ที่ใช้โลหะเป็นขั้วเกตโดยตรงบนเยอร์มันเนียม หรือซิลิคอน เป็นไปได้ยาก เนื่องจาก surface state density มีค่าสูงมาก ดังนั้นจำเป็นต้องมีฉนวนกั้นอยู่ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่บริเวณขั้วเกตของทรานซิสเตอร์

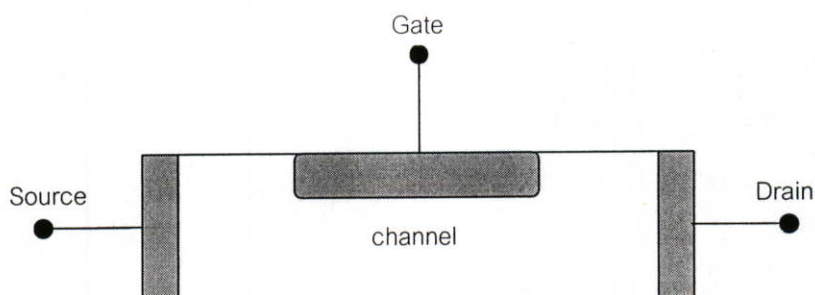
ในช่วงปี 1950 ได้มีการนำเอาซิลิคอนมาสร้างเป็น bipolar transistor แทน เยอร์มันเนียม ถึงแม้ว่าการสร้างซิลิคอนที่มีผลึกเดียวจะทำได้ยาก และกระบวนการผลิตอุปกรณ์จะยากกว่า เยอร์มันเนียมก็ตาม แต่อุปกรณ์ที่สร้างจากซิลิคอนจะสามารถทำงานได้ดีกว่า ซึ่งบริษัท Texas Instrument ประสบความสำเร็จในการสร้าง npn silicon transistor ได้เป็นครั้งแรก

ในปี 1951 Heinrich Welker ได้แสดงว่าสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบเช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ และ อินเดียมฟอสไฟด์ (InP) สามารถนำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แทนซิลิคอน และ เยอร์มันเนียมได้ ถึงแม้ว่าเขาได้แสดงให้เห็นว่าทั้ง แกลเลียมอาร์เซไนด์ และ อินเดียมฟอสไฟด์ มีค่าความคล่องตัวของประจุพาหะสูงกว่าซิลิคอน และเยอร์มันเนียม แต่ก็ไม่ได้ได้รับความสนใจเท่าที่ควร จนกระทั่งพบข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่สร้างจากซิลิคอน ดังนั้นแกลเลียมอาร์เซไนด์จึงได้รับความสนใจและพัฒนาไปเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น MESFET ที่สร้างจากแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งจะนำมาใช้งานในย่านความถี่สูง ๆ และวงจรที่ต้องการความเร็วสูง

1.2 ทรานซิสเตอร์ประเภทผลของสนามไฟฟ้า (Field-Effect Transistor) [1,2]

ทรานซิสเตอร์ประเภทผลของสนามไฟฟ้า (Field-Effect Transistor : FET) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งซึ่งการทำงานต้องอาศัยผลทางสนามไฟฟ้า โดยกระแสที่ไหลในอุปกรณ์ประเภทนี้จะเป็นกระแสของประจุพาหะส่วนมาก (Majority Carrier) เพียงชนิดเดียวเท่านั้น และเป็นกระแสดริฟ (Drift Current) ดังนั้นในบางครั้งเราจึงเรียกทรานซิสเตอร์พวกนี้ว่า "ยูนิโพลาร์ ทรานซิสเตอร์" (Unipolar Transistor) การควบคุมการไหลของกระแสในช่องทางเดินกระแส

จะกระทำได้โดยการควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนที่ขั้วหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าขั้วเกต โครงสร้างพื้นฐานของ FET จะประกอบด้วยช่องทางเดินกระแสซึ่งเป็นทางที่ให้ประจุพาหะส่วนมากไหลจากขั้วซอสไปยังขั้วเดรน ซึ่งขั้วซอสและเดรนนี้จะเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ลักษณะโครงสร้างของ FET ซึ่งมีขั้วเกตเป็นตัวควบคุมขนาดของช่องทางเดินกระแส

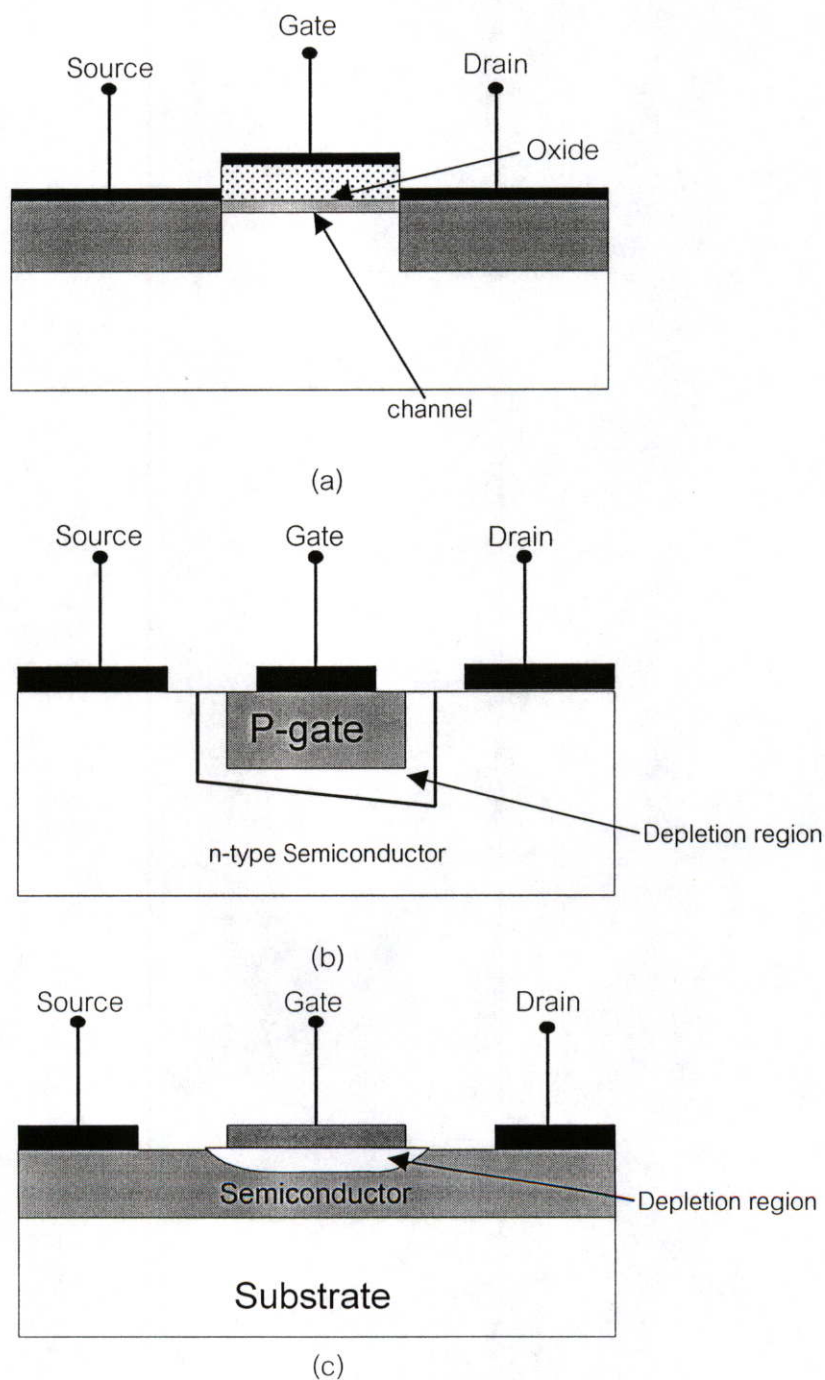
โดยความกว้างของช่องทางเดินกระแสจะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันที่ขั้วเกต ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อไหลของกระแสบริเวณช่องทางเดินกระแสด้วย FET มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar Transistor) คือมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์สูงมากและคุณสมบัติในการทำงานของ FET เปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิและรังสีน้อย นอกจากนี้ยังมีสัญญาณรบกวน (noise) ต่ำ จากข้อดีเหล่านี้ FET จึงถูกนำมาใช้งานทางด้านการสื่อสารผ่านดาวเทียม ซึ่งทำงานในย่านความถี่สูง และใช้งานในวงจรดิจิทัลที่ต้องการความเร็วสูง

จากที่กล่าวมาแล้วนี้จะเห็นได้ว่า FET เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่มีประโยชน์และน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เราสามารถจำแนก FET ออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ ได้แก่ FET ชนิดรอยสัมผัส (Junction-FET : JFET) และ FET ชนิด Metal Oxide Semiconductor (MOSFET) ซึ่ง FET ชนิดรอยสัมผัสนี้ยังสามารถแยกได้เป็น รอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำกับสารกึ่งตัวนำเรียกว่า "JFET" และรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเรียกว่า "MESFET" (Metal Semiconductor Field-Effect Transistor) FET แต่ละชนิดที่กล่าวมาข้างต้นนั้น มีความแตกต่างกันที่วัสดุที่นำมาใช้ทำขั้วเกต ตำแหน่งของขั้วเกตเมื่อเทียบกับช่องทางเดินกระแส การแยกขั้วเกตจากช่องทางเดินกระแส และชนิดของประจุพาหะที่ถูกเหนี่ยวนำโดยแรงดันที่ขั้วเกตเข้าสู่ช่องทางเดินกระแส (อิเล็กตรอนในเอ็น-แชนแนล โฮลในพี-แชนแนล)

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET) ลักษณะโครงสร้างของ MOSFET แสดงในรูปที่ 1.2(a) ขั้วเกตจะถูกแยกออกจากช่องทางเดินกระแสด้วยชั้นออกไซด์ (oxide) คุณภาพที่ดีของรอยสัมผัสระหว่างซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์ทำให้มีจำนวน interface states น้อย จุดเด่นนี้เองที่ทำให้ซิลิคอน MOSFET กลายเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญมากใน

ปัจจุบันนี้ ช่องทางเดินกระแสของทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ถูกสร้างโดยอิเล็กตรอน(เอ็น-แชนแนล) หรือ โฮล(พี-แชนแนล) ซึ่งอิเล็กตรอน หรือโฮลนี้จะถูกเหนี่ยวนำโดยแรงดันที่ขั้วเกต

JFET (Junction FET) โครงสร้างของ JFET แสดงในรูปที่ 1.2(b) เกทของ JFET จะสร้างจากรอยสัมผัสพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำ การให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยสัมผัสพี-เอ็นนี้จะเป็นตัวควบคุมความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งจะควบคุมปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าในช่องทางเดินกระแส



รูปที่ 1.2 ลักษณะโครงสร้างของ FET ชนิดต่างๆ (a)MOSFET (b)JFET (c)MESFET

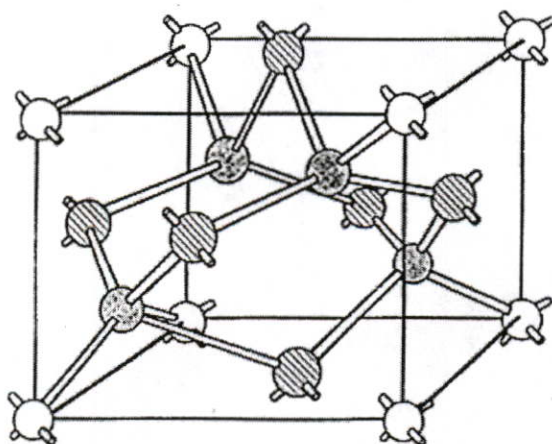
MESFET (Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor) มีโครงสร้างพื้นฐานและหลักการทำงานคล้ายกับ JFET ซึ่งเกตที่เป็นรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำของ JFET จะถูกแทนที่ด้วยเกตที่เป็นรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำโดยใช้โลหะที่เป็นรอยสัมผัสแบบขอตติกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำให้ MESFET มีข้อดีกว่า JFET คือสามารถสร้างรอยสัมผัสแบบขอตติได้ง่ายและไม่ต้องแพร่สารเจือเพื่อทำเป็นขั้วเกต ทำให้ลดความผิดพลาดของรูปทรงของเกตได้ และสามารถที่จะสร้างอุปกรณ์ให้มีช่องทางเดินกระแสสั้น ๆ ได้ ลักษณะโครงสร้างของ MESFET แสดงในรูปที่ 1.2(c) ช่องทางเดินกระแสของ MESFET จะถูกทำให้หายไปบางส่วน หรือปิดสนิทด้วยแรงดันที่ขั้วเกต หรือแรงดันภายใน(built-in voltage) ที่เกิดจากรอยสัมผัสขอตติที่บริเวณขั้วเกต ช่องทางเดินกระแส และเกตถูกแยกออกจากกันด้วยบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนี้สามารถควบคุมได้โดยแรงดันที่ขั้วเกต ค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนี้เองที่เป็นตัวควบคุมปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าในช่องทางเดินกระแส

เมื่อไม่นานมานี้มีการทดลองที่ประสบผลสำเร็จในการสังเคราะห์เพชรได้ที่อุณหภูมิสูงและความดันต่ำ โดยเพชรที่สังเคราะห์ได้นี้มีคุณสมบัติหลายๆ อย่างที่ดีกว่าสารกึ่งตัวนำที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน และสามารถสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก และรอยสัมผัสแบบขอตติกับฟิล์มเพชรได้ โดยขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่จะนำมาใช้ทำรอยสัมผัส ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ก็คือ เพชร โดยสังเคราะห์ได้ด้วยวิธี CVD แบบความร้อนซึ่งเมื่อเรานำเพชรมาสร้างเป็น MESFET จะทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าหลายๆ อย่างดีขึ้น และสามารถใช้งานในที่อุณหภูมิสูงได้ดี โดยเพชรยังสังเคราะห์ได้ง่าย ปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย

1.3 สารกึ่งตัวนำเพชร [3]

เพชรเป็นรูปแบบหนึ่งของธาตุคาร์บอนซึ่งเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ที่ 4 โดยลักษณะของโครงสร้างจะประกอบไปด้วย อะตอมคาร์บอนจับตัวกันเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า "Diamond Structure" ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.3 จากรูปแสดงให้เห็นว่าภายในยูนิทเซลล์จะประกอบไปด้วย อะตอมคาร์บอน 6 อะตอมเรียงตัวแบบ face center cubic (FCC) และอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอม อยู่ในตำแหน่ง $\frac{1}{4}$ เมื่อวัดตามแนวเส้นทแยงมุมของยูนิทเซลล์ อะตอมคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนสี่ตัวที่อยู่รอบ ๆ ตัวมันเองด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3 เราจะพบว่า Diamond Structure นี้ อะตอมคาร์บอนจะจับตัวกันมีลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม โดยอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการเหลื่อมในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกันจากระนาบ หรืออาจมองได้ว่า วงแหวนหกเหลี่ยมเกิดจากอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกันเป็นระนาบ (111) 2 อันวางซ้อนทับกันในลักษณะกลับหัว ความยาวของแลตทิซอาจถูกมองว่าเป็นการเรียงกันเป็นชั้น ๆ ของวงแหวน

หกเหลี่ยมโดยที่แต่ละวงมีตำแหน่งตรงกัน ในทิศทางของระนาบ (111) การเรียงลำดับชั้นจะเป็นแบบ ABC ABC.... ซึ่งทำให้เพชรมีค่าคงที่แลตทิซเป็น 3.567 \AA และความยาวพันธะหรือระยะห่างระหว่างอะตอมตัวที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.54 \AA ผลของการตรวจสอบด้วย Raman spectroscopy พบว่าค่ายอดลำดับที่หนึ่ง (First order peak) ของเพชรมีค่า 1332 cm^{-1} สำหรับคาร์บอน 12 ส่วนในกรณีของคาร์บอน 13 จะมีค่ายอดที่ลำดับที่หนึ่งอยู่ที่ 1284 cm^{-1}



รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกเพชร [3]

1.4 คุณสมบัติต่าง ๆ ของเพชร [4]

1.4.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

เพชรมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่น่าสนใจหลายอย่างจึงสามารถนำเพชรมาใช้งานทางด้านการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ หากพิจารณาคุณสมบัติของเพชรในแง่สารกึ่งตัวนำแล้วพบว่าค่าความคล่องตัวของโฮลสูงถึง $1800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ส่วนของอิเล็กตรอนมีค่า $2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในปัจจุบันมีเพียงเยอรมาเนียม (Germanium) และอินเดียมแอนติโมนไนด์ (Indium antimonide) เท่านั้นที่มีค่าความคล่องตัวของโฮลสูง ๆ ส่วนในวัสดุอื่น ๆ จะมีค่าความคล่องตัวของโฮลและ Dielectric strength ต่ำ ส่วนค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติจะสูงถึง $10^{16} \text{ }\Omega\text{-cm}$

สารเจือที่นำมาใช้ในการเปลี่ยนสภาพฟิล์มเพชรให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีคือโบรอน โดยอาจอยู่ในรูปของก๊าซหรือของเหลว เนื่องจากโบรอนเป็นธาตุอยู่ในหมู่ที่ 3 จึงทำหน้าที่เป็นอะตอมสารเจือผู้รับ อีกทั้งยังมีขนาดอะตอมเหมาะสมสามารถจับตัวกับอะตอมคาร์บอนโดยไม่ทำให้แลตทิซเสียรูป ค่าพลังงานกระตุ้นของโบรอนขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนที่เจือลงไป ถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่ามาก พลังงานกระตุ้นจะมีค่าน้อยลงทำให้เกิด

Shallow level มากขึ้น โดยทั่วไปแล้วถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่าประมาณ 10^{19} cm^{-3} พลังงานกระตุ้นจะมีค่าประมาณ 0.37 eV ส่วนฟิล์มเพชรชนิด Highly doped (อะตอมสารเจือมากกว่า 10^{19} - 10^{20} cm^{-3}) พลังงานกระตุ้นจะมีค่าต่ำคือประมาณ 0.002 eV

1.4.2 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

พิจารณาตารางที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชร กับซิลิคอน และแกเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้นิยมใช้เป็นสารกึ่งตัวนำหลักในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน จากตารางจะเห็นว่าเพชรมีคุณสมบัติหลาย ๆ อย่างที่ดีกว่าซิลิคอน และแกเลียมอาร์เซไนด์ ดังนั้นเพชรจึงเป็นสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมจะนำมาใช้งานในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับซิลิคอน และแกเลียมอาร์เซไนด์ [3]

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

*สำหรับกรณีสารกึ่งตัวนำเพชรชนิด Polycrystalline [5]

จากตารางสามารถสรุปลักษณะเด่นของเพชรได้ดังนี้

1. เพชรมีค่าแถบพลังงานต้องห้าม (E_g) สูงกว่าซิลิคอน และแกเลียมอาร์เซไนด์มาก จึงเหมาะที่จะนำไปใช้งานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูง ๆ ซึ่งที่อุณหภูมิสูงนี้ซิลิคอน และแกเลียมอาร์เซไนด์จะมีประจุพาหะอิสระเกิดขึ้นจำนวนมากข้ามผ่านแถบพลังงานต้องห้ามทำให้ไม่สามารถควบคุมจำนวนประจุพาหะได้ตามต้องการ
2. เพชรมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ ทำให้สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ดี

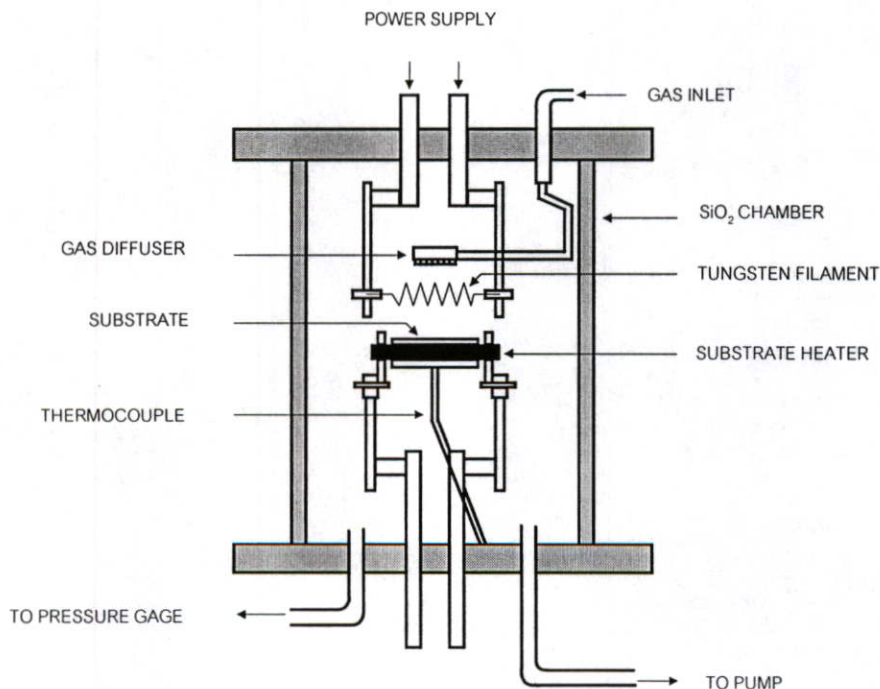
3. ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรธรรมชาติมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพต้านทานนี้สามารถเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการโดยเติมอะตอมสารเจือลงไป
4. เพชรที่มีค่าสภาพนำความร้อนสูงจึงเหมาะที่จะนำไปใช้งานทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และในวงจรรวมสามารถที่จะบรรจุจำนวนอุปกรณ์ให้มีความหนาแน่นมากได้ โดยที่ไม่มีปัญหาทางด้านความร้อน อีกทั้งยังเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นตัวระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ

1.5 เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี Thermal Enhance CVD [4]

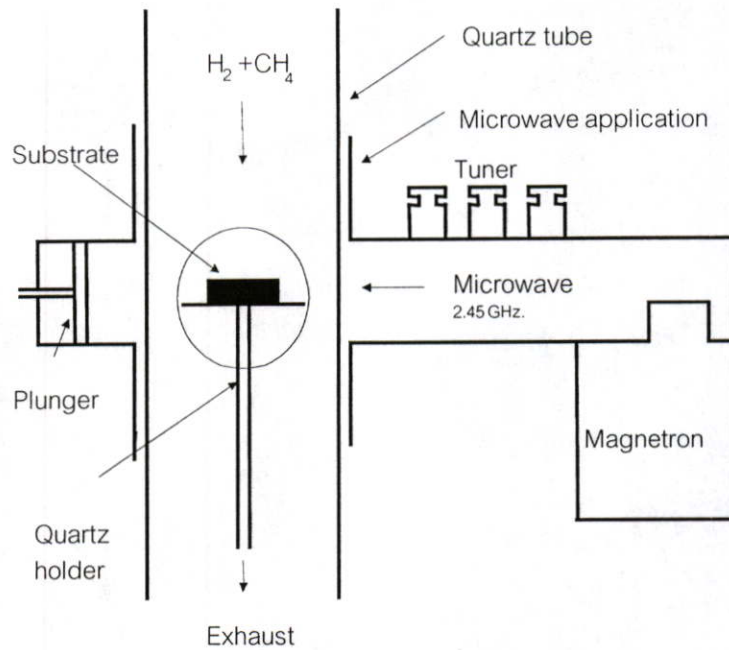
ปัจจุบันการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการสร้างไม่ยุ่งยากและต้นทุนการสร้างต่ำ การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD เป็นหนึ่งในวิธีสร้างที่มีผู้ให้ความสนใจแพร่หลาย มีการพัฒนาทางเทคนิคการสร้างแตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปแล้ววิธีการ CVD นี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม หลักๆได้ตามเทคนิคที่ใช้คือ

1. Thermal Enhanced CVD Methods
2. Plasma- Enhanced CVD Methods
3. Combustion Flame - Assisted CVD

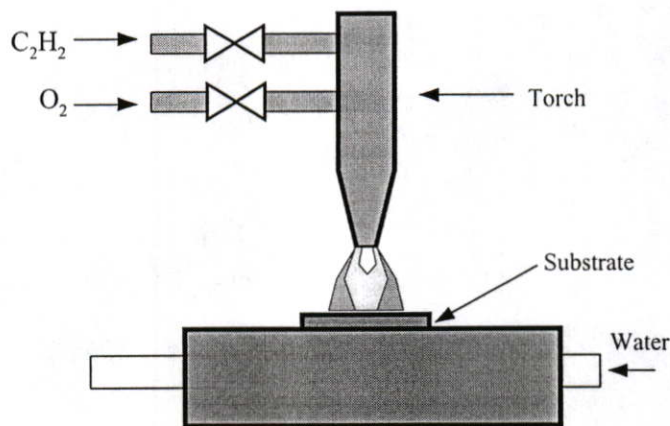
โดยแผนภาพของระบบ CVD ทั้ง 3 กลุ่มนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.4-รูปที่ 1.6



รูปที่ 1.4 แผนภาพระบบ Hot-Filament-Assisted Thermal CVD [4]

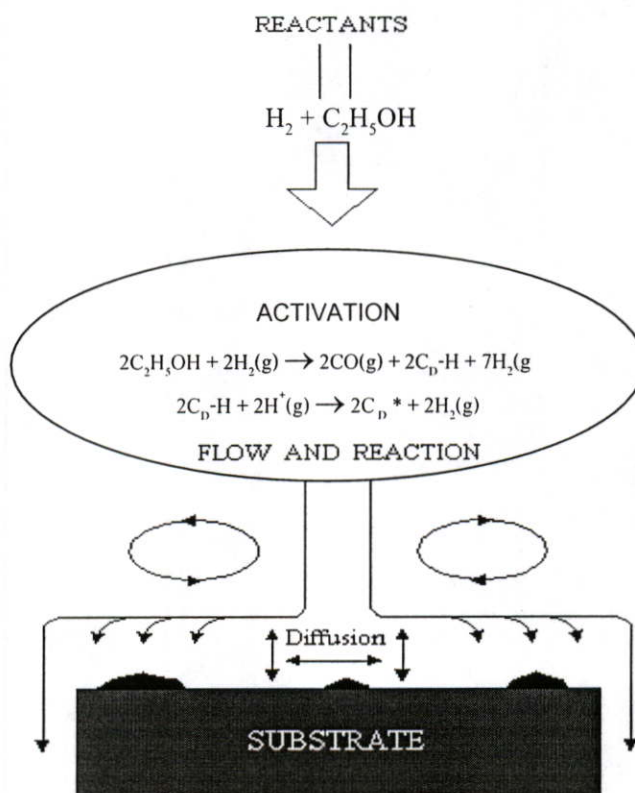


รูปที่ 1.5 แผนภาพระบบ Microwave Plasma CVD [4]



รูปที่ 1.6 แผนภาพระบบ Combustion Flame Assisted CVD [4]

โดยแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันของพารามิเตอร์ อาทิเช่น อัตราการเกิดของฟิล์มเพชร อุณหภูมิที่ใช้ในการสร้าง อุณหภูมิของฐานรอง, พื้นที่การเกิดฟิล์มเพชร ตลอดจนคุณภาพของฟิล์มที่ได้ แต่ท้ายที่สุดฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีการต่างๆ จากการตรวจสอบจะพบว่า ลักษณะรูปร่างของฟิล์มและสเปกตรัมของ Raman จะคล้ายกันอันเป็นที่ยืนยันได้ว่า แม้เทคนิคที่ใช้สร้างฟิล์มเพชรต่างกันไป แต่ผลที่ได้ก็คือ ฟิล์มเพชรเหมือนกันนั่นเอง



รูปที่ 1.7 แผนภาพกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์เพชร ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน [3]

หลักการพื้นฐานของวิธี Thermal Enhance CVD จะประกอบไปด้วย

1. ในระบบต้องมีอะตอมของไฮโดรเจนปรากฏอยู่

เนื่องจากการเกิดของเพชรจากอนุมูลคาร์บอนในบรรยากาศที่มีอะตอมของไฮโดรเจนเป็นเครื่องยืนยันให้เห็นว่า เพชรจะมีความเสถียรในสภาวะที่มีอะตอมไฮโดรเจนมากกว่ากราฟิต สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ในโครงสร้างเพชรถ้าหากมีอะตอมคาร์บอนข้างเคียงสองอะตอมถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจน จะพบว่าพันธะ sp^3 ยังคงมีอยู่ ซึ่งในกรณีเดียวกันนี้กราฟิตจะมีการเปลี่ยนแปลงในวงแหวนกราฟิตทั้งหมด นั่นคือ ในการเกิดเพชรจากอนุมูลคาร์บอนซึ่งถูกเจือจางด้วยไฮโดรเจน จะนำไปสู่สองกระบวนการคือ หนึ่งคาร์บอนเริ่มก่อตัวในรูปของกราฟิต โดยมีเพชรอยู่บ้างเล็กน้อย และสองเกิดการเลือกกำจัดกราฟิตออกด้วยอะตอมไฮโดรเจน อาจกล่าวโดยสรุปว่าอะตอมไฮโดรเจนเป็นตัวสำคัญในการกำจัดกราฟิตหรือลดการเกิดกราฟิตขึ้น.

2. ต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุมูลคาร์บอน

จากรูปที่ 1.7 ในบริเวณที่มีการกระตุ้น (Activation) ก๊าซทั้งสองชนิดด้วยความร้อนจากหลอดความร้อนทั้งสแตนด์ออลที่มีประมาณ 2000 องศาเซลเซียส เป็นผลให้โมเลกุลของก๊าซทั้ง

สองเกิดการแตกตัวเป็นคาร์บอนอะตอม และไฮโดรเจนอะตอม ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นนี้จะถูกส่งผ่านจากบริเวณกระตุ้นไปยังฐานรอง โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิและแรงเป่าของก๊าซเฟส

3. อุณหภูมิของฐานรองต้องมีความเหมาะสม

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนี้ อุณหภูมิมีความสำคัญอย่างมากต่อการก่อตัวและการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนให้อยู่ในโครงสร้างเพชร รวมทั้งระนาบของฟิล์มเพชรที่จะเกิดขึ้นด้วย เพชรจะก่อตัวบนพื้นผิวฐานรองที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 500°C ถึง 1200°C แล้วแต่กระบวนการที่ใช้ ถ้าหากอุณหภูมิของฐานรองมีค่าสูง หรือต่ำเกินไปจากนี้ อาจจะทำให้เกิดกราไฟต์หรือ Diamond-like carbon (DLC) ได้

4. ต้องมีการเตรียมพื้นผิวฐานรอง

ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิดสูง และมีโอกาสเกิดเป็นฟิล์มมากขึ้น หากมีการเตรียมพื้นผิวฐานรองเพื่อรองรับการนิวคลีเอชัน ซึ่งมีหลายวิธีในการเตรียมพื้นผิวเช่น การขัด, การกัดด้วยสารเคมี, การใช้แสงเลเซอร์ ฯลฯ นอกจากนี้ยังรวมไปถึงฐานรองที่ใช้ บริเวณพื้นผิวต้องไม่มีตัวเร่งต่างๆ ที่ทำให้เกิดกราไฟต์

ในกระบวนการสร้างนั้น ต้องใช้หลักการทั้งสี่ข้อนี้รวมกันเพื่อให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพดี อัตราการเกิดเป็นฟิล์มเพชรมีค่าสูง หากขาดข้อใดข้อหนึ่งไป ผลลัพธ์ที่ได้จะไม่ใช่เพชร คือ อาจเป็นกราไฟต์ อัดแน่นคาร์บอน หรือ Diamond-like carbon (DLC) ก็ได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการควบคุมเงื่อนไขทั้งสี่ข้อดังกล่าวสามารถใช้เทคนิคหลายอย่างควบคุมตามความเหมาะสม

สำหรับในวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอนี้ เลือกใช้การสังเคราะห์แบบ Thermal Enhanced CVD Methods โดยจะใช้กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน (Hot Filament Assisted Thermal CVD) วิธีนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Matsumoto et al. จาก NIRIM ในปี ค.ศ. 1981 แผนภาพของวิธี Filament-Assisted Thermal CVD แสดงดังรูป 1.4 ภายใน Chamber มีไส้หลอดทั้งสแตนทำหน้าที่กำเนิดความร้อน อุณหภูมิของไส้หลอดทั้งสแตนมีค่าสูงถึง $2,000-2,300^{\circ}\text{C}$ ฐานรองวางอยู่ด้านล่างของไส้หลอดมีอุณหภูมิ $700-1,000^{\circ}\text{C}$ เมื่อก๊าซผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจนถูกปล่อยเข้าไปใน Chamber ที่บริเวณไส้หลอดทั้งสแตนจะเกิดการแตกตัวของก๊าซขึ้นเป็นไฮโดรเจนอะตอมและคาร์บอนอะตอม ฐานรองสามารถไบอัสไฟเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการนิวคลีเอชัน และอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชร วิธี Filament-Assisted Thermal CVD นี้เป็นวิธีการที่ง่าย ค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีคุณภาพดีมาก สามารถสร้างฟิล์มเพชรได้ในบริเวณกว้าง และมีความปลอดภัยสูง แต่ปัญหาที่พบคือ อายุการใช้งานไส้หลอดทั้งสแตนสั้น เนื่องจากผลของการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดทั้งสแตนเป็นเวลานาน ทำให้ไส้หลอดเปราะและผิวดรูปได้ง่าย

1.6 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร

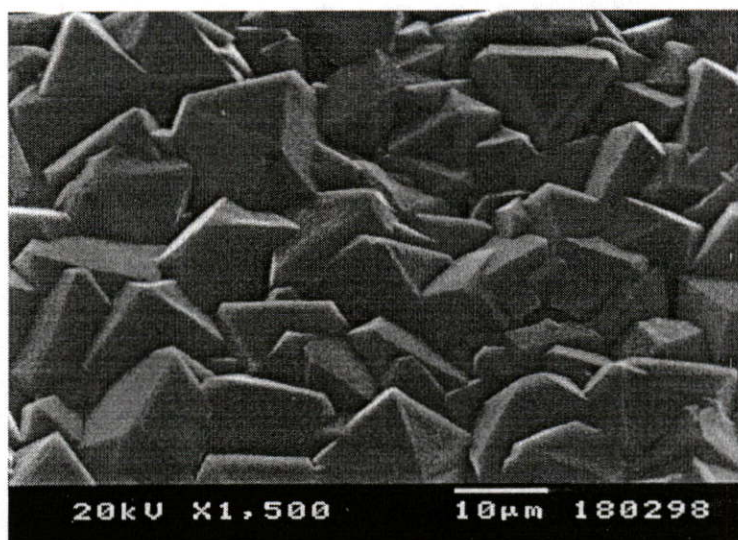
ภายหลังจากกระบวนการสร้างเพชรเสร็จสิ้นแล้ว ชิ้นงานที่ได้จะถูกนำไปตรวจสอบและวิเคราะห์หาคุณสมบัติของเพชรต่อไป การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรมีหลายวิธีการแล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งาน อาทิเช่น ถ้าต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรหรือความหนาของเพชรที่เกิดขึ้น นิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) แต่หากต้องการวิเคราะห์ถึงพันธะของอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกัน เพื่อตรวจว่าเป็นเพชร, กราไฟต์, อะมอร์ฟัสคาร์บอน หรือ DLC นิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy สำหรับในการศึกษาครั้งนี้จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติของเพชร 2 วิธี ได้แก่ วิธี Scanning Electron Microscopy (SEM) และวิธี Raman Spectroscopy

1.6.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) [3,4,6]

SEM เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน หลักการพื้นฐานของ SEM คือทำการกวาดโฟกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโฟกัสให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10-20 nm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุล ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด CRT (Cathode-ray tube) ข้อดีของ SEM เมื่อเทียบกับ Optical microscopes ชนิดอื่น ๆ คือ SEM มีกำลังขยายสูง (ตั้งแต่ 50 - 40,000X) ความคมชัดของภาพสูง (2.5-10 nm), ความลึกของสนามมากกว่า 500 เท่า และภาพที่เห็นเป็นแบบสามมิติ และหากเปรียบเทียบกับ TEM (Transmission electron microscopy) ซึ่งสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบต้องมีความบางมาก ๆ เพื่อให้อิเล็กตรอนผ่านไปได้ แต่ SEM สามารถใช้สารตัวอย่างที่เป็นเนื้อของแข็งได้เลย สำหรับสารตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้า สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านการเตรียมก่อน อย่างไรก็ตามในการใช้งานลำแสงอิเล็กตรอนที่มีค่าแรงดันและกระแสดำ ๆ จะช่วยหลีกเลี่ยงการประจุบนฟิล์ม ส่วนมากแล้วในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM นิยมใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น Raman spectroscopy

นอกจากนี้เทคนิคต่าง ๆ ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ทำให้ได้รูปร่างลักษณะของฟิล์มแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสร้าง โดยทั่วไปแล้วฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร (โดยเฉพาะฐานรอง Si) บริเวณผิวหน้าจะมีความขรุขระ และรูปร่างลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มเพชร แสดงดังรูปที่ 1.8 ซึ่งลักษณะของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่

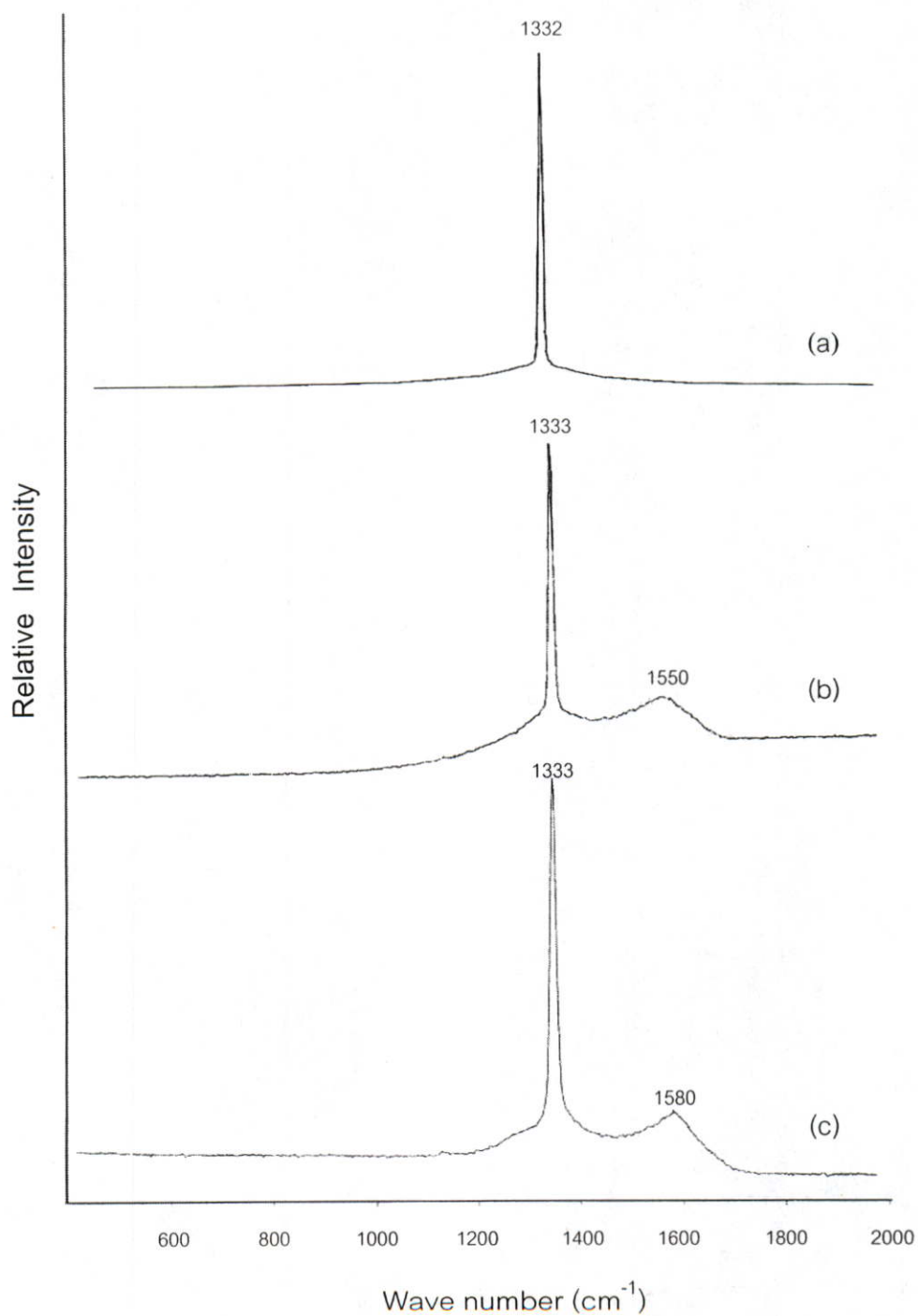
ใช้ในการสร้าง โดยเฉพาะอุณหภูมิของฐานรองและความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอนต่อก๊าซไฮโดรเจน



รูปที่ 1.8 ลักษณะรูปพื้นผิวด้านหน้าของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM

1.6.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy [3,4,7]

Raman spectroscopy เป็นวิธีการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ของวัสดุ โดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสง โดยทำการวัดการลดลงของความเข้มลำแสงที่ผ่านตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน (non-absorbing medium) ผลของ Raman นี้จะเป็นการกระเจิงในระดับโมเลกุล นั่นคือการกระเจิงของแสงนี้เกิดจากโฟตอนของลำแสงกับการสั่นภายในแลตทิซหรือโฟนอน ดังนั้น Raman Spectroscopy จึงเป็นวิธีที่นิยมนำมาตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร เนื่องจากพันธะของคาร์บอนมีความไวต่อการกระเจิงของ Raman สูง ดังนั้นจึงสามารถจำแนกประเภทต่าง ๆ ของโครงสร้างคาร์บอนได้ เช่น เพชร กราไฟต์ และอะมอร์ฟัสคาร์บอนซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ Raman spectrum และพันธะของคาร์บอนแสดงไว้ในตารางที่ 1.2 โดยที่ค่าสเปกตรัมของเพชรธรรมชาติมียอดอยู่ที่ 1332 cm^{-1} ดังแสดงในรูปที่ 1.9(a) และลักษณะสเปกตรัมของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.9(b) และ 1.9(c) โดยที่ยอดของกราฟ Raman อันดับหนึ่งสำหรับคาร์บอนโครงสร้างเพชร อะมอร์ฟัสและกราฟไฟต์ จะมีค่าอยู่ที่ 1333 cm^{-1} , 1550 cm^{-1} และ 1580 cm^{-1} ตามลำดับ จากรูปที่ 1.9(b) และ 1.9(c) บอกได้ว่า ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นเพชรที่ใกล้เคียงธรรมชาติ และบริสุทธิ์มาก แต่ยังมีปริมาณกราฟไฟต์และอะมอร์ฟัสคาร์บอนปนอยู่บ้าง ข้อดีที่สุดของการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วย Raman Spectroscopy นี้ คือเป็นวิธีที่ไม่ทำให้ชิ้นงานที่ตรวจสอบเสียหาย หรือทำลายโครงสร้าง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานต่อได้



รูปที่ 1.9 ลักษณะสเปกตรัมของเพชรธรรมชาติ และเพชรที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน (a) เพชรธรรมชาติ (b) เพชรสังเคราะห์ที่มีปริมาณอะมอร์ฟัสคาร์บอนปะปนอยู่ (c) เพชรสังเคราะห์ที่มีปริมาณกราฟิตปะปนอยู่

ตารางที่ 1.2 แสดงค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆ ของคาร์บอน[4]

Peak position	Type of carbon	Description
$\sim 1140 \text{ cm}^{-1}$	small size ($< 0.1 \mu\text{m}$) cubic diamond	occasionally observed in diamond films with very small grain sizes ($< 0.1 \mu\text{m}$)
$1315\text{-}1326 \text{ cm}^{-1}$	hexagonal diamond	broad band, observed in shock wave produced diamond
1332 cm^{-1}	cubic diamond	first order peak with FWHM of 1.9 cm^{-1} for natural diamond
1345 cm^{-1}	amorphous carbon	broad band. It becomes a shoulder of the 1550 cm^{-1} band when the material is hydrogenated
1355 cm^{-1}	microcrystalline graphite	observed in materials with small grain sizes
1550 cm^{-1}	amorphous or diamond-like carbon	broad band
1580 cm^{-1}	graphite	first order peak
2458 cm^{-1}	cubic diamond	second order peak
2710 cm^{-1}	microcrystalline graphite	second order peak
3240 cm^{-1}	graphite	second order peak

บทที่ 2

ทรานซิสเตอร์ประเภทผลของสนามไฟฟ้า โครงสร้างแบบ MESFET

MESFET (Metal Semiconductor Field-Effect Transistor) เป็นทรานซิสเตอร์ประเภทผลของสนามไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานกันแพร่หลายในปัจจุบัน โดยเฉพาะงานทางด้านการสื่อสารผ่านดาวเทียมซึ่งทำงานในย่านความถี่สูง และวงจรดิจิทัลที่ต้องการความเร็วสูง โครงสร้างของ MESFET พื้นฐาน คือ ประกอบด้วยขั้วสัมผัส 3 ขั้วคือ ขั้วซอส ขั้วเดรน และขั้วเกต โดยที่ขั้วซอส และขั้วเดรน เป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก ส่วนขั้วเกตเป็นรอยสัมผัสแบบชอตตี

ดังนั้นในขั้นต้นเราจะศึกษาถึงคุณสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อน เพื่อที่จะได้มีความเข้าใจในหลักการทำงานของ MESFET ดีขึ้น จากนั้นจะศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET ต่อไป

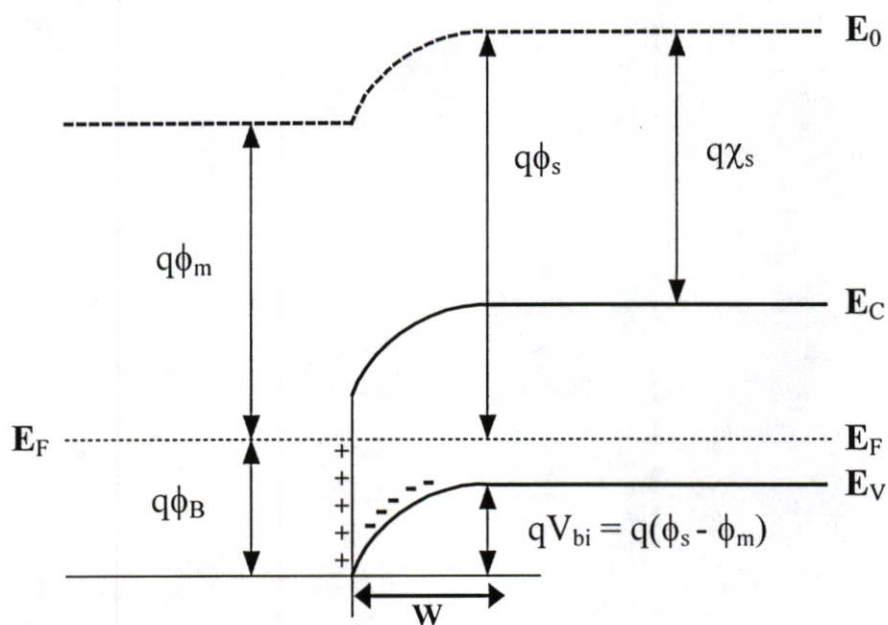
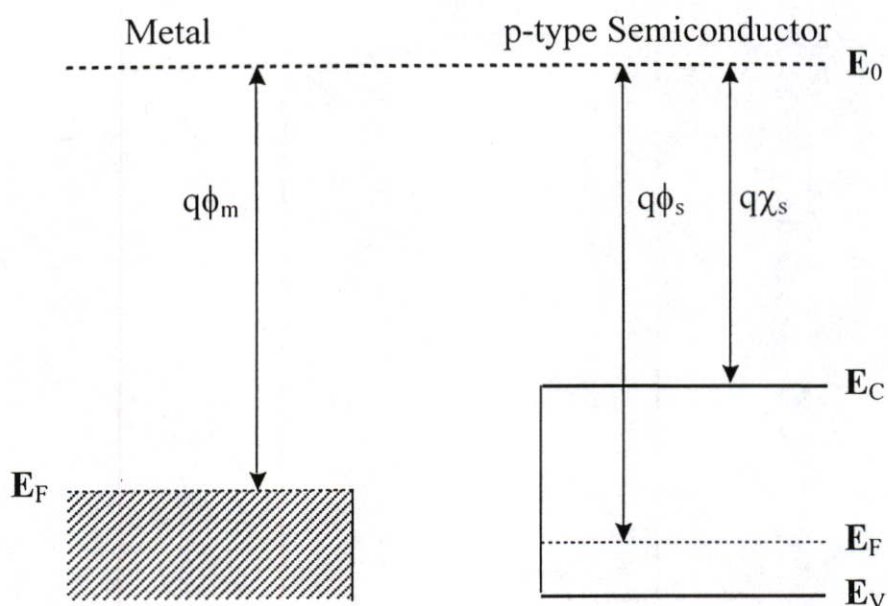
2.1 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ [8]

รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งได้ 2 ชนิดโดยขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำที่สัมผัสกัน รอยสัมผัสที่มีค่าความนำสูงและไม่มีผลหรือเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแส เรียกว่า "รอยสัมผัสแบบโอห์มิก"(ohmic contact) ส่วนรอยสัมผัสที่ยอมให้กระแสไหลได้ในทิศทางเดียวจะเรียกว่า "รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์"(rectify contact) หรือรอยสัมผัสแบบชอตตี ซึ่งคุณสมบัติของรอยสัมผัสทั้ง 2 แบบนี้ต่างก็ถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาเฉพาะ Diamond MESFET ชนิดพีแชนแนล ดังนั้นจะพิจารณาถึงคุณสมบัติของรอยสัมผัสที่สร้างขึ้นระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี

2.1.1 รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ (Rectify contact)

แบบจำลองแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่ก่อนสัมผัสกัน แสดงในรูปที่ 2.1(a) โดยมีระดับพลังงานที่สูญญากาศ (E_0) เป็นระดับพลังงานอ้างอิง ซึ่งที่ระดับพลังงานที่สูญญากาศนี้อิเล็กตรอนจะหยุดนิ่ง ($E_k = 0$) ค่าฟังก์ชันงาน (work function : ϕ) คือค่าพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนจากระดับเฟอร์มิหลุดไปอยู่ที่ระดับสูญญากาศ พิจารณาจากรูปก็คือค่าความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานที่สูญญากาศกับระดับพลังงานเฟอร์มิ (ในสารกึ่งตัวนำระดับพลังงานเฟอร์มิจะขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนอะตอมสารเจือที่มีอยู่ในสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นระดับพลังงานเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำจึงเปลี่ยนแปลงได้) พิจารณารูปค่า electron affinity (χ_s) คือ ค่าพลังงานที่ทำให้

อิเล็กตรอนที่แถบความนำของสารกึ่งตัวนำหลุดไปอยู่ที่ระดับ E_0 ซึ่งก็คือ ค่าความแตกต่างระหว่าง E_0 กับแถบความนำ (E_C) ของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.1 แบบจำลองแถบพลังงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี (a) ก่อนสัมผัส
(b) ที่สภาวะสมดุลความร้อน

จากรูปที่ 2.1 ค่าฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าเท่ากับ $(E_0 - q\phi_m)$ และค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากับ $(E_0 - q\phi_s)$ โดยที่ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของโลหะ $(q\phi_{sp} > q\phi_m)$ เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีมาสัมผัสกัน เนื่องจากค่าฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี นั่นคือ อิเล็กตรอนในโลหะมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี จึงทำให้อิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านสารกึ่งตัวนำจนกระทั่งถึงสภาวะสมดุลความร้อน การถ่ายเทอิเล็กตรอนจะหยุดลงในภาวะนี้ ซึ่งระดับพลังงานเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ที่ระดับเดียวกันผ่านตลอดรอยสัมผัส ทำให้ระดับพลังงานอื่น ๆ ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีบริเวณรอยสัมผัสมีลักษณะโค้งลง ดังแสดงในรูปที่ 2.1(b) ในขณะที่อิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านสารกึ่งตัวนำนั้น อิเล็กตรอนจะรวมตัวกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ จึงทำให้เกิดอ็อนลบของอะตอมสารเจือผู้รับขึ้นที่สารกึ่งตัวนำ และเกิดมีประจุบวกขึ้นทางด้านโลหะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นที่สารกึ่งตัวนำโดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนี้มีค่าเท่ากับ W ซึ่งขนาดของความกว้างนี้จะขึ้นอยู่กับการเจือปนของสารเจือที่เติมลงไป ในสารกึ่งตัวนำ และที่บริเวณปลอดพาหะนี้จะเกิดสนามไฟฟ้าและแรงดันภายใน (built-in voltage) V_{bi} ขึ้น ซึ่งมีค่าดังนี้

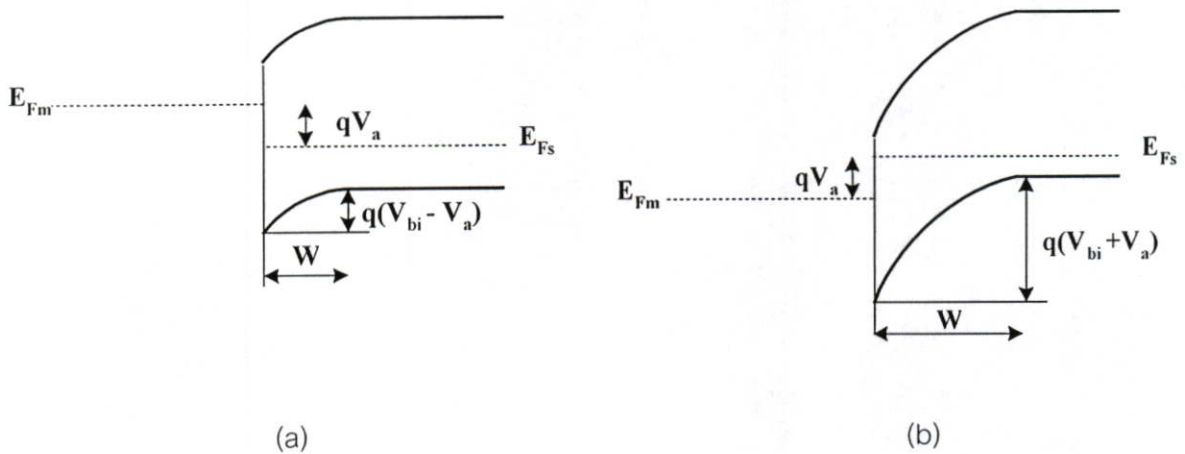
$$qV_{bi} = q(\phi_s - \phi_m) \tag{2.1}$$

โดยค่าแรงดันภายในนี้ เป็นค่าพลังงานที่โฮลต้องใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสเข้าไปในโลหะจากรูปที่ 2.1(b) จะเห็นว่ามีกำแพงศักย์ $(q\phi_B)$ เกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัสซึ่งเรียกว่า ซอตตีคกี แบรีเออร์ (Schottky barrier) โดยจะมีค่าดังสมการที่ (2.2)

$$q\phi_B = (q\chi_s + E_g - q\phi_m) \tag{2.2}$$

ค่าความสูงกำแพงศักย์นี้ คือ ค่าความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิ และแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณรอยสัมผัส

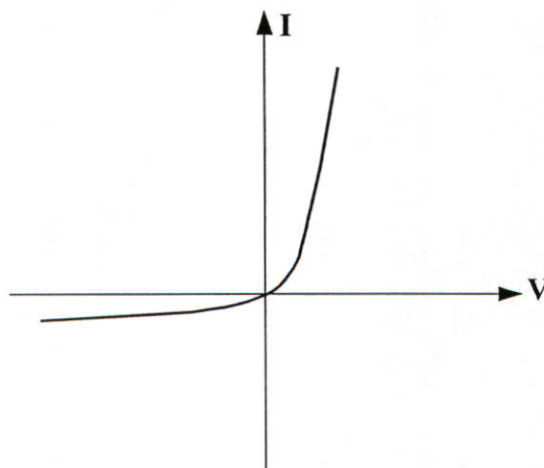
ในกรณีที่รอยสัมผัสได้รับแรงดันไบอัสโดยทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับโลหะ (ไบอัสตรง) จะทำให้ระดับพลังงานทุกระดับในสารกึ่งตัวนำมีค่าลดลงจากภาวะเดิมด้วยปริมาณ qV_a (V_a คือแรงดันไบอัสที่ให้แก่อรอยสัมผัส) ดังรูปที่ 2.2(a) ดังนั้นความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยสัมผัสจะมีค่าลดลงทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีค่าลดลงด้วย ดังนั้นจึงทำให้โฮลไหลจากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไหลในปริมาณมาก



รูปที่ 2.2 แบบจำลองแถบพลังงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ($\phi_m < \phi_{sp}$)

(a) กรณีไบอัสตรง (b) กรณีไบอัสกลับ

ส่วนในกรณีให้แรงดันไบอัสกลับแก่วอยล์สัมผัส คือให้ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีศักย์เป็นลบ เมื่อเทียบกับโลหะ กรณีนี้จะทำให้ความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขยายกว้างกว่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.2(b) ดังนั้นโฮลที่จะไหลไปยังโลหะจะถูกขัดขวางไว้ด้วยกำแพงศักย์ที่มีขนาดความสูงมาก ทำให้มีกระแสไหลได้ในจำนวนน้อยมาก ดังนั้นจึงเห็นได้ชัดว่ารอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีซึ่ง $\phi_m < \phi_{sp}$ จะมีคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ได้ เช่นเดียวกับรอยสัมผัสพี-เอ็นโดยทั่วไป คือ ยอมให้กระแสผ่านในกรณีที่เป็นไบอัสตรงเท่านั้นดังแสดงในรูป 2.3 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำแบบนี้เรียกว่า รอยสัมผัสชอตต์กี (Schottky contact) หรือ ชอตต์กีไดโอด (Schottky diode)



รูปที่ 2.3 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสชอตต์กี

จากคุณลักษณะกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสขอตติ์ในรูปที่ 2.3 จะมีปริมาณกระแสไฟฟ้าดังสมการที่ (2.3)

$$I = I_s [\exp(qV_a / kT) - 1] \quad (2.3)$$

โดยที่ค่า I_s คือกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับอิ่มตัว มีค่าเป็น

$$I_s = AA^* T^2 \exp(-q\phi_B / kT) \quad (2.4)$$

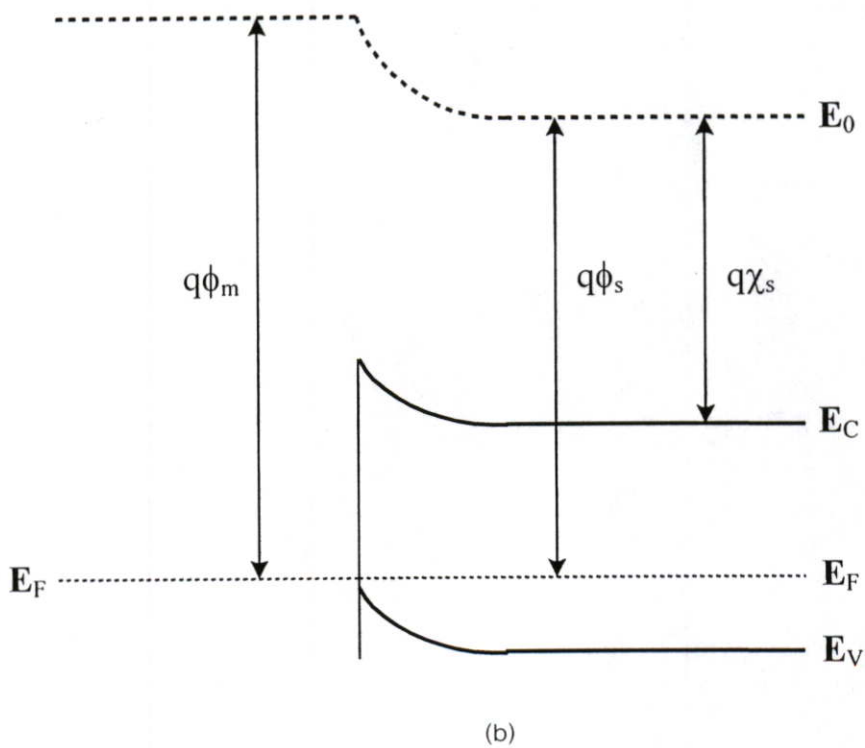
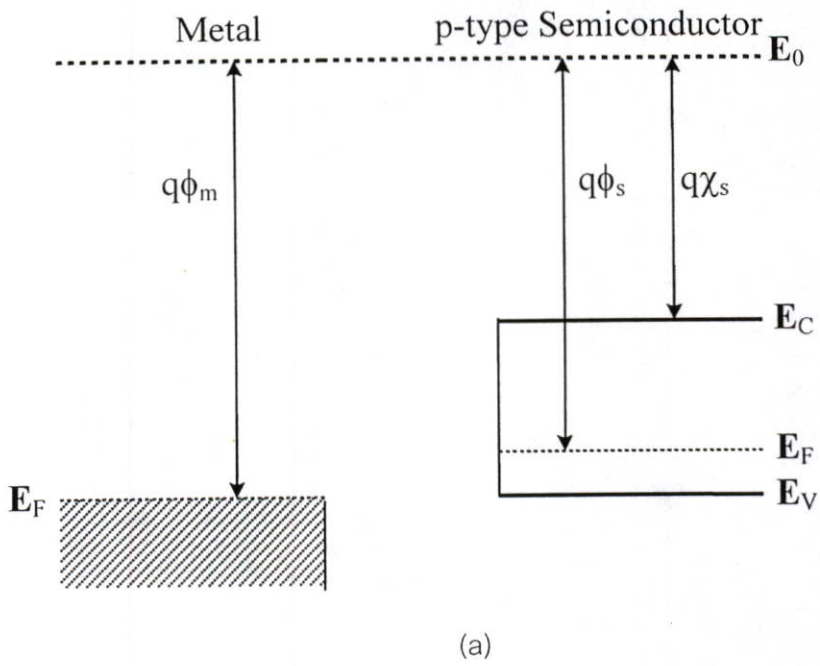
โดยที่ A คือพื้นที่ของรอยสัมผัส

A^* คือค่าคงที่ Richardson มีค่าดังสมการ

$$A^* = \frac{4\pi q m_h^* k^2}{h^3} \quad (2.5)$$

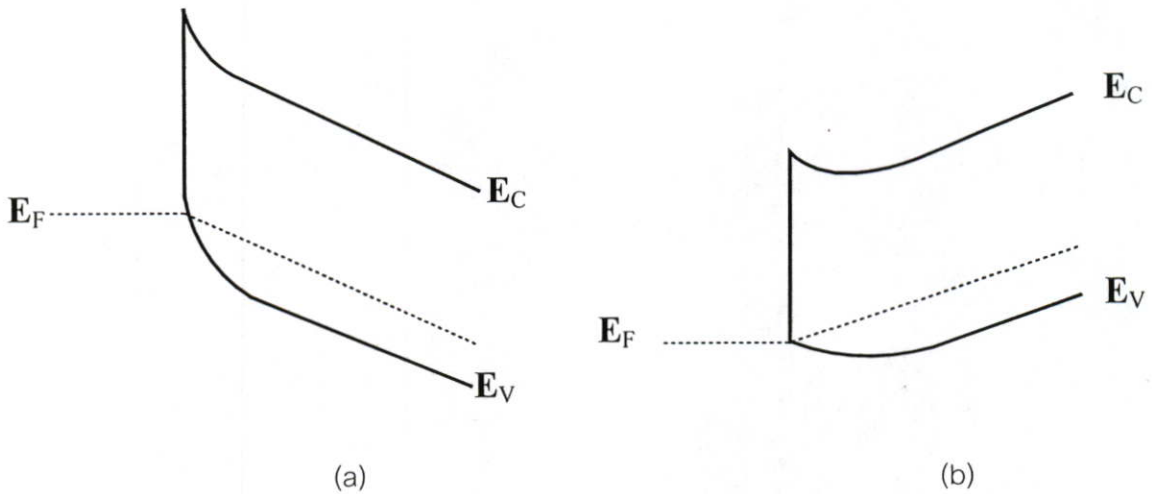
2.1.2 รอยสัมผัสแบบโอห์มิก (Ohmic contact)

รอยสัมผัสแบบโอห์มิก คือรอยสัมผัสที่มีค่าความนำสูง ไม่มีผลหรือเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแส โดยทั่วไปแล้วการสร้างขั้วสัมผัสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อนำไปใช้งานมักจะเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิกนี้ แบบจำลองแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนสัมผัสกัน แสดงในรูปที่ 2.4(a) จากรูปจะเห็นว่า ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของโลหะ และเมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีมาสัมผัสกัน เนื่องจากค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของโลหะ นั่นคืออิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีพลังงานมากกว่าอิเล็กตรอนในโลหะ จึงทำให้อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำชนิดพีเคลื่อนที่เข้าไปในโลหะจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุลความร้อน นั่นคือระดับพลังงานเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ที่ระดับเดียวกัน ทำให้ระดับพลังงานอื่น ๆ ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีบริเวณรอยสัมผัสมีลักษณะโค้งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.4(b) ที่บริเวณรอยสัมผัสจะเกิดการสะสมของโฮลขึ้นที่บริเวณแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี และเกิดประจุบวขึ้นทางด้านโลหะทำให้ไม่มีบริเวณปลอดพาหะเกิดขึ้น ดังนั้นจึงไม่มีกำแพงศักย์ที่คอยต้านการเคลื่อนที่ของโฮล โฮลจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสได้โดยอิสระ ซึ่งรอยสัมผัสดังกล่าวนี้จะมีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก



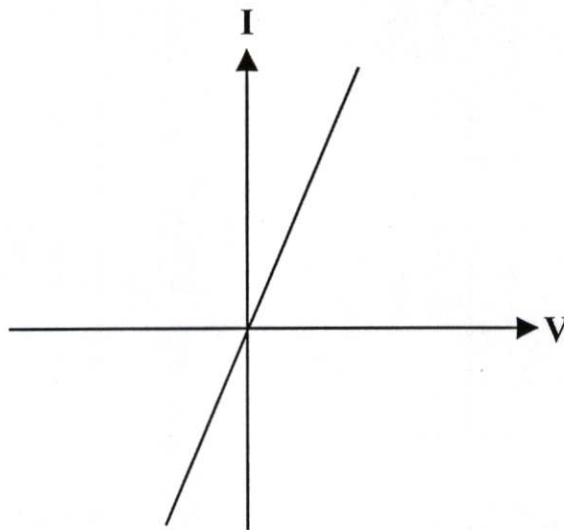
รูปที่ 2.4 แบบจำลองแถบพลังงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี (a) ก่อนสัมผัส
(b) ที่สภาวะสมดุลความร้อน

ในกรณีที่รอยสัมผัสได้รับไบอัสไม่ว่า ไบอัสตรงหรือไบอัสกลับโฮลยังคงสามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสได้โดยอิสระดังแสดงในรูปที่ 2.5 และในรูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสแบบโอห์มิก จะเห็นว่ามีลักษณะเป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.5 แบบจำลองแถบพลังงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ($\phi_m > \phi_{sp}$)

(a)กรณีไบอัสตรง (b)กรณีไบอัสกลับ



รูปที่ 2.6 คุณลักษณะกระแส และแรงดันของรอยสัมผัสแบบโอห์มิก

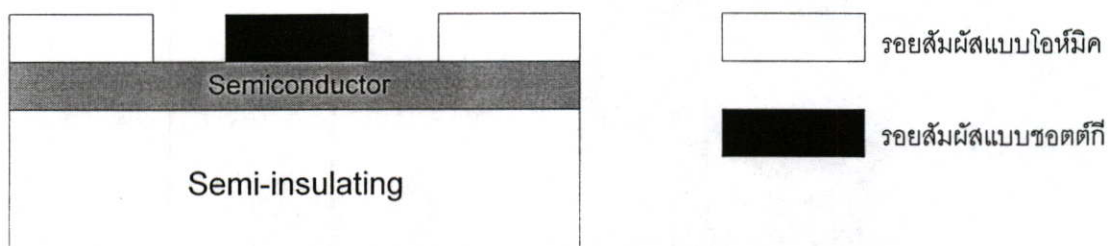
จากที่กล่าวมาทั้งหมด เราอาจสรุปได้ว่า รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะแสดงคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก หรือรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์นั้น ขึ้นอยู่กับค่าเปรียบเทียบกับระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี กล่าวคือ ถ้าค่าฟังก์ชันงานของโลหะมี

ค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ($\phi_m > \phi_{sp}$) รอยสัมผัสจะเป็นแบบโอห์มิก และถ้าค่าฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ($\phi_m < \phi_{sp}$) รอยสัมผัสจะเป็นแบบเรกติไฟร์

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดพีนั้น รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพีจะแสดงคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ เนื่องจากค่าฟังก์ชันงานของอลูมิเนียมมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของฟิล์มเพชรชนิดพี และรอยสัมผัสระหว่างทองคำกับฟิล์มเพชรชนิดพีเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก เนื่องจากค่าฟังก์ชันงานของทองคำมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของฟิล์มเพชรชนิดพี [9] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้อลูมิเนียมเพื่อสร้างรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ในการสร้างเป็นขั้วเกต และใช้ทองคำเพื่อสร้างเป็นขั้วซอส และขั้วเดรนของ MESFET

2.2 โครงสร้างและการทำงานของทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MESFET [10]

โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบ MESFET สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้นคือ ชั้นแรกจะใช้สารกึ่งฉนวน(Semi-insulating) เป็นฐานรอง ในกรณีของ Diamond MESFET ชั้นของฐานรองนี้จะใช้สารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิคแทน ส่วนในชั้นที่สองจะเป็นชั้นของสารกึ่งตัวนำ และชั้นบนสุดจะเป็น ชั้นโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



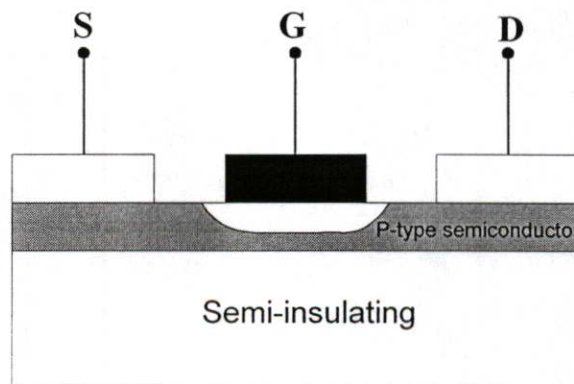
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบ MESFET

ในส่วน of ขั้วโลหะนั้น จะใช้โลหะ 2 ชนิดในการสร้างขั้วสัมผัส โดยจะใช้โลหะที่เป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก ในการสร้างขั้วซอส และขั้วเดรน และใช้โลหะที่เป็นรอยสัมผัสแบบชอตต์กีสร้างขั้วเกต ซึ่งจุดนี้เองที่เป็นข้อดีของ MESFET เนื่องจากการสร้างรอยสัมผัสแบบชอตต์กีนั้นทำได้ง่าย และไม่ต้องแพร่สารเจือเพื่อทำขั้วเกต ทำให้ลดความผิดพลาดของรูปทรงเรขาคณิตของขั้วเกตได้ ที่บริเวณของสารกึ่งตัวนำได้ขั้วเกตซึ่งเรียกว่าช่องทางเดินกระแสจะเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น เนื่องจากใช้โลหะที่เป็นรอยสัมผัสแบบชอตต์กี ดังที่กล่าวมาในหัวข้อที่แล้ว ซึ่งความกว้างของบริเวณ

หลอดพาหะนี้ สามารถควบคุมได้ด้วยแรงดันไบอัสที่ให้แก่วัสดุ และขนาดของบริเวณหลอดพาหะนี้ จะมีผลต่อกระแสที่ไหลในช่องทางเดินกระแสด้วย ดังนั้นเราสามารถควบคุมปริมาณกระแสที่ไหลในช่องทางเดินกระแสได้ด้วยแรงดันไบอัสที่ขั้วเกต ซึ่งจะเห็นได้ว่า MESFET นั้นจัดเป็น FET ชนิดรอยสัมผัสแบบหนึ่ง เราสามารถแบ่งชนิดของ MESFET ตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 แบบ [2] คือ แบบดีพลีชันโหมด (depletion mode) และแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (enhancement mode) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะยกตัวอย่างเฉพาะกรณี พีแซนแนลเท่านั้น โดยรายละเอียดของ MESFET ทั้งสองแบบนี้จะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

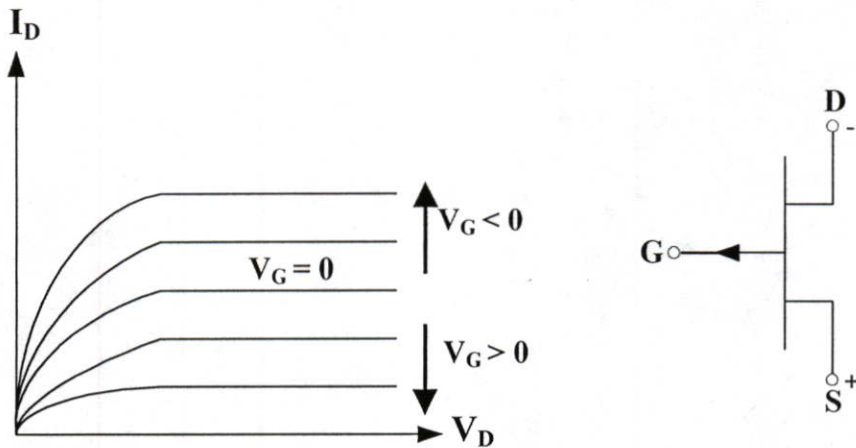
2.2.1 ทรานซิสเตอร์ ชนิดพีแซนแนลแบบดีพลีชันโหมด

ทรานซิสเตอร์แบบดีพลีชันโหมดนี้ ในขณะที่ยังไม่มีการให้แรงดันที่ขั้วเกต ($V_G = 0$) จะเกิดช่องทางเดินกระแสขึ้นเนื่องจากบริเวณหลอดพาหะจะครอบคลุมเพียงบางส่วนของช่องทางเดินกระแส เมื่อมีการให้แรงดันที่ขั้วซอร์ส และเดรน กระแสจะไหลได้ทันที โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.8 ขนาดของช่องทางเดินกระแสสามารถควบคุมได้ด้วยแรงดันที่ให้แก่วัสดุ นั่นคือถ้าให้แรงดันบวกแก่วัสดุ (ไบอัสกลับ) ขนาดของช่องทางเดินกระแสจะเล็กลงเนื่องจากบริเวณหลอดพาหะขยายตัวทำให้กระแสที่ไหลมีค่าลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าให้แรงดันลบแก่วัสดุ (ไบอัสตรง) ช่องทางเดินกระแสจะมีขนาดกว้างขึ้นทำให้กระแสไหลได้มากขึ้น ในกรณีที่ค่าแรงดันที่ขั้วเดรน (V_D) ต่ำๆ ในขณะที่ค่าของแรงดันที่ขั้วเกต (V_G) มีค่าคงที่ ค่าความต้านทานของช่องทางเดินกระแสจะมีค่าคงที่ ทำให้กระแสที่ไหลนั้นแปรผันตรงกับค่าแรงดันที่ขั้วเดรน นั่นคือกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น เมื่อแรงดันที่ขั้วเดรนมีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานของช่องทางเดินกระแสก็จะมากขึ้นด้วย ถึงแม้ว่ากระแสยังคงเพิ่มขึ้นตามค่าแรงดันที่ขั้วเดรนที่เพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.8 โครงสร้าง MESFET ชนิดพีแซนแนลแบบดีพลีชันโหมด

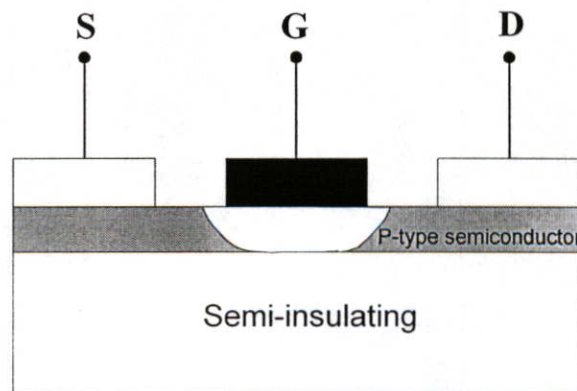
ส่วนในกรณีที่แรงดันที่ขั้วเดรนมีค่าคงที่ และแรงดันที่ขั้วเกตมีค่าเป็นบวกลดลง จะทำให้บริเวณปลอดพาหะมีขนาดลดลงส่งผลให้ช่องทางเดินกระแสมีขนาดกว้างขึ้นกระแสจึงไหลได้มากขึ้น ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันดังที่กล่าวมานี้แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน และสัญลักษณ์ของ MESFET ชนิดพีแชนแนลแบบดีพลีชันโหมด

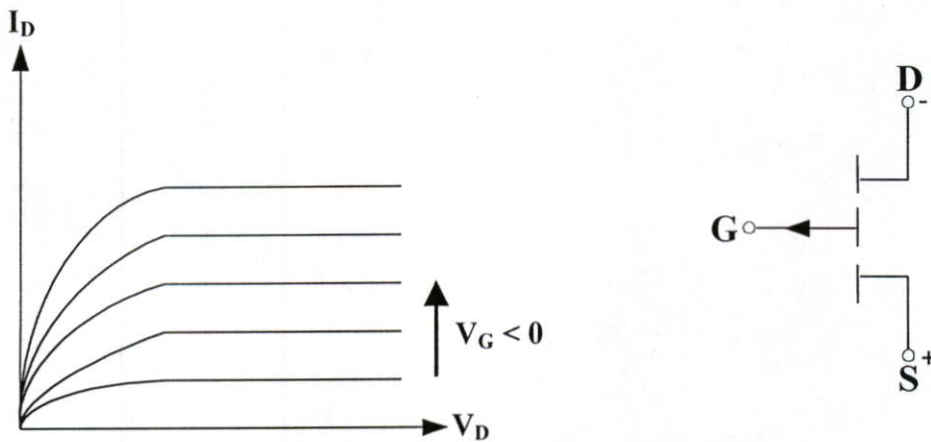
2.2.2 ทฤษฎีของ MESFET ชนิดพีแชนแนลแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

ในทฤษฎีของ MESFET ชนิดนี้ ขณะที่ยังไม่มีแรงดันที่ขั้วเกต ($V_G = 0$) ช่องทางเดินกระแสจะถูกปิดหมด โดยบริเวณปลอดพาหะจะครอบคลุมช่องทางเดินกระแสทั้งหมด เนื่องจากค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัสขอตติกัน ที่สภาวะสมดุลความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.10 ดังนั้นการที่จะทำให้เกิดช่องทางเดินกระแสขึ้นได้นั้นจะต้องลดขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้วยการให้แรงดันลบที่ขั้วเกตซึ่งเป็นการให้ไบอัสตรงแก่รอยสัมผัสขอตติกัน



รูปที่ 2.10 โครงสร้าง MESFET ชนิดพีแชนแนลแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

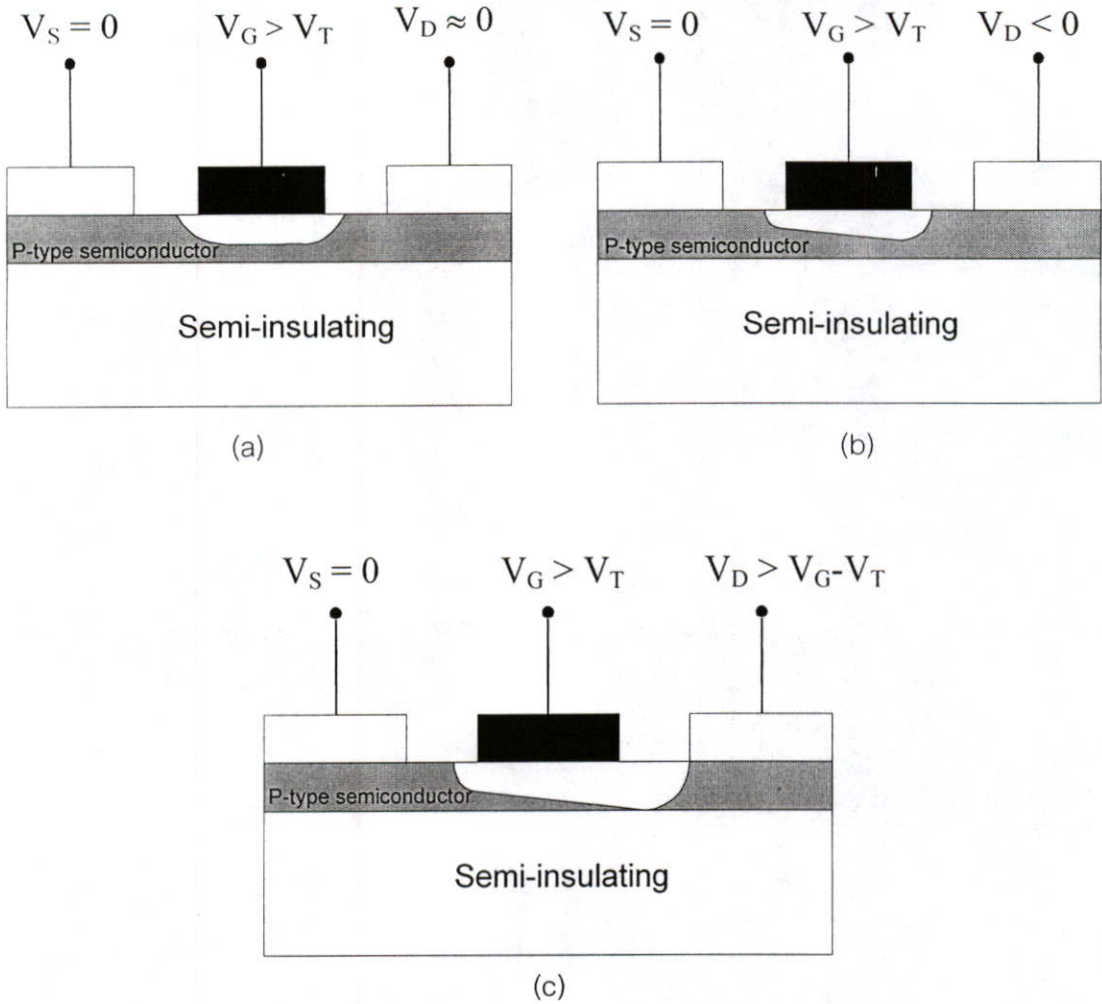
การให้ไบอัสตรงที่ขั้วเกตที่มีค่ามากเกินไปนั้นจะทำให้เกิดกระแสขึ้นเป็นจำนวนมากจะส่งผลให้ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์มีค่าลดลง ซึ่งค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ที่สูงนี้คือข้อดีของอุปกรณ์ประเภทนี้ ดังนั้นในการให้ไบอัสที่ขั้วเกตจะต้องมีค่าไม่เกิน turn-on voltage ของรอยสัมผัสขอตติ์จึงจะทำให้ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ไม่เปลี่ยนแปลง ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันของทรานซิสเตอร์ชนิดพีแชนแนลแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมดแสดงดังรูปที่ 2.11



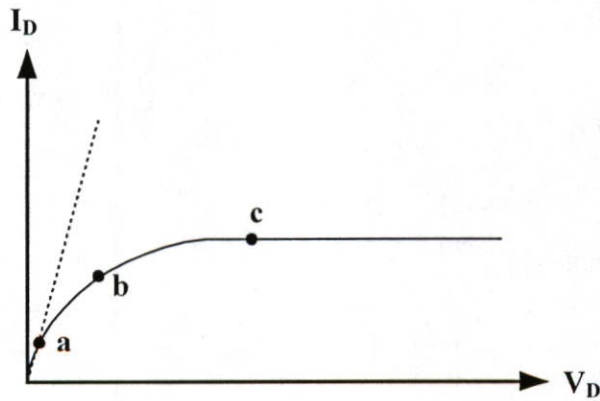
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน และสัญลักษณ์ของ MESFET ชนิดพีแชนแนลแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

2.2.3 การทำงานของทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MESFET [10]

พิจารณารูปที่ 2.12 ซึ่งแสดงภาพของ MESFET ชนิดพีแชนแนลภายใต้สภาวะแรงดันไบอัสค่าต่าง ๆ ในกรณีนี้จะพิจารณา MESFET แบบดีพลีชันโหมด สำหรับกรณีนี้ที่ค่า V_0 น้อย ๆ บริเวณช่องทางเดินกระแสจะมีขนาดสม่ำเสมอจากบริเวณขั้วซอสถึงขั้วเดรน (ดังรูปที่ 2.12(a)) เนื่องจากแรงดันระหว่างขั้วซอส และขั้วเดรนมีค่าเกือบจะไม่แตกต่างกัน และบริเวณหลอดพาหะนั้นก็จะมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นกรณีค่า V_0 น้อย ๆ บริเวณช่องทางเดินกระแสจะมีลักษณะคล้ายเป็นตัวต้านทานตัวหนึ่งทำให้กระแสที่ไหลมีลักษณะเป็นเชิงเส้น (จุด a ในรูปที่ 2.13) เมื่อค่า V_0 มีค่าเพิ่มขึ้นบริเวณหลอดพาหะจะกว้างขึ้นโดยขยายตัวมาทางด้านขาเดรนทำให้ช่องทางเดินกระแสบริเวณใกล้ ๆ ขาเดรนมีขนาดลดลง (ดังรูปที่ 2.12(b)) ซึ่งส่งผลให้กระแสมีค่าลดลง (จุด b ในรูปที่ 2.13) และเมื่อค่า V_0 มีค่าเพิ่มขึ้นจนทำให้ช่องทางเดินกระแสถูกปิดสนิทบริเวณใกล้ ๆ ขาเดรน ซึ่งเรียกว่าบริเวณพินช์ออฟ (pinch off) (ดังรูปที่ 2.12(c)) ค่าของกระแสจะยังคงไม่ลดลง แต่จะมีค่าคงที่ตลอดเนื่องจากประจุพาหะจะถูกจุดให้เคลื่อนที่ผ่านบริเวณพินช์ออฟด้วยค่าสนามไฟฟ้า (จุด c ในรูปที่ 2.13)



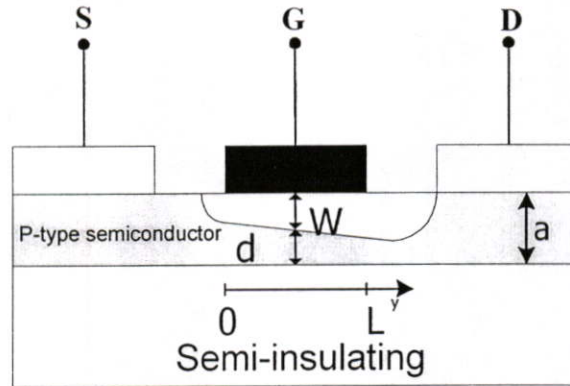
รูปที่ 2.12 ภาพตัดขวางของ MESFET ชนิดพีแชนแนลภายใต้สภาวะแรงดันไบอัสค่าต่าง ๆ



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันของ MESFET ชนิดพีแชนแนล (จุด a-c แสดงลักษณะกระแสที่สอดคล้องกับค่า V_0 ค่าต่าง ๆ ที่แสดงในรูปที่ 2.12)

2.3 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MESFET[10]

ในรูปที่ 2.14 แสดงภาพตัดขวางของ MESFET ชนิดพีแชนแนล และขนาดของพารามิเตอร์ค่าต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ขนาดของบริเวณปลอดพาหะ $W(y)$ จะเพิ่มขึ้นโดยจะขยายตัวไปทางด้านขวาเดรน เนื่องจากที่ขาเดรนได้รับแรงดันไบอัสกลับ



รูปที่ 2.14 ภาพตัดขวางของ MESFET ชนิดพีแชนแนลแสดงขนาดของพารามิเตอร์ค่าต่าง ๆ (ขนาดความกว้างของช่องทางเดินกระแส Z มีทิศพุ่งเข้ากระดาษ)

โดยทั่วไปแล้วการหาค่ากระแสเดรนนั้น เราจะคิดว่าค่าความคล่องตัวของประจุพาหะที่เคลื่อนที่ผ่านช่องทางเดินกระแสมีค่าคงที่ เริ่มแรกเราจะพิจารณาความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ W เนื่องจากที่บริเวณใกล้ ๆ ขาซอสนั้นค่าแรงดันที่ให้แก่อรอยสัมผัสจะมีเฉพาะค่าของ V_G เท่านั้น ดังนั้นขนาดของบริเวณปลอดพาหะแสดงได้โดย

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_{bi} + V_G)}{qN_A}} \quad (2.6)$$

ถ้าให้แกน y มีทิศชี้จากขาซอสไปยังขาเดรนจะพบว่าแรงดันที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจึงเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งแสดงได้โดย

$$W(y) = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_{bi} + V_G - V(y))}{qN_A}} \quad (2.7)$$

กำหนดให้ค่าแรงดันพินชออฟมีค่าเท่ากับ $V_P = qN_A a^2 / 2\epsilon$ ซึ่งก็คือค่าแรงดันที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะแล้วทำให้ความหนาของบริเวณปลอดพาหะมีค่าเท่ากับ a นั่นคือช่องทางเดินกระแสถูกปิดสนิทพอดี แทนค่า V_P ลงในสมการ (2.7) จะได้เป็น

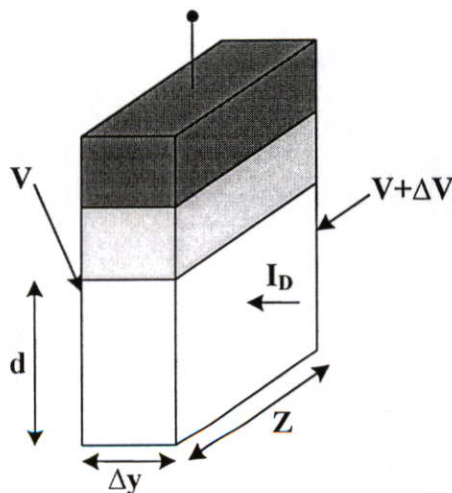
$$W(y) = a \sqrt{\frac{V_{bi} + V_G - V(y)}{V_P}} \quad (2.8)$$

และขนาดของบริเวณที่ไม่ใช่บริเวณปลอดพาหะคือ

$$d(y) = a \left[1 - \sqrt{\frac{V_{bi} + V_G - V(y)}{V_P}} \right] \quad (2.9)$$

จากนี้จะทำการหาค่ากระแสเดรนโดยคิดว่าขณะนี้ช่องทางเดินกระแสยังไม่ถูกปิดสนิท พิจารณาบริเวณเล็ก ๆ ของช่องทางเดินกระแสที่มีขนาด Δy (ดังรูปที่ 2.15) ค่าแรงดันที่ตกคร่อมบริเวณนี้คือ

$$\Delta V = I_D \frac{1}{q\mu_p N_A} \frac{\Delta y}{d(y)Z} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางของบริเวณช่องทางเดินกระแสที่มีขนาด Δy

เราจะพิจารณาว่าไฮลเคลื่อนที่ด้วยค่าความคล่องตัว μ_p ผ่านจากเป็นระยะทาง $\Delta y \rightarrow 0$ ดังนั้น จากสมการที่ (2.10) จะได้เป็น

$$\frac{dV}{dy} = \frac{I_D}{q\mu_p N_A d(y)Z} \quad (2.11)$$

จากนั้นหาค่า I_D โดยทำการอินทิเกรตตลอดความยาวของช่องทางเดินกระแส

$$\int_0^L I_D dy = \mu_p \int_0^{V_D} qd(V(y))ZN_A dV \quad (2.12)$$

แทนค่าขนาดของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ L และอินทิเกรตค่า I_D จะได้ดังสมการ

$$I_D = \frac{Z}{L} q\mu_p N_A a \int_0^{V_D} \left[1 - \sqrt{\frac{V_{bi} + V_G - V(y)}{V_P}} \right] dV \quad (2.13)$$

ดังนั้นจะได้ค่ากระแสเดรนก่อนถึงช่วงพินช์ออฟ หรือช่วงไม่อิ่มตัว (non-saturation region) คือ

$$I_D = G_0 \left\{ V_D + \frac{2}{3} V_P \left[\left(\frac{V_{bi} + V_G - V_D}{V_P} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{V_{bi} + V_G}{V_P} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \right\}; V_D < V_G - V_T \quad (2.14)$$

เมื่อ G_0 คือค่าความนำของช่องทางเดินกระแสในกรณีที่ไม่มีบริเวณปลดพาหะ

$$\text{มีค่าเป็น } \frac{Z}{L} q\mu_p N_A a$$

ในกรณีที่ MESFET ทำงานในช่วงเชิงเส้น (linear region) โดยพิจารณาว่าในขณะที่แรงดัน V_D มีค่าน้อย ๆ หรือ $V_D \ll V_{bi} + V_G$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.14) สามารถลดรูปได้เป็น

$$I_D \cong G_0 \left[1 - \left(\frac{V_{bi} + V_G}{V_P} \right)^{\frac{1}{2}} \right] V_D \quad (2.15)$$

จากสมการที่ (2.15) นี้จะเห็นว่ากระแส I_D แปรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดัน V_D ที่แรงดัน V_G คงที่ค่าหนึ่งๆ

ในกรณีที่ MESFET ทำงานในช่วงอิ่มตัว (saturation region) จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดจุดพินช์ออฟ ค่ากระแส I_D จะมีค่าคงที่ตลอดแม้ว่าแรงดัน V_D จะเพิ่มขึ้นอีกก็ตาม ค่าแรงดัน V_D ที่ทำให้เกิดจุดพินช์ออฟคือ

$$V_{Dsat} = V_G + V_{bi} - V_P \quad (2.16)$$

นำค่า V_{Dsat} จากสมการที่ (2.16) แทนลงในสมการ (2.14) จะได้ค่า I_D เป็นดังสมการที่ (2.17)

$$I_{Dsat} = G_0 \left\{ -\frac{V_P}{3} - \frac{2}{3} \frac{(V_{bi} + V_G)^2}{V_P^{1/2}} + V_{bi} + V_G \right\} ; V_D \geq V_G - V_T \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.17) นี้จะเห็นว่ากระแส I_{Dsat} จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับค่าแรงดัน V_D โดยจะมีค่าคงที่ที่แรงดัน V_G ค่าหนึ่งๆ

2.3.1 ทรานส์คอนดักแตนซ์ (Transconductance : g_m) [1]

ทรานส์คอนดักแตนซ์ (g_m) คืออัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสเดรนต่อแรงดันเกต ที่ค่า V_D คงที่ แสดงได้ดังสมการ

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \right|_{V_D = \text{const.}} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.14) จะได้เป็น

$$g_m = G_0 \left[\left(\frac{V_{bi} + V_G - V_D}{V_P} \right)^{1/2} - \left(\frac{V_{bi} + V_G}{V_P} \right)^{1/2} \right] \quad (2.19)$$

ในกรณีสภาวะอิ่มตัว จากสมการที่ (2.17) จะได้เป็น

$$g_{msat} = G_0 \left[1 - \left(\frac{V_{bi} + V_G}{V_P} \right)^2 \right] \quad (2.20)$$

พิจารณาค่า G_0 และสมการที่ (2.19) และ(2.20) จะเห็นว่าค่าทรานส์คอนดักแตนซ์สามารถปรับปรุงให้มีค่ามากได้โดยใช้สารกึ่งตัวนำที่มีค่าความคล่องตัวของประจุพาหะสูง ๆ หรือทำให้ขนาดของช่องทางเดินกระแสของ MESFET สั้นลง การปรับปรุงค่าทรานส์คอนดักแตนซ์นี้จะทำให้ค่าเกณฑ์การขยายสูงขึ้น และการตอบสนองความถี่สูงขึ้นด้วย

2.3.2 แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage : V_T) [8]

พิจารณา MESFET ที่มีขนาดความหนาของช่องทางเดินกระแสเป็น a ดังรูปที่ 2.14 แรงดันที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะแล้วทำให้ช่องทางเดินกระแสปิดสนิท หรือทำให้บริเวณปลอดพาหะมีขนาดเป็น a จะเรียกแรงดันค่านี้ว่า "แรงดันพินช์ออฟ" (pinchoff voltage : V_P) ซึ่งมีค่าดังสมการที่ (2.21)

$$V_P = \frac{qN_A a^2}{2\epsilon} \quad (2.21)$$

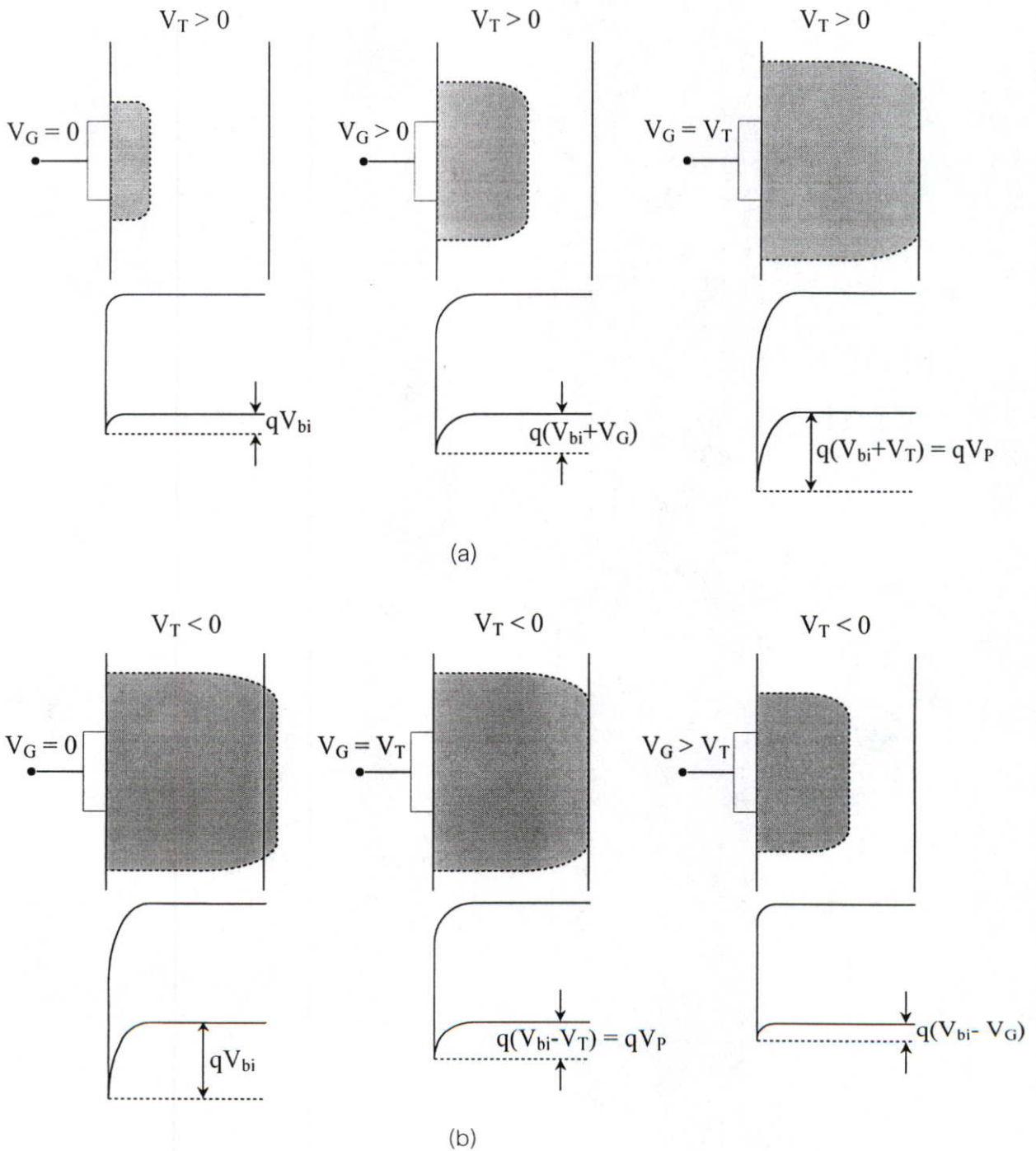
ถ้าแรงดันภายในของรอยสัมผัสขอตักทำให้บริเวณปลอดพาหะครอบคลุมเพียงบางส่วนของช่องทางเดินกระแสเท่านั้น (MESFET แบบดีพลีชันโหมด) แต่แรงดันที่จะทำให้ช่องทางเดินกระแสปิดสนิท คือ V_P ดังนั้นจึงต้องมีการให้แรงดันจากภายนอก คือแรงดันบวก (ไบอัสกลับ) ที่ขั้วเกตเพื่อทำให้ช่องทางเดินกระแสปิดสนิท แรงดันที่ให้ที่ขั้วเกตนี้เรียกว่า "แรงดันขีดเริ่ม" (threshold voltage: V_T) มีค่าดังสมการที่ (2.22)

$$V_P = V_{bi} + V_T \quad (2.22)$$

$$\text{หรือ } V_T = V_P - V_{bi} \quad (2.23)$$

ดังนั้น แรงดันขีดเริ่ม คือค่าแรงดันที่ให้ที่ขั้วเกตแล้วทำให้ช่องทางเดินกระแสปิดสนิทพอดี สำหรับกรณีของ MESFET แบบเอ็นฮานซ์โหมดนั้น แรงดันภายในของรอยสัมผัสขอตักทำให้

ให้ช่องทางเดินกระแสเปิดอยู่ ซึ่งต้องให้แรงดันลบ(ไบอัสตรง) ที่ขั้วเกตเพื่อที่จะทำให้ช่องทางเดินกระแสเปิดสนิทพอดี ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า MESFET ชนิดพีแชนแนลนั้น ค่าแรงดันขีดเริ่มจะมีค่าเป็นบวกสำหรับ MESFET แบบดีพลีชันโหมด และมีค่าเป็นลบสำหรับ MESFET แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (2.23)

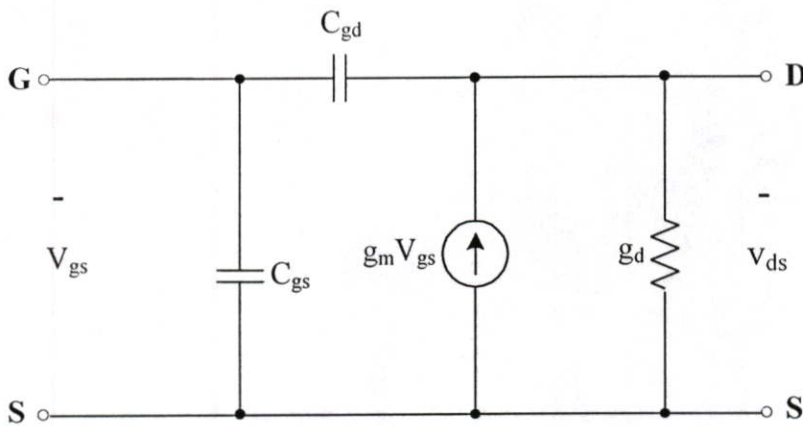


รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_T , V_P และ V_{bi} ของ MESFET ชนิดพีแชนแนล
(a)แบบดีพลีชันโหมด (b)แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

2.4 การตอบสนองความถี่[1]

การตอบสนองความถี่ (frequency response) เป็นการหาค่าความถี่สูงสุดที่ MESFET สามารถทำงานได้ โดยจะพิจารณาจากจุดที่อัตราขยายลดลงเหลือเป็น 0.707 เท่าของอัตราขยาย (-3dB) เราจะเรียกความถี่นี้ว่า ความถี่คัทออฟ (cut-off frequency : f_c)

พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ ค่าความถี่ f_T ซึ่งอาจนิยามได้ว่าเป็นค่าความถี่ที่ซึ่งอัตราขยายกระแสมีค่าเท่ากับหนึ่ง ความถี่ f_T นี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ผลคูณของอัตราขยายกระแสและความกว้างของความถี่ (current gain bandwidth product) [11] ในรูปที่ 2.17 เป็นวงจรเสมือนของ MESFET ในกรณีที่ความถี่สูง



รูปที่ 2.17 วงจรเสมือนของ MESFET ในกรณีที่ความถี่สูง

ในรูปที่ 2.17 แสดงค่าความจุไฟฟ้า 2 ค่า คือ C_{gs} และ C_{gd} ซึ่งเป็นความจุไฟฟ้าระหว่างขาเกตกับขาสอส และความจุไฟฟ้าระหว่างขาเกตกับขาเดรนตามลำดับ เราสามารถหาค่าความถี่ f_T ได้ เมื่อความถี่ f_T คือความถี่ที่หาได้จากอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าด้านเอาต์พุตต่อกระแสไฟฟ้าด้านอินพุต ซึ่งมีค่าเท่ากับหนึ่ง นั่นคือ MESFET จะไม่มีการขยายสัญญาณไฟฟ้า จะได้กระแสไฟฟ้าด้านอินพุต เมื่อเอาต์พุตของอุปกรณ์ถูกลัดวงจรเป็น

$$I_{in} = j\omega C_g V_G \quad (2.24)$$

เมื่อ ω คือ อัตราขยายเชิงมุม (angular gain) = $2\pi f_T$

C_g คือ ความจุไฟฟ้าที่เกต = $C_{gs} + C_{gd}$

และกระแสไฟฟ้าด้านเอาต์พุต มีค่าเป็น

$$I_{\text{out}} = g_m V_G \quad (2.25)$$

นำสมการที่ (2.25) หารด้วยสมการที่ (2.24) จะได้เป็น

$$\frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} = \frac{g_m V_G}{j\omega C_g V_G} \quad (2.26)$$

เมื่อ $I_{\text{out}} / I_{\text{in}} = 1$ ดังนั้นความถี่ f_T จะได้เป็น

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi C_g} \quad (2.27)$$

จากค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ที่มากที่สุดในสภาวะอิ่มตัว ซึ่งมีค่าเป็น

$$g_{\text{msat}}(\text{max}) = \frac{Zq\mu_p N_A a}{L} \quad (2.28)$$

และ ค่าความจุไฟฟ้าที่เกต

$$C_g = \frac{\epsilon ZL}{a} \quad (2.29)$$

ความถี่ f_T ที่มากที่สุดสามารถหาได้โดยแทนค่า $g_{\text{msat}}(\text{max})$ จากสมการ (2.28) และค่า C_g จากสมการ (2.29) ลงในสมการ (2.27) จะได้เป็น

$$f_T(\text{max}) = \frac{q\mu_p N_A a^2}{2\pi\epsilon L^2} \quad (2.30)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.30) จะพบว่า ความถี่ f_T จะขึ้นกับ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุพาหะไปตามช่องทางเดินกระแส, ความยาวของช่องทางเดินกระแส และความจุไฟฟ้าที่แผงอยู่ในโครงสร้างของ MESFET

ถ้าเราต้องการการตอบสนองความถี่ที่สูงขึ้นสามารถปรับปรุงได้โดยเลือกสารกึ่งตัวนำที่มีค่าความคล่องตัวของประจุพาหะสูง ๆ และลดความยาวของช่องทางเดินกระแสลง ซึ่งจะทำให้ความจุไฟฟ้าที่เกทลดลงด้วย

บทที่ 3

กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการสร้าง และการศึกษา Diamond MESFET โดยจะมีกระบวนการอยู่หลายขั้นตอน เช่น กระบวนการเตรียมฐานรอง กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร รวมไปถึงการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ที่สร้างได้ ดังจะกล่าวต่อไปนี้

3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง

การทดลองนี้เลือกใช้ซิลิคอนเป็นฐานรองในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยใช้ซิลิคอนชนิดพีระนาบ (100) ก่อนที่จะนำฐานรองซิลิคอนนี้ไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จำเป็นต้องทำความสะอาดเบื้องต้น และเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอนดังนี้

3.1.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเบื้องต้น

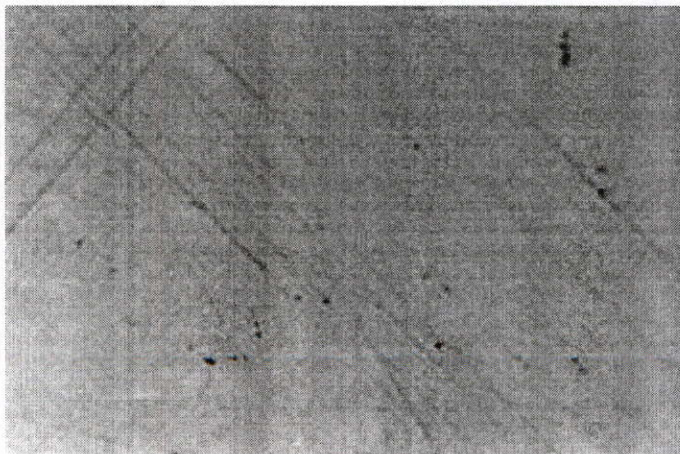
- กำจัดเศษฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกบนผิวหน้าซิลิคอนในน้ำ DI (Deionized- water) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning) แล้วล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง
- ลอกชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าฐานรองด้วยสารละลายกรด HF 5% เป็นเวลา 2 นาทีแล้วล้างออกด้วยน้ำ DI
- กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะบริเวณผิวหน้าโดยการต้มด้วยกรดไนตริก (HNO_3 acid) เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างกรด HNO_3 ด้วยการต้มในน้ำ DI และล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2
- กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมันบริเวณผิวหน้า โดยการต้มด้วยสารละลายไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างสารละลายไตรคลอโรเอทิลีนออกด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูงและล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2
- ลอกชั้นออกไซด์ออกด้วยสารละลายกรด HF 5% และล้างออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2

3.1.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร

หลังจากทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเบื้องต้นครบทุกขั้นตอนตามหัวข้อ 3.1.1 แล้วจะทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอนก่อนนำไปตั้งเคราะห์ฟิล์มเพชร เพื่อเป็นการกระตุ้นฐานรองให้มีความหนาแน่นของการนิวเคลียสเพิ่มขึ้นทำให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรเร็วขึ้น [12] โดยในการทดลองนี้ เลือกใช้การขัดด้วยครีมเพชรเป็นการเตรียมผิวหน้าฐานรอง ครีมเพชรที่ใช้ขัดมีขนาดของเม็ดผลึก 0.25 ไมโครเมตร ใช้เวลาในการขัดประมาณ 1-2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการขัดนี้อีกครั้งเพื่อล้างครีมเพชรออกด้วยวิธีดังต่อไปนี้

- ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วย เอทิลแอลกอฮอล์ เพื่อกำจัดครีมเพชรที่ติดอยู่บนแผ่นซิลิคอนให้หมดไป
- นำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการขัดมาต้มในสารละลายไตรคลอโรเอทิลีน เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปเข้าเครื่องล้างความถี่สูงทันที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดครีมเพชรที่ยังติดค้างอยู่ที่แผ่นซิลิคอน
- ล้างสารละลายไตรคลอโรเอทิลีนออกด้วยอะซีโตนโดยเครื่องล้างความถี่สูง
- ล้างอะซีโตนออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- กำจัดชั้นออกไซด์ที่อาจจะเกิดขึ้นอีกครั้งด้วยสารละลายกรด HF 5%
- ล้างสารละลายกรด HF 5% ออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

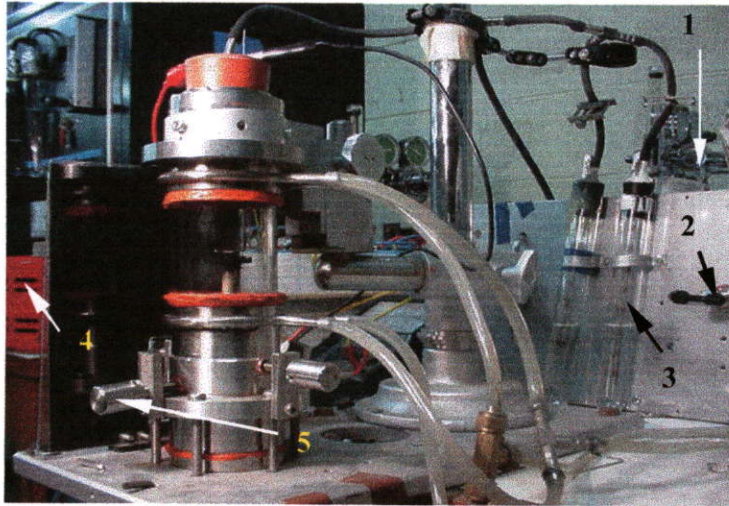
จากนั้น นำแผ่นซิลิคอนนี้ไปตรวจสอบรอยขีดที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งลักษณะผิวหน้าที่ผ่านการขัดด้วยครีมเพชรนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นฐานรองที่พร้อมจะนำไปตั้งเคราะห์ฟิล์มเพชร



รูปที่ 3.1 ลักษณะรอยขีดที่เกิดขึ้นจากการขัดด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 μm

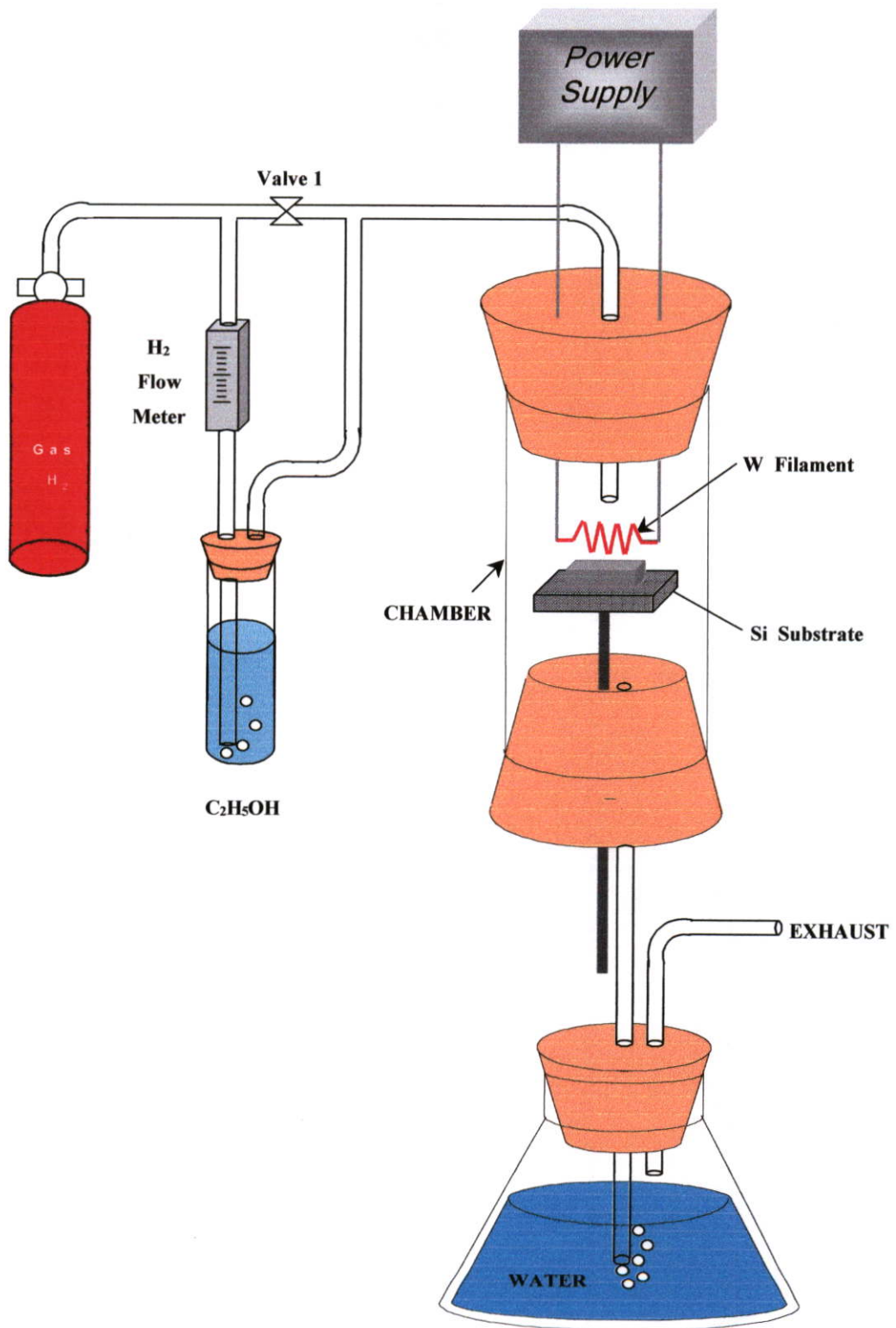
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรในการวิจัยนี้ จะใช้วิธี CVD แบบ Hot-Filament (HFCVD) ด้วยชุดเครื่องมือในรูปที่ 3.2 โดยจะมีไดอะแกรมของระบบ CVD ที่ใช้อย่างง่าย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งมีขั้นตอนในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

- ปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจนจากถังผ่าน (1)mainvalve(อยู่ข้างหลัง)เข้าไปใน Chamber ประมาณ 15 นาที เพื่อให้ภายใน Chamber เป็นบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว
- ปิดวาล์ว (2) เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนไหลผ่านแหล่งจ่ายเป็นตัวพาไอระเหยของแอลกอฮอล์ (3) เข้า Chamber ด้วยอัตราการไหลคงที่ ซึ่งควบคุมโดย Flow meter
- จ่ายกระแส (4) อย่างช้า ๆ ให้กับไส้หลอดทั้งสองเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของไส้หลอดจนมีอุณหภูมิประมาณ 2000 °C
- ปรับระยะห่างและตำแหน่งระหว่างฐานรองซิลิคอนกับไส้หลอดทั้งสองด้วยแกนปรับระยะ (5) ให้ได้ระยะที่เหมาะสมประมาณ 2 มิลลิเมตร
- สร้างฟิล์มเพชรตามระยะเวลาที่ต้องการ เมื่อครบระยะเวลาที่ต้องการสร้างแล้วจึงค่อย ๆ ลดระยะของฐานรองซิลิคอนให้ต่ำลงจากไส้หลอดมาก ๆ พร้อมกับลดการจ่ายกระแสลงอย่างช้า ๆ
- ปิดถังก๊าซไฮโดรเจน และรอจนกระทั่งก๊าซไฮโดรเจนในระบบที่ยังค้างอยู่ออกจนหมด
- นำชิ้นงานที่ได้ไปใช้ในกระบวนการถัดไป หรือไปตรวจสอบคุณสมบัติต่าง ๆ



รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมระบบ CVD อย่างง่ายที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์มเพชร

3.3 กระบวนการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้า

ในกระบวนการนี้เป็นขั้นตอนการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้า (conductive layer) โดยไม่มีการเติมอะตอมสารเจือชนิดอื่น ๆ เลย จากฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกโดยการแอนเนลฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่สังเคราะห์ขึ้นในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเรียกวิธีการนี้ว่า H-termination โดยใช้อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ เป็นเงื่อนไขในการสังเคราะห์เพื่อควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้านี้ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์มีค่าดังนี้ 500, 600 และ 700 °C และใช้เวลาในการสังเคราะห์ 3, 5, 10 และ 15 นาที

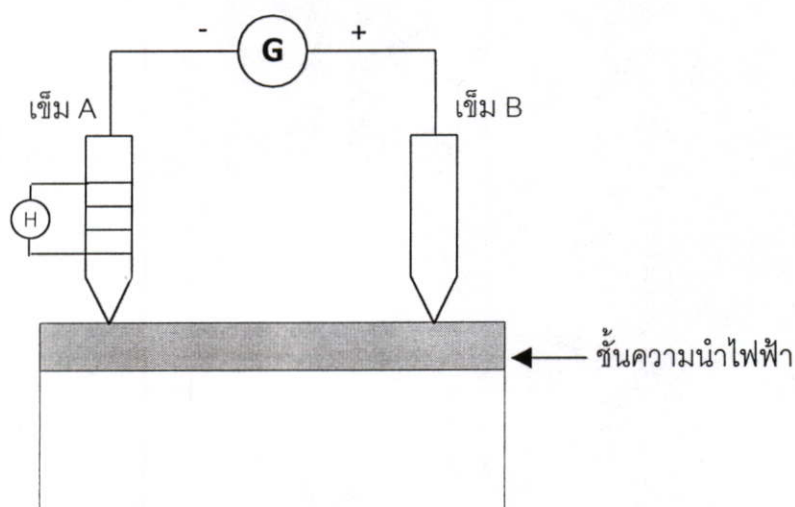
หลังจากทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกด้วยวิธีการ H-termination แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของชั้นความนำไฟฟ้านี้ เช่น ชนิดของพาหะส่วนมาก (Majority carrier) ซึ่งเป็นตัวกำหนดชนิดของสารกึ่งตัวนำ, คุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้านี้ เป็นต้น เนื่องจากในการนำชั้นความนำไฟฟ้านี้ไปประยุกต์ใช้งานสร้างเป็น Diamond MESFET จำเป็นต้องทราบข้อมูลต่างๆ ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกชั้นความนำไฟฟ้าไปใช้งานต่อไป

3.3.1 การตรวจสอบชนิดของพาหะส่วนมากของชั้นความนำไฟฟ้า

โดยปกติชนิดของพาหะส่วนมาก (Majority carrier) จะเป็นตัวกำหนดชนิดของสารกึ่งตัวนำ ถ้าพาหะส่วนมากคือ โฮล สารกึ่งตัวนำนั้นก็คือ สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) และถ้าพาหะส่วนมากคือ อิเล็กตรอน สารกึ่งตัวนำนั้นก็คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ดังนั้นหลักการวัดชนิดของสารกึ่งตัวนำก็คือ การวัดและการตรวจสอบชนิดของพาหะส่วนมากที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำนั่นเอง

วิธีการตรวจสอบที่ง่าย และเป็นที่ยอมรับกันมากได้แก่ "วิธีวัดด้วยเข็มร้อน" (Hot point probe measurement) โดยอาศัยหลักการซีเบค ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) เป็นปรากฏการณ์ที่ได้จากการสังเกตจากการทดลอง โดยการนำเอาตัวนำ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน ที่มีปลายด้านหนึ่งเชื่อมติดกัน ส่วนอีกปลายหนึ่งไม่ได้มีการเชื่อมติดกัน เมื่อมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างส่วนที่เชื่อมติดกันกับส่วนที่ไม่ได้ต่อเชื่อมกันแล้ว จะทำให้มีความต่างศักย์เกิดขึ้นระหว่างส่วนที่ไม่ได้ต่อเชื่อมติดกัน ในทำนองเดียวกัน ถ้าเราให้วัสดุสารกึ่งตัวนำได้รับความร้อนที่ปลายด้านหนึ่ง ซึ่งทำให้อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามแท่งวัสดุ และพบว่ามีการปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามมาคือ มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุพาหะ เนื่องจากความเข้มข้นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงทำให้ความเข้มข้นของประจุพาหะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแพร่ของประจุพาหะในแท่งวัสดุขึ้น

จากหลักการซีเบก นำมาใช้วิเคราะห์ชนิดของพาหะส่วนมากของชั้นความนำไฟฟ้า ว่ามีพาหะหลักในการนำกระแสชนิดใด การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติดังกล่าวจะใช้ชุดอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.4 จากรูปจะเห็นว่าชุดอุปกรณ์ประกอบด้วยเข็ม 2 เล่ม จีตีคบนฟิล์มเพชร โดยเข็ม A ทำหน้าที่เป็นเข็มความร้อน ส่วนเข็ม B จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง นำกัลวานอมิเตอร์มาต่อระหว่างเข็มทั้งสอง โดยใช้ขั้วบวกของกัลวานอมิเตอร์ต่อเข้ากับเข็ม B และขั้วลบต่อเข้ากับเข็ม A เริ่มให้ความร้อนแก่เข็ม A แล้วสังเกตดูว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้ไปในทิศใด



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์การหาชนิดของพาหะส่วนมากของชั้นความนำไฟฟ้า

ในการตรวจสอบชนิดของพาหะส่วนมากของชั้นความนำไฟฟ้านี้มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิคอนมาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าของฐานรองซิลิคอนตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายคาร์บอนเป็นเอทิลแอลกอฮอล์เพียงอย่างเดียว
- ทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.3
- ทำการตรวจสอบชนิดของพาหะส่วนมากของชั้นความนำไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ในรูปที่ 3.4

3.3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้า

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้า เช่น ความต้านทาน(R), สภาพต้านทานไฟฟ้า(ρ), ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะ และค่าระดับพลังงานเฟอร์มิของชั้นความนำไฟฟ้า ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน โดยมีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิคอนมาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าของฐานรองซิลิคอนตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายคาร์บอนเป็นเอทิลแอลกอฮอล์เพียงอย่างเดียว
- ทำการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค เพื่อจะนำไปเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานหลังจากสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าแล้ว
- ทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.3 ใช้อุณหภูมิ และเวลาค่าต่าง ๆ เป็นเงื่อนไขในการสังเคราะห์ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์มีค่าดังนี้ 500, 600 และ 700 °C และใช้เวลาในการสังเคราะห์ 3, 5, 10 และ 15 นาที
- ทำการเคลือบโลหะทองคำด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator เพื่อทำเป็นขั้วสัมผัส
- นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบทองคำแล้วไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อสร้างขั้วสัมผัส
- ทำการกัดทองคำด้วยสารละลาย Aqua regia ซึ่งคือส่วนผสมของกรด $\text{HCl} + \text{HNO}_3$
- ลอกน้ำยาไวแสงออกด้วยอะซีโตน จะได้ลวดลายของโลหะทองคำซึ่งเป็นขั้วสัมผัส
- ทำการซินเตอร์ริง ที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 12 นาที
- ทำการวัดคุณสมบัติของกระแสและแรงดัน (I-V) แล้วทำการหาค่าความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้า จากนั้นก็คำนวณหาค่าปริมาณต่างๆ ต่อไป

3.4 การออกแบบและกระบวนการสร้าง Diamond MESFET

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างของ MESFET เพื่อใช้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET และกระบวนการสร้าง MESFET ซึ่งมีขั้นตอนต่างๆ มากมายเช่น การสร้างกระจกต้นแบบ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี กระบวนการเคลือบโลหะ โดยจะได้กล่าวถึงรายละเอียดที่ละส่วนดังต่อไปนี้

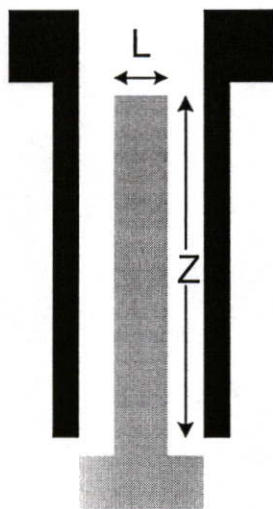
3.4.1 การออกแบบ MESFET

ในการศึกษาโครงสร้าง MESFET นั้น การออกแบบใช้หลักการเดียวกับการออกแบบมอสเฟตทั่วไป โดยการกำหนดขนาดความกว้าง (Z) และความยาว (L) ของช่องทางเดินกระแสเป็นหลัก ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดความกว้าง และขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแส โดยในการศึกษาครั้งนี้จะทำการออกแบบขนาดความกว้างของช่องทางเดินกระแสมีค่าดังนี้ $Z = 200, 400, 600$ และ $800 \mu\text{m}$ และขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแสมีค่าดังนี้ $L = 20, 40, 60$ และ $80 \mu\text{m}$ โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วซอสกับขั้วเกต และระยะห่างระหว่างขั้วเดรนกับขั้วเกตมีขนาดเท่ากันคือ $20 \mu\text{m}$ ในรูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างขนาดของต้นแบบ MESFET ที่ออกแบบ

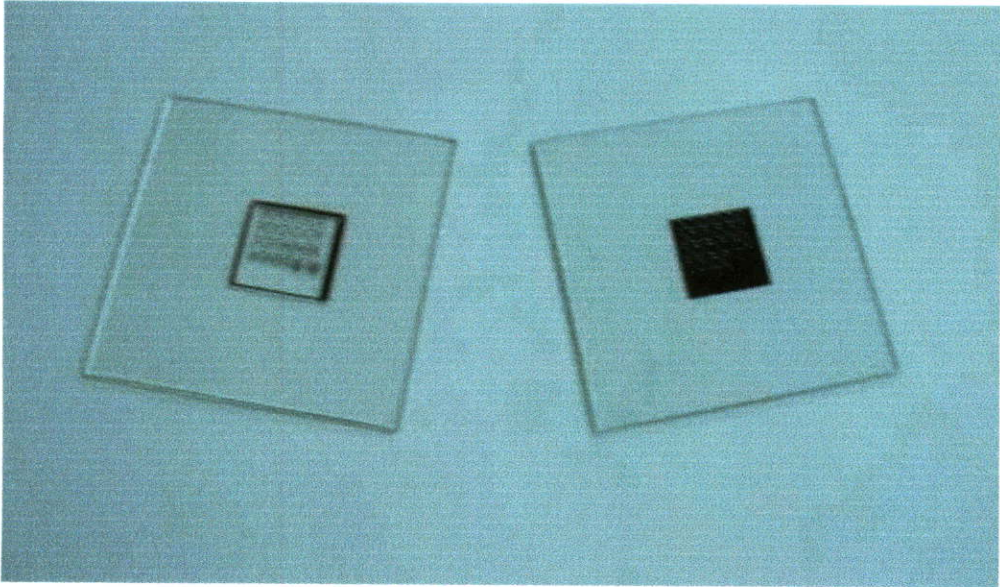
เมื่อได้ลวดลายต้นแบบแล้วจึงนำไปผลิตเป็นกระจกมาสก์ (photographic mask) โดยใช้กล้องถ่ายภาพย่อส่วน (reduction camera) ซึ่งจะย่อจากต้นแบบจริงลง 50 เท่า ดังนั้นขนาดที่ออกแบบไว้ 1 mm จะเท่ากับ $20 \mu\text{m}$ หลังจากถ่ายย่อส่วนแล้ว ทำยที่สุดจะได้ลวดลายบนแผ่นกระจกขนาด $3" \times 3"$ เพื่อใช้เป็นโฟโตมาสก์ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีต่อไป ในกระบวนการสร้างนี้จะใช้มาสก์ต้นแบบทั้งหมด 2 มาสก์ด้วยกัน ซึ่งใช้สำหรับกระบวนการสร้างต่าง ๆ ดังนี้

มาสก์ที่ 1 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างขั้วซอส และขั้วเดรน

มาสก์ที่ 2 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างขั้วเกต



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างขนาดของต้นแบบ MESFET ที่ออกแบบ



รูปที่ 3.6 กระจกต้นแบบที่ใช้เป็นโฟโตมาสก์

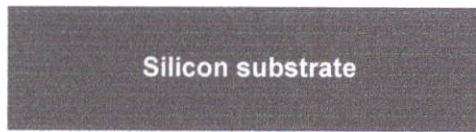
3.4.2 กระบวนการสร้าง Diamond MEFET

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ และทำการสร้างกระจกต้นแบบเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นกระบวนการสร้าง Diamond MEFET โดยมีลำดับขั้นตอนการสร้างดังนี้

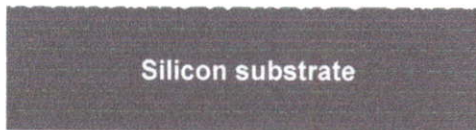
- นำแผ่นฐานรองซิลิคอนมาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายคาร์บอนเป็นเอทิลแอลกอฮอล์เพียงอย่างเดียว
- ทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.3
- ทำการเคลือบโลหะทองคำด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator
- นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบทองคำแล้วไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อสร้างขั้วขอส และขั้วเดรนตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยในขั้นตอนนี้จะใช้กระจกมาสก์ที่ 1
- ทำการกัดทองคำด้วยสารละลาย Aqua regia ซึ่งคือส่วนผสมของกรด $\text{HCl} + \text{HNO}_3$
- ลอกน้ำยาไวแสงออกด้วยอะซีโตน จะได้ลวดลายของโลหะทองคำซึ่งเป็นขั้วขอส และขั้วเดรน ตามที่ได้ออกแบบไว้

- นำชิ้นงานมาผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้กระจกมาส์กที่ 2
- ทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator
- ลอกน้ำยาไวแสงออกด้วยอะซีโตน อลูมิเนียมที่เคลือบอยู่บนชั้นน้ำยาไวแสงจะหลุดออกมาพร้อมกับน้ำยาไวแสง ทำให้ได้ลวดลายของอลูมิเนียมซึ่งเป็นขั้วเกต ตามที่ได้ออกแบบไว้
- ทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 12 นาที โดยสามารถอธิบายขั้นตอนทั้งหมดได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.7 โดย MESFET ที่สร้างได้จะถูก

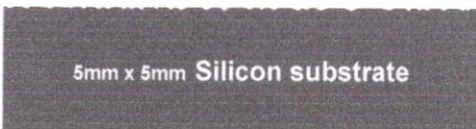
นำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป



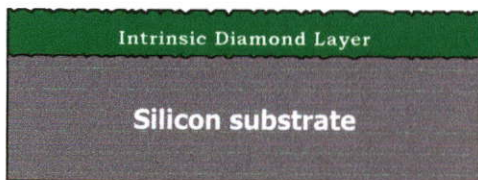
ฐานรองซิลิคอน หนา 100 ไมครอน
ผ่านการทำความสะอาดเบื้องต้น



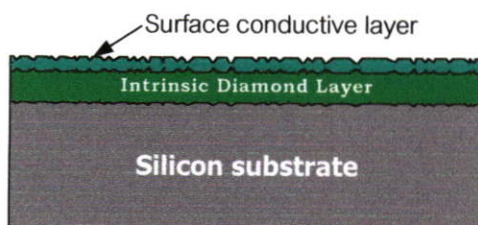
ทำการเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วยการขัด
ด้วยครีมเพชรขนาดเม็ดผลึก 0.25 ไมครอน



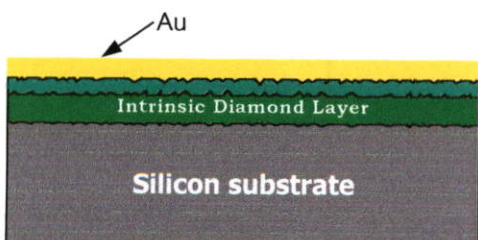
ตัดฐานรองซิลิคอนก่อนนำไปสังเคราะห์
ฟิล์มเพชรที่มีขนาด 5x5 ตารางมิลลิเมตร



สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก โดย
ใช้แหล่งจ่ายคาร์บอนเป็นเอทิลแอลกอฮอล์

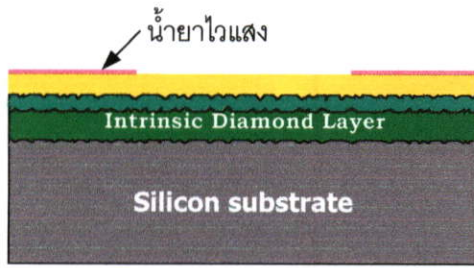


สังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าด้วยวิธี
H-termination

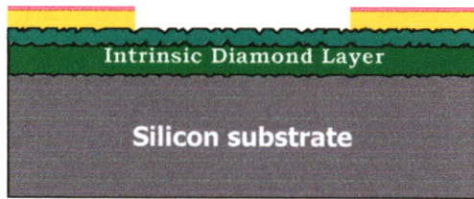


ทำการเคลือบทองคำด้วยเครื่อง Vacuum
Evaporator เพื่อสร้างขั้วซอส และขั้วเดรน
ของ MESFET

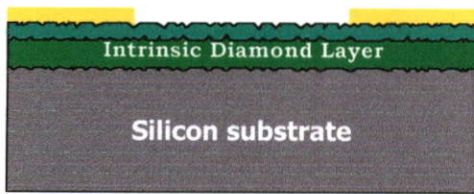
รูปที่ 3.7 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง Diamond MESFET



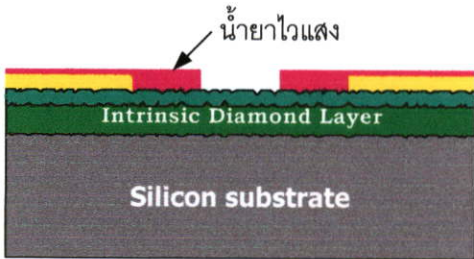
กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาส์กที่ 1
 โดยน้ำยาไวแสงที่ใช้คือชนิดบวก AZ 1350



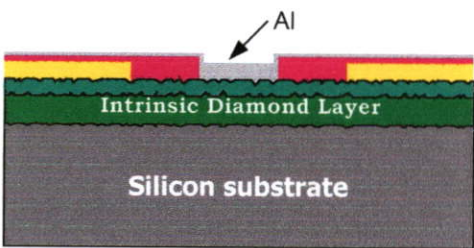
ทำการกัดของค้ำออกด้วยน้ำยากัดของค้ำ aqua regia ส่วนของค้ำที่มีน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่จะไม่ถูกกัดออก



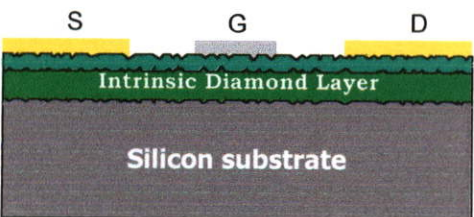
ลอกน้ำยาไวแสงออกด้วยอะซิโตน(Acetone) ในขั้นตอนนี้จะได้ขั้วซอส และขั้วเดรนของ MESFET



กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาส์กที่ 2
 โดยน้ำยาไวแสงที่ใช้คือชนิดบวก AZ 5014



ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator เพื่อสร้างขั้วเกตของ MESFET



ลอกน้ำยาไวแสงออกด้วยอะซิโตน อลูมิเนียมที่เคลือบอยู่บนน้ำยาไวแสงจะหลุดออกด้วย ในขั้นตอนนี้จะได้ขั้วเกตของ MESFET

รูปที่ 3.7 (ต่อ)

3.5 การศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของ MESFET

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบและสร้าง MESFET ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่แล้ว ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของ MESFET ที่ทำการสร้างขึ้น เช่น ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสขอต่อกี้, ศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่ม, ศึกษาผลของขนาดช่องทางเดินกระแสที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า, ศึกษาการตอบสนองของควมถี่ เป็นต้น ดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไปนี้

3.5.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสขอต่อกี้

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสขอต่อกี้ของ MESFET ที่บริเวณขั้วเกต-ซอส และขั้วเกต-เดรน โดยมีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิคอนมาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายคาร์บอนเป็นเอทิลแอลกอฮอล์เพียงอย่างเดียว
- ทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.3
- ทำการเคลือบโลหะทองคำด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator
- นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบทองคำแล้วไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อสร้างขั้วซอส และขั้วเดรนตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยในขั้นตอนนี้จะใช้กระจกมาสก์ที่ 1
- ทำการกัดทองคำด้วยสารละลาย Aqua regia ซึ่งคือส่วนผสมของกรด $\text{HCl} + \text{HNO}_3$
- ลอกน้ำยาไวแสงออกด้วยอะซีโตน จะได้ลวดลายของโลหะทองคำซึ่งเป็นขั้วซอส และขั้วเดรน ตามที่ได้ออกแบบไว้
- นำชิ้นงานมาผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้กระจกมาสก์ที่ 2
- ทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator
- ลอกน้ำยาไวแสงออกด้วยอะซีโตน อลูมิเนียมที่เคลือบอยู่บนชั้นน้ำยาไวแสงจะหลุดออกมาพร้อมกับน้ำยาไวแสง ทำให้ได้ลวดลายของอลูมิเนียมซึ่งเป็นขนาดของช่องทางเดินกระแสตามที่ได้ออกแบบไว้
- ทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 12 นาที
- ทำการทดสอบคุณสมบัติกระแสและแรงดัน (I-V) ของขั้วเกต-ซอส และขั้วเกต-เดรน

3.5.2 การศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET โดยจะศึกษาถึงผลของความหนาของชั้นความนำไฟฟ้า และผลของความหนาแน่นของโฮลที่มีต่อแรงดันขีดเริ่ม ในขณะที่ขนาดความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสมีค่าคงที่ โดยความกว้างของช่องทางเดินกระแสมีขนาด $200 \mu\text{m}$ และความยาวของช่องทางเดินกระแสมีขนาด $20 \mu\text{m}$

3.5.2.1 การศึกษาผลของความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET เมื่อมีความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าต่าง ๆ กัน ซึ่งมีขั้นตอนการสร้างดังนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิคอนมาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายคาร์บอนเป็นเอทิลแอลกอฮอล์เพียงอย่างเดียว
- ทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.3 โดยจะทำการเลือกเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ดังนี้ $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 3 นาที, $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 15 นาที, $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 3 นาที และ $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 5 นาที ซึ่งจะได้ค่าความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าค่าต่าง ๆ กัน
- ทำการเคลือบโลหะทองคำด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator
- นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบทองคำแล้วไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อสร้างขั้วซอส และขั้วเดรนตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยในขั้นตอนนี้จะใช้กระจกมาสก์ที่ 1
- ทำการกัดทองคำด้วยสารละลาย Aqua regia ซึ่งคือส่วนผสมของกรด $\text{HCl} + \text{HNO}_3$
- ลอกน้ำยาไวแสงออกด้วยอะซีโตน จะได้ลวดลายของโลหะทองคำซึ่งเป็นขั้วซอส และขั้วเดรน ตามที่ได้ออกแบบไว้
- นำชิ้นงานมาผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้กระจกมาสก์ที่ 2 โดยจะเลือกขนาดของความกว้าง และความยาวของช่องทางเดินกระแสเป็น $200 \mu\text{m}$ และ $20 \mu\text{m}$ ตามลำดับ
- ทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator

- ลอกน้ำยาไวแสงออกด้วยอะซิโตน อลูมิเนียมที่เคลือบอยู่บนชั้นน้ำยาไวแสงจะหลุดออกมาพร้อมกับน้ำยาไวแสง ทำให้ได้ลวดลายของอลูมิเนียมซึ่งเป็นขนาดของช่องทางเดินกระแสตามที่ได้ออกแบบไว้
- ทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 12 นาที
- ทำการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET ที่สร้างได้จากเงื่อนไขข้างต้นด้วยการใช้เครื่องทดสอบกระแสและแรงดัน Hewlett Packard 4156B ดังแสดงในภาคผนวก ก

3.5.2.2 การศึกษาผลของความหนาแน่นของโฮลที่มีผลต่อ

ค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET เมื่อมีความหนาแน่นของโฮลค่าต่าง ๆ กัน ซึ่งมีรายละเอียดของขั้นตอนการสร้างดังจะกล่าวต่อไปนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิคอนมาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายคาร์บอนเป็นเอทิลแอลกอฮอล์เพียงอย่างเดียว
- ทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.3 โดยจะทำการเลือกเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ดังนี้ 500 °C 3 นาที, 600 °C 5 นาที, 600 °C 10 นาที, 600 °C 15 นาที และ 700 °C 15 นาที ซึ่งจะได้ค่าความหนาแน่นของโฮลค่าต่าง ๆ กัน
- เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 5-13 ของหัวข้อ 3.5.2.1

โดยสามารถอธิบายขั้นตอนทั้งหมดได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.7 ซึ่ง MESFET ที่สร้างเสร็จตามเงื่อนไขดังกล่าว จะถูกนำไปตรวจสอบค่าแรงดันขีดเริ่มต่อไป

3.5.3 การศึกษาเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าที่มีผลต่อ

คุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET เมื่อเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าแตกต่างกันออกไป โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้านั้นจะใช้อุณหภูมิ 600 °C เพียงอุณหภูมิเดียวแต่จะแปรค่าเวลาที่ใช้เป็น 3, 5, 10 และ 15 นาที ซึ่งจะกำหนดขนาดความกว้าง และความยาวของช่องทางเดินกระแสเป็น 200 μm และ 20 μm ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการสร้างเหมือนหัวข้อที่ 3.4.2

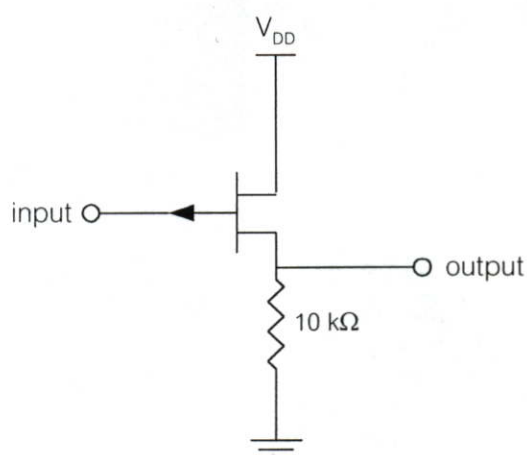
เมื่อสร้าง MESFET ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ข้างต้นเสร็จแล้วทำการทดสอบคุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ต่อไป

3.5.4 การศึกษาขนาดความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษานขนาดความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET โดยทำการออกแบบ MESFET ที่มีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสแตกต่างกัน 2 ชุด โดยชุดแรกให้มีความกว้างของช่องทางเดินกระแสคงที่ $200\ \mu\text{m}$ ส่วนความยาวของช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ $20, 40, 60$ และ $80\ \mu\text{m}$ ส่วนในชุดที่สองมีความยาวของช่องทางเดินกระแสคงที่ $20\ \mu\text{m}$ ส่วนความกว้างของช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ $200, 400, 600$ และ $800\ \mu\text{m}$ และในการทดลองนี้เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้านั้นจะใช้อุณหภูมิ $500\ ^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 นาที เพียงเงื่อนไขเดียว ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนการสร้างนั้นจะเหมือนกับหัวข้อ 3.4.2 จะแตกต่างกันตรงที่เงื่อนไขที่กำหนดไว้ข้างต้น เมื่อสร้าง MESFET ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้เสร็จแล้วทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET ต่อไป

3.5.5 การศึกษาการตอบสนองความถี่ของ MESFET

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาถึงการตอบสนองความถี่ของ MESFET ว่าสามารถที่จะตอบสนองความถี่สูงสุดได้เท่าไร โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดการสร้างเหมือนหัวข้อที่ 3.4.2 ซึ่งในการทดลองนี้เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้านั้นจะใช้อุณหภูมิ $500\ ^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 นาที เพียงเงื่อนไขเดียว โดยมีขนาดความกว้างของช่องทางเดินกระแสเป็น $200\ \mu\text{m}$ และความยาวของช่องทางเดินกระแสเป็น $20, 40$ และ $60\ \mu\text{m}$ ตามลำดับ เมื่อสร้าง MESFET ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้เสร็จแล้วทำการทดสอบการตอบสนองความถี่ของ MESFET โดยใช้วงจรมัดรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรที่ใช้วัดการตอบสนองของความถี่ของ MESFET

3.5.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET เมื่อทำงานในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ๆ โดยมีขั้นตอนการสร้างเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.4.2 จากนั้นนำ MESFET ไปทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยจะพิจารณาค่ากระแส I_{DS} ของ MESFET ซึ่งทำงานในช่วงอิมิตัว เมื่อทำงานอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ (อุณหภูมิห้อง), $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $250\text{ }^{\circ}\text{C}$

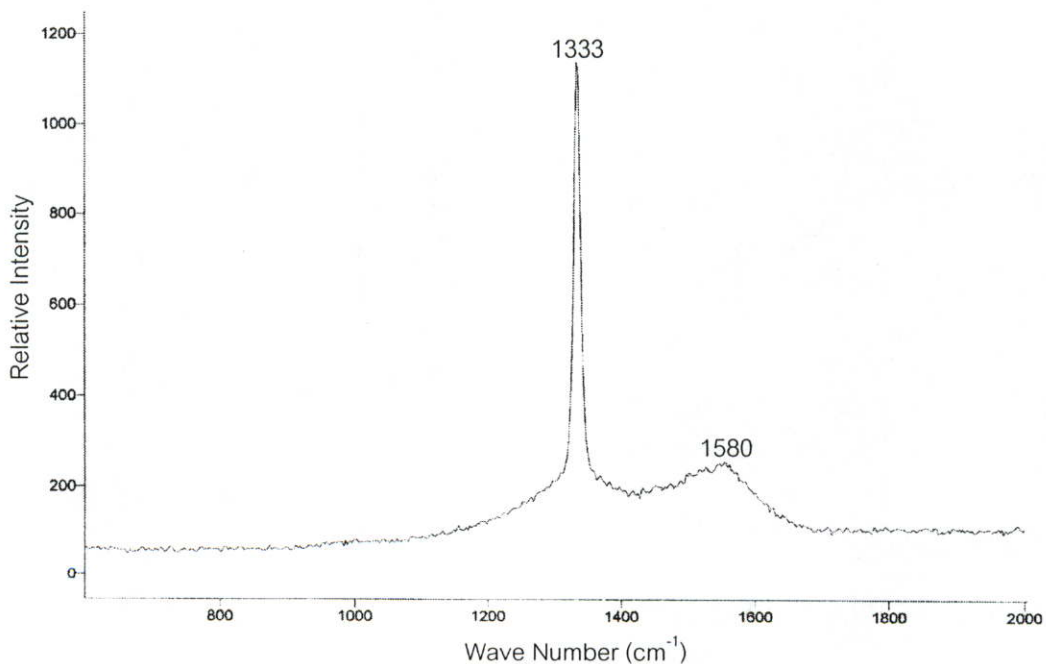
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากผ่านกระบวนการสร้างตามลำดับขั้นตอน และเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กำหนดไว้เพื่อทดลอง และตรวจสอบในวิทยานิพนธ์นี้ไว้แล้วในบทที่ 3 ในบทนี้จึงจะเสนอถึงผลการทดลองพร้อมทั้งวิเคราะห์ ผลการทดลองที่ได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของชั้นความนำไฟฟ้า

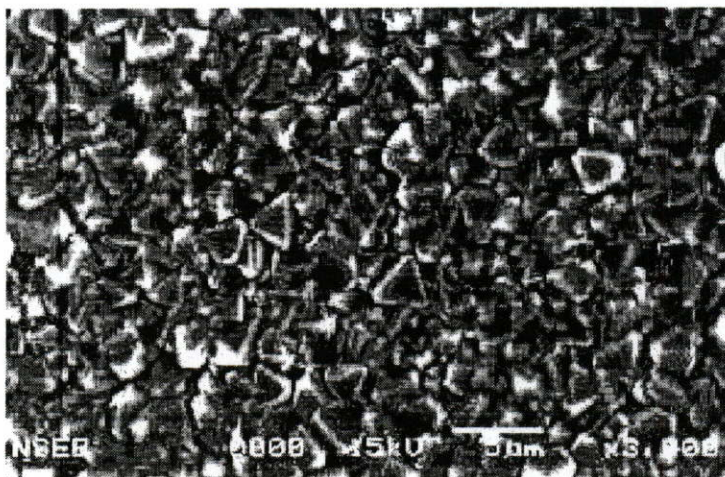
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่ผ่านการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าแล้ว โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรนี้จะอาศัย Raman Spectroscopy และ Scanning Electron Microscopy เพื่อตรวจสอบความเป็นเพชร และลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร ตามลำดับ ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจากรูปจะ เห็นได้ว่า ค่ายอดสูงสุดของ Raman spectrum ที่วัดได้จากชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์นี้มีค่าอยู่ที่ 1333 cm^{-1} อย่างชัดเจน ซึ่งมีค่ายอดสูงสุดใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติมาก ซึ่งเพชรในธรรมชาติมีค่า ยอดสูงสุดของ Raman spectrum เท่ากับ 1332 cm^{-1} ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 แม้ว่าจะมียอดของ



รูปที่ 4.1 ลักษณะของ Raman spectrum ของชั้นความนำไฟฟ้า

กราฟไพล์ที่ 1580 cm^{-1} รวมอยู่ด้วยแต่ความสูงยอดกราฟต่ำกว่ามาก นั่นคือชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติเป็นเพชรและมีปริมาณกราฟไพล์ต่ำมาก

ผลการตรวจสอบด้วย SEM นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะผิวหน้าของชั้นความนำไฟฟ้านั้นยังคงมีลักษณะเป็นฟิล์มเพชร โดยมีลักษณะเป็นผลึกเล็กๆ เรียงชิดติดกันอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.2 ลักษณะผิวหน้าของชั้นความนำไฟฟ้า

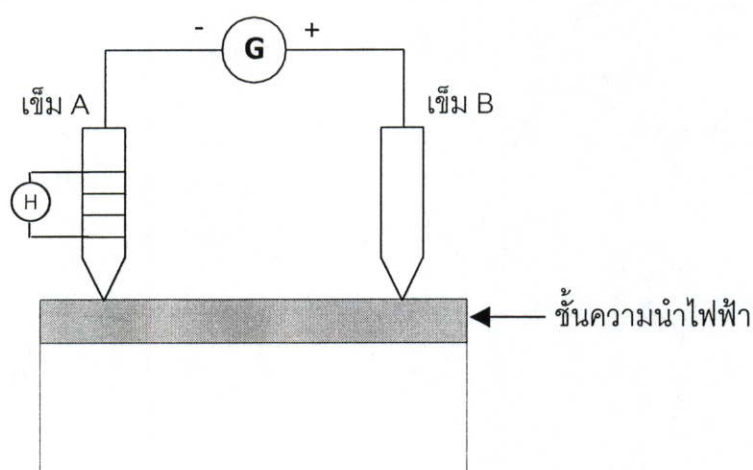
4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้า

4.2.1 ผลการตรวจสอบชนิดของพาหะส่วนมากของชั้นความนำไฟฟ้า

หลังจากทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าด้วยวิธี H-termination ซึ่งมีเงื่อนไขในการสังเคราะห์คือ อุณหภูมิที่ใช้ 500, 600 และ 700 °C และเวลาที่ใช้คือ 3, 5, 10 และ 15 นาที แล้วทำการทดสอบหาชนิดของพาหะส่วนมากของชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้นี้ด้วยวิธีเข็มร้อน ซึ่งมีอุปกรณ์การทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 จากรูปจะเห็นว่าชุดอุปกรณ์ประกอบด้วยเข็ม 2 เล่ม จี้ติดบนฟิล์มเพชร โดยเข็ม A ทำหน้าที่เป็นเข็มความร้อน ส่วนเข็ม B จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง นำกัลวานอมิเตอร์มาต่อระหว่างเข็มทั้งสอง โดยใช้ขั้วบวกของกัลวานอมิเตอร์ต่อเข้ากับเข็ม B และขั้วลบต่อเข้ากับเข็ม A

ผลการทดลองที่ได้หลังจากให้ความร้อนแก่เข็ม A ปรากฏว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้เอนไปทางด้านบวก เนื่องมาจากที่บริเวณเข็มร้อน (เข็ม A) พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้มีประจุโฮล

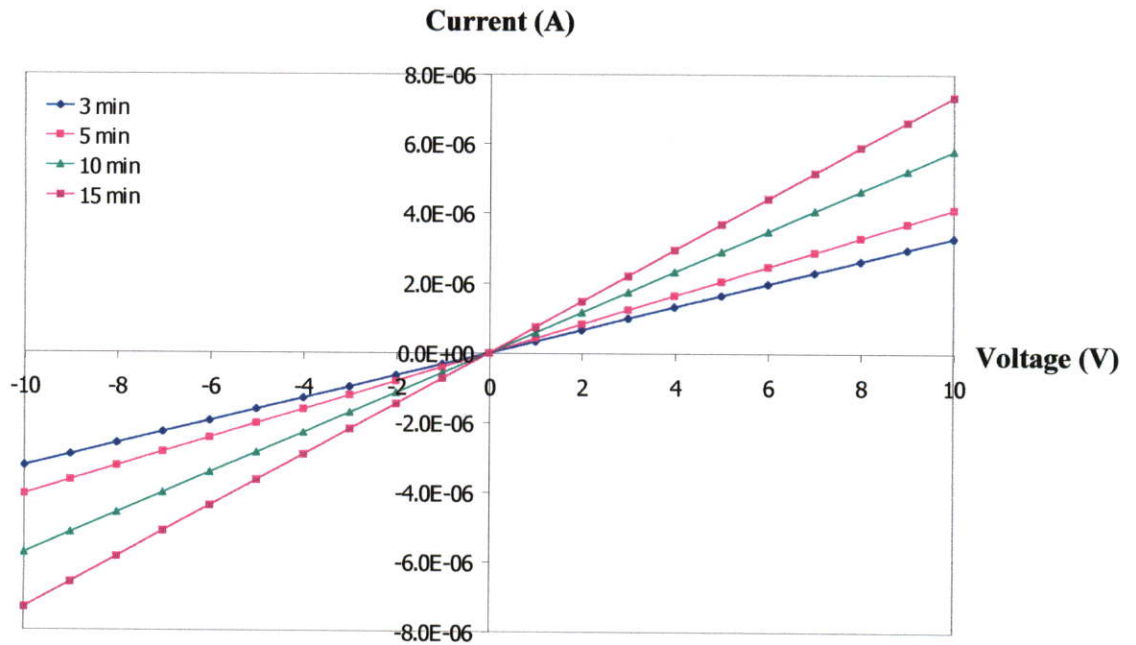
เพิ่มขึ้น และประจุไหลเหล่านี้จะมีพลังงานสูงกว่าประจุไหลที่บริเวณอื่นๆ ดังนั้นประจุไหลเหล่านี้จะแพร่กระจายออกไปรอบๆ และทำให้เกิดมีการแพร่ของประจุไหล โดยไหลจากเข็มร้อนไปยังเข็มที่เย็นกว่า บริเวณเข็มร้อนจึงขาดประจุไฟฟ้าบวก และทำให้มีศักย์เป็นลบ ส่วนด้านเข็มเย็นจะมีศักย์เป็นบวก ดังนั้นกระแสสุทธิจึงไหลออกจากเข็มเย็นผ่านมิเตอร์ไปยังเข็มร้อน แสดงว่ามีประจุเคลื่อนที่จากเข็ม A ไปยังเข็ม B แล้วผ่านกัลวานมิเตอร์ทางซ้ายบวก ทำให้เข็มของกัลวานมิเตอร์ที่เบนไปทางบวก ดังนั้นพหุผลหลักในการนำกระแสของชั้นความนำไฟฟ้าที่ทำการวัดนี้คือ โหลด จึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่าชั้นความนำไฟฟ้าที่สร้างได้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี



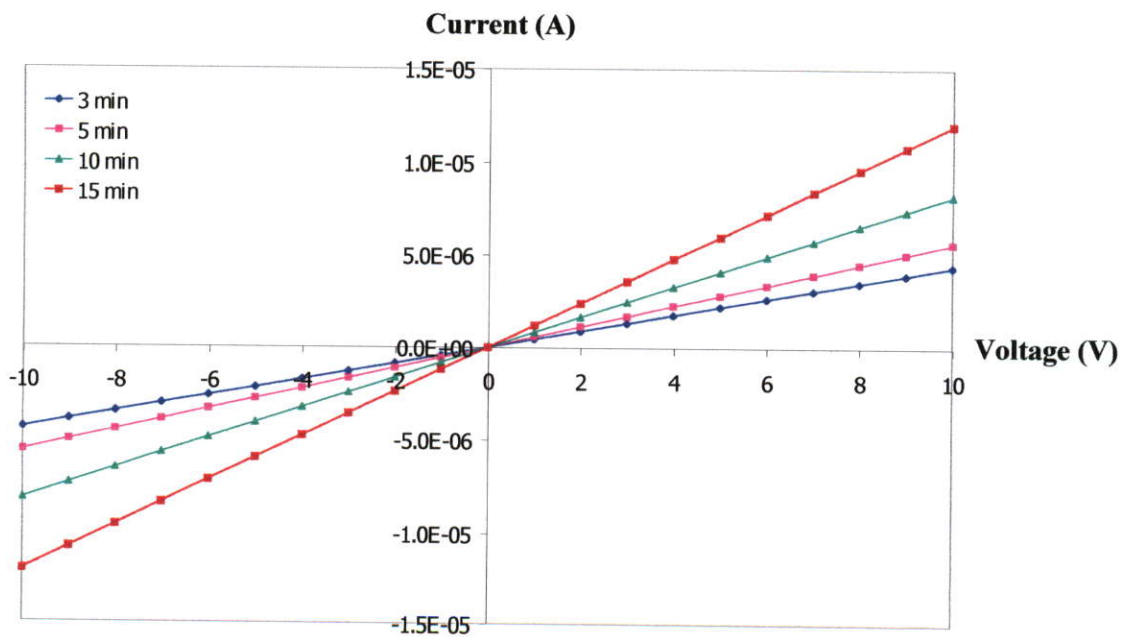
รูปที่ 4.3 อุปกรณ์การหาชนิดของพหุผลส่วนมากของชั้นความนำไฟฟ้า

4.2.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้า

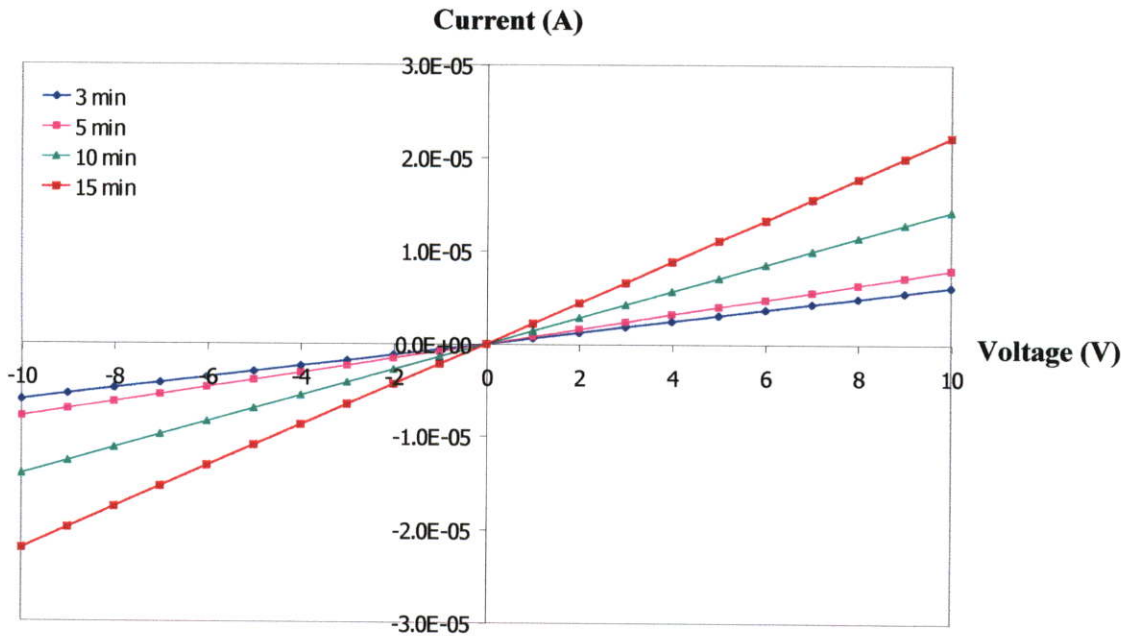
หลังจากทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคเสร็จแล้ว จะทำการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคก่อนที่จะนำไปสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้า โดยค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าประมาณ $10^{10} \Omega$ เพื่อที่จะนำค่าความต้านทานนี้ไปเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานหลังจากทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าแล้ว หลังจากนั้นจึงทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าด้วยวิธี H-termination ดังที่ได้กล่าวถึงรายละเอียดแล้วในหัวข้อที่ 3.3 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ 500, 600 และ 700 °C และใช้เวลาในการสังเคราะห์ 3, 5, 10 และ 15 นาที หลังจากนั้นจึงทำขั้วสัมผัสโหนดด้วยโลหะทองคำเพื่อตรวจสอบคุณลักษณะกระแสและแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ขึ้นตามเงื่อนไขข้างต้น ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4-รูปที่ 4.6



รูปที่ 4.4 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ 500 °C และใช้เวลาค่าต่าง ๆ ด้วยวิธี H-termination



รูปที่ 4.5 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ 600 °C และใช้เวลาค่าต่าง ๆ ด้วยวิธี H-termination

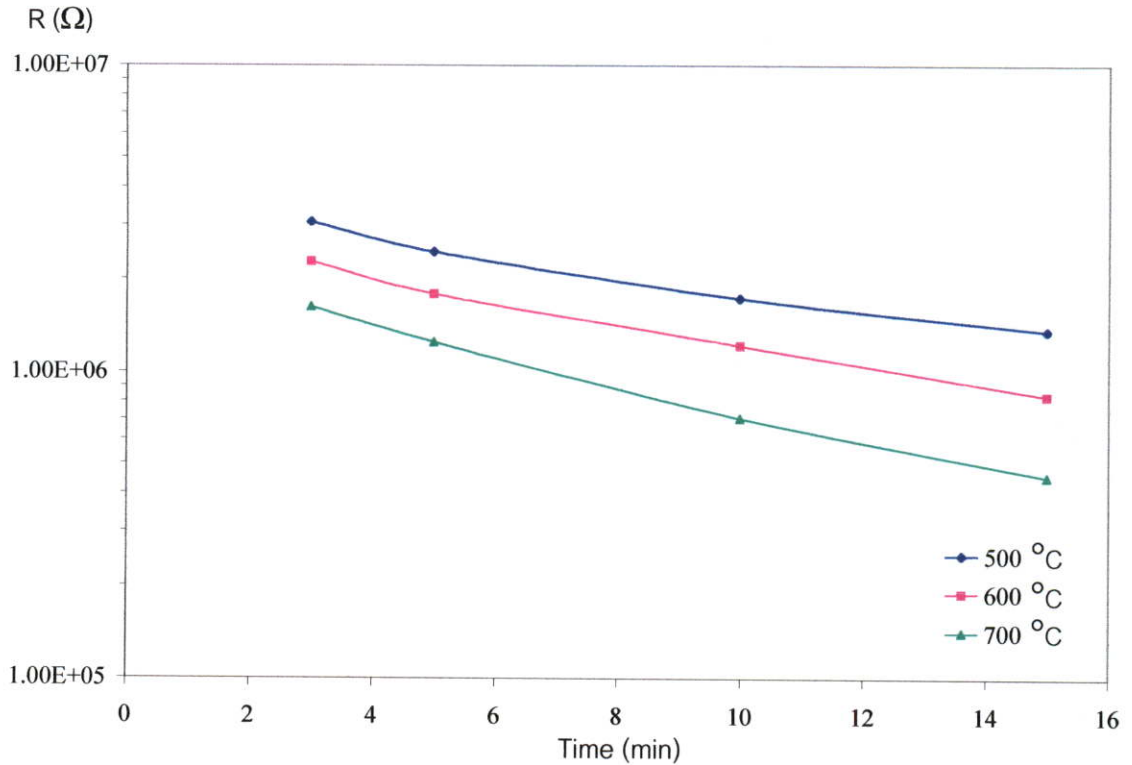


รูปที่ 4.6 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 700 °C และใช้เวลาต่าง ๆ ด้วยวิธี H-termination

จากการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้าทั้งหมดที่ทำการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขที่กล่าวมาข้างต้นสามารถหาค่าความต้านทานได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 4.4-รูปที่ 4.6 สรุปเป็นค่าต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าค่าความต้านทานมีค่าลดลงอย่างมาก (จาก $10^{10}\Omega$ เหลือ 10^6 - $10^5\Omega$) จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้ากับเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทาน(Ω)ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C) \ เวลา (min)	500	600	700
3	3.05×10^6	2.28×10^6	1.62×10^6
5	2.44×10^6	1.78×10^6	1.25×10^6
10	1.73×10^6	1.22×10^6	7.03×10^5
15	1.36×10^6	8.34×10^5	4.52×10^5



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้ากับเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยวิธี H-termination

พิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยวิธี H-termination มากขึ้นแต่ใช้เวลาในการสังเคราะห์เท่ากัน ค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าลดลง โดยเมื่อพิจารณาที่เวลา 3 นาทีเท่ากัน และใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์เป็น 500, 600 และ 700 °C ค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าเท่ากับ $3.05 \times 10^6 \Omega$, $2.28 \times 10^6 \Omega$ และ $1.62 \times 10^6 \Omega$ ตามลำดับ และถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์มีค่าเท่ากัน แต่เวลาที่ใช้นานขึ้นค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าลดลง โดยเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 500 °C แต่ใช้เวลาดังกันคือ 3, 5, 10 และ 15 นาที พบว่าค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่า $3.05 \times 10^6 \Omega$, $2.44 \times 10^6 \Omega$, $1.73 \times 10^6 \Omega$ และ $1.36 \times 10^6 \Omega$ ตามลำดับซึ่งมีค่าลดลง

หลังจากทำการหาค่าความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้าได้แล้ว จะทำการหาความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ต่อไป โดยจะให้แรงดันไบอัสย้อนกลับแก่ชั้นความนำไฟฟ้านี้เพื่อหาค่า

แรงดันพังทลาย (punch through) ที่เกิดขึ้น โดยค่าแรงดันพังทลายที่วัดได้จากชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ขึ้นตามเงื่อนไขต่าง ๆ สามารถสรุปเป็นค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันพังทลาย V_{pt} (V) ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่างๆ

อุณหภูมิ($^{\circ}$ C) เวลา(นาทื)	500	600	700
3	0.5	0.8	1.4
5	0.7	1.3	2.2
10	1.3	2.1	4.1
15	1.8	3.2	6.6

จากค่าแรงดันพังทลายที่วัดได้ในตารางที่ 4.2 นี้สามารถนำมาคำนวณหาความหนาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.1)-(4.5)

$$V_{pt} = a^2 \frac{qp}{2\epsilon} \quad (4.1)$$

โดยที่ V_{pt} คือ แรงดันพังทลาย

a คือ ความหนาของชั้นความนำไฟฟ้า

$$R = \frac{1}{pq\mu_p} \frac{L}{Za} \quad (4.2)$$

จากสมการที่ (4.2) จะได้ค่า p ดังสมการที่ (4.3)

$$p = \frac{L}{Rq\mu_p Z a} \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (4.1) จะได้ค่า p ดังสมการที่ (4.4)

$$p = \frac{V_{pt} 2\epsilon}{q} \frac{1}{a^2} \quad (4.4)$$

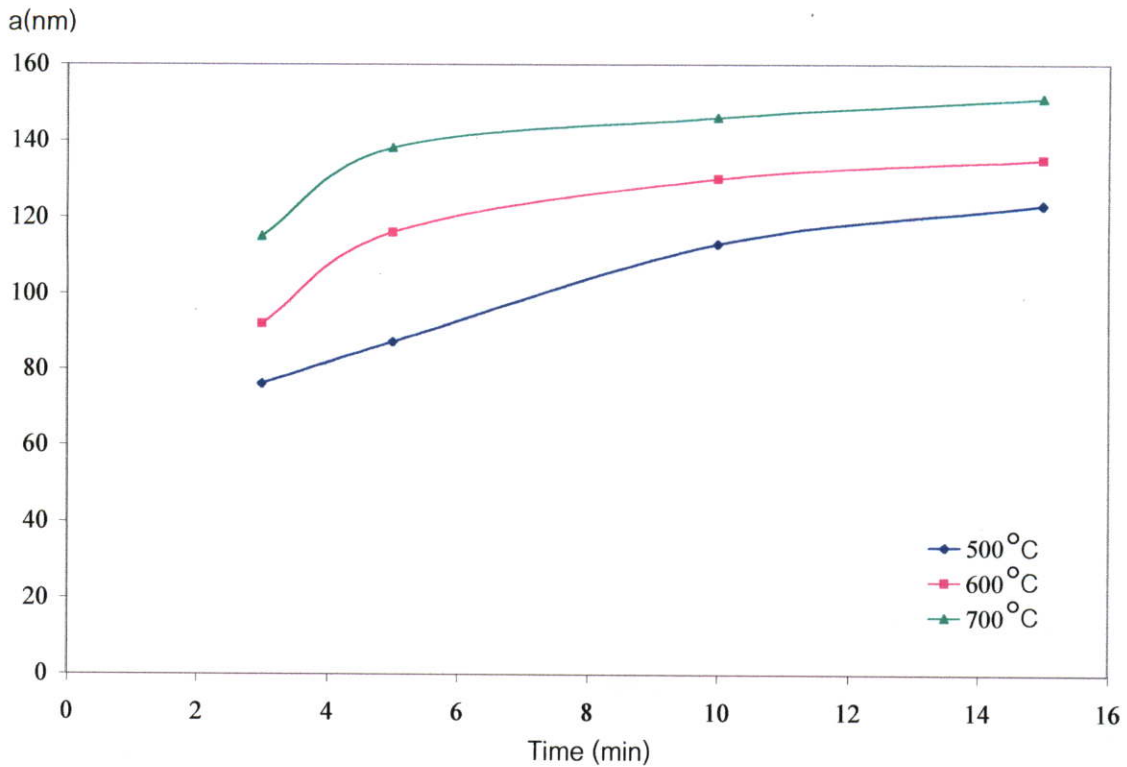
จากสมการที่ (4.3) และ (4.4) จะได้ค่าความหนาดังสมการที่ (4.5)

$$a = 2\epsilon R V_{pt} \mu_p \frac{Z}{L} \quad (4.5)$$

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนา a (nm) ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

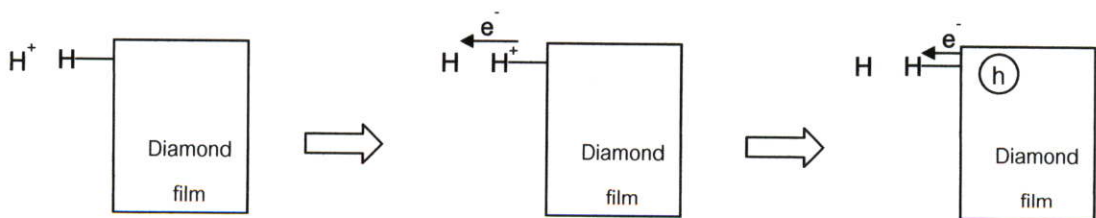
อุณหภูมิ(°C) \ เวลา(นาที่)	500	600	700
3	76	92	115
5	87	116	138
10	113	130	146
15	123	135	151

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนา (a) ของชั้นความนำไฟฟ้ากับเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยวิธี H-termination มากขึ้นแต่ใช้เวลาในการสังเคราะห์เท่ากัน ค่าความหนาที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อพิจารณาที่เวลา 3 นาทีเท่ากัน และใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์เป็น 500, 600 และ 700 °C ค่าความหนาที่ได้จะมีค่า 76 nm, 92 nm, และ 115 nm ตามลำดับ และถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์มีค่าเท่ากัน แต่เวลาที่ใช้นานขึ้นค่าความหนาที่ได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยโดยเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 500 °C แต่ใช้เวลาดังกันคือ 3, 5, 10 และ 15 นาที พบว่าค่าความหนาที่ได้จะมีค่า 76 nm, 87 nm, 113 nm และ 123 nm ตามลำดับ

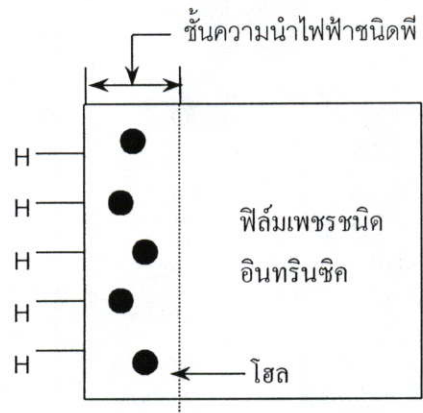


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นความนำไฟฟ้ากับเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยวิธี H-termination

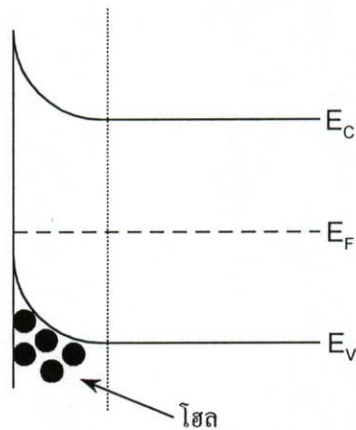
จากผลการทดลองที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่ออะตอมของไฮโดรเจนได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไฮโดรเจนไอออนเหล่านี้เมื่อปกคลุมบริเวณผิวหน้าของฟิล์มเพชรจะดึงอิเล็กตรอนจากอะตอมไฮโดรเจนที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มเพชรทำให้อะตอมไฮโดรเจนเหล่านี้มีประจุบวก และอะตอมไฮโดรเจนจะทำการดึงอิเล็กตรอนในพันธะของอะตอมคาร์บอนออกมาทำให้เกิดที่ว่างขึ้นในพันธะของอะตอมคาร์บอนนั่นคือมีโฮลเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แผนภาพแสดงกระบวนการเกิดโฮลในฟิล์มเพชร



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.10 (ก) แสดงการเกิดขึ้นของชั้นความนำไฟฟ้าชนิดพี (ข) แสดงลักษณะแถบพลังงานของชั้นความนำไฟฟ้า

ในรูปที่ 4.10(ก) แสดงการเกิดขึ้นของชั้นความนำไฟฟ้าชนิดพี และในรูปที่ 4.10(ข) แสดงลักษณะแถบพลังงานของชั้นความนำไฟฟ้า จะเห็นว่าแถบพลังงานมีการโค้งขึ้นที่บริเวณผิวหน้าเนื่องมาจากเกิดการก่อดั้วของชั้นความนำไฟฟ้าชนิดพี เมื่ออุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้ามากขึ้น อะตอมไฮโดรเจนจะสามารถดึงอิเล็กตรอนจากอะตอมคาร์บอนในชั้นถัดไปได้มากขึ้น นั่นคือความหนาของชั้นความนำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นทำให้ค่าความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความหนาของชั้นความนำไฟฟ้านี้จะแปรผันตรงกับ เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์

จากค่าความต้านทานและความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นที่ได้จากผลการทดลองข้างต้น สามารถนำมาคำนวณหาค่าพื้นฐานต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้า ได้แก่ ค่าพิกัดความต้านทาน (resistivity : ρ) ค่าความหนาแน่นประจุโฮล (hole concentration : p) ระดับพลังงานเฟอร์มิเทียบกับระดับพลังงานวาเลนซ์ ($E_F - E_V$) ได้จากสมการที่ (4.6)-(4.7) ซึ่งค่าทั้งหมดที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 4.4-ตารางที่ 4.6

$$R = \rho \frac{L}{Za} \quad (4.6)$$

$$p = \frac{1}{q\mu_p\rho} = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right) \quad (4.7)$$

โดยที่

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi kT m_h^*}{h^2} \right)^{3/2}$$

ตารางที่ 4.4 ค่าพิกัดความต้านทาน ρ ($\Omega\text{-cm}$) ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

อุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$) เวลา(นาทื)	500	600	700
3	23.18	20.98	18.63
5	21.23	20.65	17.25
10	19.55	15.86	10.26
15	16.73	11.26	6.83

ตารางที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นประจุโฮล p (cm^{-3}) ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

อุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$) เวลา(นาทีก)	500	600	700
3	5.39×10^{16}	5.96×10^{16}	6.71×10^{16}
5	5.89×10^{16}	6.05×10^{16}	7.25×10^{16}
10	6.39×10^{16}	7.88×10^{16}	1.22×10^{17}
15	7.47×10^{16}	1.11×10^{17}	1.83×10^{17}

ตารางที่ 4.6 ค่าระดับพลังงานเฟอร์มิเทียบกับระดับพลังงานวาเลนซ์ $E_F - E_V$ (eV) ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

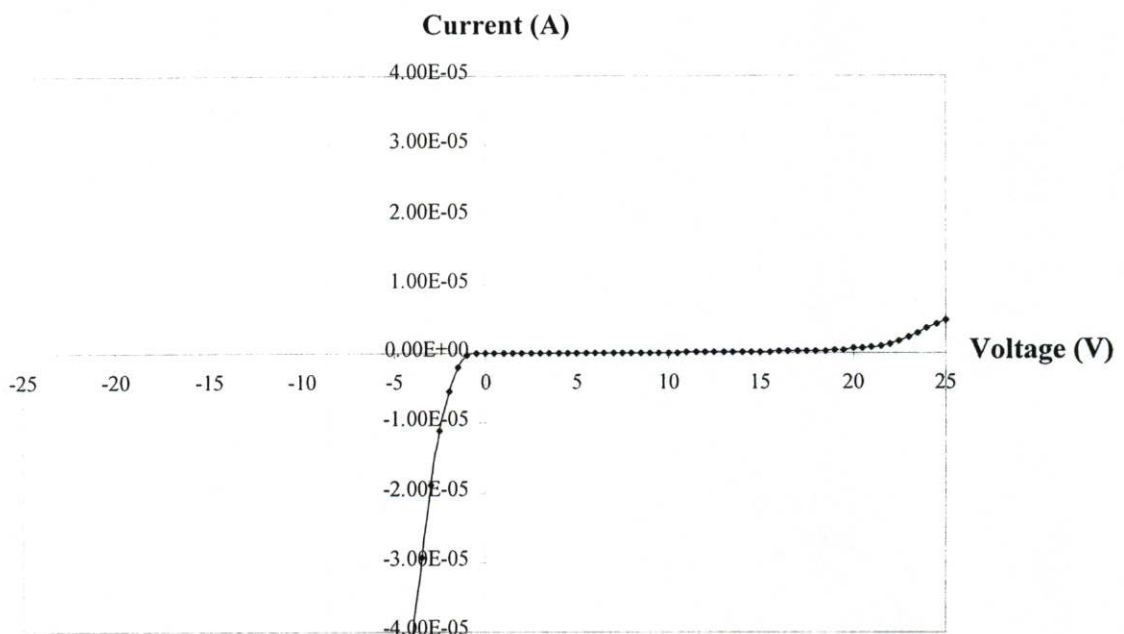
อุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$) เวลา(นาทีก)	500	600	700
3	0.1233	0.1207	0.1177
5	0.1210	0.1203	0.1157
10	0.1189	0.1135	0.1022
15	0.1149	0.1046	0.0917

4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของ MESFET

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบและสร้าง MESFET ด้วยกระบวนการสร้างมาตรฐานดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 เสร็จเรียบร้อยแล้ว ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของ MESFET ที่ทำการสร้างขึ้น เช่น ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสขอตติ์, ผลการศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่ม, ผลการศึกษาขนาดความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า, ผลการศึกษากการตอบสนองของควมถี่ เป็นต้น ดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไป

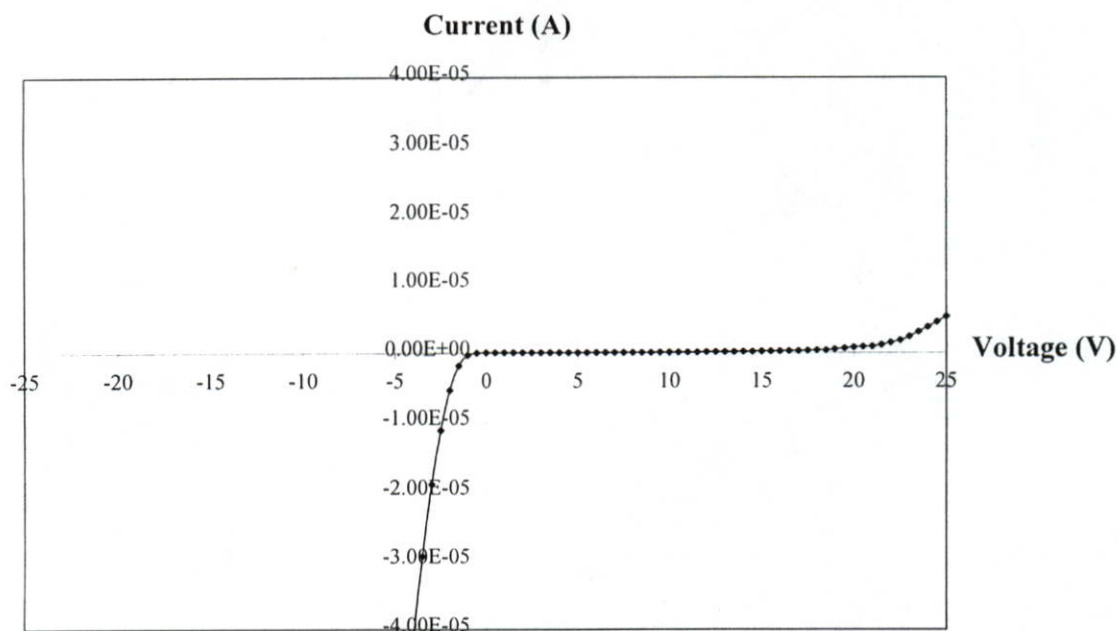
4.3.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสชนิดขดตึก

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสชนิดขดตึกของ MESFET ที่บริเวณขั้วเกต-ซอส และขั้วเกต-เดรน โดยจะทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าด้วยวิธี H-termination ดังที่ได้กล่าวถึงรายละเอียดแล้วในหัวข้อที่ 3.3 หลังจากนั้นจึงทำรอยสัมผัสโหนดด้วยโลหะทองคำซึ่งจะได้ขั้วซอส และขั้วเดรนของ MESFET จากนั้นจึงทำรอยสัมผัสชนิดขดตึกด้วยโลหะอลูมิเนียมซึ่งในขั้นตอนนี้จะได้ขั้วเกตของ MESFET เมื่อได้รอยสัมผัสชนิดขดตึก และรอยสัมผัสโหนดแล้ว จะทำการตรวจสอบคุณลักษณะกระแสและแรงดันของขั้วเกต-ซอส และขั้วเกต-เดรน ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของขั้วเกต-ซอส ของ MESFET

พิจารณารูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นกราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดันของขั้วเกต-ซอส ของ MESFET พบว่า มีลักษณะเป็นรอยสัมผัสชนิดขดตึก นั่นคือ ในกรณีที่ให้แรงดันไบอัสตรงกับรอยสัมผัสจะมีกระแสไหล ส่วนในกรณีที่ให้แรงดันไบอัสกลับกับรอยสัมผัสจะไม่มีกระแสไหลจนกระทั่งถึงค่าแรงดันพังทลาย(Breakdown Voltage) กระแสจึงจะสามารถไหลได้ จากผลการทดลองในรูปที่ 4.11 ค่าแรงดันพังทลายมีค่าประมาณ 20 V



รูปที่ 4.12 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของขั้วเกต-เดรน ของ MESFET

พิจารณารูปที่ 4.12 พบว่า ลักษณะของกราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดันของขั้วเกต-เดรน ของ MESFET มีลักษณะเป็นรอยสัมผัสขอตติ์ก็เช่นเดียวกับผลการทดลองในรูปที่ 4.11 โดยค่าแรงดันพังทลายของกราฟในรูปที่ 4.12 นี้ มีค่าประมาณ 20 V

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 จะพบว่ามีลักษณะเป็นรอยสัมผัสขอตติ์ก็ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า รอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับชั้นความนำไฟฟ้าชนิดพีที่ทำกรเลี้ยงกระแสที่ด้วยวิธี H-termination นี้เป็นรอยสัมผัสแบบขอตติ์ก็

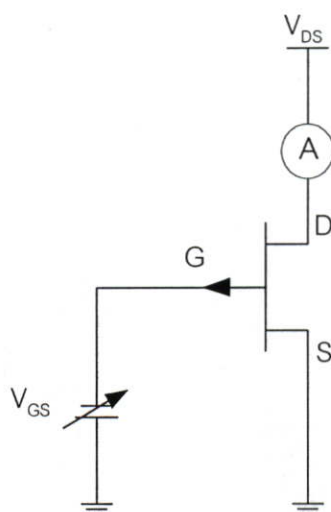
4.3.2 ผลการศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET โดยจะศึกษาถึงผลของความหนาของชั้นความนำไฟฟ้า และผลของความหนาแน่นของโฮลที่มีต่อแรงดันขีดเริ่ม ในขณะที่ขนาดความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสมีค่าคงที่ โดยความกว้างของช่องทางเดินกระแสมีขนาด 200 μm และความยาวของช่องทางเดินกระแสมีขนาด 20 μm

4.3.2.1 ผลของความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาถึงผลของความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET โดยจะกำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้านี้คือ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 3 นาที, $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 15 นาที, $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 3 นาที และ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 5 นาที ซึ่งจากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 จะได้ค่าความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าค่าต่าง ๆ กันคือ 76 nm, 123 nm, 92 nm และ 138 nm ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการสร้าง MESFET ด้วยกระบวนการสร้างดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.4.2 โดยกำหนดขนาดความกว้าง และความยาวของช่องทางเดินกระแสคงที่ ซึ่งมีขนาด $200\text{ }\mu\text{m}$ และ $20\text{ }\mu\text{m}$ ตามลำดับ เมื่อทำการสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกระแสและแรงดัน Hewlett Packard 4156B

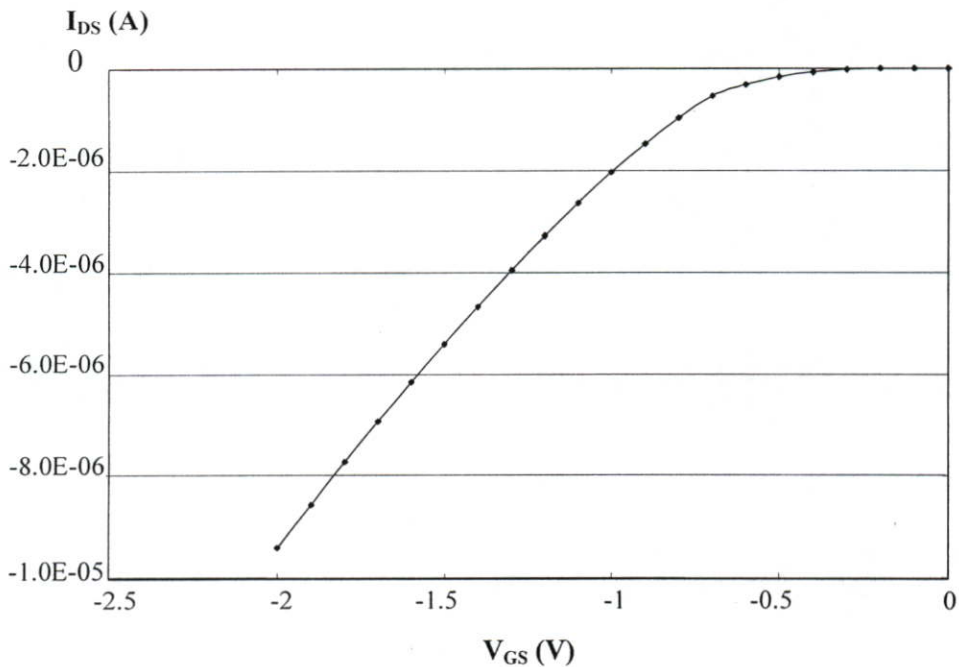
ส่วนประกอบของเครื่องที่ใช้ในการหาค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง 2 ค่า (V_{DS} และ V_{GS}) และเครื่องวัดกระแส (Amp Meter) ในการทดสอบคุณสมบัติดังกล่าวจะทำการต่อวงจรดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 วงจรที่ใช้ในการหาค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET

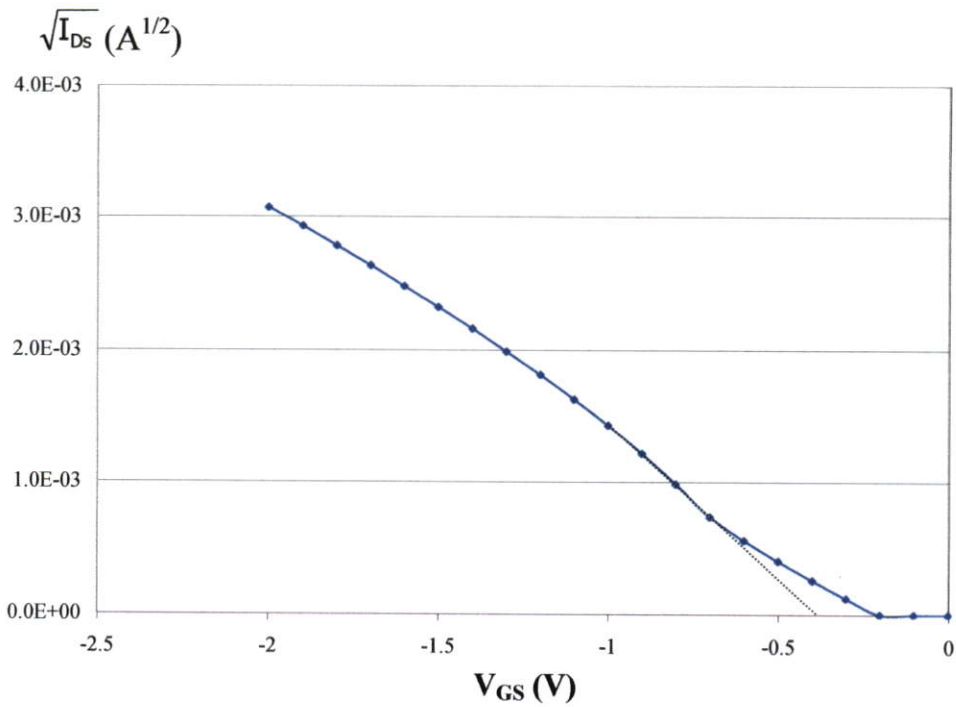
ในการทดสอบจะทำการจ่ายค่าแรงดันไฟเลี้ยงเดรนขอส (V_{DS}) แก่วงจรคงที่ค่าหนึ่งคือ -10 V จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่ขั้วเกต (V_{GS}) ของทรานซิสเตอร์ เครื่องจะทำการบันทึกค่ากระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์แต่ละครั้งที่ทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันและเก็บค่าต่าง ๆ ไว้ จากนั้น

ทำการแสดงผลด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ตัวอย่างผลการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่ม ในกรณีที่ชั้นความนำไฟฟ้าหนา 76 nm แสดงได้ดังรูปที่ 4.14

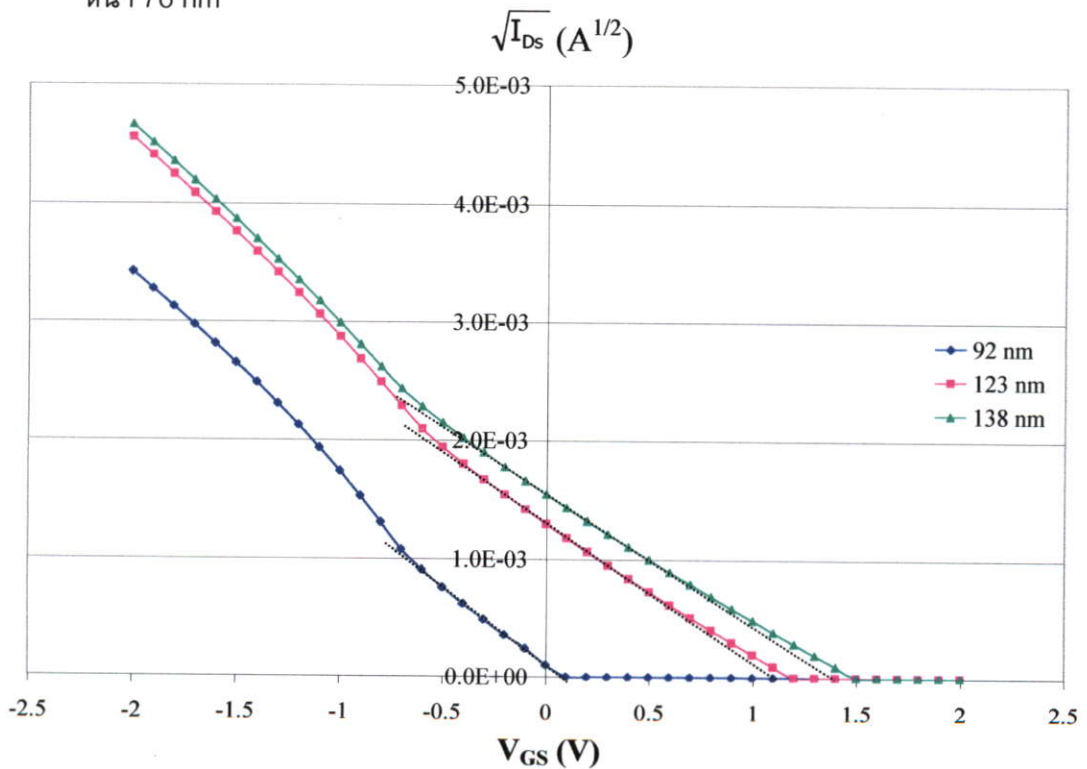


รูปที่ 4.14 ตัวอย่างผลการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET ในกรณีที่ชั้นความนำไฟฟ้าหนา 76 nm

จากนั้นนำผลที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{GS} ในรูปที่ 4.14 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ กับ V_{GS} จากนั้นลากเส้นตรงจากกราฟลงมาตัดแกน V_{GS} ที่จุดตัดแกนนี้จะเป็นค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET ดังแสดงในรูปที่ 4.15 จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.15 นี้สามารถอ่านค่าแรงดันขีดเริ่มได้มีค่าเท่ากับ -0.4 V จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าเป็นลบแสดงว่า MESFET ที่สร้างจากชั้นความนำไฟฟ้าหนา 76 nm นี้เป็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ซึ่งในกรณีของ MESFET แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมดนั้น แรงดันภายในของรอยสัมผัสขอตักก็ทำให้ช่องทางเดินกระแสปิดอยู่ ซึ่งต้องให้แรงดันลบ (ไบอัสตรง) ที่ขั้วเกตเพื่อที่จะทำให้ช่องทางเดินกระแสเปิดสนิทพอดี และถ้าให้แรงดันเป็นลบมากขึ้นอีก ช่องทางเดินกระแสจะถูกทำให้เปิดออก ทำให้กระแสสามารถไหลผ่านช่องทางเดินกระแสนี้ได้



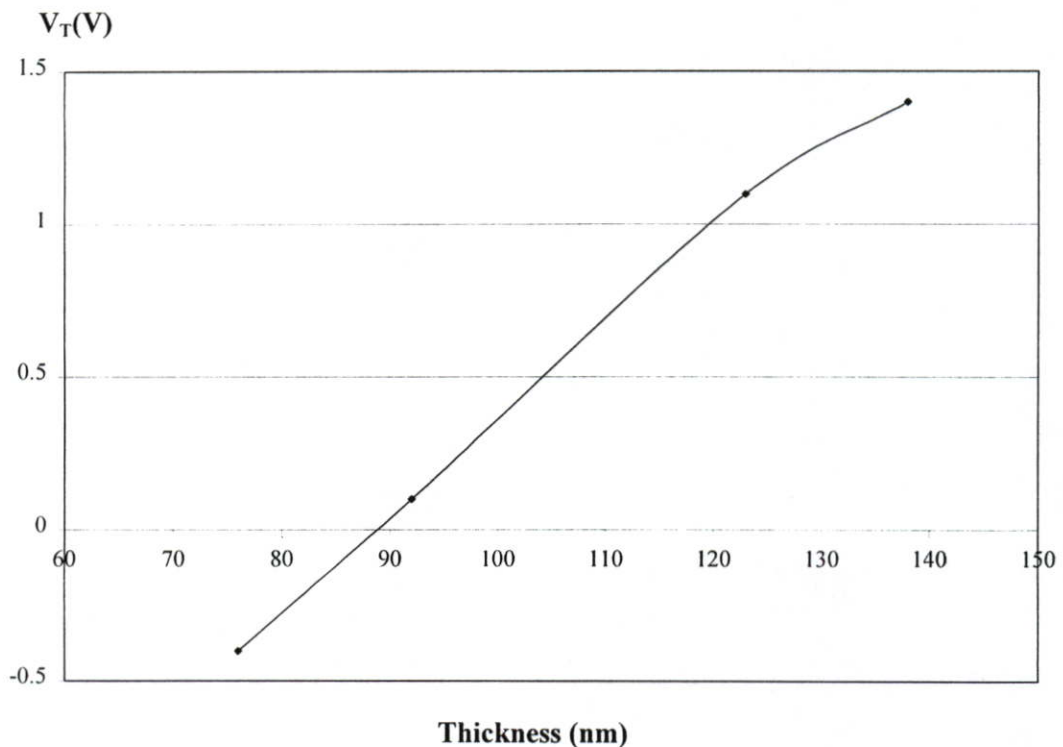
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ กับ V_{GS} ของ MESFET ในกรณีที่ชั้นความนำไฟฟ้าหนา 76 nm



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ กับ V_{GS} ของ MESFET ในกรณีที่ชั้นความนำไฟฟ้ามีความหนาต่าง ๆ

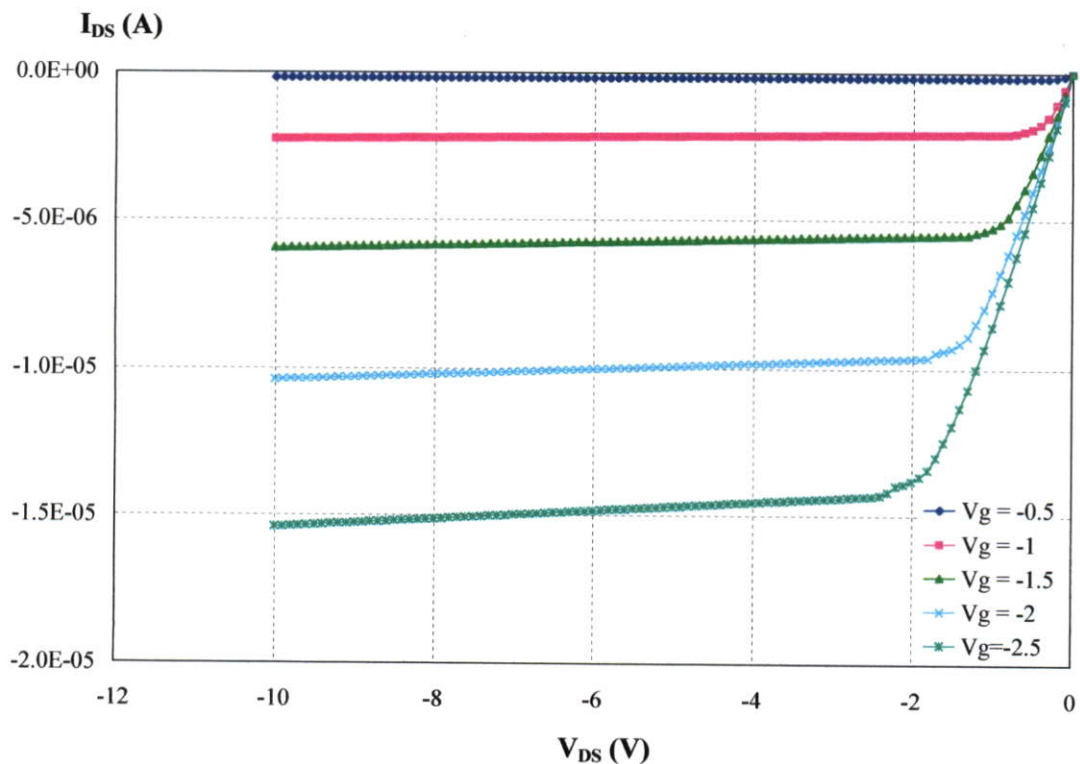
จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.16 จะพบว่า ค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET ที่สร้างขึ้นโดยมีค่าความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าต่าง ๆ กันคือ 92 nm, 123 nm และ 138 nm มีค่า 0.1 V, 1.1 V และ 1.4 V ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าเป็นบวก แสดงว่า MESFET ที่สร้างขึ้นนี้เป็นแบบดีพลิตชันโหมด ซึ่งในกรณีของ MESFET แบบดีพลิตชันโหมดนั้น ต้องให้แรงดันบวก(ไบอัสกลับ) ที่ขั้วเกตเพื่อที่จะทำให้ช่องทางเดินกระแสปิดสนิทพอดี จากผลการทดลองในกรณีของ MESFET แบบดีพลิตชันโหมดจะเห็นว่าถ้าความหนาของชั้นความนำไฟฟ้ามียิ่งมากขึ้น ค่าแรงดันขีดเริ่มก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย นั่นคือต้องให้แรงดันบวก หรือไบอัสกลับที่ขั้วเกตมากขึ้นเพื่อที่จะทำให้ช่องทางเดินกระแสปิดสนิทพอดี

ดังนั้นจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า MESFET ที่สร้างขึ้นจากเงื่อนไขดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถทำงานได้ 2 โหมดด้วยกัน คือ แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด และ แบบดีพลิตชันโหมด โดยพิจารณาจากค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.3.2

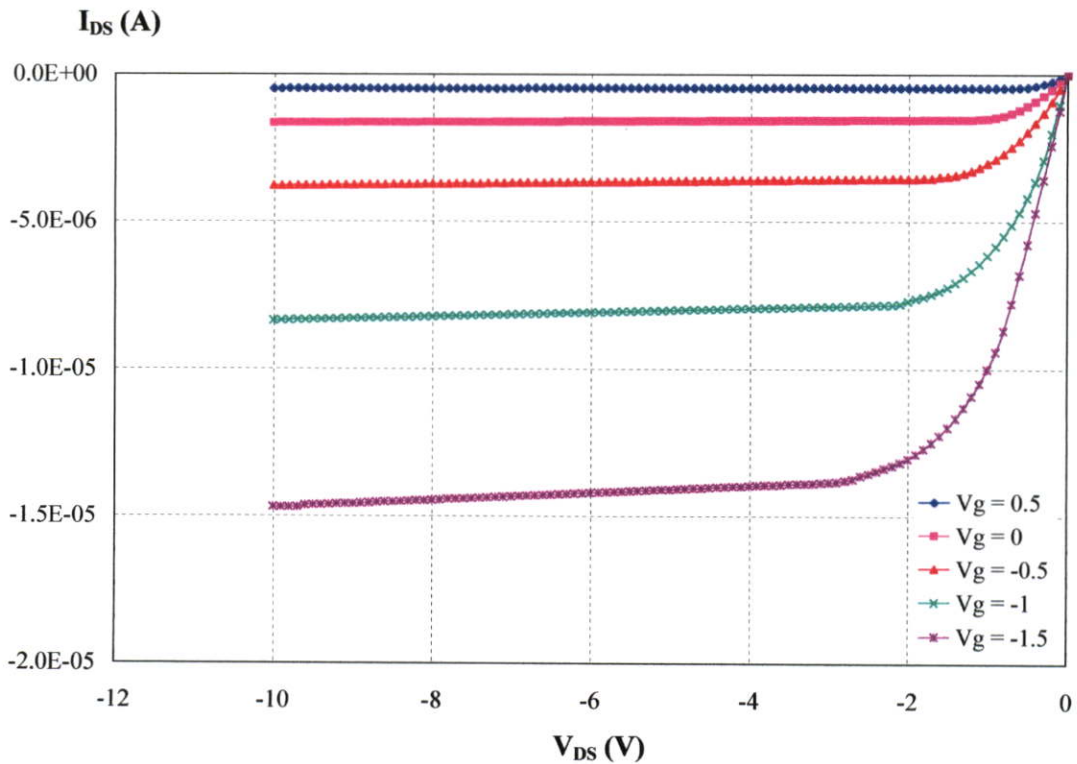


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET กับความหนาของชั้นความนำไฟฟ้า

นั่นคือ ถ้าค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าเป็นลบ MESFET จะทำงานแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ส่วนในกรณีที่ค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าเป็นบวก MESFET จะทำงานแบบดีพลีทชันโหมด ซึ่งค่าของแรงดันขีดเริ่มนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นความนำไฟฟ้า ในรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET กับความหนาของชั้นความนำไฟฟ้า พิจารณาที่ความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าน้อยที่สุด (76 nm) พบว่า MESFET จะทำงานในแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ส่วนในกรณีความหนาค่าอื่น ๆ MESFET จะทำงานในแบบดีพลีทชันโหมด และพบว่าเมื่อความหนาของชั้นความนำไฟฟ้ามากขึ้นค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET ก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย ในรูปที่ 4.18 แสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ที่มีการทำงานในแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (ชั้นความนำไฟฟ้าหนา 76 nm) และรูปที่ 4.19 แสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ที่มีการทำงานในแบบดีพลีทชันโหมด (ชั้นความนำไฟฟ้าหนา 123 nm)



รูปที่ 4.18 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ที่มีการทำงานในแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (ชั้นความนำไฟฟ้าหนา 76 nm)



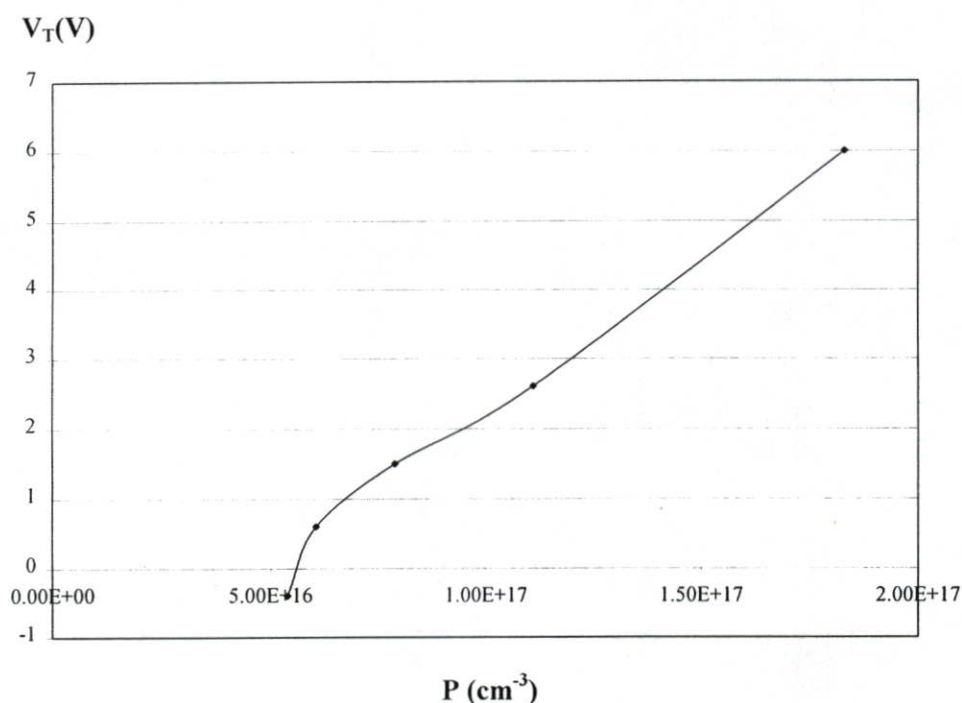
รูปที่ 4.19 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ที่มีการทำงานในแบบดีพลีชันโหมด (ชั้นความนำไฟฟ้าหนา 123 nm)

4.3.2.2 ผลของความหนาแน่นของโฮลที่มีผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาถึงผลของความหนาแน่นของโฮลที่มีผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET โดยจะกำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้านี้คือ 500 °C 3 นาที, 600 °C 5 นาที, 600 °C 10 นาที, 600 °C 15 นาที และ 700 °C 15 นาที ซึ่งจากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 จะได้ค่าความหนาแน่นของโฮลค่าต่าง ๆ กันคือ $5.39 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $6.05 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $7.88 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $1.11 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และ $1.83 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการสร้าง MESFET ด้วยกระบวนการสร้างดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.4.2 โดยกำหนดขนาดความกว้าง และความยาวของช่องทางเดินกระแสคงที่ ซึ่งมีขนาด 200 μm และ 20 μm ตามลำดับ เมื่อทำการสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงทำการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มเหมือนในหัวข้อที่ 4.3.2.1

จากผลการทดลองพบว่า MESFET ที่สร้างขึ้นโดยมีค่าความหนาแน่นของโฮลค่าต่าง ๆ กันคือ $5.39 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $6.05 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $7.88 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $1.11 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และ $1.83 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET จะมีค่า -0.4 V, 0.6 V, 1.5 V, 2.6 V และ 6.0 V ตาม

ลำดับ ซึ่งมีลักษณะการทำงานทั้งในแบบเอ็นฮานซ์โหมดที่โหมด และแบบดีพลีที่โหมด หลังจากนั้น นำผลที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET กับความหนาแน่นของโฮลค่าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.20 พบว่า เมื่อค่าความหนาแน่นของโฮลมีค่ามากขึ้นค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องมาจากค่าความหนาแน่นของโฮลที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้แรงดันพินชออฟมีค่ามากขึ้นด้วยดังสมการที่ (2.21) ดังนั้นเมื่อค่าแรงดันพินชออฟมีค่ามากขึ้นก็จะทำให้แรงดันขีดเริ่มมีค่ามากขึ้นด้วย

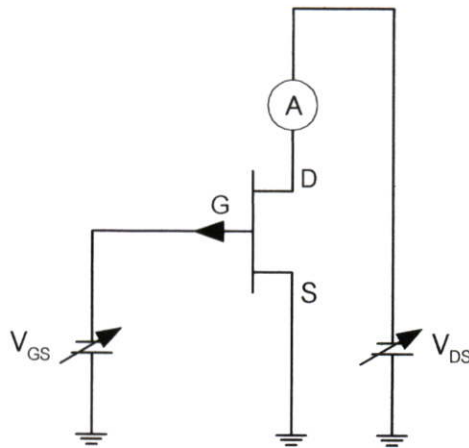


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET กับความหนาแน่นของโฮล

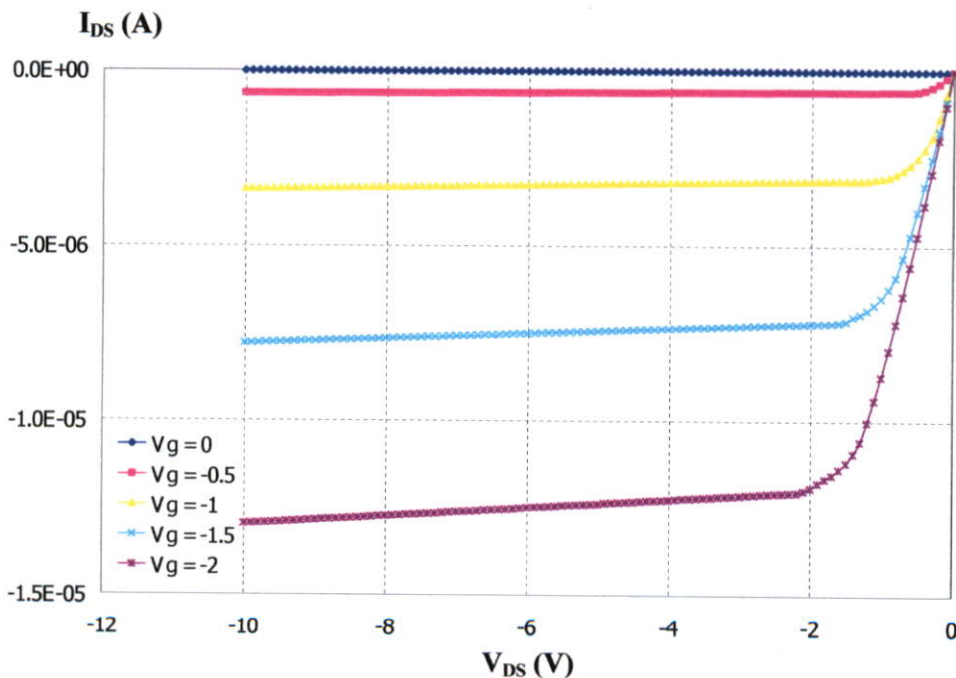
4.3.3 ผลการศึกษาเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET เมื่อเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าแตกต่างกันออกไป โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้านั้นจะใช้อุณหภูมิ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพียงอุณหภูมิเดียวแต่จะแปรค่าเวลาที่ใช้เป็น 3, 5, 10 และ 15 นาที โดยจะกำหนดขนาดความกว้าง และความยาวของช่องทางเดินกระแสเป็น $200\text{ }\mu\text{m}$ และ $20\text{ }\mu\text{m}$ ตามลำดับ เมื่อสร้าง MESFET ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ข้างต้นเสร็จแล้วทำการทดสอบคุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ด้วยเครื่อง Hewlett Packard 4156B

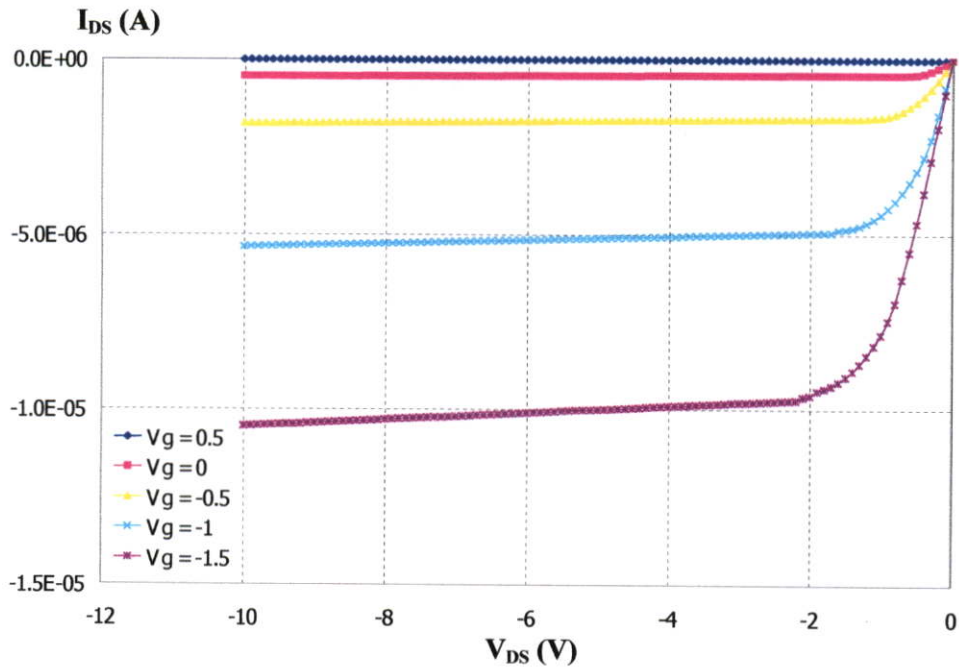
ในการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของ MESFET จะทำการต่อวงจรดังแสดงในรูปที่ 4.21 การทดสอบจะแปรค่าแรงดัน V_{GS} และทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน V_{DS} ที่จ่ายแก่ขั้วเดรนและซอสของ MESFET ในขณะที่เปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟเลี้ยงแต่ละครั้งเครื่องจะทำการบันทึกค่ากระแสที่ไหลผ่านและเก็บข้อมูลค่าลำดับกระแสและแรงดันไว้ เพื่อแสดงผลด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.22-รูปที่ 4.25



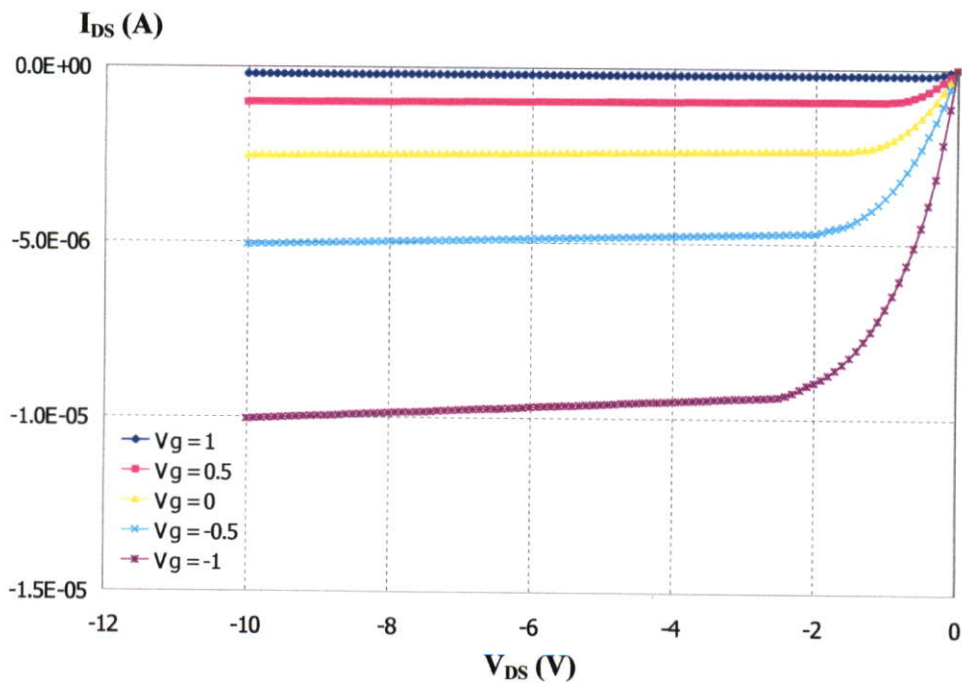
รูปที่ 4.21 วงจรที่ใช้ในการวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET



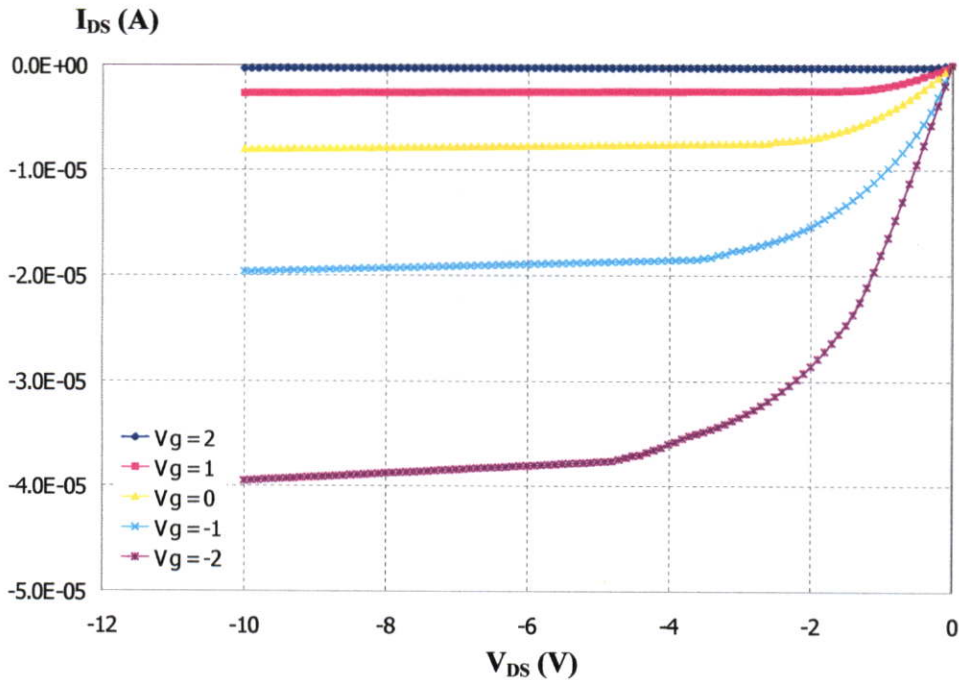
รูปที่ 4.22 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ที่สร้างจากชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่ 600°C และใช้เวลา 3 นาที



รูปที่ 4.23 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ที่สร้างจากชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้คุณหมุมิในการสังเคราะห์ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ และใช้เวลา 5 นาที



รูปที่ 4.24 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ที่สร้างจากชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้คุณหมุมิในการสังเคราะห์ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ และใช้เวลา 10 นาที



รูปที่ 4.25 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ที่สร้างจากชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 °C และใช้เวลา 15 นาที

จากการตรวจสอบคุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET ที่สร้างจากชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้เงื่อนไขในการสังเคราะห์ค่าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.22-รูปที่ 4.25 พบว่า เมื่อพิจารณาที่แรงดัน V_{DS} ที่ -10 V และที่แรงดัน $V_{GS} = -1$ V ค่ากระแส I_{DS} ของ MESFET ที่ได้มีค่าแตกต่างกัน โดยเมื่อพิจารณา MESFET ที่สร้างจากชั้นความนำไฟฟ้าที่ใช้เงื่อนไขในการสังเคราะห์คือ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 °C เท่ากัน แต่เวลาที่ใช้แตกต่างกันคือ 3, 5, 10 และ 15 นาที ค่ากระแส I_{DS} ที่ได้จะมีค่า -3.4 μA , -5.3 μA , -10 μA และ -20 μA ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่ากระแส I_{DS} จะมีค่ามากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้ามากขึ้นในขณะที่อุณหภูมิเท่ากับค่าความหนาแน่นของโฮล และค่าความหนาแน่นของชั้นความนำไฟฟ้าจะมีค่ามากขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าเป็น 600 °C และใช้เวลา 3, 5, 10 และ 15 นาที ค่าความหนาแน่นของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้มีค่าเป็น 92 nm, 116 nm, 130 nm และ 135 nm ตามลำดับ และจากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นของโฮลที่ได้มีค่า $5.96 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $6.05 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $7.88 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และ $1.11 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ จึงทำให้ค่ากระแส I_{DS} ของ MESFET มีค่ามากขึ้น

และเมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.22-รูปที่ 4.25 จะเห็นว่า MESFET จะทำงานในแบบดีฟลิตชันโหมดทั้งหมดเนื่องมาจากความหนาของชั้นความนำไฟฟ้ามีค่ามาก

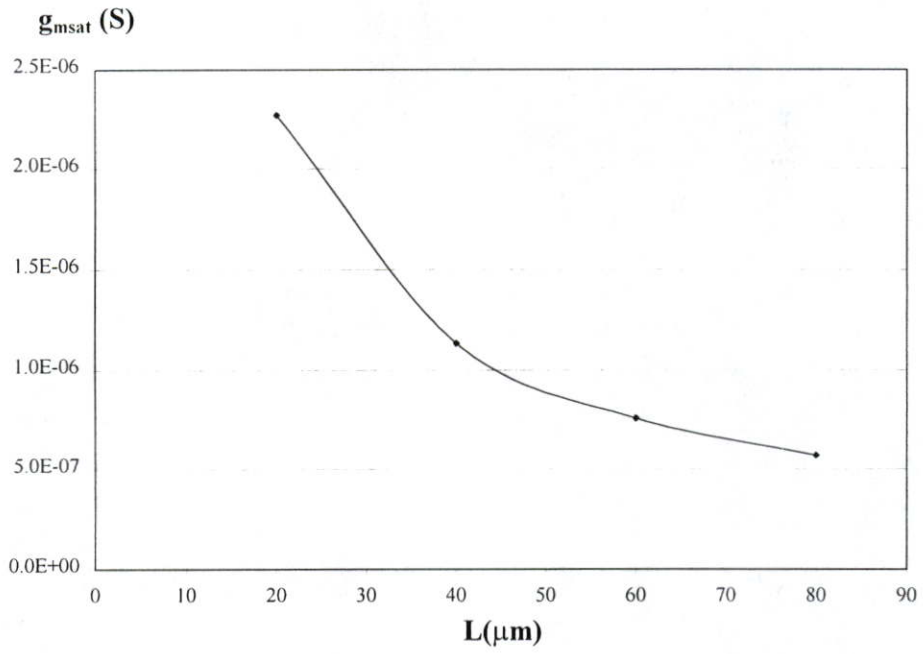
4.3.4 ผลการศึกษาขนาดความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษานขนาดความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET โดยทำการออกแบบ MESFET ที่มีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสแตกต่างกัน 2 ชุด โดยชุดแรกให้มีความกว้างของช่องทางเดินกระแสคงที่ 200 μm ส่วนความยาวของช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ 20, 40, 60 และ 80 μm ส่วนในชุดที่สองมีความยาวของช่องทางเดินกระแสคงที่ 20 μm ส่วนความกว้างของช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ 200, 400, 600 และ 800 μm และในการทดลองนี้เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้านั้นจะใช้อุณหภูมิ 500 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 นาที เพียงเงื่อนไขเดียว ซึ่งจะได้ความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าเป็น 76 nm เมื่อสร้าง MESFET ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้เสร็จแล้วทำการทดสอบคุณสมบัติกระแสและแรงดันของ MESFET ด้วยเครื่อง Hewlett Packard 4156B ในการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของ MESFET จะทำการต่อวงจรดังแสดงในรูปที่ 4.21

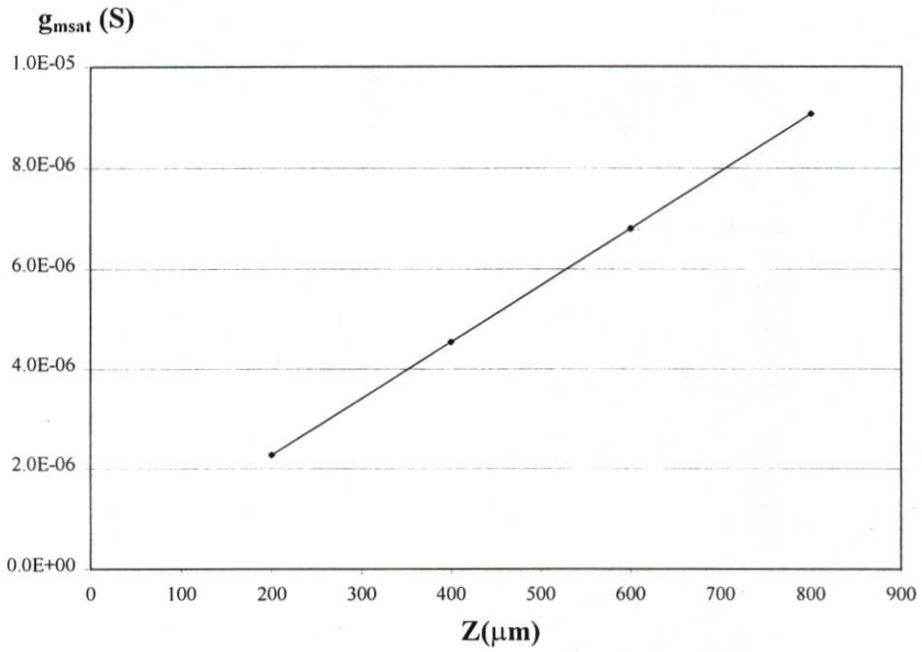
จากกราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของ MESFET สามารถนำมาหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (g_m) ได้ ซึ่งค่า g_m ที่คำนวณจากกราฟเป็นค่า g_m ในช่วงกระแสอิ่มตัว ดังนั้นค่า g_m ที่ได้จึงเป็นค่า g_{msat} นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง g_{msat} กับการเปลี่ยนแปลงขนาดของความยาวและความกว้างของช่องทางเดินกระแส ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.26 เมื่อทำการทดสอบที่แรงดัน $V_{GS} = -1 \text{ V}$ และ $V_{DS} = -10 \text{ V}$ พบว่าเมื่อความยาวของช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนแปลงจาก 20 μm ถึง 80 μm โดยที่ความกว้างของช่องทางเดินกระแสมีค่าคงที่ที่ 200 μm ค่า g_{msat} จะเปลี่ยนแปลงลดลงในลักษณะไฮเพอร์โบลาร์กับการเพิ่มขึ้นของความยาวของช่องทางเดินกระแส ซึ่งค่า g_{msat} นี้จะมีค่าอยู่ในช่วง 2.27-0.56 μS

ส่วนความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.27 เมื่อทำการทดสอบที่แรงดัน $V_{GS} = -1 \text{ V}$ และ $V_{DS} = -10 \text{ V}$ พบว่าในขณะที่ความกว้างของช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนแปลงจาก 200 μm ถึง 800 μm โดยที่ความยาวของช่องทางเดินกระแสมีค่าคงที่ที่ 20 μm ค่า g_{msat} จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามความกว้างของช่องทางเดินกระแสในแบบเชิงเส้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2.27-9.08 μS โดยทั่วไปแล้วค่า g_{msat} จะมีหน่วยเป็น S/mm ดังนั้นค่า g_{msat}/Z ที่ได้จากการทดลองนี้จะมีค่าเป็น 11.35 $\mu\text{S}/\text{mm}$



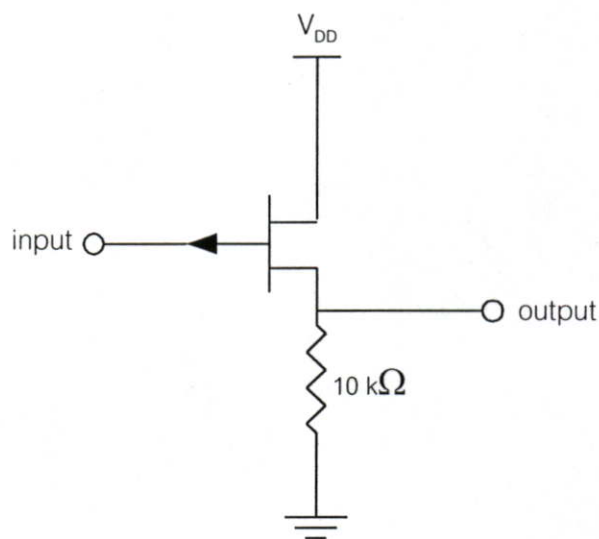
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง g_{msat} กับความยาวของช่องทางเดินกระแส



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง g_{msat} กับความกว้างของช่องทางเดินกระแส

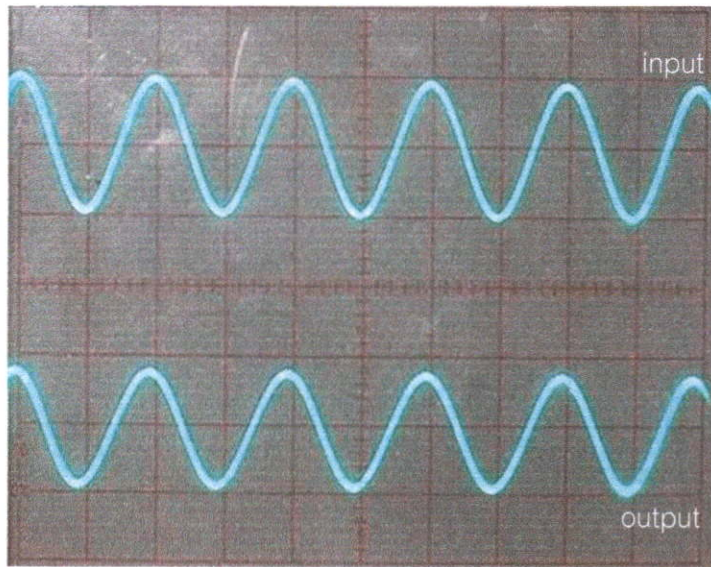
4.3.5 ผลการศึกษาการตอบสนองความถี่ของ MESFET

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาถึงการตอบสนองความถี่ของ MESFET ว่าสามารถที่จะตอบสนองความถี่สูงสุดได้เท่าไร ซึ่งในการทดลองนี้เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่ชั้นความนำไฟฟ้านั้นจะใช้ อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 นาที เพียงเงื่อนไขเดียว โดยมีขนาดความกว้างของช่องทางเดินกระแส เป็น $200\text{ }\mu\text{m}$ และขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแสเป็น 20, 40 และ $60\text{ }\mu\text{m}$ เมื่อสร้าง MESFET ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้เสร็จแล้วทำการทดสอบการตอบสนองความถี่ของ MESFET โดยใช้ วงจรดังรูปที่ 4.28

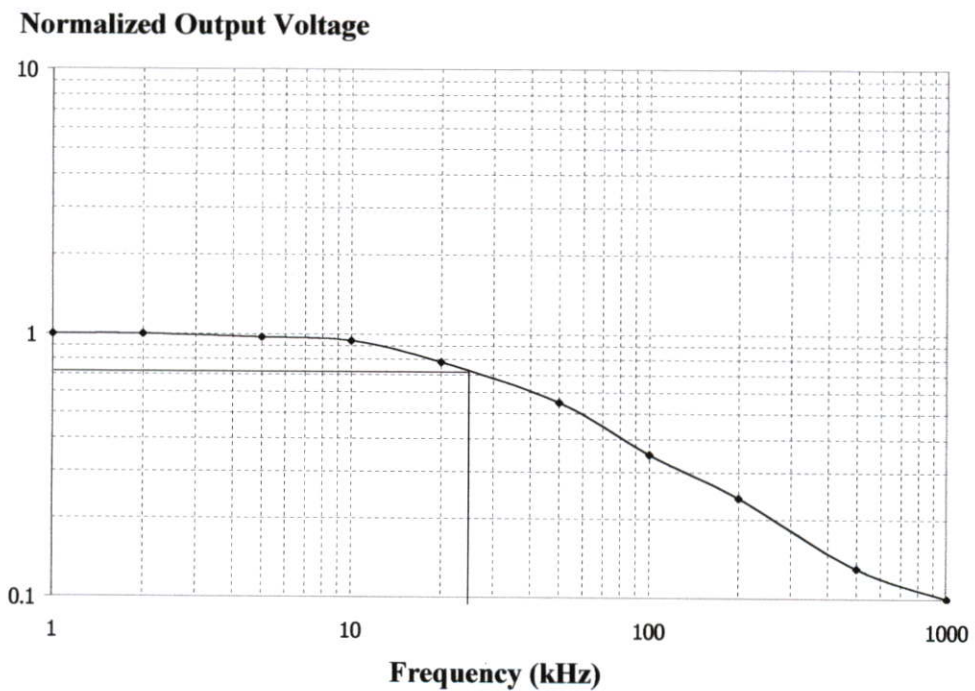


รูปที่ 4.28 วงจรที่ใช้วัดการตอบสนองความถี่ของ MESFET

ในการทดสอบจะทำการให้แรงดัน V_{DD} เท่ากับ -10 V แล้วทำการป้อนสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ขนาด 100 mV แรงดันออฟเซ็ทขนาด -1 V จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงความถี่จาก 1 kHz ถึง 1 MHz ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.29 จากนั้นนำค่าแรงดันเอาต์พุตมาทำการนอมัลไลซ์ แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันเอาต์พุตที่ทำการนอมัลไลซ์ กับความถี่ ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.30-รูปที่ 4.32

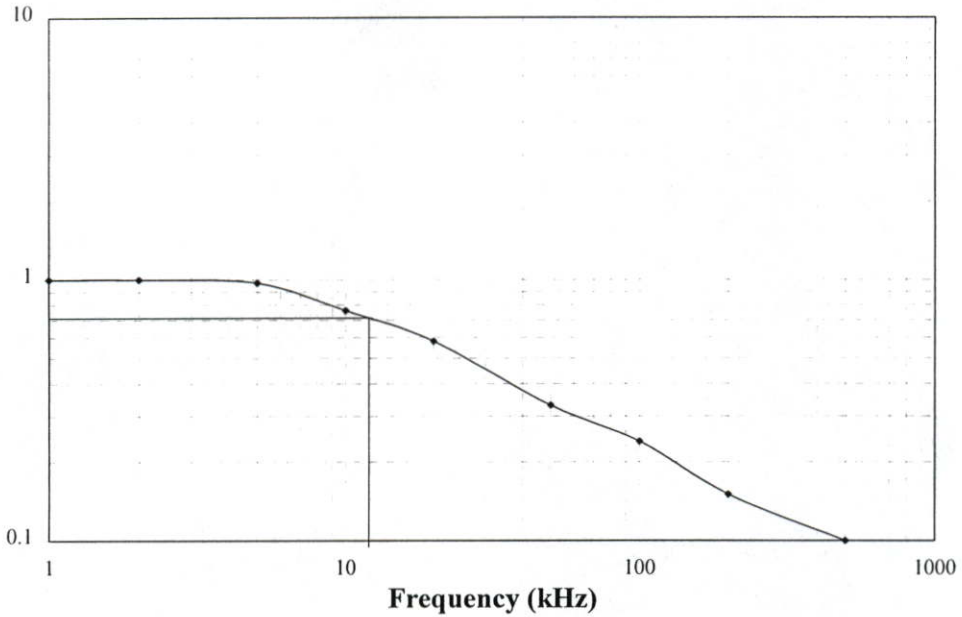


รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบการตอบสนองของความถี่



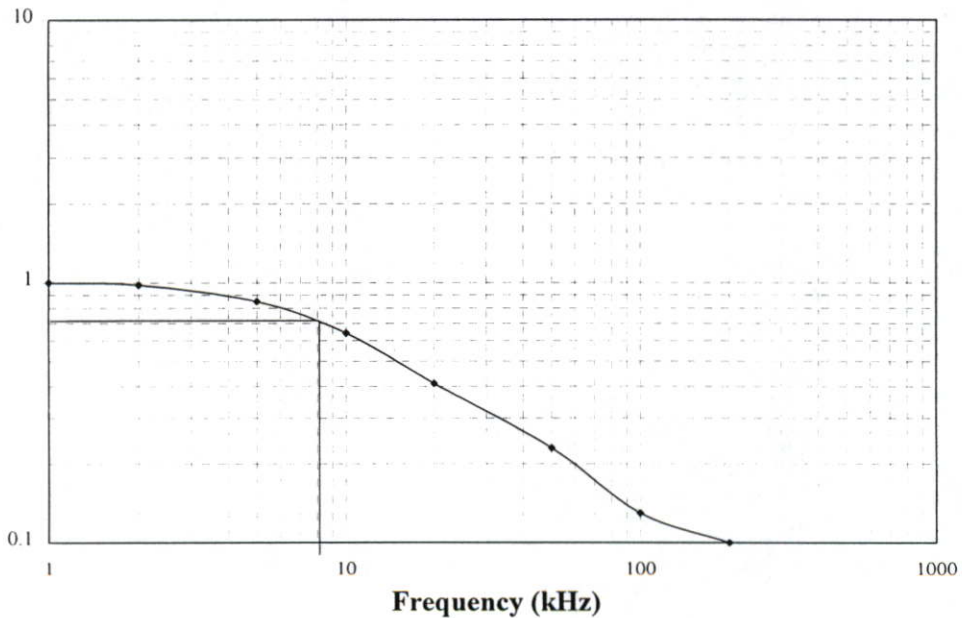
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตที่ทำการนอมนัลไลซ์กับความถี่ของ MESFET ที่มีขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแส $20\ \mu\text{m}$ และความกว้างของช่องทางเดินกระแส $200\ \mu\text{m}$

Normalized Output Voltage



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตที่ทำการนอัมไลซ์กับความถี่ของ MESFET ที่มีขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแส $40 \mu\text{m}$ และความกว้างของช่องทางเดินกระแส $200 \mu\text{m}$

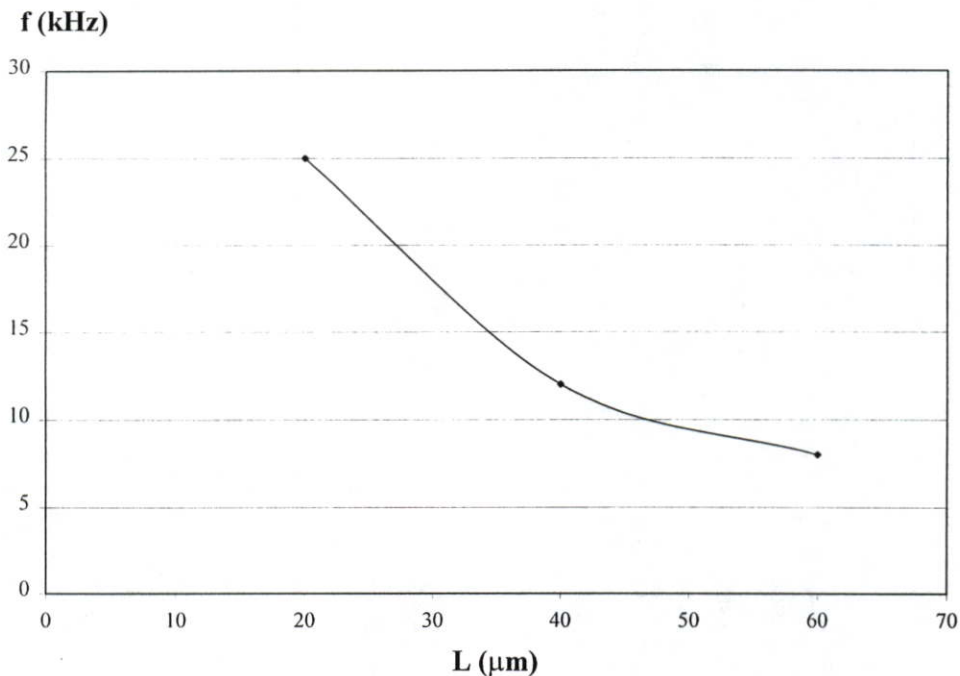
Normalized Output Voltage



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตที่ทำการนอัมไลซ์กับความถี่ของ MESFET ที่มีขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแส $60 \mu\text{m}$ และความกว้างของช่องทางเดินกระแส $200 \mu\text{m}$

จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.30-รูปที่ 4.32 สามารถหาค่าความถี่ที่ MESFET สามารถตอบสนองสูงสุดได้ โดยดูที่จุดที่แรงดันเอาต์พุตที่ทำการนอัมไลซ์มีค่าลดลงเหลือ 0.707 หรือที่ -3dB เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.30 ในกรณีที่ MESFET มีขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแส $20\ \mu\text{m}$ และความกว้างของช่องทางเดินกระแส $200\ \mu\text{m}$ จะอ่านค่าได้เท่ากับ $25\ \text{kHz}$ และจากความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.31 ในกรณีที่ MESFET มีขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแสเป็น $40\ \mu\text{m}$ จะสามารถตอบสนองความถี่ได้ $12\ \text{kHz}$ ส่วนความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.32 ซึ่ง MESFET มีขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแส $60\ \mu\text{m}$ จะสามารถตอบสนองความถี่ได้ $8\ \text{kHz}$

เมื่อนำผลการตอบสนองความถี่ของ MESFET ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของ MESFET กับความยาวของช่องทางเดินกระแส ดังแสดงในรูปที่ 4.33

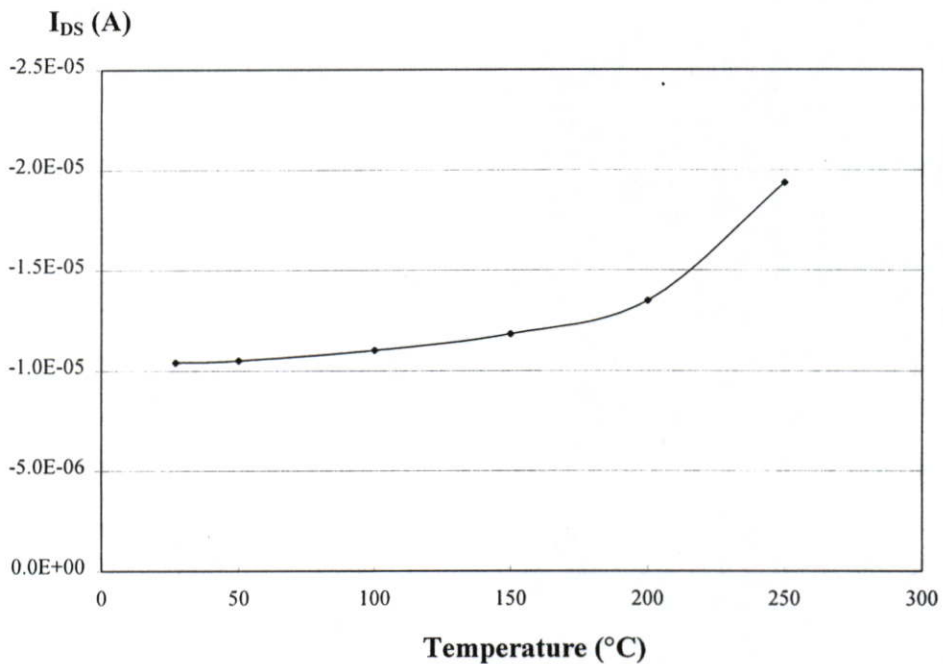


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของ MESFET กับความยาวของช่องทางเดินกระแส

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.33 พบว่าเมื่อขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแสเพิ่มมากขึ้น (ความกว้างของช่องทางเดินกระแสคงที่) การตอบสนองความถี่ของ MESFET จะมีค่าลดลงจาก $25\ \text{kHz}$ เหลือ $8\ \text{kHz}$

4.3.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET เมื่อทำงานในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ๆ โดยจะทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET ที่สร้างจากชั้นความนำไฟฟ้าหนา 76 nm ซึ่งมีขนาดของความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเป็น 200 μm และ 20 μm ตามลำดับ เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 27 $^{\circ}\text{C}$ (อุณหภูมิห้อง), 50 $^{\circ}\text{C}$, 100 $^{\circ}\text{C}$, 150 $^{\circ}\text{C}$, 200 $^{\circ}\text{C}$ และ 250 $^{\circ}\text{C}$ โดยในการทดสอบจะทำการให้แรงดัน V_{DD} เท่ากับ -10 V และแรงดัน V_{GS} เท่ากับ -2 V แล้วทำการวัดค่ากระแส I_{DS} ซึ่งอยู่ในช่วงอิมิตัว นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแส I_{DS} กับอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่ากระแส I_{DS} ของ MESFET

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.34 จะเห็นได้ว่า ค่ากระแส I_{DS} มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 200 $^{\circ}\text{C}$ แสดงว่า MESFET ที่สร้างจากฟิล์มเพชรสามารถทำงานได้ดีมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของอุณหภูมิน้อยมากจนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 200 $^{\circ}\text{C}$ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นไปอีกค่ากระแส I_{DS} จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นั่นแสดงให้เห็นว่า MESFET ที่สร้างจากฟิล์มเพชรมีเสถียรภาพของการทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 200 $^{\circ}\text{C}$

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาและพัฒนา MESFET ที่สร้างจากฟิล์มเพชร เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการประยุกต์ใช้งานสารกึ่งตัวนำเพชรเนื่องด้วยคุณสมบัติพื้นฐานที่โดดเด่นและได้เปรียบในเรื่องของการสังเคราะห์ที่ง่ายและถูก ในส่วนแรกของงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาถึงการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกโดยไม่มีการเติมอะตอมสารเจือชนิดอื่น ๆ ไปด้วยวิธี H-Termination โดยใช้อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 °C และใช้เวลาในการสังเคราะห์ 3, 5, 10 และ 15 นาที จากการทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้ พบว่า มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยความหนา และความหนาแน่นของโฮลของชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้นี้ จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ โดยความหนาที่ได้อยู่ในช่วง 76-151 nm ส่วนค่าความหนาแน่นของโฮลจะมีค่าอยู่ในช่วง $5.39 \times 10^{16} - 1.83 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ หลังจากนั้นนำชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้นี้ไปสร้างเป็น MESFET แล้วทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของ MESFET โดยในขั้นแรกจะทำการทดสอบคุณสมบัติของรอยสัมผัสขอตติที่บริเวณขั้วเกต-ซอส และขั้วเกต-เดรน พบว่ารอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับชั้นความนำไฟฟ้าชนิดพีนี้เป็นรอยสัมผัสแบบขอตติ จากนั้นทำการศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET พบว่า MESFET สามารถทำงานได้ใน 2 โหมดคือ แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด และ แบบดีพลีชันโหมด ซึ่งในกรณีที่ความหนาของชั้นความนำไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุด คือ 76 nm MESFET จะสามารถทำงานในแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมดได้ ส่วนในกรณีที่ความหนาของชั้นความนำไฟฟ้ามากกว่านี้ MESFET จะทำงานในแบบดีพลีชันโหมด โดยพบว่าที่ความหนาของชั้นความนำไฟฟ้ามากขึ้นจะทำให้แรงดันขีดเริ่มของ MESFET มากขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาผลของค่าความหนาแน่นของโฮลที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่ม พบว่า ที่ความหนาแน่นของโฮลมากขึ้นค่าแรงดันขีดเริ่มก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาถึงผลของเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแสและแรงดันของ MESFET พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เท่ากัน แต่เวลาที่ให้มีค่ามากขึ้น ค่ากระแส I_{DS} ของ MESFET จะมีค่ามากขึ้นด้วย และเมื่อนำ MESFET ที่ทำงานในแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมดมาทำการศึกษาถึงผลของขนาดความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET พบว่า ในกรณีที่ความกว้างของช่องทางเดินกระแสมีค่าคงที่แต่ความยาวของช่องทางเดินกระแสมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์จะมีค่าลดลงในลักษณะไฮเปอร์โบลาร์กับการเพิ่มขึ้นของความยาวของช่องทางเดินกระแส

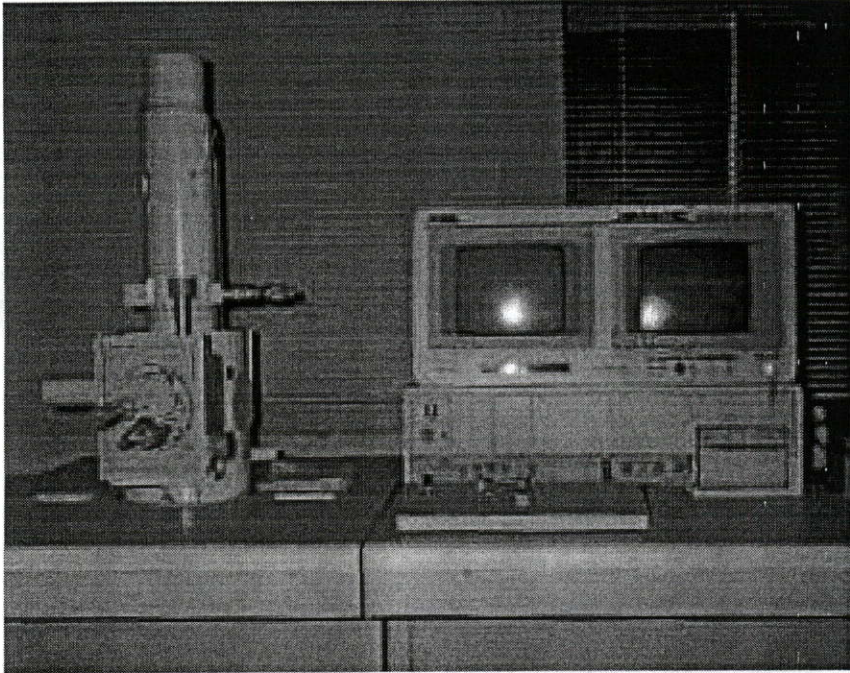
ส่วนในกรณีที่มีความยาวของช่องทางเดินกระแสมีค่าคงที่แต่ความกว้างของช่องทางเดินกระแสมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามความกว้างของช่องทางเดินกระแสในแบบเชิงเส้น และค่าทรานส์คอนดักแตนซ์สูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ $11.35 \mu\text{S}/\text{mm}$ จากนั้นทำการศึกษาการตอบสนองความถี่ของ MESFET ที่ทำงานในแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด พบว่า ค่าความถี่ที่ MESFET สามารถตอบสนองได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 25 kHz และจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดของความยาวช่องทางเดินกระแสมากขึ้น เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET ที่ทำงานในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ๆ พบว่า MESFET ที่สร้างจากฟิล์มเพชรนี้สามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง 200°C

จากการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะนำ MESFET ที่สร้างจากฟิล์มเพชรนี้ไปพัฒนาและประยุกต์ใช้งานในการสร้างเป็นวงจรรวมประเภทต่าง ๆ ต่อไป เช่น วงจรรวมทางด้านตรรก และวงจรรวมเชิงเส้น เป็นต้น

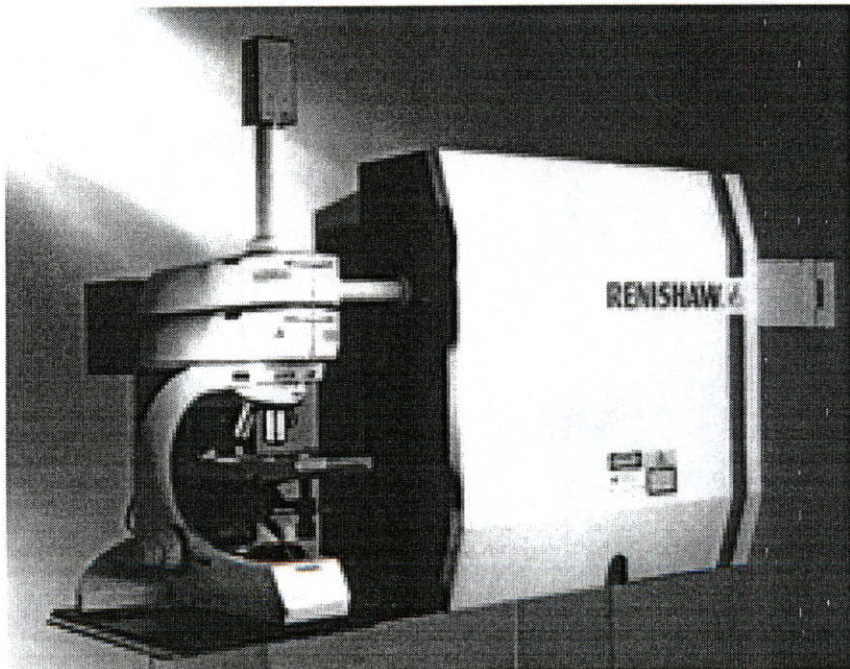
เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Singh. Semiconductor Devices : an Introduction. New York : McGraw-Hill. 1994.
- [2] M. Shur. Physic of Semiconductor Devices. New Jersey : Prentice-Hall. 1990.
- [3] Robert F.David. Diamond Films and Coatings. New Jersey : Noyes Publications. 1993.
- [4] Lawrence S. Pan, Don R.Kania. Diamond : Electronic Properties and Applications. Boston : Kluwer Academic Publishers. 1995.
- [5] M. Iida, H. Maekawa, H. Kimura, Y. Akiba, Y. Hirose, T. Kurosu and Y. Matsumae "Electrical Conduction Mechanism in Polycrystalline p-type Diamond Films." 2nd International Conference on the Application of Diamond Films and Related Material, 1993. pp. 367-370.
- [6] พรศักดิ์ อรรถวานิช. วัสดุศาสตร์. พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ.2536.
- [7] John R. Ferraro, Kazuo Nakamoto. Introductory Raman Spectroscopy. London : Academic Press.Inc. 1994.
- [8] K. Kano. Semiconductor Devices. New Jersey : Prentice-Hall. 1998.
- [9] นริศ จันทร์แดง. "การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเพชร." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2538.
- [10] D. W. Greve. Field Effect Devices and Applications. New Jersey : Prentice-Hall. 1998.
- [11] สมเกียรติ ศุภเดช. สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ. พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2540.
- [12] กอบศักดิ์ ศรีประภา. "การศึกษาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเฉพาะพื้นที่ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
- [13] พิระวุฒิ ชินวรรังสี, วิสุทธิ์ รุติรุ่งเรือง. "การสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกด้วยวิธี H-termination." วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 19, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2545.

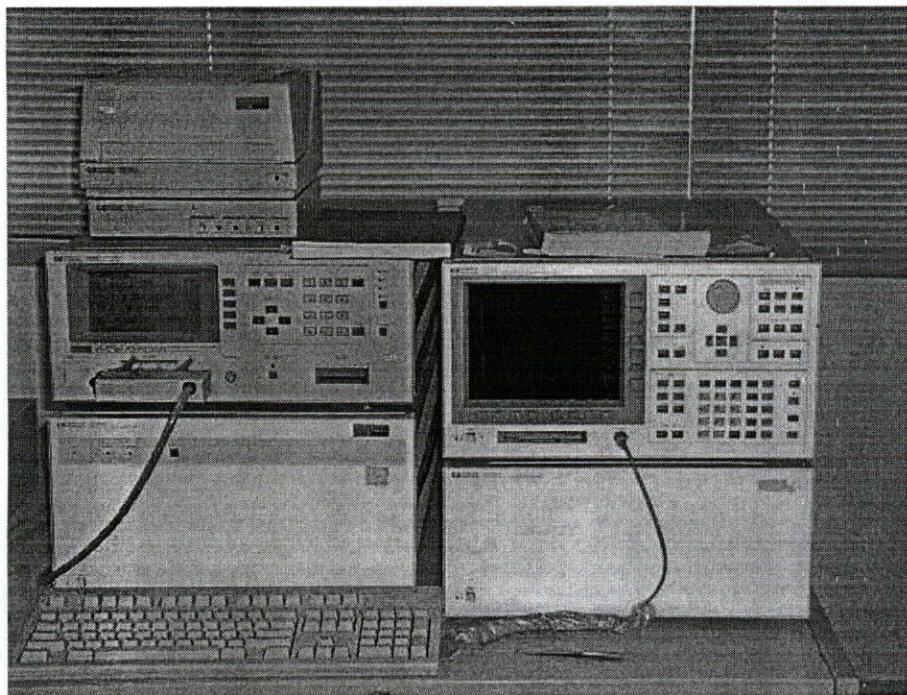
ภาคผนวก ก



รูปที่ ก-1 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของ JEOL รุ่น JCM-5410
ติดตั้งประจำอยู่ที่ บริษัท NS Electronic



รูปที่ ก-2 Raman spectroscope รุ่น System 2000 ของบริษัท Renishaw
ติดตั้งประจำอยู่ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ



รูปที่ ก-3 เครื่องมือวัด Hewlett Packard 4156 B
ติดตั้งประจำอยู่ที่ TMEC

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน

นายพีระวุฒิ ชินวรรังสี

วันเดือนปีเกิด

วันที่ 12 พฤศจิกายน พ.ศ. 2517

สถานที่เกิด

จังหวัดนครปฐม

วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี

วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์)

สถานที่สำเร็จการศึกษา

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีสำเร็จการศึกษา

ปีการศึกษา 2538