

อุปกรณ์ออลด์แบบฟิล์มเพชร
DIAMOND HALL DEVICES



โดย

นาย สมควร ชะนะศรีสวัสดิ์
นาย สมศักดิ์ ภคพงษ์พันธุ์

4

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **46199**
วัน, เดือน, ปี 2 1 ส.ค. 2546

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

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

5 142 201 500

อุปกรณ์ฮอลล์แบบฟิล์มเพชร
DIAMOND HALL DEVICES

โดย

นาย สมควร ชะนะศรีสวัสดิ์ 42515743

นาย สมศักดิ์ ภคพงษ์พันธุ์ 42515745

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล

ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

อุปกรณ์ฮอลล์แบบฟิล์มเพชร
DIAMOND HALL DEVICES

นาย สมควร ชะนะศรีสวัสดิ์ รหัส 42515743
นาย สมศักดิ์ ภคพงศ์พันธุ์ รหัส 42515745

โครงการนี้ได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



(ผศ. ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

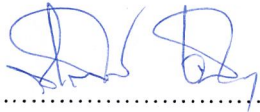
ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2544

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง อุปกรณ์ฮอตลด์แบบฟิล์มเพชร

ผู้จัดทำ

1. นาย สมควร ชะนะศรีสวัสดิ์ 42515743
2. นาย สมศักดิ์ ภคพงษ์พันธุ์ 42515745



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล)

อุปกรณ์ฮอลล์แบบฟิล์มเพชร

นาย สมควร ชะนะศรีสวัสดิ์

นาย สมศักดิ์ ภคพงษ์พันธุ์

ผศ.ดร.เดิมนงษ์ เพ็ชรกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ลงบนฐานรองที่เป็นแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น ตัวอุปกรณ์ฮอลล์ถูกสร้างจากฟิล์มบางเพชรด้วยวิธี Low-Pressure Hot-Filament CVD มีลักษณะเป็นรูปกากบาท ซึ่งถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือโบรอน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้งานเป็น Magnetic sensor การทดลองนี้ใช้การเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็กในช่วง 0 ถึง 0.5 เทสลา จากการทดลองพบว่า อุปกรณ์ฮอลล์ที่มีขนาด $\frac{L}{W}$ เท่ากับ 2.5 ที่ค่ากระแสไบอัสเท่ากับ 1.5 mA มีค่า sensitivity เท่ากับ 28.30 mV/mA-T ซึ่งเป็นค่าสูงพอควร นอกจากนั้น ผลตอบสนองแรงดันฮอลล์ที่มีต่อสนามแม่เหล็ก มีผลของสัญญาณรบกวนจากสัญญาณต่างๆมาก ทั้งที่เกิดจากตัวอุปกรณ์เองและเกิดจากเครื่องมือวัด

DIAMOND HALL DEVICES

Mr.Somkhuan Shanasesawat

Mr. Somsak Pakapongpun

Assist.Dr. Toermpong Phetchakul

Academic Year 2001

ABSTRACT

These thesis demonstrates Diamond Hall Devices that are built on silicon n-type substate. Diamond Hall Devices can be made from diamond thin film by the Low-Pressure Hot-Filament Chemical Vapor Deposition (LPCVD) that show cross pattern. A purpose of used to the magnetic sensor. These experiment shows the variation of magnetics field from 0 to 0.5 Tesla. In according to these experiment, can be abserved that Diamond Hall Devies which have 2.5 in L/W ratio and 1.5 mA bias current, these devices have 28.30 mV/mA-T sensitivity. Not only that the responsitivity of Hall voltage can be influenced by equipment and other environment factor.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ข
สารบัญ	ค-ง
สารบัญรูป	จ-ช
สารบัญตาราง	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น	3
2.1 หลักการพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect Measurements)	3
2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของเพชร	8
2.2.1 โครงสร้างของเพชร	8
2.2.2 คุณสมบัติต่าง ๆ ของเพชร	9
- คุณสมบัติทางไฟฟ้า	9
- คุณสมบัติทางแสง	11
2.3 คุณสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์เซ็นเซอร์	12
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แบบฟิล์มเพชร	15
3.1 การออกแบบ	15
3.2 กระบวนการสร้าง	17
3.2.1 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชร	17
- เทคนิคที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร	17
- การเตรียมฐานรองซิลิกอน	17
- เงื่อนไขที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร	18
- ขั้นตอนการสร้างฟิล์มเพชร	19
3.2.2 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แบบฟิล์มเพชร	20
3.3 กระบวนการที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แบบฟิล์มเพชร	30
3.3.1 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรด้วยกระบวนการ CVD	
(Chemical Vapor Deposition : CVD)	30
3.3.2 กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์ด้วยวิธี Sputtering Deposition	32

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
3.3.3 กระบวนการสกัดชั้นออกไซด์ด้วยวิธี Reactive-Ion Etching Technique : RIE	35
3.3.4 กระบวนการสกัดชั้นฟิล์มเพชรด้วยวิธี Microwave-Plasma Etching Technique	36
บทที่ 4 การวัดและการทดลอง	37
4.1 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางเพชร	37
4.2 ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันฮอลล์	39
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	46
5.1 การหาค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือโบรอน	46
5.2 การหาค่าสภาพคล่องของโฮล	47
5.3 ค่าออฟเซ็ท (offset)	48
5.4 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)	48
5.5 ความไว (Sensitivity)	49
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	50
ภาคผนวก	52
ภาคผนวก ก. สัญลักษณ์	52
ภาคผนวก ข. กระบวนการโฟโวลติโทกราฟี และกระบวนการ evaporation	53
กิตติกรรมประกาศ	56
บรรณานุกรม	57

สารบัญรูป

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 1.1 รูปร่างของอุปกรณ์ฮอลล์ที่ได้ทำการออกแบบ	1
รูปที่ 2.1 แสดงการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี	3
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร	8
รูปที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของ Ideal sensor	13
รูปที่ 2.4 ฮีสเตอร์รีซิส	14
รูปที่ 3.1 ภาพด้านบนของ Hall device	15
รูปที่ 3.2 Mask Diamond	16
รูปที่ 3.3 Mask Au	16
รูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพวิธีการ CVD แบบความร้อน	18
รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของฟิล์มเพชรที่ได้จากกระบวนการ CVD	19
รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงกระบวนการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์	20
รูปที่ 3.7 แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานเมื่อชิ้นงานผ่านการสร้างชั้นฟิล์มเพชรแล้ว	21
รูปที่ 3.8 แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านการสร้างชั้นออกไซด์แล้ว	21
รูปที่ 3.9 (ก) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานขณะทำการฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์ที่ 1	22
(ข) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานหลังทำการฉายแสงและ develop แล้ว	22
(ค) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาสก์ที่ 1	22
รูปที่ 3.10 (ก) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านการกัด oxide ครั้งที่ 1 แล้ว	23
(ข) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านการลอกชั้น Az แล้ว	23
(ค) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านการกัด oxide ครั้งที่ 1 แล้ว	23
(ง) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านการลอกชั้น Az แล้ว	24
รูปที่ 3.11 (ก) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการ Diamond etchingแล้ว	24
(ข) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อทำการลอกชั้น Az ออกแล้ว	24
(ค) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการ Diamond etchingแล้ว	25
(ง) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงาน เมื่อทำการลอกชั้น Az ออกแล้ว	25

สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 3.12 แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อขึ้นงานผ่านกระบวนการสร้างชั้น oxide แล้ว	25
รูปที่ 3.13 (ก) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานขณะทำการฉายแสงผ่านโพโตมาส์คที่ 2	26
(ข) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานหลังทำการฉายแสง uv และ develop แล้ว	26
(ค) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงานหลังทำการฉายแสง uv และ develop แล้ว	27
รูปที่ 3.14 (ก) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อขึ้นงานผ่านกระบวนการผ่านกระบวนการ Oxide etching ครั้งที่ 2	27
(ข) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อขึ้นงานผ่านกระบวนการผ่านกระบวนการ Oxide etching ครั้งที่ 2	27
รูปที่ 3.15 แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานเมื่อขึ้นงานผ่านการเคลือบชั้นทองคำแล้ว	28
รูปที่ 3.16 (ก) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อขึ้นงานผ่านกระบวนการ Au etching แล้ว	28
(ข) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงาน เมื่อขึ้นงานผ่านกระบวนการ Au etching แล้ว	28
รูปที่ 3.17 (ก) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานที่ได้ เมื่อเสร็จทุกขั้นตอน	29
(ข) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงานที่ได้ เมื่อเสร็จทุกขั้นตอน	29
รูปที่ 3.18 แสดงลักษณะของ Diamond Hall Devices	30
รูปที่ 3.19 แสดงประเภทของระบบ Chemical Vapor Deposition	31
รูปที่ 3.20 แสดงระบบ Hot Filament CVD ที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร	32
รูปที่ 3.21 แสดงโครงสร้างทางฟิสิกส์ของระบบ Sputtering	33
รูปที่ 3.22 แสดงลักษณะของ Dark Space ที่สภาวะต่าง ๆ	33
รูปที่ 3.23 แสดงลักษณะของเครื่อง Sputter Deposition	34
รูปที่ 3.24 แสดงระบบ Reactive-Ion Etching	35
รูปที่ 3.25 แสดงระบบ Microwave Plasma Etching	36
รูปที่ 4.1 แสดงการวัดค่า Resistivity ของอุปกรณ์ฮอลล์	37
รูปที่ 4.2 แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันฮอลล์	39

สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กกับแรงดันฮอลล์ ของอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีค่า $L = 3 \text{ mm}$	42
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันฮอลล์ ของอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีค่า $L = 3 \text{ mm}$	43
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กกับแรงดันฮอลล์ ของอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีค่า $L = 5 \text{ mm}$	44
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันฮอลล์ ของอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีค่า $L = 5 \text{ mm}$	45
รูปที่ 6.1 แสดงลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ฮอลล์ในกล่องที่ทำการ shield ป้องกันสัญญาณรบกวน	51
รูปที่ ข1 แสดงขั้นตอนกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้ทั่วไป	53
รูปที่ ข2 แสดงระบบสูญญากาศที่ใช้ในกระบวนการ Evaporation	54
รูปที่ ข3 แสดงลักษณะของ Filament และ Boat ที่ใช้ในกระบวนการ Evaporation	55

สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ เพชร ซิลิกอน และแกเลียมอาร์เซไนด์	10
ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบค่า Optical Properties	11
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าแรงดันฮอลล์ของอุปกรณ์ฮอลล์ที่ $L = 3$ mm โดยการจ่ายกระแส และสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ	40
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าแรงดันฮอลล์ของอุปกรณ์ฮอลล์ที่ $L = 3$ mm โดยการจ่ายกระแส และสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ	41
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าออฟเซ็ทของอุปกรณ์ฮอลล์แต่ละตัวที่ค่ากระแสค่าต่าง ๆ	48
ตารางที่ 5.2 แสดงค่า sensitivity ของอุปกรณ์ฮอลล์แต่ละตัว	49
ตารางที่ 6.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวอุปกรณ์ฮอลล์ที่ออกแบบไว้	50

บทที่ 1

บทนำ

อุปกรณ์แมกเนติกเซ็นเซอร์ (Magnetic Sensor) จะทำหน้าที่เป็นตัวแปลงสนามแม่เหล็กให้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้า อุปกรณ์แมกเนติกเซ็นเซอร์ที่สร้างส่วนใหญ่จะอาศัยปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์กัลวานอแมกเนติก” (Galvanomagnetic Effects) อันเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสนามแม่เหล็กหรือเรียกว่า “ปรากฏการณ์ฮอลล์” (Hall effect) หรืออาจกล่าวได้ว่า สนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับกระแสทำให้เกิดแรงกระทำต่อประจุพาหะเรียกว่า “แรงลอเรนซ์” (Lorentz Force) ผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีทิศตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก และทิศทางของกระแส

โดยจะทำการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ (Hall devices) ลงบนฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งตัวอุปกรณ์ฮอลล์นั้นจะถูกสร้างจากฟิล์มบางเพชรด้วยวิธี Low-Pressure Hot-Filament CVD อุปกรณ์ฮอลล์ ที่สร้างขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นรูปกากบาทที่มีค่าความยาวไม่เท่ากัน ทั้งนี้เพื่อที่จะดูผลของความยาวที่มีต่อแรงดันฮอลล์

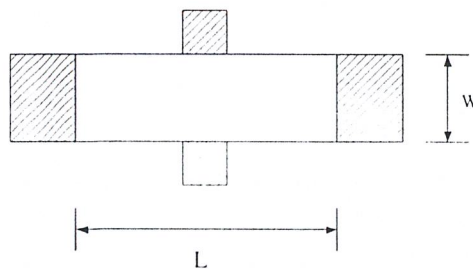
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาการประยุกต์ฟิล์มบางเพชร (Diamond Thin Film) มาทำเป็นอุปกรณ์ฮอลล์ และศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันฮอลล์ (Hall voltage)

1.2 ขอบเขตของโครงการ

1.2.1 ออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์

ทำการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์ให้มีลักษณะรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งค่าความยาว (L) ของอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าแตกต่างกัน เพื่อทำการทดสอบว่าโครงสร้างของอุปกรณ์มีผลต่อแรงดันฮอลล์ที่วัดได้อย่างไร



รูปที่ 1.1 รูปร่างของอุปกรณ์ฮอลล์ที่ได้ทำการออกแบบ

1.2.2 ทำการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

ในการสร้างฟิล์มบางเพชรนั้นจะใช้วิธี Low-Pressure Hot-Filament CVD การสกัดชั้นฟิล์มบางเพชรที่สร้างขึ้นมาจะใช้วิธีไมโครเวฟพลาสมา และการสกัดชั้นออกไซด์ที่สร้างขึ้นด้วยวิธี RF Spattering นั้นจะใช้วิธี RIE (Reactive Ion Etching)

1.2.3 ทำการวัดผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันฮอลล์

โดยทำการป้อนกระแสและสนามแม่เหล็กให้กับอุปกรณ์ฮอลล์ที่ค่าต่าง ๆ กัน แล้วจากนั้นทำการวัดค่าแรงดันฮอลล์

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. เข้าใจปรากฏการณ์ฮอลล์
2. เข้าใจถึงกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ
3. สามารถอธิบายผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันฮอลล์
4. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานได้

บทที่ 2

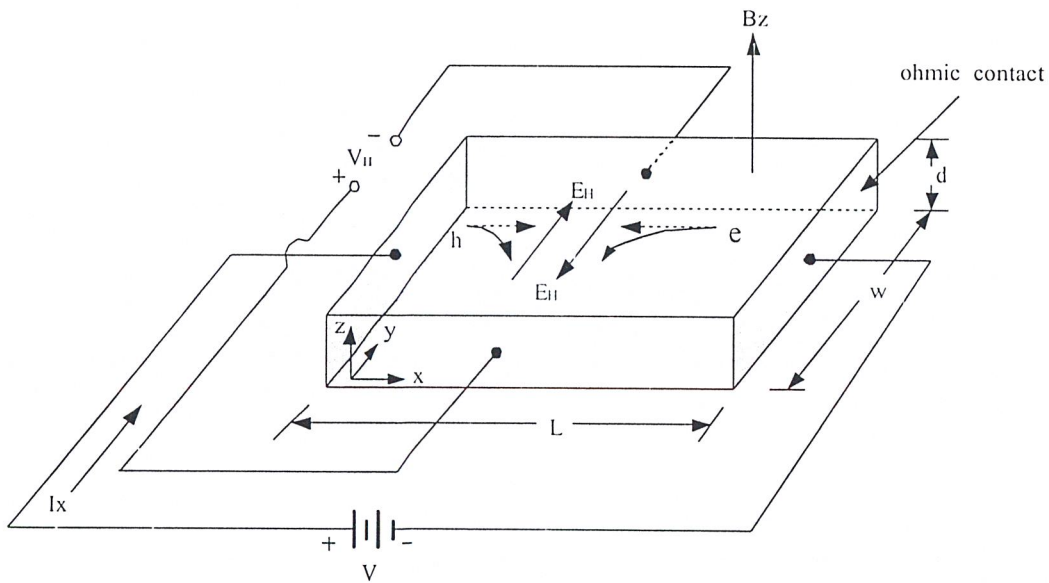
ทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 หลักการพื้นฐานของ Hall Effect Measurements

ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำ และให้สนามแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส จะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในทิศที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแสและทิศทางของสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า “ปรากฏการณ์ของฮอลล์” (Hall Effect)

การทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์เป็นการยืนยันแนวคิดที่เป็นไปได้เกี่ยวกับชนิดของพาหะประจุ (Charge carrier) ทั้งสองชนิด คือ อิเล็กตรอนและโฮล ที่มีอยู่จริงในสารกึ่งตัวนำ ผลจากการทดลองเรื่องนี้ทำให้สามารถวัดและคำนวณค่า parameter ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งยังสามารถไปคำนวณหา parameter อื่น ๆ ได้อีกด้วย

พิจารณาแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีดังรูปที่ 2.1 นำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันที่ค่าความต่างศักย์ V โวลต์ ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (current density) J_x ไหลในทิศ $+x$ และให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นฟลักซ์ (flux density) B_z ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศ $+z$



รูปที่ 2.1 แสดงการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากและมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า \mathcal{E}_x จะเกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว drift (drift velocity) V_{dx} ในทิศทาง $+x$ และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_z ตัดผ่านในทิศตั้งฉากกับกระแส จะเกิดมีแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) กระทำต่อโฮลด้วย ตามสมการ

$$\vec{F}_L = e\vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

โดยที่ \vec{F}_L คือ แรงลอเรนซ์มีขนาดเป็น

$$|\vec{F}_L| = F_L = eV_{dx}B_z \quad (2)$$

และมีทิศในแกน $-y$ ดังนั้น จะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาแกน $-y$ และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้าม (ด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ) จึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลทางด้านหน้ามีจำนวนมาก ๆ ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนของโฮลน้อยกว่าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน \mathcal{E}_y ในทิศ $+y$ สนามไฟฟ้านี้จะต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ ในภาวะสมดุล และ steady state ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศ $+x$ ได้แสดงว่าแรงลอเรนซ์ (F_L) และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน ($e\mathcal{E}_y$) มีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$e\mathcal{E}_y = F_L = e \cdot V_{dx} \cdot B_z \quad (3)$$

จาก
$$\mathcal{E}_y = V_{dx} \cdot B_z \quad (4)$$

$$J_x = p \cdot e \cdot V_{dx}$$

หรือ

$$V_{dx} = \frac{J_x}{pe}$$

แทน V_{dx} ลงในสมการ (4) จะได้

$$\varepsilon_y = \frac{J_x B_z}{pe}$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\varepsilon_y}{J_x B_z} = \frac{1}{pe} = R_H \quad (5)$$

โดย

R_H คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

จากรูปที่ 2.1 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ w จะได้

$$V_H = \varepsilon_y \cdot w \quad (6)$$

โดย

V_H คือ แรงดันฮอลล์ (Hall voltage)

โดยการแทนค่า $J_x = \frac{I}{wd}$ และ $\varepsilon_y = \frac{V_H}{w}$ ลงในสมการ (5) จะได้

$$R_H = \frac{V_H}{w \cdot I \cdot B_z} \cdot wd$$

หรือ

$$R_H = \frac{dV_H}{IB_z} = \frac{1}{pe} \quad (7)$$

$$\therefore V_H = \frac{I \cdot B_z}{p \cdot e \cdot d} \quad (8)$$

ความหนาแน่นของโฮล คือ

$$\rho = \frac{1}{eR_H} = \frac{I \cdot B_z}{e \cdot d \cdot V_H} \quad (9)$$

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

$$\rho = R \cdot \frac{wd}{L} = \frac{V}{I} \cdot \frac{w \cdot d}{L} \quad (10)$$

โดย R คือ ความต้านทานไฟฟ้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ

จาก
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{ep\mu_p}$$

ดังนั้นจะได้

$$\mu_p = \frac{1}{e \cdot \rho \cdot \rho} = \frac{1}{\rho} \cdot R_H \quad (11)$$

จากสมการที่ (9) , (10) และ (11) จะเห็นว่าการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้เราสามารถหาค่า parameter ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะได้เป็นอย่างดี

ในทำนองเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แรงดันฮอลล์ (V_H) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือมีค่าเป็นลบ และจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ R_H เป็น

$$R_{He} = -\frac{1}{ne} \quad (12)$$

ดังนั้นโดยการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นสารชนิดเอ็นหรือชนิดพีได้

ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิ ในแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นผลของการรวมเวกเตอร์ของ \mathcal{E}_y และ \mathcal{E}_x ซึ่งไม่ได้มีทิศทางตรงไปตามแกน $+x$ แต่ทำมุม θ กับแกน $+x$ ดังรูป ซึ่งมุม θ ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “มุมฮอลล์” (Hall angle) โดย

$$\tan \theta = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$$

โดยการแทนค่า $\varepsilon_y = \frac{J_x B_z}{pe}$ และ $J_x = \sigma \varepsilon_x$ จะได้

$$\tan \theta = \frac{J_x B_z}{pe} \cdot \frac{\sigma}{J_x} = \frac{\sigma B_z}{pe}$$

หรือ

$$\tan \theta = \frac{\sigma B_z}{pe} = pe \mu_p \frac{B_z}{pe} = \mu_p B_z$$

$$\frac{\sigma}{pe} = \mu_p$$

$$\mu_p = \sigma \cdot R_H$$

ซึ่งเท่ากับสมการ (11) นั่นเอง

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันระหว่างพาหะกับพาหะหรือพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ (Lattice Scattering) จะได้ว่า

$$R_{H \text{ ชนกัน}} = \frac{3\pi}{8} \cdot R_H = 1.18 R_H \quad (13)$$

และ

$$\tan \theta = \frac{3\pi}{8} \cdot \mu_p B_z = \mu_H B_z$$

หรือ

$$\mu_H = \frac{\tan \theta}{B_z} = \frac{3\pi}{8} \mu_p$$

$$\mu_{H \text{ ชนกัน}} = \mu_H = 1.18 \mu_p \quad (14)$$

โดย μ_H คือ Hall mobility

ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (Ionized Impurity Scattering) จะได้

$$R_{H \text{ ชนกัน}} = \frac{315\pi}{512} \cdot R_H = 1.93R_H \quad (15)$$

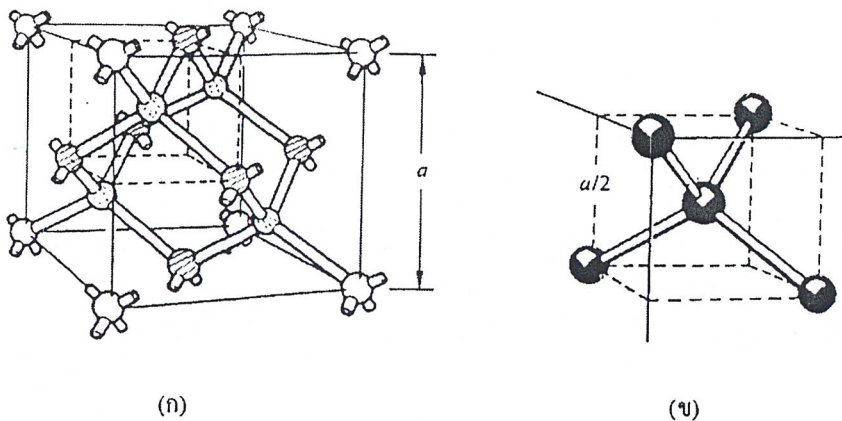
และ

$$\mu_{H \text{ ชนกัน}} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93\mu_p \quad (16)$$

2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของเพชร

2.2.1 โครงสร้างของเพชร

โครงสร้างของผลึกเพชรซึ่งประกอบไปด้วยอะตอมคาร์บอนที่เรียงตัวแบบ face center cubic (fcc) แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร

ผลึกเพชรประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 8 อะตอม ที่มุมทั้ง 8 กับอะตอมคาร์บอน 6 อะตอม ที่บริเวณตรงกลางในด้านแต่ละด้านของหน่วยเซลล์ (unit cell) และอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอม ในตำแหน่ง $\frac{1}{4}$ ตามแนวทแยงมุมของหน่วยเซลล์ อะตอมของคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวกับอะตอมคาร์บอนรอบ ๆ ข้างอีก 4 อะตอมแบบ Tetrahedral ด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3

ระนาบ {111} ซึ่งเป็นพื้นผิวในแต่ละด้านของรูปลูกบาศก์เพชร หรือทิศทางของผลึกซึ่งประกอบไปด้วยอะตอมคาร์บอนที่อยู่ใกล้เคียงกันและมีการเชื่อมกันในตำแหน่งสูงต่ำสลับกันจากระนาบ {111} การเรียงลำดับชั้นของอะตอมจะเป็นแบบ ABC ABC ABC... ซึ่งทำให้เพชรมีค่าคงที่แลตทิซเท่ากับ 3.56 Å

2.2.2 คุณสมบัติต่างๆ ของเพชร

เพชรมีคุณสมบัติหลายประการที่น่าสนใจ อาทิเช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสง ซึ่งคุณสมบัติแต่ละชนิดนั้นมีรายละเอียดดังนี้

1. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร

หากพิจารณาคุณสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในเพชรธรรมชาติ มีค่าอยู่ในช่วง 10^{12} cm³/C ที่อุณหภูมิ 140 K ถึง 10^{15} cm³/C ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าความคล่องตัวของโฮลในเพชรธรรมชาติสูงถึง 1800 cm²/V.s ในขณะที่ของอิล็กตรอนมีค่าสูงถึง 2000 cm²/V.s ส่วนฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นมาที่อุณหภูมิ 500 °C พบว่ามีค่าความคล่องตัวของโฮลเพียง 850 cm²/V.s

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีใช้งานในปัจจุบันมีเพียง Germanium และ Indium Antimonide เท่านั้นที่มีค่าความคล่องตัวของโฮลสูง ส่วนในวัสดุอื่น ๆ จะมีค่าความเร็วอิ่มตัวของโฮล (Saturate hole velocity) น้อย และมีค่า dielectric strength ต่ำ ที่สนามไฟฟ้า 10^4 V/cm ค่าความเร็วครีฟท์ทั้งของอิล็กตรอนและโฮลในเพชรธรรมชาติเริ่มมีการอิ่มตัว กรณีของโฮลมีค่าความเร็วครีฟท์สูงสุดเท่ากับ 10^7 cm/s สำหรับอิล็กตรอนจะมีความเร็วครีฟท์สูงสุดเท่ากับ 2×10^7 cm/s ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (electric resistivity) ของเพชรในธรรมชาติมีค่าสูงถึง 10^{16} Ω.cm ในตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชรที่ดีกว่าสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร ซิลิกอน และแกเลียมอาร์เซไนด์

Property	Diamond	Silicon	GaAs
Bandgab (meV)	5450	1100	1430
Electron mobility *	2000	1500	8500
Hole mobility*	1800	600	400
Breakdown V/cm x 10 ⁶	10	5	6
Resistivity (ohm-cm)	10 ¹⁶	10 ³	10 ⁹
High Field electron	2.7	1	1
Velocity (cm/sec x 10 ⁷)			
Dielectric constant	5.7	11	12.5
Thermal conductivity**	20.00	1.50	0.46

*cm²/volt-sec

**W/cm^oc

จากตารางที่ 2.1 จะพบว่าในกรณีของเพชรนั้น ค่า electron mobility มีค่าเท่ากับ 2000 cm²/V.s ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า hole mobility ซึ่งเท่ากับ 1800 cm²/V.s ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีของ ซิลิกอน และแกเลียมอาร์เซไนด์นั้นค่า electron mobility และค่า hole mobility นั้นมีค่าแตกต่างกันมาก กล่าวคือในกรณีของซิลิกอนมีค่าเท่ากับ 1500 cm²/V.s และ 600 cm²/V.s ตามลำดับ และในกรณีของแกเลียมอาร์เซไนด์มีค่า เท่ากับ 8500 cm²/V.s และ 400 cm²/V.s ตามลำดับ

ส่วนค่า Thermal conductivity กรณีของเพชรมีค่าสูงกว่าซิลิกอน และ แกเลียมอาร์เซไนด์ คือกรณีของเพชรมีค่าเท่ากับ 20 W/cm^oc กรณีของซิลิกอนและแกเลียมอาร์เซไนด์มีค่าเท่ากับ 1.5 W/cm^oc และ 0.46 W/cm^oc ตามลำดับ

นอกจากนี้แล้วจะพบว่าเพชรมีช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามสูงถึง 5.45 eV ซึ่งเมื่อเทียบกับกรณีของซิลิกอนและแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีค่าเท่ากับ 1.1 eV และ 4.3 eV จะพบว่า กรณีของเพชรนั้นมีค่าสูงกว่ามาก ดังนั้นจึงเหมาะที่จะทำงานที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากสามารถควบคุมประจุพาหะ โดยไม่มีผลของอุณหภูมิมารบกวน

โบรอนเป็นสารเจือที่ถูกลำมาใช้ในการเปลี่ยนสภาพฟิล์มเพชรให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอาจอยู่ในรูปของก๊าซหรือของเหลว ทั้งนี้เนื่องจากโบรอน ซึ่งเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ 3 ของตาราง periodic ทำหน้าที่เป็นอะตอมสารเจือผู้รับ อีกทั้งยังมีขนาดอะตอมที่เหมาะสม สามารถจับตัวกับอะตอมคาร์บอนโดยไม่ทำให้แลททิซเสียรูป ค่าพลังงานกระตุ้นของโบรอนขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนที่เจือลงไป ถ้าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือมีค่ามาก พลังงาน

กระตุ้นจะมีค่าน้อยลงเกิด shallow levels มากขึ้น โดยทั่วไปแล้วถ้าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือมีค่าประมาณ 100 ppm หรือ 10^{19} cm^{-3} พลังงานกระตุ้นจะมีค่าประมาณ 370 meV และสำหรับฟิล์มเพชรชนิด Highly doped (อะตอมสารเจือมากกว่า 10^{19} - 10^{20} cm^{-3}) จะมีค่าต่ำคือประมาณ 2 meV

กรณีของอะตอมสารเจือผู้ให้ ในกรณีของไนโตรเจนพบว่าไม่สามารถใช้เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ได้ เนื่องจากค่าพลังงานกระตุ้นของไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่าค่าพลังงานในแถบความนำ คือมีค่าเพียง 1.57 eV เท่านั้น ดังนั้นจึงไม่เกิด Shallow Levels ขึ้น อีกทั้งอะตอมของไนโตรเจนยังทำให้โครงสร้างของเพชรเสียรูปไป ในกรณีของฟอสฟอรัส ซึ่งมีขนาดอะตอมใหญ่กว่าคาร์บอน เมื่อสร้างพันธะกับอะตอมคาร์บอนแล้ว มีผลทำให้โครงสร้างของเพชรเสียรูปไป ดังนั้นลิเทียมจึงเป็นสารที่ได้รับความสนใจและศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้งาน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าฟิล์มเพชรที่ทำการได้ปรีเชื่อมด้วยวิธี Ion-Implantation แสดงคุณสมบัติเป็นฟิล์มเพชรชนิดอื่น แต่ในการได้รูปแบบ In-situ และ In-diffusion จะไม่เกิดผลตามต้องการเนื่องจากเกิดการชดเชยด้วยความหนาแน่นสูงของสถานะผู้รับที่กระจายอยู่ในแถบพลังงานต้องห้าม ตลอดจนลิเทียมในเพชรมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งทำให้การได้ปรีมีความไม่แน่นอน

2. คุณสมบัติทางแสง

การพิจารณาคุณสมบัติทางแสงของเพชรส่วนใหญ่แล้วจะพิจารณาค่าดัชนีหักเห แสงและการดูดกลืนแสง ณ อุณหภูมิและความยาวคลื่นที่กำหนด ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหแสงของเพชรและวัสดุอื่น ๆ ที่อุณหภูมิห้องในย่าน near IR ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบค่า Optical Properties

Material	Refractive Index
Germanium	4.00 - 4.10
Silicon	3.42 - 3.50
GaAs	3.34 - 2.12
Diamond	2.41 - 2.44 (656 - 486nm)
Sapphire	1.58 - 1.83
Fused Silica	1.40 - 1.48
Crystal quartz	1.52 - 1.69
Water	1.33 - 1.34
Calcium fluoride	1.31 - 1.51
Lithium fluoride	1.11 - 1.45

จากตารางที่ 2.2 สามารถแบ่งชนิดของเพชรตามคุณสมบัติทางแสงได้เป็น type I และ type II สำหรับ type I นั้นมีจำนวนไนโตรเจนเจือปนอยู่เป็นจำนวนมาก ถ้าไนโตรเจนอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (เพชรในธรรมชาติ) จัดเป็น type Ia ถ้าไนโตรเจนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (เพชรที่ได้จากการสังเคราะห์) จัดเป็น type Ib ในกรณี type II จะไม่มีไนโตรเจนเจือปนอยู่ ใน type IIa มีความเป็นฉนวนสูงมากมีจำนวนไนโตรเจนเจือปนอยู่น้อยมาก จนทำให้การตรวจสอบด้วยการวัดการดูดกลืน IR ทำได้ยากและไม่มีโบรอนเจือปนอยู่ในขณะที่ type IIb นั้นมีจำนวนโบรอนมากกว่าไนโตรเจน

2.3 คุณสมบัติทั่ว ๆ ไปของอุปกรณ์เซ็นเซอร์

การนำอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไปใช้งานโดยทั่ว ๆ ไปนั้น มีเงื่อนไขในการใช้งานอย่างปกติ (Ambient Condition Allowed) เช่นใช้ที่อุณหภูมิ , ความชื้น , แรงดันเท่าไร เพื่อให้เราสามารถนำเซ็นเซอร์ไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยในเซ็นเซอร์ทั่ว ๆ ไปค่าเงื่อนไขการใช้งานอย่างปกติมีความหมายดังนี้

1. ย่านวัด (Range) เป็นการจำกัดค่าอินพุตและเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ในการใช้งาน เช่น เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดความดันตัวหนึ่งใช้กับความดันอินพุตอยู่ในช่วง 0 ถึง 7 บาร์ โดยให้กระแสดันเอาต์พุตอยู่ในช่วง 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ เป็นต้น

2. ความผิดพลาด (Error) เนื่องจากขั้นตอนดำเนินการและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด จะไม่สมบูรณ์แบบในทางปฏิบัติดังนั้นจะเกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างผลที่ได้จากการวัดและค่าจริงของปริมาณที่ถูกวัด ความแตกต่างนี้เรียกว่า “ความผิดพลาด” ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถหาค่าผิดพลาดในการวัดอย่างแน่นอนได้ ดังนั้นผลที่ได้จากการวัดจึงมีความไม่แน่นอน (Uncertainty) รวมอยู่ด้วยเสมอ

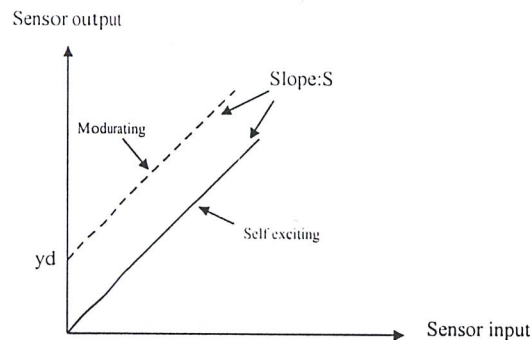
3. ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) ในการวัดค่า ความแม่นยำและความเที่ยงตรง ถือว่าเป็นลักษณะจำเพาะของกระบวนการวัด ความแม่นยำ หมายถึง ค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริงมากเพียงใด ในขณะที่ความเที่ยงตรง จะมีสองความหมาย ความหมายแรก หมายถึง สามารถวัดได้ละเอียด (Sharp definition) อุปกรณ์วัดที่มีความละเอียดสูง หมายถึง มันมีสเกลที่แบ่งย่อยละเอียดมากทำให้เราสามารถอ่านค่าได้ละเอียด ในอีกความหมายหนึ่งของคำว่าเที่ยงตรงก็คือ ค่าที่วัดได้เข้าใกล้กันเพียงใด ในความหมายหลังนี้จะหมายถึง ความคงเส้นคงวา (Consistency) หรือความสามารถซ้ำค่าเดิม (Repeatibility) ของผลการวัด อุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง หมายถึง ค่าที่ได้จากการวัดจะมีการกระจายน้อยกว่าอุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงต่ำ

4. ความไว (Sensitivity) หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตหรือการตอบสนองของอุปกรณ์วัดต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุตหรือค่าที่ถูกวัด เช่น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิตัวหนึ่งซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมีความไวเป็น $0.5 \Omega/^{\circ}\text{C}$ เป็นต้น

ในกรณีของอุปกรณ์ฮอลล์ ค่าความไวที่มีการไบอัสด้วยกระแสสามารถหาค่าได้จากสมการ

$$S = \frac{V_H}{IB} = \frac{R_H G}{t} = \frac{G \cdot r_n}{qnt}$$

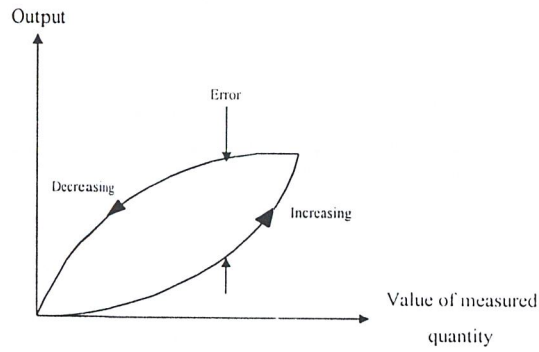
5. ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) บ่อยครั้งที่เราถือว่าความแม่นยำ (Accuracy) ก็คือความเป็นเชิงเส้น ความเป็นเชิงเส้นจะแสดงค่าที่วัดได้ว่าการวางตัวอย่างโรบนสเกลที่เป็นเชิงเส้นและเป็นสัดส่วน สเกลอาจจะเป็นเชิงเส้นอย่างมากแต่มีความเอียง (bias) มีความชัน (Slope) หรือออฟเซ็ท (offset) จากค่าที่ถูกกำหนด



รูปที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของ Ideal sensor

6. ความมีเสถียรภาพ (Stability) ความมีเสถียรภาพของอุปกรณ์วัด หมายถึง ความสามารถในการให้สัญญาณเอาต์พุตเดิม เมื่อใช้วัดสัญญาณอินพุตที่คงที่แม้เวลาจะเปลี่ยนแปลงไป คำว่า การลื่นไหล (Drift) มักจะถูกนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าของเอาต์พุตอันเนื่องมาจากเหตุการณ์ดังกล่าว การลื่นไหลอาจจะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เต็มย่านวัดก็ได้ คำว่า การลื่นไหลเป็นศูนย์ (Zero drift) จะถูกนำมาใช้สำหรับ การเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏขึ้นที่เอาต์พุต เมื่ออินพุตมีค่าเป็นศูนย์

7. ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) การที่อุปกรณ์วัดให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิม กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงอาจมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ผลที่เกิดจากเหตุการณ์นี้เรียกว่า ฮิสเทอรีซิส ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นนี้ถือว่าเป็นความผิดพลาด



รูปที่ 2.4 ฮิสเตอร์รีซิส

8. การแยกชัด (Resolution or Discrimination) บอกถึง คุณภาพซึ่งแสดงถึงลักษณะจำเพาะของความสามารถของอุปกรณ์วัดในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเล็กๆ ของปริมาณที่ถูกวัด

9. ออฟเซ็ท (Off set) เป็นค่าเอาท์พุทของเซ็นเซอร์ ที่ไม่ต้องการที่อุณหภูมิห้องหรือที่สัญญาณอินพุทเป็นศูนย์ ในกรณีของอุปกรณ์ฮอลล์ ค่าออฟเซ็ทจะหมายถึง ค่าแรงดันฮอลล์ในขณะที่สนามแม่เหล็กเท่ากับศูนย์

โดยเงื่อนไขในการใช้งานหรือคุณลักษณะของเซ็นเซอร์ที่ต้องการนั้นมีรายละเอียดดังนี้

คุณลักษณะ	ค่าในทางอุดมคติ
Response, Δy	มีความเป็นเชิงเส้น แน่นอน และไม่มีสัญญาณรบกวน
Baseline, y_0	เท่ากับศูนย์
Response time, T	เท่ากับศูนย์สำหรับผลตอบสนองชั่วขณะ
Frequency band-width	เท่ากับอนันต์สำหรับผลตอบสนองชั่วขณะ
Time to reach 90 % of final value, t_{90}	เท่ากับศูนย์สำหรับผลตอบสนองชั่วขณะ
Working range, $(y_{\max} - y_{\min})$	เท่ากับอนันต์
Sensitivity, S	มีค่าสูงและคงที่ตลอดย่านการทำงาน
Resolution	เท่ากับอนันต์

บทที่ 3

การออกแบบและกระบวนการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แบบฟิล์มเพชร

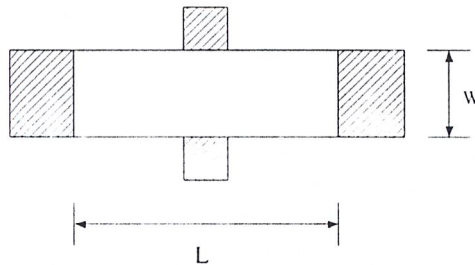
3.1 การออกแบบ

หลักสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์ก็เช่นเดียวกับอุปกรณ์เซ็นเซอร์ชนิดอื่น ๆ คือ ต้องการอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีค่า Sensitivity สูง ๆ นั่นก็คือต้องออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์ให้มีค่าแรงดันฮอลล์สูงๆ จากสมการที่ (8)

$$\therefore V_H = \frac{I \cdot B_z}{p \cdot e \cdot d}$$

ทำให้เราทราบว่า การออกแบบที่มีค่าแรงดันฮอลล์สูง ๆ ทำได้ดังนี้

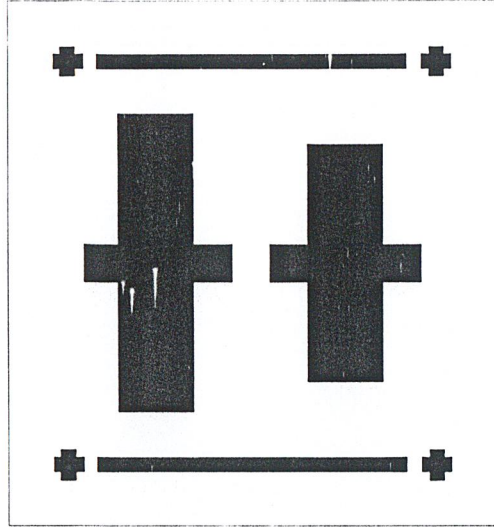
1. ทำให้ค่า p ต่ำ ๆ โดยที่ p คือ ความหนาแน่นของประจุพาหะ โดยทั่วไปจะวัดได้ประมาณ 10^{15} cm^{-3}
2. ทำให้ค่า d มีค่าน้อย ๆ โดยที่ d คือ ความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์



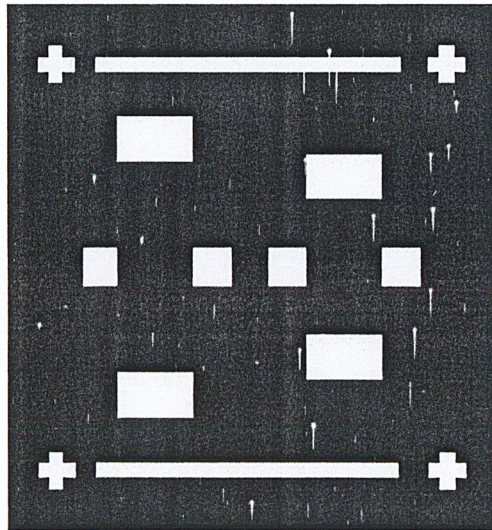
รูปที่ 3.1 ภาพด้านบนของ Hall device

โดยทำการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์ให้มีค่า $w = 2 \text{ mm}$ และค่า L เท่ากับ 3 และ 5 mm เพื่อทดสอบว่า ค่า L มีผลต่อแรงดันฮอลล์ที่ได้อย่างไรและหลังจากนั้น นำรูปร่าง และ parameters ต่าง ๆ ไปสร้างโฟโต้มาสก์ (Photo Mask) โดยการออกแบบใน โปรแกรม L- edit และมีจำนวนโฟโต้มาสก์ (Photo Mask) ทั้งหมด 2 มาส์ค ได้แก่

1. Mask Diamond (รูปที่ 3.2)
2. Mask Au (รูปที่ 3.3)



រូបទី 3.2 Mask Diamond



រូបទី 3.3 Mask Au

3.2 กระบวนการสร้าง

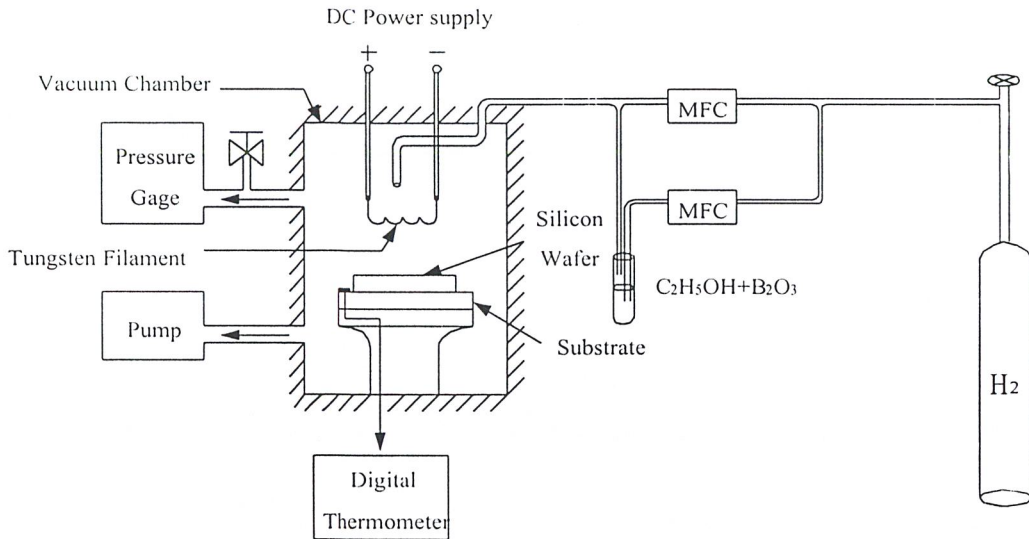
3.2.1 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชร

- เทคนิคที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร

ในการสร้างฟิล์มเพชรที่ใช้ในการทดลองนี้ เราจะใช้วิธีการ CVD (Chemical Vapor deposition) แบบความร้อน พร้อมทั้งจะทำการได้ปอะตอมสารเจือโบรอนเข้าไปในระหว่างที่สร้างฟิล์มเพชรด้วย ซึ่งกระบวนการ Chemical Vapor Deposition (CVD) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการสร้างชั้นฟิล์มบาง ของวัสดุ บนพื้นผิวของฐานรองโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี จากไอ หรือ ก๊าซ ซึ่งเป็นสารประกอบของธาตุที่ต้องการกับธาตุไฮโดรเจนหรือคลอรีน เมื่อก๊าซสารประกอบได้รับความร้อน จะเกิดการแยกตัวออก เป็นธาตุอิสระ หรือ บางทีอาจใช้ธาตุไฮโดรเจน เป็นตัวดึงคลอรีนออกจากสารประกอบ รูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพวิธีการ CVD แบบความร้อนที่ใช้ในการสร้างจริง ซึ่งประกอบด้วย Chamber ที่ใช้สำหรับควบคุมความดันอากาศ ภายใน Chamber มีหลอดทั้งสแตนเลสที่ใช้เป็นตัวให้ความร้อน โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าภายนอกให้กับไส้หลอดทั้งสแตน ส่วนฐานรองที่ใช้สำหรับวางฐานรองซิลิกอนในระหว่างที่สร้างคือ ฐานรองโมลิบดีนัม ซึ่งจะทนความร้อนได้สูงมาก วางอยู่ใต้ไส้หลอดทั้งสแตนและจะถูกยึดให้อยู่กับที่ด้วยสกรู นอกจากนี้จะมีช่องทางเข้าของก๊าซ 2 ชนิด คือ ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซไฮโดรเจนที่ผ่านเอทิลแอลกอฮอล์ และมีอะตอมสารเจือโบรอนปนอยู่ด้วย และสุดท้ายจะมีช่องทางเพื่อให้ก๊าซได้ไหลออกเพื่อควบคุมความดันให้ได้คงที่ตามที่เราต้องการ

- การเตรียมฐานรองซิลิกอน

การเตรียมฐานรองซิลิกอนเพื่อใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรนั้น มีอยู่ 2 วิธีคือ วิธีการชุบด้วยสารละลายของเอทิลแอลกอฮอล์กับผงเพชร (Diamond powder) และวิธีการฝนหรือถูด้วยครีมเพชร (Diamond paste) ซึ่งจะขอกกล่าวถึงเฉพาะวิธีหลัง เนื่องจากการทดลองนี้ใช้วิธีในการเตรียมฐานรองซิลิกอนโดยวิธีดังกล่าว เมื่อนำครีมเพชรมาฝนหรือถูกับผิวหน้าของฐานรองซิลิกอน จะทำให้ผิวหน้าของฐานรองซิลิกอนมีรอยของการขีดข่วนจากครีมเพชร มีลักษณะเป็นตาข่ายทั่วทั้งผิวหน้า รอยของการขีดข่วนจะมีขนาดเท่ากับขนาดของเม็ดเพชรที่อยู่ในครีมเพชร ซึ่งผิวหน้าที่มีรอยขีดข่วนนี้จะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของการก่อตัวเป็นฟิล์มบางของเพชร



รูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพวิธีการ CVD แบบความร้อน

- เงื่อนไขที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร

การสังเคราะห์หรือสร้างฟิล์มเพชรที่เจืออะตอมโบรอน จะใช้แหล่งจ่ายที่เป็นสารละลายของผงโบรอนไตรออกไซด์ในเอทิลแอลกอฮอล์ โดยก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวพาไอระเหยของแหล่งจ่ายมายังระบบ ไล่ไหลตลอดทั้งสแตนด์เป็นตัวให้ความร้อนทำให้พันธะของโมเลกุลก๊าซแตกตัว ทำปฏิกิริยากับฐานรองซิลิกอนที่อยู่ใต้ไหลตลอดทั้งสแตนด์ เกิดเป็นฟิล์มเพชรขึ้นมา เงื่อนไขที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรในครั้งนี้ คือ

- ก.) ใช้ครีมเพชรขนาด $3 \mu\text{m}$ ผ่นแผ่นฐานรองซิลิกอน
- ข.) เตรียมสารละลายโบรอนไตรออกไซด์ในเอทิลแอลกอฮอล์ ที่อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนมีค่า 10 ppm
- ค.) อัตราส่วนของไอระเหยของแหล่งจ่ายก๊าซไฮโดรเจน มีค่าประมาณ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
- ง.) อุณหภูมิของไล่ไหลตลอดทั้งสแตนด์ ประมาณ 2000°C และอุณหภูมิของฐานรองซิลิกอน ประมาณ $950\text{-}1100^\circ\text{C}$
- จ.) ระยะห่างระหว่างไล่ไหลตลอดทั้งสแตนด์กับฐานรองซิลิกอน ประมาณ 3.5 mm.
- ฉ.) ความกดอากาศภายใน Chamber มีค่า 150 Torr
- ช.) ระยะเวลาที่ใช้ในการสร้าง 4 ชั่วโมง

- ขั้นตอนการสร้างฟิล์มเพชร

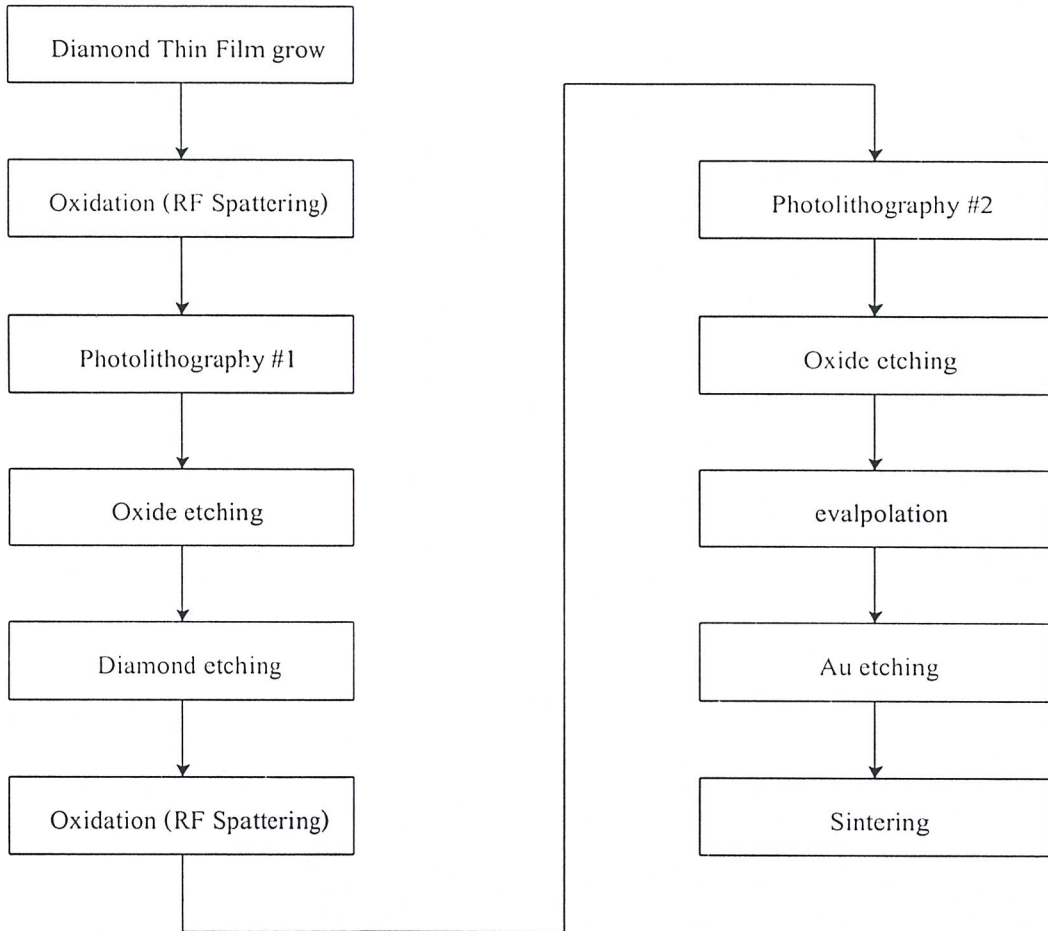
สำหรับขั้นตอนการสร้างฟิล์มเพชร สามารถอธิบายโดยคร่าว ๆ ได้ดังนี้ คือ หลังจากเตรียมฐานรองซิริคอนโดยวิธีฝนด้วยครีมเพชรเป็นเวลา 15 นาทีเรียบร้อยแล้ว นำฐานรองซิริคอนไปวางบนฐานรองโมลิบดีนัมที่อยู่ใน Chamber หลังจากนั้นปิดฝา Chamber ลงและทำการดูดอากาศภายในออกให้หมด จึงค่อยปล่อยก๊าซไฮโดรเจนที่มีอัตราการไหล 100 ccm. และไอระเหยจากเอทิลแอลกอฮอล์ที่มีอัตราการไหลเป็น 2 % ของก๊าซไฮโดรเจนออกมา เมื่อทำการควบคุมความดันภายใน Chamber ได้แล้ว คือ 150 Torr หลังจากนั้นค่อย ๆ ง่ายกระแสไบอัสให้กับไส้หลอดทั้งสแตนด์บายได้ค่ากระแสที่วัดได้มีค่า 2.6 A. เมื่อได้ค่าต่าง ๆ ตามที่ได้ตั้งไว้แล้วใช้เวลาในการสร้างทั้งหมด 4 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาต้องรอให้อุณหภูมิที่ฐานรองซิริคอนเย็นลงก่อน จึงค่อย ๆ นำฐานรองซิริคอนออกจาก Chamber โดยต้องระวังไม่ให้ถูกกับไส้หลอดทั้งสแตนด์บาย เพราะจะทำให้ไส้หลอดได้รับความเสียหายได้ หลังจากนั้นจึงนำฐานรองซิริคอนที่สร้างฟิล์มเพชรเสร็จเรียบร้อยแล้วไปสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ต่อไป



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของฟิล์มเพชรที่ได้จากกระบวนการ CVD

3.2.2 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แบบฟิล์มเพชร

เนื่องจากขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์มีมาก ในหัวข้อนี้จะกล่าวโดยคร่าว ๆ และจะมีรูปประกอบในแต่ละขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6

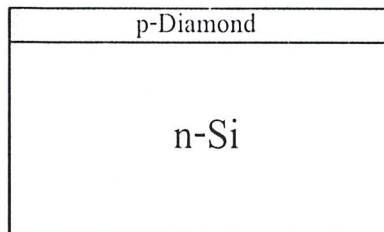


รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงกระบวนการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

ซึ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนการส้างนั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. ทำการส้างชั้นฟิล์มเพชร โดยวิธี Low-Pressure Hot filament CVD

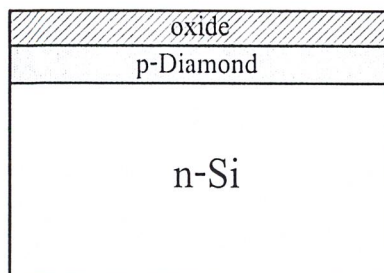
ซึ่งก่อนทำการส้างชั้นฟิล์มเพชรนั้นจะต้องทำการเตรียมฐานรองซิลิกอนก่อน โดยการนำแผ่นซิลิกอนขนาด 1.5 x 1.2 cm. ไปขัดกับครีมเพชรขนาด 3 μ m. ใช้เวลาในการขัดประมาณ 15 นาที แล้วนำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการขัดด้วยครีมเพชรแล้วไปส้างชั้นฟิล์มเพชร ส้างโดยใช้ความกดอากาศต่ำกว่าบรรยากาศ คือ 150 Torr อุณหภูมิที่ใส่หลอด 2000 °C อุณหภูมิที่ Substrate ประมาณ 950 °C-1100 °C ระยะห่างระหว่างใส่หลอดกับชิ้นงานประมาณ 3.5 mm. ใช้เวลาในการส้างประมาณ 4 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อเสร็จกระบวนการนี้แล้วจะได้ฟิล์มเพชรหนาประมาณ 5 μ m. อยู่บนฐานรองซิลิกอนแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานเมื่อชิ้นงานผ่านการส้างชั้นฟิล์มเพชรแล้ว

ขั้นตอนที่ 2. กระบวนการส้างชั้นออกไซด์ ครั้งที่ 1

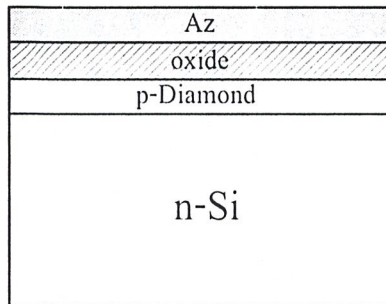
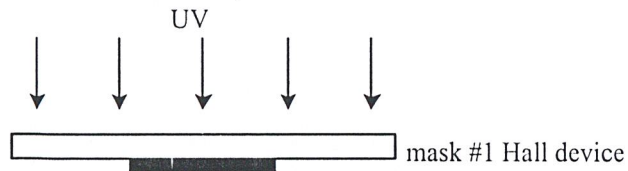
นำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการส้างชั้นฟิล์มเพชรแล้วไปทำการส้างชั้น oxide โดยวิธี RF Sputtering ที่ 200 °C และใช้เวลาในการส้าง 2.5 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ชั้นออกไซด์หนาประมาณ 2500 Å เมื่อเสร็จกระบวนการนี้ จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.8



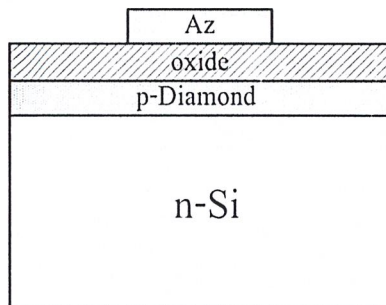
รูปที่ 3.8 แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านการส้างชั้นออกไซด์แล้ว

ขั้นตอนที่ 3. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาสก์ที่ 1 (Hall Device)

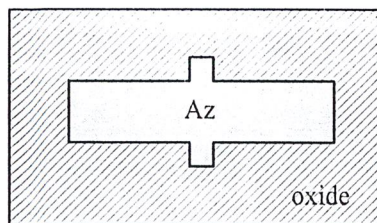
โดยนำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการสร้างชั้น oxide แล้ว ไปทำการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (Az 4620) จากนั้นนำชิ้นงานไปฉายแสง uv โดยผ่านโฟโตมาสก์ซึ่งเป็นกระจกแบบแผ่นที่ 1 และทำการ develop ก็จะได้ชั้นของ Az เป็นรูปกากบาท แสดงดังรูปที่ 3.9 (ก) (ข) และ(ค)



(ก)



(ข)

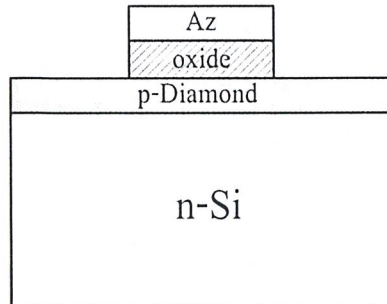


(ค)

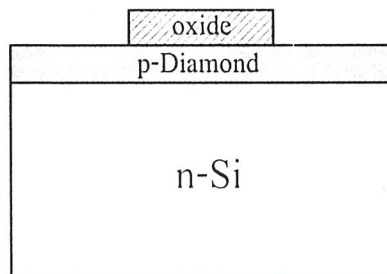
- รูปที่ 3.9 (ก) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานขณะทำการฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์ที่ 1
 (ข) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานหลังทำการฉายแสงและ develop แล้ว
 (ค) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการ โฟโตลิโทกราฟีมาสก์ที่ 1

ขั้นตอนที่ 4. oxide etching ครั้งที่ 1

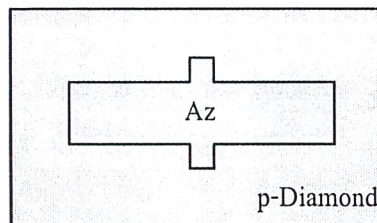
ทำการสกัดชั้น oxide ให้เป็นรูปกากบาท โดยวิธี RIE (Reactive Ion Etching) โดยมี Az เป็นหน้ากักป้องกันการกัด หลังจากนั้นทำการลอกชั้น Az ออกด้วย Aceton ก่อนนำไปสกัดชั้นฟิล์มเพชรให้เป็นรูปกากบาทด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมา โดยมีชั้น oxide เป็นหน้ากักป้องกัน



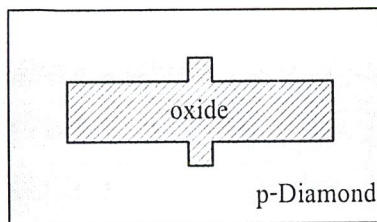
(ก)



(ข)



(ค)

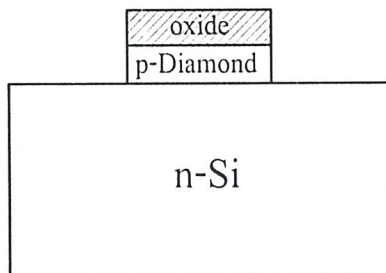


(ง)

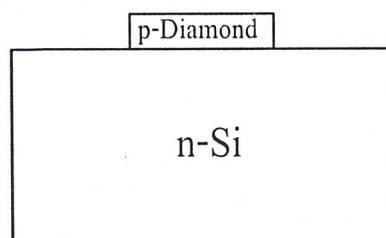
- รูปที่ 3.10 (ก) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านการสกัด oxide ครั้งที่ 1 แล้ว
 (ข) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านการลอกชั้น Az แล้ว
 (ค) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านการสกัด oxide ครั้งที่ 1 แล้ว
 (ง) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านการลอกชั้น Az แล้ว

ขั้นตอนที่ 5. Diamond Etching

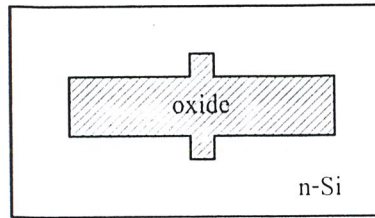
ทำการสกัดชั้นฟิล์มเพชรให้เป็นรูปกากบาทตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะใช้วิธีไมโครเวฟพลาสมา ในการกัดชั้นฟิล์มเพชรนี้จะใช้เวลาประมาณ 20 นาที และมี oxide เป็นหน้ากักป้องกันการกัด ซึ่งเมื่อเสร็จจากกระบวนการนี้แล้วจะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.11 (ก) (ข) (ค) และ(ง)



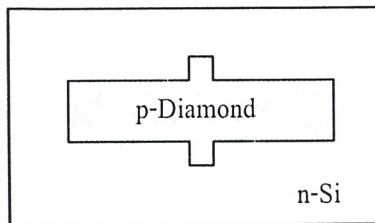
(ก)



(ข)



(ก)



(ง)

รูปที่ 3.11 (ก) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อขึ้นงานผ่านกระบวนการ Diamond etching แล้ว

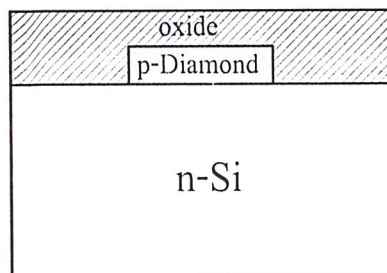
(ข) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อทำการลอกชั้น Az ออกแล้ว

(ค) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงาน เมื่อขึ้นงานผ่านกระบวนการ Diamond etching แล้ว

(ง) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงาน เมื่อทำการลอกชั้น Az ออกแล้ว

ขั้นตอนที่ 6. กระบวนการสร้างชั้น oxide ครั้งที่ 2

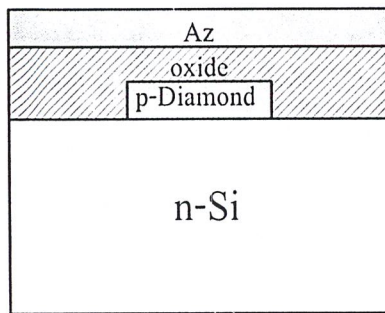
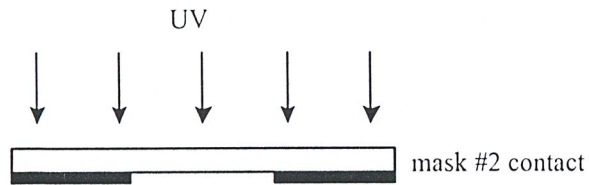
นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Diamond etching แล้วมาสร้างชั้น oxide ด้วยวิธี RF Spattering ที่ อุณหภูมิ 200 °C ใช้เวลาในการสร้าง 2.5 ชั่วโมง



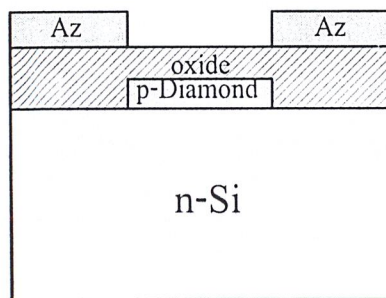
รูปที่ 3.12 แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อขึ้นงานผ่านกระบวนการสร้างชั้น oxide แล้ว

ขั้นตอนที่ 7. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาสก์ที่ 2 (Contact)

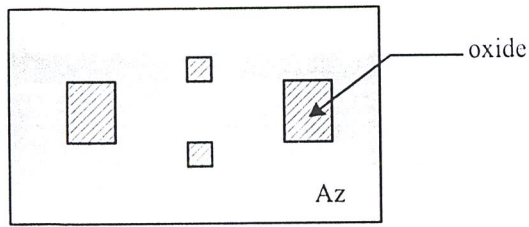
โดยการนำชั้นงานที่ผ่านการสร้างชั้น oxide แล้วไปเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก จากนั้นนำชั้นงานไปฉายแสง uv โดยผ่านโฟโตมาสก์ที่ 2 และทำการ develop ก็จะได้ชั้นของ Az ดังรูปที่ 3.13



(ก)



(ข)

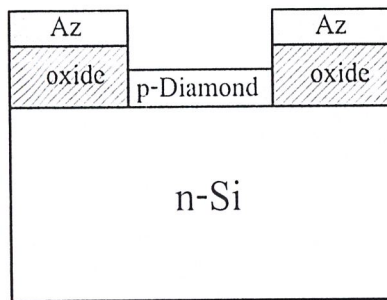


(ก)

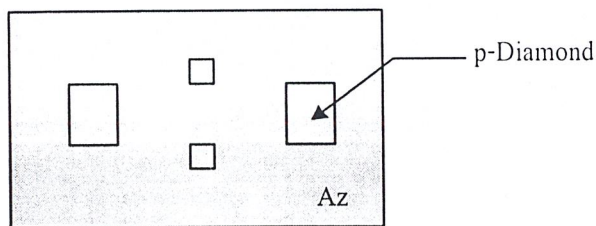
- รูปที่ 3.13 (ก) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานขณะทำการฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์ที่ 2
 (ข) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานหลังทำการฉายแสง uv และ develop แล้ว
 (ค) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงานหลังทำการฉายแสง uv และ develop แล้ว

ขั้นตอนที่ 8. Oxide etching ครั้งที่ 2

ทำการกัดชั้น oxide ออกเพื่อเปิดช่อง contact โดยใช้วิธี RIE (Reactive Ion Etching) และมี Az เป็นหน้ากักป้องกันการกัด หลังจากเสร็จขั้นตอนนี้ จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.14 (ก) และ(ข)



(ก)

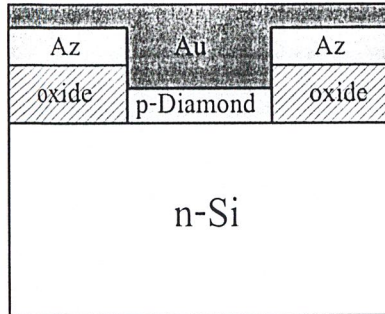


(ข)

- รูปที่ 3.14 (ก) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการ Oxide etching ครั้งที่ 2
 (ข) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการ Oxide etching ครั้งที่ 2

ขั้นตอนที่ 9. กระบวนการเคลือบชั้นทองคำ

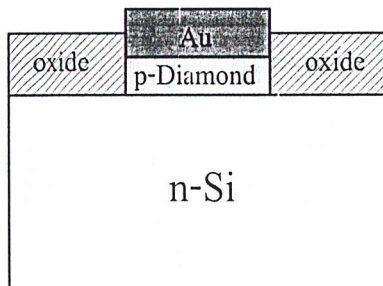
ทำการเคลือบชั้นทองคำในสุญญากาศด้วยเครื่อง evaporator ที่ความดัน 1.6×10^{-6} Torr เมื่อเสร็จขั้นตอนนี้จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.15



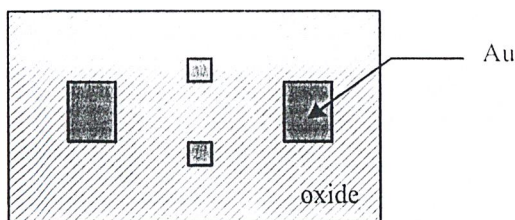
รูปที่ 3.15 แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานเมื่อชิ้นงานผ่านการเคลือบชั้นทองคำแล้ว

ขั้นตอนที่ 10. Au etching

ทำการสกัดลวดลายทองคำเพื่อใช้ทำเป็นขั้วต่อ โดยการนำชิ้นงานไปจุ่มใน Aceton เพื่อให้ Az ที่มีทองคำอยู่ด้านบน (ตรงบริเวณที่ไม่ใช่ขั้วต่อ) หลุดออกไป (วิธี lift off) ซึ่งเมื่อเสร็จจากกระบวนการนี้ จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.16 (ก) และ (ข)



(ก)



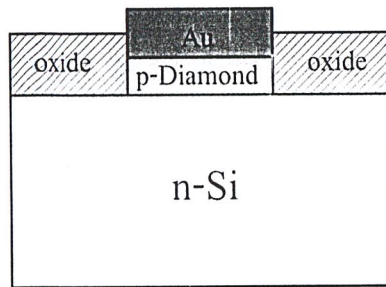
(ข)

รูปที่ 3.16 (ก) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการ Au etching แล้ว

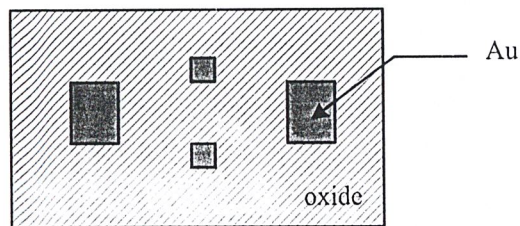
(ข) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการ Au etching แล้ว

ขั้นตอนที่ 11. Sintering

ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย โดยการนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Au etching แล้ว มาทำการ Sintering ที่ อุณหภูมิ 400 ° C จะได้ชิ้นงานสำเร็จ ดังรูปที่ 3.17 (ก) และ (ข)

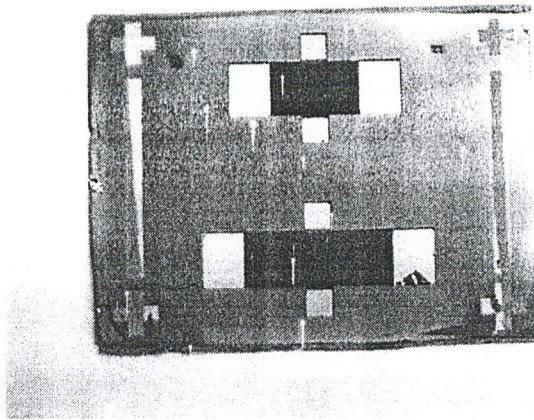


(ก)



(ข)

รูปที่ 3.17 (ก) แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานที่ได้ เมื่อเสร็จทุกขั้นตอน
(ข) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงานที่ได้ เมื่อเสร็จทุกขั้นตอน



รูปที่ 3.18 แสดงลักษณะของ Diamond Hall Devices

3.3 กระบวนการที่ใช้ในการสร้าง Diamond Hall Devices

3.3.1 กระบวนการ Chemical Vapor Deposition : CVD

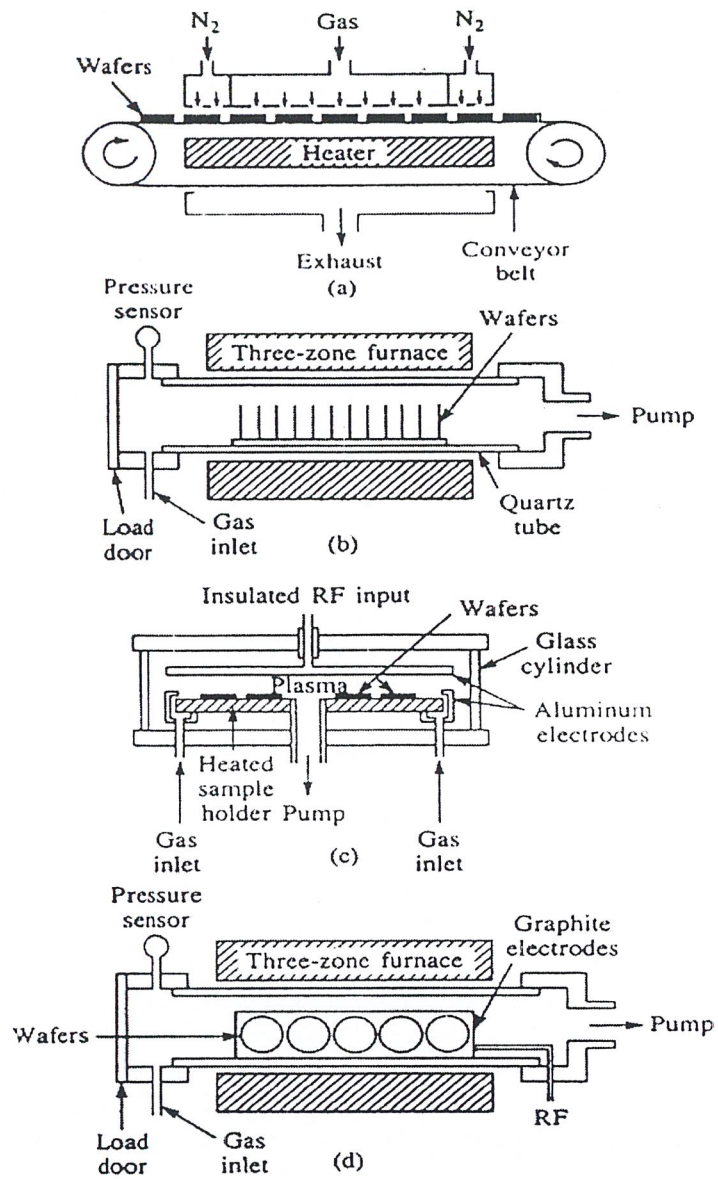
สำหรับกระบวนการ CVD นั้นมีหลายๆ รูปแบบขึ้นอยู่กับระบบของ CVD Reactor ในรูปที่ 3.19 (a) แสดง Reactor แบบ Atmospheric-pressure ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในการสร้างชั้นบาง ๆ ของ silicon dioxide ในชั้น passivation ซึ่งเป็นกระบวนการขั้นสุดท้ายในขั้นตอนการสร้างวงจรรวม

ในรูปที่ 3.19 (b) แสดง Reactor แบบ hot-wall, low pressure ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในการสร้างชั้นบาง ๆ ของ Poly-silicon, silicon dioxide และ silicon nitride ในระบบ LPCVD (low-pressure CVD) Reactor แบบนี้ฟิล์มบางที่ได้จะมีลักษณะ uniform ดีมากและสามารถสร้างได้พร้อมกันทีละหลาย ๆ แผ่น แต่ข้อเสียของระบบ hot wall คือ ฟิล์ม deposited จะถูกเคลือบพร้อม ๆ กันภายในหลอด ดังนั้นภายในหลอดต้องสะอาดหรือมีอนุภาคแปลกปลอมน้อยที่สุด แต่ถึงอย่างไรก็ตามระบบ hot-wall LPCVD ก็เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ในรูปที่ 3.19 (c) เป็นลักษณะของ plasma-enhanced CVD (PECVD) ซึ่งเป็นระบบที่ทำงานในช่วงอุณหภูมิต่ำ แผ่น wafer จะถูกวางลงบนแผ่นกรวดที่เป็นอะลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นขั้ว electrode ด้านล่างในกระบวนการสร้าง plasma เราสามารถให้ความร้อนกับแผ่น wafer ได้ที่อุณหภูมิประมาณ 400 °C โดยใช้หลอด high – intensity หรือ resistance heater ส่วนขั้ว electrode ด้านบนเป็นแผ่นอะลูมิเนียมที่วางไว้ใกล้ ๆ กับผิวหน้าของแผ่น wafer

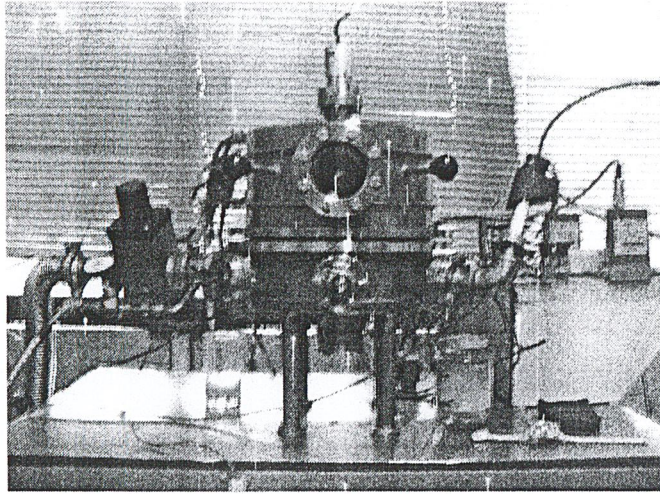
ปัญหาหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้างใน VLSI Technology คืออนุภาคของวัตถุแปลกปลอมซึ่งอาจจะหล่นลงมาจาก electrode แผ่นบน และตกลงบนแผ่น wafer ได้

ระบบ furnace-plasma ในรูปที่ 3.19(d) สามารถควบคุมจำนวนแผ่น wafer ได้พร้อม ๆ กันในเวลาเดียวกันในคราวละมาก ๆ



รูปที่ 3.19 แสดงประเภทของระบบ Chemical Vapor Deposition

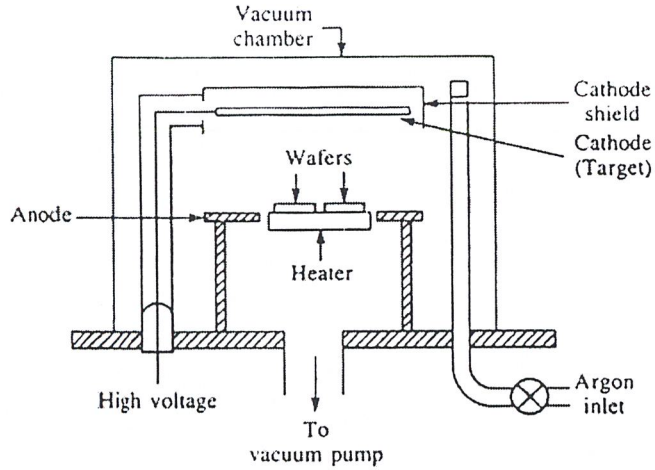
- (a) Atmospheric-pressure reactor
- (b) Hot-wall LPCVD system
- (c) Parallel-plate plasma-enhanced CVD system
- (d) PECVD system



รูปที่ 3.20 แสดงระบบ Hot Filament CVD ที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร

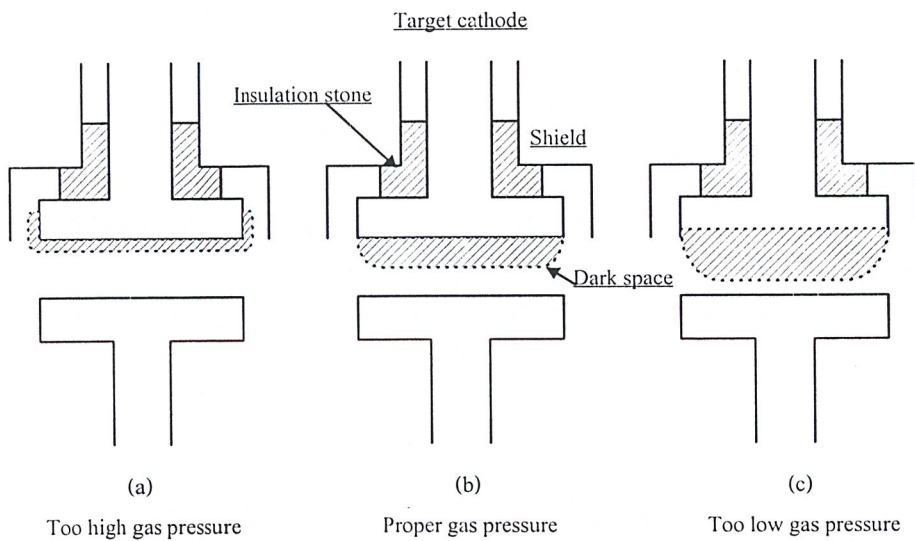
3.3.2 Sputtering Deposition

เทคนิค Sputtering เป็นการเคลือบสารในสุญญากาศวิธีหนึ่ง ที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง ในขบวนการของการสร้างวงจรรวม สำหรับสารที่นิยมใช้เคลือบได้แก่ Ti, Pt, Au, Mo, W และ SiO_2 หลักการที่ใช้ในระบบ Sputtering อาจจะเป็น DC หรือ RF discharge ในระบบไดโอด ดังแสดงระบบโครงสร้างทางฟิสิกส์ในรูปที่ 3.21 ภายใน chamber ของระบบจะเป็นบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยที่มีความดันประมาณ 8×10^{-2} mbar ซึ่ง Sputter เป็นปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ไฟฟ้าสค์ลบแรงสูงที่ขั้ว Cathode มีสารที่ใช้เคลือบติดอยู่เกิดการ Discharge ระหว่าง chamber สุญญากาศกับฐานรอง จะใช้ศักดาไฟฟ้าที่มีค่าประมาณ 2 – 4 kV การ discharge นี้จะเกิด Dark Space ที่มีระยะห่างประมาณ 10 – 50 mm จากผิวหน้าของสารที่เคลือบ ซึ่งการ Discharge จะทำให้อะตอมของ Ar แยกตัวเป็นไอออน (Ar^+) และไอออนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งในสนามไฟฟ้าไปกระทบกับเนื้อสารที่ขั้ว Cathode ทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้าของสารเคลือบจะระเหยกกลายเป็นไอและเคลื่อนที่ไปยังฐานรอง



รูปที่3.21 แสดงโครงสร้างทางฟิสิกส์ของระบบ Sputtering

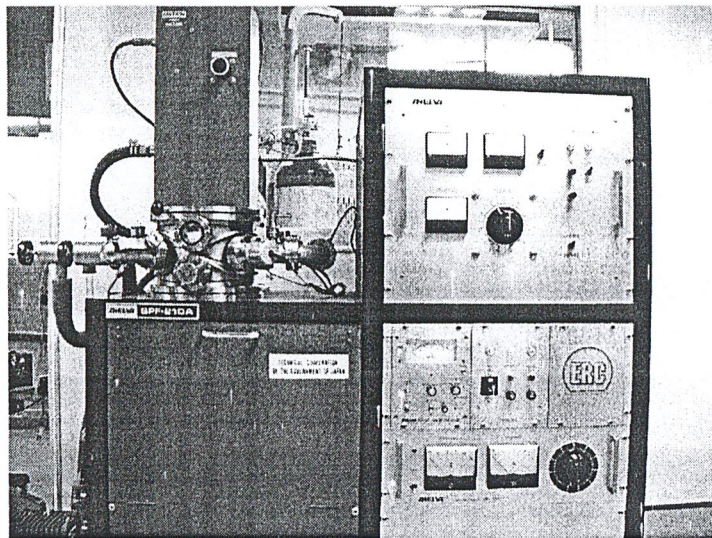
จึงทำให้เกิดฟิล์มบางที่ฐานรอง ฟิล์มที่เกิดขึ้นจะมีความหนาอย่างสม่ำเสมอ และมีสิ่งเจือปนมากเท่าไรขึ้นอยู่กับความกว้างของ dark space ดังแสดงในรูป3.22



รูปที่3.22 แสดงลักษณะของ Dark Space ที่สภาวะต่าง ๆ

เมื่อความกว้างของ Dark Space น้อยเกินไป เกิดขึ้นจากความดันของก๊าซใน chamber มีค่ามากเกินไป จะทำให้ ion ที่เกิดขึ้นกระทบด้านหลัง ด้านข้างขั้วคาโทด และของ shield ทำให้เกิดสารเจือที่ไม่ต้องการมาเคลือบบนฐานรองด้วย เมื่อ Dark space กว้างเกินไป เกิดขึ้นเนื่องจากความดัน

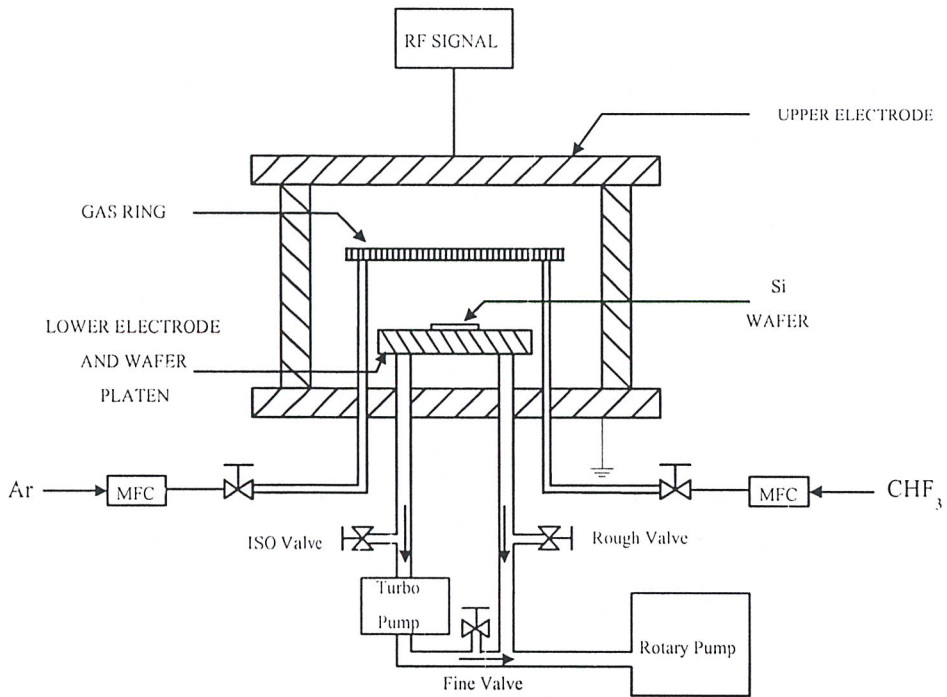
ของก๊าซใน chamber มีค่าต่ำเกินไป ปกติ Discharge ในกรณีนี้เกิดขึ้นได้ยาก และถ้าเกิดขึ้นได้ก็จะมีเสถียรภาพ ดังนั้น Discharge Sputtering จึงขึ้นอยู่กับความดันก๊าซ เนื้อสารที่ใช้เคลือบ และระยะห่างขั้วคาโทด อัตราการเคลือบสารด้วยวิธีนี้จะช้ากว่าเทคนิคอื่น ๆ แต่เหมาะสำหรับใช้ในการเคลือบสารที่มีจุดหลอมเหลวสูง และต้องการให้ชั้นสารที่เคลือบมีความบางมาก ๆ



รูปที่ 3.23 แสดงลักษณะของเครื่อง Sputter Deposition

3.3.3 Reactive-Ion Etching Technique : RIE

RIE เป็นกระบวนการที่ประกอบด้วย Plasma process และ Sputter Etching process โดยระบบ Plasma จะใช้ ionize reactive gase และ ions จะถูกเร่งให้ไปชนกับพื้นผิวของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) การสกัดที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากทั้งปฏิกิริยาทางเคมี และการถ่ายเทโมเมนตัมในอะตอมที่บริเวณพื้นผิวของ SiO_2



รูปที่ 3.24 แสดงระบบ Reactive-Ion Etching

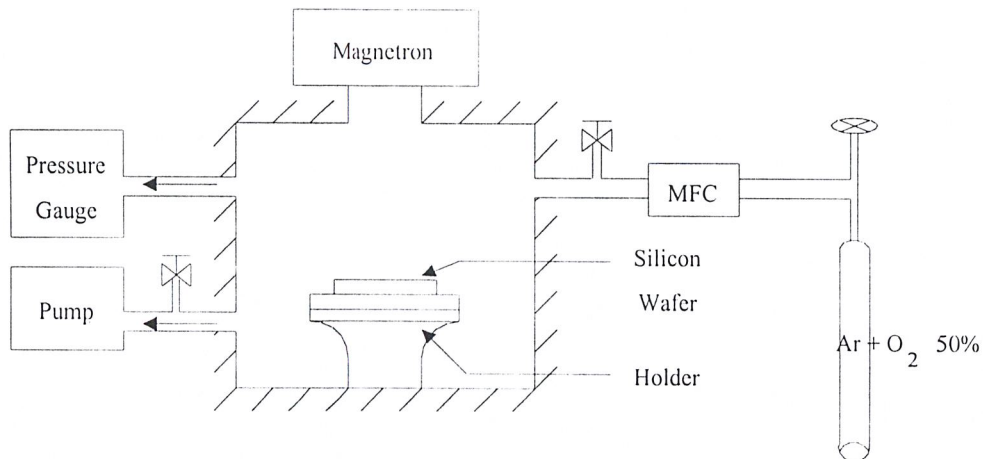
จากรูป Plasma จะอยู่ระหว่างขั้ว electrode ทั้งสองโมเลกุลของก๊าซ เช่น CHF_3 จะถูกป้อนผ่าน Gas ring ในอัตรา 6.5 sccm ด้วย MFC รวมกับ Ar ในอัตรา 8.5 sccm ด้วย MFC โดยมีความดันขณะทำงาน 200 mTorr

3.3.4 Microwave Plasma Etching Technique

Plasma etching เป็นเทคนิคที่ใช้ฝังหรือสกัดแผ่น wafer เป็นฟิล์มบางด้วย Plasma ที่เกิดจากกระบวนการกระตุ้นโดยใช้ความถี่คลื่นวิทยุ (Radio Frequency :RF) ภายในระบบที่เป็นสุญญากาศ ซึ่ง Plasma ดังกล่าว ประกอบด้วย ion ซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยที่ถูกกระตุ้นเช่น Ar^+ ร่วมกับก๊าซทำปฏิกิริยา เช่น O_2 50% ที่ใช้ในการสกัดฟิล์มบางเพชร

โดยแหล่งจ่ายที่จ่ายพลังงานให้แก่ระบบซึ่งเป็น RF นั้น ปกติในทางปฏิบัติจะมีความถี่ที่ใช้งานเท่ากับ 13.56 MHz

ในการสกัดฟิล์มบางเพชร โดยใช้ Plasma Etching นั้น ions ซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยที่ถูกกระตุ้น เช่น Ar^+ ร่วมกับก๊าซทำปฏิกิริยาจะถูกยิงไปบนพื้นผิวของฟิล์มบางเพชร และจะทำให้เกิดการชนกันของอะตอมที่บริเวณพื้นผิวของฟิล์มเพชร โดยใช้น้ำยาไวแสงเคลือบเป็นหน้ากักป้องกันการสกัด และผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีดังกล่าวนี้จะทำให้ได้ลักษณะของการสกัดเป็นแบบ Anisotropic



รูปที่ 3.25 แสดงระบบ Microwave Plasma Etching

ในรูปที่ 3.25 แสดงระบบที่ใช้งานจริง ซึ่งในการสกัดฟิล์มบางเพชรจะใช้ก๊าซผสมระหว่าง Ar และ O_2 50 % ควบคุมอัตราการไหล 50 sccm โดย Mass Flow Control : MFC ภายใต้ความดันบรรยากาศ 8.5 Torr และ RF ที่ใช้มีช่วงความถี่ 13.56 MHz , Power 800 W

บทที่ 4

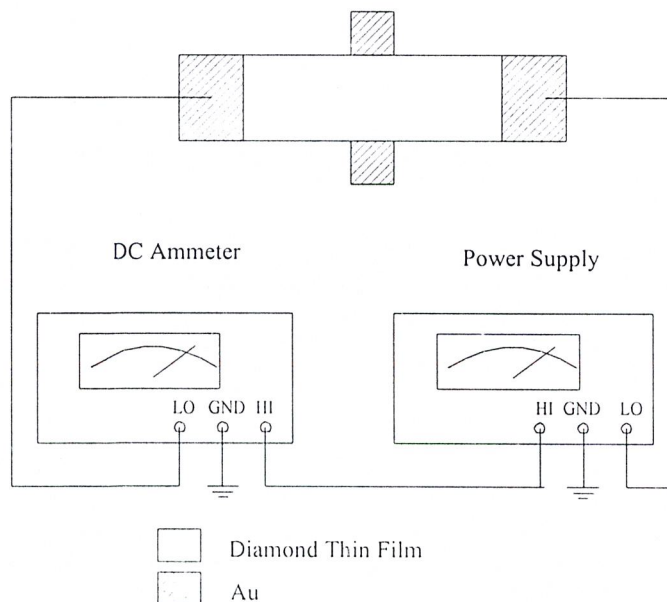
การวัดและการทดลอง

ในการใช้งานเซ็นเซอร์โดยทั่ว ๆ ไป สัญญาณรบกวนเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากสัญญาณทางด้านเอาต์พุต นั้นมีค่าน้อยมาก ทำให้เกิดการรบกวนจากสัญญาณต่าง ๆ ได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันสัญญาณรบกวนดังกล่าวทั้งที่เกิดจากตัวอุปกรณ์เอง และอาจเกิดจากเครื่องมือวัด เพื่อให้ได้ค่าถูกต้องมากที่สุด

จากการออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ให้มีขนาดกว้าง(w) ยาว(L) และหนา(d) ตามค่าในการทดลองนั้น ทำให้เราสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ parameter ที่สำคัญของฟิล์มเพชรได้ ดังนี้

4.1 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางเพชร

ซึ่งจากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของอุปกรณ์ฮอลล์

จากรูปที่ 4.1 จะได้

- กรณี $L/W = 1.5$

ที่กระแสไบอัส 1 mA ได้ค่าแรงดันฮอลล์ 41.54 V

จากสมการ

$$\rho = R \frac{A}{L} = R \frac{w \cdot d}{L}$$

และจาก $R = \frac{V}{I}$

โดยที่

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของฟิล์มเพชร

R คือ ความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) ของอุปกรณ์ฮอลล์

I คือ ค่ากระแสไบอัส (Bias current)

V คือ แรงดันฮอลล์ (Hall voltage)

A คือ พื้นที่หน้าตัด (Cross section area) ของอุปกรณ์ฮอลล์ที่กระแสไหลผ่าน

w คือ ความกว้าง (Width) ของอุปกรณ์ฮอลล์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2000 \mu\text{m}$

d คือ ความหนา (Thickness) ของอุปกรณ์ฮอลล์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $5 \mu\text{m}$

L คือ ความยาว (Length) ของอุปกรณ์ฮอลล์

จะได้

$$\rho = 13.85 \quad \Omega \cdot \text{cm}$$

- กรณี $L/W = 2.5$

ในทำนองเดียวกัน

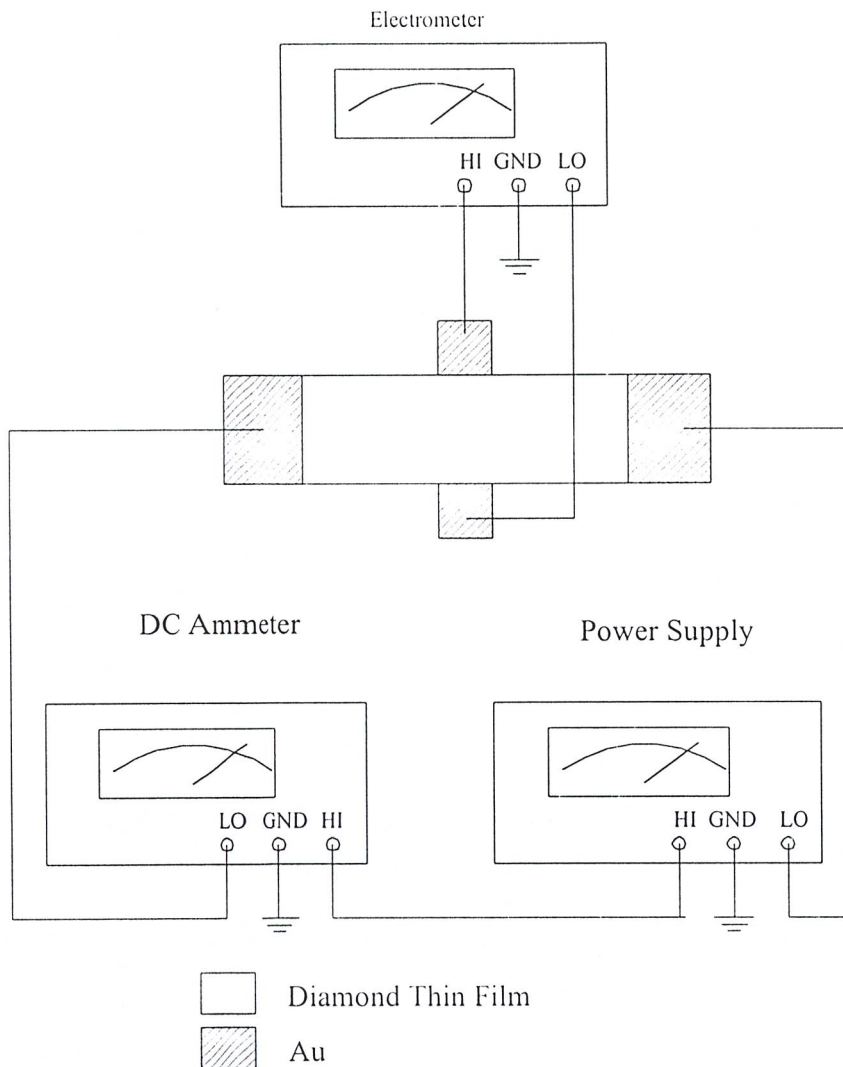
ที่กระแสไบอัส 1 mA ได้ค่าแรงดันฮอลล์ 31.48 V

จะได้

$$\rho = 6.296 \quad \Omega \cdot \text{cm}$$

4.2 ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันฮอลล์

หลังจากเตรียมเครื่องมือสำหรับการวัด ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ก็ดำเนินการวัดโดยการป้อนกระแสในช่วง 0.5 mA ถึง 2 mA ที่ค่ากระแสแตกต่างกัน ทำการจ่ายสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับกระแสในช่วง 0 – 5000 Gauss ได้ผลของแรงดันฮอลล์ ดังในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



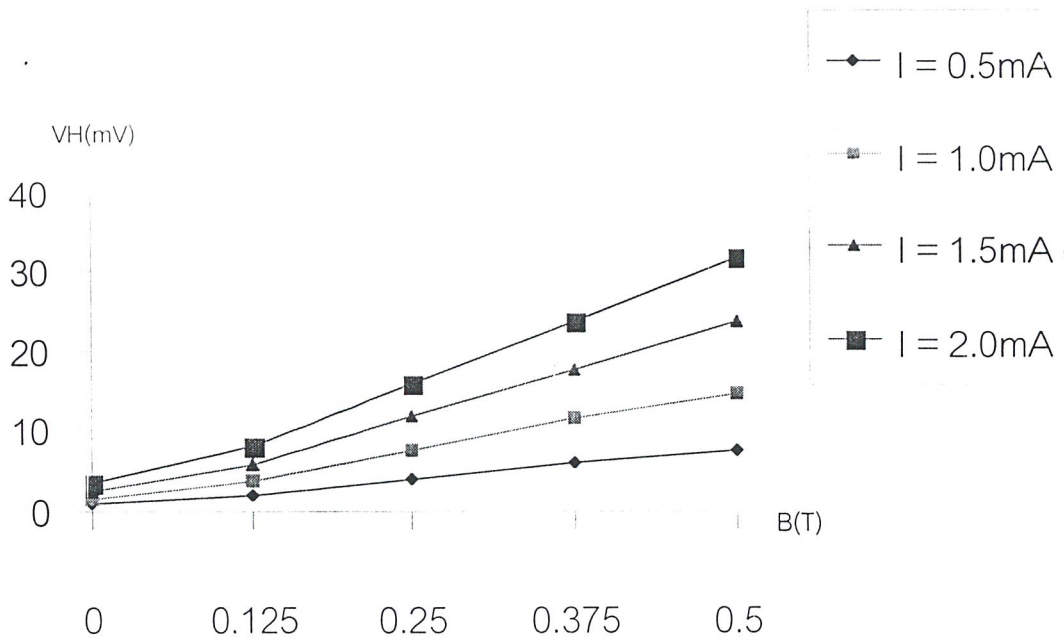
รูปที่ 4.2 แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันฮอลล์

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าแรงดันฮอลล์ของอุปกรณ์ฮอลล์ที่ $L = 3 \text{ mm}$ โดยการจ่ายกระแสและสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ

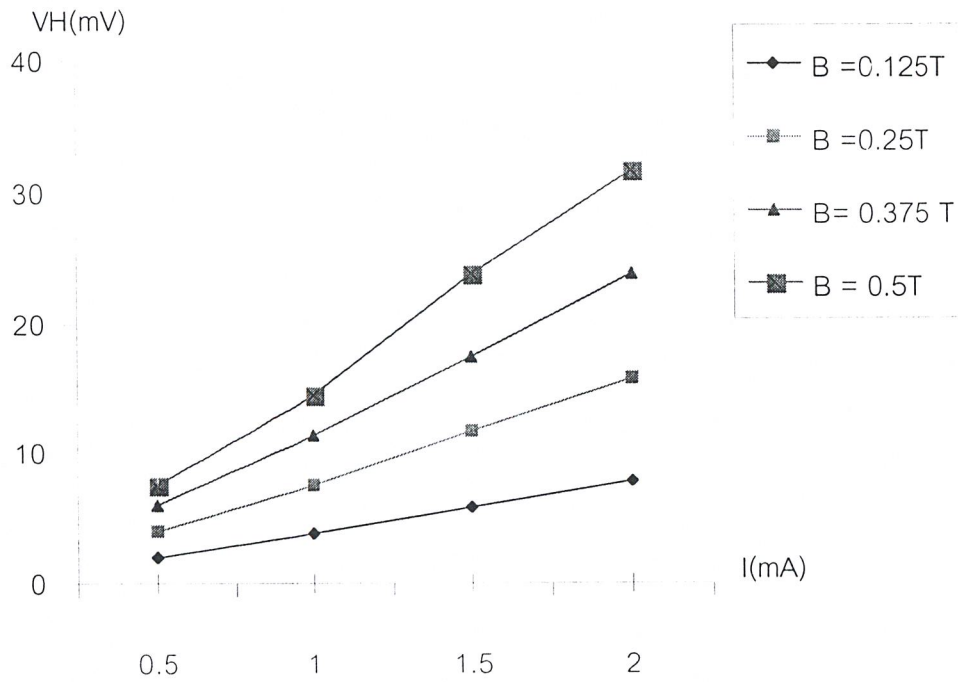
กระแส I_{bias} (mA)	สนามแม่เหล็ก $B(T)$	แรงดันฮอลล์ $V_H(mV)$
0.5	0	1.1
	0.125	2
	0.25	3.95
	0.375	5.95
	0.5	7.5
1.0	0	1.5
	0.125	3.8
	0.25	7.5
	0.375	11.5
	0.5	14.5
1.5	0	2.5
	0.125	5.8
	0.25	11.8
	0.375	17.5
	0.5	23.75
2	0	3.4
	0.125	7.95
	0.25	15.8
	0.375	23.75
	0.5	31.65

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าแรงดันฮอลล์ของอุปกรณ์ฮอลล์ที่ $L = 5 \text{ mm}$ โดยการจ่ายกระแสและสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ

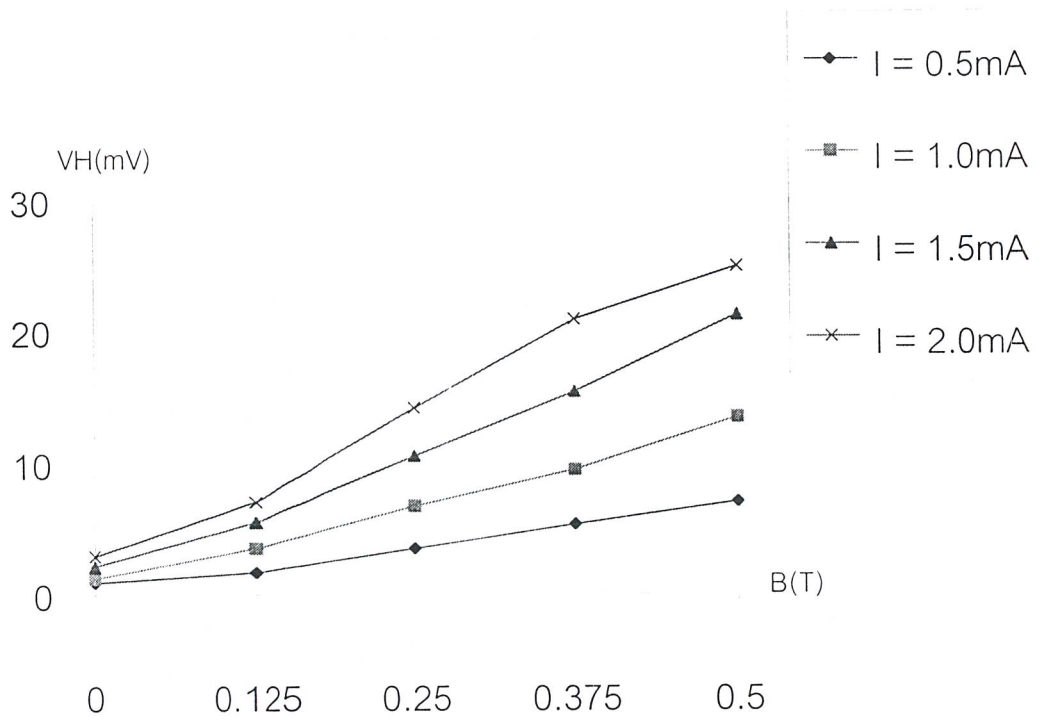
กระแส I_{bias} (mA)	สนามแม่เหล็ก B (T)	แรงดันฮอลล์ V_H (mV)
0.5	0	0.9
	0.125	1.7
	0.25	3.5
	0.375	5.3
	0.5	7
1.0	0	1.2
	0.125	3.5
	0.25	6.5
	0.375	9.5
	0.5	13.5
1.5	0	2.2
	0.125	5.5
	0.25	10.5
	0.375	15.5
	0.5	21.3
2	0	2.9
	0.125	7.0
	0.25	14.2
	0.375	21.2
	0.5	25



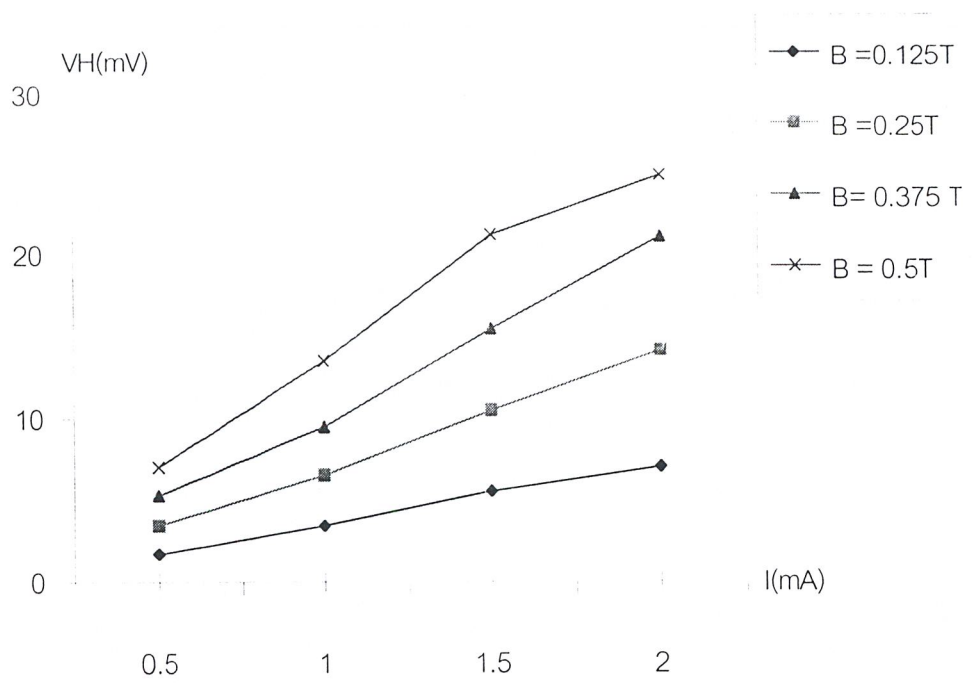
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กกับแรงดันฮอลล์
ของอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีค่า $L = 3 \text{ mm}$



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันฮอลล์
ของอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีค่า $L = 3\text{ mm}$



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กกับแรงดันฮอลล์
ของอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีค่า $L = 5 \text{ mm}$



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันฮอลล์
ของอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีค่า $L = 5\text{ mm}$

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 การหาค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือโบรอน

การหาค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือปน สามารถหาได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับข้อมูลที่มีอยู่ โดยวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นการหาค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือโบรอนโดยคำนวณจากสมการแรงดันฮอลล์

จากสมการ

$$V_H = \frac{I \cdot B_z}{p \cdot e \cdot d} \quad (5.1)$$

ดังนั้น

$$p = Na = \frac{I \cdot B_z}{V_H \cdot e \cdot d}$$

โดยที่

$p = Na$ คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือโบรอน (Impurity concentration)

I คือ ค่ากระแสไบอัส (Bias current)

B_z คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density)

V_H คือ แรงดันฮอลล์ (Hall Voltage)

e คือ ค่าประจุอิเล็กตรอนิก (Electronic charge)

d คือ ความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์ (Thickness)

- กรณี $L/W = 1.5$

$V_H = 31.65 \text{ mV}$, $I = 2 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T} = 5 \times 10^{-5} \text{ Wb/cm}^2$ และ $d = 5 \text{ } \mu\text{m}$

จะได้

$$Na = 3.94 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

- กรณี $L/W = 2.5$

$V_H = 21.3 \text{ mV}$, $I = 1.5 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T} = 5 \times 10^{-5} \text{ Wb/cm}^2$ และ $d = 5 \text{ } \mu\text{m}$

จะได้

$$Na = 4.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

5.2 การหาค่าสภาพคล่องของโฮล (μ_p)

ค่าสภาพคล่องของโฮลซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกค่าหนึ่งและสามารถหาได้จากปรากฏการณ์ของฮอลล์ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ฮอลล์

จากสมการ

$$Na = \frac{1}{\rho \cdot e \cdot \mu_p}$$

หรือ

$$\mu_p = \frac{1}{\rho \cdot e \cdot Na}$$

โดยที่

μ_p คือ สภาพคล่องของโฮล (Hole mobility)

Na คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือปน (Impurity concentration)

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของฟิล์มเพชร

e คือ ประจุอิเล็กตรอน (Electronic charge)

- กรณี $L/W = 1.5$

$$\rho = 13.85 \Omega \cdot cm, Na = 3.94 \times 10^{16} cm^{-3}$$

จะได้

$$\mu_p = 11.45 cm^2 / V.s$$

- กรณี $L/W = 2.5$

$$\rho = 6.296 \Omega \cdot cm, Na = 4.4 \times 10^{16} cm^{-3}$$

จะได้

$$\mu_p = 22.56 cm^2 / V.s$$

5.3 ค่าออฟเซ็ท (off set)

จากการทดลองอุปกรณ์ฮอลล์ทุกตัวมีค่า ออฟเซ็ทอยู่ค่าหนึ่ง และเมื่อค่ากระแสที่ป้อนให้กับขั้วเคอร์เรนคอนแทกมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าออฟเซ็ทก็จะเพิ่มขึ้นไปด้วยดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าออฟเซ็ทของอุปกรณ์ฮอลล์แต่ละตัวที่ค่ากระแสค่าต่าง ๆ

กระแสไบอัส (mA)	V_{HO} (mV) ที่ค่า L ต่าง ๆ	
	L = 3 mm	L = 5 mm
0.5	1.1	0.9
1	1.5	1.2
1.5	2.5	2.2
2	3.4	2.9

ซึ่งสาเหตุของออฟเซ็ทอาจเกิดจากความหนาของฟิล์มบางเพชร (d) ที่เราทำการสร้างขึ้นมานั้นมีความหนาไม่เท่ากัน หรืออาจเกิดจากความไม่สมมาตรของรูปร่างอุปกรณ์ฮอลล์เอง ซึ่งค่าออฟเซ็ท นั้นสามารถลดคิให้น้อยลงได้โดยการ compensate

5.4 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) คือ ผลการตอบสนองแรงดันฮอลล์ต่อสนามแม่เหล็ก ที่เป็นลักษณะเชิงเส้นจากการทดลองพบว่า อุปกรณ์ฮอลล์ที่มีค่า L = 3 mm มีความเป็น Linearity ที่การป้อนกระแส 1mA และอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีค่า L = 5 mm จะมีความเป็น Linearity ที่การป้อนกระแส 1.5 mA

5.5 ความไว (Sensitivity)

ค่า sensitivity คือ อัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตต่อสัญญาณอินพุต ซึ่งในกรณีของอุปกรณ์ฮอลล์นั้น คือ ค่าของแรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแสและสนามแม่เหล็ก ซึ่งจากการทดลองพบว่าอุปกรณ์ฮอลล์จะมีค่า sensitivity ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงค่า sensitivity ของอุปกรณ์ฮอลล์แต่ละตัว

กระแสไบอัส (mA)	S (mV/mA-T)	
	L = 3 mm	L = 5 mm
0.5	31.32	27.86
1	30.01	26.57
1.5	31.28	28.3
2	31.68	27.4

จากตารางที่ 5.2 พบว่า อุปกรณ์ฮอลล์ที่มีความยาว (L) = 3 mm จะมีค่า sensitivity สูงสุดที่การให้กระแสไบอัส 2 mA และอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีความยาว (L) = 5 mm จะมีค่า sensitivity สูงสุดที่การให้กระแสไบอัส 1.5 mA

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

หลังจากออกแบบและทำการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แบบฟิล์มเพชร บนฐานรองที่เป็นแผ่นซิลิกอน โดยการออกแบบลักษณะของอุปกรณ์ฮอลล์ให้เป็นรูปกากบาทมี parameter 2 ค่า คือขนาดความยาว (L) และความกว้าง (W) ของตัวอุปกรณ์ฮอลล์ ที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันฮอลล์ ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้ออกแบบตัวอุปกรณ์ฮอลล์ให้มีขนาด W และ L ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวอุปกรณ์ฮอลล์ที่ออกแบบไว้

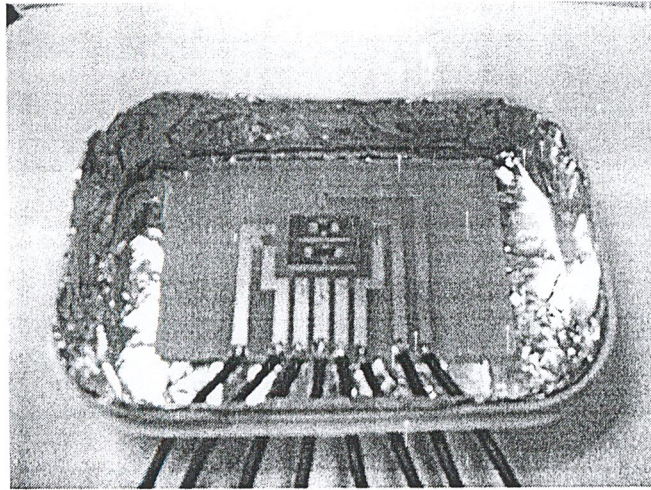
Sample Number	Thickness(d) (μm)	Width(W) (μm)	Length(L) (μm)	L/W
1	5	2000	3000	1.5
2	5	2000	5000	2.5

สำหรับการทดลองครั้งนี้ได้ทำการป้อนกระแสไบอัสค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ 0.5, 1, 1.5, และ 2 mA และป้อนสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 – 0.5 T จากนั้นทำการวัดขนาดของแรงดันฮอลล์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของกระแสไบอัสและสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองพบว่า อุปกรณ์ฮอลล์ที่มีขนาด L/W เท่ากับ 1.5 นั้น ที่ค่ากระแสไบอัสเท่ากับ 1 mA มีความเป็นเชิงเส้นที่สุด ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของเส้นกราฟที่ได้จากการทดลอง ที่ค่ากระแสไบอัส 1 mA เส้นกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเชิงเส้นมากที่สุด แต่ในขณะที่กระแสไบอัสเท่ากับ 2mA จะได้ค่า sensitivity ดีที่สุด ซึ่งเท่ากับ 31.68 mV/mA-T

ในขณะที่อุปกรณ์ฮอลล์ที่มีขนาด L/W เท่ากับ 2.5 นั้น พบว่าที่ค่ากระแสไบอัสเท่ากับ 1.5 mA เส้นกราฟที่ได้จากการทดลองจะมีความเป็นเชิงเส้นที่สุด และได้ค่า sensitivity ดีที่สุด ซึ่งเท่ากับ 28.30 mV/mA-T

ดังนั้นการทดลองทั้งหมด ถือว่าอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีอัตราส่วน L/W เท่ากับ 2.5 ถือว่าดีที่สุด เพราะมีความเป็นเชิงเส้นสูงใช้งานได้ตลอดช่วงสนามแม่เหล็ก 0 – 0.5 T และมีค่า Sensitivity เท่ากับ 28.30 mV/mA-T ซึ่งมีค่าสูงพอควรแต่มีค่าออฟเซต 2.2 mV ฉะนั้นก่อนนำไปใช้งาน จำเป็นต้องลดค่า offset ดังกล่าว ซึ่งอาจใช้วิธีการ current compensate หรือใช้การ Calibration

นอกจากนั้นแล้วจากการทดลองการวัดแรงดันฮอลล์ความยุ่งยากจะอยู่ที่การป้องกันสัญญาณรบกวน (noise) ทั้งที่เกิดจากตัวอุปกรณ์ฮอลล์เองและเกิดจากเครื่องมือและอุปกรณ์ในการวัด สำหรับการทดลองครั้งนี้ป้องกันสัญญาณรบกวนโดยการวางอุปกรณ์ฮอลล์ไว้ในกล่องที่ทำการ shield ด้วย Aluminium foil และใช้สายสัญญาณในจุดต่าง ๆ เป็นสายโคแอกเซียล



รูปที่ 6.1 แสดงลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ฮอลล์ในกล่องที่ทำการ shield ป้องกันสัญญาณรบกวน

ยิ่งไปกว่านั้นในระบบกราวด์ ต้องแน่ใจว่าจุดกราวด์ทุกจุดต้องต่อถึงกันในลักษณะที่แน่นหนา และจากอุปกรณ์ฮอลล์แบบฟิล์มเพชรที่ได้จากการสร้างพบว่า ถ้าลดความหนาของฟิล์มบางเพชรก็จะทำให้ขนาดของแรงดันฮอลล์มีค่าเพิ่มขึ้น และค่า sensitivity ก็จะมีเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งการลดความหนาของฟิล์มบางเพชร สามารถทำได้โดยการลดจำนวนชั่วโมงในการสร้างฟิล์มบางเพชรลง

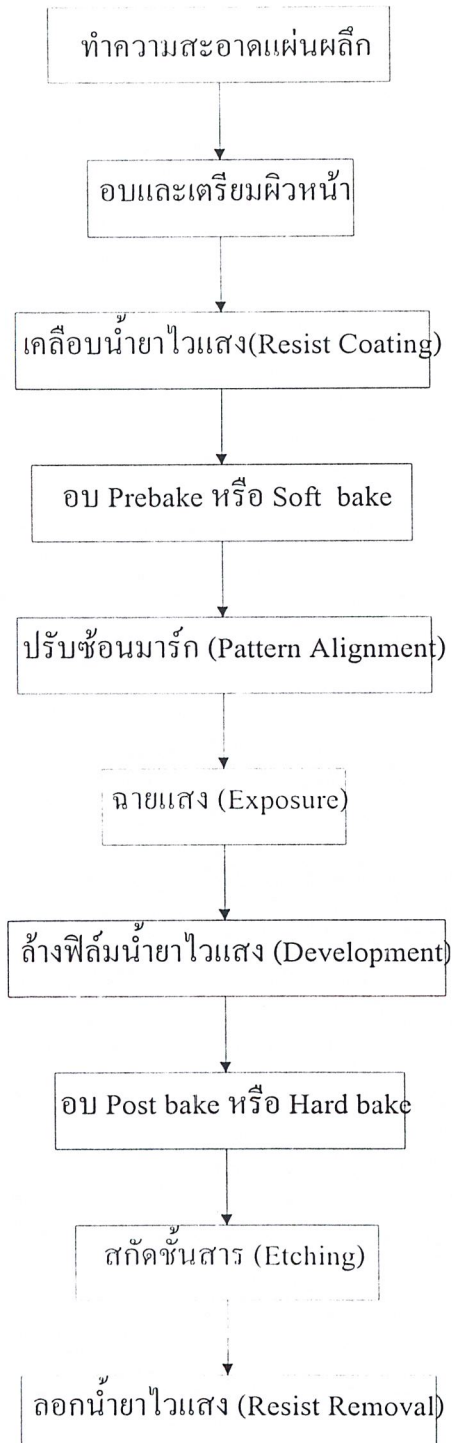
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. สัญลักษณ์	
B	สนามแม่เหล็ก(T = เทสลา)
F	แรงลอเรนท (N = นิวตัน)
I	กระแส (mA)
J_n	ความหนาแน่นกระแส (mA/cm ²)
L	ความยาวของขั้วเคอร์เรนคอนแทค (mm)
p	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือชนิดพี (cm ⁻³)
N_A	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับ (cm ⁻³)
N_D	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ (cm ⁻³)
R_H	สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (C ⁻¹ m ³)
d	ความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์ (μ m)
V_H	แรงดันฮอลล์ (mV)
W	ความกว้างของขั้วเซ็นเซอร์คอนแทค (μ m)
σ_n	ความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอน ($\Omega^{-1} cm^{-1}$)
μ_n	ความคล่องตัวของประจุพาหะอิเล็กตรอน (cm ² / V-sec)
μ_h	ความคล่องตัวของประจุพาหะโฮล (cm ² / V-sec)
θ_H	มุมฮอลล์ (องศา)
ρ	พิกัดความต้านทาน(Ω -cm)
ϵ	สนามไฟฟ้า (V/m)

ภาคผนวก ข. กระบวนการ Photolithography และกระบวนการ Evaporation

ข.1 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

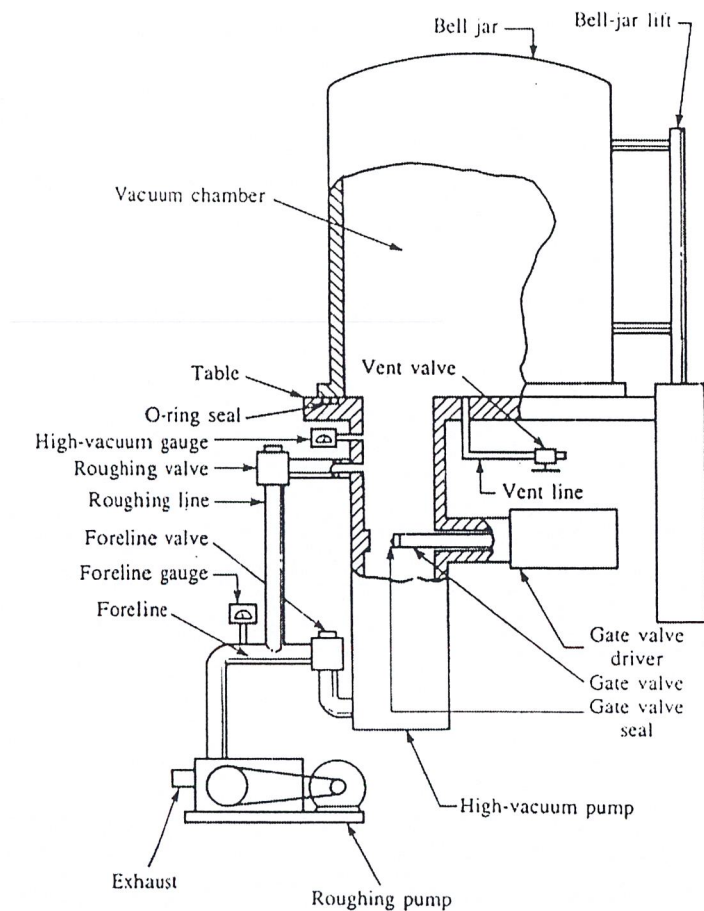
ลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้โดยทั่วไป สามารถแสดงได้ดังแผนภาพด้านล่าง



รูปที่ ข1 แสดงขั้นตอนกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้ทั่วไป

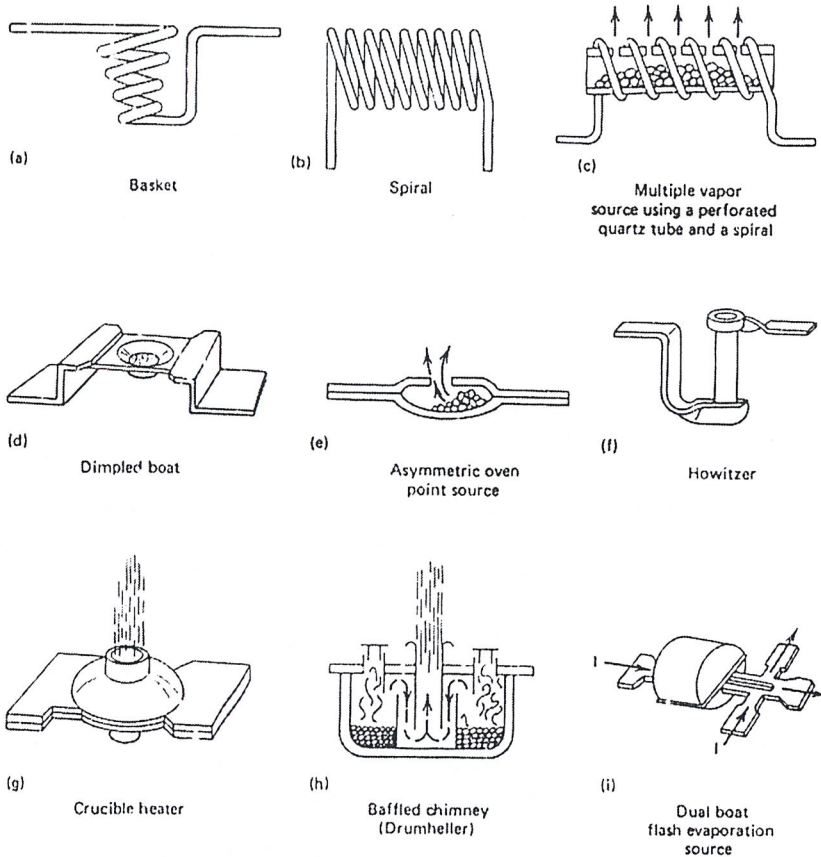
ข.2 กระบวนการ Evaporation

เป็นกระบวนการเคลือบชั้นโลหะในระบบสุญญากาศ ซึ่งแสดงดังรูปที่ ข.2. ลักษณะของ chamber ซึ่งเป็นรูปทรงระฆังคว่ำ (Bell Jar) หรืออาจใช้โครงสร้างของเหล็กสแตนเลสรูปทรงกระบอกปลายเปิดวางอยู่บนแท่นที่ seal ได้สนิท เมื่อเริ่มต้นภายใน chamber มีความดันบรรยากาศปกติ จะถูกดูดออกโดยใช้ Roughing Pump เช่น Mechanical rotary pump ซึ่ง rotary oil pump จะลดความดันใน chamber ได้ประมาณ 10^{-3} Torr โดยสามารถวัดความดันที่จุดนี้โดย Geissler's Tube จากนั้น chamber ก็จะเปิดให้ระบบ High Vacuum Pump ช่วยลดความดันต่อไปจนถึงค่าความดันประมาณ 5×10^{-7} Torr ขบวนการเคลือบสารก็สามารถดำเนินการได้ ที่ความดันต่ำจะวัดความดันโดยใช้ Ionization Gauge



รูปที่ข.2 แสดงระบบสุญญากาศที่ใช้ในกระบวนการ Evaporation

โดยเทคนิคการเคลือบชั้นโลหะด้วยการระเหยสารในสุญญากาศที่เราจะพิจารณาในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธี Filament Evaporation ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด สิ้นเปลืองน้อยไม่มีผลของการแผ่กระจายไอออกน แต่วิธีนี้จะมีข้อเสียตรงที่อายุการใช้งานของ Filament จะสั้น สำหรับการเคลือบสารทำได้โดยทำให้สารนั้นได้รับความร้อนจากไส้ filament หรือ boat ที่ทำจากสาร Tungsten หรือ Molybdenum



รูปที่ ข3 แสดงลักษณะของ Filament และ Boat ที่ใช้ในกระบวนการ Evaporation

Filament หรือ Boat นี้จะให้ความร้อนออกจากการที่มีกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน โดยในขณะที่ทำการเคลือบสารจะควบคุมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Filament หรือ Boat เพิ่มขึ้นทีละน้อย ๆ จนกระทั่งสารที่วางอยู่ที่ Filament หลอมตัวเป็นของเหลวติดอยู่กับ filament และระเหยเป็นไอพุ่งกระจาย เคลือบแผ่นผลึกที่วางใน chamber โดยวิธีนี้จะใช้กับสารที่มีธาตุต่างชนิดรวมกันอยู่ไม่ได้ เนื่องจากธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำระเหยเป็นไวก่อนธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า การเลือกใช้ filament หรือ boat ต้องพิจารณาให้มีขนาดพอเหมาะกับสารที่จะใช้ระเหย ถ้าไม่เช่นนั้นแล้วจะสิ้นเปลืองสารที่ใช้ระเหยมาก และพื้นที่ของสารเคลือบที่มีขนาดใหญ่จะทำให้สารที่เคลือบมีความหนาอย่างสม่ำเสมอมากกว่าพื้นที่ของสารที่เคลือบมีขนาดเล็ก เทคนิคการระเหยสารวิธีนี้จะใช้สะดวกกับสาร Al, Au, Ag, Pd

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อันเนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์ให้ทำการทดลองในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ขอขอบพระคุณท่าน อาจารย์เติมพงษ์ เพ็ชรกุล อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือคอยดูแลรวมทั้งให้คำปรึกษาแนะนำในสิ่งต่าง ๆ มากมายในทุก ๆ เรื่อง ขอขอบพระคุณ อาจารย์ สมศักดิ์ เชียรศิริกุล ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้ห้องวิจัยการสร้างฟิล์มบางเพชร ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโท นายเอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์ สำหรับความช่วยเหลือต่าง ๆ มากมาย ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านขอขอบคุณพี่ๆ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่ได้คำแนะนำช่วยเหลือในสิ่งต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการสร้าง การวัด ตลอดจนจัดหาเครื่องมือเครื่องใช้ในการประกอบทดลองในครั้งนี้

บรรณานุกรม

- [1] ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, “ฟิล์มสารกึ่งตัวนำ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , ตุลาคม 2542
- [2] รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิล์ม”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , สิงหาคม 2542
- [3] รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช, “เอกสารประกอบการเรียนวิชาเทคโนโลยีวงจรรวม”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
- [4] Dieter K. Schroder, “**Semiconductor Material and Device Characterization**”, John Wiley & Sons , Inc.,1990
- [5] I.Shibasaki, Y.Kanayama, T.Ito, F.Ichimari, T. Yoshida, “**High sensitive Thin Film InAs Hall Element By MBE**”, IEEE Journal of Solid-state Circuits, sc-10, 1069 – 1072 (December,1991)
- [6] Julian W. Gardner, “**Microsensors**”, McGraww-Hill Book Company,INC,1994
- [7] Richard C. Jaeger, “**Volume V Introduction to Microelectronic Fabrication**”, Addison-Wesley Publishing Company, 1989
- [8] Robert F. Davis, “**Diamond Films and Coatings**”, Noyes Publications , 1993